



วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ

ปีที่ 13 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม - ธันวาคม 2562 Vol.13 No.2 July - December 2019
Rajamangala University of Technology Krungthep Research Journal

ISSN 1906-0874

- ▶ เตาเหนี่ยวนำไฟฟ้าสองเอาต์พุตสำหรับการควบคุมกำลังด้วยการปรับแรงดันอสมมาตรแบบเฟสสมดุล
- ▶ ผลกระทบของลักษณะของแผ่นกั้นที่มีผลต่อค่าความดันลดและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในระบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเปลือกและท่อ
- ▶ ระเบียบวิธีทางคอมพิวเตอร์สำหรับการมองเห็นสิ่งของการควมเสียดทานเพิ่โดยใช้ไอโฟนซีวี
- ▶ การออกแบบและพัฒนาเครื่องต้นแบบระบบวัดทางไฟฟ้า
- ▶ พูลบริดจ์สวิตชิ่งเพาเวอร์ซัพพลายสำหรับเครื่องลดความชื้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริก
- ▶ โรงเรือนแบบไฮโดรโปนิคส์ที่มีระบบการควบคุมแบบอัตโนมัติโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์
- ▶ การคำนวณค่าความเสี่ยงและการทดสอบสภาวะวิกฤตสำหรับตึราสารหนึ่ระยะยาว
- ▶ การออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบการสึกหรอชนิดเคลื่อนที่ไปกลับ
- ▶ การเลือกเส้นทางการขนส่งสินค้าด้วยการประเมินศักยภาพลักษณะทางกายภาพและการตัดสินใจแบบเรียงลำดับความสำคัญเทียบเคียงอุดมคติ : กรณีศึกษาบริษัทผลิตสายไฟฟ้า
- ▶ การเปรียบเทียบวิธีการพยากรณ์อัตราเร็วลมที่ระดับความสูง 120 เมตร จังหวัดมุกดาหาร
- ▶ การพยากรณ์ปริมาณการส่งออกปลาหมึกและผลิตภัณฑ์
- ▶ การเปรียบเทียบวิธีการหาค่าเหมาะที่สุด ด้วยโซลเวอร์ของโปรแกรมโมโครซอฟท์เอกเซลส์ 2007 และ 2019
- ▶ ผลของภาษาะบรรจุต่อคุณภาพของนมผงเคี้ยวจากข้าวหอมนิล
- ▶ Synthesis, Characterization and Antimicrobial Activity of Organometallic Ru(II) Complex Containing Phenylthiourea Ligand
- ▶ ความเข้มข้นและอัตราการปลดปล่อยแก๊สเรดอนจากตัวอย่างหินที่ใช้ในการก่อสร้างบริเวณทางตอนเหนือของจังหวัดยะลา

ISSN 2651-2130 (Online)

วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ
UTK RESEARCH JOURNAL



วารสารวิจัย

มทร.กรุงเทพ

วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

Rajamangala University of Technology Krungthep Research Journal

ปีที่ 13 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม 2562 Vol 13 No.2 July – December 2019

เจ้าของ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ที่ปรึกษากองบรรณาธิการ

ดร.สุกิจ นิตินัย	อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ศาสตราจารย์ ดร.ปิยะสาร ประเสริฐธรรม	กรรมการสภาวิชาการมหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์สมชาย วงศ์วิเศษ	กรรมการสภามหาวิทยาลัย
ดร.สิริเบญจา กอวัฒนา	กรรมการสภามหาวิทยาลัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์อภรณ์ บางเจริญพรพงศ์	รองอธิการบดี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์นพรัตน์ ภัยวิมุตติ	ผู้ช่วยอธิการบดี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สายชล ชุตติเจื้อจัน	ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา
นางสาวรุ่งทิพา วงศ์ไพศาลฤทธิ์	รองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา

บรรณาธิการ

ดร.สุธรรม ศิวาวุธ	รองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา
-------------------	-----------------------------------

ผู้ช่วยบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กนกวรรณ จ้าวสุวรรณ	ผู้ช่วยผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา
ดร.กฤษณ์ สงวนพวง	ผู้ช่วยผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์ จันทน์ไทย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์กิตติคุณ ดร.อัฉรา จันทน์ฉาย	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ ดร.นเรศเรษฐ พัฒนเดช	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.บวรโชค ผู้พัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.วราภรณ์ ศรีวงศ์ชล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ชนิษฐา เจริญลาภ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
รองศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภาก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พิชัย จันทน์มณี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประยูร สุรินทร์	สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุราษฎร์ พรหมจันทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กมล จิรเสรีอมรกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.นัฐโชติ รักไทยเจริญชีพ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. คมกริช ละวรรณวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรพล จิรจรีต
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สรนาถ ไกรภู
ดร.ประกอบ ชาตฤกษ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
มหาวิทยาลัยมหิดล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

เจ้าหน้าที่ประจำวารสาร

นางสาวเกตุดี อุเทน
นางนาฏนภา จรัส
นางสาวขวัญใจ ยุกติรัตน์
นางสาวศิริพร ช้างอยู่
นายวีระวัฒน์ ราษฎร์สภา
นายวันนิวัติ วันทนา

นางวิไรรัตน์ ราษฎร์สภา
นางจันทนา สังข์อู่
นางสาวกนกวรรณ วอนเพียร
นางสาวอัจฉรา จินดาจ้านง
นางสาววันทนา ประณีธานธรรม

บทความที่ลงตีพิมพ์ในวารสารเป็นความคิดเห็นของผู้เขียน กองบรรณาธิการไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป

ความเป็นมา

วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ISSN 1906 - 0874 เป็นวารสารวิชาการของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ โดยสถาบันวิจัยและพัฒนา ได้มีการจัดทำวารสารอย่างต่อเนื่องตั้งแต่พ.ศ. 2550 จนถึงปัจจุบัน ซึ่งเป็นวารสารที่อยู่ในฐานข้อมูลของศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารไทย (TCI) กลุ่มที่ 1 ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยเผยแพร่เป็นราย 6 เดือน ซึ่งตีพิมพ์ปีละ 2 ฉบับ (ฉบับละ 15-20 บทความ) และมีการดำเนินงาน จัดพิมพ์บทความประเภทต่าง ๆ ได้แก่ บทความวิจัย (Research paper) และ บทความวิชาการ (Academic paper)

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ เป็นบทความที่สร้างองค์ความรู้ และมีคุณภาพในทางวิชาการสามารถนำไปใช้ประโยชน์เพื่อการอ้างอิงได้ เพราะผ่านการพิจารณาถ่วงถ่วงและประเมินคุณภาพจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง อย่างน้อย 2 ท่าน ซึ่งเป็นการประเมินแบบไม่แสดงชื่อผู้แต่งและผู้ประเมิน (Double blinded) ก่อนที่จะเผยแพร่สู่สาธารณะชน จึงทำให้วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ เป็นวารสารวิชาการที่มีคุณภาพ

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

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเผยแพร่บทความวิจัย (Research paper) และบทความวิชาการ (Academic paper) ที่มีคุณภาพของอาจารย์นักวิจัย นักวิชาการทั้งภายในและภายนอกมหาวิทยาลัย ในสาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ได้แก่ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ และสาขาอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง และสาขาต่าง ๆ ที่มีการบูรณาการข้ามศาสตร์ที่เกี่ยวข้องวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเพื่อให้เกิดองค์ความรู้ใหม่ที่ทันสมัย
2. เพื่อส่งเสริมและเป็นกลไกการขับเคลื่อนงานวิจัย ทำให้เกิดผลงานวิจัยที่เข้าไปสู่การพัฒนาต่อภาคสังคม ชุมชน และนำไปประยุกต์ใช้ในการเรียนการสอนเพื่อต่อยอด และเกิดความเชื่อมโยงระหว่างงานวิจัยงานวิชาการ ซึ่งนำมาสู่การเกิดประโยชน์ต่อมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ และตอบสนองต่อการพัฒนาเทคโนโลยีของประเทศไทย

นโยบายการรับบทความ

กองบรรณาธิการวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ มีความยินดีที่จะรับบทความจากอาจารย์ นักวิจัย นักวิชาการทั้งภายในและภายนอกมหาวิทยาลัย ในสาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ได้แก่ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ และสาขาอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง รวมถึงสาขาต่าง ๆ ที่มีการบูรณาการข้ามศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่เขียนเป็นภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษ ซึ่งผลงานวิชาการที่ส่งมาขอตีพิมพ์ต้องไม่เคยเผยแพร่ในสิ่งพิมพ์อื่นใดมาก่อน และต้องไม่อยู่ในระหว่างการพิจารณาของวารสารอื่น

การละเมิดลิขสิทธิ์ถือเป็นความรับผิดชอบของผู้ส่งบทความโดยตรง บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ต้องผ่านการพิจารณาจากคณะกรรมการจากผู้ทรงคุณวุฒิ และได้รับความเห็นชอบจากกองบรรณาธิการ

ข้อความที่ปรากฏอยู่ในแต่ละบทความที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการเล่มนี้ เป็นความคิดเห็นส่วนตัวของผู้เขียนแต่ละท่าน ไม่เกี่ยวข้องกับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพแต่อย่างใด ความรับผิดชอบด้านเนื้อหา และการตรวจร่างบทความแต่ละบทความเป็นของผู้เขียนแต่ละท่าน หากมีความผิดพลาดใด ๆ ผู้เขียนแต่ละท่านจะต้องรับผิดชอบต่อบทความของตนเองแต่ผู้เดียว

กองบรรณาธิการขอสงวนสิทธิ์ให้นำเนื้อหา 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 1177 โทรสาร 0 2287 9684
E-mail: utk_research_journal@mail.rmutk.ac.th
www.rdi.rmutk.ac.th

กำหนดการเผยแพร่

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

การเผยแพร่

มอบให้สถาบันการศึกษาต่าง ๆ ทั่วประเทศไทย และ
<https://www.tci-thaijo.org/index.php/rmutk>

สถานที่ออกแบบและจัดพิมพ์ ห้างหุ้นส่วนจำกัดศรีสมบูรณ์คอมพิวเตอร์การพิมพ์
95/84 ถนนสุขสวัสดิ์ ตำบลในคลองบางปลากด อำเภอพระสมุทรเจดีย์
จังหวัดสมุทรปราการ 10290
โทร. 02 816 2221, 089 519 2093
E – mail: sbpprinting@gmail.com

สารบัญ

หน้า

เตาเหนี่ยวนำไฟฟ้าสองเอาต์พุตสำหรับการควบคุมกำลังด้วยการปรับแรงดันอสมมาตรแบบเฟสสมดุล Two Output Power Control of Induction Cooker with Full Bridge Inverter Controlled by Asymmetrical Voltage Control.....	1
บุญทัน ศรีบุญเรือง	
ผลกระทบของลักษณะของแผ่นกั้นที่มีผลต่อค่าความดันลดและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในระบบ เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเปลือกและท่อ The effect of baffles types on pressure drop and the overall heat transfer coefficient inside a shell and tube heat exchanger.....	13
ณัฐดนัย พรณูเจริญวงศ์, ณัฐภา กัลยาประสิทธิ์, พลเทพ เวงสูงเนิน, ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช	
ระเบียบวิธีทางคอมพิวเตอร์สำหรับการมองเห็นสีของการคั่วเมล็ดกาแฟโดยใช้โอเพนซีวี Computational Method for Color Vision of Coffee Bean Roasting Using OpenCV.....	25
ชัยณรงค์ วิเศษศักดิ์วิชัย, ประเสริฐ เผ่าชู, เอกพล อนุสุเรนทร์, ชุตัญญ์ กมลขันติธร, วินัย เมธาวิติต	
การออกแบบและพัฒนาเครื่องต้นแบบระบบวัดทางไฟฟ้า Design and development of an electrical measuring system prototype.....	39
กัลยา ธนาสินธ์	
ฟูลบริดจ์สวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายสำหรับเครื่องลดความชื้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริก Full Bridge Switching Power Supply for a Thermoelectric Dehumidifier.....	54
เจนศักดิ์ เอกบุณยะวัฒน์	
โรงเรือนแบบไฮโดรโปนิคส์ที่มีระบบการควบคุมแบบอัตโนมัติโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ Hydroponics house with automatic control system using solar energy.....	65
ขจรศักดิ์ พงศ์ธนา, ชัยวัฒน์ สากุล	
การคำนวณค่าความเสี่ยงและการทดสอบสภาวะวิกฤตสำหรับตราสารหนี้ระยะยาว An Approach Calculate Value at Risk and Stress Test for Long Term Bond.....	78
วิภาดา สุภาสนันท์, สัจจา ดวงชัยอยู่สุข	
การออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบการสึกหรอนชนิดเคลื่อนที่ไปกลับ Designs and fabrication reciprocating wear testing machine.....	89
นราธิป ภาวารี, ฌักพร อินทนนท์, สุภลักษณ์ ศรีน้อย	

การเลือกเส้นทางการขนส่งสินค้าด้วยการประเมินศักยภาพลักษณะทางกายภาพและการตัดสินใจแบบ
เรียงลำดับความสำคัญเทียบเคียงจุดมคติ: กรณีศึกษาบริษัทผลิตสายไฟฟ้า

A Selection of Transportation Routes with Physical Characteristics Potential Assessment
and TOPSIS: A Case Study of Electrical Wire Manufacturer.....99

นิธิเดช คูหาทองสัมฤทธิ์, วาสนา จันทร์ขำ

การเปรียบเทียบวิธีการพยากรณ์อัตราเร็วลมที่ระดับความสูง 120 เมตร จังหวัดมุกดาหาร

A Comparison of Forecasting Methods for Wind Speed at an Altitude of 120 Meters
in Mukdahan Province.....115

วรางคณา เรียนสุทธิ, จอมภพ แวค์ศักดิ์

การพยากรณ์ปริมาณการส่งออกปลาหมึกและผลิตภัณฑ์

Forecasting the Export Quantity of Squid and Products.....131

วรางคณา เรียนสุทธิ

การเปรียบเทียบวิธีการหาค่าเหมาะที่สุด ด้วยโซลเวอร์ของโปรแกรมไมโครซอฟท์เอกเซลล์ 2007
และ 2019

Comparing Methods of Optimization in Solver of Microsoft Excel 2007 and 2019.....144

วฐา มินเสน, ปรรธนา มินเสน

ผลของภาชนะบรรจุต่อคุณภาพของขนมขบเคี้ยวจากข้าวหอมนิล

Effect of package on Hom Nil Rice Snack Qualities.....162

อาภัสรา แสงนาค, กุลยา ลิ้มรุ่งเรืองรัตน์, วิษณีย์ ยืนยงพุทธกาล, อัญชลี เรืองเดช,
อุบลรัตน์ สิริภัทรวรรณ

Synthesis, Characterization and Antimicrobial Activity of Organometallic Ru(II) Complex

Containing Phenylthiourea Ligand.....170

Rachna Neang, Parichad Chuklin, Saowanit Saithong, Sauwalak Phongpaichit,
Luksamee Vittaya, Nararak Leesakul

ความเข้มข้นและอัตราการปลดปล่อยแก๊สเรดอนจากตัวอย่างหินที่ใช้ในการก่อสร้างบริเวณทางตอนเหนือของ
จังหวัดยะลา

Radon Concentration and Radon Exhalation Rate from Rock Samples Used for Construction
at Northern Part of Yala Province.....187

พวงทิพย์ แก้วทับทิม, พชรารัฐ โสลา, ทิพวรรณ คงภักดี

เตาเหนี่ยวนำไฟฟ้าสองเอาต์พุตสำหรับการควบคุมกำลังด้วยการปรับแรงดันอสมมาตร
แบบเฟสสมดุล

Two output power control of induction cooker with full bridge inverter
controlled by asymmetrical voltage control

บุญตัน ศรีบุญเรือง

Boontan Sriboonreung

สาขาครุศาสตร์ไฟฟ้า คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Thanyaburi University

Corresponding author. E-mail: boontan_123@outlook.co.th

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอเตาเหนี่ยวนำไฟฟ้าสองเอาต์พุตที่ปรับกำลังเอาต์พุตแยกอิสระด้วยวงจรเต็มบริดจ์ที่ควบคุมด้วยการปรับแรงดันอสมมาตรแบบเฟสสมดุลด้วยไอซี dsPIC30F2020 ขนาดกำลังรวม 1.5 กิโลวัตต์ทำงานที่ความถี่ 35-40 กิโลเฮิร์ตซ์ รับไฟฟ้ากระแสสลับแบบ 1 เฟส 220 โวลต์ สามารถปรับกำลังและความร้อนที่ใช้ในการปรุงอาหารให้เป็นอิสระจากกันโดยมีสวิตช์ไอจีบีทีสร้างสัญญาณความถี่สูง และขดลวดเหนี่ยวนำให้ความร้อน โดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กกระหว่างเตาแม่เหล็กไฟฟ้า สามารถแสดงการปรับค่าระดับความร้อนของชุดเตาเหนี่ยวนำไฟฟ้าแบบสองเอาต์พุตได้ห้าระดับควบคุมด้วยการปรับแรงดันอสมมาตรแบบเฟสสมดุลเพื่อแบ่งกระแสไหลผ่านสวิตช์หลัก 2 ตัว ให้ใกล้เคียงกันซึ่งเพิ่มประสิทธิภาพได้ถึง 8 % และแบ่งกระแสได้ต่างกันไม่เกิน 20% ขึ้นกับการใช้งาน

คำสำคัญ: เตาเหนี่ยวนำไฟฟ้าสองเอาต์พุต การปรับแรงดันอสมมาตรแบบสมดุล ขดลวดเหนี่ยวนำ

ABSTRACT

This paper presents the two independent power induction furnaces that independently adjust the output power of the full bridge circuit, controlled by asymmetrical voltage cancellation and phase balance control with dsPIC30F2020 IC, total power 1.5 kW. AC 220 V single phase power can adjust the power and heat used to cook food independent of each other that can adjust the power and heat used to cook independently of each other with the IGBT switch generates high-frequency signals and heat-induced coils. Use the induction principle of the magnetic field between the induction cooker can adjust the heat level output has five levels controlled by adjusting the asymmetrical phase balance voltage to divide the current

Received 22-09-2018
Revised 03-04-2019
Accepted 08-05-2019

flowing closely through two main switches, which increases efficiency around 8 percentage and it can divide up to 20% difference depending on usage.

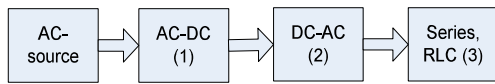
Keyword: Two induction cookers, Asymmetrical voltage and phase balance control, Induction coil

1. บทนำ

ปัจจุบันงานประยุกต์ใช้อิเล็กทรอนิกส์กำลังได้เข้ามามีบทบาทในงานอุตสาหกรรมงานเกษตร เช่น งานขับเคลื่อนมอเตอร์ ระบบจ่ายไฟสำรองและเครื่องหลอมโลหะ เป็นต้น นอกจากนี้ยังได้ประยุกต์ใช้ในเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้านเช่นเตาหุงต้มแบบเหนี่ยวนำ ความร้อน อุปกรณ์สวิตซ์ที่ทำหน้าที่ส่งจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับภาระโหลด เช่น มอสเฟต (MOSFET) หรือ ไอจีบีที (IGBT) เป็นต้น ในส่วนโหลดของเตาหุงต้มส่วนใหญ่จะเป็นขดลวดที่มีค่าความต้านทานและค่าความเหนี่ยวนำที่ต่ออนุกรมกับตัวเก็บประจุความถี่สูง การให้ความร้อนทำได้โดยใช้อินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่จ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับขดลวดเพื่อเหนี่ยวนำความร้อนไปยังภาชนะที่มีสารความเป็นแม่เหล็ก [1,2] โครงสร้างโดยรวมของอินเวอร์เตอร์แสดงดังภาพที่ 1 ประกอบด้วย ส่วนที่แรกคือเรกติฟายทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรง ส่วนที่สองส่วนของอินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่เปลี่ยนแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ โดยการทำงานของสวิตซ์กำลัง ส่วนที่3 โหลดอนุกรมเรโซแนนซ์ ชนิดของอินเวอร์เตอร์ที่ใช้ในเตาหุงต้มไฟฟ้า เช่น วงจรคลาสอี ที่ใช้สวิตซ์กำลังเพียงหนึ่งตัว ทำหน้าที่ส่งจ่ายกำลังไฟฟ้า [1] ซึ่งวงจรชนิดนี้จะทำให้เกิดแรงดันสูงตกคร่อมสวิตซ์และในกรณีวงจรทำงานต่อเนื่องเป็นเวลานาน ๆ อาจจะทำให้สวิตซ์กำลังเกิดความร้อนและเกิดเสียหายได้ อินเวอร์เตอร์แบบกึ่งบริดจ์ประกอบด้วยสวิตซ์กำลังสองตัวแต่ละตัวจะจ่ายกำลังไฟฟ้านาตรงกลาง [2] และสำหรับงานให้ความ

ร้อนแบบเหนี่ยวนำที่ต้องการกำลังที่สูงขึ้น อินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์จะถูกนำมาใช้งาน ซึ่งวงจรจะประกอบด้วยสวิตซ์กำลังสี่ตัวดังภาพที่ 3 อินเวอร์เตอร์ชนิดนี้จะจ่ายกำลังมากกว่าสองชนิดที่กล่าวมา ซึ่งเหมาะกับโหลดที่ต้องการกำลังมาก วิธีการควบคุมอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์ต้องการที่จะปรับกำลังไฟฟ้าด้านออกของอินเวอร์เตอร์สามารถทำได้โดยการควบคุมสัญญาณขับนำสวิตซ์อิเล็กทรอนิกส์กำลัง เช่น การเลื่อนเฟส (Phase-shift control, PS) [3] การปรับความกว้างของพัลส์ (Asymmetrical duty cycle control, ADC) [4] และการควบคุมแรงดันแบบไม่สมมาตร (Asymmetrical voltage-cancellation control, AVC) [5] การควบคุมแต่ละวิธีที่กล่าวมาจะต้องให้ความถี่สวิตซ์มากกว่าความถี่เรโซแนนซ์ของภาระโหลด เพื่อให้สวิตซ์นำกระแสที่แรงดันเป็นศูนย์ [6-9] ประโยชน์คือลดกำลังสูญเสียที่สวิตซ์กำลัง และความถี่สวิตซ์ที่ใช้จะต้องมากกว่า 20 kHz เพื่อลดขนาดของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ [10-12]

สำหรับงานหุงต้มแบบเหนี่ยวนำที่ต้องการสองเอาต์พุตสำหรับประกอบอาหารวงจรที่ถูกเลือกใช้จะเป็นวงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์โดยการเพิ่มกิ่งและเอาต์พุตดังภาพที่ 6 [2] โดยการควบคุมจะเป็นแบบการควบคุมแรงดันแบบไม่สมมาตร (Asymmetrical Voltage-Cancellation control, AVC) [5] ซึ่งหลักการดังกล่าวมีผลต่อสวิตซ์หลักเกิดความไม่เท่ากันในวงจรซึ่งอาจทำให้เกิดความเสียหายที่สวิตซ์หลักได้

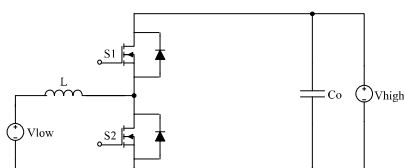


ภาพที่ 1 โครงสร้างของอินเวอร์เตอร์

เพื่อการพัฒนาการยืดอายุการใช้งานเตาเหนี่ยวนำโดยปรับสมดุลกระแสและความร้อนที่สวิตช์หลักให้สมดุลกัน งานวิจัยนี้จึงนำเสนอเตาเหนี่ยวนำไฟฟ้าสองเอาต์พุตที่ปรับกำลังเอาต์พุตแยกอิสระด้วยวงจรเต็มบริดจ์ที่ควบคุมด้วยการปรับแรงดันอสมมาตรแบบเฟสสมดุล ด้วยไอซี dsPIC30F2020 ขนาดกำลังรวม 1.5 กิโลวัตต์ ทำงานที่ความถี่ 35-40 กิโลเฮิร์ตซ์ รับไฟฟ้ากระแสสลับแบบ 1 เฟส 220 โวลต์ ได้ สามารถปรับกำลังและความร้อนที่ใช้ในการปรุงอาหารให้เป็นอิสระจากกันได้ โดยมีสวิตช์ไอจีบีทีสร้างสัญญาณความถี่สูง และมีเตาเหนี่ยวนำไฟฟ้าหรือเตาแม่เหล็กไฟฟ้าให้ความร้อน โดยอาศัยหลักการเหนี่ยวนำของสนามแม่เหล็กกระหว่างเตาแม่เหล็กไฟฟ้าและภาชนะที่เหนี่ยวนำไฟฟ้า เช่น เหล็ก เพราะฉะนั้นหากภาชนะที่นำมาใช้ไม่มีคุณสมบัติในการเหนี่ยวนำแม่เหล็กก็จะไม่สามารถทำให้เกิดความร้อนได้ ความร้อนจะเกิดขึ้นจากการเหนี่ยวนำที่ขดลวดและส่งผ่านไปที่ภาชนะที่เหนี่ยวนำไฟฟ้าทำให้สามารถทำงานที่อุณหภูมิต่าง ๆ ได้อย่างแม่นยำ มีความทันสมัยและเพิ่มความสะดวกสบายอย่างมากในการประกอบอาหารต่าง ๆ เหมาะที่จะใช้ทำอาหารหลายชนิด

2. วิธีดำเนินการวิจัย

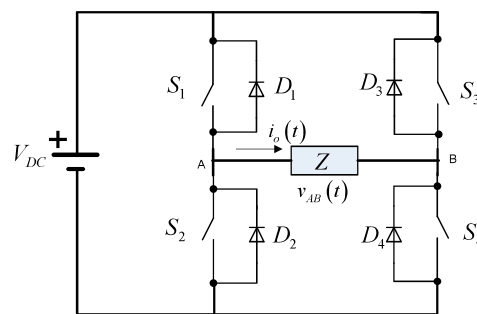
2.1 วงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์ทั่วไป



ภาพที่ 2 วงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบครึ่งบริดจ์

วงจรอินเวอร์เตอร์เรโซแนนซ์แบบครึ่งบริดจ์บริดจ์แสดงในภาพที่ 2 ซึ่งเป็นวงจรประกอบด้วยสวิตช์สองตัวสามารถประยุกต์ใช้ในงานชาร์จประจุแบตเตอรี่แบบสองทิศทางได้และในทางกลับกันก็สามารถนำมาใช้เป็นวงจรอินเวอร์เตอร์ได้ [12-17]

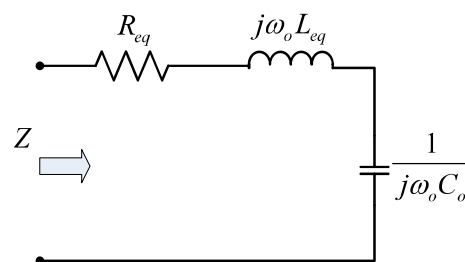
ในภาพที่ 3 แสดงวงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์ ประกอบด้วยสวิตช์กำลังสี่ตัวที่แต่ละตัวมีไดโอดต่อขนาน และจ่ายกำลังให้กับอิมพีแดนซ์โหลด (Z) แรงดันตกคร่อมโหลดอนุกรมเรโซแนนซ์ $v_{AB}(t)$ และกระแสที่ไหลผ่านโหลด $i_o(t)$ ที่ต่อในลักษณะอนุกรมดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 วงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์

2.2 โหลดอนุกรมเรโซแนนซ์

โหลดอนุกรมเรโซแนนซ์แสดงในภาพที่ 4 ประกอบด้วย ความต้านทานสมมูล R_{eq} ความเหนี่ยวนำโหลด และตัวเก็บ L_{eq} ประจุ C_o



ภาพที่ 4 วงจรอนุกรมเรโซแนนซ์

จากภาพที่ 4 สามารถหาค่าอิมพีแดนซ์ดังสมการที่ (1)

$$Z = R_{eq} + j \left(\omega_s L_{eq} - \frac{1}{\omega_s C_o} \right) \quad (1)$$

$$Z = R_{eq} \left(1 + j Q_L \left(\omega_n - \frac{1}{\omega_n} \right) \right) \quad (2)$$

โดยที่ ω_o ความถี่เชิงมุมที่เรโซแนนซ์และ ω_s ความถี่เชิงมุมที่สวิทช์ ค่าขนาดของอิมพีแดนซ์แสดงในสมการที่ (3)

$$|Z| = R_{eq} \sqrt{1 + Q_L^2 \left(\omega_n - \frac{1}{\omega_n} \right)^2} \quad (3)$$

และมุมเฟสของกระแสแสดงดังสมการที่ (4)

$$\varphi = \tan^{-1} \left(Q_L \left(\omega_n - \frac{1}{\omega_n} \right) \right) \quad (4)$$

ค่าโวลต์เฟคเตอร์ของโหลดอนุกรมเรโซแนนซ์แสดงในสมการที่ (5)

$$Q_L = \frac{\omega_o L_{eq}}{R_{eq}} \quad (5)$$

ความถี่เรโซแนนซ์แสดงในสมการที่ (6)

$$f_o = \frac{1}{2\pi \sqrt{L_{eq} C_o}} \quad (6)$$

หรือความถี่เรโซแนนซ์ในรูปหน่วยความถี่เชิงมุมแสดงในสมการที่ (7)

$$\omega_o = \frac{1}{\sqrt{L_{eq} C_o}} \quad (7)$$

ความถี่เชิงมุมของความถี่สวิทช์แสดงในสมการที่ (8)

$$\omega_s = 2\pi f_s \quad (8)$$

ความถี่ปกติคืออัตราส่วนของความถี่สวิทช์ต่อความถี่เรโซแนนซ์แสดงในสมการที่ (9)

$$\omega_n = \frac{\omega_s}{\omega_o} \quad (9)$$

2.3 กำลังไฟฟ้าของโหลด

ในภาพที่ 4 แสดงรูปคลื่นกระแส (i_o) และแรงดันของอินเวอร์เตอร์ (v_{AB}) ในหนึ่งคาบที่และขณะที่อินเวอร์เตอร์ทำงานจะได้ลักษณะของรูปคลื่นกระแสและแรงดันซ้ำคาบตลอดการทำงานจากภาพที่ 4 สามารถเขียนสมการแรงดันของ $v_{AB}(t)$ ดังสมการที่ (10)

$$v_{AB}(t) = V_{AB,1} \sin \omega_s t \quad (10)$$

เมื่อแรงดัน $V_{AB,1}$ คือแรงดันมูลฐานแสดงดังสมการที่ (11)

$$V_{AB,1} = V_m = \frac{4V_{DC}}{\pi} \quad (11)$$

และสามารถแสดงสมการของกระแส ดังสมการที่ (12)

$$i_o(t) = I_m (\sin \omega_s t - \varphi) \quad (12)$$

วงจรอินเวอร์เตอร์แบบเต็มบริดจ์จะได้ค่ากำลังไฟฟ้
ดังสมการที่ (13)

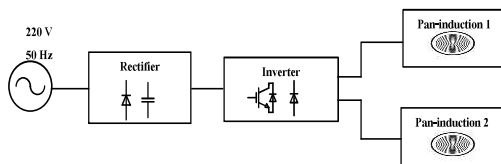
$$P_o = I_{rms}^2 R_{eq} \quad (13)$$

$$\text{เมื่อ } I_{rms} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{4V_{DC}}{\pi\sqrt{2}|Z|} \quad (14)$$

เอาสมการที่ (3) และ สมการที่ (14) จะได้สมการ
กำลังไฟฟ้าด้านออกของอินเวอร์เตอร์ ดังสมการที่
(15) หรือ (16)

$$P_o = \left[\frac{4V_{DC}}{\pi\sqrt{2}|Z|} \right]^2 R_{eq} \quad (15)$$

$$P_o = \frac{8V_{DC}^2}{\pi^2 R_{eq} \left(1 + Q_L^2 \left(\omega_n - \frac{1}{\omega_n} \right)^2 \right)} \quad (16)$$

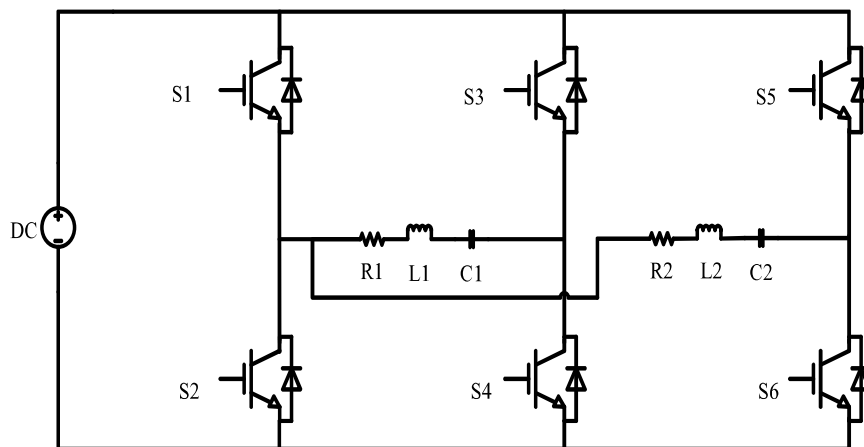


ภาพที่ 5 โครงสร้างเตาเหนี่ยวนำไฟฟ้า

เตาเหนี่ยวนำไฟฟ้าโดยอาศัยความร้อนจาก
การเหนี่ยวนำไฟฟ้าที่ใช้อินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่าย
แรงดันแบบเต็มบริดจ์สองเอาต์พุตมีลักษณะ
โครงสร้างของวงจรประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ
ดังบล็อกไดอะแกรมภาพที่ 1 ซึ่งสามารถอธิบาย
รายละเอียดของแต่ละส่วนของวงจรได้

2.4 วงจรอินเวอร์เตอร์เต็มบริดจ์แบบสอง เอาต์พุตที่มีการปรับแรงดันแบบอสมมาตร

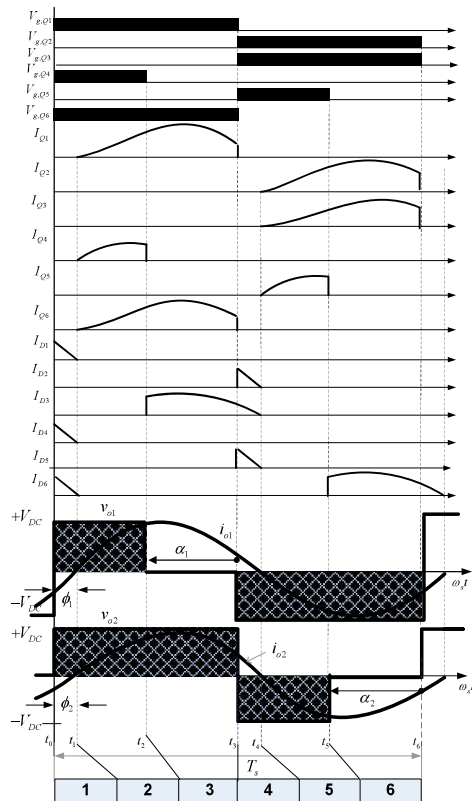
วงจรอินเวอร์เตอร์ซึ่งมีหน้าที่หลักคือจ่าย
กำลังไฟฟ้าความถี่สูงให้แก่โหลดทางด้านเอาต์พุตซึ่งมี
สองเอาต์พุตโดยในวงจรอินเวอร์เตอร์นั้นจะมีด้วยกัน
อยู่หลายแบบแต่ในที่นี้จะกล่าวเฉพาะวงจร
อินเวอร์เตอร์ชนิดเต็มบริดจ์เท่านั้นเนื่องจากเป็นวงจร
ที่เลือกใช้ในงานนี้ซึ่งมีลักษณะการต่อวงจรดังภาพที่
6 จะเห็นได้ว่าวงจรจะประกอบไปด้วยสวิตช์ทั้งหมด
6 ตัวนั่นคือสวิตช์ S1, S2, S3, S4, S5 และ S6 โดย
จะมีลักษณะการทำงานดังนี้คือที่เอาต์พุตตัวที่หนึ่งจะ
ใช้คู่สวิตช์ S1, S4 และ S2, S3 ที่เอาต์พุตตัวที่สองใช้
คู่สวิตช์ S1, S6 และ S2, S5 และจะทำงานเปิด-ปิด
(ON – OFF) สลับกันไปเพื่อแปลงแรงดันไฟฟ้า
กระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง



ภาพที่ 6 วงจรภาคแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูง

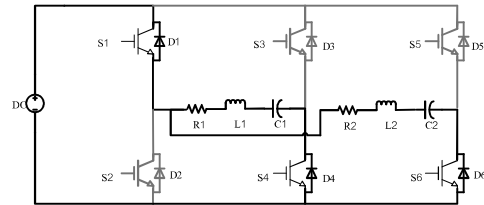
2.5 โหมดการทำงานของวงจรอินเวอร์เตอร์

ที่นำเสนอ

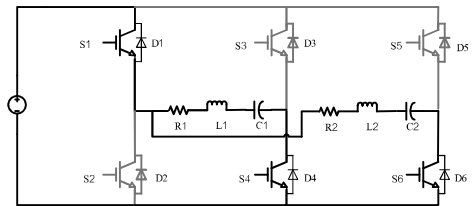


ภาพที่ 7 รูปสัญญาณกระแสแรงดัน ที่โหมดการทำงานของสวิตช์ 6 โหมด

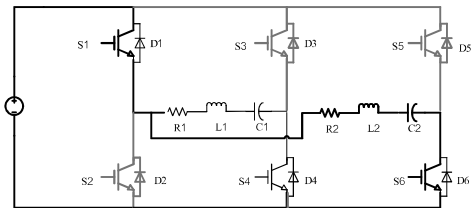
ลักษณะการทำงานของ การควบคุมแบบอสมมาตร แบบเฟสสมดุล แสดงดังภาพที่ 8 โดยแสดงให้เห็นว่าในโหมดที่ 1 และ 5 จะมีกระแสไหลผ่านสวิตช์หลัก S1 และ S2 ไกล่เคียงกันขึ้นกับการปรับอัตรากำลัง โดยลักษณะการทำงานของวงจรการเปิดปิดของสวิตช์แสดงดังภาพที่ 9-15



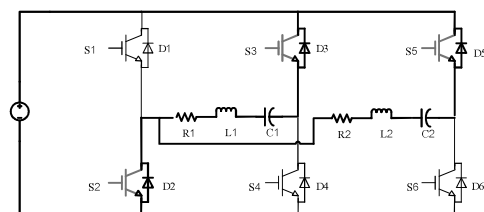
ภาพที่ 8 โหมดการทำงานที่ 1 ไดโอด D1, D4, D6 นำกระแส สวิตช์ S1, S4 และ S6 ไม่นำกระแส



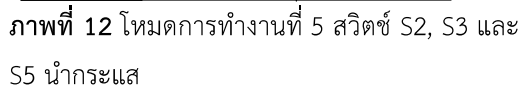
ภาพที่ 9 โหมดการทำงานที่ 2 ไดโอด D1, D4, D6 หยุดนำกระแส และสวิตช์ S1, S4 และ S6 นำกระแส



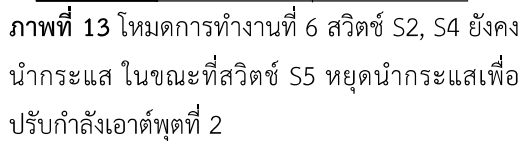
ภาพที่ 10 โหมดการทำงานที่ 3 สวิตช์ S4 หยุดนำกระแส



ภาพที่ 11 โหมดการทำงานที่ 4 สวิตช์ S1, S4 และ S6 หยุดนำกระแส ไดโอด D1, D4, D6 นำกระแส



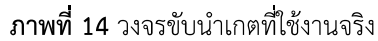
ภาพที่ 12 โหมดการทำงานที่ 5 สวิตช์ S2, S3 และ S5 นำกระแส



ภาพที่ 13 โหมดการทำงานที่ 6 สวิตช์ S2, S4 ยังคง
นำกระแส ในขณะที่สวิตช์ S5 หยุดนำกระแสเพื่อ
ปรับกำลังเอาต์พุตที่ 2

2.6 วงจรขับนำเกต

วงจรขับนำเกตดังภาพที่ 14 แสดงวงจรขับเกตที่ใช้งานจริง ใช้ตัวแยกโศดทางแสงเพื่อแยกโศดระหว่างวงจรควบคุมกับวงจรกำลัง สัญญาณขับนำจากวงจรควบคุมจะเป็นตัวขับแอลอีดีที่อยู่ในตัวแยกโศดทางแสงเพื่อไปอัสให้กับทรานซิสเตอร์ T_1 ภายในให้น้ำกระแส และในขณะที่เดียวกัน



ภาพที่ 14 วงจรขับนำเกตที่ใช้งานจริง



อุปกรณ์ที่สำคัญ คือตัวเหนี่ยวนำเรโซแนนซ์ตัวเหนี่ยวนำที่เล็กที่สุดของวงจร ตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์ตัวเก็บประจุทางด้านออก อุปกรณ์ที่ทำหน้าที่สวิตช์วงจรกำลังต้องมีความสามารถทำงานได้ที่ความถี่ 20 กิโลเฮิร์ตซ์ซึ่งเป็นความถี่ที่เหมาะสมในการสวิตช์ของอุปกรณ์สวิตช์ ในวงจรกำลังจะประกอบไปด้วยการออกแบบส่วนต่าง ๆ

จากขดลวดเหนี่ยวนำที่ได้ออกแบบไปในหัวข้อที่ผ่านมา นำไปวัดด้วยเครื่องวัดค่าความเหนี่ยวนำ ซึ่งค่าที่ได้เป็นค่าโดยประมาณ ในงานวิจัยนี้ได้ใช้เครื่องวัดรุ่น HIOKI 3532-50 LCR HITESTER โดยเลือกใช้ความถี่ที่เครื่องวัดมีอยู่ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ ค่าความเหนี่ยวนำที่ได้มีค่าโดยประมาณ L_{coil} มีค่า 58.57 ไมโครเฮนรี ค่าที่ได้นี้อาจมีความคลาดเคลื่อนจากเครื่องวัด ดังนั้นจึงไปเลือกขนาดของค่าตัวเก็บประจุที่ความถี่เรโซแนนซ์ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ ดังนี้

$$\text{จาก} \quad f = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad C_r = \frac{1}{4\pi^2 f^2 L}$$

$$C_r = \frac{1}{4\pi^2 (40 \times 10^3)^2 (58.57 \times 10^{-6})}$$

$$C_r = 0.27 \mu F \approx 0.3 \mu F$$

เมื่อ f คือความถี่เรโซแนนซ์หน่วยคือ เฮิร์ตซ์ (Hz)
 C_r คือ ค่าตัวเก็บประจุเรโซแนนซ์หน่วยคือ ฟาร์ด (F)

จะได้ค่าตัวเก็บประจุประมาณ 0.3 ไมโครฟาร์ด เพราะฉะนั้นจะใช้ตัวเก็บประจุขนาด 0.3 ไมโครฟาร์ด จำนวน 2 ตัว ค่าที่ได้นี้จะต่างกับค่าที่

คำนวณได้ เนื่องมาจากค่าของตัวเก็บประจุที่มีขายอยู่ และลักษณะการติดตั้งตัวเก็บประจุที่ขดลวดเหนี่ยวนำ ดังนั้นจึงเลือกใช้ตัวเก็บประจุที่มีค่า 0.3 ไมโครฟาร์ด

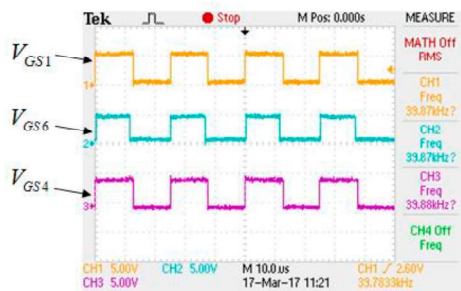
ตารางที่ 1 รายการและข้อกำหนดทั่วไปที่ใช้ในการจำลองและการทดลอง

รายละเอียด	กำหนดการ
แรงดันด้านต่ำ (V_{in})	5-6 โวลต์
ค่าความจุด้านเข้า (C_i)	220 ไมโครฟาร์ด
ค่าความเหนี่ยวนำเล็กที่สุด (L_{min})	190 ไมโครเฮนรี
ค่าความจุเรโซแนนซ์ (C_r)	10 นาโนฟาร์ด
ค่าความเหนี่ยวนำเรโซแนนซ์ (L_r)	5 ไมโครเฮนรี
ค่าความจุด้านออก (C_o)	220 ไมโครฟาร์ด
ค่าความต้านทานโหลด (R_{Load})	20 โอห์ม
แรงดันด้านสูง (V_o)	8 โวลต์
ดิวตี้ไซเคิล (D)	38 เปอร์เซ็นต์
ความถี่ (f)	20 กิโลเฮิร์ตซ์

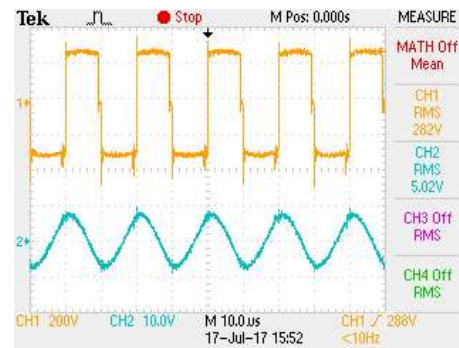
3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

3.1 การทดสอบภาคควบคุมการทำงานของอินเวอร์เตอร์

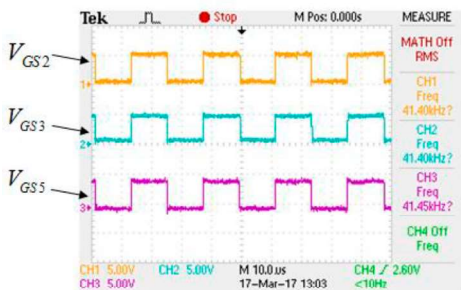
การทดสอบสัญญาณขับเคลื่อนของไอจีบีทีทั้งสองตัวนั้นจะต้องมีช่องว่างของช่วงเวลาวิกฤต อยู่เล็กน้อยเพื่อป้องกันการลัดวงจรของอินเวอร์เตอร์ โดยในที่นี้มีค่าอยู่ประมาณ 2 ไมโครวินาทีซึ่งเหมาะกับค่าการทำงานและหยุดทำงานของไอจีบีที ลักษณะสัญญาณขับไอจีบีทีทั้งสองตัวที่ได้จากการวัดแสดงดังภาพที่ 16 และ 17



ภาพที่ 16 สัญญาณขับไอจีบีที S1, S6 และ S4 (V_{GS1} :5V/div, V_{GS6} :5V/div, V_{GS4} :5V/div, Time:10 μ s/div)



ภาพที่ 18 สัญญาณแรงดันและกระแสที่ออกจากเอาต์พุต 1 ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 50 เปอร์เซ็นต์ (V_o :200V/div, i_o :10V/div, Time:10 μ s/div)



ภาพที่ 17 สัญญาณขับไอจีบีที S2, S3 และ S5 (V_{GS2} :5V/div, V_{GS3} :5V/div, V_{GS5} :5V/div, Time:10 μ s/div)



ภาพที่ 19 วัดอุณหภูมิเอาต์พุต 1 ได้ประมาณ 99 องศาเซลเซียส ภายใน 3 นาที

3.2 การวัดค่าแรงดันและกระแสทางด้านเอาต์พุต

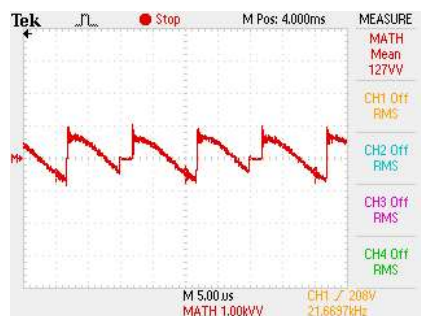
ทดสอบการวัดสัญญาณกระแสแรงดันไฟฟ้าและกำลังไฟฟ้า พร้อมกับวัดระดับความร้อนที่กระแทกที่ความถี่ 40 กิโลเฮิร์ตซ์ แสดงดังภาพที่ 18-23 โดยใช้ออสซิลโลสโคป Tektronix รุ่น TDS2004C และเครื่องวัดอุณหภูมิอินฟราเรด ยี่ห้อ CEM รุ่น DT-8835



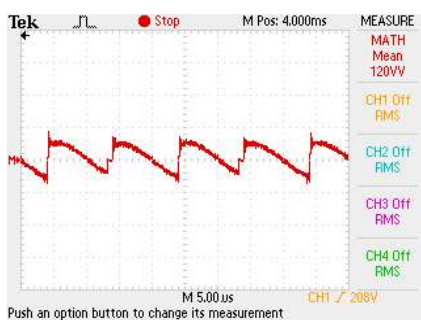
ภาพที่ 20 สัญญาณแรงดันและกระแสที่ออกจากเอาต์พุต 2 ที่ค่าวัฏจักรหน้าที่ 50 % (V_o :200V/div, i_o :10V/div, Time:10 μ s/div)



ภาพที่ 21 วัดอุณหภูมิเอาต์พุต 2 ได้ 97 องศาเซลเซียส ภายใน 3 นาที



ภาพที่ 22 สัญญาณกำลังไฟฟ้าที่ออกจากเอาต์พุต 1 ที่ค่าวัฏจักรหน้าที 50 เปอร์เซ็นต์ (P_o : 1kW/div, Time : 5 μ s /div, v_o : 200V/div, i_o : 10V/div)



ภาพที่ 23 สัญญาณกำลังไฟฟ้าที่ออกจากเอาต์พุต 2 ที่ค่าวัฏจักรหน้าที 50 เปอร์เซ็นต์ (P_o : 1kW/div, Time : 5 μ s /div, v_o : 200V/div, i_o : 10V/div)

จากการทดสอบเตาเหนี่ยวนำไฟฟ้าสองเอาต์พุตที่ปรับกำลังแยกอิสระโดยใช้การควบคุมการทำงานอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันแบบแบบเต็มบริดจ์ สามารถปรับระดับความร้อนของเอาต์พุตทั้งสองได้ 5 ระดับดังตารางที่ 5 โดยการปรับค่าวัฏจักรหน้าที

ไมโครคอนโทรลเลอร์ สามารถใช้สร้างสัญญาณควบคุมวงจรอินเวอร์เตอร์ชนิดแหล่งจ่ายแรงดันแบบเต็มบริดจ์ที่มีไอจีบีที 6 ตัวได้ และสามารถแก้ไขค่าสั่งเพื่อปรับความถี่ ค่าวัฏจักรหน้าที และ ช่วงเวลาวิกฤตได้โดยโปรแกรมไมโครคอนโทรลเลอร์ ทำให้ได้อุณหภูมิของความร้อนที่เพิ่มหรือลดลงตามความต้องการได้และปรับไซเคิลทั้งซิกบวกลบและลบได้ผลตามทฤษฎีที่นำเสนอ

4. สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองปรับค่าวัฏจักรหน้าทีเราจะได้อุณหภูมิที่ต้องการในการทำความร้อน 5 ระดับ ซึ่งได้ทดลองจากการให้ความร้อนหม้อต้ม สามารถใช้กับแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ 1 เฟส 200 โวลต์ 50 เฮิร์ตซ์ได้ ระบบวิธีการควบคุมที่นำเสนอสามารถรักษาระดับอุณหภูมิสวิตช์หลัก S1 และ S2 ได้ใกล้เคียงกันไม่เกิน 20 เปอร์เซ็นต์โดยอยู่ที่ประมาณ 60 และ 65 องศาเซลเซียสที่กำลังไฟเอาต์พุต 1 เท่ากับ 400 วัตต์ และเอาต์พุต 2 เท่ากับ 600 วัตต์ ซึ่งสามารถแบ่งภาระกระแสที่สวิตช์หลักได้ใกล้เคียงกันอีกด้วย

5. อ้างอิง

- [1] Artigas JI, Urriza I, Acero J, et al. Power Measurement by Output-Current Integration in Series Resonant Inverters.

- IEEE Transaction on Industrial Electronics. 2009; 56(2):559 - 67.
- [2] José MB, Fernando M, José RG, et al. A Two - Output Series-Resonant Inverter for Induction – Heating Cooking Appliances. IEEE Transaction on Industrial Electronics. 2005; 20(4):815 - 22.
- [3] Pansuwan T, Nuchkamnead R, Chuchaloem K, et al . Bidirectional Converter with Duty Cycle Control using Solar Energy for CCTV. Electrical Engineering Network of Rajamangala University of Technology EENET 7th; 2015 May 27-29; Chonburi, Thailand. Bangkok; 2015.
- [4] Kim JG, Park SW, Kim YH, et al. Bidirectional Soft Switching DC-DC Converter. 2010 International Power Electronics Conference. 2010 June 21-24; Japan; 2010.
- [5] Chudjuarjeen S, Jayasuriya S, Yachiangkam S, et al. Analysis of Measurement Delay Errors in a DC-DC Buck-Boost Converter using Stochastic Differential Equations. 37th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society (IECON 2011). 2011 Nov 7-10; Melbourne, Australia; 2011.
- [6] Chuang YC. High-Efficiency ZCS Buck Converter for Rechargeable Batteries. IEEE Trans Ind Electron. 2010; 57(7):2463–72.
- [7] Cheng HL, Lin CW .Design and Implementation of a High-Power Factor LED Driver with Zero-Voltage Switching-On Characteristics. IEEE Trans Power Electron. 2014; 9(9):4949–58.
- [8] Inoue S, Akagi H. A bidirectional dc–dc converter for an energy storage system with galvanic isolation. IEEE Trans Power Electron. 2007; 22(6): 2299–2306.
- [9] Zhu L. A novel soft-commutating isolated boost full-bridge ZVSPWM DCDC converter for bidirectional high power applications. IEEE Trans Power Electron. 2006; 2 (2):422–29.
- [10] Lee J, Jo J, Choi S, et al. A 10-kw SOFC low-voltage battery hybrid power conditioning system for residential use. IEEE Trans Energ Convers. 2006; 21(2):575–85.
- [11] Chiu HJ, Lin LW. A bidirectional DCDC converter for fuel cell electric vehicle driving system. IEEE Trans Power Electron. 2006; 21(4):950–58.
- [12] Zhao Q, Lee FC. High-efficiency, high step-up DCDC converters. IEEE Trans Power Electron. 2003; 18(1):65–73.
- [13] Schuch L, Rech C, Hey HL, et al. Analysis and design of a new high-efficiency bidirectional integrated ZVT PWM converter for DC-bus and battery-bank interface. IEEE Trans Ind Appl. 2006; 42(5):1321–32.

- [14] Tan NM, Abe T, Akagi H. Design and performance of a bidirectional isolated DC-DC converter for a battery energy storage system. IEEE Trans Power Electron. 2012; 27(3):1237-1248.
- [15] Wang K, Lin CY, Zhu L, et al. Bidirectional dc/dc converters for fuel cell systems. IEEE Trans Power Electron. 1998; 21(4):47-51.
- [16] Peng FS, Li H, Su GJ, et al. A new ZVS bidirectional DC-DC converter for fuel cell and battery application. IEEE Trans Power Electron. 2004; 19(1):54 – 65.
- [17] Inoue S, Akagi H. A bidirectional dc-dc converter for an energy storage system with galvanic isolation. IEEE Trans Power Electron. 2007; 22(6):2299-2306.

ผลกระทบของลักษณะของแผ่นกั้นที่มีผลต่อค่าความดันลดและค่าสัมประสิทธิ์
การถ่ายเทความร้อนในระบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเปลือกและท่อ[†]
The effect of baffles types on pressure drop and the overall heat transfer
coefficient inside a shell and tube heat exchanger

ณัฐดนัย พรรณเจริญวงศ์^{1*}, ณัฏฐา กัลยาประสิทธิ์¹, พลเทพ เวงสูงเนิน², ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช¹
Nattadon Pannucharoenwong^{1*}, Natha Kanlayaprasit¹, Ponthepong Vengsungne²,
Phadungsak Ratanadecho¹

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

² สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องจักรกลเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of engineering, Thammasat University

²Department of Agricultural Machinery Engineering, Rajamangala University of Technology Isan

Corresponding author. Tel.: 0 3825 9050-55, E-mail: pnattado@engr.tu.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและเปรียบเทียบผลกระทบของลักษณะของแผ่นกั้นต่อค่าความดันลดและสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนที่ติดตั้งในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเปลือกและท่อที่นำมาใช้แทนระบบเครื่องควบคุมไอรหรือน้ำมันของบริษัท ปตท.จำกัด (มหาชน) สำนักงานพระโขนง โดยศึกษาลักษณะของแผ่นกั้นที่ใช้ในการศึกษามี 3 ลักษณะ ได้แก่ แผ่นกั้นแบบ segmental baffle (SB) แผ่นกั้นแบบ double segmental baffle (DSB) และแผ่นกั้นแบบ helical baffle (HB) โดยงานวิจัยนี้จะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลอง และวิเคราะห์ลักษณะการไหล (CFD) เพื่อนำไปเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนดังกล่าว จากการวิเคราะห์พบว่า ค่าความดันลดมีค่าเท่ากับ 222.36, 179.32 และ 100.57 Pa ตามลำดับและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมีค่าเท่ากับ 13.07, 8.93 และ 14.57 W/m²K ตามลำดับ สรุปได้ว่าเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเปลือกและท่อที่ใช้แผ่นกั้นแบบ HB มีค่าความดันลดต่ำที่สุดและมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนในระบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเปลือกและท่อสูงที่สุดในงานวิจัยนี้และเมื่อเปรียบเทียบกับระบบเครื่องควบคุมไอรหรือน้ำมันเดิมกับระบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนที่ใช้แผ่นกั้นแบบ HB พบว่า ระบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมีค่าประสิทธิผลเพิ่มขึ้นเท่ากับ 72.77%

คำสำคัญ: แผ่นกั้น เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ความดันลด สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

[†] บทความจากงานประชุมวิชาการระดับชาติเชิงสร้างสรรค์ครั้งที่2

Abstract

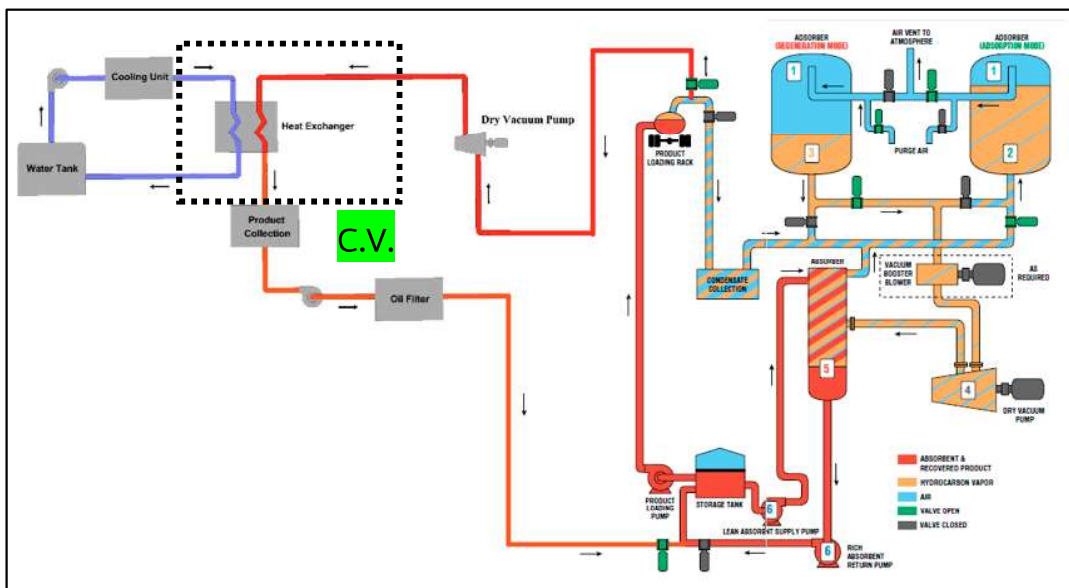
This research study the effect of the baffles type on pressure drop and the overall heat transfer coefficient in the shell and tube heat exchanger that replaces on vapor recovery unit located at PTT public company limited Prakanhong branch. The 3 types of baffles were employed including segmental baffles (SB), double segmental baffles (DSB) and helical baffles (HB). The solving in this research was carried out by CFD to improve heat transfer efficiency in this heat exchanger. A pressure drop found to be 222.36, 170.32 and 100.57 Pa and the overall heat transfer coefficient were 13.07, 8.93 and 14.57 W/m²K respectively. It can be concluded that the shell-and-tube heat exchanger using HB gave the lowest pressure drop and highest overall heat transfer coefficient in this research. The effectiveness between VRU system and heat exchanger with HB system is improved 72.77%

Keywords: Baffle types, Heat exchanger, Pressure drop, Overall heat transfer coefficient

1. บทนำ

การเจริญเติบโตและการพัฒนาของภาคอุตสาหกรรมต่าง ๆ ในปัจจุบันส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น โดยเฉพาะอุตสาหกรรมปิโตรเลียมเนื่องจากไฮโดรคาร์บอนระเหยง่าย (Volatile organic compounds: VOCs) ซึ่งเป็นสารตั้งต้นประเภทหนึ่งในปฏิกิริยาการเกิดโอโซนและสารประกอบเบนซีน (benzene) ซึ่งเป็นสารก่อมะเร็งเม็ดเลือดขาว โดยแหล่งกำเนิดไฮโดรคาร์บอนระเหยง่ายจะอยู่ที่คลังน้ำมันเชื้อเพลิง สถานีบริการน้ำมันเชื้อเพลิงและการขนส่งน้ำมันเชื้อเพลิง ส่งผลให้ผู้ประกอบการแก้ไขปัญหาโดยการติดตั้งเครื่องควบคุมไอระเหยน้ำมัน (Vapor

recovery unit: VRU) เข้ามาในระบบ เพื่อควบคุมปริมาณไฮโดรคาร์บอนเชื้อเพลิงและนำไอระเหยน้ำมันกลับมาใช้ แต่ระบบดังกล่าวนี้มีราคาสูงเนื่องจากเป็นเทคโนโลยีจากต่างประเทศ ทางบริษัท ปตท. จำกัด (มหาชน) สำนักงานพระโขนง กรุงเทพมหานคร ได้นำหลักการของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเปลือกและท่อ (Shell and tube heat exchanger) มาใช้แทนระบบ VRU เพื่อลดค่าใช้จ่าย ความดันและอุณหภูมิลง โดยให้ไฮโดรคาร์บอนอยู่ในท่อและแลกเปลี่ยนความร้อนกับน้ำที่อยู่ล้อมรอบท่อ เพื่อให้ไฮโดรคาร์บอนควบแน่นและนำไปใช้ในระบบต่อไป แผนผังของระบบควบคุมทั้งหมดของการกลั่นน้ำมันซึ่งสามารถติดต่อระบบจากส่วนของระบบ VRU ระบบเดิม แสดงได้ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แผนผังการทำงานของระบบทดแทนต้นแบบร่วมกับระบบ VRU และ Control volume [1]

“เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน” เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเปลือกและท่อเป็นอุปกรณ์ที่ใช้แลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลสองชนิดที่มีอุณหภูมิต่างกันโดยของไหลชนิดหนึ่งอยู่ในท่อ (Tube) และของไหลอีกชนิดจะอยู่ในเปลือก (Shell) และมักจะมีแผ่นบังคับทิศทางการไหลหรือแผ่นกั้น (Baffles) กันไม่ให้ของไหลในเปลือกลัดวงจร ปรับเปลี่ยนทิศทางการไหลของของไหล รักษาระยะห่างระหว่างท่อและทำให้เกิดการไหลแบบปั่นป่วนเพื่อเพิ่มการอัตราการถ่ายเทความร้อน ($\dot{Q}$) [2, 3] โดยทั่วไปการไหลภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะเป็นการไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow) ส่วนมากจะเกิดจากการใช้แผ่นกั้น ซึ่งแผ่นกั้นที่ใช้มีหลายประเภท เช่น แผ่นกั้นแบบ segmental, double segmental, triple segmental, helical, double helical, doughnut [4] และพบว่า ส่วนใหญ่ปัญหาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเปลือกและท่อจะถูกแก้โดยการใส่แผ่นกั้นแบบ HB โดยเฉพาะการศึกษาค่าของมุมเอียงต่าง ๆ ของแผ่นกั้นแบบ HB จากโมเดล periodic พบว่า

ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U , Overall heat transfer coefficient) ของเครื่องแลกเปลี่ยน ความร้อนแปรผกผันกับค่าความดันลด (Δp , Pressure drop) และที่ความดันลดเท่ากัน มุมบิด (Helix angle) ที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดมีขนาดประมาณ 45° [5-7] เช่นเดียวกันกับ Pranita B. et al. และ Anus EM. [8] ที่วิเคราะห์การไหลโดยการเปลี่ยนลักษณะของแผ่นกั้น พบว่าแผ่นกั้นแบบ SB เกิดบริเวณที่ไม่มีการไหลวนของ ของไหล (dead zones) เกิดการไหลวนกลับ (back mixing) และการผสมของอนุภาคของเหลวทำให้ค่า ความดันลดสูงส่งผลให้งานของปั๊ม (W_{pump}) สูง- ตามไปด้วยและค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน (thermal performance) ต่ำ ซึ่งสามารถแก้ไขได้โดย การเปลี่ยนมาใช้แผ่นกั้นแบบ helical ดังนั้น ใน การเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อน เครื่อง แลกเปลี่ยนความร้อนควรจะมีค่าอัตราไหลเชิงมวล ($\dot{m}$) ในเปลือกและค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน (U , the overall heat transfer coefficient) สูง

ค่าความดันลดน้อย จะทำให้ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายโอนความร้อนสูง[8,9] Zena KK. et al. [10,11]ใช้ Computational Fluid Dynamics หรือ CFD ในการวิเคราะห์หรือคาดการณ์ผลการไหลของของไหลเมื่อไหลผ่านวัตถุที่เราสนใจ หลักการคือ แบ่งขอบเขตของปริมาตรเป็นตาข่าย (mesh) และ ใช้สมการนาเวียร์-สโตกส์ คำนวณผลของการไหลจากตาข่ายหนึ่งไปยังอีกตาข่ายหนึ่ง ซึ่งผลจากการคำนวณจะเป็นค่าประมาณ สามารถเพิ่มความแม่นยำได้โดยขึ้นอยู่กับ การแบ่งตาข่าย การกำหนดค่าต่าง ๆ ของผู้ใช้ และ ประสิทธิภาพของคอมพิวเตอร์ที่ใช้คำนวณ

จากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า ความดันลดส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของระบบ เนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลงลักษณะของแผ่นกั้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จะใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จำลองและวิเคราะห์ลักษณะการไหลเพื่อศึกษาและเปรียบเทียบผลกระทบของลักษณะของแผ่นกั้นต่อค่าความดันลดและค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่ติดตั้งในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเปลือกและท่อโดยศึกษาลักษณะของแผ่นกั้นที่ใช้ในการศึกษามี 3 ลักษณะ ได้แก่ แผ่นกั้นแบบ Segmental (SB) แผ่นกั้นแบบ Double segmental (DSB) และแผ่นกั้นแบบ Helical (HB)

2. วิธีการดำเนินการวิจัย

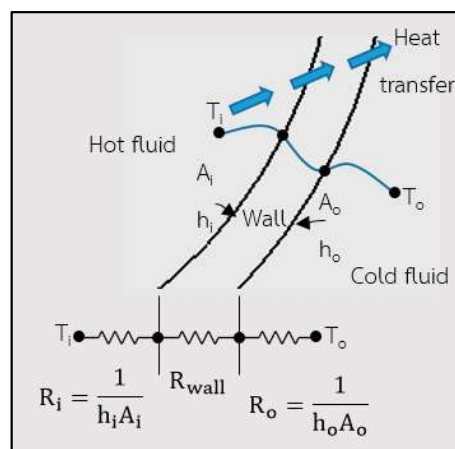
2.1 สมการที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 สัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

(U, Overall heat transfer coefficient)

เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนจะมีการแลกเปลี่ยนความร้อนจากของไหลอุณหภูมิสูงไปยังผนังท่อโดยการนำความร้อน (Conduction) และจาก

ผนังท่อไปยังของไหลอุณหภูมิต่ำโดยการพาความร้อน (Convection) เพื่อให้ง่ายต่อการคำนวณจึงคิดเป็นวงจรความต้านทานความร้อน (R, Thermal resistance) ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 วงจรความต้านทานความร้อนที่ผนังท่อระหว่างของไหลเย็นและของไหลร้อน

$$R_{wall} = \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi kL} \quad (1)$$

เมื่อ k คือ ค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนของผนังท่อ

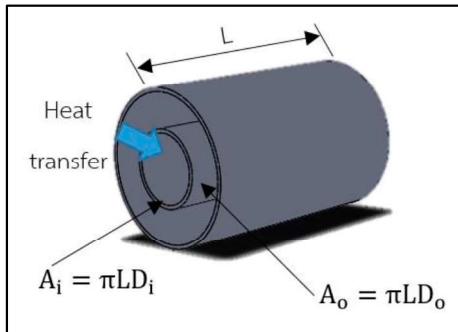
L คือ ความยาวท่อ

R คือ ความต้านทานความร้อนรวม

$A_i = \pi D_i L$ และ $A_o = \pi D_o L$ คือ พื้นที่ของผิวผนังด้านในและด้านนอก ตามลำดับ

เมื่อรวมค่า R จะได้สมการ (2) และภาพที่ 3

$$R = R_{total} = R_i + R_{wall} + R_o = \frac{1}{h_i A_i} + \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi kL} + \frac{1}{h_o A_o} \quad (2)$$



ภาพที่ 3 การถ่ายเทความร้อนระหว่างพื้นผิวท่อด้านในและด้านนอก

อัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนระหว่างของไหลสามารถคำนวณได้จากสมการ (3)

$$\dot{Q} = \frac{\Delta T}{R} = UA_s \Delta T = U_i A_i \Delta T = U_o A_o \Delta T \quad (3)$$

$$A_s = \frac{\pi n t L}{2} \quad (4)$$

เมื่อ t คือ ความหนาของท่อ
 n คือ จำนวนท่อ

$$\frac{1}{UA_s} = \frac{1}{U_i A_i} + \frac{1}{U_o A_o} = R = \frac{1}{h_i A_i} + R_{wall} + \frac{1}{h_o A_o} \quad (5)$$

ถ้าผนังท่อบางและค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อนน้อย จะได้

$$\frac{1}{U} \approx \frac{1}{h_i} + \frac{1}{h_o} \quad (6)$$

ประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนมักจะเสื่อมไปตามกาลเวลา เป็นผลมาจากการสะสมของตะกอนบนพื้นผิวการถ่ายเทความร้อน จึงต้องมีการคำนวณค่า Fouling factors, R_f เพื่อในค่าความต้านทานด้วย ดังสมการ (7)

$$\frac{1}{UA_s} = \frac{1}{U_i A_i} + \frac{1}{U_o A_o} = R$$

$$= \frac{1}{h_i A_i} + \frac{R_{f,i}}{A_i} + \frac{\ln(D_o/D_i)}{2\pi k L} + \frac{R_{f,o}}{A_o} + \frac{1}{h_o A_o} \quad (7)$$

2.1.2 การวิเคราะห์เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ทำได้ 2 วิธี คือ

2.1.2.1 วิธี Effectiveness-NTU

$$\dot{Q}_c = \dot{m}_c C_{pc} (T_{c, out} - T_{c, in}) = \dot{m}_c C_{pc} \Delta T_c \quad (8)$$

$$\dot{Q}_h = \dot{m}_h C_{ph} (T_{h, out} - T_{h, in}) = \dot{m}_h C_{ph} \Delta T_h \quad (9)$$

เมื่อ ΔT_c และ ΔT_h เป็น ค่าผลต่างของอุณหภูมิขาเข้าและขาออกตามลำดับ

2.1.2.1 วิธี Log Mean Temperature Difference (LMTD)

$$\dot{Q} = UA_s \Delta T_{lm} \quad (10)$$

$$\Delta T_{lm} = \frac{\Delta T_1 - \Delta T_2}{\ln(\Delta T_1 / \Delta T_2)} \quad (11)$$

เมื่อ ΔT_{lm} เป็นผลต่างของอุณหภูมิ log mean

2.1.3 การวิเคราะห์ปัญหา CFD

กำหนดให้ $\nabla = \vec{i} \frac{\partial}{\partial x} + \vec{j} \frac{\partial}{\partial y} + \vec{k} \frac{\partial}{\partial z}$ (12)

Continuity eq. $\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = 0$ (13)

x-momentum

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} + \rho f_x \quad (14)$$

y-momentum

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} + \rho f_y \quad (15)$$

z-momentum

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho w \vec{V}) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + \rho f_z \quad (16)$$

จะได้ การวิเคราะห์พลศาสตร์ของไหล
เชิงคำนวณอยู่ภายใต้สมการนาเวียร์-สโตกส์

$$\begin{aligned} & \left(\frac{\partial \rho \phi}{\partial t} \right) + \left(\frac{\partial \rho u \phi}{\partial x} + \frac{\partial \rho v \phi}{\partial y} + \frac{\partial \rho w \phi}{\partial z} \right) \\ & = \Gamma \left(\frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \phi}{\partial z^2} \right) + S(\phi) \end{aligned} \quad (17)$$

2.2 สมมติฐานที่ใช้ในการคำนวณ (assumption)

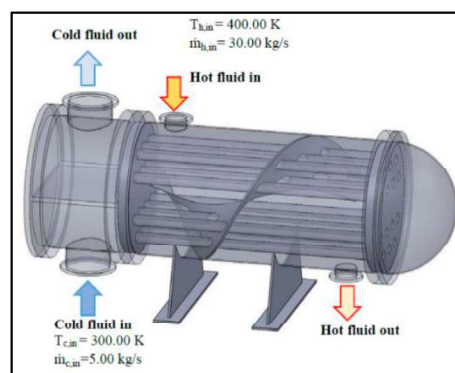
- การวิเคราะห์เป็นแบบ 3 มิติ
- การวิเคราะห์เป็นแบบสภาวะคงตัว (Steady state) ของไหลอัดตัวไม่ได้ (Incompressible fluid) และไหลแบบปั่นป่วน (Turbulent flow)
- วิเคราะห์โดยพิจารณาแรงโน้มถ่วงของโลก
- แบบจำลองความหนืด Standard k - ε (2 eqⁿ)

- ใช้ SIMPLE scheme แก้สมการ Pressure-velocity coupling แบบ SIMPLE Scheme

2.3 การสร้างรูปทรงเรขาคณิต (Geometry creation) และการสร้างตาข่ายในการคำนวณ (Mesh generation)

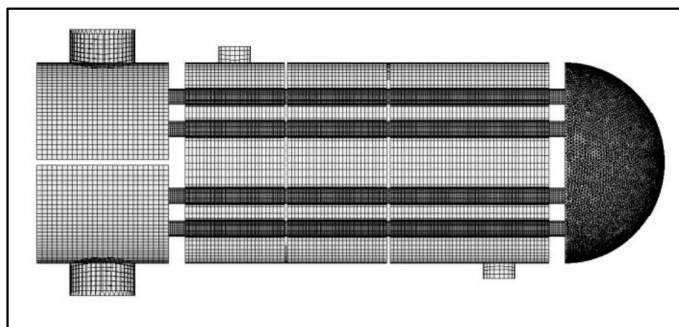
การสร้างแบบจำลองเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนในงานวิจัยนี้ ออกแบบโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์จากระบบ ทศพล ขำบัวน้อยและคณะ [1]

ตัวเครื่องมี 1 ทางเข้า-ออกของของไหลเย็น (Cold fluid) 1 ทางเข้า-ออกของของไหลร้อน (Hot fluid) ภายในตัวเครื่องมีท่ออยู่ 14 ท่ออยู่พร้อมแผ่นกั้น กำหนดให้ ฝั่งของไหลเย็นมีอุณหภูมิขาเข้า ($T_{c,in}$) เท่ากับ 300 K และอัตราไหลเชิงมวล ($\dot{m}_{c,in}$) เท่ากับ 5.00 kg/s ฝั่งของไหลร้อนมีอุณหภูมิขาเข้า ($T_{h,in}$) เท่ากับ 400 K และอัตราไหลเชิงมวล ($\dot{m}_{h,in}$) เท่ากับ 30.00 kg/s และมีทิศทางการไหลดังภาพที่ 4

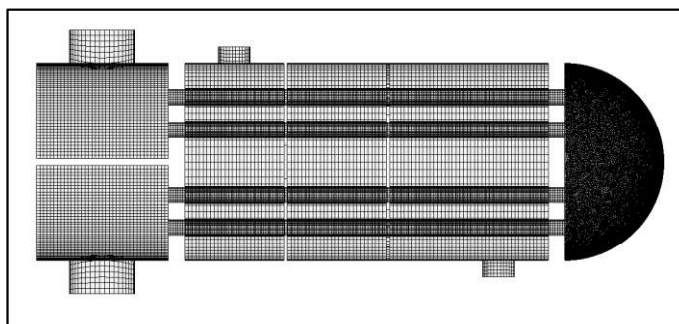


ภาพที่ 4 ทิศทางการไหลของของไหลภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

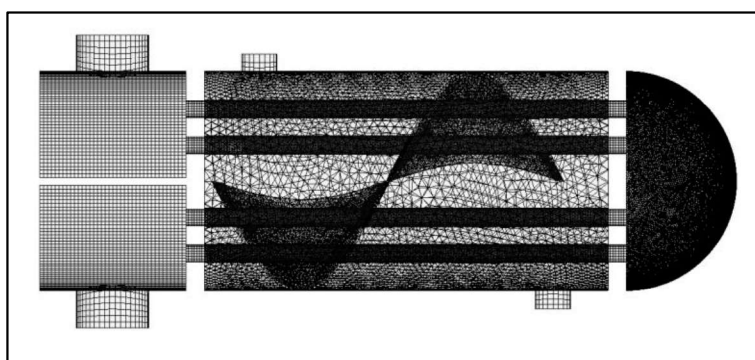
การสร้างตาข่ายในการคำนวณเป็นขั้นตอนที่สำคัญมากเพราะต้องเหมาะสมกับโดเมนเชิงคำนวณ ในการเพิ่มจำนวนเซลล์จะเพิ่มความละเอียด และความแม่นยำในการคำนวณ แต่ระยะเวลาในการคำนวณจะมากขึ้นตามไปด้วย ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของคอมพิวเตอร์ ในกระบวนการทางวิศวกรรมจะการใช้การสร้างตาข่ายเพื่อแก้สมการ (17), รายละเอียดแสดงดังภาพที่ 5 และตารางที่ 1 [10]



ก



ข



ค

ภาพที่ 5 ตาข่ายในการคำนวณแผ่นกั้น (ก) แบบ SB (ข) แบบ DSB (ค) แบบ HB

ตารางที่ 1 จำนวนของเซลล์ระหว่างตาข่ายที่ใช้คำนวณ

ชนิดของแผ่นกั้น	จำนวนโหนด	จำนวนอีลิเมนต์	Tetrahedral	Wedges	Hexahedra
SB	755,965	1,117,846	489,530	18,642	609,674
DSB	869,643	2,683,467	2,260,122	9,994	413,351
HB	941,468	3,873,409	3,610,747	7,696	254,966

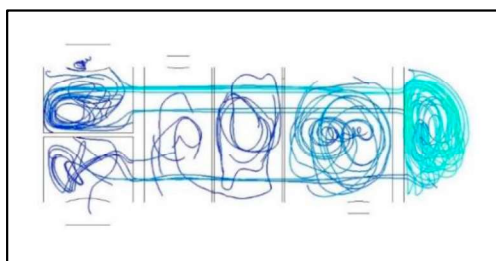
3. ผลการวิจัยและการอภิปราย

จากการจำลองพลศาสตร์ของของไหลภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนตามเงื่อนไขที่กำหนดข้างต้นโดยเปลี่ยนชนิดของแผ่นกัน จะได้ผลการทดลองดังนี้

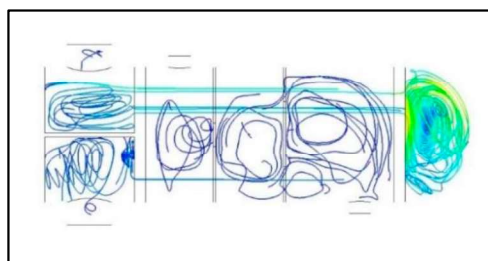
3.1 Stream line ของของไหลภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

การหาค่าความดันลดของระบบเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนี้ พิจารณาจากกระแสการไหล (stream line) ของของไหลแบบปั่นป่วน ภาพที่ 6(ก) ของไหลเกิดบริเวณที่ไม่มีการไหลวนของของไหลหรือ

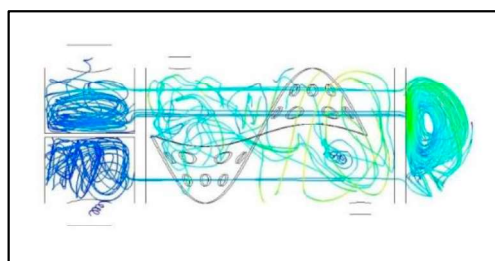
การอันของของไหล (Dead zones) เกิดการไหลวนกลับ (Back mixing) ทำให้มีการผสมของอนุภาคของเหลว ส่งผลให้ มีค่าความดันลดเท่ากับ 222.36 Pa ภาพที่ 6(ข) มีการไหลวนกลับของของไหลอยู่บ้างเล็กน้อย มีค่าความดันลดเท่ากับ 179.32 Pa และภาพที่ 6(ค) ไม่เกิดการไหลวนกลับของของไหล มีค่าความดันลดเท่ากับ 100.57 Pa จากกระแสการไหลจะเห็นได้ว่าการเกิดการอันของของไหลและการไหลวนกลับจะส่งผลกับค่า Δp โดยแผ่นกันแบบ HB จะมีค่าความดันลดต่ำที่สุด ตามด้วยแผ่นกันแบบ DSB และแผ่นกันแบบ SB



ก



ข



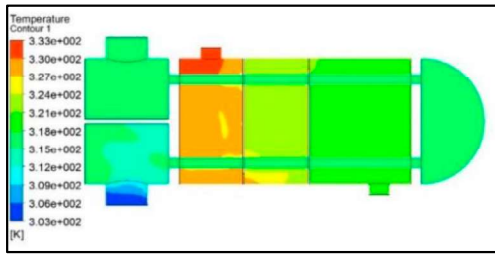
ค

ภาพที่ 6 กระแสการไหลภายในแผ่นกัน (ก) แบบ SB (ข) แบบ DSB (ค) แบบ HB

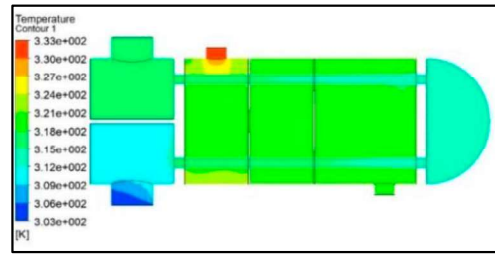
3.2 คอนทัวร์อุณหภูมิภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน

คอนทัวร์อุณหภูมิภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนของแต่ละชนิดของแผ่นกันนี้ แสดงให้เห็นการกระจายตัวของอุณหภูมิของไหลในเครื่อง-

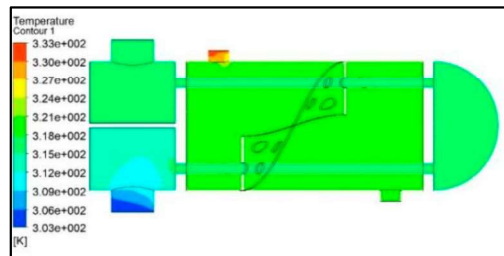
แลกเปลี่ยนความร้อนในแต่ละชนิดที่แตกต่างกัน ในภาพที่ 7 พบว่า อุณหภูมิของของไหลเย็นขาออก ($T_{c,out}$) อยู่ในช่วง 312 K ถึง 319 K และอุณหภูมิของของไหลร้อนขาออก ($T_{h,out}$) อยู่ในช่วง 388 K ถึง 395 K



ก



ข



ค

ภาพที่ 7 คอนทัวร์อุณหภูมิภายในแผ่นกัน (ก) แบบ SB (ข) แบบ DSB (ค) แบบ HB

ตารางที่ 2 ตารางบันทึกค่าอุณหภูมิ

ชนิดของแผ่นกัน	$T_{c,in}$, K	$T_{c,out}$, K	ΔT_c , K	$T_{h,in}$, K	$T_{h,out}$, K	ΔT_h , K	ΔT_{lm}
SB	300	314.94	14.94	400	393.86	6.14	9.90
DSB	300	312.05	12.05	400	388.67	11.33	11.69
HB	300	318.56	18.56	400	394.27	5.73	10.92

จากตารางที่ 2 ภาพที่ 7(ก) มีค่าอุณหภูมิต่าง ๆ ดังนี้ $T_{c,out}$, $T_{h,out}$, ΔT_c , ΔT_h และ ΔT_{lm} เท่ากับ 314.94, 393.86, 14.94, 6.14 และ 9.90 K ตามลำดับ ภาพที่ 7(ข) มีค่า 312.05, 388.67, 12.05, 11.33 และ 11.69 K ตามลำดับ และ ภาพที่ 7(ค) มีค่า 318.56, 394.27, 18.56, 5.73 และ 10.92 K ตามลำดับ ซึ่งค่า ΔT_c จะนำไปคำนวณค่า $\dot{Q}_c$ ต่อไป ในหัวข้อ 3.3

3.3 ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน ($\dot{Q}_c$) ของแต่ละชนิดของแผ่นกันสามารถคำนวณตามสมการ (8) กำหนดให้ $c_{p,water@300\text{ K}} = 4.18 \text{ kJ/kgK}$ และค่า $\dot{m} = 5 \text{ kg/s}$ จะได้ค่า $\dot{Q}_{c,SB}$, $\dot{Q}_{c,DSB}$ และ $\dot{Q}_{c,HB}$ เท่ากับ 312.31, 251.91 และ 387.89 kW/m²K ตามลำดับ ซึ่งค่า $\dot{Q}_c$ ดังกล่าว จะนำมาคำนวณหาค่า U ตามสมการ (10) จะได้ค่า U_{SB} , U_{DSB} และ U_{HB} ได้ตามตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ตารางคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน

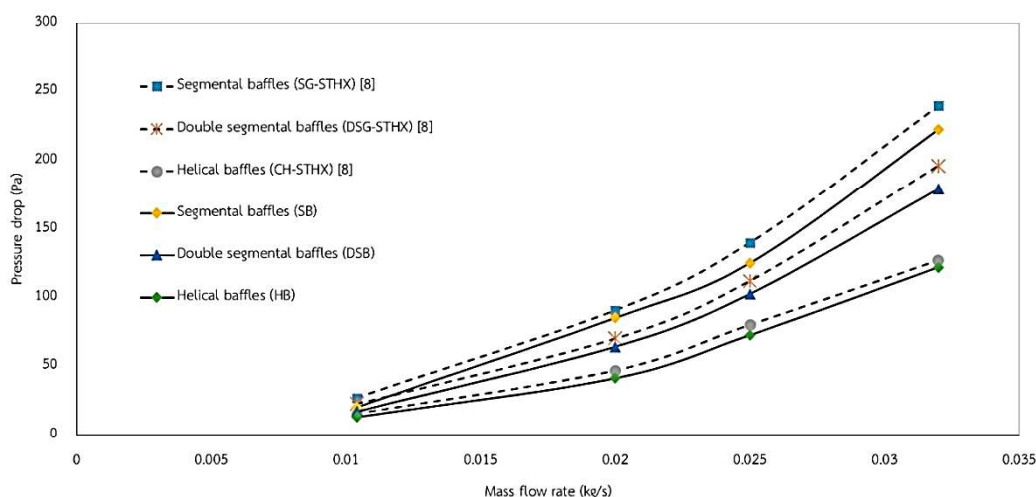
ชนิดของแผ่นกั้น	$\dot{Q}_c$, kW	A_s , m ²	U, kW/m ² K
SB	312.31	2.41	13.07
DSB	251.91	2.41	8.93
HB	387.89	2.44	14.57

จากการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน จะเห็นได้ว่า ค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน และค่า ΔT_{lm} ส่งผลต่อค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อน โดยแผ่นกั้นแบบ HB จะมีค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนมากที่สุด ตามด้วย แผ่นกั้นแบบ SB และแผ่นกั้นแบบ DSB

3.4 การตรวจสอบ (Validation)

ผลการคำนวณที่ได้จะนำไปเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Pranita B. et al. [9] เพื่อดูแนวโน้มของ

ระบบที่ใช้ทดลองกับระบบของงานวิจัยอื่นที่มีเงื่อนไขไม่แตกต่าง โดยพบว่า แนวโน้มของแผ่นกั้นแบบ SB แบบ DSB และแบบ CH ไปในทิศทางเดียวกัน คือ เมื่ออัตราการไหลเชิงมวลเพิ่มขึ้นจะทำให้ค่าความดันลดเพิ่มขึ้นและมีค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละ 4.54, 6.46 และ 7.83 ตามลำดับ ดังนั้น เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนชนิดเปลือกและท่อสามารถทดแทนระบบ VRU ได้



ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างความดันลดกับอัตราการไหลเชิงมวล

4. บทสรุป

จากการคำนวณพลศาสตร์ของของไหลภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน พบว่า Stream line ของของไหลขึ้นอยู่กับชนิดและทิศทางของแผ่นกั้น

เนื่องจากลักษณะของแผ่นกั้นส่งผลต่อลักษณะการไหลวนของของไหลภายในเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน ซึ่งทำให้เกิดการอันของของไหลและการไหลวนกลับ ซึ่งทั้งสองอย่างนี้จะส่งผลกับ

ค่าความดันลด โดยแผ่นกั้นแบบ HB จะมีค่าความดันลดต่ำที่สุด ตามด้วยแผ่นกั้นแบบ DSB และแผ่นกั้นแบบ SB และจากการเปลี่ยนชนิดของแผ่นกั้น จะได้ค่าอุณหภูมิขาออกของของไหลทั้งสองชนิดและการหาค่าอัตราการถ่ายเทความร้อนสามารถหาได้จากผลต่างของอุณหภูมิของของไหลชนิดใดชนิดหนึ่ง ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับค่า c_p และค่าอัตราการไหลเชิงมวล ซึ่งจะส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน นอกจากนี้ ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนสามารถหาได้จากค่าอัตราการถ่ายเทความร้อน ที่พื้นที่หน้าตัดเท่ากัน ค่าสัมประสิทธิ์การถ่ายเทความร้อนของแผ่นกั้นแบบ SB จะมีค่าสูงกว่าของแผ่นกั้นแบบ DSB และเมื่อตรวจสอบแนวโน้มของระบบที่ใช้ทดลองกับระบบของงานวิจัยอื่นที่มีเงื่อนไขเหมือนกัน พบว่า แผ่นกั้นแบบ SB แบบ DSB และแบบ CH มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันและมีค่าความคลาดเคลื่อนร้อยละ 4.54, 6.46 และ 7.83 ตามลำดับ

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยฉบับนี้ได้รับความอนุเคราะห์ข้อมูลจาก บริษัท ปตท.จำกัด (มหาชน) สำนักงานพระโขนง กรุงเทพมหานคร และผลงานวิจัยฉบับนี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนวิจัยจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

6. เอกสารอ้างอิง

[1] ทศพล ขาวน้อย, ฉัตรชัย เบญจปิยะพร, จุฬารักษ์ เบญจปิยะพร. การหาแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดในการออกแบบสร้างอุปกรณ์ต้นแบบเพื่อใช้ในการทดแทนระบบเครื่องควบคุมไอระเหย่น้ำมันโดยใช้พลศาสตร์ของไหลเชิง

คำนวณในการวิเคราะห์. ขอนแก่น: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น; ม.ป.ป.

- [2] Yunus AC. Heat and mass transfer a practical approach. 5th edition: McGraw-Hill; 2015.
- [3] เครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน. [อินเทอร์เน็ต]. ม.ป.ป. [เข้าถึงเมื่อ 1 พ.ค. 2561]. จาก: <http://eng.sut.ac.th/me/2014/laboratory/document/HeatExchanger.pdf>
- [4] Bell KJ. Heat exchanger design for the process industries. transactions of the ASME, Trans. ASME J Heat Tran. 2004; 126 (6):877-85.
- [5] Lutch J, Nemcansky J. Performance improvement of tubular heat exchangers by helical baffles. Chem Eng Res Des. 1990; 68(3):263-70.
- [6] Master BI. Heat exchanger. United States: US 6827138 B1, 2004.
- [7] Lei YG, He YL, Gao YF. Effects of baffle inclination angle on flow and heat transfer of a heat exchanger with helical baffles. Chem Eng Process. 2008; 36(2):2336-45.
- [8] Anas EM. Numerical comparison of shell side performance for shell and tube heat exchangers with trefoil-hole helical and segmental baffles. Appl Therm Eng 2016;109:175-85.
- [9] Bichkar P, Dandgaval O, Dalvi P, et al. Study of shell and tube heat exchanger with the effect of types of baffles. Procedia Manufacturing. 2018; 20:195-200.

- [10] Zena KK, Muna SK, Adel YAH. CFD study for cross flow heat exchanger with integral finned tube. Int J Sci Res Publ. 2016; 6(6):668-77.
- [11] Intanon N, yawara P, Suriyapa C, et al. Rolling sliding fatigue of Hard-chrome surface. UTK Res J. 2017; 12(1):112-18.

ระเบียบวิธีทางคอมพิวเตอร์สำหรับการมองเห็นสีของการคั่วเมล็ดกาแฟโดยใช้โอเพนซีวี
Computational method for color vision of coffee bean roasting
using openCV

ชัยณรงค์ วิเศษศักดิ์วิชัย^{1*}, ประเสริฐ เผ่าชู²,
เอกพล อนสุเรนทร์¹, ชุติกาญจน์ กมลขันติธร¹, วินัย เมธาวิตต์¹
Chainarong Wisassakwichai^{1*}, Prasert Phaochoo²,
Ekkapol Anusurain¹, Choosak Kamonkhantithorn¹, Winai Methavithit¹

¹สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

²สาขาวิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

¹Division of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep

²Division of Mathematics, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Krungthep

*Corresponding author. Tel.: 08 1343 7693 E-mail: chainarong.w@mail.rmutk.ac.th

บทคัดย่อ

การพัฒนาซอฟต์แวร์สำหรับระบบคอมพิวเตอร์วิทัศน์ ให้มีความอิสระต่อคอมพิวเตอร์แพลตฟอร์ม สามารถทำได้สำเร็จโดยการใช้ภาษาการโปรแกรมที่เหมาะสม บทความนี้จึงได้นำเสนอ ระเบียบวิธีทางคอมพิวเตอร์สำหรับการมองเห็นสีของการคั่วเมล็ดกาแฟ ใช้ทรัพยากรเปิดของภาษาการโปรแกรมซีพลัสพลัส ภาพดิจิทัลจะถูกปฏิบัติการประมวลผลบนไฟล์ข้อมูลภาพบันทึกอยู่ในหน่วยความจำสำรองของระบบคอมพิวเตอร์ วัตถุเชิงโปรแกรมของไฟล์ข้อมูลภาพถูกสร้างขึ้นด้วยไลบรารีของโอเพนซีวี (OpenCV, open source computer vision library) โดยใช้ปริภูมิสีแบบเอชเอสวี (HSV, hue-saturation-value color space) โดยที่ช่องสีต่าง ๆ จะแยกออกอยู่ในหน่วยวัตถุของการโปรแกรมเชิงวัตถุ การปรับเท่าฮิสโตแกรมจะดำเนินการบนหน่วยวัตถุที่เลือกสำหรับการแผ่ขยายค่าความเข้ม ก่อนที่ทั้งหมดจะถูกจำลองด้วยการแจกแจงความน่าจะเป็นไม่ต่อเนื่องของความเข้มสีน้ำเงิน สีเขียว และสีแดง ตัวแทนสีเชิงตัวเลขของเมล็ดกาแฟจะถูกกำหนดด้วยค่าคาดหวังและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปรสุ่ม โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นสามารถปฏิบัติการได้ทั้งเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลและคอมพิวเตอร์บอร์ดเดียวแบบราสเบอร์รี่พาย ที่ใช้ระบบปฏิบัติการวินโดวส์และใช้ระบบปฏิบัติการลินุกซ์ ตามลำดับ

คำสำคัญ: คอมพิวเตอร์วิทัศน์ การประมวลผลภาพดิจิทัล วัตถุเชิงโปรแกรม ปริภูมิสีแบบเอชเอสวี การปรับเท่าฮิสโตแกรม การแจกแจงความน่าจะเป็น ค่าคาดหวัง ตัวแปรสุ่ม

Received 24-04-2019
Revised 17-06-2019
Accepted 24-06-2019

Abstract

Development of software for computer vision system which does not depend upon computer platforms can be accomplished by appropriate programming language. This paper presents the computational method for color vision of coffee bean roasting using the open source of C++ programming language. Digital image processing is performed on the image file recording in secondary memory unit of computer system. The programmatic object of image file is created by the library of OpenCV (open source computer vision) using HSV (hue-saturation-value) color space where the color channels separate into the instances of object-oriented programming. The histogram equalization operates on selected instance for intensity stretching before all of them are modeled with discrete probability distribution of color intensity in red green and blue. The numerical color representations of roast coffee beans are determined by expected values and standard deviation of random variables. The developed program can execute in both personal computer and Raspberry Pi computer single board with Windows and Linux operating system respectively.

Keywords: Computer vision, Digital image processing, Programmatic object, HSV color space, Histogram equalization, Probability distribution, Expected value, Random variables

1. บทนำ

การประมวลผลภาพดิจิทัลให้อาตรพุตเป็นข้อมูลเข้าสู่กระบวนการแปลความหมายเพื่อคอมพิวเตอร์จะมีความสามารถเห็นความแตกต่างของวัตถุ จำแนกประเภท ตลอดจนสามารถจัดเรียงวัตถุได้ตามขนาด ทั้งหมดนับได้เป็นกระบวนการทำงานของระบบคอมพิวเตอร์วิทัศน์ ดังจะพบได้ในการควบคุมหุ่นยนต์งานอุตสาหกรรมแบบเลือกและวาง (pick and place) ได้ใช้คอมพิวเตอร์วิทัศน์ในการกำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่ [1] ในที่ซึ่งกล้องจะถูกติดตั้งไว้หน้าพื้นที่ทำงาน เพื่อเชื่อมโยงภาพเข้ากับโปรแกรมประมวลผลภาพ การรู้จำวัตถุ เพื่อถ่ายโอนวัตถุจากระบบพิกัดของจุดภาพไปเป็นระบบพิกัดทำงานจริง แต่สำหรับงานทางด้านประเมินคุณภาพอาหารได้มีการแบ่งเป็นลำดับขั้นการทำงานตั้งแต่ [2-3]

การจัดหาภาพ การประมวลผลเบื้องต้น การแยกบริเวณภาพ การเลือกหรือการสกัดลักษณะสมบัติเฉพาะ และการจัดประเภท ภาพดิจิทัลถูกจำลองในลักษณะแถวลำดับ 2 มิติ ของความเข้มสีกำหนดค่าเชิงตัวเลข $f(x, y)$ เมื่อคู่อันดับของจำนวนเต็ม (x, y) คือพิกัดเชิงพื้นที่ (Spatial coordinate) ของจุดภาพ [4] การวิเคราะห์สีของอาหารเพื่อกำหนดคุณภาพ จะมีการแยกภาพดิจิทัลออกเป็นช่องสีในปริภูมิเอชเอสวี [5-6] ทำให้สามารถกำหนดเส้นแบ่งเขต (Threshold) ในช่องสีส่วนประกอบของปริภูมิสีเพื่อให้เกิดการแยกบริเวณสี (Color segmentation) สำหรับการจัดส่วนพื้นหลังจากส่วนบริเวณภาพที่ต้องการวิเคราะห์ภาพดิจิทัลซึ่งมีจำนวนจุดภาพ N จุดและความเข้มสีกำหนดเชิงตัวเลขอยู่ในช่วงปิด $f_k(x_i, y_j) \in [0, L]$ เมื่อ $k = 0, 1, 2, \dots, L$

ขณะที่ $i, j \in [0, N-1]$ จะสามารถคำนวณค่าฮิสโตแกรมได้ในลักษณะ

$$h(f_k) = \sum_{n=1}^{n_k} 1$$

เมื่อ n_k คือจำนวนจุดภาพที่มีความเข้มสีกำหนดค่าเชิงตัวเลขเท่ากับ $f_k \triangleq f_k(x_i, y_j)$ Laurent และคณะ [7] แยกภาพดิจิทัลออกเป็นช่องสีเพื่อคำนวณฮิสโตแกรม ซึ่งพบว่าการประมวลผลภาพโดยใช้ฮิสโตแกรมสี มีแบบรูปการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญสัมพันธ์กับความยากในการปรุงสุกของเมล็ดถั่วแขก

เป้าหมายของงานในที่นี้คือ พัฒนาระเบียบวิธีทางคอมพิวเตอร์กำหนดค่าสีตัวแทนของภาพเมล็ดกาแฟจากการคั่ว โดยใช้ค่าคาดหมายและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของตัวแปรสุ่ม บ่งชี้ภาพสีตัวแทนที่สามารถนำไปใช้ในการเปรียบเทียบกับค่าสีระดับของการคั่วกำหนดไว้ก่อน สำหรับการพัฒนากระบวนการคอมพิวเตอร์วิทัศน์ของการคั่วเมล็ดกาแฟได้ทั้งบนเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคลที่ใช้ระบบปฏิบัติการวินโดวส์ และคอมพิวเตอร์บอร์ดเดียวแบบราสเบอร์รี่พายที่ใช้ระบบปฏิบัติการลินุกซ์

1.1 หลักการที่เกี่ยวข้อง

การวางมาตรฐานทางสีของ CIE (Commission internationale de l'Eclairage) ได้กำหนดสามสีปฐมภูมิโดยใช้ค่าความยาวคลื่นได้แก่ 435.8 , 546.1 และ 700 nm สำหรับ สีน้ำเงิน สีเขียว และสีแดงตามลำดับ

1.1.1 ปริภูมิสี

ปริภูมิสีอาร์จีบี (RGB color space) เป็นลูกบาศก์หนึ่งหน่วยที่แต่ละแกนพิกัดคือสีปฐมภูมิเรียงลำดับสีแดง สีเขียว และ สีน้ำเงิน จุดสีดำคือตำแหน่งของจุดกำเนิด จุดภายในลูกบาศก์คือสี

ต่าง ๆ กำหนดจากพิกัดค่าสีปฐมภูมิที่จุดนั้น กรณีที่ใช้เลขฐาน 2 จำนวน 8 บิต ในแต่ละสีปฐมภูมิ สีแดงสว่าง (Bright red) มีพิกัด (255, 0, 0) สีเขียวสว่าง (Bright green) มีพิกัด (0, 255, 0) และสีน้ำเงินสว่าง (Bright blue) มีพิกัด (0, 0, 255) แนวเส้นทแยงจากจุด (0, 0, 0) ไปยัง (255, 255, 255) คือโทนสีเทา (Grey scale) สำหรับภาพขนาด $m \times n$ ที่จุดใด ๆ ในปริภูมิอาร์จีบีสามารถส่งไปยังแนวเส้นทแยงโทนสีเทาด้วยภาพฉายของเวกเตอร์สามมิติ

$$gray = [r \ g \ b] [1/\sqrt{3} \ 1/\sqrt{3} \ 1/\sqrt{3}]^T$$

เมื่อจำนวนเต็ม $r, g, b \in [0, 255]$ คือพิกัดสีในปริภูมิ ทำการปรับขนาดโทนสีเทา $gray$ ให้อยู่ในช่วงปิด $[0, 255]$ ดังนี้

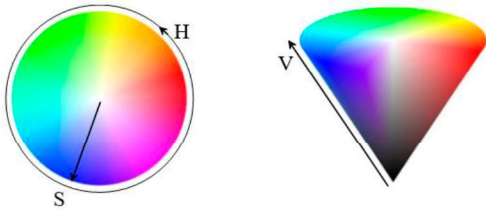
$$Gray = gray(\frac{255}{255\sqrt{3}}) = \frac{1}{\sqrt{3}} gray$$

ดังนั้นจึงสามารถคำนวณโทนสีเทา $Gray \in [0, 255]$ ให้กับพิกัดสีในปริภูมิสีอาร์จีบีได้ด้วยสูตร

$$Gray = \frac{R + G + B}{3}$$

เมื่อ $Gray, R, G$ และ B คือเมทริกซ์ขนาด $m \times n$ โดยให้สัญลักษณ์อักษร mat แสดงถึงเมทริกซ์ทั้ง 4 นี้ และ $\langle mat \rangle_{ij}$ คือสมาชิกตำแหน่งใด ๆ ที่นิยามค่าจำนวนเต็มในช่วง $\langle mat \rangle_{ij} \in [0, 255]$

ปริภูมิสีเอชเอสบีวี (HSV color space) เป็นปริภูมิที่มี 3 ช่องสี (Channels) เช่นเดียวกับ ปริภูมิสีอาร์จีบีที่ประกอบด้วยช่องสีแดง ช่องสีเขียว และช่องสีน้ำเงิน แต่ปริภูมิเอชเอสบีวีจะประกอบด้วย ช่องเนื้อสี (hue; H) ช่องความอิ่มตัวของสี (Saturation; S) ช่องค่าความสว่างของแสง (Value; V) ซึ่งจัดเป็นช่องการมองเห็นสีสอดคล้องกับมนุษย์มากกว่าปริภูมิอาร์จีบี ด้วยเพราะมนุษย์ใช้ความสว่างของแสงในการจำแนกโทนสี ดังแสดงในภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ปริภูมิสีเอชเอสวี

สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริภูมิสีอาร์จีบีกับปริภูมิสีเอชเอสวีได้แก่ [8]

$$v = \max(r, g, b)$$

$$s = \begin{cases} \frac{v - \min(r, g, b)}{v} & \text{if } v \neq 0 \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

$$h = \begin{cases} \frac{60(g-b)}{v - \min(r, g, b)} & \text{if } v = r \\ 120 + \frac{60(b-r)}{v - \min(r, g, b)} & \text{if } v = g \\ 240 + \frac{60(r-g)}{v - \min(r, g, b)} & \text{if } v = b \end{cases}$$

$$h \leftarrow h + 360 \text{ if } h < 0$$

เมื่อ $0 \leq r, g, b \leq 1$ คือพิกัดสีในปริภูมิสีอาร์จีบี (ปรับขนาด) และ h, s และ v คือพิกัดสีในปริภูมิสีเอชเอสวี

1.1.2 ฮีสโตแกรมของภาพดิจิทัล

ภาพดิจิทัลโทนสีเทาที่ใช้เลขฐาน 2 จำนวน 8 บิต จะแสดงค่าระดับความเข้มโทนสีเทาได้ 256 ระดับ มีผลรวมค่าฮีสโตแกรมทุกระดับคือ

$$\sum_{k=0}^{255} h(f_k) = \sum_{k=0}^{255} \sum_{n=1}^{n_k} 1 = \sum_{k=0}^{255} n_k$$

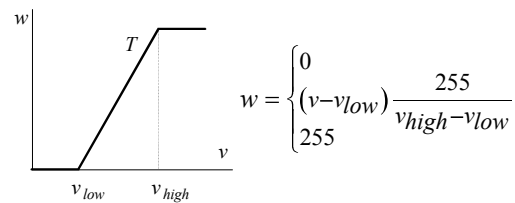
ในกรณีภาพมีขนาด $m \times n$ ผลรวมค่าฮีสโตแกรมทุกระดับจึงเท่ากับจำนวนจุดภาพทั้งหมดหรือ

$$\sum_{k=0}^{255} n_k = mn$$

โดยการกระจายตัวของฮีสโตแกรมในระนาบ xy ($x=k, y=h$) จะส่งผลต่อภาพปรากฏ การแผ่ขยายกราฟฮีสโตแกรมที่รวมกลุ่มอยู่ในช่วงระดับความเข้มหนึ่งออกไป จะส่งผลให้การเปรียบเทียบ (Contrast) ของภาพปรากฏดีขึ้น การแผ่ขยายกราฟฮีสโตแกรมสามารถทำได้โดยการแปลงค่าระดับความเข้ม

$$w = T(v)$$

เมื่อ w และ v คือระดับความเข้มโทนสีเทาของภาพใหม่และเดิมตามลำดับ การแปลงค่าระดับความเข้มดังภาพที่ 2 คือการปรับเปรียบเทียบแบบอัตโนมัติ (Automatic contrast adjustment) [9]



ภาพที่ 2 การแปลงค่าระดับความเข้มแบบการปรับเปรียบเทียบแบบอัตโนมัติ

2. วิธีดำเนินการวิจัย

ในอุตสาหกรรมเกี่ยวข้องกับกาแฟ ยังขาดการกำหนดคำศัพท์เฉพาะเป็นข้อตกลงร่วมกันในการกำหนดระดับของเมล็ดกาแฟคั่ว ทำให้เกิดความสับสนในกลุ่มของนักคั่วกาแฟและผู้บริโภค อย่างไรก็ตามมีการแบ่งระดับการคั่วออกเป็น 6 ระดับได้แก่ [10] Cinnamon, City, Full city, Vienna, French และ Italian การให้ความร้อนเมล็ดกาแฟโดยการคั่ว

จะทำให้สีของเมล็ดกาแฟเปลี่ยนแปลง นำไปสู่การจัด
ระดับของการคั่วเมล็ดกาแฟดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ระดับสีการคั่วเมล็ดกาแฟ (ที่มา : Dan
Bollinger - Own work, CC BY-SA 3.0, <https://commons.wikimedia.org>)

2.1 ตัวแปรหน่วยความจำภาพเมล็ดกาแฟคั่ว

ปริภูมิสีอาร์จีบีถูกใช้ในการแสดงผลภาพสี
บนจอภาพคอมพิวเตอร์ ดังนั้นภาพเมล็ดกาแฟคั่ว
ขนาด $m \times n$ จุดภาพจะต้องใช้เมทริกซ์ mat ตาม
ขนาดภาพ จำนวน 3 เมทริกซ์สำหรับช่องสี R , G และ
 B ทำให้ภาพเมล็ดกาแฟคั่วเขียนได้ในลักษณะ
เมทริกซ์แต่งเติม (Augmented matrix) ดังนี้

$$^{RGB}Mat = [R : G : B]$$

ค่าระดับความเข้มสีในช่องสีใด ๆ เช่นช่องสี
 R จึงจะเขียนแทนด้วย

$$\left\langle ^{RGB}Mat.R \right\rangle_{ij} = r$$

เมื่อ r คือระดับความเข้มสีในช่องสี R การสร้าง
ตัวแปรหน่วยความจำสำหรับเมทริกซ์ Mat โดยภาษา
การโปรแกรมซีพลัสพลัส ประกอบพร้อมกับไลบรารี

ของโอเพนซีวี [11] ที่เป็นแบบทรัพยากรเปิดจะมี
ลักษณะข้อความสั่งดังต่อไปนี้

```
Mat CofRstImg =  
    Imread(RstBean.jpg);
```

เมื่อ Mat คือวัตถุเชิงโปรแกรมของโอเพนซีวี
 $CofRstImg$ คือชื่อตัวแปรหน่วยความจำตั้งขึ้น
สำหรับหน่วยวัตถุข้อมูลภาพในปริภูมิสีอาร์จีบี และ
 $RstBean.jpg$ คือไฟล์ข้อมูลภาพเมล็ดกาแฟคั่ว
ถ้าให้ $r = 127$ แล้ว $\langle Mat.R \rangle_{ij}$ ดังสมการข้างต้นจะ
เขียนเป็นข้อความสั่งได้ดังนี้

```
CofRstImg.at<Vec3b>(i,j)[3]=127;
```

2.2 การปรับเท่าฮิสโตแกรม

ภาพดิจิทัลเมล็ดกาแฟคั่วเดียวกัน ถ่าย
ในสภาพแสงที่ต่างกัน สามารถส่งผลกระทบต่อระบบ
คอมพิวเตอร์วิทัศน์ในการตัดสินใจระดับสีที่ไม่
เหมือนกันซึ่งนับเป็นข้อด้อย ดังนั้นเพื่อลดความไว
แสงของเหตุการณ์นี้จึงทำการปรับเท่าฮิสโตแกรม
ให้กับช่องค่าความสว่างของแสง ของภาพเมล็ดกาแฟ
คั่วในปริภูมิเอชเอสวี ในการนี้จะประยุกต์ใช้ฟังก์ชัน
การแจกแจงสะสม (Cumulative distribution
function) แปลงค่าระดับความเข้ม [12]

$$w = T(v) = \int_0^v p_v(s) ds \quad 0 \leq v \leq 1$$

เมื่อ s คือตัวแปรหุ่น (Dummy variable)
ของการหาปริพันธ์ $p_v(v)$ คือฟังก์ชันความหนาแน่น
ของความน่าจะเป็น (Probability density
function) ที่การแปลงมีสมบัติ $0 \leq T(v) \leq 1$ เป็น
ฟังก์ชันค่าเดียวและเพิ่มขึ้นทางเดียว ทำให้

ความหนาแน่นของความน่าจะเป็นของความเข้มใหม่เป็นแบบเอกรูป

$$p_w(w) = \left[p_v(v) \frac{dv}{dw} \right]_{v=T^{-1}(w)} = 1$$

สำหรับการปรับเท่าฮิสโตแกรม ซึ่งในงานวิจัยนี้ $p_v(v)$ ไม่ต่อเนื่องและคำนวณค่าจาก

$$p_v(v_k) = \frac{n_k}{mn}$$

เมื่อ $p_v(v_k)$ คือการแจกแจงความน่าจะเป็น (Probability distribution) ของตัวแปรสุ่ม v_k ทำให้ต้องกำหนดสมการแปลงค่าระดับความเข้มในรูปปริพันธ์ข้างต้นใหม่เป็น

$$w_{v_k} = T(v_k) = \sum_{j=0}^{v_k} \frac{n_j}{mn} = \sum_{j=0}^{v_k} p_v(v_j)$$

ทำการแปลงปริภูมิสีอาร์จีบี เป็นปริภูมิสีเอชเอสวีที่เขียนแทนด้วย

$$^{HSV}Mat \leftarrow ^{RGB}Mat$$

เมื่อ ^{HSV}Mat คือเมทริกซ์แต่งเติมสำหรับช่องสี H, S และ V

$$^{HSV}Mat = [H : S : V]$$

ทำการเขียนฮิสโตแกรมของช่องค่าความสว่างของแสงในรูปเมทริกซ์แถวดังนี้

$$H(^{HSV}Mat.V) = [n_0 \ n_1 \ n_2 \dots n_k \dots n_{255}]$$

เมื่อ n_k คือค่าฮิสโตแกรม $h(f_k)$ ทำให้สามารถคำนวณเมทริกซ์การแจกแจงความน่าจะเป็น

$$P = \frac{H(^{HSV}Mat.V)}{mn} = [p_0 \ p_2 \ p_3 \dots p_k \dots p_{255}]$$

จึงคำนวณค่าจำนวนเต็มระดับความเข้มใหม่จาก

$$\langle V' \rangle_{ij} = w_{\langle V \rangle_{ij}} = 255 \times \sum_{k=0}^{\langle V \rangle_{ij}} \langle P \rangle_k$$

โดยที่จำนวนเต็ม $\langle V' \rangle_{ij} \in [0, 255]$ สำหรับการปรับปรุงภาพดิจิทัลใหม่

$$^{HSV}Mat' = [H : S : V'] \leftarrow ^{HSV}Mat = [H : S : V]$$

ซึ่งสามารถดำเนินงานด้วยไลบรารีของโอเพนซีวีด้วยความสั่ง

`equalizeHist(src, dst);`

เมื่อ `src` คือ $^{HSV}Mat.V$ และ `dst` คือ

$$^{HSV}Mat'.V'$$

2.3 คำนวณสีเมสติกภาพด้วยค่าทางสถิติ

ด้วยมุมมองการกระจายตัวค่าระดับความเข้มสีในภาพดิจิทัลคือตัวแปรสุ่มที่มีการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบไม่ต่อเนื่อง คำนวณค่าได้ดังนี้

$${}^{RGB}Mat' = [R' : G' : B'] \leftarrow {}^{HSV}Mat' = [H : S : V']$$

$$P_r = \frac{H({}^{RGB}Mat'.R')}{mn}$$

$$P_g = \frac{H({}^{RGB}Mat'.G')}{mn}$$

$$P_b = \frac{H({}^{RGB}Mat'.B')}{mn}$$

เมื่อ P_r , P_g และ P_b คือการแจกแจงความน่าจะเป็นไม่ต่อเนื่องของระดับความเข้มสีแดง สีเขียว และสีน้ำเงินตามลำดับ นำไปสู่ค่าคาดหวังของแต่ละสีปฐภูมิ โดยการกำหนดให้ L คือเมทริกซ์แถวของระดับความเข้มสี

$$L = [0 \ 1 \ 2 \ \dots \ k \ \dots \ 255]$$

ค่าคาดหวังจึงคำนวณด้วยสูตร

$$E_r = P_r L^T, \ E_g = P_g L^T \text{ และ } E_b = P_b L^T$$

ภาพสีตัวแทนของภาพเมล็ดกาแฟคั่ว ${}^{RGB}Mat^*$ จะคำนวณได้โดย

$$\left\langle {}^{RGB}Mat^*.R \right\rangle_{ij} = E_r \quad \forall i, j$$

$$\left\langle {}^{RGB}Mat^*.G \right\rangle_{ij} = E_g \quad \forall i, j$$

$$\left\langle {}^{RGB}Mat^*.B \right\rangle_{ij} = E_b \quad \forall i, j$$

$${}^{RGB}Mat^* = [R : G : B]$$

ซึ่งมีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานแต่ละช่องสีดังนี้

$$S_r = \sqrt{P_r D_r (L - E_r I_R)^T}$$

$$S_g = \sqrt{P_g D_g (L - E_g I_R)^T}$$

$$S_b = \sqrt{P_b D_b (L - E_b I_R)^T}$$

เมื่อเมทริกซ์ทแยงมุม D_k คือ

$$D_k \Big|_{k=r,g,b} = \begin{bmatrix} 0-E_k & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 1-E_k & 0 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 2-E_k & 0 & \dots & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3-E_k & \dots & 0 \\ & & & \vdots & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 255-E_k \end{bmatrix}$$

และ I_R คือเมทริกซ์แถว $I_R = [1 \ 1 \ 1 \ \dots \ 1 \ \dots \ 1]_{1 \times 256}$ ทั้งค่าคาดหวังและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานสามารถคำนวณได้ด้วยข้อความสั่งที่ใช้ฟังก์ชันของไลบรารีของโอเพนซีวีดังนี้

meanStdDev(srcRGB, Ergb, Srgb);

เมื่อ srcRGB คือหน่วยวัตถุเชิงโปรแกรมข้อมูลภาพสำหรับ ${}^{RGB}Mat' = [R' : G' : B']$ โดยที่ Ergb และ Srgb คือตัวแปรหน่วยความจำแถวลำดับของค่าคาดหวัง E_r , E_g , E_b และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน S_r , S_g , S_b

2.4 ขั้นตอนวิธีคำนวณตัวแทนสีภาพเมล็ดกาแฟคั่ว

การวัดระดับเมล็ดกาแฟคั่วว่าอยู่ระดับใดในทางปฏิบัติได้มีการใช้แผ่นวัสดุสีเทียบการคั่ว (Roast color tiles) มีระดับสีแสดงดังภาพที่ 4 [13]



ภาพที่ 4 แผ่นวัสดุสีเทียบการคำนวณสีดกภาพ

จากภาพจะสังเกตได้ว่ามีทั้งหมด 8 ระดับ โดยระดับที่เข้มที่สุดเป็นระดับ Italian/Spanish หมายความว่าแผ่นวัสดุเทียบสีการคำนวณ มีสีระดับการคำนวณเข้มมากกว่าก่อนหน้านี้ 2 ระดับ

```

input(RGB Mat = [R : G : B], m, n, L, Dr, Dg,
      Db, IR)
HSV Mat = [H : S : V] ← RGB Mat = [R : G : B]
equalizeHist(HSV Mat)
RGB Mat' = [R' : G' : B'] ← HSV Mat' = [H : S : V']
meanStdDev(RGB Mat')

```

ภาพที่ 5 ขั้นตอนวิธีคำนวณตัวแทนสีภาพเมื่อดำเนินการ

ขั้นตอนวิธีในภาพที่ 5 ถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้คอมพิวเตอร์ทำการคำนวณค่าตัวแทนสี ของภาพเมื่อดำเนินการ E_r , E_g และ E_b พร้อมทั้งค่าส่วนเบี่ยงมาตรฐาน ซึ่งค่าตัวแทนสีนำไปสร้างภาพดิจิทัล $^{RGB}Mat^* = [R : G : B]$ ของภาพเมื่อดำเนินการได้โดยมีขั้นตอนวิธีสำหรับฟังก์ชัน *equalizeHist* และ *meanStdDev* แสดงดังภาพที่ 6 และ 7

```

input(HSV Mat)
HSV Mat' = [H : S : V'] ← HSV Mat = [H : S : V]
P =  $\frac{H(\sup{HSV} Mat.V)}{mn}$ 
for i = 0 to m step 1
  for j = 0 to n step 1
     $\langle \sup{HSV} Mat.V' \rangle_{ij} = 255 \times \sum_{k=0}^{\langle \sup{HSV} Mat.V \rangle_{ij}} \langle P \rangle_k$ 
  end for
end for

```

ภาพที่ 6 ขั้นตอนวิธีคำนวณ *equalizeHist*

```

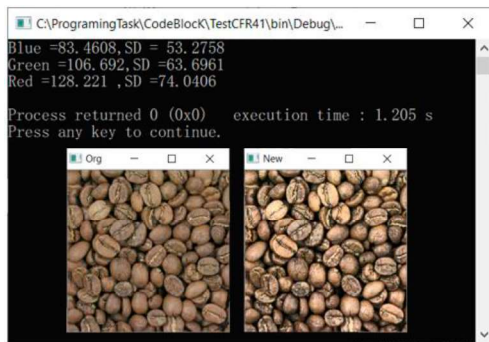
input(RGB Mat')
for i = r, g, b according to I = R, G, B
  Pi =  $\frac{H(\sup{RGB} Mat'.I)}{mn}$ 
  Ei = Pi LT
  Si =  $\sqrt{P_i D_i (L - E_i I_R)^T}$ 
end for

```

ภาพที่ 7 ขั้นตอนวิธีคำนวณ *meanStdDev*

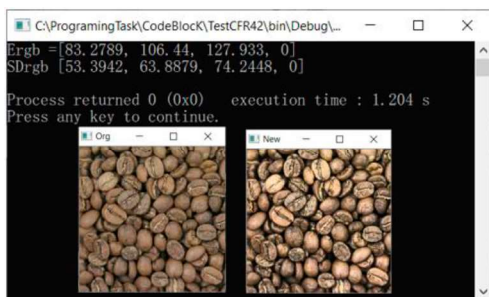
3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

เมื่อนำขั้นตอนวิธีที่สร้างขึ้นในภาพที่ 5 ไปพัฒนาโปรแกรม ด้วยภาษาการโปรแกรมซีพลัสพลัส จะมีลักษณะดังภาพที่ ก.1 ในภาคผนวก ก. และใช้ภาพดิจิทัลของเมื่อดำเนินการในภาพที่ 3 ที่ระดับค่า Cinnamon บันทึกอยู่ในหน่วยความจำสำรอง ของระบบคอมพิวเตอร์ใช้ชื่อไฟล์ “Cinnamon.png” สำหรับเป็นข้อมูลเข้าให้กับขั้นตอนวิธีคำนวณตัวแทนสีภาพเมื่อดำเนินการ ผลการทำงานของโปรแกรมแสดงดังภาพที่ 8 ได้ค่าตัวแทนสีแดง 128.2210 ค่าตัวแทนสีเขียว 106.6920 และ ค่าตัวแทนสีน้ำเงิน 83.4608



ภาพที่ 8 ผลการทำงานของโปรแกรมคำนวณ
ตัวแทนสีภาพเมล็ดกาแฟจากรุ่นต้นวิธีในภาพที่
5 - 7

ภาพเมล็ดกาแฟคั่วระดับ Cinnamon ทาง
ซ้ายของภาพที่ 8 เป็นภาพดั้งเดิมที่ยังไม่ปรับเท่า
ฮิสโตแกรมส่วนทางขวาปรับเท่าฮิสโตแกรมแล้วจึง
นำเข้าสู่การคำนวณค่าตัวแทนสี อย่างไรก็ตามผล
การทำงานแบบเดียวกัน แต่ใช้ฟังก์ชันในไลบรารีของ
โอเพนซีวี ปรับเท่าฮิสโตแกรม ตลอดจนคำนวณค่า
คาดหวัง และส่วนเบี่ยงมาตรฐาน แทนที่จะใช้
ขั้นตอนวิธีที่สร้างขึ้นในภาพที่ 6 - 7 ของบทความ
ส่งผลให้การพัฒนาโปรแกรมทำได้ง่ายขึ้นดังโปรแกรม
ในภาพที่ ก.3 (ภาพผนวก ก.) นำไปสู่ผลการทำงานที่
แตกต่างออกไปเล็กน้อยดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 ผลการทำงานของโปรแกรมคำนวณ
ตัวแทนสีภาพเมล็ดกาแฟคั่วโดยใช้ไลบรารีของ
โอเพนซีวี

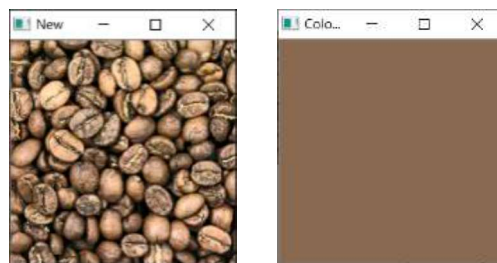
การใช้ฟังก์ชันในไลบรารีของโอเพนซีวี ทำ
ให้ผลตัวแทนสีของเมล็ดกาแฟคั่วระดับ Cinnamon
ในภาพที่ 9 แตกต่างจากภาพที่ 8 ไปเล็กน้อย โดยค่าตัว
แทนสีแดง 127.9330 ค่าตัวแทนสีเขียว 106.4400
และค่าตัวแทนสีน้ำเงิน 83.2789 ทั้งนี้ในการที่จะทำ
ให้ผลการทำงานของโปรแกรม เทียบเคียงได้กับแผ่น
วัสดุสีเทียบการคั่วเมล็ดกาแฟ ดังภาพที่ 4 ค่าตัว
แทนสีจึงถูกแปลงเป็นภาพตัวแทนสีด้วยขั้นตอนวิธีใน
ภาพที่ 10 โดยจะมีผลการทำงานดังภาพที่ 11

```

input( $^{RGB}Mat = [R : G : B]_{m,n}, E_r, E_g, E_b$ )
for i = 0 to m step 1
  for j = 0 to n step 1
    for k = r, g, b according to
       $K = R, G, B$ 
       $\langle ^{RGB}Mat.K \rangle_{ij} = E_k$ 
    end for
  end for
end for

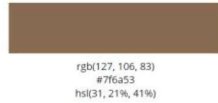
```

ภาพที่ 10 ขั้นตอนวิธีสร้างภาพสีตัวแทนเมล็ดกาแฟคั่ว



ภาพที่ 11 ผลการสร้างภาพสีตัวแทนเมล็ดกาแฟคั่ว

ผลการทำงานของโปรแกรมยังสามารถ
เปรียบ เทียบกับการเฉลี่ยสีของภาพดิจิทัลแบบ
ออนไลน์บนเว็บไซต์ <http://matkl.github.io/average-color/> ซึ่งมีผลการทำงานดังภาพที่ 12



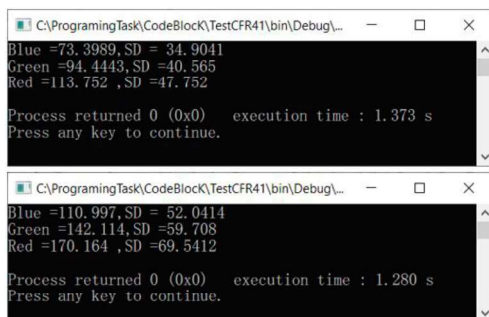
ภาพที่ 12 ผลการเฉลี่ยสีของภาพเมล็ดกาแฟคั่วโดยใช้เว็บไซต์แบบออนไลน์

ผลการเฉลี่ยสีของภาพเมล็ดกาแฟคั่วดังภาพที่ 12 ให้ผลลัพธ์ค่าสีแดง 127 ค่าสีเขียว 106 และค่าสีน้ำเงิน 83 ซึ่งสอดคล้องและใกล้เคียงกันมากกับโปรแกรมที่พัฒนาขึ้น ผลการปรับเท่าฮิสโตแกรมจะส่งผลให้ค่าตัวแทนสีของภาพเดียวกันแต่ให้แสงสว่างไม่เท่ากัน 2 ภาพ มีสภาพคงทนต่อความสว่างของภาพ โดยจะสังเกตได้จากภาพเมล็ดกาแฟคั่วเดียวกัน 2 ภาพ แต่อีกภาพปรับสภาพความสว่างเพิ่มขึ้น 2 เท่า



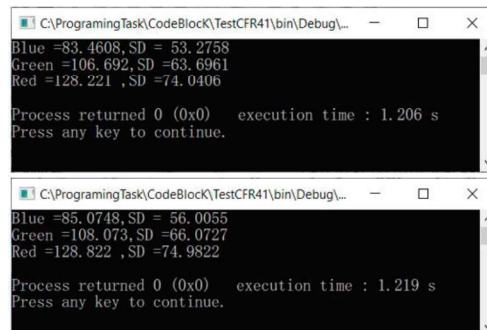
ภาพที่ 13 ภาพเมล็ดกาแฟคั่วเดียวกันปรับความสว่าง ต่างกัน 1 เท่า

จากเดิม ผลการใช้โปรแกรมคำนวณค่าสีตัวแทนเมล็ดกาแฟคั่วทั้ง 2 ภาพดังปรากฏในภาพที่ 13 คือ

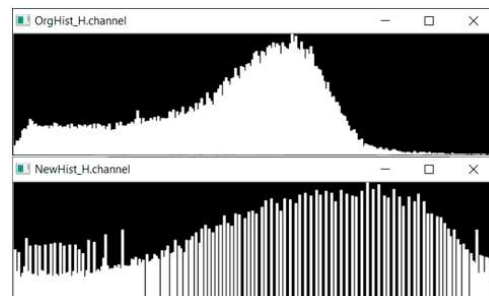


ภาพที่ 14 ผลคำนวณสีตัวแทนภาพเมล็ดกาแฟคั่วความสว่างต่างกัน 1 เท่าที่มีการปรับเท่าฮิสโตแกรม

เห็นได้จากผลการคำนวณในภาพข้างต้นว่า มีความแตกต่างค่าสีตัวแทนแต่ละค่าไม่เกิน 2 หน่วย แต่ในขณะที่ไม่มีการใช้การปรับเท่าฮิสโตแกรม ในขั้นตอนวิธีคำนวณค่าตัวแทนสีภาพเมล็ดกาแฟคั่ว จะได้ผลดังภาพที่ 15 มีความแตกต่างของค่าสีตัวแทนแต่ละสีเกินกว่า 37 หน่วย นอกจากนี้ ในการปรับเท่าฮิสโตแกรมซึ่งส่งผลให้ การกระจายตัวของฮิสโตแกรมของภาพขยายกว้างขึ้น จะสามารถสังเกตได้จากการนำค่าฮิสโตแกรมในช่องค่าความสว่างของแสง V ก่อนและหลังการปรับเท่าฮิสโตแกรมไปวาดกราฟ มีผลดังภาพที่ 16 โดยภาพด้านบนคือภาพฮิสโตแกรมของช่องค่าความสว่างของแสง V ของเมล็ดกาแฟคั่วเดิม ส่วนภาพล่างคือฮิสโตแกรมที่ได้หลังการปรับเท่าฮิสโตแกรมแล้ว

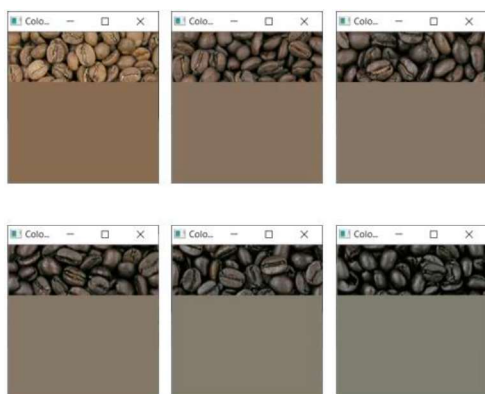


ภาพที่ 15 ผลคำนวณสีตัวแทนภาพเมล็ดกาแฟคั่วความสว่างต่างกัน 1 เท่าไม่มีการปรับเท่าฮิสโตแกรม



ภาพที่ 16 ภาพฮิสโตแกรมก่อนและหลังการปรับเท่าฮิสโตแกรม

เห็นได้ชัดว่าการปรับเท่าฮิสโตแกรมที่ทำให้ค่าฮิสโตแกรมมีการกระจายตัวมากขึ้น ส่งผลให้ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานมีค่าสูงดังผลการทำงานในภาพที่ 14 เมื่อเปรียบเทียบกับผลการทำงานในภาพที่ 15 ที่มีค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำกว่าอย่างเด่นชัด การสร้างภาพสีตัวแทนสี ด้วยระเบียบวิธีทางคอมพิวเตอร์ของบทความนี้สำหรับภาพเมล็ดกาแฟคั่วตามภาพที่ 3 ทั้ง 6 ระดับได้ผลแสดงดังภาพที่ 17 และ 18



ภาพที่ 17 ผลภาพสีตัวแทนเมล็ดกาแฟคั่วโดยปรับเท่าฮิสโตแกรมช่องค่าความสว่างก่อนคำนวณ

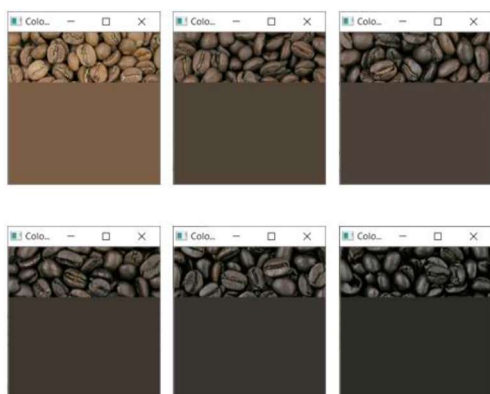
ตารางที่ 1 ผลคำนวณค่าตัวแทนสีภาพเมล็ดกาแฟคั่วปรับเท่าฮิสโตแกรมช่องค่าความสว่างก่อนคำนวณ

ระดับ	ขั้นตอนวิธี	ค่าเฉลี่ยสี	ความแตกต่าง
คั่ว	บทความวิจัย	ของภาพ	
		(ออนไลน์)	
	B	G	R
cnm	83	107	128
cit	96	112	128
Fcit	103	116	128
ven	104	118	128
fre	110	122	127
ita	111	126	126

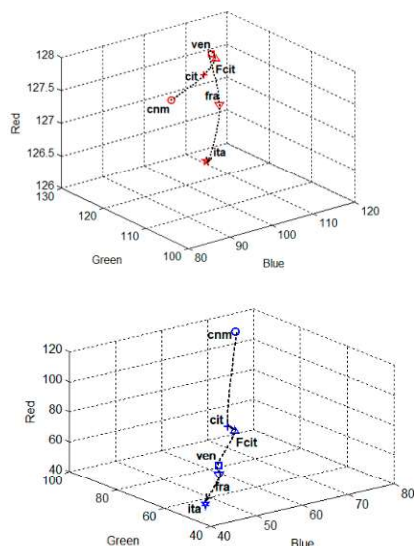
ตารางที่ 2 ผลคำนวณค่าตัวแทนสีภาพเมล็ดกาแฟคั่วไม่ปรับเท่าฮิสโตแกรมช่องค่าความสว่างก่อนคำนวณ

ระดับ	ขั้นตอนวิธี	ค่าเฉลี่ยสี	ความแตกต่าง
คั่ว	บทความวิจัย	ของภาพ	
		(ออนไลน์)	
	B	G	R
cnm	73	94	114
cit	58	68	77
Fcit	59	67	74
ven	51	58	62
fre	50	56	58
ita	43	48	48

ภาพที่เป็นข้อมูลเข้าให้กับขั้นตอนวิธีทางคอมพิวเตอร์ที่สร้างขึ้น ในแต่ละระดับการคั่วถูกปรับขนาดภาพลดลงจาก 800×800 เหลือ 200×200 จุดภาพ และมีการเปรียบเทียบผลการคำนวณกับการคำนวณค่าเฉลี่ยสีของภาพที่ได้จากเว็บไซต์ออนไลน์ ดังแสดงในภาพที่ 12 พบว่ามีระดับค่าตัวแทนใกล้เคียงกันมาก ดังแสดงในตารางที่ 1 - 2 ซึ่งนับเป็นผลการพัฒนาโปรแกรมบนไอดีอี (Integrated development environment; IDE) ที่เป็นแบบทรัพยากรเปิดรู้จักในนาม “CODE::BLOCK” รุ่น 17.12 โดยใช้ตัวแปลโปรแกรม (Compiler) “GNU GCC” บนระบบปฏิบัติการ “Windows 10” ตัวประมวลผล “Intel(R) Core (TM) i7- 8750H CPU@2.2 GHz” นอกจากนี้ยังได้ทดลองปฏิบัติโปรแกรมบนไอดีอีและตัวแปลโปรแกรมเดียวกันบนคอมพิวเตอร์บอร์ดเดียว ราสเบอร์รี่พาย 3 รุ่นปี (Raspberry pi 3 model B) บนระบบปฏิบัติการ Linux raspberrypi 4.14.93-v7, armv71 GNU/Linux ซึ่งได้ผลการทำงานเหมือนกันทุกประการ



ภาพที่ 18 ผลภาพสีตัวแทนภาพเมล็ดกาแฟคั่ว
ไม่ปรับเท่าฮิสโตแกรมช่องค่าความสว่างก่อนคำนวณ



ภาพที่ 19 กราฟตำแหน่งค่าตัวแทนสีภาพเมล็ดกาแฟ
คั่วจากผลการคำนวณในตารางที่ 1 และตารางที่ 2

การเคลื่อนที่ของพิกัดสีในปริภูมิอาร์จีบี ของ
กราฟด้านบนในภาพที่ 19 จากคั่วอ่อนที่สุดไปถึง
คั่วเข้มที่สุด 6 ระดับ เป็นผลจากการคำนวณในตารางที่
1 โดย 4 ระดับแรกมีลักษณะเคลื่อนที่ในทิศทางการเพิ่ม
ค่าของพิกัดสีเขียวและสีน้ำเงิน บนระนาบแกนพิกัดสี
แดงคงที่ ขณะที่ 2 ระดับสุดท้ายค่าพิกัดสีแดงจะมี

ทิศทางลดลงเล็กน้อย แต่สำหรับกราฟด้านล่างเป็น
ผลจากการคำนวณในตารางที่ 2 การเคลื่อนที่ของ
พิกัดสีในปริภูมิอาร์จีบีจากคั่วอ่อนที่สุดไปถึงคั่วเข้ม
ที่สุดมีทิศทางลดลงทั้ง 3 สี

4. สรุปผลการวิจัย

ระเบียบวิธีทางคอมพิวเตอร์ที่สร้างขึ้น ทำให้
ภาพดิจิทัลของการคั่วเมล็ดกาแฟ ถูกแสดงแทนด้วย
ข้อมูลเชิงตัวเลข 3 ค่าคือ ตัวแทนสีน้ำเงิน สีเขียวและ
สีแดงพร้อมทั้งสร้างภาพตัวแทนสี ที่สามารถนำไป
พัฒนาระบบคอมพิวเตอร์วิทัศน์ ในอุตสาหกรรมยุค
ที่ 4.0 ด้วยภาษาการโปรแกรมซีพลัสพลัสบนแหล่ง
ทรัพยากรเปิดได้ทั้งหมด สำหรับระบบอัตโนมัติ
การคั่วเมล็ดกาแฟเชิงอุตสาหกรรมหรือในครัวเรือน
จากผลการทดลองพบว่าการปรับเท่าฮิสโตแกรม
ในช่องค่าความสว่างของปริภูมิเอชเอสบี ของภาพ
ดิจิทัลเมล็ดกาแฟคั่วที่ระดับใด ๆ ทำให้ค่าตัวแทนสี
มีความคงทนต่อสภาพแสงที่เปลี่ยนแปลง และข้อมูล
ตัวแทนสีมีแบบรูปการเคลื่อนที่ของค่าพิกัดสีที่
แน่นอน ตามลำดับของภาพดิจิทัลเมล็ดกาแฟคั่ว
จากระดับอ่อนไปจนถึงเข้มที่สุด ผลการทำงานของ
ระเบียบวิธีทางคอมพิวเตอร์ ให้ผลการคำนวณต่างกัน
เพียงเล็กน้อย ในระดับเลข ทศนิยม เมื่อเทียบกับการ
ใช้ฟังก์ชันสำเร็จรูปของไลบรารีโอเพนซีวีบาง
ฟังก์ชัน ที่ทำการคำนวณอย่างเดียวกัน จึงนับเป็น
หนทางที่สามารถนำขั้นตอนวิธีของบทความนี้
ไปพัฒนาโปรแกรมบนแพลตฟอร์มอื่นที่ไม่สามารถใช้
ไลบรารีโอเพนซีวีได้ ดังเช่นในระ ดับไมโครคอนโทรลเลอร์
และเมื่อนำผลการคำนวณตัวแทนสี ไปเปรียบเทียบกับ
ผลการคำนวณค่าเฉลี่ยสีของภาพดิจิทัลแบบ
ออนไลน์ พบว่ามีผลใกล้เคียงกัน

5. อ้างอิง

- [1] Andhare P, Rawat SP. Pick and Place Industrial Robot Controller with Computer Vision. 2016 International Conference on Computing Communication Control and automation (ICCUBE); 2016 Aug 12-13; Pune, India: IEEE; 2016:1-4.
- [2] Mery D, Pedreschi F, Soto A. Automated Design of a Computer Vision System for Visual Food Quality Evaluation. Food and Bioprocess Technology, 2013; 6(8): 2093-2108.
- [3] Priyadharshini K, Akila R. A Survey on Computer Vision Technology for Food Quality Evaluation. IJIRCCE 2016; 4(8): 14860-65.
- [4] Habib MT, Majumder A, Jakaria AZM, et al. Machine Vision Based Papaya Disease Recognition. Journal of King Saud University-Computer and Information Sciences, 2018.
- [5] Trientin D, Hidayat B, Darana S. Beef Freshness Classification by Using Color Analysis, Multi-wavelet Transformation and Artificial Neural Network. 2015 International Conference on Automation, Cognitive Science, Optics, Micro Electro-Mechanical System, and Information Technology (ICACOMIT); 2015 Oct 29-30; Bandung, Indonesia: IEEE; 2015:181-85.
- [6] Adi K, Pujiyanto S, Nurhayati OD, et al. Beef Quality Identification Using Color Analysis and K-nearest Neighbor Classification. 2015 4th International Conference on Instrumentation, Communications, Information Technology, and Biomedical Engineering (ICICI-BME); 2015 Nov 2-3; Bandung, Indonesia: IEEE; 2015:180-4.
- [7] Laurent B, Ousman B, Dzudie T, et al. Digital Camera Images Processing of Hard-to-Cook Beans. J Eng Tech Res, 2010; 2(9): 177 – 88.
- [8] Garcia G, Suarez OD, Aranda JLE, et al. Learning Image Processing with Open CV. Birmingham: Packt Publishing Ltd; 2015
- [9] Burger W, Burge MJ. Principles of Digital Image Processing: Fundamental Techniques. London: Springer-Verlag London Limited; 2009.
- [10] Rao S. The Coffee Roaster's Companion. Canada: Scott Rao; 2014.
- [11] Kaehler A, Bradski G. Learning OpenCV 3: Computer Vision in C++ with The OpenCV library. Tokyo: O'Reilly Media, Inc.; 2017.
- [12] Gonzalez RC, Woods RE. Digital Image Processing. New Jersey: Prentice Hall; 2002.
- [13] Sinnott K. The Art and Craft of Coffee: An Enthusiast's Guide to Selecting, Roasting, and Brewing Exquisite Coffee. Massachusetts: Quarry Books; 2011.

7. ภาคผนวก

ภาคผนวก ก.

```

1  #include "opencv2/highgui/highgui.hpp"
2  #include "opencv2/imgproc/imgproc.hpp"
3  #include <iostream>
4  using namespace cv; using namespace std;
5  void histogramPlot(Mat, String);
6  void colorPlot(Mat, Mat*);
7  int main( int argc, char** argv)
8  { Mat MatRGB=imread("cinnamon.png");
9    namedWindow("Qxg", 1);
10   imshow("Qxg", MatRGB);
11   Mat MatHSV;
12   cvtColor(MatRGB, MatHSV, CV_BGR2HSV);
13   vector<Mat> colorSpaceHSV;
14   split(MatHSV, colorSpaceHSV);
15   Mat Mat_Hue= colorSpaceHSV[2].clone();
16   int imgRow=MatRGB.rows, imgCol=MatRGB.cols;
17   Mat histData; int nBins=256;
18   int hsize[]={ nBins };
19   float range[]={ 0, 256 };
20   const float *ranges[]={ range };
21   int chnls[]={ 0 };
22   calcHist(&Mat_Hue, 1, chnls, Mat(),
23           histData, 1, hsize, ranges);
24   histogramPlot(histData, "QxgHist_H.channel");
25   Mat Pr=histData/sum(histData)[0];
26   Mat Mat_nHue = Mat_Hue.clone();
27   float CPD[256]; Mat L=cv::Mat(1,256,CV_32F);
28   for(int i=0; i<256; i++)
29   { CPD[i]=0.0; L.at<float>(i)=(float)i;
30     for( int j=0; j<=1; j++)
31       CPD[i] += Pr.at<float>(j); } uchar k;
32   for( int i=0; i<imgRow; i++)
33   { for( int j=0; j<imgCol; j++)
34     { k=Mat_Hue.at<uchar>(i,j);
35       Mat_nHue.at<uchar>(i,j)=
36         (uchar)round(255*CPD[k]); } }
37   calcHist(&Mat_nHue, 1, chnls, Mat(),
38           histData, 1, hsize, ranges);
39   histogramPlot(histData, "NewHist_H.channel");
40   Mat nMatHSV, nMatRGB; colorSpaceHSV[2]=Mat_nHue;
41   merge(colorSpaceHSV, nMatHSV);
42   cvtColor(nMatHSV, nMatRGB, CV_HSV2BGR);
43   vector<Mat> colorSpaceRGB;
44   split(nMatRGB, colorSpaceRGB);
45   Mat histRGB[3], Prb[3], Expt[3];
46   Mat Rl(1,256,CV_32FCL,Scalar(1.0)), D[3], Var[3];
47   Mat IL=Mat::eye(256,256, CV_32F);
48   for(int i=0; i<256; i++)
49   { IL.at<float>(i,i)=1;
50     calcHist(&colorSpaceRGB[0], 1, chnls,
51             Mat(), histRGB[0], 1, hsize, ranges);
52     calcHist(&colorSpaceRGB[1], 1, chnls,
53             Mat(), histRGB[1], 1, hsize, ranges);
54     calcHist(&colorSpaceRGB[2], 1, chnls,
55             Mat(), histRGB[2], 1, hsize, ranges);
56     namedWindow( "New", 1 );
57     imshow( "New", nMatRGB );
58     for(int i=0; i<3; i++)
59     { Prb[i]=histRGB[i]/sum(histRGB[i])[0];
60       Expt[i]=Prb[i].t()*L.t();
61       D[i]=IL-Mat::eye(256,256, CV_32F)*
62         Expt[i].at<float>(0);
63       Var[i]= Prb[i].t()*D[i]*L.t()-
64         Expt[i].at<float>(0)*Rl.t(); }
65     cout<<"Blue ="<< round(Expt[0].at<float>(0))
66          <<" ,SD = "<<sqrt(Var[0].at<float>(0))<<"\n";
67     cout<<"Green ="<<round(Expt[1].at<float>(0))
68          <<" ,SD ="<<sqrt(Var[1].at<float>(0))<<"\n";
69     cout<<"Red ="<<round(Expt[2].at<float>(0))
70          <<" ,SD ="<<sqrt(Var[2].at<float>(0))<<"\n";
71     colorPlot(MatRGB, Expt);
72     waitKey();
73     return 0;
74 }

```

ภาพที่ ก1. โปรแกรมคำนวณตัวแทนสีภาพเมล็ด
กาแฟจากขั้นตอนวิธีในภาพที่ 5 – 7

```

76 void colorPlot(Mat MatRGB, Mat *Expt)
77 { Mat ColrRep = MatRGB.clone();
78   for( int i=ColrRep.rows/3; i<ColrRep.rows; i++)
79   { for( int j=0; j<ColrRep.cols; j++)
80     { ColrRep.at<Vec3b>(i,j)[0]=
81       round(Expt[0].at<float>(0));
82       ColrRep.at<Vec3b>(i,j)[1]=
83         round(Expt[1].at<float>(0));
84       ColrRep.at<Vec3b>(i,j)[2]=
85         round(Expt[2].at<float>(0));
86     }
87   }
88   namedWindow( "ColorRep", 1 );
89   imshow( "ColorRep", ColrRep );
90 }
91
92 void histogramPlot(Mat histData, String Name)
93 { Mat histBuff, histImg;
94   normalize(histData, histBuff,
95             0, 1, NORM_MINMAX, -1, Mat());
96   histImg=imHist(histBuff,2,2);
97   namedWindow(Name, 1 );
98   imshow(Name,histImg);
99 }

```

ภาพที่ ก2. ฟังก์ชันสร้างภาพสีตัวแทนเมล็ดกาแฟ
ตามขั้นตอนวิธีในภาพที่ 10 และวาดกราฟฮิสโตแกรม
ในภาพที่ 16

```

1  #include "opencv2/highgui/highgui.hpp"
2  #include "opencv2/imgproc/imgproc.hpp"
3  #include <iostream>
4  using namespace cv; using namespace std;
5  void histogramPlot(Mat,String);
6  void colorPlot(Mat,Scalar);
7  int main( int argc, char** argv )
8  { Mat MatRGB=imread("cinnamon.png");
9    namedWindow( "Qxg", 1 );imshow( "Qxg",MatRGB );
10   Mat MatHSV; cvtColor(MatRGB, MatHSV,CV_BGR2HSV);
11   vector<Mat> colorSpaceHSV;split(MatHSV, colorSpaceHSV);
12   Mat Mat_Hue= colorSpaceHSV[2].clone();
13   Mat histData;int nBins = 256;
14   int hsize[]={ nBins };
15   float range[]={ 0,256 };const float *ranges[]={ range };
16   int chnls[]={ 0 };
17   calcHist(&Mat_Hue,1,chnls,Mat(),histData,1,hsize,ranges);
18   histogramPlot(histData, "QxgHist_H.channel");
19   Mat src = Mat_Hue.clone(), dst;
20   equalizeHist( src, dst );
21   calcHist(&dst,1,chnls,Mat(),histData,1,hsize,ranges);
22   histogramPlot(histData, "NewHist_H.channel");
23   Mat nMatHSV, nMatRGB; colorSpaceHSV[2] = dst;
24   merge(colorSpaceHSV, nMatHSV);
25   cvtColor(nMatHSV, nMatRGB, CV_HSV2BGR);
26   Scalar Ergb, SDrgb;meanStdDev(nMatRGB, Ergb,SDrgb);
27   cout<<"Ergb ="<<Ergb<<"\n"<<"SDrgb "<<SDrgb<<"\n";
28   colorPlot(MatRGB, Ergb);
29   waitKey();
30   return 0;
31 }

```

ภาพที่ ก3. โปรแกรมคำนวณตัวแทนสีภาพเมล็ด
กาแฟ โดยใช้ฟังก์ชันในไลบรารีของโอเพนซีวีใน
การปรับเท่าฮิสโตแกรม คำนวณค่าคาดหวัง และ
ส่วนเบี่ยงมาตรฐาน

การออกแบบและพัฒนาเครื่องต้นแบบระบบวัดทางไฟฟ้า Design and development of an electrical measuring system prototype

กัลยา ธนาสินธ์
Kanlaya Thanasin

สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา
Physics Program, Faculty of Science and Technology, Bansomdejchaopraya Rajabhat University, Bangkok
Corresponding author. Tel: 09 5247 6777, E-mail: kanlayathanasin@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและพัฒนาเครื่องต้นแบบระบบวัดค่าทางไฟฟ้าเพื่อให้สามารถนำเครื่องต้นแบบระบบวัดค่าทางไฟฟ้ามาใช้ในการวัดค่ากระแสไฟฟ้ากระแสตรงและไฟฟ้าสลับ การวัดค่าแรงดันไฟฟ้า การวัดค่าความต้านทาน การวัดค่าความจุทางไฟฟ้า การวัดค่าความถี่ และการวัดค่าพื้นฐานทางด้านไฟฟ้าได้ ซึ่งเครื่องต้นแบบระบบวัดค่าทางไฟฟ้าที่สร้างขึ้นนี้ มีผลของการทดสอบการใช้งานแสดงให้เห็นได้ว่า เครื่องต้นแบบนั้นสามารถวัดค่ากระแสไฟฟ้าตรงและกระแสไฟฟ้าสลับได้ในหน่วยของแอมแปร์ โดยสามารถวัดค่าได้ที่ย่าน 0.2 ถึง 40 แอมแปร์ และย่าน 1 ถึง 400 แอมแปร์ การวัดค่าแรงดันไฟฟ้าได้ที่ย่าน 0 ถึง 1,000 โวลต์ การวัดค่าความต้านทานได้ที่ย่าน 1 โอห์ม ถึง 40 เมกะโอห์ม การวัดค่าความจุของตัวเก็บประจุได้ในหน่วยของไมโครฟารัด ได้ที่ย่าน 1 ถึงย่าน 4,000 ไมโครฟารัด การวัดค่าความถี่ในหน่วยเฮิรตซ์ วัดค่าได้ที่ย่าน 10 เฮิรตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิรตซ์ และการวัดการรั่วของกระแสไฟฟ้า การช้อตของวงจรไฟฟ้าได้ด้วย เครื่องต้นแบบระบบวัดค่าทางไฟฟ้านี้สามารถวัดค่าพื้นฐานทางด้านไฟฟ้าได้เทียบกับเครื่องมาตรฐานวัดค่าทางไฟฟ้า Fluke รุ่น 325 ได้อย่างแม่นยำและมีความคลาดเคลื่อนจะต้องไม่เกิน 5 %

คำสำคัญ: เครื่องวัดไฟฟ้า แคลมป์มิเตอร์ ระบบการวัด

ABSTRACT

This research proposes the design and development of an electrical measuring system prototype which can be used to measure electrical current included direct and alternating current. The prototype can measure voltage, resistance, capacity, frequency, and electrical basis. A prototype of the electrical measuring system which was creates that has the results of experiment can measure direct and alternating current in units of Amperes. It can measure at 0.2 to 40 Ampere, and can measure 1 to 400 Ampere. The measurement of voltage can measure at 0 Volts to 1,000 Volts. The measurement of resistance can measure at 1 Ohm

Received 09-07-2019
Revised 11-09-2019
Accepted 13-09-2019

to 40 mega-Ohms. The measurement of capacity can measure at 1 to 4000 μF in units of microfarad (μF). The measurement of frequency at 10 Hz. to 1 MHz in units of Hertz. In other measurements of leakage electricity and shortage circuit that can be measured. A prototype of the electrical measuring system can measure electrical basis compared to instrumental standard Fluke model 325 that the result was precisely and percentage of tolerance did not more than 5 percentages.

Keywords: Electric energy, Clamp Meter, Measurement

1. บทนำ

ปัจจุบันนี้การใช้งานด้านการวัดคุณภาพไฟฟ้ามีความจำเป็นอย่างยิ่งที่จะต้องทำการวิเคราะห์ ทั้งทางด้านค่าพลังงานของไฟฟ้า ค่ากระแสไฟฟ้า เพราะยุคสมัยนั้นไฟฟ้าเป็นความจำเป็นหลักของการดำเนินชีวิตของมนุษย์ทุกคน ซึ่งเมื่อมีการใช้ไฟฟ้า การใช้งานจะต้องมีการบำรุงรักษา ตรวจสอบให้มีคุณภาพอยู่เสมอ ๆ ซึ่งเครื่องตรวจวัดนั้นก็มีหลายจำพวก แต่การวัดคุณภาพของกระแสไฟฟ้านั้นเป็นสิ่งที่ต้องคำนึงถึงเป็นอันดับต้น ๆ เพราะค่ากระแสไฟนั้นถ้าเกิดการรั่วในสายไฟอาจจะทำให้เกิดการช็อตของวงจร การระเบิดของระบบไฟฟ้า ทำให้ส่งผลกระทบต่อมนุษย์อุตสาหกรรมและชุมชนได้ [1]

ดังนั้นผู้วิจัยเล็งเห็นถึงปัญหานี้ จึงมีแนวคิดที่จะออกแบบและพัฒนาเครื่องมือวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่สามารถพกพาได้สะดวก และใช้งานได้ง่าย ใช้ได้กับสายไฟระบบไฟฟ้าได้ทุกจุด โดยที่ไม่ต้องหยุดการจ่ายกระแสไฟฟ้า ซึ่งเครื่องมือวัดค่านี้คือ แคลมป์มิเตอร์ หรือ เป็นอุปกรณ์ที่จะถูกออกแบบมาเพื่อการวัดกระแสโดยไม่ต้องดับหรือหยุดการทำงานของวงจร ส่วนการวัดยังสามารถพัฒนาให้วัดค่าทางไฟฟ้าพื้นฐานได้ อาทิเช่น ค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าตรง-สลับ ค่าความจุไฟฟ้า ค่าไดโอด และค่าความต้านทานไฟฟ้าในส่วนของการแสดงผลนั้นจะแสดงเป็นดิस्पเลย์บนจอดิจิตอล

ซึ่งจะสะดวกต่อการอ่านและบันทึกค่าของการใช้งานของเครื่องต้นแบบนี้ [1]

1.1 เซนเซอร์ ETCR068AD Clamp AC/DC current sensor

ETCR0 6 8 AD Clamp AC / DC เป็นเซนเซอร์ถูกออกแบบมาสำหรับทดสอบการทำงานของ AC / DC ที่มีแรงดันไฟฟ้าได้สูงสุด 600V และเป็นการพัฒนาเทคโนโลยี CT มาใช้ในการอ่านค่าที่เป็นดิจิตอล โดยเซนเซอร์จะรับค่าการเหนี่ยวนำของค่ากระแสไฟฟ้า โดยการคล้อง CT เข้ากับโหลดหรืออุปกรณ์ที่มีกระแสไฟฟ้า จะสามารถ นำค่ามาวิเคราะห์ได้ว่าค่าของกระแสไฟฟ้า ที่มีความแม่นยำสูงสามารถเชื่อมต่อได้หลายเมตร สามารถใช้ร่วมกับชุดวิเคราะห์คุณภาพไฟฟ้าได้ ฯลฯ และนิยมนำมาใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการผลิตไฟฟ้าและการวิจัย [2]

1.2 ส่วนควบคุมและประมวลผล

งานวิจัยนี้ใช้ MCU พัฒนาบน Open source platform คือบอร์ด Arduino UNO R3 ทำหน้าที่ควบคุมการทำงาน รับค่าจากส่วน ADC และอินพุตต่าง ๆ ทำการประมวลผล ตามระบบควบคุมโปรแกรม และแสดงผลออกทางจอ LCD โดยมีการทำงานตามหลักดังนี้

1.2.1 การวัดโวลท์ Volt AC, Volt DC ทำการรับค่าจาก ADC ประมวลผลทางค่านวณทางคณิตศาสตร์โดยใช้ตัวคูณจากตำแหน่ง ของ Range selector แสดงผลออกทาง LCD

1.2.2 การวัดกระแส Current AC , Current DC การวัดจะใช้ Current clamp แบบ m VDC output จึงใช้การรับค่าจาก ADC และนำมาคูณค่าจากสเกล ของ Current clamp แสดงผลออก LCD

1.2.3 การวัดความถี่ ทำการรับค่า Input จากวงจร Pulse และวัดคาบเวลาของ Pulse ประมวลผลเป็นความถี่ และแสดงผลออกจอ LCD

1.2.4 การวัดค่าความต้านทาน ทำโดยรับค่า V ตกคร่อมระหว่างวงจร R divider จาก ADC ประกอบกับค่าตำแหน่งของ R range selector ประมวลผลและแสดงค่า R ทางจอแสดงผล LCD

1.2.5 การตรวจวัดตำแหน่งการซ็อตของไฟฟ้า Test diode ,Transistor ในการทดสอบอุปกรณ์ เช่น ไดโอด ทรานซิสเตอร์ เราสามารถใช้วงจรวัด Resistor มาทำการทดสอบได้ หลักการคือ จะทดสอบ PN Junction โดยทำให้เกิด Volt ตกคร่อมแล้วทำการวัดค่า Volt หากเป็นทิศทาง Forward จะทราบค่า Forward voltage และหากเป็นทิศทาง Reverse จะเป็นการเกิด High impedance ทำให้ประเมินอุปกรณ์ได้ว่าอยู่ในสภาพดีหรือเสียได้ [3]

1.2.6 การตรวจวัดค่าความจุทางไฟฟ้า ตัวเก็บประจุ ในตำแหน่งนี้จะไม่ใช่วงจร R divider เพียงแต่บอก MCU ให้รู้ว่าอยู่ใน Mode ที่ต้องการวัดค่าตัวเก็บประจุ หลักการคือวัดค่า Time constant ซึ่งสัมพันธ์กับค่า Capacitance ที่ต้องการทดสอบ โดยใช้วงจร RC ต้องบอก MCU ให้รู้ว่าอยู่ใน Mode ที่ต้องการวัดค่าตัวเก็บประจุได้อย่างสมบูรณ์ [4]

1.3 ส่วนของ Mode Selector

ส่วนนี้จะใช้ทำหน้าที่เลือกฟังก์ชันที่จะทำการวัดและเป็นตัวกำหนดลักษณะการต่อ Terminal กับวงจรและตำแหน่งของ Selector จะถูกส่งผ่าน Input pin ของ MCU Mode Selector ใช้ Rotary Switch แบบ 6 ตำแหน่ง 4 pole ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่1 แสดง Rotary Switch แบบ 6 ตำแหน่ง

ตำแหน่ง	ฟังก์ชันการวัด	สถานะ
0	OFF	ปิดวงจร
1	VDC	วัด DC Volt
2	VAC	วัด AC Volt
3	Frequency	วัด Frequency
4	A (mA)	วัด Current
5	Ω /D/TR /C	วัด R, D,TR,C

จากการศึกษาข้อมูลวิจัยพบว่าปี พ.ศ. 2558 ชีรากร ซีโฮ ได้ทำการวิจัยเรื่อง ศึกษาการวัดกระแสไฟฟ้าจาก Current transformer ที่สร้างขึ้นเทียบกับดิจิตอลแคลมป์มิเตอร์ โดยจะกล่าวถึงเทคนิคที่มีประสิทธิภาพสำหรับวัดค่ากระแสไฟฟ้าผู้วิจัยได้สร้างอุปกรณ์โดยใช้หลักการ Current transformer โดยได้พันขดลวดทองแดงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.91 mm. รอบแกนเหล็กอ่อนวงกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5.2 cm. จำนวน 2, 4, และ 6 รอบ ตามลำดับ แล้วนำมาทำการทดลองเพื่อคำนวณหาอัตราส่วนของกระแส Current transformer แต่ละตัว ซึ่งได้อัตราส่วนเท่ากับ 2/1 A, 4/1 A และ 6/1 A หลังจากนั้น Current transformer ทั้ง 3 ตัว มาทำการทดลองวัดกระแสไฟฟ้าจากเครื่องใช้ไฟฟ้าในบ้านชนิดต่าง ๆ โดยเทียบกับดิจิตอลแคลมป์มิเตอร์ จากการทดลองพบว่าค่าของกระแสไฟฟ้าที่วัดได้จาก Current transformer อัตรา

ส่วนเท่ากับ 2/1 A มีค่าใกล้เคียงกับแคลมป์มิเตอร์ โดยค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุดเท่ากับ 1.41% ค่าความคลาดเคลื่อนมากที่สุดเท่ากับ 3.85%, อัตราส่วน 4/1 A มีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุดเท่ากับ 0.93% มีค่าความคลาดเคลื่อนมากที่สุดเท่ากับ 4.62%, และมีค่าอัตราส่วน 6/1 A มีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุดเท่ากับ 1.49% และมีค่าความคลาดเคลื่อนมากที่สุดเท่ากับ 9.09% [5]

ปีพ.ศ.2558 นฤมล วันน้อย ทำการวิจัยเครื่องต้นแบบแสดงผลคุณภาพกำลังไฟฟ้าบันทึกผลอัจฉริยะด้วยระบบจัดเก็บข้อมูลโดยใช้โปรแกรมแลปวิวสำหรับการจัดการอนุรักษ์พลังงาน ซึ่งทำการวิจัยเครื่องต้นแบบอัจฉริยะแสดงผลคุณภาพกำลังไฟฟ้าและบันทึกผลโดยใช้ โปรแกรมแลปวิวสำหรับการจัดการการอนุรักษ์พลังงาน ได้ออกแบบสำหรับวัดคุณภาพและวิเคราะห์ผลของกำลังไฟฟ้า 1 เฟส พร้อมบันทึกค่าของการใช้หรือปริมาณกำลังไฟฟ้า เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการจัดทำรูปแบบหรือแผนงานในการอนุรักษ์และการประหยัดพลังงาน ซึ่งได้ออกแบบเป็น เครื่องมือวัดโดยใช้คอมพิวเตอร์รับโปรแกรมแลปวิว ซึ่งสามารถวัดแรงดันได้จำนวน 2 ช่องและ กระแสจำนวน 2 ช่องโดยใช้อุปกรณ์ตรวจจับและส่งสัญญาณแรงดันและกระแสสัญญาณที่ได้ จากอุปกรณ์ตรวจจับและส่งสัญญาณแรงดัน และกระแสนั้นจะถูกส่งเข้ามายังอุปกรณ์จัดเก็บเพื่อการบันทึกข้อมูล (DAQ) แล้วจะส่งสัญญาณไปยังคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์ประมวลผลและจะทำการบันทึกผลที่ได้ [6]

ปี พ.ศ. 2556 ธนรัตน์ ดันมณีประเสริฐ ได้ทำวิจัยเกี่ยวกับการออกแบบและพัฒนาระบบสร้างโพรบวัดค่ากระแสไฟฟ้าสลับแบบขดลวดโรโกสกี 1 kA ซึ่งสามารถนำไปวัดสายส่งกระแสไฟฟ้าที่สูง ซึ่งการวิจัยนั้นสามารถตรวจจับคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าที่ไหลผ่านสาย

ตัวนำ จากนั้นนำกระแสที่วัดได้ให้เข้าไปไหลผ่านวงจรอินทิเกรเตอร์ ซึ่งจะใช้ชุดกล่องสัญญาณที่สร้างขึ้น เพื่อปรับค่าชดเชยซึ่งให้เหมาะสมกับกระแสอินพุตโดยจะต้องกำหนดค่าแรงดันของโพรบเอาต์พุตเท่ากับ 1mV/A ก่อน ซึ่งผลที่ได้คือโพรบวัดจะสามารถวัดค่ากระแสได้ดี สามารถวัดไฟฟ้าแรงสูงได้ขนาด 1 kA ได้ ซึ่งชุดกล่องสัญญาณสามารถขยายค่าพารามิเตอร์ให้มีความสำคัญและสอดคล้องกับค่าที่วัดได้อย่างถูกต้องและสามารถใช้งานได้จริง ประหยัดค่าใช้จ่าย มีความสะดวกมากกว่าในการใช้งานเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้หม้อแปลงเป็นเครื่องมือวัดกระแสไฟฟ้า [7]

การนำงานวิจัยนี้มาใช้ประโยชน์ในครั้งนี้จะเป็นการนำเอาหลักการของการวัดค่าและวิเคราะห์ผลของคุณภาพด้านการวัดกระแสไฟฟ้าสลับและแนวทางในการพัฒนาหัววัดเพื่อนำมาพัฒนาต้นแบบได้อย่างแม่นยำโดยอ้างอิงจากปี พ.ศ. 2558 ชีรากร ชิโฮ้ ได้ทำการวิจัยเรื่อง ศึกษาการวัดกระแสไฟฟ้าจาก Current Transformer ที่สร้างขึ้นเทียบกับดิจิตอลแคลมป์มิเตอร์งานวิจัยนั้นมีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุดเท่ากับ 1.49% และมีค่าความคลาดเคลื่อนมากที่สุดเท่ากับ 9.09% [5] จากงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้อ้างอิงเปอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อนจากงานวิจัยเพื่อนำมาพัฒนาเครื่องต้นแบบวัดค่าทางไฟฟ้าเพื่อเทียบมาตรฐานกับเครื่องมาตรฐาน Fluke รุ่น 325 โดยผู้วิจัยจะพัฒนาเครื่องต้นแบบวัดค่าทางไฟฟ้าที่มีเปอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อนจะต้องไม่เกิน 5 % ในการสร้างเครื่องต้นแบบวัดค่าทางไฟฟ้านี้ถึงจะมีค่าความแม่นยำที่อยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน

1.4. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1.4.1 เพื่อออกแบบวงจรเครื่องต้นแบบระบบวัดค่าทางไฟฟ้าพื้นฐานได้

1.4.2. เพื่อนำเครื่องต้นแบบระบบวัดค่า

ทางไฟฟ้า วัดค่ากระแสไฟฟ้ากระแสตรงและสลับได้ และวัดค่าพื้นฐานทางด้านไฟฟ้าได้

1.4.3. เพื่อนำมาใช้ประโยชน์ในการจัดการ

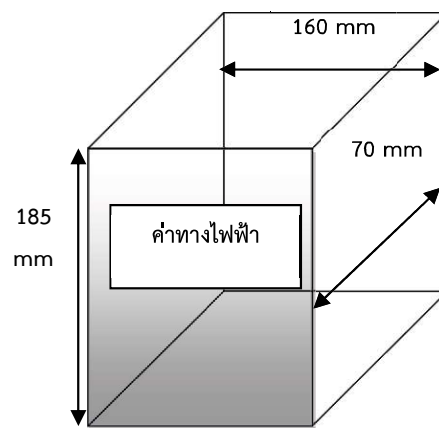
เรียนการสอนในสาขาวิชาฟิสิกส์และสาขาวิชาเทคโนโลยีคอมพิวเตอร์อิเล็กทรอนิกส์ทั้งทางทฤษฎีและหลักการได้

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

การสร้างเครื่องต้นแบบวัดค่าทางไฟฟ้า เป็นการออกแบบและพัฒนาการสร้างวงจรโดยการนำอุปกรณ์ทางอิเล็กทรอนิกส์ เป็นอุปกรณ์ชิ้นส่วนผนวกกับการออกแบบระบบควบคุมการวัดค่าทางไฟฟ้าโดยการเขียนโปรแกรมผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino เพื่อควบคุมการทำงานของระบบการวัดค่าพื้นฐานทางไฟฟ้า โดยการวัดค่าแรงดันไฟฟ้า V (โวลต์) การวัดค่ากระแสไฟฟ้า I (แอมป์แปร์) การวัดค่าความต้านทาน R (โอห์ม) การวัดค่าความจุ C (ฟารัด) และการวัดค่าความถี่ f (เฮิรตซ์) และสามารถแสดงค่าทางไฟฟ้าทั้งหมดออกทางจอแสดงผลแบบดิจิทัล (LCD) ร่วมกับอุปกรณ์ตัวตรวจรู้ ดังเช่นเซนเซอร์ ETCR068AD Clamp AC/DC current sensor ซึ่งเป็นเซนเซอร์วัดค่ากระแส เซนเซอร์วัดค่าแรงดัน ร่วมกับวงจรอิเล็กทรอนิกส์ที่ออกแบบคำนวณและสร้างขึ้นเพื่อระบบการวัดค่าทางไฟฟ้าซึ่งจะพัฒนาให้อยู่ในช่วงของการวัดรวมทั้งระบบการตรวจวัดทั้งหมดและแหล่งจ่ายพลังงานพื้นฐานทางไฟฟ้าโดยจะใช้เครื่องมาตรฐานเป็นแหล่งจ่ายไฟฟ้าให้กับระบบการวัดของเครื่องต้นแบบวัดค่าทางไฟฟ้า คือเครื่อง Multi

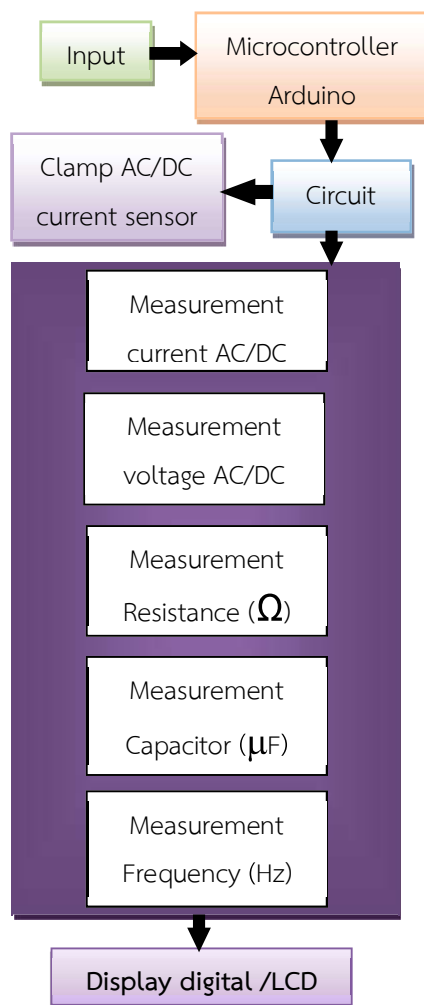
position test systems (MPT) เป็น Portable test PTS รุ่น 3.3 ซึ่งใช้อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เฉพาะด้านด้านวัสดุที่ใช้จะเป็นวัสดุจำเพาะซึ่งสามารถทนความร้อนต่ออุณหภูมิของอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ทั้งวงจรรวมทั้งระบบการวัดยังคงมีค่าเสถียรภาพเทียบเท่ามาตรฐานของระบบการวัดทางไฟฟ้าได้มากที่สุด [8]

2.1 ออกแบบเครื่องต้นแบบวัดค่าทางไฟฟ้า



ภาพที่ 1 โครงสร้างกล่องเครื่องต้นแบบระบบวัดค่าทางไฟฟ้า

จากภาพที่ 1 แสดงการออกแบบโครงสร้างของกล่องที่ใช้บรรจุเครื่องต้นแบบวัดค่าทางไฟฟ้านี้จะต้องมีขนาดที่เหมาะสมและสามารถเคลื่อนย้ายพกพาได้สะดวก จัดเก็บได้ง่าย มีระบบสวิตช์ให้เปิด-ปิดง่าย ๆ ซึ่งจะใช้วัสดุที่มีความคงทนต่อสภาพแวดล้อมการใช้งานคือเป็นฉนวนมีคุณสมบัติไม่นำไฟฟ้า เนื่องจากจะใช้ในการเก็บในส่วนของการวัดค่าทางไฟฟ้า และวงจรอิเล็กทรอนิกส์เพื่อวัดค่าทางไฟฟ้า ไว้ภายในกล่องเก็บข้อมูลและระบบการควบคุมการวัดค่าทางไฟฟ้าทั้งหมด

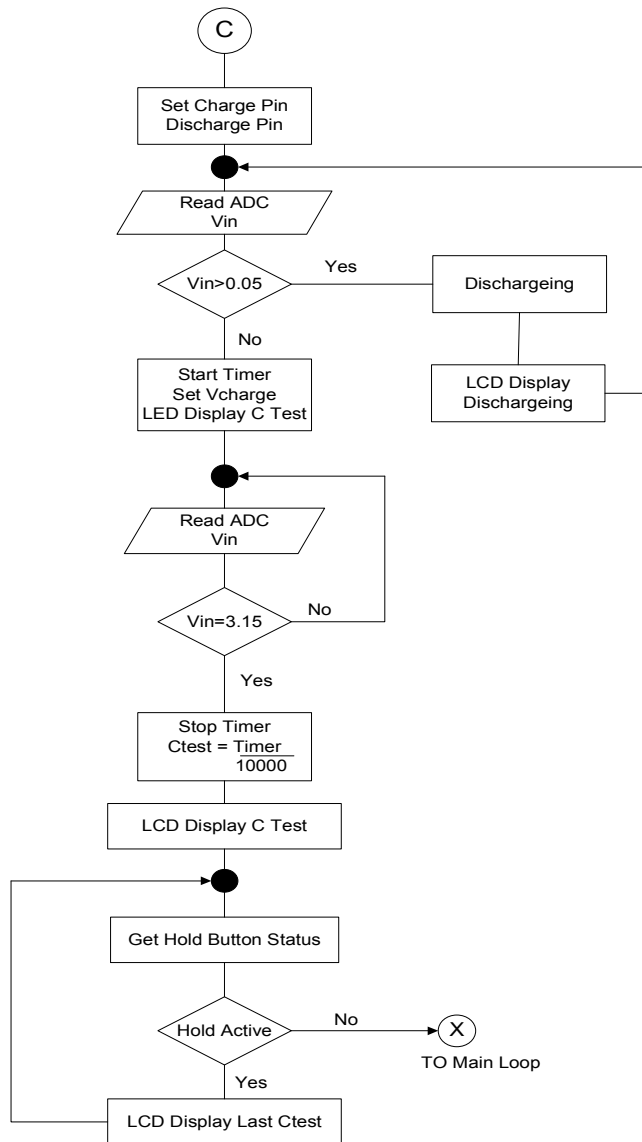


ภาพที่ 2 แผนภาพแสดงระบบการวัดควบคุมโดยโปรแกรมผ่านไมโครคอนโทรลเลอร์

จากภาพที่ 2 แสดงการทำงานการควบคุมระบบ การวัดค่าทางไฟฟ้าด้วยโปรแกรมภาษาซี ซึ่งจะเป็น การประยุกต์ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino ร่วมกับการวัดค่ากระแสไฟฟ้า รวมถึงสร้างวงจร อิเล็กทรอนิกส์เพื่อการวัดค่าทางไฟฟ้า โดยการวัด

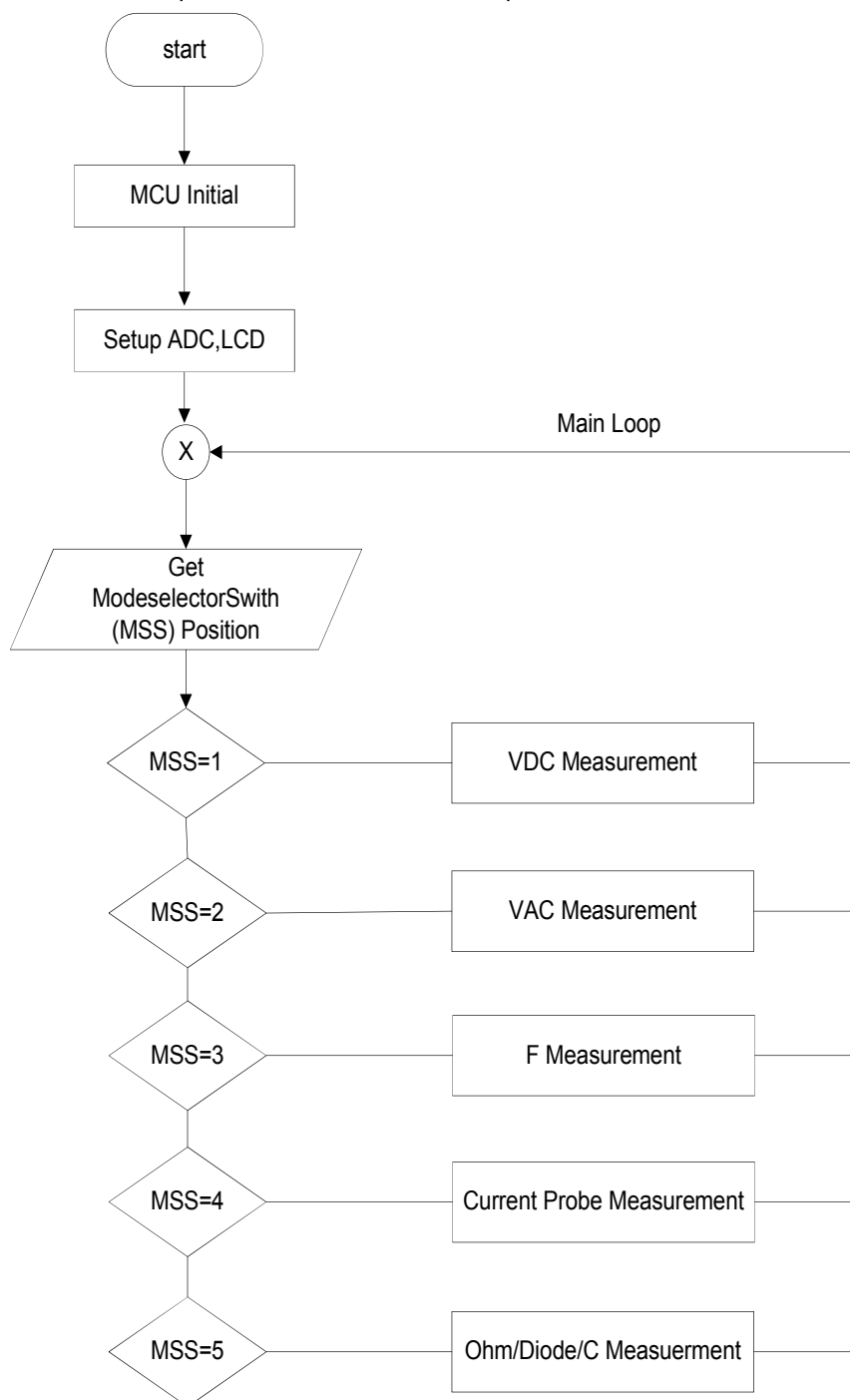
ค่าแรงดันไฟฟ้า V (โวลต์) การวัดค่ากระแสไฟฟ้า I (แอมป์แปร์) การวัดค่าความต้านทาน R (โอห์ม) การวัดค่าความจุ C (ฟารัด) และการวัดค่าความถี่ f (เฮิรตซ์) ได้และแสดงค่าทางไฟฟ้าออกทางจอแสดงผล แบบดิจิตอล (LCD) ดังแสดงในภาพที่ 2

2.2 เขียนโปรแกรมควบคุมระบบการวัดค่าทางไฟฟ้าผ่านอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์

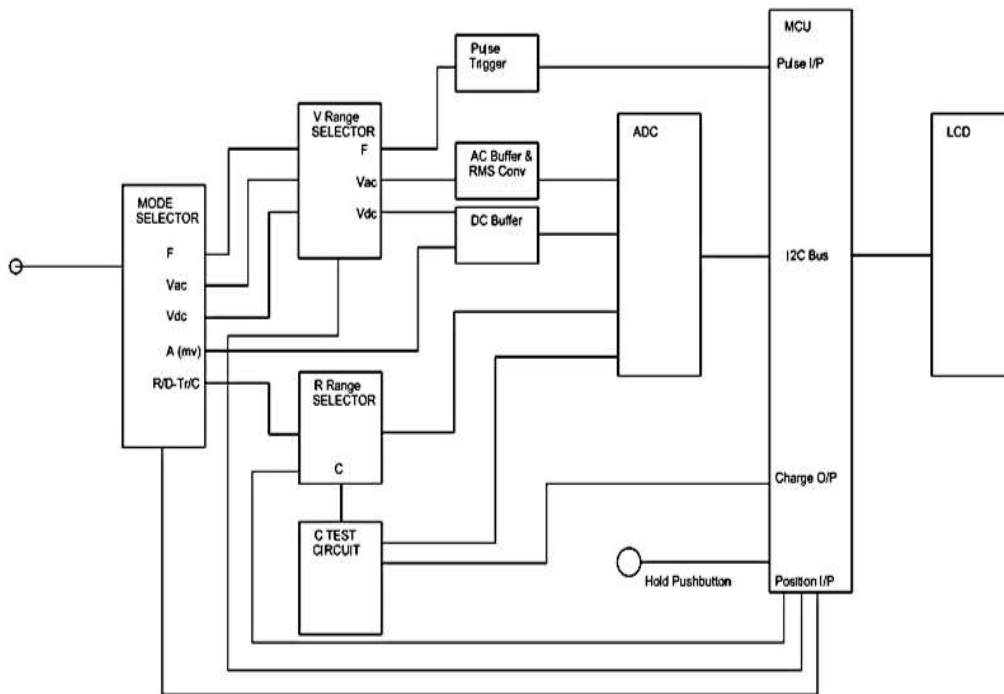


ภาพที่ 3 ผังการเขียนโปรแกรมควบคุมระบบการทำงานของกรวัดค่าทางไฟฟ้า

2.2 เขียนโปรแกรมควบคุมระบบการวัดค่าทางไฟฟ้าผ่านอุปกรณ์ไมโครคอนโทรลเลอร์(ต่อ)



ภาพที่ 4 ผังการเขียนโปรแกรมควบคุมระบบการทำงานในแต่ละย่านของการวัดค่าทางไฟฟ้า



ภาพที่ 5 โครงสร้างผังการทำงานของระบบการสร้างเครื่องต้นแบบเครื่องวัดทางด้านไฟฟ้า

จากแผนภาพในการเขียนโปรแกรมควบคุมระบบการวัดค่าทางไฟฟ้าโดยการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบการวัดค่าทางไฟฟ้าจะทำการออกแบบระบบควบคุมอุปกรณ์และวงจรอิเล็กทรอนิกส์ด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ดังแสดงในภาพที่ 3 และภาพที่ 4 และแสดงผลออกทางจอแบบดิจิทัล ดังแสดงในภาพที่ 5 ซึ่งจะเป็นการแสดงผลผังแสดงระบบการทำงานของเครื่องต้นแบบนี้จะแสดงในส่วนของการวัดค่าแรงดันไฟฟ้า V (โวลต์) ค่ากระแสไฟฟ้า I (แอมป์แปร์) ค่าความต้านทาน R (โอห์ม) ค่าความจุ C (ฟารัด) และค่าความถี่ f (เฮิร์ตท) และจะเป็นการแสดงผลออกทางจอดิจิทัล ภายในกล่องจะสร้างระบบการวัดออกเป็นย่านการวัด ดังนี้ การวัดแรงดันไฟฟ้า การวัดกระแสไฟฟ้า การวัดความต้านทาน

ไฟฟ้า การวัดค่าความจุไฟฟ้า การวัดความถี่ไฟฟ้า และการเช็คค่าการชื้อตของวงจรดังแสดงในภาพที่ 6-7 กล่องควบคุมเครื่องต้นแบบนี้พัฒนาขึ้นมาพร้อมกับระบบการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์วัดค่าทางไฟฟ้า ให้เรียบร้อยพร้อมสำหรับการต่อใช้งาน



ภาพที่ 6 เครื่องต้นแบบวัดค่าทางไฟฟ้า



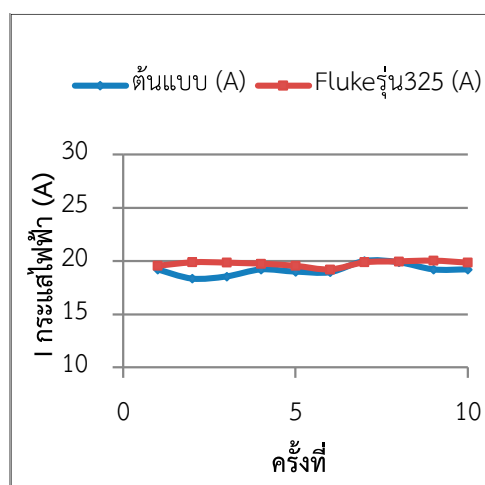
ภาพที่ 7 เครื่องต้นแบบวัดค่าทางไฟฟ้าแสดงหน้าจอขณะกำลังใช้งานวัดค่าความถี่ไฟฟ้า

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

ผลการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบการวัดค่าทางไฟฟ้าโดยในการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องต้นแบบวัดค่าทางไฟฟ้านั้นจะเป็นการใช้เครื่องต้นแบบวัดค่าพื้นฐานทางไฟฟ้า ดังเช่น ค่ากระแสไฟฟ้า ค่าแรงดัน ค่าความต้านทาน ค่าความจุ ค่าความถี่ เป็นต้น แล้วนำมาวัดเทียบกับเครื่องมาตรฐาน Fluke รุ่น 325 เนื่องจาก Fluke รุ่น 325 เป็นเครื่องมือวัดค่าทางไฟฟ้าที่มีประสิทธิภาพสามารถวัดค่าแรงดันไฟฟ้า V (โวลต์) การวัดค่ากระแสไฟฟ้า I (แอมป์แปร์) การวัดค่าความต้านทาน R (โอห์ม) การวัดค่า ความจุ C (ฟารัด) และการวัดค่าความถี่ f (เฮิรตซ์) วัดค่าการลัดวงจรไฟฟ้าได้ และแสดงค่าทางไฟฟ้าออกทางจอแสดงผลแบบดิจิทัลได้และเป็นที่ยอมรับในงานด้านการวัดคุณภาพไฟฟ้าแต่ก็มีราคาที่สูงพอสมควร ซึ่งการวิจัยนี้จึงอ้างอิงระบบการวัดค่าทางไฟฟ้าของเครื่องมาตรฐานนี้ [9] แล้วสามารถนำมาเป็นเครื่องเทียบค่ามาตรฐานได้ในงานวิจัยนี้ ซึ่งการแสดงผลการทดลองนั้นจะแสดงรูปแบบกราฟข้อมูลเปรียบเทียบค่าจากเครื่องต้นแบบเทียบกับค่าของเครื่องมาตรฐานดังภาพที่ 8-14 นี้

3.1 ผลการทดสอบวัดค่ากระแสไฟฟ้า

ในผลการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องต้นแบบระบบวัดค่าทางไฟฟ้านั้นพบว่าเครื่องต้นแบบสามารถวัดค่ากระแสไฟฟ้าตรงและไฟฟ้าสลับได้ในหน่วยของแอมแปร์ (A) โดยวัดค่ากระแสไฟฟ้าตรงได้ที่ย่าน 0.2 แอมแปร์ถึงย่าน 40 แอมแปร์ และวัดค่ากระแสไฟฟ้าสลับได้ในหน่วยของแอมแปร์ ได้ที่ ย่าน 1 แอมแปร์ ถึง 400 แอมแปร์ การทำการทดลองได้ทำการทดลองการวัดค่ากระแสไฟฟ้าทั้งกระแสตรงและกระแสสลับ จำนวน 10 ครั้ง ซึ่งแสดงค่าวัดในย่านต่ำ 20 แอมแปร์ ดังภาพที่ 8-9

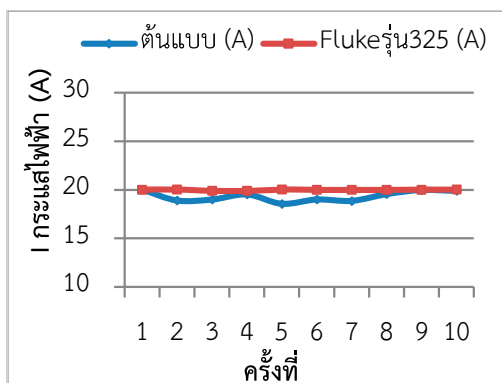


ภาพที่ 8 ผลการทดสอบของเครื่องต้นแบบระบบวัดค่ากระแสไฟฟ้าตรงในหน่วยของแอมแปร์ (A)

*หมายเหตุ :Error (%) หาจาก
$$\left| \frac{\text{ค่าที่วัดได้}-\text{ค่าจริง}}{\text{ค่าจริง}} \right| \times 100$$

จากภาพที่ 8 แสดงผลการทดสอบของเครื่องต้นแบบระบบวัดค่ากระแสไฟฟ้าตรง ซึ่งในการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องต้นแบบนั้นจะทำการทดสอบเป็นจำนวน 10 ครั้ง ในแต่ละครั้งจะวัดหน่วยของแอมแปร์ (A) โดยจะแสดงค่าวัดในย่านวัดต่ำ 20

แอมป์ ในการวัดทุกครั้งของการวัดค่ากระแสไฟฟ้าตรงนั้นจะใช้เครื่องมือมาตรฐาน Fluke รุ่น 325 เป็นเครื่องเทียบค่ามาตรฐานด้วยและจากผลการทดสอบประสิทธิภาพ พบว่าเครื่องต้นแบบสามารถวัดค่ากระแสไฟฟ้าตรงได้ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 19.16 แอมป์ และจากการวัดด้วยเครื่องมือมาตรฐานวัดค่ากระแสไฟฟ้าตรงได้เฉลี่ยอยู่ที่ 19.75 แอมป์ แล้วพบว่ามีความของการวัดนั้นแตกต่างกันมีเปอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อน (%) อยู่ที่ 2.99 %

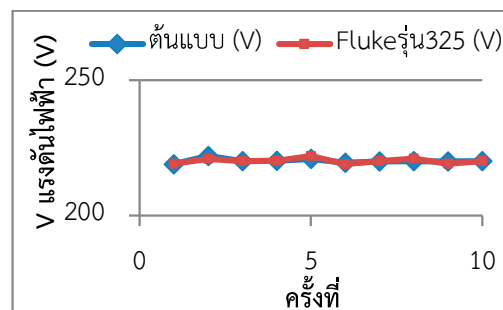


ภาพที่ 9 ผลการทดสอบของเครื่องต้นแบบระบบวัดค่ากระแสไฟฟ้าสลับในหน่วยของแอมป์ (A)

จากภาพที่ 9 แสดงผลการทดสอบของเครื่องต้นแบบระบบวัดค่ากระแสไฟฟ้าสลับในหน่วยของแอมป์ (A) แสดงค่าวัดในย่านวัดต่ำ 20 แอมป์ จากผลการทดสอบประสิทธิภาพ พบว่าเครื่องต้นแบบสามารถวัดค่ากระแสไฟฟ้าสลับได้ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 19.32 แอมป์ และจากการวัดด้วยเครื่องมือมาตรฐาน วัดค่ากระแสไฟฟ้าตรงได้เฉลี่ยอยู่ที่ 19.98 แอมป์ แล้วพบว่ามีความของการวัดนั้นแตกต่างกันมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ 3.30 %

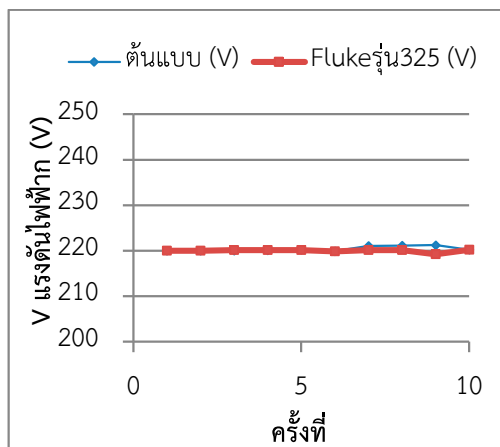
3.2 ผลการทดสอบวัดค่าความแรงดันไฟฟ้า

จากผลการทดสอบประสิทธิภาพการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าเครื่องต้นแบบสามารถวัดค่าแรงดันไฟฟ้าตรงในหน่วยของโวลต์ (V) โดยวัดค่าแรงดันไฟฟ้าได้ที่ย่าน 0 โวลต์ ถึง 1,000 โวลต์ ในการทำการทดลองได้ทำการทดลองการวัดค่าแรงดันไฟฟ้าทั้งแรงดันไฟตรงและแรงดันไฟสลับจำนวน 10 ครั้ง ซึ่งแสดงค่าวัดในย่านต่ำ 220 V ดังแสดงในภาพที่ 9-10



ภาพที่ 10 แสดงผลการทดสอบของเครื่องต้นแบบระบบวัดค่าความแรงดันไฟฟ้าตรง ในหน่วยโวลต์ (V)

จากภาพที่ 10 แสดงผลการทดสอบของเครื่องต้นแบบระบบวัดค่าแรงดันไฟฟ้าตรง ซึ่งในการทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องต้นแบบนั้นจะทำการทดสอบเป็นจำนวน 10 ครั้ง ในหน่วยโวลต์ (V) โดยวัดค่าแรงดันตรงไฟฟ้าที่ย่านต่ำ 220 โวลต์ แล้วใช้เทียบค่าเป็นเครื่องมือมาตรฐาน Fluke รุ่น 325 ทุกครั้ง ในการทดสอบประสิทธิภาพพบว่าเครื่องต้นแบบสามารถวัดค่าแรงดันไฟฟ้าได้ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 220.24 V และจากการวัดด้วยเครื่องมือมาตรฐานวัดค่าแรงดันไฟฟ้าได้ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 220.23 V แล้วพบว่ามีความของการวัดนั้นแตกต่างกันมีค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ยอยู่ที่ 0.21 %

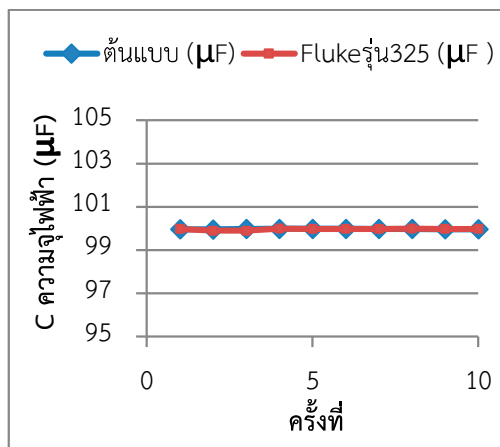


ภาพที่ 11 แสดงผลการทดสอบของเครื่องต้นแบบระบบวัดค่าความแรงดันไฟฟ้าสลับ ในหน่วยโวลท์ (V)

จากภาพที่ 11 แสดงผลการทดสอบของเครื่องต้นแบบระบบวัดค่าความแรงดันไฟฟ้าสลับ ในหน่วยโวลท์ (V) โดยวัดค่าแรงดันไฟฟ้าจะทำการวัดที่ย่านต่ำ 220 โวลท์ พบว่าเครื่องต้นแบบวัดค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 220.38 โวลท์ และจากการวัดด้วยเครื่องมือมาตรฐาน ได้ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 219.99 โวลท์ พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 0.192 %

3.3 ผลการทดสอบวัดค่าของความจุไฟฟ้า

จากผลการทดสอบประสิทธิภาพการวัดค่าความจุไฟฟ้า พบว่าการวัดค่าความจุไฟฟ้าของตัวเก็บประจุนั้นเครื่องต้นแบบสามารถวัดค่าความจุไฟฟ้าได้ในหน่วยของ ฟารัด ถึง ไมโครฟารัด (F- μ F) โดยการวัดค่าความจุไฟฟ้าจะวัดได้ที่ย่าน 1 ถึง 400 ไมโครฟารัด ซึ่งในการทำการทดลองนั้นได้ทำการทดลองการวัดค่าความจุที่มีค่า 100 ไมโครฟารัด เป็นจำนวน 10 ครั้ง แล้วนำมาเปรียบเทียบกับเครื่องวัดมาตรฐาน Fluke รุ่น 325 ทุกครั้ง เพื่อหาเปอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องต้นแบบได้ ดังแสดงในภาพที่ 12

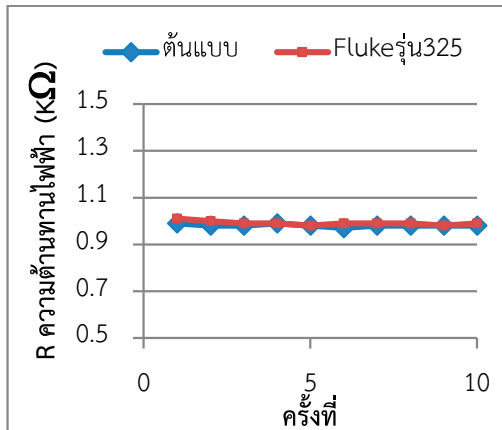


ภาพที่ 12 แสดงผลการทดสอบของเครื่องต้นแบบระบบวัดค่าความจุที่มีค่า 100 ไมโครฟารัด (μ F)

จากภาพที่ 12 แสดงผลการทดสอบของเครื่องต้นแบบการวัดค่าความจุของตัวเก็บประจุที่มีค่า 100 ไมโครฟารัด พบว่าเครื่องต้นแบบวัดค่าได้เฉลี่ยอยู่ที่ 99.97 ไมโครฟารัด และจากการวัดด้วยเครื่องมือมาตรฐานวัดได้ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 99.96 ไมโครฟารัด มีค่าความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 0.024 %

3.4 ผลการทดสอบวัดค่าความต้านทาน

จากผลการทดสอบประสิทธิภาพการวัดค่าความต้านทานไฟฟ้า พบว่าเครื่องต้นแบบสามารถวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าในหน่วยของโอห์มถึง เมกะโอห์ม ($\Omega - M\Omega$) ได้โดยจะวัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าได้ที่ย่าน 1 โอห์ม ถึง 40 เมกะโอห์ม ซึ่งในการทดลองวัดค่านั้นจะทดลองวัดค่าที่ย่าน 1 กิโลโอห์ม เป็นจำนวน 10 ครั้ง แล้วนำค่าความต้านทานที่ได้มาเปรียบเทียบกับเครื่องวัดมาตรฐาน Fluke รุ่น 325 ทุกครั้ง เพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อนของเครื่องต้นแบบได้ ดังแสดงในภาพที่ 13

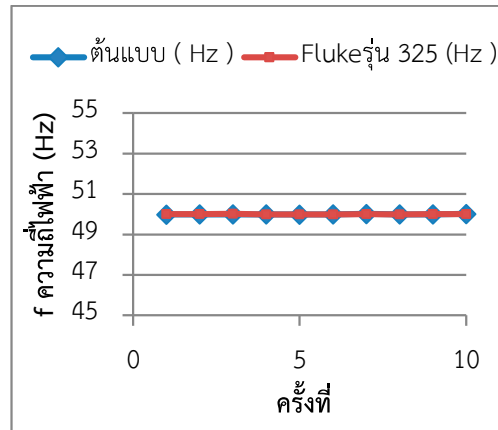


ภาพที่ 13 ผลการทดสอบของเครื่องต้นแบบระบบวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ย่าน 1 กิโลโอห์ม ($k\Omega$)

จากภาพที่ 13 แสดงผลการทดสอบของเครื่องต้นแบบระบบวัดค่าความต้านทานไฟฟ้าที่ย่าน 1 กิโลโอห์ม เมื่อเทียบกับเครื่องมาตรฐานพบว่ามีความคลาดเคลื่อน (%) อยู่ที่ 1.00 %

3.5 ผลการทดสอบวัดค่าความถี่

จากผลการทดลองประสิทธิภาพของการวัดค่าความถี่ไฟฟ้า พบว่าเครื่องต้นแบบระบบวัดค่าทางไฟฟ้าสามารถวัดค่าความถี่ทางไฟฟ้าได้ตั้งแต่ย่านความถี่ 10 เฮิรตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิรตซ์ (Hz – MHz) ซึ่งในการทดลองจะเป็นการวัดค่าความถี่ทางไฟฟ้าในหน่วยเฮิรตซ์ (Hz) โดยจะทำการทดลองวัดที่ย่านความถี่ 50 เฮิรตซ์ เป็นจำนวน 10 ครั้ง เนื่องจากเป็นค่าความถี่ของไฟฟ้าที่ใช้ในชีวิตประจำวันหรือจะเรียกว่าค่าความถี่ของไฟบ้านก็ได้ โดยการทดสอบทุก ๆ ครั้งนั้น จะต้องนำค่าความถี่ที่วัดได้มาเปรียบเทียบกับเครื่องวัดมาตรฐาน Fluke รุ่น 325 เพื่อหาเปอร์เซ็นต์ค่าความคลาดเคลื่อน (%) ได้ ดังแสดงในภาพที่ 14



ภาพที่ 14 ผลการทดสอบของเครื่องต้นแบบระบบวัดค่าความถี่ทางไฟฟ้าที่ย่าน 50 เฮิรตซ์ (Hz)

จากภาพที่ 14 แสดงผลการทดสอบของเครื่องต้นแบบระบบวัดค่าความถี่ไฟฟ้าที่ย่าน 50 เฮิรตซ์ เมื่อเทียบกับเครื่องมาตรฐานพบว่ามีความคลาดเคลื่อนอยู่ที่ 0.019 %

3.6 ผลการทดสอบการช็อตทางไฟฟ้า

การทดสอบวัดค่าการช็อตทางไฟฟ้า จะใช้วงจรวัดค่าความต้านทานมาทำการทดสอบ ใช้หลักการ PN Junction โดยทำให้เกิดแรงดันตกคร่อมแล้วทำการวัดค่าแรงดันหากเป็นทิศทาง Forward จะทราบค่า Forward voltage และหากเป็นทิศทาง Reverse จะเป็นการเกิด ค่าอิมพีแดนซ์สูง ซึ่งจะประเมินอุปกรณ์ได้ว่าอยู่ในสภาพดีหรือเสีย ในการทดลองวัดค่าการช็อตวงจรไฟฟ้าจะทดลองวัดสายไฟฟ้าที่ชำรุดยาว 20 เมตร จะวัดค่าความต้านทานได้ในหน่วยของโอห์ม (Ω) ส่วนที่เกิดการชำรุด ไฟช็อต หรือ ลัดวงจร หรือ รั่ว ก็จะได้แสดงค่าความต้านทานในหน่วยช่วง 0 ถึง 10 โอห์ม ซึ่งในเครื่องต้นแบบนี้กำหนดค่าไว้ ส่วนที่เป็นปกติอยู่ในสภาพที่ไม่ช็อตหรือรั่วของกระแสไฟฟ้า ค่าความต้านทานก็จะเป็น 0 โอห์ม เท่านั้น

4. สรุปผลการทดลอง

การออกแบบและพัฒนาเครื่องต้นแบบวัดค่าทางไฟฟ้าสามารถวัดค่ากระแสไฟฟ้าตรงในหน่วยของแอมแปร์ (A) วัดค่าได้ที่ย่าน 0.2 ถึง 40 แอมแปร์ และกระแสไฟฟ้าสลับ ได้ที่ย่าน 1 ถึง 400 แอมแปร์ วัดค่าแรงดันไฟฟ้าตรงและแรงดันไฟสลับในหน่วยของโวลต์ (V) ได้ตั้งแต่น้อย 0 ถึง 1,000 โวลต์ วัดค่าความจุไฟฟ้าในหน่วย ไมโครฟารัด (μF) ได้ที่ย่าน 1 ถึง 4,000 ไมโครฟารัด วัดค่าความต้านทานทางไฟฟ้าในหน่วยของโอห์มถึงเมกะโอห์ม ($\Omega - M\Omega$) ได้ที่ย่าน 1 โอห์ม ถึง 40 เมกะโอห์ม วัดค่าของความถี่ทางไฟฟ้า ในหน่วยของเฮิรตซ์ถึงเมกะเฮิรตซ์ (Hz – MHz) ได้ตั้งแต่น้อย 10 เฮิรตซ์ ถึง 1 เมกะเฮิรตซ์ และวัดค่าการซัดของวงจรทางไฟฟ้า สามารถใช้เครื่องต้นแบบวัดค่าอิมพีแดนซ์ ได้ในหน่วยโอห์ม(Ω) ได้ในช่วง 0 โอห์ม ถึง 10 โอห์ม ตามระยะของสายไฟฟ้าที่แท้จริง โดยเครื่องต้นแบบนี้เมื่อนำไปเทียบกับเครื่องมาตรฐานพบว่ามีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 5% ซึ่งถือว่าอยู่เกณฑ์มาตรฐานที่ผู้วิจัยได้ตั้งขอบเขตไว้ได้

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้เป็นส่วนหนึ่งของการวิจัยเรื่องการออกแบบและพัฒนาเครื่องต้นแบบระบบวัดทางไฟฟ้า ได้รับทุนสนับสนุนจากสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา ในปีงบประมาณ 2560

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] สมาร์ทเลิร์นนิ่ง.อิเล็กทรอนิกส์.พิมพ์ครั้งที่1 ประเทศไทย กรุงเทพฯ; 2551.
- [2] ETCR, Electronic Technology Co.,Ltd. [Internet]. Guangzhou; 2017 [cited 2017 Oct 25]. Available from: <http://en.gzetcr.com>
- [3] เจษฎา ชินรุ่งเรือง. ทฤษฎีวงจรไฟฟ้าเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 3 ประเทศไทย กรุงเทพฯ:สำนักพิมพ์ โรงพิมพ์จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2557.
- [4] บุญธรรม ภัทราจารกุล. งานไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์เบื้องต้น.พิมพ์ครั้งที่ 1 ประเทศไทย กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดเคชั่น; 2556.
- [5] ชีรากร ซีโฮ. ศึกษาการวัดกระแสไฟฟ้าจาก Current Transformer ที่สร้างขึ้นเทียบกับ ดิจิตอลแคลมป์มิเตอร์.[วิทยานิพนธ์ปริญญา มหาบัณฑิต]. ชลบุรี: มหาวิทยาลัยบูรพา; 2558.
- [6] นฤมล วันน้อย.เครื่องต้นแบบแสดงผลคุณภาพ กำลังไฟฟ้าและบันทึกผลอัจฉริยะด้วยระบบ จัดเก็บข้อมูลโดยใช้โปรแกรมแลปวิวสำหรับการ จัดการอนุรักษ์พลังงาน .การประชุมวิชาการ ระดับชาติ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม ครั้งที่ 7 วันที่ 30 – 31 มีนาคม.นครปฐม;2558.1-9.
- [7] ธนารัตน์ ต้นมณี,ประเสริฐ ดลรวีวันแม่สอด,ธนิต มาละวรรณโณ และคณะ.โพรบวัดกระแสไฟฟ้า สลับแบบขดลวดโรโกสกี ขนาด 1 KA. วารสารวิชาการและวิจัยมทร.พระนคร,ฉบับ พิเศษ: 2556; 16 Suppl:S108-17.

- [8] Position Test Systems (MPT) Portable Test PTS model 3.3 [Internet]. Switzerland: Landis+GyrStrasse1, P.O.box7550,6302Zug Schweiz; c2019 [cited 2019 Aug 25]. Available from: <https://www.mte.ch/>
- [9] Fluke 325 True-rms Clamp Meter [Internet]. Singapore: Fluke South East Asia Pte Ltd1, Clementi Loop; c2019 [cited 2019 Aug 15]. Available from: <https://www.fluke.com/>

ฟูลบริดจ์สวิตซิงเพาเวอร์ซัพพลายสำหรับเครื่องลดความชื้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริก Full bridge switching power supply for a thermoelectric dehumidifier

เจนศักดิ์ เอกบุรณะวัฒน์
Jensak Ekburanawat

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
ถนนพุทธมณฑล สาย 5 ตำบลศาลายา อำเภอพุทธมณฑล จังหวัดนครปฐม
Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology
Rattanakosin, Nakhon Pathom
Corresponding author.Tel.: 08 9697 4340, E-mail: jensak.eak@rmutr.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอการประดิษฐ์สวิตซิงเพาเวอร์ซัพพลายสำหรับเครื่องลดความชื้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริก สวิตซิงเพาเวอร์ซัพพลายที่สร้างขึ้นประกอบด้วยวงจรสำคัญหลายวงจร คือ วงจรซอฟต์แวร์สตาร์ท วงจรเรียงกระแส วงจรทบทระดับแรงดัน วงจรแบบฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ หม้อแปลงความถี่สูง และวงจรเรียงกระแสด้านขาออก ตามลำดับ สวิตซิงเพาเวอร์ซัพพลายที่สร้างขึ้นนี้สามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าขาออกได้ 2 ระดับ คือ 12 และ 24 โวลต์ การควบคุมการทำงานใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เบอร์ PIC16F886 ควบคุมการทำงานของวงจรทบทระดับแรงดันและวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ โดยวงจรควบคุมทำหน้าที่สร้างสัญญาณขับเคลื่อนให้กับสวิตช์ไอจีบีทีใน วงจรทั้งสองเพื่อควบคุมแรงดันขาออกของวงจรให้คงที่ สวิตซิงเพาเวอร์ซัพพลายที่สร้างขึ้นสามารถจ่าย กำลังไฟรวมให้โหลดได้เท่ากับ 94.85 วัตต์ ที่ประสิทธิภาพร้อยละ 83.20 และมีค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้า เท่ากับ 0.95 lagging

คำสำคัญ : สวิตซิงเพาเวอร์ซัพพลาย เทอร์โมอิเล็กทริก เครื่องลดความชื้น

Abstract

This research proposes an invention of the switching power supply designed for a thermoelectric dehumidifier. This switching power supply consists of many important part which are a soft-start circuit, rectifier, boost converter, full-bridge inverter, high frequency transformer and the output rectifier circuits. The switching power supply can produce two voltage levels; 12 and 24 volts. The microcontroller PIC16F886 integrated in the main control unit manages the operation of the boost converter circuit and full-bridge inverter circuit by generating the driving signal to the IGBT switch in both circuits for better output-voltage stability. This switching power

Received 12-06-2019
Revised 13-08-2019
Accepted 13-08-2019

supply can provide power rating of 94.85 watts in total and have 83.20 % efficiency with a power factor high as 0.95 lagging.

Keywords: Switching power supply, Thermoelectric, Dehumidifier

1. บทนำ

ประเทศไทยมีลักษณะภูมิอากาศเป็นแบบเขตร้อนชื้น โดยทั่ว ๆ ไปสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 ฤดู คือ อากาศจะร้อนที่สุดในเดือนเมษายน ถึงเดือนพฤษภาคม เป็นฤดูร้อน และจะมีฝนตกและเมฆมากจากลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ในช่วง กลางเดือนพฤษภาคม ถึงเดือนตุลาคม เรียกว่า ฤดูฝน ส่วนเดือนพฤศจิกายน ถึงกลางเดือนมีนาคม อากาศจะแห้งและหนาวเย็นเนื่องจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือเป็นฤดูหนาว ยกเว้นในภาคใต้ที่มีอากาศร้อนชื้นตลอดทั้งปีจึงมีแค่สองฤดู คือ ฤดูร้อนกับฤดูฝนเท่านั้น

1.1 สภาวะสบาย (Comfort zone)

สภาวะสบาย สามารถอธิบายได้ง่าย ๆ ว่าเป็นช่วงอุณหภูมิและความชื้นของอากาศที่ทำให้คนส่วนใหญ่รู้สึกสบาย ซึ่งมีปัจจัยหลัก 4 ปัจจัย คือ อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ความเร็วลมที่มาปะทะตัวเรา และการแผ่ความร้อนจากสิ่งแวดล้อม องค์การ ASHVE (American society of heating & ventilating engineers) กำหนดช่วงสภาวะสบายสำหรับผู้อยู่อาศัยในประเทศสหรัฐอเมริกาไว้ที่ช่วงความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศอยู่ระหว่างร้อยละ 30-70 ซึ่งเป็นช่วงที่ไม่ทำให้ผิวหนังแห้งหรือรู้สึกเหนียวตัวจนเกินไป กับอุณหภูมิกระเปาะแห้ง (Dry bulb temperature) อยู่ในช่วง 18-29 องศาเซลเซียส [1] สภาวะสบายในแต่ละฤดูและแต่ละภูมิภาคจะแตกต่างกันไป สภาวะสบายในประเทศไทยจะอยู่ที่อุณหภูมิประมาณ 24-27 องศาเซลเซียส ความชื้น

สัมพัทธ์อยู่ที่ประมาณร้อยละ 50-70 และความเร็วลมที่ 0.2-1.0 เมตรต่อวินาที จากตารางที่ 1 จะเห็นว่าความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยของประเทศไทยนั้นมีค่าสูงตลอดทั้งปี

ตารางที่ 1 ร้อยละความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยตลอดปีของแต่ละภูมิภาคในประเทศไทย [2]

ภาค	ร้อยละความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ยตลอดปี
เหนือ	74
ตะวันออกเฉียงเหนือ	72
กลาง	73
ตะวันออก	76
ใต้ฝั่งตะวันออก	79
ใต้ฝั่งตะวันตก	80

1.2 จุดน้ำค้าง (Dew point)

จุดน้ำค้าง คือ จุดที่ไอน้ำในอากาศควบแน่นและกลั่นตัวเป็นน้ำ อุณหภูมิจุดน้ำค้าง (Dew point temperature) คืออุณหภูมิ ณ จุดที่เมื่ออากาศชื้นถูกทำให้เย็นลงในขณะที่ปริมาณไอน้ำคงที่ การลดอุณหภูมิลงจนถึงจุดจุดหนึ่งจะทำให้ไอน้ำในอากาศเกิดการอึดตัว และกลั่นตัวควบแน่นเป็นหยดน้ำที่ความดันบรรยากาศคงที่ เราสามารถคำนวณหาอุณหภูมิจุดน้ำค้างได้จากค่าความชื้นสัมพัทธ์ (RH) และค่าอุณหภูมิในขณะนั้น (T) ได้จากสมการที่ 1

[3] ที่อุณหภูมิระหว่าง -45 องศาเซลเซียส ถึง 60 องศาเซลเซียส มีค่า β เท่ากับ 17.62 และ λ เท่ากับ 243.12 องศาเซลเซียส

$$D_p(T, RH) = \frac{\lambda \cdot \left[\ln \left(\frac{RH}{100} \right) + \frac{\beta \cdot T}{\lambda + T} \right]}{\beta - \left[\ln \left(\frac{RH}{100} \right) + \frac{\beta \cdot T}{\lambda + T} \right]} \quad (1)$$

1.3 แนวคิดและขอบเขตของงานวิจัย

แนวคิดของงานวิจัยนี้ก็คือ การสร้างเครื่องลดความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศเพื่อสร้างสภาวะสบายในบ้านพักอาศัยที่ใช้หลักการควบแน่นของไอน้ำเมื่ออุณหภูมิลดลงถึงจุดน้ำค้าง ปริมาณความชื้นสัมพัทธ์ในอากาศที่ลดลงจะเพิ่มสภาวะสบายในบ้านพักอาศัยได้ เครื่องลดความชื้นนี้จะใช้เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลเป็นอุปกรณ์ในการทำความเย็นแทนเครื่องทำความเย็นระบบอัดไอ การใช้งานเทอร์โมอิเล็กทริกมีข้อดี คือ ไม่มีชิ้นส่วนเคลื่อนไหว ทำให้ไม่ต้องการการบำรุงรักษามาก มีอายุการใช้งานยาวนาน ไม่ต้องใช้สารทำงานที่มีส่วนประกอบของสาร CFCs สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ง่าย และยังมีขนาดกะทัดรัดอีกด้วย

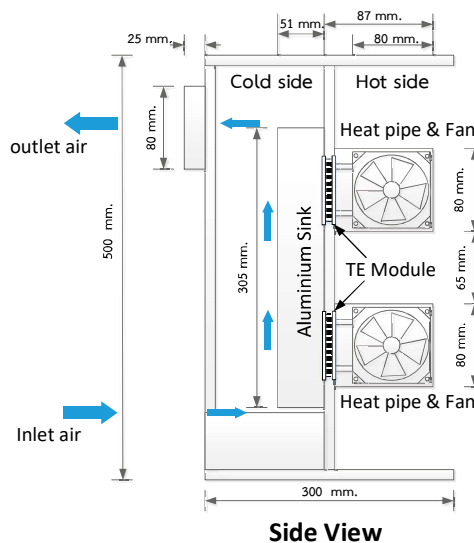
ขอบเขตของงานวิจัยก็คือ การออกแบบและสร้างเครื่องลดความชื้นที่ใช้เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลเป็นอุปกรณ์ทำความเย็น และออกแบบวงจรสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายสำหรับจ่ายไฟให้กับเครื่องลดความชื้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริกเครื่องนี้

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

2.1 โครงสร้างของเครื่องลดความชื้น

เครื่องลดความชื้นต้นแบบที่สร้างขึ้นทำจากแผ่นอะคริลิก หนา 5 มิลลิเมตร โครงสร้างของเครื่องมีลักษณะเป็นตู้ แบ่งเป็น 2 ด้าน คือ ด้านทำความเย็น

และด้านระบายความร้อน ด้านทำความเย็นประกอบไปด้วย ครีบอลูมิเนียมด้านเย็น ขนาด $94 \times 305 \times 94$ มิลลิเมตร จำนวน 2 อัน สำหรับเป็นพื้นที่ให้อากาศควบแน่นเป็นหยดน้ำ เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล รุ่น TEC1-12710 จำนวน 4 โมดูล ถาดรองน้ำ พัดลมสำหรับหมุนเวียนอากาศ และเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและความชื้น ส่วนทางฝั่งด้านร้อนจะประกอบไปด้วยฮีตไปป์ (Heat pipe) สำหรับระบายความร้อนจากเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล จำนวน 4 ชุด และพัดลมระบายความร้อนขนาด 80 มิลลิเมตร จำนวน 4 ตัว



ภาพที่ 1 โครงสร้างของเครื่องลดความชื้น

2.2 การหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับ เทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

ความสามารถในการทำความเย็นของเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลนั้นขึ้นอยู่กับ การระบายความร้อนออกจากด้านร้อนของโมดูล หากสามารถระบายความร้อนออกจากด้านร้อนของโมดูลได้มากก็จะสร้างความแตกต่างของอุณหภูมิด้านร้อนและด้านเย็นของโมดูล (ΔT) ได้มากเช่นกัน การจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับโมดูลต้องคำนึงถึงความสามารถของระบบระบายความร้อนด้วย

เพราะถ้าจ่ายกำลังไฟฟ้าให้กับเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูลมากจนไม่สามารถระบายความร้อนออกจากโมดูลได้ทัน ความร้อนจากด้านร้อนที่ระบายไม่ทันจะสะท้อนมาทางด้านเย็นทำให้ความสามารถในการทำความเย็นของโมดูลลดลง

ดังนั้นจึงต้องหาค่าแรงดันไฟฟ้าที่เหมาะสมสำหรับเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล โดยทำการต่อเทอร์โมอิเล็กทริกทั้ง 4 โมดูลแบบอนุกรม แล้วทดลองจ่ายแรงดันที่ 24, 36 และ 48 โวลต์ ตามลำดับ ทำการวัดค่ากระแสไฟฟ้าที่เทอร์โมอิเล็กทริกใช้ อุณหภูมิที่ครีบอลูมิเนียมด้านเย็น และบันทึกค่าอุณหภูมิด้านเย็นเทียบกับเวลาจนอุณหภูมิด้านเย็นมีค่าคงที่ ได้ผลดังตารางที่ 2

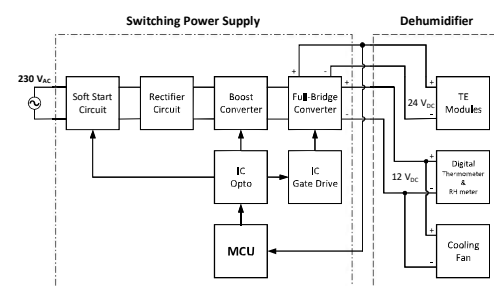
ตารางที่ 2 ค่าแรงดันและกระแสที่เหมาะสมสำหรับจ่ายให้เครื่องลดความชื้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริก

Voltage (V)	Temp. (°C)	Time (min)	Current (A)
24	14.11	32	3.65
36	13.33	39	5.25
48	13.98	38	6.58

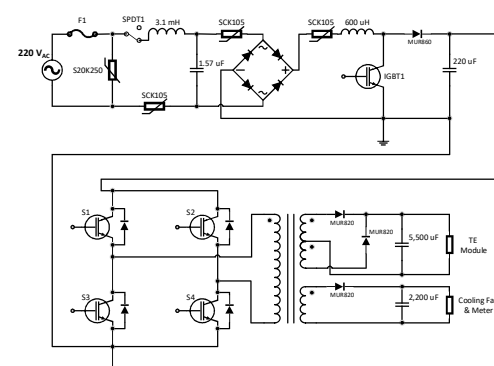
จากสมการที่ 1 หากกำหนดให้อุณหภูมิห้องที่ต้องการลดความชื้นเท่ากับ 25 องศาเซลเซียส ความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 70 สามารถคำนวณอุณหภูมิจุดน้ำค้างได้เท่ากับ 19 องศาเซลเซียส หมายความว่าในสภาวะดังกล่าวหากเครื่องลดความชื้นสามารถทำให้อุณหภูมิด้านเย็นลดลงเป็น 19 องศาเซลเซียส ใอน้ำในอากาศก็จะสามารถควบแน่นเป็นหยดน้ำที่ครีบอลูมิเนียมของเครื่องได้ หากพิจารณาข้อมูลจากตารางที่ 2 แล้วจะพบว่า การจ่ายแรงดัน 24 โวลต์ ให้กับโมดูลก็เพียงพอที่จะทำความเย็นเพื่อให้เกิดการควบแน่นของไอน้ำได้แล้ว

2.3 การออกแบบและสร้างวงจรจ่ายไฟแบบสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลาย

จากเหตุผลในข้อ 2.2 จึงทำการออกแบบสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายที่สามารถจ่ายแรงดันไฟฟ้าด้านขาออกได้ 2 ระดับ คือ 24 โวลต์ สำหรับจ่ายให้กับเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล และ 12 โวลต์ สำหรับจ่ายให้กับพัดลมระบายความร้อนและเครื่องวัดอุณหภูมิและความชื้นแบบดิจิตอล ส่วนประกอบต่าง ๆ ของสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายที่ออกแบบ แสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แผนภาพส่วนประกอบของเครื่องลดความชื้นและสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลาย



ภาพที่ 3 วงจรกำลังของสวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลาย

2.3.1 ขั้นตอนการทำงานของวงจร

สวิตชิงเพาเวอร์ซัพพลายสำหรับเครื่องลดความชื้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริก มีลำดับการทำงานดังต่อไปนี้ จากวงจรภาพที่ 2 แรงดันไฟฟ้ากระแสสลับ

220 โวลต์ จากแหล่งจ่ายถูกส่งผ่านเข้าสู่วงจรซอฟต์แวร์สตาร์ท โดยวงจรนี้จะทำหน้าที่ ปิด-เปิด และลดกระแสกระชากเพื่อไม่ให้เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์ในวงจร ต่อมาไฟฟ้ากระแสสลับจะถูกแปลงเป็นกระแสตรงโดยวงจรบริดจ์เรกติไฟเออร์ แล้วผ่านวงจรทบระดับแรงดันเพิ่มแรงดันขึ้นเป็น 380 โวลต์ เพื่อปรับปรุงค่าเพาเวอร์แฟกเตอร์ของวงจร หลังจากนั้นจะส่งต่อไปยังวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ทำหน้าที่แปลงแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับความถี่สูงรูปสี่เหลี่ยม และถูกลดแรงดันไฟฟ้าลงอีกครั้งด้วยหม้อแปลงความถี่สูง แล้วผ่านเข้าวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นเพื่อเปลี่ยนเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงแรงดัน 24 โวลต์ จ่ายให้กับโหลดเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล และแรงดัน 12 โวลต์ จ่ายให้กับอุปกรณ์อื่นในเครื่องลดความชื้น การควบคุมการทำงานของวงจร ใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ทำหน้าที่สร้างสัญญาณขับสวิทช์ต่าง ๆ ในวงจรกำลัง โดยมี การเขียนโปรแกรมควบคุมการทำงานให้สามารถปรับการทำงานของวงจรได้จากสัญญาณป้อนกลับที่ได้รับอีกด้วย

2.3.2 การออกแบบวงจร

จากวงจรกำลังในภาพที่ 3 การออกแบบวงจรสามารถพิจารณาตามลำดับขั้นดังต่อไปนี้

1. วงจรซอฟต์แวร์สตาร์ท (Soft start) เป็นส่วนที่มีความสำคัญต่อวงจรทั้งหมดเพราะเนื่องจากช่วยลดทอนกระแสพุ่งเข้า ไม่ให้สร้างความเสียหายต่ออุปกรณ์และวงจรโดยรวมได้ การลดกระแสพุ่งเข้านั้นทำได้หลายวิธี ในงานวิจัยนี้เลือกใช้การลดทอนกระแสพุ่งเข้าแบบพาสซีฟ โดยใช้ตัวต้านทานแบบเทอร์มิสเตอร์เป็นตัวลดทอนกระแส การควบคุมการทำงานของวงจรกำลังนั้นจะใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ควบคุมการทำงานของรีเลย์ ที่ทำหน้าที่ ปิด-เปิด วงจร และคอย ๆ เพิ่มวัฏจักรงานของ IGBT1 ในวงจรทบระดับแรงดันขึ้นเพื่อให้กระแสที่ไหลเข้าวงจรค่อย ๆ เพิ่มขึ้น การเพิ่ม

วัฏจักรงานที่ล้นน้อยจะช่วยลดกระแสพุ่งเข้าขณะกดสวิทช์เริ่มทำงาน

2. วงจรกรองความถี่ต่ำผ่าน (Low pass filter) ทำหน้าที่กรองความถี่สูงที่ปะปนมากับแหล่งจ่ายไฟฟ้ากระแสสลับให้ลดทอนลง ทำให้ความถี่รบกวนมีน้อยลง ส่งผลให้ประสิทธิภาพของวงจรดีขึ้น สามารถคำนวณค่าตัวเก็บประจุและตัวเหนี่ยวนำได้จากสมการ

$$f_c = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (2)$$

เมื่อ

f_c คือ ความถี่ที่ต้องการตัดออก

L คือ ค่าของตัวเหนี่ยวนำ

C คือ ค่าของตัวเก็บประจุที่ใช้ในวงจร

ในวงจรที่ออกแบบได้กำหนดให้ตัวเหนี่ยวนำมีค่า 3 มิลลิเฮนรี และตัวเก็บประจุมี 1.57 ไมโครฟารัด ดังนั้นความถี่ที่ถูกตัดทอนลงไป คือ ความถี่ที่มากกว่า 2,300 กิโลเฮิรตซ์ ขึ้นไป

3. วงจรทบระดับแรงดัน (Boost convertor) วงจรทบระดับแรงดันทำหน้าที่เพิ่มแรงดันขาออกของวงจรด้วยตัวเหนี่ยวนำที่สะสมพลังงานไว้ แรงดันขาออกของวงจรสามารถหาได้จากสมการที่ 3 [4]

$$V_{out} = \frac{V_{in}}{1-D} \quad (3)$$

เมื่อ

V_{in} คือ แรงดันขาเข้าของวงจร

V_{out} คือ แรงดันขาออกของวงจร

D คือ วัฏจักรงาน (Duty cycle)

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ตัวเหนี่ยวนำค่า 600 ไมโครเฮนรี ซึ่งเป็นค่าที่ได้มาจากการทดลอง สวิตช์ที่ใช้ในวงจรทบระดับต้องสามารถทนแรงดันตกคร่อมได้สองเท่าของ

แรงดันขาเข้าวงจร ดังนั้นจึงเลือกใช้สวิตช์เป็นไอจีบีทีเบอร์ RGTH00TS65GC11 ขนาดพิกัด 650 โวลต์ 50 แอมแปร์ และเลือกใช้คาปาซิเตอร์ 220 ไมโครฟารัด 450 โวลต์ เป็นตัวกรองแรงดันให้ราบเรียบ เพื่อส่งต่อไปยังวงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์

4. วงจรฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์ (Full bridge Inverter) เป็นวงจรที่ใช้สวิตช์ 4 ตัวในการทำงาน สวิตช์ตัวบนและตัวล่างจะทำงานพร้อมกัน คือ สวิตช์ S_1 , S_4 จะทำงานพร้อมกัน และสวิตช์ S_2 , S_3 จะทำงานพร้อมกันและจะสลับกันทำงานเป็นคู่ ๆ ดังนั้นแรงดันที่ตกคร่อมสวิตช์แต่ละคู่จะเท่ากับแรงดันขาเข้าของวงจร ซึ่งสวิตช์ที่ใช้เป็นไอจีบีทีแบบเดียวกับที่ใช้ในวงจรทบทวน

5. หม้อแปลงไฟฟ้าความถี่สูง (High frequency transformer) [5,6] โครงสร้างหม้อแปลงที่ใช้มีขดลวดปฐมภูมิ 1 ขด ขดลวดทุติยภูมิ 2 ขด พันบนแกนเฟอร์ไรต์ ขนาด EE42 โดยออกแบบที่แรงดันปฐมภูมิเท่ากับ 380 โวลต์ แรงดันทุติยภูมิเท่ากับ 24 และ 12 โวลต์ ตามลำดับความถี่สวิตช์เท่ากับ 25 กิโลเฮิร์ตซ์ ซึ่งคำนวณหาจำนวนรอบของขดลวดปฐมภูมิได้ตามสมการที่ 4

$$N_1 = \frac{V_{in}}{4A_c \cdot B_m \cdot f_s} \quad (4)$$

หาอัตราส่วนของหม้อแปลงได้จากสมการที่ 5 และ 6

$$V_{out} = 2V_{in} \left[\frac{N_2}{N_1} \right] \cdot D_{max} \quad (5)$$

$$\frac{N_2}{N_1} = \frac{V_{out}}{2V_{in} \cdot D_{max}} \quad (6)$$

และเมื่อทราบอัตราส่วนของหม้อแปลงและสามารถหาจำนวนรอบของขดลวดทุติยภูมิได้จากสมการที่ 7

$$n = \frac{N_2}{N_1} \quad (7)$$

เมื่อ

A_c คือ พื้นที่หน้าตัดของแกนเฟอร์ไรต์

B_m คือ ความหนาแน่นของเส้นแรงแม่เหล็ก

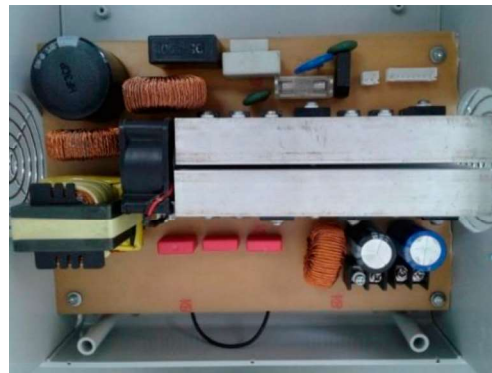
D คือ วัฏจักรงานสูงสุด

N_1 คือ จำนวนรอบของขดปฐมภูมิ

N_2 คือ จำนวนรอบของขดทุติยภูมิ

n คือ อัตราส่วนของหม้อแปลง

6. วงจรเรียงกระแส (Rectifier) ด้านทุติยภูมิของหม้อแปลงความถี่สูง มีวงจรเรียงกระแส 2 ชุด วงจรที่จ่ายแรงดัน 24 โวลต์ เป็นวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น และวงจรที่จ่ายแรงดัน 12 โวลต์ เป็นวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น ทั้งสองวงจรใช้ไดโอด MUR820 (Fast recovery diode) 200 โวลต์, 8 แอมแปร์ทำหน้าที่เรียงกระแสในวงจร วงจรกำลังของสวิตซ์เพาเวอร์ซัพพลายที่ประกอบเสร็จเรียบร้อยแล้ว แสดงดังภาพที่ 4

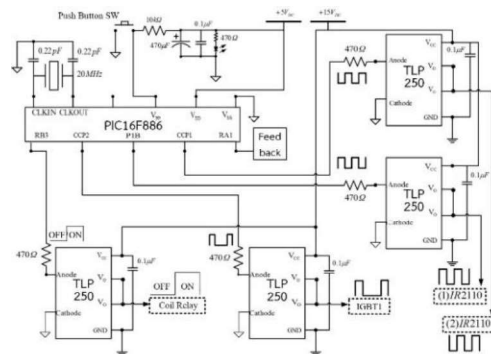


ภาพที่ 4 วงจรกำลังของสวิตซ์เพาเวอร์ซัพพลายที่ประกอบเสร็จเรียบร้อยแล้ว

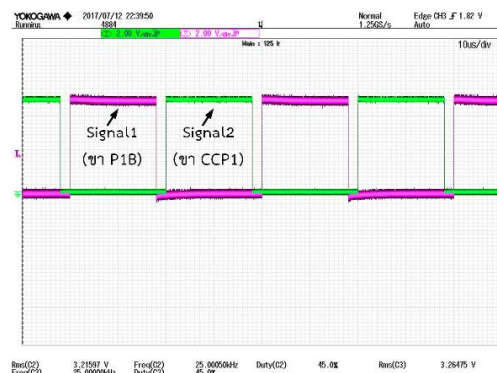
2.3.3 การออกแบบวงจรควบคุมและโปรแกรม

การควบคุมการทำงานของสวิตซ์เพาเวอร์ซัพพลายใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ เบอร์

PIC16F886 เมื่อไมโครคอนโทรลเลอร์ได้รับสัญญาณป้อนกลับเป็นแรงดันขาออกของวงจรจะทำการประมวลผลข้อมูลและทำงานตามคำสั่งในโปรแกรม ถ้าข้อมูลที่ได้รับเป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนดก็จะสร้างสัญญาณพัลส์ออกไปขับเคลื่อนและควบคุมให้พัลส์นั้นคงที่ แต่ถ้าสัญญาณป้อนกลับไม่เป็นไปตามเงื่อนไขก็จะเพิ่มหรือลดวัฏจักรงานของสัญญาณพัลส์ที่ส่งออกไป การต่อวงจรไมโครคอนโทรลเลอร์แสดงดังภาพที่ 5



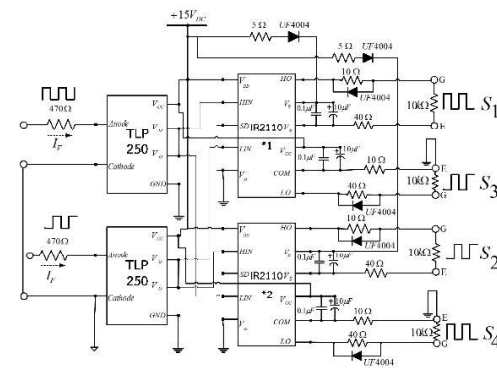
ภาพที่ 5 วงจรไมโครคอนโทรลเลอร์



ภาพที่ 6 สัญญาณขับสวิตช์ของวงจรอินเวอร์เตอร์ที่ส่งจาก PIC16F886 ไปยัง TLP 250

วงจรอินเวอร์เตอร์แบบฟูลบริดจ์นั้น สวิตช์ตัวบน (S_1, S_2) จะไม่สามารถใช้กราวด์ร่วมกับ สวิตช์ตัวล่าง (S_3, S_4) ได้ เนื่องจากการทำงานที่คาบเวลาต่างกันและการอ้างอิงกราวด์ที่ต่างกัน จึง

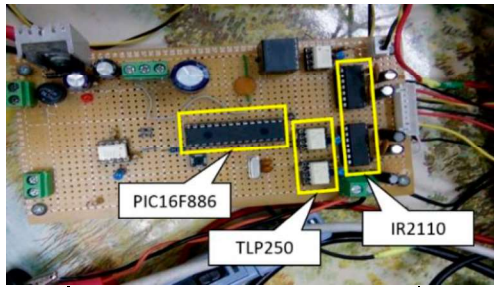
จำเป็นต้องใช้ไอซีเกตไดรเวอร์เพื่อแยกสัญญาณระหว่างไอซีกับภาคกำลังออกจากกันและขยายสัญญาณขับเคลื่อนให้เป็น 4 สัญญาณ โดยใช้ไอซีเบอร์ IR2110 จำนวน 2 ตัว IR2110 จะรับสัญญาณเข้าจากออปโตคัปเปิลอร์ 2 สัญญาณ แต่จะสลับกันรับสัญญาณขาเข้า คือ IR2110 ตัวที่ 1 จะรับสัญญาณ H_{IN} และ L_{IN} จากออปโตคัปเปิลอร์ต่างสัญญาณกัน ส่วน IR2110 ตัวที่ 2 ก็ทำงานในลักษณะเดียวกัน ทำให้ได้สัญญาณขับเคลื่อนสวิตช์ตัวบนและตัวล่างที่ต่างกัน 2 คู่ ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 วงจรไอซีขับเกต



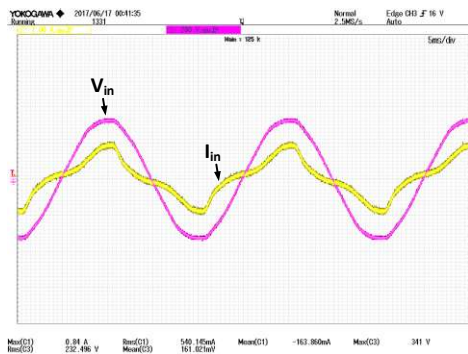
ภาพที่ 8 สัญญาณขับเคลื่อนของสวิตช์ S_1 และ S_3 ในวงจรอินเวอร์เตอร์ ที่มาจากไอซี IR2110 ตัวที่ 1



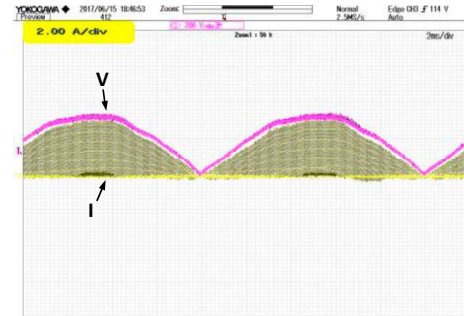
ภาพที่ 9 วงจรควบคุมและวงจรขับเคลื่อนที่ประกอบ
เสร็จเรียบร้อยแล้ว

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

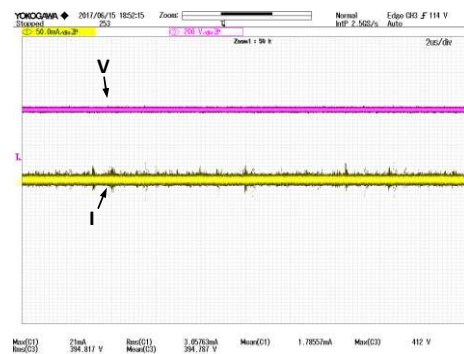
ทำการทดลองโดยใช้สวิตช์เพาเวอร์ซัพพลาย
ที่สร้างขึ้นจ่ายไฟให้กับเครื่องลดความชื้นแบบ
เทอร์โมอิเล็กทริก แล้วทำการวัดค่าแรงดัน กระแส
กำลังไฟฟ้า ณ จุดต่าง ๆ ในวงจรด้วยออสซิลโลสโคป
ยี่ห้อ YOKOGAWA 200 MHz 2.5 GS และวัดค่าตัว
ประกอบกำลังของวงจรด้วย Power quality
analyzer ยี่ห้อ Fluke รุ่น 434 โดยรูปสัญญาณที่วัด
ได้ แสดงดังภาพที่ 10-17 ค่าตัวประกอบกำลังของ
วงจรที่วัดได้ แสดงดังภาพที่ 18



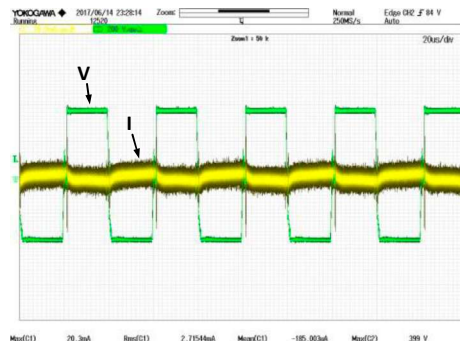
ภาพที่ 10 กระแสและแรงดันขาเข้าวงจรเรียงกระแส
ชุดแรก



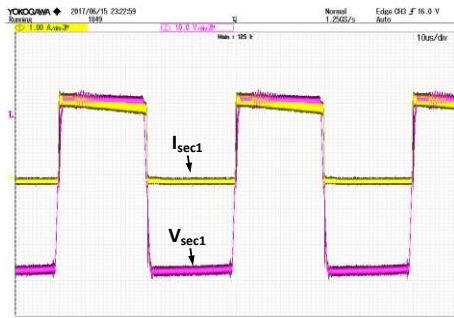
ภาพที่ 11 กระแสและแรงดันขาเข้าของวงจรทบ
ระดับแรงดัน



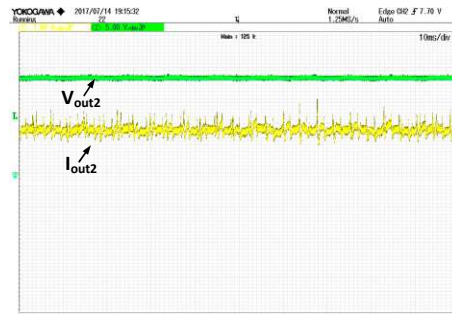
ภาพที่ 12 กระแสและแรงดันขาเข้าของวงจร
ฟูลบริดจ์อินเวอร์เตอร์



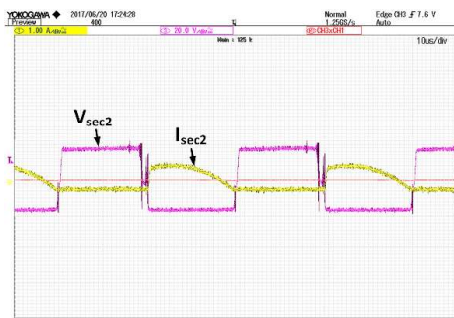
ภาพที่ 13 กระแสและแรงดันตกคร่อมสวิตช์ตัวที่ 1
ในวงจรอินเวอร์เตอร์



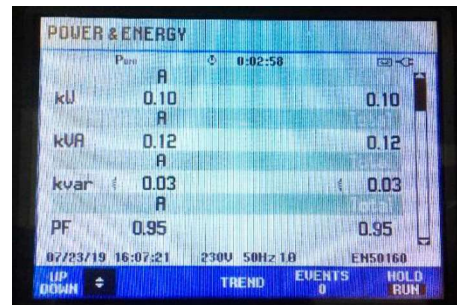
ภาพที่ 14 กระแสและแรงดันที่ขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงชนิดที่ 1



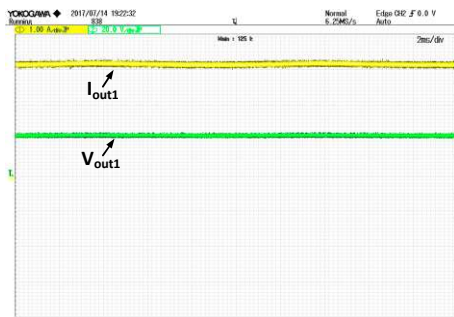
ภาพที่ 17 กระแสและแรงดันของวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่นที่จ่ายให้พัดลมระบายความร้อน



ภาพที่ 15 กระแสและแรงดันที่ขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงชนิดที่ 2



ภาพที่ 18 ค่าตัวประกอบกำลังไฟฟ้าของวงจร



ภาพที่ 16 กระแสและแรงดันของวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่นที่จ่ายให้กับเทอร์โมอิเล็กทริกโมดูล

ภาพที่ 14 คือภาพของกระแสและแรงดันที่วัดได้จากขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงชนิดที่ 1 ที่ต่อกับวงจรเรียงกระแสแบบเต็มคลื่น และภาพที่ 15 คือภาพของกระแสและแรงดันที่วัดได้จากขดลวดทุติยภูมิของหม้อแปลงชนิดที่ 2 ที่ต่อกับวงจรเรียงกระแสแบบครึ่งคลื่น ดังนั้นกระแส I_{sec2} ด้านซ้ายบวกลบจึงมีลักษณะรูปคลื่นต่างจากซ้ายลบ

ขณะเครื่องทำงานทำการวัดค่ากำลังไฟฟ้าขาเข้าได้ 114 วัตต์ และวัดค่ากำลังไฟฟ้าขาออกที่จ่ายให้กับโหลดเครื่องลดความชื้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริก หน้าจอแสดงผล และพัดลมระบายความร้อนได้รวม 94.85 วัตต์ เมื่อนำค่ากำลังไฟฟ้าที่วัดได้จากทั้ง 2 จุด มาหักลบกัน จะได้ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียของวงจรเท่ากับ 19.15 วัตต์ และสามารถคำนวณค่า

ประสิทธิภาพของวงจรไดรฟ์ยล 83.20 การใช้งาน
วงจรซอฟต์แวร์และวงจรระดับแรงดัน สามารถ
ลดกระแสพ่วงเข้าและปรับค่าตัวประกอบกำลังของ
วงจรได้ โดยค่าตัวประกอบกำลังของวงจรมีค่าเท่ากับ
0.95 lagging แต่เนื่องจากอุปกรณ์ในวงจรและโหลด
มีค่าความเหนี่ยวนำแฝงอยู่ วงจรจึงมีค่าตัวประกอบ
กำลังไฟฟ้าเพียง 0.95 lagging ซึ่งต้องปรับปรุงให้
สูงขึ้นต่อไป สวิตซ์เพาเวอร์ซัพพลายและเครื่องลด
ความชื้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริกที่ประกอบเสร็จแล้ว
แสดงดังรูปที่ 19

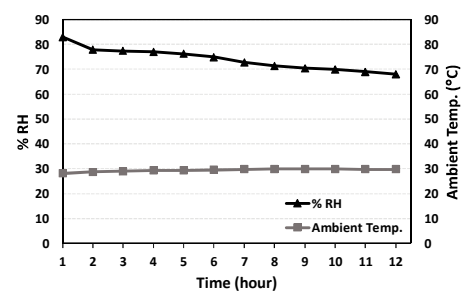


ภาพที่ 19 สวิตซ์เพาเวอร์ซัพพลายและเครื่องลด
ความชื้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริก

4. สรุปผลการทดลอง

จากการทดลองสวิตซ์เพาเวอร์ซัพพลาย
สำหรับเครื่องลดความชื้นแบบเทอร์โมอิเล็กทริกที่
สร้างขึ้น พบว่าเครื่องลดความชื้นแบบเทอร์โมอิเล็ก
ทริก สามารถลดความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องทดสอบ
ขนาด 4.70 x 6.80 x 3.30 เมตร ลงได้และสามารถ
ควบคุมความชื้นภายในห้องไม่ให้เปลี่ยนแปลงตาม
ความชื้นของสภาพแวดล้อมด้านนอกได้ อุณหภูมิของ
ห้องทดสอบเมื่อเริ่มทำการทดลองอยู่ที่ 25 องศา
เซลเซียส จากการทดลองความชื้นในอากาศจะเริ่มจับ

ตัวเป็นหยดน้ำที่ครีบลูมิเนียมด้านเย็นของเครื่องเมื่อ
เวลาผ่านไป 15-20 นาที และหลังจากนั้นประมาณ
20-25 นาที ใอน้ำที่ก่อตัวขึ้นจะหยดลงสู่ถาดรองน้ำ
ทำการทดลองลดความชื้นเป็นเวลา 12 ชั่วโมง เครื่อง
สามารถลดความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้องทดสอบลง
เหลือร้อยละ 15 (ดูภาพที่ 20) ปริมาณน้ำที่ได้จาก
การลดความชื้น 425 กรัม สวิตซ์เพาเวอร์ซัพพลายที่
สร้างขึ้นสามารถจ่ายไฟให้เครื่องลดความชื้นทำงาน
ได้อย่างต่อเนื่องและปกติ โดยความร้อนของอุปกรณ์
ในวงจรที่วัดได้มีค่าไม่เกินจุดวิกฤตและไม่มีอุปกรณ์ใด
เสียหาย



ภาพที่ 20 อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ภายในห้อง
ที่บันทึกได้ขณะทำการทดลองระยะเวลา 12 ชั่วโมง

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
ราชมงคลรัตนโกสินทร์ ที่ได้ให้การสนับสนุน
งบประมาณในการทำวิจัยนี้จากงบประมาณเงิน
รายได้ของมหาวิทยาลัย ประจำปี พ.ศ. 2562 ทำให้
งานวิจัยนี้ดำเนินการสำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

6. อ้างอิง

- [1] Comfort Zone for Conditioned Space
[Internet] . [cited 2019 March 30] .
Available form: <http://www.air-conditioner>

- selection. com/ comfort- zone- air-conditioner-sizing.html.
- [2] กรมอุตุนิยมวิทยา [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ: ความชื้นสัมพัทธ์ [เข้าถึงเมื่อ 1 เมษายน 2562] จาก: <http://www.tmd.go.th/info>.
- [3] Sonntag D. Important New Values of the Physical Constants of 1986. Vapour Pressure Formulations based on the IST-90 and Psychrometer Formulae. Z. Meteorol. 1990:340-44.
- [4] Muhammad H. Rashid. Power Electronics Handbook. California USA. Academic Press; 2001.
- [5] Brown M. , Practical Switching Power Supply Design. California USA. Academic Press; 1990.
- [6] Daniel W. H. Switching Power Supply Design. USA. McGraw-Hill; 2011.

โรงเรือนแบบไฮโดรโปนิกส์ที่มีระบบการควบคุมแบบอัตโนมัติโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ Hydroponics house with automatic control system using solar energy

ขจรศักดิ์ พงศ์ธนา^{1*}, ชัยวัฒน์ สากุล²
Kajornsak Pongtana^{1*}, Chaiwat Sakul²

^{1*}คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย สงขลา

²คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตตรัง

¹Faculty of Industrial education and technology, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Songkla,

²Faculty of Engineering and Technology, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Trang campus,

*Corresponding author. Tel: 08 1541 42999, Email: pkajornsak@yahoo.com

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบการสร้างโรงเรือนแบบไฮโดรโปนิกส์ที่มีระบบการควบคุมแบบอัตโนมัติโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ โครงสร้างของระบบจะมี 2 ส่วน คือ ส่วนแรกจะเป็นระบบพลังงานทดแทนจากพลังงานแสงอาทิตย์ สามารถผลิตกำลังได้ที่ 842.21 วัตต์ต่อวัน โดยใช้แผงโซลาร์เซลล์ขนาด 120 วัตต์ ซึ่งสามารถทำงานได้ไม่น้อยกว่า 8 ชั่วโมงต่อวัน ส่วนที่สองจะเป็นการทำงานของระบบควบคุมการทำงานในโรงเรือน ซึ่งมีอยู่ 5 ระบบ คือ ระบบควบคุมการผสมปุ๋ย ระบบควบคุมการเปลี่ยนถ่ายน้ำ ระบบควบคุมการสูบน้ำ ระบบควบคุมอุณหภูมิและระบบควบคุมความชื้นภายในโรงเรือน ขนาดของโรงเรือนที่ใช้ในการทดสอบจะมีความกว้าง 1.2 เมตร และความยาว 2.4 เมตร หลังคาของโรงเรือนจะเป็นรูปแบบทรงหน้าจั่วโดยปลายยอดหลังคาจะสูงขึ้นจากโครงเสา 0.8 เมตร ข้อดีคือจะสามารถระบายความร้อนได้ดี และพื้นโรงเรือนจะยกสูงจากพื้นดิน 0.80 เมตร มีวัตถุประสงค์เพื่อให้สามารถระบายน้ำส่วนเกินออกได้ โดยที่ช่วงเวลากลางวันระบบสามารถควบคุมความชื้นภายในโรงเรือนได้ 80% ที่อุณหภูมิ 35°C และระบบการเปลี่ยนถ่ายน้ำจะทำงานควบคู่กับระบบการผสมปุ๋ยมีอัตราส่วนคือ 400 มิลลิลิตร ต่อน้ำ 80 ลิตร ที่เวลา 13 วินาที โดยระบบจะมีการทำงานทุก ๆ 7 วัน จนครบ 4 ครั้ง และในครั้งที่ 5 ระบบการเปลี่ยนถ่ายน้ำยังคงทำงานตามปกติโดยที่ระบบผสมปุ๋ยจะหยุดการทำงาน จากผลการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบพบว่าโรงเรือนแบบไฮโดรโปนิกส์ที่ออกแบบสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพเหมาะสำหรับการนำมาประยุกต์ใช้งาน

คำสำคัญ: พลังงานแสงอาทิตย์ ระบบควบคุมอัตโนมัติ โรงเรือนไฮโดรโปนิกส์

Abstract

The article presents hydroponics house with an automation control system using solar energy. The structure of the system is divided into 2 parts: the first part is the solar energy

Received 31-07-2019

Revised 09-09-2019

Accepted 11-09-2019

system which can produce electric power at 842.21 Watt per day and the second part is the control system which consists of 5 operations; fertilizer mixing control system, water charging control system, water pump control system, temperature control system and humidity control system. The dimension of the hydroponics house is 12 meters wide and 2.4 meters in length. The house is covered with a gable roof with 0.8-meter height up from the roof frame for better ventilation, meanwhile, the floor frame is also 0.8-meter-high up from the ground for the release of overused water. During the daytime, the system can control 80% of humidity inside hydroponics house at a temperature of 35°C. The water charging control system will work in conjunction with the fertilizer mixing system with a ratio of 400 mL fertilizer per 80 liters of water at 13 seconds run time. The system is functioned to run every 7 days for 4 times and then at the fifth time, the water charging control system will still work as usual while the fertilizer mixing system will stop working. From the performance testing of the system, it is found that the designed hydroponics-house can work efficiently and is suitable for the application.

Keywords: Solar energy, Automation control system, Hydroponics-house

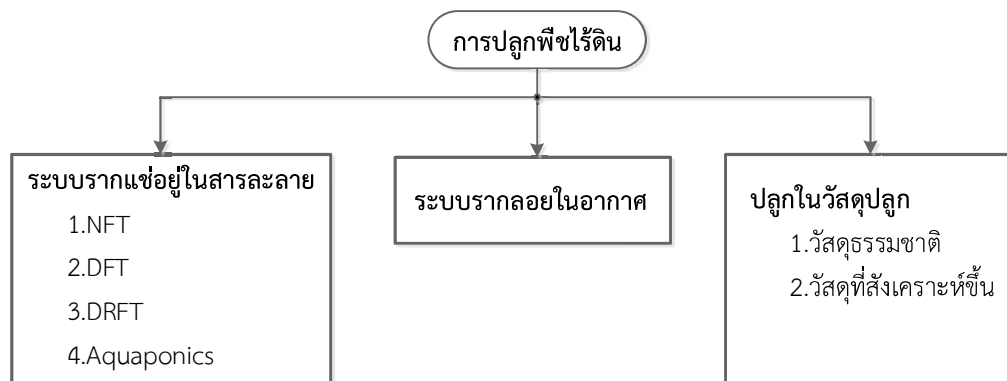
1. บทนำ

ประเทศไทยได้ชื่อว่าเป็นประเทศทางด้านการเกษตรกรรมมาตั้งแต่อดีตถึงปัจจุบัน เนื่องจากเป็นประเทศที่ตั้งอยู่ในเขตร้อนชื้นเอเซียตะวันออกเฉียงใต้ ซึ่งมีสภาพภูมิประเทศ ทรัพยากร สิ่งแวดล้อมและมีภูมิอากาศเอื้อต่อการทำการเกษตร ประชากรส่วนใหญ่ของประเทศจะประกอบอาชีพทางด้านเกษตรกรรมหรืออาชีพที่เกี่ยวข้องด้านการเกษตร แม้ว่าในปัจจุบันได้มีการพัฒนาให้ประเทศก้าวไปสู่ประเทศที่มีการพัฒนาทางด้านอุตสาหกรรมแต่ก็ยังคงต้องพึ่งพาอาศัยเกษตรกรรมอยู่เช่นเดียวกับประเทศที่ได้พัฒนาไปแล้ววิวัฒนาการและการพัฒนาการเกษตรของไทยได้มีการเปลี่ยนแปลงตามยุคสมัยด้วยเช่นกันตามกระแสการเปลี่ยนแปลงของโลกที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา การปลูกพืชก็เช่นเดียวกันในอดีตจะเป็นการปลูกพืชในดินซึ่งเป็นวิธีการที่มีการปฏิบัติโดยทั่วไป ต่อมาได้มีการนำเสนอ

งานวิจัยที่ได้แสดงวิธีและกระบวนการต่าง ๆ ในการปลูกพืชวิธีใหม่ขึ้นมามากมาย [1-7] โดยได้เสนอวิธีการที่เหมาะสมกับการปลูกพืชในบริเวณที่ไม่มีพื้นที่สำหรับการเพาะปลูก เช่น คอนโด อพาร์ทเมนต์ เป็นต้น นั่นคือวิธีการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์ วิธีการแบบนี้เหมาะสำหรับการปลูกพืชผักสวนครัวที่มีลักษณะของลำต้นไม่ใหญ่หรือสูงมากนัก ส่วนใหญ่จะเป็นผักที่นำส่วนของใบมาประกอบอาหารเท่านั้น จุดเด่นที่สำคัญของการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์จะสามารถป้องกันป้องกันแมลงที่เป็นศัตรูพืชได้ดีและเป็นผักที่ปลอดสารพิษ แต่อย่างไรก็ตามการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์มีความจำเป็นต้องใช้พลังงานไฟฟ้าช่วยในการสูบน้ำเพื่อจ่ายให้กับพืชที่ปลูกตลอดเวลา ทำให้เกิดการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าและโรงเรือนที่ใช้ปลูกพืชจะมีลักษณะเป็นแบบโรงเรือนปิดซึ่งจะมีข้อเสียคือภายในโรงเรือนจะมีความร้อนสะสมอยู่เป็นปริมาณมาก วิธีการแก้ไขคือการสร้างระบบการระบายอากาศ

เพื่อให้มีอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการปลูกพืชตามความเหมาะสม ในส่วนของระบบการให้ปุ๋ยที่ผ่านมาจะใช้จะใช้วิธีการให้ปุ๋ยและวิธีการถ่ายน้ำทิ้งโดยมีมนุษย์เป็นผู้ดำเนินการทั้งหมดซึ่งอาจทำให้เกิดปัญหาและอุปสรรคตามมา เช่น ช่วงเวลาของการให้ปุ๋ยและถ่ายน้ำทิ้งไม่ตรงตามเวลาที่กำหนดอาจทำให้พืชที่ปลูกเกิดความเสียหายได้ ตัวอย่างงานวิจัยที่มีการนำเสนอในอดีตที่ผ่านมา [6] ได้เสนอโรงเรือนไฮโดรโปนิคส์อัตโนมัติ ซึ่งจะมีการทำงานโดยสามารถควบคุมความชื้น อุณหภูมิ การให้น้ำแบบหมุนเวียนเป็นต้น ซึ่งระบบจะเลือกการควบคุมการทำงานโดยมนุษย์ แต่มีข้อด้อยคือระบบการทำงานต้องใช้แหล่งพลังงานจากภายนอกมาควบคุมการทำงานทั้งระบบ

ดังนั้นเพื่อลดปัญหาและอุปสรรคดังกล่าว จึงได้เสนอการออกแบบโรงเรือนแบบไฮโดรโปนิคส์ที่มีระบบการควบคุมแบบอัตโนมัติโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งข้อดีของระบบจะสามารถใช้ระบบที่มีการควบคุมแบบอัตโนมัติมาประยุกต์ใช้ในระบบต่างๆ ที่เกี่ยวข้องแทนการควบคุมโดยมนุษย์และทำให้สามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งจะใช้แผงโซลาร์เซลล์ที่มีขนาด 120 วัตต์ เข้ามาช่วยในการผลิตกระแสไฟฟ้าเพื่อใช้ในเวลากลางคืน และข้อดีอีกประการหนึ่งคือเป็นการส่งเสริมให้มีการปลูกผักปลอดสารพิษเพื่อเก็บไว้รับประทานเองเพื่อสุขภาพที่ดีต่อไป



ภาพที่ 1 รูปแบบการปลูกพืชไร้ดิน

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

2.1 การออกแบบโรงเรือน

การออกแบบโรงเรือนแบบไฮโดรโปนิคส์ที่มีระบบการควบคุมแบบอัตโนมัติโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์การสร้างโรงเรือนแบบไฮโดรโปนิคส์การออกแบบจะสร้างโรงเรือนขนาด 1.20 x 2.40 เมตร วัสดุอุปกรณ์ที่ใช้คือท่อพีวีซี โดยใช้ข้อต่อพีวีซีหากาวให้ยึดติดกันเพื่อความทนทาน ประกอบด้วย

- โครงสร้างอาคาร จะใช้วัสดุท่อพีวีซีโดยใช้ข้อต่อพีวีซีมายึดให้ทนทานให้กับโรงเรือน มีขนาด 1.20 x 2.40 เมตร ส่วนของหลังคาจะเลือกแบบทรงหน้าจั่วข้อดีคือจะช่วยระบายความร้อนได้ดี โดยมีปลายยอดหลังคาสูงขึ้นจากโครงเสาประมาณ 0.8 เมตร

- พื้นโรงเรือนยกสูง 0.8 เมตร เพื่อให้สามารถระบายน้ำส่วนเกินออกได้

- วัสดุที่ขึ้นฝาโรงเรือนและหลังคาจะเลือกวัสดุอย่างคลุมเฉพาะสำหรับการปลูกผักไฮโดรโปนิคส์คลุมทั้งโรงเรือนมีลักษณะเป็นผ้าบางพลาสติกสีขาวขุ่น

- ชั้นวางผักจะเป็นส่วนที่ต้องสัมผัสกับน้ำปุ๋ย วัสดุที่เลือกใช้จึงควรมีความทนทานต่อการสึกกร่อน ความชื้น และเชื้อรา

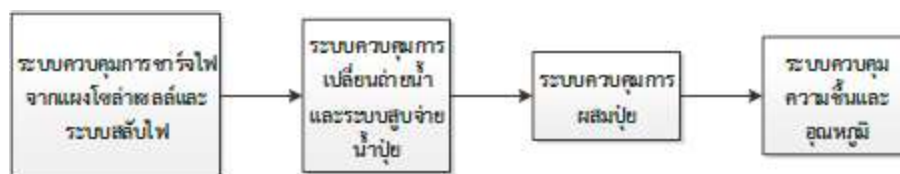
2.2 การออกแบบระบบควบคุม

การปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์จะเป็นการศึกษาเกี่ยวกับการใช้ธาตุอาหารในการปลูกพืชโดยปราศจากดินที่ใช้ในการปลูกพืชโดยทั่วไป ซึ่งในอดีตที่ผ่านมาแบบไฮโดรโปนิคส์สามารถแบ่งออกตามลักษณะและวิธีการปลูกพืชสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม ซึ่งประกอบด้วยกลุ่มแรกจะเป็นระบบรากแช่อยู่ในสารละลาย กลุ่มที่สองจะเป็นระบบรากลอยในอากาศและกลุ่มที่สามจะเป็นระบบที่ปลูกในวัสดุปลูก แสดงได้ดังภาพที่ 1 ปัจจุบันมีผู้เสนองานวิจัยอย่างมากมาย สำหรับรูปแบบของการของการปลูกพืชไร้ดินหรือที่นิยมเรียกว่าการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์นั่นเอง

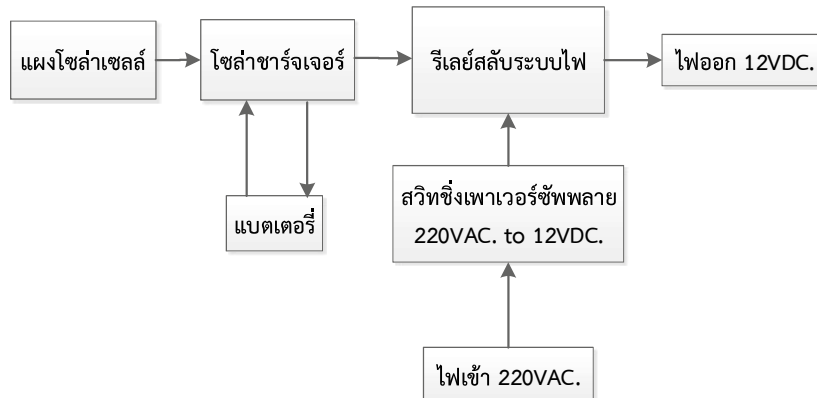
การปลูกพืชในระบบรากแช่ที่นำเสนอในงานวิจัยนี้จะเป็นการปลูกพืชแบบระบบน้ำดิน NFT (Nutrient film technique) วิธีการนี้จะต้องให้ราก

ของพืชแช่อยู่ในน้ำผสมธาตุอาหารพืชตลอดเวลาและมีระบบเติมอากาศลงไปในสารละลายเพื่อให้รากพืชได้รับออกซิเจนอย่างสม่ำเสมอ โดยงานวิจัยที่นำเสนอจะนำระบบการควบคุมโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์มาประยุกต์ใช้ร่วมกับทามเมอร์แทนการควบคุมโดยมนุษย์ซึ่งอาจจะเกิดความผิดพลาดได้และได้ออกแบบให้ระบบการมีการใช้งานได้โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ซึ่งจะช่วยให้การลดและประหยัดพลังงานได้อีกด้วย การทำงานของระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์ที่นำเสนอในงานวิจัยแสดงได้ดังภาพที่ 2

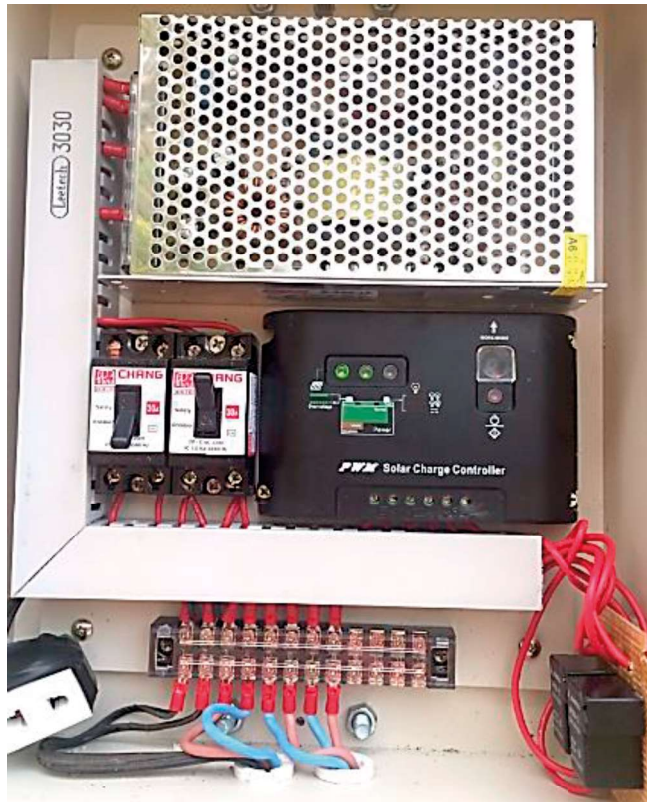
การออกแบบการสร้างโรงเรือนแบบไฮโดรโปนิคส์ที่มีระบบการควบคุมแบบอัตโนมัติโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ที่ออกแบบในงานวิจัยนี้จะมีส่วนประกอบต่าง ๆ ที่สำคัญรวม 4 ส่วนด้วยกัน โดยที่การทำงานของแต่ละส่วนจะมีการทำงานร่วมกันคือระบบควบคุมการชาร์จไฟจากแผงโซลาร์เซลล์และระบบควบคุมการสลับไฟฟ้า ระบบควบคุมการเปลี่ยนถ่ายน้ำและระบบสูบน้ำปุ๋ย ระบบควบคุมการผสมปุ๋ยและระบบควบคุมความชื้นและระบบควบคุมอุณหภูมิโดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์เข้ามาควบคุมโดยอาศัยหลักการเขียนโปรแกรมควบคุมที่ออกแบบจากโปรแกรม Arduino



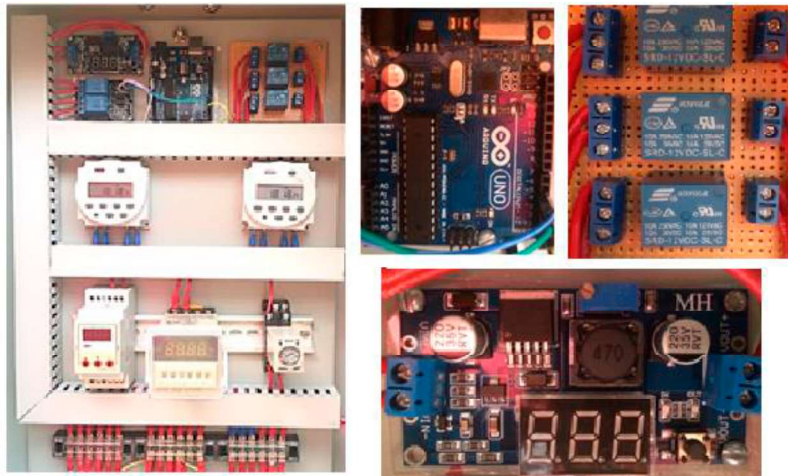
ภาพที่ 2 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของระบบ



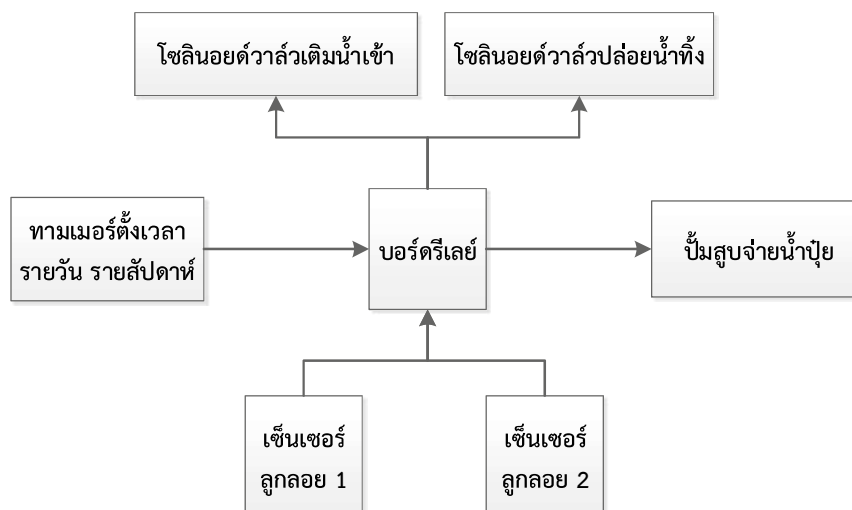
ภาพที่ 3 ระบบควบคุมการชาร์จไฟและระบบควบคุมการสลับไฟ



ภาพที่ 4 ระบบควบคุมการชาร์จไฟจากแผงโซลาร์เซลล์และระบบควบคุมการสลับไฟ



ภาพที่ 5 ระบบควบคุมอัตโนมัติ



ภาพที่ 6 ระบบควบคุมการเปลี่ยนถ่ายน้ำและระบบสูบน้ำจ่ายน้ำปุย

2.2.1 ระบบควบคุมการชาร์จไฟจากแผงโซลาร์และระบบการควบคุมการสลับไฟ

การทำงานของระบบจะมีหลักการทำงาน คือ จะทำการแปลงพลังงานแสงอาทิตย์ในช่วงเวลากลางวันให้เป็นพลังงานไฟฟ้าและทำการชาร์จประจุเข้าสู่แบตเตอรี่ โดยพลังงานที่ใช้ในช่วงเวลากลางวันจะนำแรงดันไฟฟ้ากระแสสลับขนาด

220 โวลต์ แปลงเป็นแรงดันไฟฟ้ากระแสตรงขนาด 12 โวลต์ ทำหน้าที่จ่ายพลังงานไฟฟ้าให้กับอุปกรณ์ทางด้านอิเล็กทรอนิกส์ในตู้ควบคุมโดยตรง และในช่วงระยะเวลากลางคืนหรือในช่วงที่ไม่สามารถชาร์จพลังงานแสงอาทิตย์ได้ ระบบจะสลับการทำงานมาสู่มอเตอร์ที่ใช้พลังงานทดแทนโดยอัตโนมัติโดยรีเลย์เป็นตัวตัดต่อการทำงานของระบบ ซึ่งจะใช้

พลังงานไฟฟ้ากระแสตรงจากแบตเตอรี่ที่ได้ชาร์จ
ประจุไว้ และเมื่อพลังงานจากแบตเตอรี่หมดระบบจะ
สลับการทำงานไปใช้ไฟฟ้ากระแสสลับอีกครั้ง
การทำงานของระบบแสดงได้ดังภาพที่ 3 และภาพที่ 4

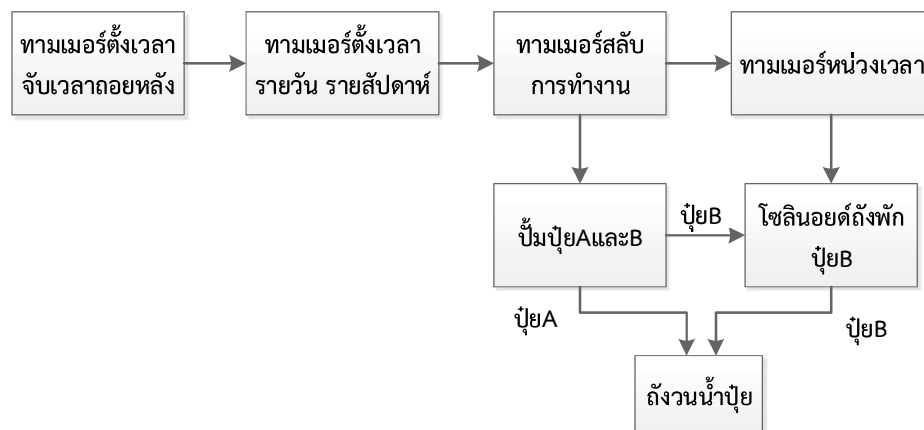
2.2.2 ระบบควบคุมการเปลี่ยนถ่ายน้ำ และระบบสูบน้ำ

การทำงานของระบบทั้งสองแบบจะ
ใช้ตามเมอร์ในการตั้งเวลา โดยสามารถที่จะตั้งเวลา
ให้ระบบมีการทำงานเป็นรายวันหรือรายสัปดาห์ เพื่อ
ควบคุมให้โซลีนอยด์วาล์วทำการเปิดวาล์วเพื่อถ่ายน้ำ
ปุ๋ยออกมา การทำงานของอุปกรณ์สามารถทำงานได้
โดยนำรีเลย์มาต่อกับเซ็นเซอร์ลูกลอยตัวที่ 1 ซึ่งจะ
เป็นเซ็นเซอร์ที่ควบคุมการเติมน้ำในกรณีที่ต้องการ
เติมน้ำหรือในกรณีที่น้ำในระบบลดลง โดยจะสั่งให้
โซลีนอยด์วาล์วเติมน้ำปล่อยน้ำเข้าสู่ระบบจนถึง
ระดับเซ็นเซอร์ของลูกลอยที่กำหนดจากนั้นระบบจะ
ตัดการทำงานของชุดเติมน้ำ ระบบการทำงานของ

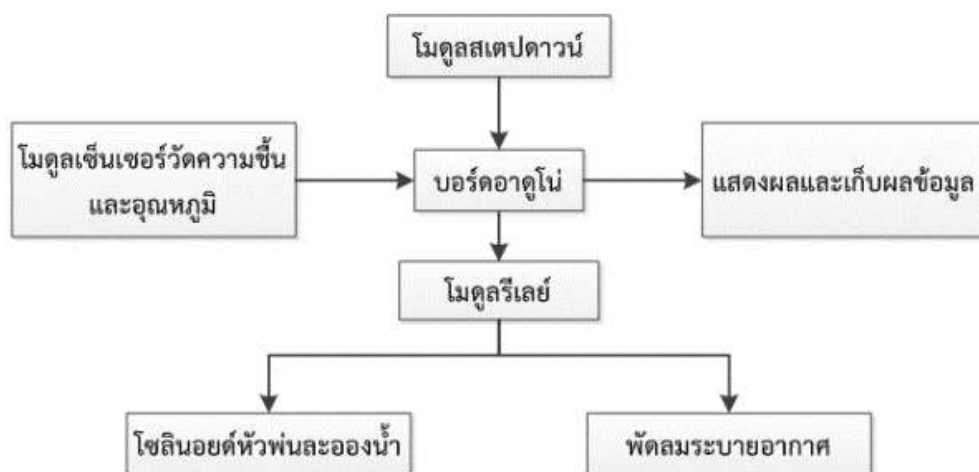
การเติมน้ำจะมีการทำงานตลอดเวลาและในกรณีสั่ง
ให้โซลีนอยด์วาล์วถ่ายน้ำปุ๋ยออกตัวรีเลย์ก็จะทำการ
ตัดระบบการเติมน้ำอัตโนมัติออกไปจนถึงช่วงเวลา
ที่ตั้งตามเมอร์ไว้จึงจะหยุดระบบการถ่ายน้ำปุ๋ยทันที
ในทางกลับกันส่วนของระบบเติมน้ำก็จะกลับมา
ทำงานเช่นเดิม และเมื่อระบบเติมน้ำในถังวนปุ๋ยจน
เต็มเซ็นเซอร์ลูกลอยตัวที่ 2 จะสั่งให้รีเลย์ทำงานเพื่อ
สั่งให้ปั๊มสูบน้ำปุ๋ยทำงาน โดยจะสูบน้ำปุ๋ยไปยัง
แปลงผักไฮโดรโปนิคส์ที่ออกแบบทันที การทำงาน
ของระบบสามารถแสดงบล็อกไดอะแกรมการทำงาน
ได้ดังภาพที่ 5 และภาพที่ 6

2.2.3 ระบบควบคุมการผสมปุ๋ย

ภาพที่ 7 จะแสดงระบบควบคุม
การผสมปุ๋ยซึ่งจะใช้ตามเมอร์เป็นอุปกรณ์หลัก
ในการออกแบบ สามารถอธิบายการทำงานของ
ตามเมอร์ในแต่ละส่วนได้ดังนี้



ภาพที่ 7 ระบบควบคุมการผสมปุ๋ย



ภาพที่ 8 ระบบควบคุมความชื้นและอุณหภูมิ

ตามเมอร์ ตั้งเวลาจับเวลาถอยหลัง จะทำหน้าที่ในการจับเวลานับถอยหลังซึ่งจะควบคุมระยะเวลาในการทำงานให้ระบบมีการทำงานตรงตามระยะเวลาที่กำหนด ซึ่งในงานวิจัยนี้จะกำหนดให้ระบบผสมปุ๋ยมีการทำงานตลอดระยะเวลา 4 สัปดาห์ และในสัปดาห์ที่ 5 จะตั้งให้ตามเมอร์ตัดระบบผสมปุ๋ยให้หยุดการทำงานเพื่อต้องการให้ระบบส่งน้ำให้แปลงผักก่อนทำการเก็บเกี่ยวประมาณ 3-5 วัน

ตามเมอร์ตั้งเวลา รายวัน รายสัปดาห์ จะทำหน้าที่สั่งให้ระบบผสมปุ๋ยทำงานหลังจากที่ระบบเปลี่ยนถ่ายน้ำทำงาน

ตามเมอร์สลับการทำงาน จะทำหน้าที่ควบคุมควบคุมปริมาณของปุ๋ยให้มีอัตราส่วนตรงตามที่ผักต้องการ โดยจะสั่งให้ปั๊มปุ๋ย A และปั๊มปุ๋ย B ทำการปั๊มปุ๋ยในอัตราส่วนที่เท่ากัน การทำงานปุ๋ย A จะถูกปั๊มลงสู่ถังจนน้ำปุ๋ยก่อน ส่วนปั๊มปุ๋ย B จะปั๊มปุ๋ยลงสู่ถังพักปุ๋ย B จนกว่าตามเมอร์หนึ่งเวลาจะสั่งให้โซลินอยด์วาล์วปล่อยปุ๋ย B ลงไปผสมกับปุ๋ย A ในถังวนน้ำปุ๋ย

ตามเมอร์หนึ่งเวลา จะทำหน้าที่หนึ่งเวลาเพื่อให้โซลินอยด์วาล์วของถังพักปุ๋ย B ปล่อยปุ๋ยลงไปผสมกับปุ๋ย A ในถังวนน้ำปุ๋ยในระยะเวลาที่เหมาะสม โดยในงานวิจัยนี้จะกำหนดให้มีการหนึ่งเวลา 5 นาที ซึ่งในระยะเวลาดังกล่าวพบว่าปุ๋ย A และปุ๋ย B จะผสมเข้ากันได้ดีและที่สำคัญไม่ทำให้เกิดการตกตะกอนของปุ๋ยที่ทำการผสม

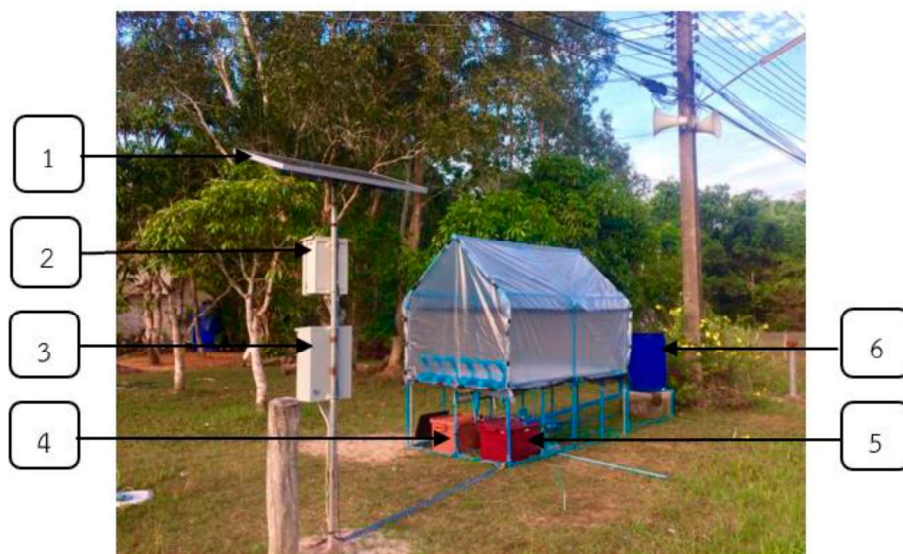
2.2.4 ระบบควบคุมความชื้นและอุณหภูมิ

การทำงานของระบบแสดงดังภาพที่ 8 โดยจะกำหนดให้ระบบทำงานเมื่อเซ็นเซอร์รับค่าความชื้นที่สูงกว่า 80% ที่อุณหภูมิสูงกว่า 35°C ซึ่งจะควบคุมการทำงานโดยไมโครคอนโทรลเลอร์โดยจะทำการประมวลผลแล้วสั่งไมโครรีเลย์ทำหน้าที่ในการตัดต่อให้พัดลมระบายอากาศทำงานเพื่อเป็นการดูดอากาศร้อนขึ้นบริเวณภายในของแปลงปลูกผักไฮโดรโปนิคส์ออกจนกว่าค่าความชื้นภายในโรงเรือนจะลดลงตามที่กำหนดระบบควบคุมความชื้นและอุณหภูมิจึงจะหยุดการทำงาน ทั้งนี้เพื่อเป็นการ-

ป้องกันโรครากเน่าที่เกิดขึ้นสำหรับการปลูกผักแบบไฮโดรโปนิคส์ และในกรณีที่เซนเซอร์รับค่าอุณหภูมิที่มีอุณหภูมิสูงกว่าค่าที่กำหนด (ในงานวิจัยกำหนดอุณหภูมิในโรงเรือนมีค่า 35°C) ไมโครคอนโทรลเลอร์จะสั่งให้โซลินอยด์เปิดให้น้ำไหลผ่านท่อไปยังหัวฟ่นละอองน้ำทำงานจนกว่าอุณหภูมิต่ำกว่า 35°C ระบบจึงจะหยุดการทำงาน ระบบที่นำเสนอในงานวิจัยนี้จะเหมาะกับการเจริญเติบโตของผักไฮโดรโปนิคส์เพราะการปลูกพืชไร้ดินในระบบไฮโดรโปนิคส์แบบ Nutrient film technique (NFT) ในโรงเรือนเพาะปลูกระบบปิด ซึ่งจะต้องมีการควบคุมให้มีอุณหภูมิในโรงเรือนระหว่าง $25\text{--}35^{\circ}\text{C}$ ความชื้น 60–80% [1-4]

ภาพที่ 9 จะแสดงลักษณะโครงสร้างของโรงเรือนแบบไฮโดรโปนิคส์ที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ประกอบด้วย แผงโซลาร์เซลล์ (หมายเลข 1) ตู้ควบคุมการชาร์จแบตเตอรี่และควบคุมการสลับระบบไฟฟ้า (หมายเลข 2) ตู้ควบคุมอัตโนมัติสำหรับโรงเรือนแบบไฮโดรโปนิคส์ (หมายเลข 3) ถังเก็บแบตเตอรี่และถังเก็บปุ๋ย (หมายเลข 4) ถังวนน้ำปุ๋ย (หมายเลข 5) และถังพักน้ำ (หมายเลข 6)

ภาพที่ 10 จะแสดงลักษณะโครงสร้างภายในของโรงเรือนแบบไฮโดรโปนิคส์ ซึ่งประกอบด้วย วาล์วปรับปริมาณการไหลของน้ำปุ๋ย (หมายเลข 1) หัวฟ่นละอองน้ำ (หมายเลข 2) พัดลมดูดความชื้น (หมายเลข 3) เซนเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิและความชื้น (หมายเลข 4) และรางปลูกผัก (หมายเลข 5)



ภาพที่ 9 ลักษณะโครงสร้างของโรงเรือนแบบไฮโดรโปนิคส์ที่ใช้พลังงานแสงอาทิตย์



ภาพที่ 10 ลักษณะโครงสร้างภายในของโรงเรือนแบบไฮโดรโปนิคส์

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

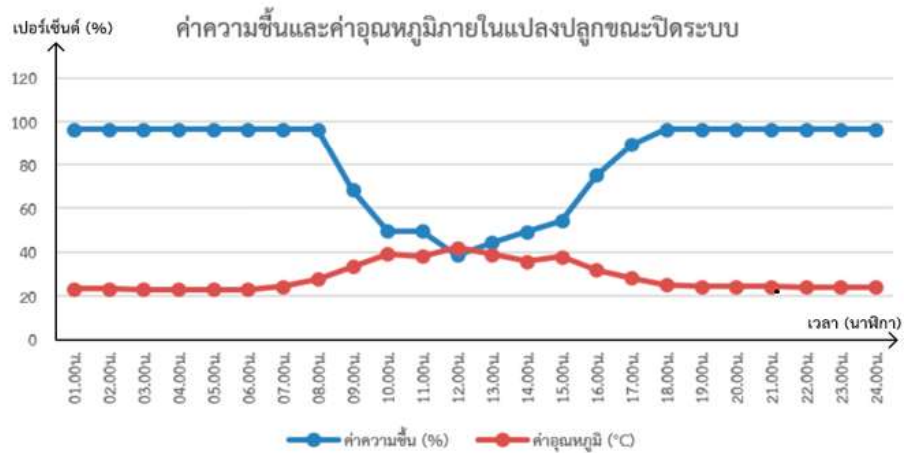
การทดสอบการทำงานของระบบจะทำการทดสอบ 4 ส่วนด้วยกัน ดังนี้คือ ส่วนแรกคือทดสอบระบบวัดค่าความชื้นและค่าอุณหภูมิอัตโนมัติ ส่วนที่สองจะเป็นการทดสอบการทำงานของระบบการเปลี่ยนถ่ายน้ำปุ๋ย ส่วนที่สามจะเป็นการทดสอบการทำงานของระบบผสมแม่ปุ๋ย A และแม่ปุ๋ย B และสุดท้ายจะทดสอบการทำงานของระบบสลับไฟฟ้าเป็นการใช้ระบบไฟจากพลังงานแสงอาทิตย์ [5-7] ดังนี้

3.1 การทดสอบระบบการทำงานวัดค่าความชื้นและอุณหภูมิ

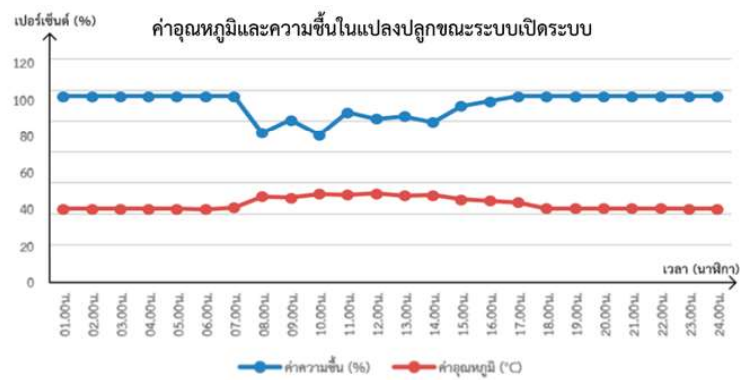
ภาพที่ 11 เป็นการทดสอบในขณะปิดระบบ พบว่าความชื้นในตอนกลางวันมีค่าต่ำกว่า 80% ที่อุณหภูมิสูงกว่า 35°C ทำให้อากาศภายในโรงเรือนโดยรวมจะเป็นอากาศที่ไม่เหมาะสมสำหรับการปลูกผักแบบไฮโดรโปนิคส์

ภาพที่ 12 เป็นการทดสอบในขณะเปิดระบบ พบว่าความชื้นในตอนกลางวันมีค่าไม่เกิน 80% ที่อุณหภูมิสูงกว่า 35°C ทำให้อากาศภายในโรงเรือน โดยรวมจะเป็นอากาศที่เหมาะสมสำหรับการปลูกผักแบบไฮโดรโปนิคส์

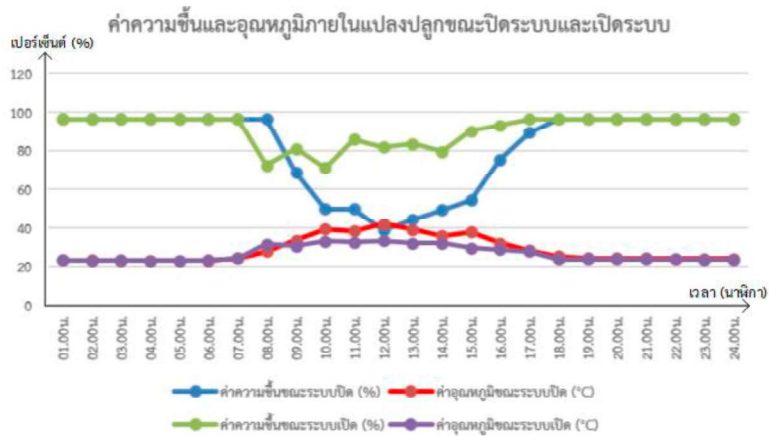
ภาพที่ 13 จะเป็นผลการทดสอบค่าความชื้นและอุณหภูมิในขณะเปิดระบบควบคุมอัตโนมัติ ในช่วงเวลากลางวันค่าความชื้นภายในโรงเรือนจะมีค่าต่ำและค่าอุณหภูมิมีค่าสูงทำให้ส่งผลให้สภาพอากาศภายในโรงเรือนมีสภาพอากาศที่ร้อนแห้งจึงไม่เหมาะสำหรับการปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์ และเมื่อเปิดระบบควบคุมอัตโนมัติให้ทำงานพบว่าค่าความชื้นและอุณหภูมิภายในโรงเรือนจะมีค่าเปลี่ยนไปจากเดิมโดยที่ค่าความชื้นจะมีค่าเพิ่มมากขึ้นแต่อุณหภูมิจะไม่เกินค่าที่กำหนดไว้จึงทำให้สภาพอากาศภายในโรงเรือนมีสภาพอากาศที่เหมาะสมแก่การเพาะปลูกพืชแบบไฮโดรโปนิคส์



ภาพที่ 11 ค่าความชื้นและอุณหภูมิในขณะปิดระบบ



ภาพที่ 12 ค่าความชื้นและอุณหภูมิในขณะเปิดระบบ



ภาพที่ 13 ความแตกต่างของค่าความชื้นและอุณหภูมิระหว่างปิดระบบกับเปิดระบบ

3.2 การทดสอบระบบการทำงานระบบ เปลี่ยนถ่ายน้ำปุ๋ย

การทดสอบเปิดระบบการทำงานเปลี่ยนถ่ายน้ำปุ๋ยเพื่อหาระยะเวลาที่เหมาะสมในการเปลี่ยนถ่ายน้ำปุ๋ยและเติมน้ำปุ๋ย โดยการใช้น้ำพิก้าในการจับเวลาการระบายน้ำและการเติมน้ำจนเต็ม จากนั้นจะตั้งเวลาโดยใช้ทามเมอร์ควบคุม พบว่าในกรณีใช้ถังวนน้ำปุ๋ยที่มีขนาด 80 ลิตร จะใช้เวลาในการถ่ายน้ำทั้งประมาณ 15 นาทีและใช้เวลาเติมน้ำประมาณ 10 นาที การทดสอบจะตั้งเวลาที่ตัวทามเมอร์ควบคุมการถ่ายน้ำปุ๋ยในการปลูกพืชไฮโดรโปนิกส์เป็นระยะเวลา 1 เดือน พบว่าระบบสามารถทำงานได้ตรงตามระยะเวลาที่ตั้งไว้โดยกำหนดให้ระบบถ่ายน้ำทั้งทำงานที่เวลา 18.00-18.15 น. และเวลาที่ระบบเติมน้ำจนเต็มเวลา 18.15-18.25 น. ในทุก ๆ 7 วัน จำนวน 5 ครั้ง

3.3 การทดสอบระบบการทำงานการผสม แม่ปุ๋ย A และแม่ปุ๋ย B

การทดสอบการตั้งเวลาการทำงานกรณีใช้ถังวนน้ำปุ๋ย 80 ลิตร จะใช้อัตราส่วนของแม่ปุ๋ยกำหนดให้ใช้การผสมเป็นแม่ปุ๋ย 5 มิลลิลิตรต่อน้ำ 1 ลิตร ดังนั้นในกรณีนี้จะต้องใส่แม่ปุ๋ย A และแม่ปุ๋ย B ชนิดละ 400 มิลลิลิตร โดยจะตั้งเวลาของทามเมอร์ปั๊มสูบลำน้ำ 13 วินาที และตั้งเวลาของทามเมอร์ระบบปิดการผสมปุ๋ยที่เวลา 600 ชั่วโมง ดังนั้นจะต้องใช้เวลาในการทดสอบ 5 สัปดาห์ สำหรับระบบที่ทำการออกแบบ โดยระบบผสมปุ๋ยมีการทำงานตลอดระยะเวลา 4 สัปดาห์ และในสัปดาห์ที่ 5 จะตั้งให้ทามเมอร์ตัดระบบผสมปุ๋ยให้หยุดการทำงานเพื่อต้องการให้ระบบส่งน้ำให้แปลงผักก่อนทำการเก็บเกี่ยวประมาณ 3-5 วัน โดยจะสามารถลดอาการขมของผักและจะทำให้ผักสามารถดูดทรัพยากรปุ๋ยไปใช้ใน

การเจริญเติบโตจนหมดก่อนนำผักนั้นมาทำการบริโภค

3.4 การทดสอบระบบการทำงานของระบบ สลับไฟฟ้าไปใช้ไฟฟ้าจากพลังงานแสงอาทิตย์

การทำงานของระบบพลังงานแสงอาทิตย์โดยใช้โซลาร์เซลล์จะตั้งให้ระบบมีการทำงานอยู่ในโหมด 2 ซึ่งจะมีการทำงานหลังจากที่ดวงอาทิตย์ตก (12 ชั่วโมง) โดยจะกำหนดให้รีเลย์สลับไปใช้พลังงานจากแบตเตอรี่ที่ผ่านการชาร์จประจุจากโซลาร์เซลล์ในช่วงเวลากลางวัน ในกรณีที่พลังงานจากแบตเตอรี่หมดระบบก็จะตัดไปใช้พลังงานไฟฟ้าเช่นเดิมโดยอัตโนมัติ ผลการทดสอบพบว่าระบบการชาร์จพลังงานไฟฟ้าโดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์จะสามารถชาร์จประจุไฟฟ้านำมาใช้ในโรงเรือนนาน 8 ชั่วโมง 25 นาที ใช้เวลาในการทดสอบ 7 วัน พบว่าระบบมีการทำงานสลับไปใช้ไฟฟ้าจากบ้านเฉลี่ยในช่วงระยะเวลา 03.05 น. ถึง 18.40 น. และระบบจะสลับไปใช้ไฟฟ้าจากแบตเตอรี่เฉลี่ยเวลา 18.40 น. ถึง 03.05 น.

4. สรุปผลการวิจัย

ระบบควบคุมอัตโนมัติสำหรับโรงเรือนแบบไฮโดรโปนิกส์โดยใช้พลังงานแสงอาทิตย์ โรงเรือนมีขนาด (1.20 x 2.40 x 1.60) เมตร (กว้างxยาวxสูง) สามารถปลูกผักได้จำนวน 60 ต้น สามารถประหยัดพลังงานไฟฟ้าและเพิ่มประสิทธิภาพของโรงเรือนเพาะปลูกผักแบบไฮโดรโปนิกส์ การทำงานจะไม่ไครคอนโทรลเลอร์ควบคุมความชื้นและอุณหภูมิสามารถควบคุมความชื้นภายในโรงเรือนในช่วงเวลากลางวันไม่เกิน 80% ที่อุณหภูมิไม่เกิน 35°C สำหรับการปลูกพืชไร้ดินในระบบไฮโดรโปนิกส์ แบบ Nutrient film technique (NFT) โรงเรือนเพาะปลูกจะเป็นระบบปิดซึ่งต้องควบคุมให้มีอุณหภูมิระหว่าง

25-35°C ความชื้น 60-80% ส่วนระบบการเปลี่ยนถ่ายน้ำจะทำงานควบคู่ไปกับระบบผสมปุ๋ย โดยจะผสมปุ๋ยที่อัตราส่วน 400 มิลลิลิตรต่อน้ำ 80 ลิตร ซึ่งจะใช้เวลา 13 วินาที โดยระบบจะทำงานทุก ๆ 7 วัน จนครบ 4 ครั้ง เมื่อเข้าสู่ครั้งที่ 5 ระบบผสมปุ๋ยจะหยุดการทำงาน แต่ระบบเปลี่ยนถ่ายน้ำยังมีการทำงานตามปกติ ทุก ๆ ครั้งที่ระบบเปลี่ยนถ่ายน้ำทำงานทำให้ระบบการสูบน้ำปุ๋ยหยุดการทำงาน ลงจนกระทั่งระบบเปลี่ยนถ่ายน้ำปุ๋ยเปลี่ยนถ่ายน้ำเสร็จ ระบบสูบน้ำปุ๋ยถึงจะกลับมาทำงานอีกครั้ง ส่วนระบบพลังงานแสงอาทิตย์จะทำการชาร์จในช่วงเวลากลางวัน พลังงานที่ได้จากแผงโซลาร์เซลล์ ขนาด 120 วัตต์ จะผลิตกำลังวัตต์ได้เฉลี่ย 842.21 วัตต์ต่อวัน ขึ้นอยู่กับปริมาณและระยะเวลาของแสงจากดวงอาทิตย์ที่ลงมาตกกระทบกับแผงโซลาร์เซลล์ กำลังการผลิตไฟฟ้าที่ได้จากแผงโซลาร์เซลล์สามารถนำพลังงานมาใช้กับระบบทั้งหมดภายในโรงเรือนได้นานเฉลี่ยประมาณ 8 ชั่วโมงต่อวัน และเมื่อนำมาคิดค่าความคุ้มค่าเมื่อนำไปสร้างเป็นโรงเรือนขนาดใหญ่จะทำให้ลดต้นทุนแต่ยังมีข้อจำกัดในส่วนของคุณภาพและงบประมาณที่ค่อนข้างสูงสำหรับการปลูกพืชไว้รับประทานเองในครอบครัว

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณนายสันติ พูนสวัสดิ์และนางสาวบุญธิดา เดชอรัญ นักศึกษาคณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตตรัง ที่ได้ช่วยทางด้านเทคนิคในการจัดทำงานวิจัยให้สำเร็จตามวัตถุประสงค์

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] ดิเรก ทองอร่าม. การปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน: หลักการจัดการผลิตเชิงธุรกิจในประเทศไทย (ฉบับปรับปรุงพิมพ์ใหม่ครั้งที่ 3). กรุงเทพฯ: พิมพ์ดีการพิมพ์; 2550.
- [2] นพดล เรียบเลิศหิรัญ. การปลูกพืชไร้ดิน (พิมพ์ครั้งที่ 3). กรุงเทพฯ: สุวีริยาสาส์น; 2553.
- [3] โสระยา ร่วมรังสี. การปลูกพืชแบบไม่ใช้ดิน. กรุงเทพฯ: โอเดียนสโตร์; 2544.
- [4] อานัฐ ตันโช. คู่มือการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน. เชียงใหม่: ทรีโอแอดเวอร์ไทซิง แอนด์ มีเดีย; 2552.
- [5] ธนากร น้ำหอมจันทร์, อติกร เสรีพัฒน์นันท. ระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในโรงเรือนเพาะปลูกพืชไร้ดินแบบ Evaporative Cooling System ร่วมกับการสเปรย์ละอองน้ำแบบอัตโนมัติโดยใช้ PLC. รายงานฉบับสมบูรณ์ทุนวิจัยมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย ประจำปีการศึกษา 2555. กรุงเทพฯ; 2556.
- [6] คำคุณ พันธวงศ์, รัฐศิลป์ รานอกภานุวัชร. โรงเรือนไฮโดรโปนิคส์อัตโนมัติ. การประชุมวิชาการงานวิจัยและพัฒนาเชิงประยุกต์ ครั้งที่ 9 การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีเพื่อตอบสนองท้องถิ่นและภาคอุตสาหกรรม. The 9th Conference on Application Research and Development; 25-28 กรกฎาคม 2560; เชียงคาน, จังหวัดเลย. 2017
- [7] สมนึก ฉิมเรือง, ตันติกร จันโท. การพัฒนาระบบควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในโรงเรือนเพื่อการปลูกผักสวนครัว. ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. ประเทศไทย; 2559.

การคำนวณค่าความเสี่ยงและการทดสอบสภาวะวิกฤตสำหรับตราสารหนี้ระยะยาว An approach calculate value at risk and stress test for long term bond

วิกานดา สุภานันท์^{1*}, สัจจา ดวงชัยอยู่สุข²
Wikanda Suphasanun¹, Sartja Duangchaiyoosook²

¹สาขาวิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

²คณะเศรษฐศาสตร์ มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย

¹Division of Mathematics, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Krungthep

²Economic Faculty, University of the Thai Chamber of Commerce

*Corresponding author. Tel: 08 0551 1614, E-mail: wikanda.s@mail.rmutk.ac.th

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้เป็นการนำเสนอวิธีการบริหารและการทดสอบพอร์ตโฟลิโอภายใต้ความเสี่ยงที่เกิดขึ้นจากอัตราดอกเบี้ยของตราสารหนี้ โดยใช้ข้อมูลตัวอย่าง คือ อัตราดอกเบี้ยของตราสารหนี้รัฐบาลที่ไม่มีคูปอนที่มีอายุตั้งแต่ 3 เดือน ถึง 45 ปี ของเดือนมีนาคม พ.ศ. 2554 จนถึงเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2561 จากข้อมูลดังกล่าว เมื่อใช้เทคนิคการวิเคราะห์หาค่าประกอบหลัก จะพบว่าการอธิบายความผันผวนที่เกิดขึ้นกับข้อมูลอัตราดอกเบี้ยของตราสารหนี้รัฐบาลที่ไม่มีคูปอนมีอยู่ 3 องค์ประกอบหลัก คือ การเปลี่ยนแปลงค่าอัตราดอกเบี้ย ความชันและการเปลี่ยนแปลงของเส้นโค้ง ซึ่งเพียงพอต่อการอธิบายความผันผวนของเส้นอัตราดอกเบี้ย และได้นำองค์ประกอบเหล่านี้มาใช้ในการจำลองอัตราดอกเบี้ยในภาวะที่ผิดปกติ โดยใช้ตัวแปรสุ่มที่ $\pm 1SD$, และ $\pm 2SD$ เพื่อมาคำนวณมูลค่าปัจจุบันสุทธิ (NPV) และเปรียบเทียบกับการวัดมูลค่าความเสี่ยง (VaR) ในการศึกษาพบว่าสำหรับค่าความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95 การทดสอบในสภาวะวิกฤตจะใช้การคำนวณน้อยกว่าการวัดมูลค่าความเสี่ยง เพราะไม่จำเป็นต้องจำลองสถานการณ์ของเส้นอัตราผลตอบแทน และผลที่ได้ยังสอดคล้องกับการวัดความเสี่ยงด้วยมูลค่าความเสี่ยงที่จำลองเส้นอัตราดอกเบี้ยโดยจากการสุ่มทั้งหมด 100,000 ครั้ง งานวิจัยนี้จึงสามารถช่วยบริหารจัดการในการประเมินความเสี่ยงและผลกำไรที่บริษัทประกันต้องเสี่ยง โดยเกิดจากการลงทุนของการถือตราสารหนี้รัฐบาลเป็นหลักได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

คำสำคัญ: ตราสารหนี้รัฐบาลที่ไม่มีคูปอน การวิเคราะห์หาค่าประกอบหลัก ภาวะที่ผิดปกติ การวัดมูลค่าความเสี่ยง

ABSTRACT

This research presents a method of managing and assessing portfolio under risk from interest rates of bonds. The dataset used is interest rates of government zero coupon bonds data from March 2011 to May 2018. The bonds' maturity ranges between 3 months to

Received 27-03-2019

Revised 01-10-2019

Accepted 04-10-2019

45 years. This research started by evaluating the interest rates of the government zero coupon bonds, using principal component analysis. To explain the fluctuations of the interest rates, the research found that the first three principle components consist of level, slope and hump. The research then performed stress test using sample variables at $\pm 1SD$ and $\pm 2SD$, and computed value at risk (VaR). The results from the two methods were then used to compute Net Present Value (NPV) for comparison. This research found that, for the same 95 percent accuracy, the stress test used less calculation than VaR, since there is no need for Yield-Curve scenario simulation. Also, the stress test's result corresponded to that of VaR, which simulated interest rate curve from 100,000 randomizations. In conclusion, the stress test method presented in this research could be adopted by insurance companies, whose main investment is government bonds, to effectively manage risks and assess profits.

Keywords: Zero coupon bond, Principal component analysis, Stress test, Value at risk

1. บทนำ

การลงทุนตราสารหนี้ หากต้องการผลตอบแทนที่สูงขึ้น นอกจากจะลงทุนในจำนวนที่มากขึ้นแล้ว ควรจะลงทุนในสินทรัพย์ที่มีความเสี่ยงสูงขึ้นด้วยมูลค่าการลงทุนเท่าเดิม ก็จะทำให้มีโอกาสได้ผลตอบแทนสูงขึ้นเช่นกัน โดยเป็นไปตามหลักการลงทุน High risk high return เนื่องจากการบริหารความเสี่ยงเป็นเครื่องมือที่สำคัญต่อการตัดสินใจในทางธุรกิจ เพราะเมื่อบริษัทตัดสินใจที่จะลงทุนกับสินทรัพย์ใด ๆ ก็ตามบริษัทก็จะได้รับผลตอบแทน (Return) จากสินทรัพย์เหล่านั้น แต่ไม่สามารถประเมินได้ว่าผลตอบแทนที่ได้รับในอนาคตนั้น จะขาดทุนหรือกำไร ซึ่งความไม่แน่นอนดังกล่าว ในทางการเงินนั้นคือตัวแทนของ “ความเสี่ยง” และความเสี่ยงนั้นขึ้นอยู่กับปัจจัยต่าง ๆ โดยความเสี่ยงบางอย่างสามารถป้องกันและหลีกเลี่ยงได้ ดังนั้นความเสี่ยงนั้นเป็นสิ่งที่สถาบันการเงินจะต้องมีการบริหารความเสี่ยงที่เกิดจากการลงทุนในหลักทรัพย์ ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งในการพิจารณาของความเสี่ยงใน

การลงทุนพันธบัตร คือ ความเสี่ยงที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราดอกเบี้ย การจัดตั้งเกณฑ์มาตรฐานหนึ่งซึ่งผู้กำกับดูแลในแต่ละประเทศต่าง ๆ นำมาปรับใช้ในการบริหารค่าความเสี่ยงของสถาบันการเงิน (Basel) เพื่อให้เป็นมาตรฐานในการบริการความเสี่ยงของสถาบันการเงิน โดยทั่วไปแล้วความเสี่ยงหลัก ๆ จะประกอบด้วย 3 ความเสี่ยงหลัก คือ 1) ความเสี่ยงด้านตลาด 2) ความเสี่ยงด้านเครดิต 3) ความเสี่ยงด้านการดำเนินงาน ทั้งนี้ความเสี่ยงที่แฝงอยู่ในความเสี่ยงด้านตลาดอีกประการหนึ่งที่มีผลกระทบต่อพอร์ตโฟลิโอของบริษัทที่มีทรัพย์สินเป็นตราสารหนี้รัฐบาลเป็นส่วนใหญ่ และอีกประการหนึ่งคือ อัตราความเสี่ยงของดอกเบี้ย ซึ่งบริษัทประกันชีวิตโดยส่วนใหญ่จะถือทรัพย์สินเป็นตราสารหนี้รัฐบาลมากกว่า 70% ของพอร์ตโฟลิโอ ซึ่งความเสี่ยงของพอร์ตโฟลิโอจะเกิดขึ้นโดยสินทรัพย์ที่เป็นอัตราความเสี่ยงของอัตราดอกเบี้ยเป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นความผันผวนที่เกิดจากอัตราดอกเบี้ยจะส่งผลกระทบต่อพอร์ตโฟลิโอของบริษัทประกันเป็นอย่างมาก

ถ้าเกิดอัตราดอกเบี้ยต่ำมากจะส่งผลกระทบต่อสินทรัพย์และหนี้สินระยะยาวของบริษัท ซึ่งในพอร์ตโฟลิโอของบริษัทที่ประกอบไปด้วยตราสารหนี้รัฐบาลและมูลค่าเงินสดในกรรมธรรม์เป็นหลัก จะทำให้สินทรัพย์ดังกล่าวมีมูลค่าน้อยกว่าหนี้สิน และจะส่งผลกระทบต่อฐานะทางการเงินของบริษัท เช่น เงินกองทุนที่บริษัทควรดำรงไว้ ทั้งนี้อัตราดอกเบี้ยอาจส่งผลทำให้บริษัทเสี่ยงต่อการล้มละลายได้ (เงินกองทุนที่ดำรงไว้ไม่เพียงพอตามที่มาตรฐานของสถาบันที่กำกับได้กำหนดไว้) ดังนั้นความเสี่ยงจากอัตราดอกเบี้ย (Interest rate risk) เป็นความเสี่ยงจากการที่ราคาตราสารหนี้จะลดลงนั้น เมื่ออัตราดอกเบี้ยเปลี่ยนแปลง เนื่องจากราคาตราสารหนี้จะแปรผกผันกับอัตราดอกเบี้ย หากแต่ถือตราสารจนครบกำหนดอายุ จะได้ถอนได้ตามราคาหน้าพันธบัตร ซึ่งนักลงทุนสามารถหลีกเลี่ยงความเสี่ยงนี้ได้โดยการถือตราสารจนครบกำหนดอายุ ในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ คือ นำเสนอวิธีการบริหารพอร์ตโฟลิโอและวิธีการทดสอบภายใต้ความเสี่ยงที่เกิดขึ้นจากอัตราดอกเบี้ยของตราสารหนี้ โดยใช้วิธีการจำลองอัตราดอกเบี้ยและค่าความเสี่ยงด้วยวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก และการทดสอบสภาวะวิกฤติเพื่อที่จะช่วยสนับสนุนในการตัดสินใจและการบริหารพอร์ตโฟลิโอของธุรกิจประกันได้อย่างดียิ่งขึ้น ซึ่งวิธีดังกล่าวนี้สอดคล้องต่อการอธิบายของพฤติกรรม การเปลี่ยนแปลงของอัตราดอกเบี้ยตามทฤษฎีทางเศรษฐศาสตร์

2. นิยามและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

งานวิจัยนี้จะกล่าวถึงคณิตศาสตร์ สถิติ และเศรษฐมิติการเงินเบื้องต้นที่เกี่ยวข้องในการสร้างแบบจำลองการเคลื่อนไหวของอัตราดอกเบี้ย [1]

การวิเคราะห์ส่วนประกอบสำคัญเป็นเครื่องมือที่อาศัยหลักความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างตัวแปรที่เป็นข้อมูลในการสร้างสมการเชิงเส้น โดยสมการแต่ละเส้นจะมีหน้าที่ในการรวบรวมรายละเอียดเข้าด้วยกัน หรืออยู่ในรูปผลรวมเชิงเส้น (Linear combination) เพื่อใช้การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก ในการอธิบายของการเคลื่อนไหวของอัตราดอกเบี้ย รวมทั้งการสร้างแบบจำลองของการเคลื่อนไหวของอัตราดอกเบี้ยอื่น ๆ

2.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal component analysis, PCA) [2]

การหาองค์ประกอบหลัก จะหาได้จากสมการ $E = \omega x$ ซึ่งจะสามารถกระจายให้อยู่ในรูปของผลรวมเชิงเส้นได้ โดยกำหนดให้ $x_1, x_2, \dots, x_p$ เป็นเวกเตอร์ที่แตกต่างกัน จะมี $e_1, e_2, \dots, e_p$ ที่เขียนเป็นผลรวมเชิงเส้นของ $x_1, x_2, \dots, x_p$ ได้ตามสมการดังนี้

$$e_1 = \omega_{11}x_1 + \omega_{12}x_2 + \dots + \omega_{1p}x_p$$

$$e_2 = \omega_{21}x_1 + \omega_{22}x_2 + \dots + \omega_{2p}x_p$$

:

$$e_p = \omega_{p1}x_1 + \omega_{p2}x_2 + \dots + \omega_{pp}x_p$$

โดยที่จะเรียก $e_1, e_2, \dots, e_p$ ว่าเป็นองค์ประกอบหลัก และมีคุณสมบัติดังต่อไปนี้

1) องค์ประกอบหลักตัวที่หนึ่ง e_1 จะมีผลรวมของความแปรปรวนของข้อมูลมากกว่าองค์ประกอบหลักตัวอื่น ๆ e_2 จะมีผลรวมของความแปรปรวนของข้อมูลมากกว่าองค์ประกอบหลักตัวอื่น ๆ แต่จะน้อยกว่าองค์ประกอบหลักตัวที่หนึ่งและจะเป็นไปตามลำดับ

2) $\omega_{i1}^2 + \omega_{i2}^2 + \dots + \omega_{ip}^2 = 1$ สำหรับ
 $i = 1, 2, \dots, p$
 $3 \ \omega_{i1} \omega_{j1} + \omega_{i2} \omega_{j2} + \dots + \omega_{ip} \omega_{jp} = 0$
 สำหรับ $i \neq j$
 โดยที่ ω_{ij} ค่าสัมประสิทธิ์ของ $x_1, x_2, \dots, x_p$

2.2 เส้นอัตราผลตอบแทน (Yield curve)

เส้นอัตราผลตอบแทน คือ เส้นแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราผลตอบแทน (Yield) กับอายุคงเหลือของตราสารหนี้ (Time to maturity) โดยทุก ๆ จุดบนเส้นอัตราผลตอบแทน โดยจะแสดงถึงอัตราผลตอบแทนตามอายุที่เหลือของตราสารหนี้ ซึ่งโดยทั่วไปจะมีอยู่ 4 ลักษณะ คือ แบบปกติ (Normal yield curve) แบบลาดลง (Inverted yield curve) แบบหลังเขา (Humped yield curve) และแบบราบ (Flat yield curve)

2.3 มูลค่าปัจจุบันสุทธิ (Net present value, NPV) [3]

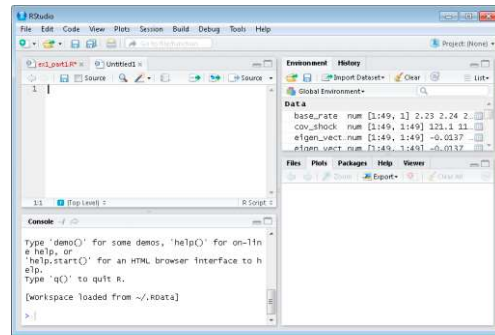
คือ ผลต่างระหว่างมูลค่าปัจจุบันรวมของกระแสเงินสดรับสุทธิกับมูลค่าปัจจุบันของเงินลงทุน

$$NPV = \sum_{i=1}^k \frac{net_i}{(1+r_i)^i} \quad (1)$$

net_i คือ มูลค่าสุทธิที่ได้จากการลงทุนในปีที่ i เมื่อ $i \in \{1, 2, \dots, k\}$
 r_i คือ อัตราผลตอบแทน(ดอกเบี้ย) ในปีที่ i เมื่อ $i \in \{1, 2, \dots, k\}$

3. วิธีดำเนินงานวิจัย

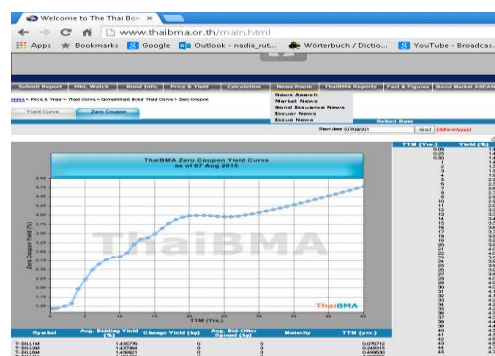
งานวิจัยนี้เลือกใช้โปรแกรม R-Studio เนื่องจากเป็นซอฟต์แวร์ที่ไม่มีค่าใช้จ่ายและเป็นที่แพร่หลายมีความน่าเชื่อถือในการคำนวณ แสดงตัวอย่างดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 Window ของโปรแกรม R-Studio

3.1 แบบแผนการวิจัย

ข้อมูลอัตราดอกเบี้ยของตราสารหนี้รัฐบาลที่ไม่มีคูปอง (Zero-coupon bonds) ซึ่งเรียกว่า ข้อมูลเส้นอัตราผลตอบแทน [3-5] ที่ได้มาจากการคำนวณโดยวิธี Cubic spline bootstrapping [6] ของพันธบัตรรัฐบาลที่มีคูปองและไม่มีคูปอง จากการคำนวณด้วยวิธีดังกล่าว จะนำข้อมูลของเส้นอัตราผลตอบแทนที่นำมาใช้ในงานวิจัย คือ เส้นอัตราผลตอบแทนของตราสารหนี้ที่ไม่มีคูปองที่มีอายุตั้งแต่ 3 เดือน ถึง 45 ปี โดยใช้ข้อมูลตั้งแต่เดือนมีนาคม พ.ศ. 2554 จนถึงเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2561 [7]



ภาพที่ 2 อัตราดอกเบี้ยของตราสารหนี้รัฐบาลที่ไม่มีคูปอง

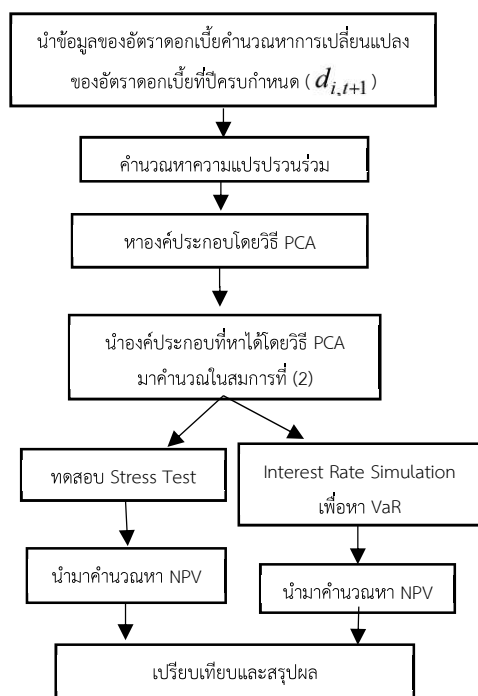
ข้อมูลเส้นอัตราผลตอบแทน (Yield curve) จะถูกอธิบายด้วยสมการ

$$d_{i,t+1} = R_{i,t+1} - R_{i,t}$$

$d_{i,t+1}$ คือ การเปลี่ยนแปลงของอัตราดอกเบี้ยที่ปีครบกำหนด (Maturity year) i

$R_{i,t+1}$ คือ อัตราดอกเบี้ยที่ปีครบกำหนด (Maturity year) i

ขั้นตอนในการทำวิจัยทั้งหมด แสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 กระบวนการขั้นตอนการวิจัย

3.2 การทดสอบสถานะวิกฤติ

ในงานวิจัยนี้ จะสมมติให้เส้นอัตราดอกเบี้ยสอดคล้องกับแบบจำลองการเคลื่อนไหวของอัตราดอกเบี้ยด้วยสมการ

$$R_{i,t+1} = R_{i,t} + \sum_{j=1}^K (\sqrt{\lambda_j} w_{i,j} \varepsilon_j) \quad (2)$$

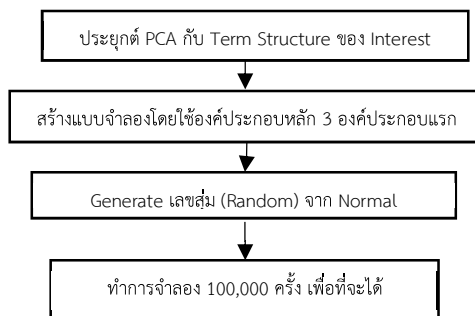
$R_{i,t+1}$ คือ อัตราดอกเบี้ยของปีที่ครบกำหนด i (Maturity year)

λ_j คือ Eigenvalue คำนวณมาจาก PCA อันดับที่ j

$w_{i,j}$ คือ Eigenvector คำนวณมาจาก PCA อันดับที่ j และปีครบกำหนดอันดับที่ i

ε_j คือ ตัวแปรสุ่มปกติ (N(0,1))

แสดงขั้นตอนการคำนวณ ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 แบบจำลองการเคลื่อนไหวของอัตราดอกเบี้ย

หมายเหตุ ในการคำนวณหา Eigenvalue และ Eigenvector จะได้มาจากการคำนวณของค่าความผันผวน (ความแปรปรวนร่วม, Covariance) ที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของ $R_{i,t}$

จากแบบจำลองอัตราดอกเบี้ย $R_{i,t}$ ในสมการที่ (2) ผู้วิจัยจะคำนวณค่า NPV เมื่อกำหนดให้เส้นอัตราผลตอบแทนความผันผวนที่ระดับ σ , 2σ และที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% เมื่อกำหนดความผันผวนจากตัวแปรสุ่มในสมการที่ (2) และเรียกเส้นอัตราผลตอบแทนเหล่านั้นว่า “เส้นอัตราผลตอบแทนในภาวะวิกฤติ” และค่า NPV ที่ได้นั้นนำไปประเมินผลจากค่า NPV ที่ได้ของพอร์ตโฟลิโอในสถานะดังกล่าวมีลักษณะอย่างไร ดังนั้น วิธีนี้จึงเรียกว่า “การทดสอบในสถานะวิกฤติ”

การคำนวณค่า NPV โดยสมมติให้พอร์ตโฟลิโอของบริษัทที่ลงทุนในตราสารหนี้และ

คาดว่าจะมีกำไรทุกปีเป็นจำนวนเงิน 1 ล้านบาท ในระยะเวลาเวลา 45 ปี เพื่อนำค่าดังกล่าวเปรียบเทียบกับวิธีมาตรฐานต่อไป

3.3 การวัดมูลค่าความเสี่ยง (Value at Risk, VaR)

มูลค่าความเสี่ยง คือ ตัวเลขในการวัดความเสี่ยงของการลงทุนที่อาจเกิดขึ้นได้ในสภาวะที่แย่ที่สุดของตลาด เนื่องจากเกิดความผันผวน และในปัจจุบันการบริหารความเสี่ยงโดยใช้เทคนิคมูลค่าความเสี่ยง (VaR) ได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก เพราะสามารถสรุปค่าความเสี่ยงออกมาเป็นตัวเลขเพียงตัวเดียว ทำให้เข้าใจได้ง่ายและตรงประเด็น วิธีการนี้เป็นวิธีมาตรฐานสำหรับการประเมินความเสี่ยงโดยการนำเส้นอัตราผลตอบแทนจากสมการที่ (2) โดยเริ่มจากการจำลอง (Simulation) ของเส้นอัตราผลตอบแทนทั้งหมด 100,000 เส้น จากแปรสุ่มที่เป็นอิสระต่อกันและมีลักษณะการแจกแจงที่

เหมือนกัน IID $N(0,1)$ ซึ่งจะมีทั้งสิ้น 100,000 ค่า และนำค่า NPV ของเปอร์เซ็นต์ไทล์ที่ 5 ของมูลค่าสินทรัพย์สุทธิที่คำนวณได้นั้น จะได้ค่า VaR ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95%

4. การอภิปรายและวิจารณ์ของผลการวิจัย

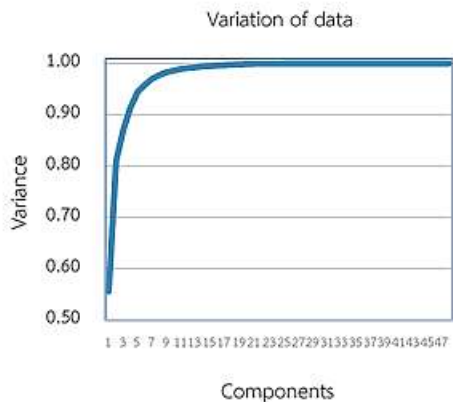
การนำเทคนิค PCA มาหาค่าประกอบหลักในการอธิบายความผันผวนที่เกิดขึ้นกับข้อมูลที่นำมาใช้ในการทำวิจัย โดยสมมติฐานการวิจัย คือ องค์ประกอบหลัก 3 องค์ประกอบแรก (Principal component analysis 3 factors) ที่สามารถอธิบายความผันผวน (Variation) ของการเคลื่อนไหวของอัตราดอกเบี้ยได้เกินกว่า 85% ของความผันผวนทั้งหมดที่เกิดขึ้น หมายความว่า การเปลี่ยนแปลงหลัก ๆ จะขึ้นอยู่กับ 3 องค์ประกอบแรก

ตารางที่ 1 การอธิบาย Eigenvalue และสัดส่วนขององค์ประกอบ 3 องค์ประกอบแรกที่สามารถอธิบายความผันผวนของข้อมูลได้ดังนี้

สัดส่วนที่สามารถอธิบายความผันผวนของข้อมูล			
อันดับที่	Eigen Value	องค์ประกอบที่	ตั้งแต่องค์ประกอบอันดับที่ 1
1	7307	0.56	0.56
2	3341	0.25	0.81
3	803	0.06	0.87
4	572	0.04	0.91
5	400	0.03	0.95

จากตารางที่ 1 พบว่า 3 องค์ประกอบแรกของ PCA สามารถอธิบายความแปรปรวนร่วม (Covariance) ของเส้นอัตราผลตอบแทนได้มากกว่า 85% และอธิบาย

ถึงความผันผวนของการเคลื่อนไหวของอัตราดอกเบี้ยที่เกิดจาก Level, Slope และ Hump ซึ่งสอดคล้องต่อทฤษฎีดอกเบี้ยของเศรษฐศาสตร์ ดังแสดงในภาพที่ 5

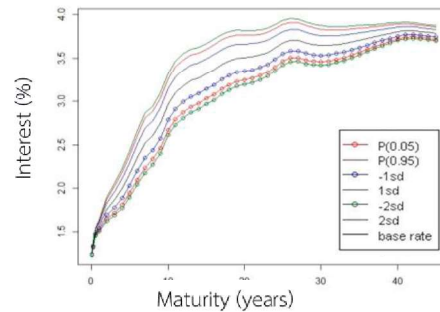


ภาพที่ 5 ความผันผวนของเส้นอัตราผลตอบแทน

4.1 การทดสอบสภาวะวิกฤติ

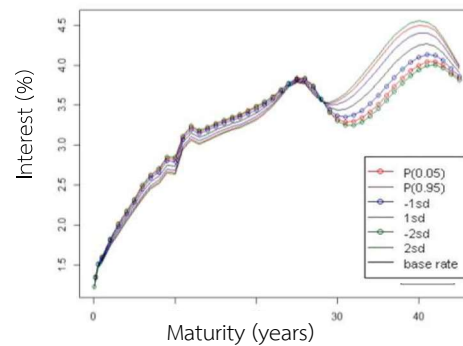
การทดสอบภาวะที่ผิดปกติ (Stress test) ของเส้นอัตราดอกเบี้ยจากแบบจำลองที่ 2 โดยใช้วิธีการตัวแปรสุ่มแบบ $\pm 1SD$ และ $\pm 2SD$ [5, 8] ซึ่งวิธีการนี้สามารถอธิบายได้ว่าถ้าตลาดตราสารหนี้มีความผันผวนอยู่ในสถานการณ์ที่ผู้วิจัยหรือผู้บริหารสนใจ แล้วเส้นอัตราผลตอบแทนของอัตราดอกเบี้ยมีลักษณะเป็นอย่างไร ในสมมติฐานจากการทดสอบสภาวะวิกฤติในหัวข้อ 3.2 ที่ได้แล้วจึงนำเส้นอัตราผลตอบแทนแต่ละเส้นคำนวณหาค่า NPV ที่สภาวะวิกฤติดังกล่าว

จากภาพที่ 6 เมื่อเลือกใช้อัตราดอกเบี้ยที่ 1 เพียงองค์ประกอบเดียว ซึ่งหมายความว่าความผันผวนที่เกิดขึ้นนั้น สามารถอธิบายได้ด้วยระดับการเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราดอกเบี้ย คือ เส้นจะมีการเพิ่มหรือลดระดับ (Level) แต่ยังคงรูปร่างเดิมไว้



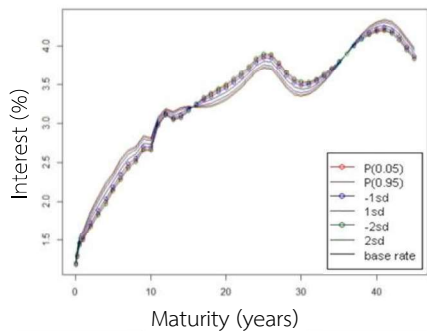
ภาพที่ 6 การทดสอบสภาวะวิกฤติ เมื่อใช้อัตราดอกเบี้ยที่ 1 เพียงองค์ประกอบเดียว

จากภาพที่ 7 ผู้วิจัยเลือกใช้อัตราดอกเบี้ยที่ 2 เพียงองค์ประกอบเดียว ซึ่งหมายความว่า ความผันผวนที่เกิดขึ้นนั้น สามารถอธิบายได้ด้วยระดับการเปลี่ยนแปลงของค่าอัตราดอกเบี้ย เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงความผันผวนนั้น รูปร่างของเส้นอัตราผลตอบแทนก็เปลี่ยนไปด้วย



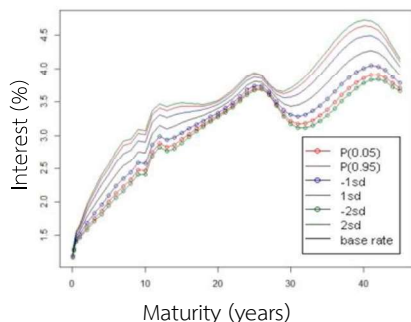
ภาพที่ 7 การทดสอบสภาวะวิกฤติ เมื่อใช้อัตราดอกเบี้ยที่ 2 เพียงองค์ประกอบเดียว

จากภาพที่ 8 ผู้วิจัยเลือกใช้อัตราดอกเบี้ยที่ 3 เพียง
องค์ประกอบเดียว ซึ่งหมายความว่า ความผันผวนที่
เกิดขึ้นนั้น สามารถอธิบายได้ด้วยการเปลี่ยนแปลง
ของเส้นโค้ง (Hump or curvature or convexity)
ซึ่งจะเห็นได้ชัดเจน โดยเฉพาะส่วนต้นและส่วนกลาง
ว่า เมื่อมีการเปลี่ยนแปลงของเส้นโค้ง จะทำให้รูปร่าง
ของเส้นอัตราดอกเบี้ยเปลี่ยนไปด้วย



ภาพที่ 8 การทดสอบสภาวะวิกฤติ เมื่อใช้
องค์ประกอบที่ 3 เพียงองค์ประกอบเดียว

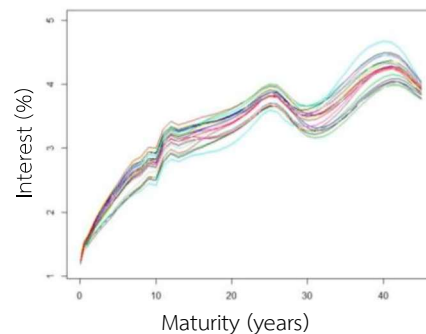
ดังนั้น ที่สภาวะวิกฤติต่างๆ เมื่อแยกแต่ละ
องค์ประกอบแล้วสามารถอธิบายได้ คือ Level
slope และ Hump ตามลำดับ ซึ่งเมื่อนำมา
องค์ประกอบทั้ง 3 ไปแทนในสมการที่ (2) จะเห็นได้
ว่าค่าวิกฤติที่ไข่มากขึ้นแล้วความผันผวนที่จะมีมาก
ขึ้นตามไปด้วย ซึ่งจะสามารถหา NPV ได้ดังนี้



ภาพที่ 9 การทดสอบสภาวะวิกฤติเมื่อ ใช้
องค์ประกอบครบทั้ง 3 องค์ประกอบ

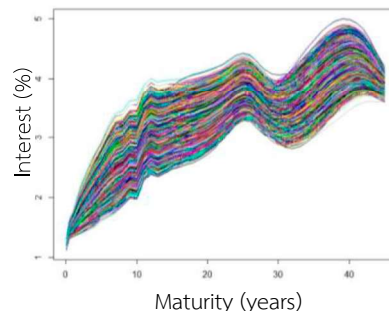
4.2 การสร้างสถานการณ์จำลองของเส้น อัตราผลตอบแทน

ในการจำลองสถานการณ์ต่าง ๆ ของเส้น
อัตราผลตอบแทนโดยการสุ่มทั้งหมด 100,000 ครั้ง
ซึ่งจะทำให้เห็นความเป็นไปได้ต่าง ๆ ของเส้นอัตรา
ผลตอบแทนและความผันผวน ดังภาพที่ 10 เพื่อนำ
เส้นอัตราดอกเบี้ยมาคำนวณ VaR



ภาพที่ 10 การจำลองสถานการณ์ของเส้นอัตรา
ดอกเบี้ยทั้ง 20 เส้น โดยอาศัยแบบจำลองที่ 2

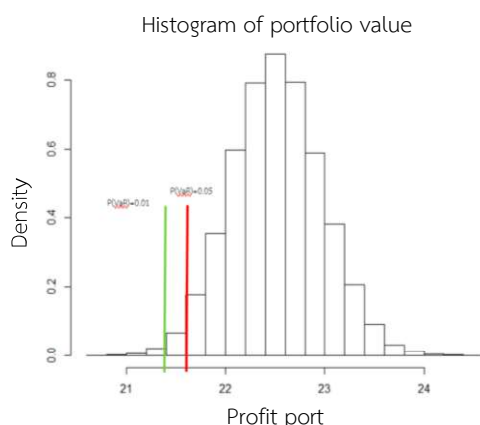
จากภาพที่ 11 การนำเส้นอัตราผลตอบแทน
ของแต่ละเส้นมาคำนวณ NPV เพื่อนำมาวัดความ
เสี่ยงด้วย VaR โดยวิธี Simulation VaR เพื่อดูการ
กระจายตัวของ NPV เมื่อนำไปเปรียบเทียบโดยใช้
แผนภูมิแท่ง (Histogram) ดังภาพที่ 9 แล้วจะพบว่า
ความเสี่ยงที่จะได้ NPV อยู่ภายใต้ระดับความเชื่อมั่น



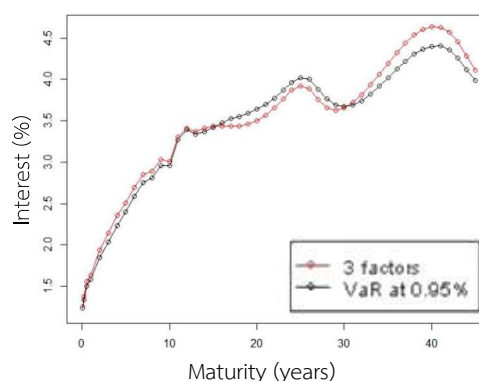
ภาพที่ 11 การจำลองสถานการณ์ของเส้นอัตรา
ดอกเบี้ยทั้ง 100,000 เส้น โดยอาศัยแบบจำลองที่ 2

ตารางที่ 2 ตารางค่า NPV ของแต่ละองค์ประกอบ

NPV (ล้านบาท)	-2SD	0.05	-1SD	Base	1SD	0.95	2SD
องค์ประกอบที่ 1	23.40	23.24	22.95	22.51	22.07	21.80	21.65
องค์ประกอบที่ 2	22.74	22.69	22.62	22.51	22.41	22.35	22.31
องค์ประกอบที่ 3	22.46	22.47	22.48	22.51	22.53	22.55	22.56
ทั้ง 3 องค์ประกอบ	23.59	23.40	23.03	22.51	22.00	21.69	21.62



ภาพที่ 12 แผนภูมิแท่ง Histogram และโค้งปกติของ NPV Simulation



ภาพที่ 13 การเปรียบเทียบระหว่างเส้นอัตราผลตอบแทนของเปอร์เซ็นต์ที่ 5 และเส้นอัตราผลตอบแทนของ VaR ที่ความเชื่อมั่น 95%

ตารางที่ 3 ค่า NPV ในสถานะต่างๆ

NPV น้อยสุด เมื่อระดับความเชื่อมั่น (5, 95)%							
Base Rate	องค์ประกอบที่ 1	องค์ประกอบ ที่ 2	องค์ประกอบ ที่ 3	ทั้ง 3 องค์ ประกอบ	VaR (95%)	VaR (99%)	
NPV (ล้านบาท)	22.51	21.80	22.35	22.55	21.69	21.62	21.38

จากการทดสอบทั้งในสถานะวิกฤติและการวัดความเสี่ยงด้วย VaR พบว่าผลที่ได้จะไม่แตกต่างกันมาก ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% และ

99% ทั้งนี้ในการเลือกจะขึ้นอยู่กับผู้ใช้งานว่ามีความต้องการตั้งเงินสำรองมากน้อยเพียงใดซึ่งขึ้นอยู่กับความเสี่ยงและจะเห็นได้ว่า VaR ที่ 99% ไม่ได้ทำให้

เพิ่มเงินสำรองมาอย่างมีนัยสำคัญ โดยความแตกต่างที่ชัดเจนนั้น คือ ขั้นตอนในการคำนวณซึ่งการทดสอบในสภาวะวิกฤติ ซึ่งจะมีวิธีการคำนวณที่น้อยกว่า เพราะไม่จำเป็นต้องจำลองสถานการณ์ของเส้นอัตราผลตอบแทน แต่ในขณะที่การวัดความเสี่ยงด้วย VaR นั้นจะสอดคล้องกับมาตรฐานในการวัดความเสี่ยง จากการวิจัยพบว่าเส้นอัตราผลตอบแทนจะถูกอธิบายด้วยความผันผวนขององค์ประกอบที่หาได้ด้วยวิธี PCA ซึ่งมีเพียง 3 องค์ประกอบหลัก คือ Level, Slope และ Hump และสามารถอธิบายความผันผวนได้มากกว่า 85%

5. บทสรุปผลการวิจัย

ในการจำลองอัตราดอกเบี้ยและความเสี่ยงโดยการนำเทคนิค PCA มาหาองค์ประกอบหลักในการอธิบายความผันผวนที่เกิดขึ้นกับข้อมูลของพอร์ตโฟลิโอภายใต้ความเสี่ยงที่เกิดขึ้นจากอัตราดอกเบี้ยของตราสารหนี้ จะพบว่าปัจจัยของความผันผวนที่เกิดขึ้นกับข้อมูลอัตราดอกเบี้ยของตราสารหนี้รัฐบาลที่ไม่มีคู่มืออยู่ 3 องค์ประกอบหลัก คือ การเปลี่ยนแปลงค่าอัตราดอกเบี้ย ความชันและการเปลี่ยนแปลงของเส้นโค้ง ซึ่งเพียงพอต่อการอธิบายการเคลื่อนไหวของอัตราดอกเบี้ยได้เกินกว่า 85% ของความผันผวนทั้งหมดที่เกิดขึ้น และสอดคล้องต่อทฤษฎีดอกเบี้ยของเศรษฐศาสตร์ เมื่อนำข้อมูลนั้นมาคำนวณภาวะที่ผิดปกติ (Stress test) ของเส้นอัตราดอกเบี้ยจากแบบจำลองโดยใช้ตัวแปรสุ่ม สามารถอธิบายได้ว่า ถ้าตลาดตราสารหนี้มีความผันผวนในสถานการณ์ที่ผู้วิจัยหรือผู้บริหารสนใจแล้ว เส้นอัตราผลตอบแทนและ NPV จะมีลักษณะเป็นอย่างไร เพื่อ

จะได้วางแผนและกำหนดนโยบายในกรณีที่เส้นอัตราผลตอบแทนนั้นตกอยู่ในสภาวะวิกฤติดังกล่าว ดังนั้นที่สภาวะวิกฤติต่าง ๆ เมื่อแยกแต่ละองค์ประกอบหลักทั้ง 3 ไปแทนในสมการที่ (2) แล้วจะพบว่าค่าวิกฤติที่ใช้มีค่ามากขึ้นแล้วความผันผวนก็จะมีค่ามากขึ้นเช่นกัน จากการทดสอบในสภาวะวิกฤติจากการจำลอง จะมีค่าไม่แตกต่างกันมากนักที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% เมื่อทำการเปรียบเทียบกับมาตรฐานในการวัดความเสี่ยงแบบมาตรฐานสากลหรือการวัดความเสี่ยงด้วย VaR และข้อดีจากการทดสอบสภาวะวิกฤติของการจำลองนั้น คือ ไม่จำเป็นต้องทำการจำลองสถานการณ์ของเส้นอัตราผลตอบแทน ซึ่งส่งผลให้การจำลองสถานการณ์นั้น มีวิธีการคำนวณและเวลาที่น้อยกว่า เนื่องจากไม่จำเป็นต้องทำการจำลองสถานการณ์ของเส้นอัตราผลตอบแทน และค่าที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับการวัดความเสี่ยงด้วย VaR ที่เป็นมาตรฐานสากลในการวัดความเสี่ยงของสถาบันการเงินต่างประเทศ ดังนั้นจากผลวิจัยจึงขอเสนอวิธีการทดสอบในสภาวะวิกฤติเป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการบริหารความเสี่ยงที่เกิดจากอัตราดอกเบี้ย เพื่อช่วยให้ในการตัดสินใจของบริษัทประกันที่จำเป็นต้องมีการประเมินความเสี่ยงของการลงทุนและทำให้ทราบว่าวิธีการบริหารพอร์ตโฟลิโอที่มีความเสี่ยงรวมถึงผลกำไรที่บริษัทประกันต้องเสี่ยง (at Risk) ที่อาจเกิดขึ้นนั่นเอง ทั้งนี้สถาบันทางการเงินที่ต้องการลงทุนในสินทรัพย์ระยะยาว เช่น พันธบัตร สามารถนำวิธีการในงานวิจัยไปประยุกต์ใช้ในการคำนวณเงินกองทุนของบริษัทให้สอดคล้องกับความเสี่ยงที่เกิดจากการเปลี่ยนแปลงของอัตราดอกเบี้ยได้ดีกว่าการคำนวณ Historical VaR

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่ได้ให้การสนับสนุนมอบทุนวิจัยให้แก่คณะผู้วิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Ho T, Lee S. Term structure movements and pricing interest rate contingent claims. *Journal of Finance*. 1986; 41(5): 1011–29.
- [2] Subhash S. *Applied Multivariate Techniques*. 1st ed. New York: John Wiley Sons; 1996.
- [3] Cox JC, Ingersoll JE, Ross SA. An intertemporal general equilibrium model of asset prices. *Econometrical*. 1985; 53:363–84.
- [4] Cox JC, Ingersoll JE, Ross SA. A theory of the term structure of interest rates. *Econometrical*. (1985b); 53:385–407.
- [5] David R, David S, Matteson R. *Statistics and data analysis for financial engineering*. 2nd ed. New York: Cornell university; 2011.
- [6] Jan RM. Creating a zero coupon curve by bootstrapping with cubic splines. Division of Applied Mathematics School of Education, Culture and Communication: Mälardalen University; 2010.
- [7] สมาคมตลาดตราสารหนี้ไทย; 2561.
- [8] John H, Alan W. One-factor interest-rate models and the valuation of interest-rate derivative securities. *The journal of financial and quantitative analysis*. (1993); 28(2): 235-54.

การออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบการสึกหรอชนิดเคลื่อนที่ไปกลับ Designs and fabrication reciprocating wear testing machine

นราธิป ภาวะศรี¹, ณภัทร อินทนนท์^{2*}, สุกัลลักษณ์ ศรีน้อย³

Naratrip Pawaree¹, Naphatara Intanon^{2*}, Supalak Sreenoi³

¹คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี

²คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน (วิทยาเขตขอนแก่น)

³ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

¹Faculty of Technology, Udon Thani Rajabhat University

²Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Isan Khon Kaen campus

³Faculty of engineering, North Eastern University

*Corresponding author. Tel: 08 6635 6986, E-mail: mppm345@hotmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและผลิตเครื่องทดสอบการสึกหรอชนิดเคลื่อนที่ไปกลับ โดยเป็นระบบควบคุมด้วยมือ โดยเครื่องทดสอบที่ได้ต้องเกิดความสะดวกในการใช้งานและความคงทนสามารถที่จะใช้ทดสอบได้อย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน มีความเที่ยง และมีค่าความคลาดเคลื่อนจากค่าในทางทฤษฎี ไม่เกิน 10 % ผลปรากฏว่าเครื่องที่ได้มีขนาด 40 x 40 เซนติเมตร น้ำหนักประมาณ 30 กิโลกรัม ความเร็วรอบสูงสุดในการทดสอบ 600 รอบต่อนาที สามารถรับน้ำหนักกดได้สูงสุด 15 N จากการทดลองใช้เครื่องเพื่อทดสอบ โดยอ้างอิงมาตรฐานการทดสอบ ASTM G133 พบว่าเครื่องที่สร้างขึ้นมีความเที่ยงตรงที่ระดับความเชื่อมั่น 95 % และมีความคลาดเคลื่อนจากค่าในทางทฤษฎี ต่ำกว่า 10 %

คำสำคัญ : เครื่องทดสอบการสึกหรอ อัตราการสึกหรอ การทดสอบแบบเคลื่อนที่ไปกลับ ASTM G133

Abstract

This research aims to design and fabricate a manual reciprocating wear testing machine which is easy to use, durable, long-time continuous testing, reliability and the error of testing result must not exceed than 10%. The result showed that the size of the machine was 40 x 40 cm. and a load of a machine was 30 kg. maximum speed was 600 rpm and maximum load was 15 N. The testing result of the machine (refer to ASTM G133) showed that the machine has reliability at 95 % confidence and testing result error was less than 10 % of theoretically.

Keywords: Wear testing machine, Wear rate, Reciprocating method, ASTM G133

Received 03-09-2019

Revised 03-10-2019

Accepted 07-10-2019

1. บทนำ

อุตสาหกรรมชิ้นส่วนเครื่องจักรกลของประเทศไทย เป็นอุตสาหกรรมที่สำคัญอย่างหนึ่งของประเทศไทย แต่ละปีประเทศไทยมีการนำเข้าชิ้นส่วนเครื่องจักรกลประมาณ 450,000 ล้านบาท และมีมูลค่าการส่งออกประมาณ 200,000 – 250,000 ล้านบาท และมูลค่าการส่งออกมีแนวโน้มเพิ่มมากขึ้น [1] ทั้งนี้เพราะ ประเทศไทยมีการผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักรกลด้วยตัวเองมากยิ่งขึ้น ทำให้มูลค่าการส่งออกมีเพิ่มมากขึ้น โดยเฉพาะชิ้นส่วนเครื่องจักรกลการเกษตร ซึ่งมีมูลค่าการส่งออก 30,000 ล้านบาทต่อปี และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ อย่างไรก็ตามด้วยมูลค่าของชิ้นส่วนเครื่องจักรกลที่มีมูลค่าสูงนี้ ทำให้มูลค่าของการบำรุงรักษาสูงตามไปด้วย จากการศึกษาเรื่องโทรโบโลยี (แรงเสียดทาน การสึกหรอ และการหล่อลื่น) ของประเทศสหรัฐอเมริกา พบว่า ค่าใช้จ่ายที่สูญเสียไปเนื่องจากการบริหารจัดการเรื่องดังกล่าวไม่ได้นั้น มีประมาณ ร้อยละ 6 - 7 ของผลิตภัณฑ์มวลรวมประชาชาติ หรือคิดเป็นเงินประมาณ 240 พันล้านดอลลาร์สหรัฐ [2] ซึ่งค่าใช้จ่ายดังกล่าวก่อให้เกิดความสูญเสียต่อระบบการผลิตและระบบเศรษฐกิจเป็นอย่างมาก หากทราบถึงอัตราการสึกหรอก็จะสามารถที่จะคำนวณหรือประมาณการอายุการใช้งานของแต่ละชิ้นส่วนได้ อันเป็นแนวทางในการป้องกันการเสียหายที่รุนแรงของเครื่องจักรได้

การศึกษาการสึกหรอของวัสดุนั้นมีผู้วิจัยทำกันมาอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ในอดีตจนถึงปัจจุบัน Charles Hatchett [3] ได้ศึกษาการสึกหรอของโลหะผสมทองคำด้วยการทดลอง ต่อมาในปี George Rennie [4] ได้ทำการทดลองเพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของแรงเสียดทาน (Friction) และการสึกหรอแบบขัดสี

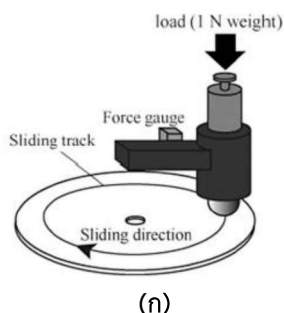
(Abrasion) ของพื้นผิวของของแข็ง (Surface of solids) จากนั้นเป็นต้นมาก็มีการศึกษาเกี่ยวข้องกับการสึกหรออีกเป็นจำนวนมาก และมีเครื่องมือมาตรฐานสำหรับตรวจสอบสมบัติเชิงกลของวัสดุหลายประเภท แต่การพยากรณ์และการควบคุมการสึกหรอนั้นยังคงทำได้ยาก [5] โดยเฉพาะอย่างยิ่งการสึกหรอที่เกิดจากการเสียดสีกันของวัสดุที่มีความแข็งแตกต่างกันค่อนข้างมาก Archard [6] ได้พัฒนาสมการสำหรับการพยากรณ์การสึกหรอที่เกิดจากการเลื่อนไถล (Sliding wear) ซึ่งเป็นสมการที่มีผู้นิยมนำมาใช้อ้างอิงเป็นจำนวนมาก ในสมการ Archard นั้น อัตราการสึกหรอ (Q) จะแปรผันตามค่าสัมประสิทธิ์การสึกหรอ (K) แรงกด (P) และความเร็วของการเลื่อนไถล และแปรผกผันกับความแข็ง (H) ของวัสดุที่อ่อนกว่า สมการนี้มีความเหมาะสมในการพยากรณ์การสึกหรอที่เป็นการสึกหรอที่ละน้อย (Mild wear) เท่านั้น ไม่เหมาะกับการพยากรณ์การสึกหรอที่รุนแรง (Severe wear) [7] จากสมการของ Archard ดังกล่าว ทำให้การศึกษาเรื่องของการสึกหรอมีปัจจัยที่สนใจอยู่ 3 ประการ คือ อัตราการสึกหรอ (Wear rate) แรงเสียดทาน (Friction) และการหล่อลื่น (Lubrication) และเรียกว่าการศึกษาโทรโบโลยี (Tribology) ทั้งนี้เพราะปัจจัยทั้ง 3 มีความสัมพันธ์โดยตรง แรงเสียดทานที่สูง ก่อให้เกิดอัตราการสึกหรอที่สูง และสามารถลดแรงเสียดทานได้โดยการหล่อลื่น นั่นหมายความว่า การหล่อลื่นสามารถลดอัตราการสึกหรอได้ อย่างไรก็ตามแรงเสียดทานของวัสดุนั้นขึ้นอยู่กับลักษณะของผิวของชิ้นงานที่สัมผัสกัน ลักษณะของผิวที่แตกต่างกันจะทำให้สัมประสิทธิ์ของแรงเสียดทานแตกต่างกัน และทำให้อัตราการสึกหรอที่แตกต่างกัน อัตราการสึกหรอจึงมีความสัมพันธ์กับความเรียบของผิวชิ้นงานด้วย ผิวชิ้นงานที่เรียบสูง

ทำให้แรงเสียดทานสถิตสูง แต่แรงเสียดทานจลน์ต่ำ ดังนั้นแรงเสียดทานที่ทำให้เกิดการสึกหรอจึงเป็นแรงเสียดทานจลน์ ซึ่งเกิดขึ้นจากการยึดติดกันระหว่างจุดยอดของผิวชิ้นงาน และเมื่อมีการเคลื่อนที่ซ้ำจุดเดิมเรื่อย ๆ ก็อาจทำให้ชิ้นงานชิ้นงานเกิดการแตกหักออกมา และทำให้เกิดการสึกหรอ อัตราการแตกหักที่เกิดขึ้นจะเป็นผลมาจากความแข็งแรงของวัสดุ ความแข็งแรงของวัสดุจึงเป็นองค์ประกอบของการสึกหรอเช่นกัน จากการศึกษาความสัมพันธ์ของการสึกหรอแรงเสียดทาน และการหล่อลื่น ที่ผ่านมาได้ข้อสรุปที่น่าสนใจในหลายกรณี เช่น Eshaghi และคณะ[8] พบว่า กระบวนการทางความร้อน (Heat treatment) ทำให้อลูมิเนียมผสมมีความต้านทานการสึกหรอเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เพราะกระบวนการทางความร้อนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างจุลภาคของโลหะ แต่ถ้าชิ้นงานทำงานในสภาวะที่มีอุณหภูมิสูง การสึกหรอของวัสดุจะเพิ่มมากขึ้น เพราะแรงยึดเหนี่ยวของอะตอมในสภาวะอุณหภูมิสูงจะมีค่าลดลง [9] ปัจจัยที่มีผลกระทบต่อการสึกหรอที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง คือ ความเรียบของผิวสัมผัส จากผลการศึกษาที่ผ่านมามีประเด็นที่น่าสนใจ คือ การศึกษาของ Albers, Savio และ Lorentz [10] พบว่า ความเรียบของผิวชิ้นงานที่มาสัมผัสกัน มีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (Friction coefficient : μ) โดย ค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานจะเพิ่มขึ้นเมื่อชิ้นงานที่มาสัมผัสกันมีความเรียบผิวมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะลดลงเมื่อความเร็วของการสัมผัสเพิ่มขึ้นอย่างไรก็ตามแรงเสียดทาน มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาเมื่อพื้นผิวเกิดการเปลี่ยนแปลงขณะเกิดการเสียดสี ดังนั้นการสึกหรอที่เกิดขึ้นจึงไม่สามารถอธิบายได้ด้วยค่าแรงเสียดทานแต่เพียงอย่างเดียว หรือกล่าวอีกอย่างหนึ่งว่า

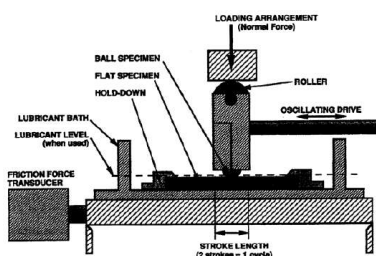
ความเรียบของพื้นผิวมีผลกระทบต่อการสึกหรอแต่ไม่ใช่ปัจจัยหลักแต่เพียงอย่างเดียว อย่างไรก็ตาม Kubiak และคณะ [11] กล่าวว่า พื้นผิวที่หยาบ (Rough surface) มีสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานต่ำ และมีอัตราการสึกหรอสูง และพื้นที่ผิวที่เรียบกว่าจะช่วยลดกระบวนการการสึกหรอแบบติดยึด (Fretting) ได้ดีกว่า จากความสำคัญของการสึกหรอที่มีผลกระทบต่อระบบเศรษฐกิจ และการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกลและระบบการทำงานของเครื่องจักรกลอย่างทีกล่าวมาแล้วนั้น การทดสอบการสึกหรอของชิ้นส่วนต่าง ๆ ที่มีการเสียดสีกัน จึงเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับการออกแบบชิ้นส่วนเครื่องจักรกล และมีความจำเป็นสำหรับการวางแผนการบำรุงรักษา และเพื่อให้การทดสอบมีความเที่ยงตรงและแม่นยำนั้น ลักษณะของการทดสอบควรที่จะมีลักษณะใกล้เคียงกันกับการทำงานจริงของชิ้นส่วนนั้น ๆ ทำให้ปัจจุบันมีเครื่องทดสอบหลายรูปแบบ เช่น เครื่องทดสอบชนิดจานหมุน (Pin on disc) (ภาพที่ 1 ก) โดยเครื่องทดสอบแบบนี้มีลักษณะการทำงานคือชิ้นงานที่ต้องการทดสอบมีลักษณะเป็นแท่งกลม ปลายมน เรียกแท่งทดสอบนี้ว่า พิน (Pin) มีน้ำหนักกด (Load) อยู่ด้านบน แรงกระทำที่เกิดขึ้นจะต้องอยู่ในแนวตั้งฉาก (Normal force) ในขณะทำการทดสอบ พินจะถูกกดให้สัมผัสกับจานหมุน (Disc) ซึ่งโดยส่วนใหญ่จะเป็นโลหะหรือเป็นวัสดุอื่นที่ต้องการทดสอบเช่นกระดาดทราย เป็นต้น ตัวพินจะอยู่กับที่แต่สามารถปรับระยะห่างจากจุดศูนย์กลางของจานหมุนเพื่อกำหนดรัศมีของการหมุนได้ จานหมุนจะหมุนด้วยความเร็วคงที่ แต่สามารถปรับความเร็วรอบของการหมุนได้ตามการออกแบบการทดสอบที่กำหนดขึ้น เครื่องทดสอบการสึกหรออีกชนิดหนึ่งที่นิยมใช้คือชนิดเคลื่อนที่ไปกลับ

(Reciprocating) (ภาพที่ 1 ข) เครื่องทดสอบชนิดนี้ พินและน้ำหนักรวมมีลักษณะเหมือนกันกับพินและ น้ำหนักกดของชนิด จานหมุน แต่ส่วนที่เป็นแผ่นรอง ด้านล่างจะเป็นลักษณะแบบเรียบ และรูปแบบของ การเคลื่อนที่จะเป็นแบบเคลื่อนที่ไปกลับด้วยความเร็ว และระยะคงที่ ขึ้นอยู่กับการออกแบบการ ทดสอบของผู้ทดสอบ ซึ่งความเร็วของการเคลื่อนที่ และระยะของการเคลื่อนที่สามารถปรับได้ ตาม มาตรฐานของเครื่องแต่ละเครื่อง

ข้อกำหนดที่สำคัญของเครื่องทดสอบทั้ง 2 แบบมีเหมือนกันคือ ส่วนที่เป็นแท่งทดสอบ ต้องอยู่ กับที่และให้ส่วนที่เป็นแผ่นทดสอบเคลื่อนที่ โดย น้ำหนักกด ความเร็วของการหมุน (หรือการเคลื่อนที่ ไปกลับ) อุณหภูมิ ระยะเวลา หรือสภาพแวดล้อมอื่น ต้องสามารถควบคุมให้คงที่ได้ตลอดระยะเวลาของ การทดสอบ และสามารถปรับได้ตามเงื่อนไขที่กำหนด



(ก)



(ข)

ภาพที่ 1 ลักษณะการทำงานของเครื่องทดสอบการสึกหรอ
(ก) ชนิดจานหมุน[12] (ข) ชนิดเคลื่อนที่ไปกลับ[13]

จากเหตุผลดังกล่าวข้างต้น ผู้วิจัยจึงเห็นว่า ควรมีการศึกษา ออกแบบและสร้างเครื่องทดสอบ ดังกล่าวเพื่อนำมาใช้ในการทดสอบการสึกหรอของ ชิ้นส่วนต่าง ๆ เพื่อเป็นประโยชน์ในการกำหนดอายุ การใช้งาน หรือการเลือกวัสดุเพื่อนำมาใช้ในการผลิต ชิ้นส่วนต่างๆ ทั้งนี้ในการออกแบบและสร้างเครื่อง ทดสอบการสึกหรอในครั้งนี้เลือกชนิดเคลื่อนที่ไปกลับ (Reciprocating) เพราะมีความสอดคล้องกับการ- ทำงานของชิ้นส่วนเครื่องจักรมากกว่า และการ- ดำเนินการทดสอบจะอ้างอิงมาตรฐานการทดสอบ ASTM G133 เป็นมาตรฐานในการเตรียมการ- ทดสอบ เพื่อให้ได้ค่าที่ตรงกับค่าทางทฤษฎีมากที่สุด

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีดำเนินการวิจัย

2.1 การออกแบบและการสร้างเครื่องทดสอบ

ในการออกแบบครั้งนี้ สามารถแบ่ง ขั้นตอนการดำเนินงานได้ดังนี้

ชุดส่งกำลัง เลือกใช้มอเตอร์ที่เป็น ดีซี- มอเตอร์ เพื่อให้สะดวกต่อการควบคุมและมีขนาดให้ เลือกลงมาเหมาะกับกำลังที่ต้องการใช้ และจะมีชุด ควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้า เพื่อควบคุมการหมุน โดยการหมุนมีความสอดคล้องกับมาตรฐานที่กำหนด คือ สามารถหมุนได้ตั้งแต่ 0 – 600 รอบต่อนาที อย่างไรก็ตามเนื่องจาก มอเตอร์เมื่อหมุนด้วย ความเร็วสูงกำลังของมอเตอร์จะลดลง ดังนั้นเพื่อ ป้องกันไม่ให้มอเตอร์ทำงานที่รอบสูงจนเกินไป จะ ใช้มุขเกียร์ที่ติดกับมอเตอร์มีขนาดใหญ่กว่า มุขเกียร์ที่ติด กับจาน การทำอย่างนี้จะทำให้มอเตอร์ไม่ทำงานที่ รอบสูงจนเกินไป และจานก็สามารถหมุนได้ตามที่ กำหนด ชุดทำงานอื่น ๆ มีการออกแบบให้มีความเหมาะสมกับขนาดของแรงบิดของมอเตอร์

จากข้อกำหนดดังกล่าวข้างต้น ผู้วิจัยได้สร้างเครื่องทดสอบการสึกหรอชนิดเคลื่อนที่ไปกลับที่มีชิ้นส่วนและองค์ประกอบที่สำคัญดังนี้ (ภาพที่ 2)

- ขนาด กว้าง x ยาว x สูง : 40 x 40 x 65 เซนติเมตร
- มอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง 24V ความเร็วรอบสูงสุด : 600 รอบต่อนาที.
- แรงกดในแนวตั้งฉาก (Normal force) สูงสุด : 15 N
- ขนาดของแท่งทดสอบ : 10 มิลลิเมตร เป็นชนิดปลายแบน (Flat)
- ระยะชัก (Stroke length) : สูงสุด 20 มิลลิเมตร (สามารถปรับได้ 3 ระยะคือ 10, 15 และ 20 มิลลิเมตร)



ภาพที่ 2 เครื่องทดสอบการสึกหรอแบบเคลื่อนที่ไปกลับ

2.2 การทดสอบการใช้งาน

ในการทดสอบการใช้งาน แบ่งการทดสอบเป็น 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนที่ 1 เป็นการทดสอบความเที่ยง ตรงของเครื่องที่สร้างขึ้น และ

ขั้นตอนที่ 2 เป็นการทดสอบการใช้งาน เพื่อนำผลการทดสอบมาคำนวณ ค่าสัมประสิทธิ์การสึกหรอเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การสึกหรอมาตรฐานที่มีการใช้งาน และอ้างอิงทั่วไป การทดสอบการสึกหรอของแต่ละขั้นมีการดำเนินการดังนี้

2.2.1 การเตรียมแท่งทดสอบ (Pin)

การเตรียมแท่งทดสอบทำได้โดยการตัดวัสดุให้ได้ความยาวตามที่ต้องการ และผิวชิ้นงานส่วนที่จะสัมผัสกับแผ่นทดสอบให้ได้ความเรียบผิวอยู่ในช่วงที่กำหนดคือ $0.02 - 0.05 \mu\text{m}$ จากนั้นนำไปแช่น้ำหนักด้วยเครื่องที่มีความละเอียดเป็นทศนิยม 4 ตำแหน่ง บันทึกข้อมูลน้ำหนัก และเก็บชิ้นงานในกล่องกันความชื้น



ภาพที่ 3 การชั่งน้ำหนักแท่งทดสอบ

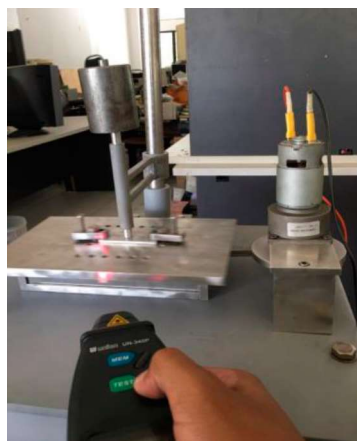
2.2.2 การเตรียมแผ่นทดสอบ (Plate)

การเตรียมแผ่นทดสอบทำเหมือนกับการเตรียมแท่งทดสอบ คือตัดชิ้นงานให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ และขัดผิวด้านที่ต้องการทดสอบให้มีความเรียบผิวอยู่ระหว่าง $0.02 - 0.05 \mu\text{m}$ ทำความสะอาดด้วยแอลกอฮอล์ และจากนั้นนำไปแช่

น้ำหนักด้วยเครื่องชั่งที่มีความละเอียดเป็นทศนิยม 4 ตำแหน่ง บันทึกค่าน้ำหนัก และเก็บใส่กล่องป้องกันความชื้น

2.2.3 การติดตั้งชิ้นงานเพื่อทดสอบ

ในการทดสอบมีการยึดชิ้นงานที่เป็นแผ่นทดสอบกับชุดเคลื่อนที่ของเครื่องโดยให้จุดกึ่งกลางของแผ่นทดสอบกับจุดกึ่งกลางของแท่งทดสอบ หลังจากนั้นนำแท่งน้ำหนัก ที่เตรียมไว้ วางลงบนแท่งทดสอบ และเปิดเครื่องเพิ่มความความเร็วรอบให้ได้ตามที่ต้องการ ในการทดสอบครั้งนี้ใช้ความเร็ว 300 รอบต่อนาที ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 การติดตั้งเครื่อง

เวลาในการทดสอบจะแตกต่างกันตามน้ำหนักกดที่ใช้ในการทดสอบ ถ้าใช้น้ำหนักกด 5 N จะใช้เวลาในการทดสอบ 25 นาที และหากใช้น้ำหนักกด 10 N จะใช้เวลาในการทดสอบ 12.5 นาที ทั้งนี้เพราะจากสมการการสึกหรอค่าน้ำหนักกด จะคู่กับระยะทางในการทดสอบ ดังนั้น เพื่อให้ดังกล่าวคงที่ เมื่อเพิ่มน้ำหนักกดจาก 5 N เป็น 10 N ค่าน้ำหนักเพิ่มขึ้น 2 เท่า เวลาในการทดสอบต้องลดลงครึ่งหนึ่ง เพื่อให้ระยะทางในการทดสอบลดลงครึ่งหนึ่ง ซึ่งจะทำให้ผลคูณของน้ำหนักและระยะทางมีค่าคงที่

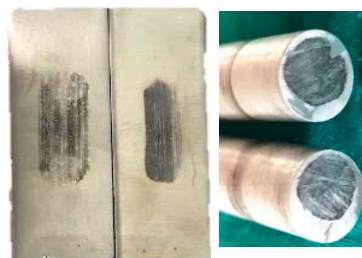
เมื่อทำการทดสอบครบตามระยะเวลาที่กำหนดแล้วจะนำชิ้นงานทั้งที่เป็นแท่งทดสอบและแผ่นทดสอบออกมาทำความสะอาดโดยการเช็ดด้วยแอลกอฮอล์และนำไปชั่งน้ำหนักอีกครั้งหนึ่ง บันทึกข้อมูลน้ำหนักหลังการทดสอบ และนำไปวิเคราะห์ข้อมูลต่อไป

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 การทดสอบความแม่นยำและเที่ยงตรงของเครื่อง

ในการทดสอบความเที่ยงตรงของเครื่องทำการทดสอบการสึกหรอของเหล็กเหนียว จำนวน 10 ครั้ง โดยเป็นการทดสอบที่ระดับน้ำหนักกด 5 N 5 ครั้ง และ 10 N 5 ครั้ง ก่อนการทดสอบมีการเตรียมผิวชิ้นงาน ให้ได้ตามข้อกำหนด โดยในการทดสอบครั้งนี้ผิวชิ้นทดสอบ มีความเรียบผิวเฉลี่ย $0.044 \mu\text{m}$ และความแข็งเฉลี่ยของชิ้นงาน มีค่าเท่ากับ 274.58 HV ผลการทดสอบ เป็นดังตารางที่ 1 และ 2

จากการทดสอบเพื่อหาความเที่ยงดังกล่าวข้างต้น ทำการวิเคราะห์หาค่าความเที่ยงตรง โดยทำการทดสอบค่าที กรณีกลุ่มตัวอย่างกลุ่มเดียว (One sample t-test) ผลการวิเคราะห์เป็นดังตารางที่ 3 (วิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม SPSS V16)



ภาพที่ 5 ลักษณะของชิ้นงานหลังการทดสอบ (ชิ้นงานสแตนเลส น้ำหนักกด 10 N)

ตารางที่ 1 น้ำหนักที่หายไปของแท่งทดสอบและ แผ่นทดสอบกรณีน้ำหนักกด 5 N

ครั้งที่	น้ำหนักของแท่งทดสอบ (กรัม)			น้ำหนักของแผ่นทดสอบ (กรัม)		
	ก่อนการ ทดสอบ	หลังการ ทดสอบ	น้ำหนักที่ หายไป	ก่อนการ ทดสอบ	หลังการ ทดสอบ	น้ำหนักที่ หายไป
1	91.6801	91.6708	0.0102	116.3327	116.3200	0.0127
2	91.3924	91.3899	0.0025	118.3044	118.2922	0.0122
3	91.3698	91.3605	0.0093	115.7632	115.7506	0.0126
4	92.0615	92.0581	0.0034	119.3066	119.2932	0.0134
5	88.9418	88.9390	0.0028	112.2945	112.2822	0.0123
เฉลี่ย	91.0891	91.0836	0.0055	116.4003	116.3876	0.0126

ตารางที่ 2 น้ำหนักที่หายไปของแท่งทดสอบ และแผ่นทดสอบ กรณีน้ำหนักกด 10 N

ครั้งที่	น้ำหนักของแท่งทดสอบ (กรัม)			น้ำหนักของ แผ่นทดสอบ (กรัม)		
	ก่อนการ ทดสอบ	หลังการ ทดสอบ	น้ำหนักที่ หายไป	ก่อนการ ทดสอบ	หลังการ ทดสอบ	น้ำหนักที่ หายไป
1	88.9364	88.9176	0.0188	117.6936	117.6798	0.0138
2	90.8873	90.8831	0.0042	115.4796	115.4660	0.0136
3	91.4811	91.4707	0.0104	116.2574	116.2432	0.0142
4	90.9351	90.9320	0.0031	119.9156	119.9020	0.0136
5	88.4222	88.4148	0.0074	117.6067	117.5938	0.0129
เฉลี่ย	90.1324	90.1236	0.0088	117.3906	117.377	0.0136

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ ค่าความเที่ยงของผลการทดสอบ

ขั้นตอนทดสอบ	ค่า t	df	Sig.(2-tailed)	Test value
แท่งทดสอบ น้ำหนักกด 5N	0.083	4	.938	0.0055
แผ่นทดสอบ น้ำหนักกด 5N	0.189	4	.895	0.0126
แท่งทดสอบ น้ำหนักกด 10N	-0.007	4	.995	0.0088
แผ่นทดสอบ น้ำหนักกด 10N	0.095	4	.929	0.0136

จากตารางที่ 1 – 3 พบว่า น้ำหนักที่หายไปของชิ้นงานที่ใช้ในการทดสอบมีความแตกต่างกันไปในแต่ละครั้งของการทดสอบ โดยชิ้นงานที่เป็นแท่งทดสอบกรณีที่มีน้ำหนักกด 5 N น้ำหนักที่หายไปอยู่ระหว่าง 0.0028 – 0.0102 กรัม โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.0055 กรัม และเมื่อทำการทดสอบทางสถิติเพื่อพิจารณาค่าความแตกต่างของน้ำหนักที่หายไปว่ามีความแตกต่างกันหรือไม่ โดยใช้การวิเคราะห์ค่า t ชนิดกลุ่มตัวอย่างเดียว (One sample t-test) ผลจากการวิเคราะห์พบว่า ค่า t มีค่าเท่ากับ 0.083 และค่า Sig. เท่ากับ 0.938 โดยเทียบกับค่าเฉลี่ย (0.0055) ซึ่งค่า Sig. มีค่าสูงกว่าค่านัยสำคัญ (0.05) หมายความว่า น้ำหนักที่ได้ถือว่ามีความไม่แตกต่างกัน และน้ำหนักที่หายไปของแผ่นทดสอบ ที่มีแรงกด 5 N แท่งทดสอบที่มีแรงกด 10 N และแผ่นทดสอบที่มีแรงกด 10 N ค่า Sig. มีค่าเท่ากับ 0.895, 0.995 และ 0.929 ตามลำดับ ซึ่งทุกค่ามีค่าสูงกว่าระดับนัยสำคัญ หมายความว่าผลการทดสอบโดยใช้เครื่องมือที่สร้างขึ้นเมื่อเทียบกับค่าเฉลี่ยแล้ว ไม่แตกต่างกัน ถือว่าเครื่องทดสอบมีความเที่ยง สามารถที่จะนำไปใช้งานได้

3.2 การทดสอบเปรียบเทียบกับค่าทางทฤษฎี

ในการทดสอบการสึกหรอเพื่อเปรียบเทียบกับค่าการสึกหรอทางทฤษฎีในครั้งนี้เลือกน้ำหนักการกด 10 N และวัสดุทดสอบเป็นสแตนเลส ทั้งนี้เพราะสแตนเลสเป็นวัสดุที่มีการควบคุมส่วนผสมในการผลิตค่อนข้างดี ทำให้สแตนเลสเป็นวัสดุที่มีส่วนผสมเป็นมาตรฐาน และมีการศึกษาเกี่ยวกับการสึกหรอของ สแตนเลสอยู่เป็นจำนวนมาก ทำให้มีข้อมูลที่สามารถนำมาใช้เป็นข้อมูลในการเปรียบเทียบได้เป็นจำนวนมาก โดยค่าสัมประสิทธิ์ของการสึกหรอของสแตนเลสมีค่าเท่ากับ $6.34 \times 10^{-5} - 8.94 \times 10^{-5}$ [14] ค่าความหนาแน่น 7700 kg/m^3 (7.7×10^3

g/mm^3) และสมการที่ใช้สำหรับการคำนวณค่าสัมประสิทธิ์การสึกหรอได้แก่สมการการสึกหรอของ Archard [2]

$$V = K \frac{WL}{H} \quad (1)$$

หรือ

$$K = \frac{VH}{WL} \quad (2)$$

โดยที่

K คือ ค่าสัมประสิทธิ์การสึกหรอ (wear coefficient)

V คือ ปริมาตรที่หายไป (mm^3)

H คือ ค่าความแข็ง (Vickers: N/mm^2)

W คือ ค่าน้ำหนักกด (g)

L คือ ระยะของการเสียดสี (mm)

จากตาราง ที่ 4 น้ำหนักที่หายไปของแท่งทดสอบ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.0039 กรัม ดังนั้นคิดเป็นปริมาตร ที่หายไปเท่ากับ $0.0039 / 7.7 \times 10^3 = 0.506 \text{ mm}^3$, ค่าความแข็งของสแตนเลสเท่ากับ 210 N/mm^2 ในการทดสอบ ใช้ความเร็วรอบ 300 รอบ ต่อนาที เวลาในการทดสอบ 12.5 นาที ดังนั้นระยะทางในการทดสอบ $= 300 \times 12.5 \times 20 \times 2 = 150,000 \text{ mm}$ แทนค่าในสมการจะได้

$$K = \frac{0.506 \times 210}{10 \times 1.5 \times 10^5} = 7.08 \times 10^{-5}$$

เมื่อเปรียบเทียบกับค่าในทางทฤษฎี ค่าสัมประสิทธิ์การสึกหรอที่ได้จากการทดลอง จะอยู่ในช่วงของค่าทางทฤษฎี ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่าเครื่องทดสอบการสึกหรอที่สร้างขึ้น มีความเที่ยงและความตรง สามารถที่จะนำไปใช้ทดสอบได้

ตารางที่ 4 น้ำหนักที่หายไปจากการทดสอบการเสียดสีกันของสแตนเลส ที่น้ำหนักกด 10N

ครั้งที่	น้ำหนักของ Pin (กรัม)			น้ำหนักของ Plate (กรัม)		
	ก่อนการทดสอบ	หลังการทดสอบ	น้ำหนักที่หายไป	ก่อนการทดสอบ	หลังการทดสอบ	น้ำหนักที่หายไป
1	90.0645	90.0585	0.0060	29.4709	29.4682	0.0027
2	90.0075	90.0040	0.0035	29.2321	29.2289	0.0032
3	89.8810	89.8777	0.0033	29.5522	29.5499	0.0023
4	90.0583	90.0554	0.0029	29.0261	29.0230	0.0031
5	90.0938	90.0903	0.0035	29.5115	29.5073	0.0042
เฉลี่ย	90.0210	90.0171	0.0039	29.3585	29.3554	0.0030

4. สรุปผลการวิจัย

จากผลทดสอบการความเที่ยงและความตรงตามทฤษฎีของเครื่องทดสอบการสึกหรอนิดเคลื่อนที่ไปกลับที่สร้างขึ้น โดยมีวัสดุที่ใช้ในการทดสอบเป็นเหล็กเพลาชาวและสแตนเลส ที่มีจำหน่ายทั่วไปในท้องตลาด ผลการทดสอบและการคำนวณค่าทางสถิติพบว่า เมื่อทำการทดสอบการสึกหรอของส่วนที่เป็นแท่งทดสอบและแผ่นทดสอบแล้วพบว่า น้ำหนักที่หายไปในแต่ละครั้งของการทดสอบ มีค่าแตกต่างกัน แต่เมื่อทำการคำนวณค่าทางสถิติเพื่อพิจารณาว่าค่าความแตกต่างมีนัยสำคัญทางสถิติหรือไม่ พบว่า น้ำหนักที่หายไปในการทดสอบแต่ละครั้งนั้น ไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ หมายความว่าเครื่องทดสอบที่สร้างขึ้นให้ผลการทดสอบที่เที่ยงตรง และเมื่อนำค่าที่ได้จากการทดสอบชิ้นงานที่เป็นสแตนเลส มาคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์การสึกหรอตามสมการการสึกหรอของ Archard เพื่อทำการเปรียบเทียบกับค่าสัมประสิทธิ์การสึกหรอที่ใช้อ้างอิงกันทั่วไป พบว่าค่าสัมประสิทธิ์การสึกหรอที่ได้จากการคำนวณ มีค่าเท่ากับ 7.08×10^{-5} อยู่ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์การสึกหรอที่ใช้กันทั่วไป ($6.34 \times 10^{-5} - 8.94 \times 10^{-5}$) ดังนั้น

สามารถสรุปได้ว่าเครื่องทดสอบที่สร้างขึ้นมีความเที่ยงตรง ค่าความแตกต่างของน้ำหนักที่หายไปไม่มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 และค่าสัมประสิทธิ์การสึกหรอแตกต่างจากค่าทฤษฎีไม่เกิน 10 % ซึ่งเป็นไปตามสมมติฐานที่กำหนด เครื่องที่สร้างขึ้นสามารถนำไปใช้ทดสอบการสึกหรอของวัสดุทั่วไปได้

5. กิตติกรรมประกาศ

ในการวิจัยครั้งนี้ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี ที่สนับสนุนทุนวิจัย เลขที่สัญญาทุน 2561FUND20TE7-IM5 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ที่ให้ความร่วมมืออนุเคราะห์ในการเตรียมและทดสอบชิ้นงาน

6. เอกสารอ้างอิง (References)

- [1] ภาวะอุตสาหกรรมเครื่องจักรกล. ศูนย์วิเคราะห์ข้อมูลเชิงลึกอุตสาหกรรมเครื่องจักรกล [อินเทอร์เน็ต]. 2562. [เข้าถึงเมื่อ 20 มิถุนายน 2562]. จาก: miu.isit.or.th

- [2] Rabinowicz E. Investing in knowledge: Friction, Wear and Lubrication [อินเทอร์เน็ต]. [เข้าถึงเมื่อ 20 พ.ย. 2561]. จาก: www.machine design.com/
- [3] Hatchett C. Experiments and observations on the various alloys, on the specific gravity, and on the comparative wear of gold. Phil Trans Roy Soc Lond. 1893; (93):43-194.
- [4] Rennie G. Experiment on the friction and Abrasive wear of solids. Phil Trans Roy Soc Lond. 1829;(119).
- [5] Zmitrowicz A. Wear patterns and laws of wear. Theor Appl Mech. 2006; (44):219-253.
- [6] Archard JF. Contact and rubbing of flat surface. J Appl Phys. 1953; (24):981-88.
- [7] Hirst W. Lancaster JK. The influence of oxide and lubricant films on the friction and surface damage of metals. Phil Trans Roy Soc Lond Math Phys Sci. 1960; (259): 228-41.
- [8] Eshaghi A. Ghasemi HM. Rassizadehghani J. Effect of heat treatment on microstructure and wear behavior of Al-Si alloys with various iron contents. Materials and Design. 2011; 3(32):1520 – 25.
- [9] Okonkwo PC, Kelly G, Rolfe BF. et al. The effect of temperature on sliding wear of steel tool steel pairs. Wear. 2012; (282):22-30.
- [10] Albers A, Savio D, Lorentz B. A model to investigate the influence of surface roughness on the tribological behavior of dry friction systems. GFT Fachtagung für Tribologie proceeding. 2010 Sep 29. Göttingen. 2010.
- [11] Kubiak KJ, Liskiewicz TW, Mathia TG. Surface morphology in engineering applications: Influence of roughness on sliding and wear in dry fretting. Tribol Int. 2011; (44) :1427-32.
- [12] Nakamura Y, Muto J, Nagahama H. et al. Amorphization of quartz by friction: Implication to silica-gel lubrication of fault surfaces. Geophysical Research Letter. 2012; (39):21303-15.
- [13] ASTM Committee on Standards. International Designation: G133. Standard Test Method for Linearly Reciprocating Ball-on-Flat Sliding Wear. Annual Book of Standards (03.02). West Conshohocken: Astm Intl; 2016.
- [14] Rajan RK, Kumar H, Albert SK. et al. Sliding friction and wear characteristics of grade 410 martensitic stainless steel. Appl Mech Mater. 2014; (592-594):1346-51.

การเลือกเส้นทางการขนส่งสินค้าด้วยการประเมินศักยภาพลักษณะทางกายภาพและการตัดสินใจ
แบบเรียงลำดับความสำคัญเทียบเคียงอุดมคติ: กรณีศึกษาบริษัทผลิตสายไฟฟ้า
A selection of transportation routes with physical characteristics potential
assessment and TOPSIS: A case study of electrical wire manufacturer

นิติเดช คูหาทองสัมฤทธิ์^{1*}, วาสนา จันทร์ขำ¹
Nitidetch Koothongsumrit^{1*}, Wasana Chankham

¹ ภาควิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง

Department of Statistics, Faculty of Science, Ramkhamhaeng University, Bangkok, Thailand

*Corresponding author. Tel.: 0 2310 8396, E-mail: Nitidetch.k@ru.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเสนอวิธีการตัดสินใจเลือกเส้นทางการขนส่งสินค้าทางถนนด้วยการตัดสินใจแบบเรียงลำดับความสำคัญจากการเทียบเคียงทางอุดมคติ โดยพิจารณาเกณฑ์การตัดสินใจ ได้แก่ ต้นทุนค่าขนส่ง ระยะเวลาการขนส่ง และระดับศักยภาพลักษณะทางกายภาพของแต่ละเส้นทางการขนส่งสินค้า พร้อมทั้งประยุกต์วิธีการที่เสนอกับกรณีศึกษาบริษัทผลิตสายไฟฟ้า ผลการศึกษานี้พบว่าเส้นทางการขนส่งสินค้าทางถนน A_2 และ A_3 เป็นเส้นทางการขนส่งสินค้าทางถนนที่เหมาะสมมากที่สุดด้วยค่าความสัมพันธ์เข้าใกล้แนวคิดวิธีแก้ปัญหาค่ากับ 0.550 และ 0.551 ซึ่งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ เส้นทางการขนส่งสินค้าทางถนน A_1 เป็นทางเลือกที่มีความเหมาะสมลำดับที่สอง และเส้นทางการขนส่งสินค้าทางถนน A_4 เป็นทางเลือกลำดับสุดท้าย นอกจากนี้วิธีการเลือกเส้นทางการขนส่งสินค้าที่เสนอซึ่งเป็นการตัดสินใจแบบเชิงรุกลำดับความสำคัญนำไปใช้แก้ปัญหาได้จริง อีกทั้งยังหลีกเลี่ยงการตัดสินใจเชิงอัตวิสัยและตอบสนองต่อความต้องการผู้ตัดสินใจได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยการกำหนดน้ำหนักความสำคัญให้กับเกณฑ์การตัดสินใจ

คำสำคัญ: การตัดสินใจแบบเรียงลำดับความสำคัญเทียบเคียงอุดมคติ การเลือกเส้นทางการขนส่งสินค้า การประเมินศักยภาพ ลักษณะทางกายภาพ

Abstract

The objective of this research is to propose an approach for selecting road transportation routes using "Technique for order preference by similarity to the ideal solution" (TOPSIS). Decision criteria for routes selection are transportation cost, transportation time and potential level of each transportation route. This approach is tested on a case study of electrical wire manufacturer. The results show that the route A_2 and A_3 are taken the best alternative routes with the relative closeness to the ideal solution values at 0.550 and 0.551, which are not

Received 18-04-2019
Revised 31-07-2019
Accepted 05-08-2019

significantly different. The route A_1 is taken the second alternative route and the route A_4 is taken the last alternative routes. Moreover, the purpose approach which is a proactive method for transport route selection can be applied to real-world problems. It overcomes the subjective decision-making and respond to the requirements of decision-makers effectively by determining the relative weights of decision criteria.

Keywords: TOPSIS, Selection of transportation routes, Potential assessment, Physical characteristics

1. บทนำ

การเลือกเส้นทางการขนส่งสินค้าที่เหมาะสมเป็นกิจกรรมที่สำคัญอย่างหนึ่งของการขนส่งสินค้าที่ช่วยเพิ่มศักยภาพให้กับผู้ประกอบการธุรกิจ เช่น ลดต้นทุนรวมของการดำเนินธุรกิจ เพิ่มมูลค่าสินค้า แสดงศักยภาพของผู้ประกอบการในการขนส่งสินค้าส่งสินค้าในปริมาณที่ถูกต้องและตรงต่อระยะเวลาที่กำหนด ฯลฯ [1] ทั้งนี้การเลือกเส้นทางการขนส่งสินค้าที่เหมาะสมโดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับเส้นทางการขนส่งสินค้าทางถนนจะประกอบด้วยองค์ประกอบสำคัญ ได้แก่ ผู้ขับขี่ ยานพาหนะ สภาพแวดล้อม และลักษณะทางกายภาพของเส้นทางการขนส่งสินค้า [2] อย่างไรก็ตามงานวิจัยของ Handerson [3] ได้แสดงให้เห็นว่าลักษณะทางกายภาพของเส้นทางการขนส่งสินค้าทางถนนเป็นองค์ประกอบที่สำคัญมากที่สุดซึ่งส่งผลต่อความสำเร็จของการขนส่งสินค้า ดังนั้นการศึกษาวิจัยครั้งนี้ต้องการศึกษาการเลือกเส้นทางการขนส่งสินค้าทางถนนที่เหมาะสมด้วยการนำลักษณะทางกายภาพมาพิจารณา

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการเลือกเส้นทางการขนส่งสินค้า ได้แก่ งานวิจัยของ Kopytov and Abramov [4] ที่กำหนดวิธีการเลือกเส้นทางการขนส่งสินค้าสำหรับการขนส่งสินค้าแต่ละประเภท พิจารณาดัชนี ต้นทุน ระยะเวลาการขนส่ง ความเชื่อมั่น ความเที่ยงตรง และสิ่งแวดล้อม งานวิจัยของ

Kengpol, Meethom and Tuominen [5] งานวิจัยของ Kengpol and Tuammee [6] และ Kengpol, Tuammee and Tuominen [7] ที่ออกแบบระบบสนับสนุนการตัดสินใจเลือกเส้นทางการขนส่งต่อเนื่องหลายรูปแบบของกลุ่มภูมิประเทศลุ่มน้ำโขง พิจารณาจากเกณฑ์การตัดสินใจเชิงปริมาณและความเสี่ยงของลักษณะทางกายภาพในเส้นทางการขนส่ง แต่ก็เป็นการพิจารณาลักษณะทางกายภาพในภาพรวมและไม่ได้ระบุลักษณะทางกายภาพสำหรับการตัดสินใจเลือกเส้นทางการขนส่งที่ชัดเจน จากนั้นงานวิจัยของ Arunyanart et al. [8] ที่เสนอแนวคิดการตัดสินใจเลือกเส้นทางการขนส่งสินค้าส่งออกตามแนวระเบียงเศรษฐกิจแนวตะวันออก-ตะวันตกด้วยกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytic hierarchy process: AHP) พิจารณาจากค่าใช้จ่ายในการขนส่ง ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และลักษณะทางกายภาพของเส้นทาง แต่ก็ไม่ได้กำหนดรายละเอียดลักษณะทางกายภาพที่พิจารณาโดยละเอียด งานวิจัยของ Sattayaprasert et al. [9] ที่เสนอวิธีการทางคณิตศาสตร์จากน้ำหนักความสำคัญของลักษณะทางกายภาพจาก AHP และเกณฑ์การประเมินความเสี่ยงลักษณะทางกายภาพสำหรับการเลือกเส้นทางการขนส่งสินค้าอันตราย งานวิจัยของ Yuan et al. [10] ที่ระบุเกณฑ์มาตรฐานสำหรับการประเมินความปลอดภัยของทางหลวงในเขตชนบทของมณฑลเหอเป่ย์ภายในสาธารณรัฐประชาชนจีนด้วยกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์

แต่เกณฑ์ดังกล่าวมีระดับการประเมินที่แตกต่างกัน งานวิจัยของนิธิเดช [11] ที่เสนอวิธีการเลือกเส้นทางการขนส่งสินค้าที่เหมาะสมด้วยการประยุกต์การโปรแกรมเป้าหมายแบบศูนย์หนึ่งกับเกณฑ์ประเมินความเสี่ยงลักษณะทางกายภาพของเส้นทางการศึกษาในงานวิจัยในข้างต้นพบว่ามีการวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาเกี่ยวกับการเลือกเส้นทางการขนส่งสินค้าที่เหมาะสมด้วยการนำลักษณะทางกายภาพของเส้นทางการขนส่งสินค้ามาพิจารณาแต่ยังไม่มีการวิจัยใดที่ประยุกต์วิธีการตัดสินใจแบบเรียงลำดับความสำคัญเทียบเคียงอุดมคติ (Technique for order of preference by similarity to ideal solution: TOPSIS) ที่เสนอครั้งแรกโดย Hwang and Yoon [12] ซึ่งเป็นวิธีการแก้ปัญหาการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์เพื่อพิจารณาทางเลือกที่ดีที่สุดจากระยะห่างของแนวคิดเชิงบวกและแนวคิดเชิงลบ อีกทั้งงานวิจัยในข้างต้นใช้การพิจารณาลักษณะทางกายภาพของเส้นทางการขนส่งสินค้าในภาพรวม ไม่ได้ระบุลักษณะทางกายภาพของเส้นทางการขนส่งสินค้าชัดเจน โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับเส้นทางการขนส่งสินค้าทางถนนที่ประกอบไปด้วยลักษณะทางกายภาพจำนวนมากและแตกต่างกัน ดังนั้นการศึกษาวิจัยครั้งนี้ต้องการเสนอวิธีการเลือกเส้นทางการขนส่งสินค้าทางถนน โดยพิจารณาเกณฑ์การตัดสินใจเชิงปริมาณ ได้แก่ ต้นทุนและระยะเวลาในการขนส่ง เกณฑ์การตัดสินใจเชิงคุณภาพซึ่งเป็นลักษณะทางกายภาพของเส้นทางการขนส่งสินค้าทางถนนแบบเอกเทศและเฉพาะเจาะจงตามแนวทางงานวิจัยของวรพจน์ [13] นอกจากนี้การศึกษาวิจัยในข้างต้นยังใช้วิธีการตัดสินใจเลือกเส้นทางการขนส่งสินค้าด้วยการประเมินความเสี่ยงและการประเมินความสำคัญเกณฑ์การตัดสินใจซึ่งต้องอาศัยข้อมูล

สถิติย้อนหลังและประสบการณ์ของผู้ตัดสินใจ ดังนั้นการศึกษาวิจัยครั้งนี้จะใช้วิธีการประเมินศักยภาพลักษณะทางกายภาพของเส้นทางการขนส่งสินค้าทางถนนด้วยการสำรวจพื้นที่เพื่อรวบรวมข้อมูลศักยภาพลักษณะทางกายภาพของเส้นทางการขนส่งสินค้า

จากที่มาและความสำคัญของปัญหาในข้างต้นการศึกษาวิจัยครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เสนอวิธีการตัดสินใจเลือกเส้นทางการขนส่งสินค้าทางถนนด้วยการตัดสินใจแบบเรียงลำดับความสำคัญเทียบเคียงอุดมคติ พิจารณาเกณฑ์การตัดสินใจ ได้แก่ ต้นทุนค่าขนส่ง ระยะเวลาการขนส่ง และระดับศักยภาพลักษณะทางกายภาพเส้นทางการขนส่งสินค้าทางถนน พร้อมทั้งประยุกต์ใช้วิธีการตัดสินใจเลือกเส้นทางการขนส่งสินค้าทางถนนที่เสนอกับบริษัทกรณีศึกษาเพื่อเป็นแนวทางแก่ผู้ประกอบการธุรกิจ หรือผู้ที่เกี่ยวข้องในการตัดสินใจเลือกเส้นทางการขนส่งสินค้าทางถนนที่เหมาะสมต่อไป

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 กำหนดเกณฑ์ที่ใช้ในการตัดสินใจ

เกณฑ์การตัดสินใจที่ใช้ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้สามารถแบ่งเป็นเกณฑ์การตัดสินใจเชิงปริมาณ (C_1) เป็นเกณฑ์การตัดสินใจที่สามารถบอกปริมาณมาก หรือน้อยกว่ากันเท่าไรได้ ประกอบด้วยเกณฑ์การตัดสินใจรอง ได้แก่ ต้นทุนและระยะเวลาขนส่ง [14] ส่วนเกณฑ์การตัดสินใจเชิงคุณภาพ (C_2) ประกอบไปด้วยเกณฑ์การตัดสินใจรองลักษณะทางกายภาพของเส้นทางการขนส่งสินค้าทางถนนทั้งหมด ซึ่งเป็นเกณฑ์การประเมินศักยภาพ เมื่อ 1 คือ ระดับศักยภาพน้อยที่สุด 2 คือ ระดับศักยภาพน้อย 3 คือ ระดับศักยภาพปานกลาง 4 คือ ระดับศักยภาพมาก

และ 5 คือ ระดับศักยภาพมากที่สุด โดยเกณฑ์การตัดสินใจทั้งหมด มีรายละเอียดดังนี้

2.1.1 ต้นทุนค่าขนส่งของเส้นทาง (C_{11}) หมายถึง ค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากการขนส่งสินค้าจากจุดต้นทางไปยังจุดปลายทาง แบ่งเป็นต้นทุนคงที่และต้นทุนผันแปร ทั้งนี้ต้นทุนค่าขนส่งของเส้นทางต้องรวมค่าใช้จ่ายในการขนส่งสินค้าเที่ยวเปล่าด้วย

2.1.2 ระยะเวลาการขนส่งของเส้นทาง (C_{12}) หมายถึง ระยะเวลาในการขนส่งสินค้าจากจุดต้นทางไปยังปลายทาง ซึ่งเป็นระยะเวลาการขนส่งโดยเฉลี่ยที่ประมาณได้จากประสบการณ์และข้อมูลในอดีต

2.1.3 จำนวนช่องจราจร (C_{21}) หมายถึง จำนวนช่องทางการเดินรถต่อทิศทางที่ยานพาหนะสามารถเคลื่อนที่ผ่านไปได้ [10] เกณฑ์ประเมินศักยภาพจำนวนช่องจราจร แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เกณฑ์ประเมินศักยภาพจำนวนช่องจราจร

ศักยภาพ	รายละเอียด
1	มีจำนวน 1 ช่องจราจรต่อทิศทาง
2	มีจำนวน 2 ช่องจราจรต่อทิศทาง
3	มีจำนวน 3 ช่องจราจรต่อทิศทาง
4	มีจำนวน 4 ช่องจราจรต่อทิศทาง
5	มีจำนวนมากกว่า 4 ช่องจราจรต่อทิศทาง

2.1.4 ความกว้างช่องจราจร (C_{22}) กรณีที่เส้นทางการขนส่งสินค้ามี 1 ช่องจราจรจะพิจารณาระยะห่างระหว่างเส้นขอบทางกับเส้นแบ่งทิศทางการจราจร กรณีมีจำนวน 2 ช่องจราจร หรือมากกว่าจะพิจารณาจากระยะห่างระหว่างเส้นขอบทางกับเส้นแบ่งช่องจราจร ระยะห่างระหว่างเส้นแบ่งทิศทางการจราจรกับเส้นแบ่งทิศทางการจราจร และระยะห่างระหว่างเส้นแบ่งช่องจราจร เกณฑ์ประเมินศักยภาพความกว้างช่องจราจร แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 เกณฑ์ประเมินศักยภาพความกว้างช่องจราจร

ศักยภาพ	รายละเอียด
1	ไม่เกิน 2.00 เมตร
2	มากกว่า 2.00 แต่ไม่เกิน 3.00 เมตร
3	มากกว่า 2.00 แต่ไม่เกิน 3.25 เมตร
4	มากกว่า 3.25 แต่ไม่เกิน 3.50 เมตร
5	มากกว่า 3.50 เมตร

2.1.5 ความกว้างไหล่ทาง (C_{23}) หมายถึง ระยะห่างจากเส้นขอบทางด้านนอกถึงขอบทางด้านซ้าย [15] ส่วนในกรณีไหล่ทางด้านขวาพิจารณาระยะห่างจากเส้นขอบทางด้านนอกถึงเกาะกลางถนน เกณฑ์ประเมินศักยภาพความกว้างไหล่ทาง แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เกณฑ์ประเมินศักยภาพความกว้างไหล่ทาง

ศักยภาพ	รายละเอียด
1	ไม่เกิน 0.50 เมตร
2	มากกว่า 0.50 แต่ไม่เกิน 1.00 เมตร
3	มากกว่า 1.00 แต่ไม่เกิน 1.50 เมตร
4	มากกว่า 1.50 แต่ไม่เกิน 2.00 เมตร
5	มากกว่า 2.00 เมตร

2.1.6 วัสดุพื้นผิวจราจร (C_{24}) หมายถึง วัสดุที่ทำมาสร้างพื้นผิวการจราจรในชั้นบนสุด ปัจจุบันสำหรับในประเทศไทยวัสดุพื้นผิวจราจรที่สามารถพบ ได้แก่ ดินลูกรัง ลาดยาง และคอนกรีต [16] เกณฑ์ประเมินศักยภาพวัสดุพื้นผิวจราจร แสดงดังตารางที่ 4

2.1.7 ความแคบตัวของถนน (C_{25}) หมายถึง ร้อยละจำนวนทางโค้งแนวดิ่งและทางโค้งแนวราบในเส้นทางการขนส่งสินค้าทางถนนกับระยะทางเส้นทางการขนส่งสินค้าทางถนนทั้งหมด [9]

เกณฑ์ประเมินศักยภาพความคดเคี้ยวของถนน แสดง
ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 4 เกณฑ์ประเมินศักยภาพวัสดุพื้นผิวจราจร

ศักยภาพ	รายละเอียด
1	ไม่ได้ถูกออกแบบมาสำหรับการเคลื่อนที่ ของยานพาหนะ
2	ดินลูกรัง
3	คอนกรีต
4	ลาดยาง
5	คอนกรีตลาดยาง

ตารางที่ 5 เกณฑ์ประเมินศักยภาพความคดเคี้ยว
ของถนน

ศักยภาพ	รายละเอียด
1	มากกว่า 50%
2	มากกว่า 35% แต่ไม่เกิน 50%
3	มากกว่า 20% แต่ไม่เกิน 35%
4	มากกว่า 10% แต่ไม่เกิน 20%
5	ไม่เกิน 10%

2.1.8 ความลาดชันของพื้นผิวจราจร (C_{26})
หมายถึง ร้อยละความลาดชันของพื้นผิวการจราจร
เส้นทางการขนส่งสินค้าทางถนนที่มีความลาดชันมาก
ทำให้ยานพาหนะเคลื่อนที่ได้ช้า ซึ่งส่งผลกระทบต่อระยะเวลา
การขนส่งสินค้า [9] เกณฑ์ประเมินศักยภาพความลาดชัน
ของพื้นผิวจราจร แสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 เกณฑ์ประเมินศักยภาพความลาดชันของ
พื้นผิวจราจร

ศักยภาพ	รายละเอียด
1	มากกว่า 10%
2	มากกว่า 8% แต่ไม่เกิน 10%
3	มากกว่า 6% แต่ไม่เกิน 8%
4	มากกว่า 4% แต่ไม่เกิน 6%
5	ไม่เกิน 4%

2.1.9 การเสื่อมสภาพความเสียหายของ
ผิวหน้าจราจร (C_{27}) หมายถึง ข้อบกพร่องของพื้นผิว
จราจรที่ระยะทางของเส้นทางการขนส่งสินค้า
ทั้งหมด เกณฑ์ประเมินศักยภาพการเสื่อมสภาพ
ความเสียหายของผิวหน้าจราจร แสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 เกณฑ์ประเมินศักยภาพการเสื่อมสภาพ
ความเสียหายของผิวหน้าจราจร

ศักยภาพ	รายละเอียด
1	มากกว่า 40%
2	มากกว่า 30% แต่ไม่เกิน 40%
3	มากกว่า 20% แต่ไม่เกิน 30%
4	มากกว่า 10% แต่ไม่เกิน 20%
5	ไม่เกิน 10%

2.1.10 จุดอันตรายในเส้นทาง (C_{28}) หมายถึง
ร้อยละระหว่างจำนวนจุดอันตรายในเส้นทาง
การขนส่งสินค้ากับระยะทางของเส้นทางการขนส่ง
สินค้าทั้งหมด เกณฑ์ประเมินศักยภาพจุดอันตราย
ในเส้นทาง [2] แสดงดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 เกณฑ์ประเมินศักยภาพจุดอันตราย
ในเส้นทาง

ศักยภาพ	รายละเอียด
1	มากกว่า 30%
2	มากกว่า 20% แต่ไม่เกิน 30%
3	มากกว่า 15% แต่ไม่เกิน 20%
4	มากกว่า 10% แต่ไม่เกิน 15%
5	ไม่เกิน 10%

2.1.11 ความสามารถในการเชื่อมต่อการขนส่ง
รูปแบบอื่น (C_{29}) หมายถึง ความสามารถในการเชื่อมต่อการ
ขนส่งสินค้ารูปแบบอื่นในรัศมี 20 กิโลเมตร ณ จุด
ต้นทาง-จุดปลายทางของเส้นทางการขนส่ง

สินค้า [13] เกณฑ์ประเมินศักยภาพความสามารถ
การเชื่อมต่อการขนส่งรูปแบบอื่น แสดงดังตารางที่ 9

ตารางที่ 9 เกณฑ์ประเมินศักยภาพความสามารถ
ในการเชื่อมต่อการขนส่งรูปแบบอื่น

ศักยภาพ	รายละเอียด
1	ไม่สามารถเชื่อมต่อการขนส่งรูปแบบอื่น
2	เชื่อมต่อการขนส่งอื่น 1 รูปแบบ
3	เชื่อมต่อการขนส่งอื่น 2 รูปแบบ
4	เชื่อมต่อการขนส่งอื่น 3 รูปแบบ
5	เชื่อมต่อการขนส่งอื่นมากกว่า 3 รูปแบบ

2.1.12 ความสามารถในการเชื่อมต่อการ
ประเทศเพื่อนบ้าน (C_{210}) หมายถึง ความสามารถในการ
เชื่อมต่อการขนส่งเพื่อนบ้านภายในระยะรัศมีต่าง ๆ
ณ จุดต้นทาง-จุดปลายทางของเส้นทางการขนส่ง
สินค้า [13] เกณฑ์ประเมินศักยภาพความสามารถ
เชื่อมต่อการขนส่งเพื่อนบ้าน แสดงดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 เกณฑ์ประเมินศักยภาพความสามารถ
ในการเชื่อมต่อการขนส่งรูปแบบอื่น

ศักยภาพ	รายละเอียด
1	ไม่สามารถเชื่อมต่อการขนส่ง เพื่อนบ้าน ในรัศมีไม่เกิน 60 กิโลเมตร
2	เชื่อมต่อการขนส่งเพื่อนบ้านได้ 1 ประเทศ ในรัศมีมากกว่า 40 แต่ไม่เกิน 60 กิโลเมตร
3	เชื่อมต่อการขนส่งเพื่อนบ้านได้ 1 ประเทศ ในรัศมีไม่เกิน 40 กิโลเมตร
4	เชื่อมต่อการขนส่งเพื่อนบ้านได้ 1 ประเทศ ในรัศมีไม่เกิน 20 กิโลเมตร
5	เชื่อมต่อการขนส่งเพื่อนบ้านได้ 1 ประเทศ ในรัศมีไม่เกิน 20 กิโลเมตรโดยไม่ต้อง เปลี่ยนถ่ายสินค้าไปยังยานพาหนะชนิดอื่น

2.2 กำหนดวิธีการรวบรวมข้อมูล

ในขั้นตอนนี้เป็นการกำหนดวิธีการรวบรวม
ข้อมูลของเส้นทางการขนส่งสินค้าที่เป็นทางเลือก
สำหรับการรวบรวมข้อมูลของเกณฑ์การตัดสินใจ
เชิงปริมาณรวบรวมได้ด้วยสัมภาษณ์ผู้บริหารของ
บริษัทกรณีศึกษา ส่วนข้อมูลของเกณฑ์การตัดสินใจ
เชิงคุณภาพรวบรวมได้ด้วยคำถามระดับศักยภาพ
ลักษณะทางกายภาพจำนวนช่องจราจร ความกว้าง
ช่องจราจร ความกว้างไหล่ทาง และวัสดุพื้นผิวจราจร
สามารถคำนวณโดยใช้วิธีค่าเฉลี่ยแบบถ่วงน้ำหนัก
ด้วยอัตราส่วนระยะทางในระดับศักยภาพนั้นกับ
ระยะทางทั้งหมด แสดงดังสมการที่ 1

$$PC_j = \sum_{k=1}^5 \frac{L_k \times k}{TL_r} \quad (1)$$

เมื่อ PC_j คือ ระดับศักยภาพเกณฑ์การตัดสินใจที่ j
; $j = 1, 2, \dots, n$

L_k คือ ระยะทางในระดับศักยภาพที่ k ; k
= 1, 2, 3, 4, 5

TL_r คือ ระยะทางทั้งหมดของเส้นทางการขนส่ง
สินค้าทางถนนที่ r ; $r = 1, 2, \dots, R$

สำหรับลักษณะทางกายภาพความคดเคี้ยว
ของถนน ความลาดชันพื้นผิวจราจร การเสื่อมสภาพ
ผิวหน้าจราจร และจุดอันตรายในเส้นทาง สามารถ
คำนวณระดับศักยภาพโดยวิธีเปรียบเทียบร้อยละ
ระหว่างลักษณะทางกายภาพที่ประเมินทั้งหมดกับ
ระยะทางของเส้นทางการขนส่งสินค้าทั้งหมด สุดท้าย
ลักษณะทางกายภาพความสามารถในการเชื่อมต่อ
กับการขนส่งรูปแบบอื่นและการเชื่อมต่อการขนส่ง
เพื่อนบ้าน สามารถคำนวณระดับศักยภาพโดย
การประเมินลักษณะทางกายภาพเชิงประจักษ์

2.2 กำหนดทางเลือกในการตัดสินใจ

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ได้ประยุกต์วิธีการเลือกเส้นทางการขนส่งสินค้าทางถนนที่เสนอกับบริษัทการศึกษาซึ่งเป็นบริษัทผู้ผลิตสายไฟฟ้า โดยขนส่งสินค้าจากตำแหน่งที่ตั้งของบริษัทฯ ในเขตบางบอน กรุงเทพมหานครไปยังท่าเรือกรุงเทพ (Bangkok Port) ในเขตคลองเตย เส้นทางการขนส่งสินค้าทางถนนที่บริษัทการศึกษาใช้ในการขนส่งสินค้าในปัจจุบันประกอบไปด้วย 4 เส้นทาง แสดงดังภาพที่ 1

2.3 กำหนดน้ำหนักความสำคัญ

การตัดสินใจแต่ละครั้งผู้ตัดสินใจอาจให้ความสำคัญกับเกณฑ์การตัดสินใจต่างกันขึ้นอยู่กับสถานการณ์ [17] ดังนั้นเกณฑ์การตัดสินใจจะถูกกำหนดน้ำหนักความสำคัญด้วยกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ มีรายละเอียดดังนี้

2.3.1 เปรียบเทียบความสำคัญ ผู้เชี่ยวชาญที่มีประสบการณ์ด้านโลจิสติกส์ที่เกี่ยวข้องกับกิจกรรมการขนส่งสินค้าอย่างน้อย 5 ปี ทำการเปรียบเทียบความสำคัญเกณฑ์การตัดสินใจเป็นรายการในรูปของตารางเปรียบเทียบความสำคัญเกณฑ์การตัดสินใจขนาด $m \times m$ [18] แสดงดังตารางที่ 11 เมื่อ a_{ij} คือ ระดับความสำคัญของเกณฑ์การตัดสินใจแถวที่ i หลักที่ j

ตารางที่ 11 ตารางเปรียบเทียบความสำคัญเกณฑ์การตัดสินใจเป็นรายการคู่

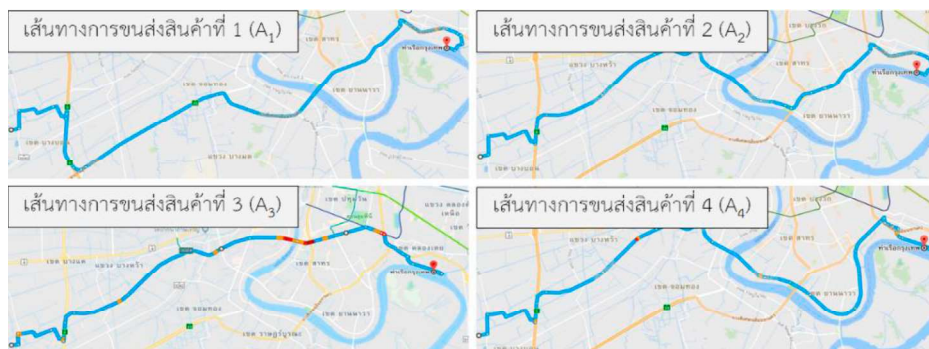
เกณฑ์การตัดสินใจ	C_1	C_2	$\dots$	C_m
C_1	1	a_{12}	$\dots$	a_{1m}
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
C_m	$1/a_{1m}$	$1/a_{2m}$	$\dots$	1

ทั้งนี้การประเมินความสำคัญเกณฑ์การตัดสินใจทั้งหมดจะประเมินด้วยระดับการประเมินความสำคัญแบบ 9 ระดับ [19] แสดงดังตารางที่ 12

ตารางที่ 12 ระดับการประเมินความสำคัญ

ระดับ	ความหมาย
1	ความสำคัญเท่ากัน
3	ความสำคัญปานกลาง
5	ความสำคัญค่อนข้างมาก
7	ความสำคัญมากกว่า
9	ความสำคัญมากที่สุด
2, 4, 6, 8	ความสำคัญระหว่างระดับการประเมิน

ทั้งนี้การเปรียบเทียบความสำคัญของเกณฑ์การตัดสินใจจะดำเนินการตามพื้นฐานวิธีเดลฟาย (Delphi method) จากผู้เชี่ยวชาญทั้งหมดจำนวนไม่น้อยกว่า 17 ราย [20] ซึ่งเป็นจำนวนที่ทำให้ความคลาดเคลื่อนลดลงน้อยมาก พร้อมตรวจสอบค่าสถิติ



ภาพที่ 1 เส้นทางการขนส่งสินค้าทางถนนที่เป็นทางเลือกในการศึกษาวิจัยครั้งนี้

ซึ่งต้องมีค่าเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด [21-22] ได้แก่ ค่าพิสัยระหว่างควอไทล์ ค่าสัมบูรณ์ผลต่างระหว่างมัธยฐานกับฐานนิยม และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

2.3.2 คำนวณน้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์การตัดสินใจทั้งหมดด้วยโปรแกรมเอ็กส์เพิร์ต-ช้อยส์ จากนั้นทำการปรับค่าให้กับน้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์การตัดสินใจทั้งหมดให้มีผลรวมเท่ากับ 1 โดยนำน้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์การตัดสินใจหลักคูณกับ น้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์การตัดสินใจรองที่เป็นสมาชิกของเกณฑ์การตัดสินใจหลักนั้น [23]

2.3.3 ตรวจสอบความสอดคล้องของเหตุผล (Consistency ratio: C.R.) จากน้ำหนักความสำคัญก่อนปรับผลรวมว่ามีความน่าเชื่อถือ หรือเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานในขั้นตอนต่อไป หรือไม่ [24] โดยค่า C.R. ต้องเป็นไปตามเงื่อนไขที่ขึ้นอยู่กับขนาดของตารางเปรียบเทียบความสำคัญเกณฑ์การตัดสินใจเป็นรายคู่ที่เสนอโดย Saaty [25]

2.4 การตัดสินใจเลือกเส้นทางการขนส่งสินค้าทางถนนที่เหมาะสม

หลังจากที่กำหนดน้ำหนักความสำคัญให้กับเกณฑ์การตัดสินใจแล้วในขั้นตอนนี้เป็น การตัดสินใจเลือกเส้นทางการขนส่งสินค้าทางถนนที่เป็นทางเลือกทั้งหมดด้วยการตัดสินใจแบบเรียงลำดับความสำคัญเทียบเคียงอุดมคติ (TOPSIS) มีรายละเอียดดังนี้

2.4.1 สร้างเมทริกซ์การตัดสินใจปรับบรรทัดฐาน เพื่อให้ข้อมูลต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นทางเลือก หรือเกณฑ์การตัดสินใจให้เป็นข้อมูลให้อยู่ ระบายเดียวกันแสดงดังสมการที่ 2 [26] เมื่อ $i = 1, \dots, m$ และ $j = 1, \dots, n$ โดยต้องแปลงให้ต้นทุนค่าขนส่งและระยะเวลาในการขนส่งสินค้าของเส้นทาง

เป็นเกณฑ์การตัดสินใจที่เป็นผลประโยชน์ด้วยการประมาณในช่วงเชิงเส้น [27] กำหนดให้เส้นทางการขนส่งสินค้าทางถนนที่มีต้นทุนค่าขนส่งต่ำที่สุดมีระดับศักยภาพ 5 ส่วนเส้นทางที่มีต้นทุนค่าขนส่งสูงที่สุดจะมีระดับศักยภาพ 1

$$n_{ij} = x_{ij} / \sqrt{\sum_{i=1}^m x_{ij}^2} \quad (2)$$

2.4.2 คำนวณค่าปรับบรรทัดฐานถ่วงน้ำหนักความสำคัญ (V_{ij}) โดยนำเมทริกซ์การตัดสินใจปรับบรรทัดฐานคูณกับน้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์การตัดสินใจรองที่ปรับผลรวมแล้วแสดงดังสมการที่ 3 [28] เมื่อ w_j คือ น้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์การตัดสินใจที่ j ; $j = 1, 2, \dots, n$

$$v_{ij} = w_j \times n_{ij} \quad (3)$$

2.4.3 คำนวณค่าอุดมคติเชิงบวก (A^+) และค่าอุดมคติเชิงลบ (A^-) โดย A^+ เป็นค่าปรับบรรทัดฐานถ่วงน้ำหนักที่มากที่สุดในแต่ละเกณฑ์การตัดสินใจรอง ส่วน A^- เป็นค่าปรับบรรทัดฐานถ่วงน้ำหนักที่น้อยที่สุดในแต่ละเกณฑ์การตัดสินใจรองแสดงดังสมการที่ 4 และสมการที่ 5 เมื่อ i คือ ตัวเลือกที่เป็นผลตอบแทน หรือผลประโยชน์และ j คือ ตัวเลือกที่เป็นค่าใช้จ่าย หรือไม่เป็นผลประโยชน์

$$A^+ = \{(\text{Max } v_{ij} | i \in I), (\text{Min } v_{ij} | i \in J)\} \quad (4)$$

$$A^- = \{(\text{Min } v_{ij} | i \in J), (\text{Max } v_{ij} | i \in I)\} \quad (5)$$

2.4.4 คำนวณระยะห่างจากค่าอุดมคติเชิงบวก (d_i^+) และอุดมคติเชิงลบ (d_i^-) โดยเปรียบเทียบระยะห่างระหว่าง v_{ij} กับ A^+ และ A^- [29]

แสดงดังสมการที่ 6 และ 7 เมื่อ $i = 1, \dots, m; j = 1, \dots, n$ และ $r = 1, \dots, R$

$$d_r^+ = \left\{ \sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^+)^2 \right\}^{1/2} \quad (6)$$

$$d_r^- = \left\{ \sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^-)^2 \right\}^{1/2} \quad (7)$$

2.4.5 คำนวณค่าความสัมพันธ์เข้าใกล้แนวคิดวิธีแก้ปัญหา เป็นการพิจารณาเส้นทางการขนส่งสินค้าทางถนนที่มีระยะใกล้ที่สุดของทางเลือกที่เป็น A^+ และเลือกระยะใกล้ที่สุดของทางเลือกที่เป็น A^- แสดงดังสมการที่ 8 [30] เมื่อ $i = 1, \dots, m$ และ $r = 1, \dots, R$ เส้นทางการขนส่งสินค้าทางถนนที่เหมาะสมที่สุดจะมีค่าความสัมพันธ์เข้าใกล้แนวคิดวิธีแก้ปัญหาสูงสุด

$$C^* = \frac{d_r^-}{d_r^+ + d_r^-} \quad (8)$$

2.5 การวิเคราะห์ความไว

เป็นขั้นตอนสำหรับตรวจสอบผลกระทบของคำตอบที่ได้จากวิธีการตัดสินใจเลือกเส้นทางการขนส่งสินค้าทางถนนเมื่อปัจจัยต่าง ๆ เกิดการเปลี่ยนแปลง โดยทำการวิเคราะห์เกณฑ์การตัดสินใจที่มีน้ำหนักความสำคัญสูงสุดมาทำการตรวจสอบตั้งแต่ 0.10 ถึง 0.90 [23] พร้อมทั้งตรวจสอบค่าความสัมพันธ์เข้าใกล้แนวคิดวิธีแก้ปัญหาและคำตอบเกิดการเปลี่ยนแปลงไปมาน้อยเพียงใด

3. ผลการดำเนินงานวิจัยและอภิปรายผล

ในขั้นตอนนี้เป็นการแสดงผลการดำเนินงานวิจัยตามขั้นตอนที่ได้กำหนดไว้ด้วยการประยุกต์ใช้วิธีการ

เลือกเส้นทางการขนส่งสินค้าทางถนนกับกรณีศึกษา มีรายละเอียดดังนี้

3.1 ผลการรวบรวมข้อมูลของเส้นทาง

ข้อมูลของเส้นทางการขนส่งสินค้าทางถนน ได้แก่ ต้นทุนค่าและระยะเวลาการขนส่ง ได้จากการสัมภาษณ์ผู้บริหารของบริษัทกรณีศึกษา ส่วนระดับศักยภาพลักษณะทางกายภาพรวบรวมได้โดยการลงพื้นที่ภาคสนามด้วยเกณฑ์การประเมินศักยภาพที่กำหนดไว้ แสดงดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 ผลการรวบรวมข้อมูลของเส้นทางการขนส่งสินค้าทางถนน

	A_1	A_2	A_3	A_4
C_{11} (บาท)	5,100	4,850	4,250	4,960
C_{12} (นาท)	43.00	41.00	50.00	46.00
C_{21} (ระดับ)	2.95	3.27	3.16	2.96
C_{22} (ระดับ)	3.06	2.83	3.53	3.42
C_{23} (ระดับ)	1.94	1.65	1.85	1.75
C_{24} (ระดับ)	3.79	3.56	3.65	3.54
C_{25} (ระดับ)	1.00	1.00	1.00	1.00
C_{26} (ระดับ)	2.09	2.17	2.05	2.42
C_{27} (ระดับ)	4.00	4.00	3.00	3.00
C_{28} (ระดับ)	1.00	1.00	1.00	1.00
C_{29} (ระดับ)	1.50	1.50	1.50	1.50
C_{210} (ระดับ)	1.00	1.00	1.00	1.00

3.2 ผลการกำหนดน้ำหนักความสำคัญ

เกณฑ์การตัดสินใจเรื่องเชิงปริมาณและเกณฑ์การตัดสินใจเชิงคุณภาพได้ถูกกำหนดน้ำหนักด้วยกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ มีรายละเอียดดังนี้

3.2.1 ผลการเปรียบเทียบความสำคัญ โดยผู้เชี่ยวชาญตามคุณสมบัติที่กำหนดไว้จำนวน 17 ราย เปรียบเทียบความสำคัญเกณฑ์การตัดสินใจทั้งหมด

เป็นรายคู้ ตัวอย่างการเปรียบเทียบความสำคัญเกณฑ์
การตัดสินใจของเชิงคุณภาพ แสดงดังตารางที่ 14

ตารางที่ 14 ผลการเปรียบเทียบความสำคัญเกณฑ์
การตัดสินใจเชิงคุณภาพเป็นรายคู้

	C ₂₁	C ₂₂	C ₂₃	C ₂₄	C ₂₅	C ₂₆	C ₂₇	C ₂₈	C ₂₉	C ₂₁₀
C ₂₁	1	2	3	2	1/2	1	1/2	2	5	8
C ₂₂	1/2	1	2	2	1/2	2	3	2	4	3
C ₂₃	1/3	1/2	1	3	1	2	1/2	3	5	6
C ₂₄	1/2	1/2	1/3	1	1/3	1	2	1	4	4
C ₂₅	2	2	1	3	1	3	1/2	2	3	7
C ₂₆	1	1/2	1/2	1	1/3	1	1	1	3	3
C ₂₇	2	1/3	2	1/2	2	1	1	1	6	6
C ₂₈	1/2	1/2	1/3	1	1/2	1	1	1	5	5
C ₂₉	1/5	1/4	1/5	1/4	1/3	1/3	1/6	1/5	1	1
C ₂₁₀	1/8	1/3	1/6	1/4	1/7	1/3	1/5	1/5	1	1

3.2.2 ผลการคำนวณน้ำหนัก
ความสำคัญและการตรวจสอบค่า C.R. ผลการ-
เปรียบเทียบความสำคัญเกณฑ์การตัดสินใจหลัก
เกณฑ์การ-ตัดสินใจเชิงปริมาณ และเกณฑ์การ-
ตัดสินใจเชิงคุณภาพ ได้ถูกนำมาคำนวณน้ำหนัก
ความสำคัญเกณฑ์การตัดสินใจทั้งหมดด้วยโปรแกรม
เอ็กส์เพิร์ท-ชอยส์ พร้อมคำนวณค่า C.R. ของน้ำหนัก
ความสำคัญ เพื่อนำไปใช้ในการตัดสินใจเลือกเส้นทาง
การขนส่งสินค้าทางถนนด้วยวิธี TOPSIS โดยพบว่า
เกณฑ์การ-ตัดสินใจหลักและเกณฑ์การตัดสินใจรอง
เชิงปริมาณมีค่า C.R. เท่ากับ 0.00 และเกณฑ์การ-
ตัดสินใจเชิงคุณภาพมีค่า C.R. เท่ากับ 0.10 ซึ่งมี
ค่าเป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนดทั้งหมด

สุดท้ายปรับผลรวมเกณฑ์การตัดสินใจ
รองให้มีค่าเท่ากับ 1 จากผลคูณระหว่างน้ำหนัก
ความสำคัญของเกณฑ์การตัดสินใจหลักกับน้ำหนัก

ความสำคัญของเกณฑ์การตัดสินใจรองที่เป็นสมาชิก
ของเกณฑ์การตัดสินใจหลักนั้น แสดงดังตารางที่ 15

ตารางที่ 15 น้ำหนักความสำคัญเกณฑ์การตัดสินใจ

หลัก	รอง	ปรับผลรวม
C ₁	0.67	C ₁₁ 0.50 0.33
		C ₁₂ 0.50 0.33
C ₂	0.33	C ₂₁ 0.15 0.05
		C ₂₂ 0.14 0.05
		C ₂₃ 0.13 0.04
		C ₂₄ 0.08 0.03
		C ₂₅ 0.16 0.05
		C ₂₆ 0.08 0.03
		C ₂₇ 0.14 0.04
		C ₂₈ 0.08 0.03
		C ₂₉ 0.03 0.01
		C ₂₁₀ 0.02 0.01

3.3 ผลการตัดสินใจเลือกเส้นทาง การขนส่งสินค้าทางถนนที่เหมาะสม

ขั้นตอนนี้เป็นารตัดสินใจเลือกเส้นทาง
การขนส่งสินค้าทางถนนที่เหมาะสมที่สุด โดยนำ
ข้อมูลของเส้นทาง การขนส่งสินค้าทางถนนและ
น้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์การตัดสินใจรอง
ทั้งหมดมาพิจารณาร่วมกันด้วยวิธี TOPSIS มี
รายละเอียดดังนี้

3.3.1 ผลการคำนวณค่าปรับบรรทัดฐาน
ถ่วงน้ำหนักความสำคัญ เริ่มจากการแปลงให้ต้นทุน
ค่าขนส่ง (C₁₁) และระยะเวลาในการขนส่งสินค้า
(C₁₂) ให้เป็นเกณฑ์การตัดสินใจที่เป็นผลประโยชน์
ด้วยวิธีการประมาณในช่วงเชิงเส้น แสดงดัง
ตารางที่ 16

ตารางที่ 16 ผลการแปลง C_{11} และ C_{12}

	A_1	A_2	A_3	A_4
C_{11}	1.00	2.18	5.00	1.66
C_{12}	4.11	5.00	1.00	2.78

ต่อมาปรับข้อมูลของเส้นทางการขนส่งสินค้าให้เป็นระนาบเดียวกัน พร้อมนำเมทริกซ์การตัดสินใจปรับบรรทัดฐานของเกณฑ์การตัดสินใจคู่กับน้ำหนักความสำคัญรวม เมทริกซ์การตัดสินใจปรับบรรทัดฐานถ่วงน้ำหนักความสำคัญ แสดงดังตารางที่ 17

ตารางที่ 17 เมทริกซ์การตัดสินใจปรับบรรทัดฐานถ่วงน้ำหนักความสำคัญ

	A_1	A_2	A_3	A_4
C_{11}	0.057	0.124	0.285	0.095
C_{12}	0.191	0.232	0.046	0.129
C_{21}	0.024	0.026	0.026	0.024
C_{22}	0.024	0.022	0.027	0.027
C_{23}	0.022	0.018	0.021	0.019
C_{24}	0.016	0.015	0.015	0.015
C_{25}	0.025	0.025	0.025	0.025
C_{26}	0.014	0.015	0.014	0.017
C_{27}	0.023	0.023	0.017	0.017
C_{28}	0.015	0.015	0.015	0.015
C_{29}	0.005	0.005	0.005	0.005
C_{210}	0.005	0.005	0.005	0.005

3.3.2 ผลการคำนวณค่า A^+ และ A^- พิจารณาจากค่าปรับบรรทัดฐานถ่วงน้ำหนักที่มากที่สุดและน้อยสุดในแต่ละเกณฑ์การตัดสินใจดังสมการที่ 4 สมการที่ 5 จากตารางที่ 19 สามารถสรุปได้ว่า $A^+ = \{0.285, 0.232, 0.026, 0.02, 0.022, 0.016, 0.025,$

$0.017, 0.023, 0.015, 0.005, 0.005\}$ และ $A^- = \{0.057, 0.046, 0.024, 0.022, 0.018, 0.015, 0.025, 0.014, 0.017, 0.015, 0.005, 0.005\}$

3.3.3 ผลการคำนวณค่า d_r^+ และ d_r^- ของแต่ละทางเลือกเพื่อนำไปคำนวณค่าความสัมพันธ์เข้าใกล้แนวคิดวิธีแก้ปัญหา แสดงดังตารางที่ 18

ตารางที่ 18 ระยะห่างจากค่าอุดมคติเชิงบวกและอุดมคติเชิงลบ

	A_1	A_2	A_3	A_4
d_r^+	0.232	0.161	0.186	0.217
d_r^-	0.144	0.197	0.228	0.091

3.3.4 ผลการคำนวณค่าความสัมพันธ์เข้าใกล้แนวคิดวิธีแก้ปัญหา (C_r^*) เพื่อจัดลำดับเส้นทางการขนส่งสินค้าทางถนนที่เหมาะสมจากระยะใกล้ที่สุดของเส้นทางการขนส่งสินค้าทางถนนที่เป็นแนวคิดเชิงบวกและระยะใกล้ที่สุดของเส้นทางการขนส่งสินค้าทางถนนที่เป็นแนวคิดเชิงลบ ผลการคำนวณค่าความสัมพันธ์เข้าใกล้แนวคิดวิธีแก้ปัญหา แสดงดังตารางที่ 19

ตารางที่ 19 ค่าความสัมพันธ์เข้าใกล้แนวคิดวิธีแก้ปัญหา

	A_1	A_2	A_3	A_4
C_r^*	0.384	0.550	0.551	0.296

จากตารางที่ 22 เส้นทางการขนส่งสินค้าทางถนน A_3 เป็นเส้นทางการขนส่งสินค้าทางถนนที่เหมาะสมมากที่สุดเนื่องจากมีค่าความสัมพันธ์เข้าใกล้แนวคิดวิธีแก้ปัญหาสูงที่สุด ในขณะที่เส้นทางการขนส่งสินค้าทางถนน A_2 เป็นทางเลือกที่มีความเหมาะสมรองลงมา เส้นทางการขนส่งสินค้าทาง

ถนน A_1 เป็นทางเลือกที่มีความเหมาะสมเป็นลำดับที่สาม และสุดท้ายเส้นทางการขนส่งสินค้าทางถนน A_4 เป็นทางเลือกลำดับสุดท้าย ทั้งเนื่องจากค่าความสัมพัทธ์เข้าใกล้แนวคิดวิธีแก้ปัญหาของเส้นทางการขนส่งสินค้าทางถนน A_2 และ A_3 มีค่าใกล้เคียงกันมากจึงต้องมีการวิเคราะห์ความอ่อนไหวของคำตอบและเปรียบเทียบความแตกต่างในขั้นตอนต่อไป

3.4 ผลการวิเคราะห์ความไว

ผลการวิเคราะห์ความไวด้วยการตรวจสอบคำตอบด้วยการพิจารณาเกณฑ์การตัดสินใจหลักต้นทุนค่าขนส่ง (C_1) เนื่องจากมีน้ำหนักความสำคัญสูงสุด (0.67) โดยตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของค่าความสัมพัทธ์เข้าใกล้แนวคิดวิธีแก้ปัญหาเมื่อน้ำหนักความสำคัญของต้นทุนค่าขนส่งเปลี่ยนแปลงตั้งแต่ 0.10 ถึง 0.90 แสดงดังตารางที่ 20

ตารางที่ 20 ผลการวิเคราะห์ความไว

W_j	A_1	A_2	A_3	A_4
0.10	0.447	0.544	0.527	0.333
0.20	0.400	0.549	0.545	0.306
0.30	0.390	0.550	0.549	0.299
0.40	0.386	0.550	0.551	0.297
0.50	0.385	0.550	0.551	0.297
0.60	0.384	0.550	0.551	0.296
<u>0.67*</u>	<u>0.384</u>	<u>0.550</u>	<u>0.551</u>	<u>0.296</u>
0.70	0.384	0.551	0.551	0.296
0.80	0.384	0.551	0.551	0.295
0.90	0.384	0.551	0.551	0.295

จากผลการวิเคราะห์ความไวสรุปได้ว่าเมื่อน้ำหนักความสำคัญของต้นทุนค่าขนส่ง (C_1) มีค่า

ตั้งแต่ 0.30 ถึง 0.90 แล้วค่าความสัมพัทธ์เข้าใกล้แนวคิดวิธีแก้ปัญหาจะมีค่าไม่แตกต่างกัน โดยเฉพาะเส้นทางการขนส่งสินค้าทางถนน A_2 และ A_3 เป็นทางเลือกที่ดีที่สุดและสามารถทดแทนกันได้เนื่องจากมีค่าความสัมพัทธ์เข้าใกล้แนวคิดวิธีแก้ปัญหาใกล้เคียงกันมาก

สุดท้ายเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยความสัมพัทธ์เข้าใกล้แนวคิดวิธีแก้ปัญหาของเส้นทางการขนส่งสินค้าทางถนน A_2 และ A_3 ที่คำนวณจากน้ำหนักความสำคัญทั้งหมดเพื่อยืนยันศักยภาพของเส้นทางการขนส่งสินค้าทางถนนทั้งสองไม่แตกต่างกันด้วยสถิติทดสอบที (T-test) ในกรณีประชากร 2 กลุ่มเป็นอิสระกัน เมื่อความแปรปรวนของค่าความสัมพัทธ์เข้าใกล้แนวคิดวิธีแก้ปัญหาแตกต่างกัน ที่ระดับนัยสำคัญ (α) เท่ากับ 0.05 ผลการทดสอบสมมติฐานพบว่าความน่าจะเป็นที่จะปฏิเสธสมมติฐานหลัก (P-value) เท่ากับ 0.48 และเนื่องจากค่า P-value มีค่าสูงกว่า α จึงสรุปได้ว่าเส้นทางการขนส่งสินค้าทางถนน A_2 และ A_3 มีศักยภาพไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ

4. สรุปผลการวิจัย

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ต้องการเสนอวิธีการตัดสินใจเลือกเส้นทางการขนส่งสินค้าทางถนนที่มีความเหมาะสมมากที่สุดด้วยวิธีการตัดสินใจแบบเรียงลำดับความสำคัญเทียบเคียงอุดมคติด้วยการพิจารณาเกณฑ์การตัดสินใจเชิงปริมาณ ได้แก่ ต้นทุนค่าขนส่งและระยะเวลาในการขนส่งสินค้า และเกณฑ์การตัดสินใจเชิงคุณภาพซึ่งเป็นระดับศักยภาพของลักษณะทางกายภาพในเส้นทางการขนส่งสินค้าทางถนน ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าวิธีการที่เสนอสามารถตัดสินใจเลือกเส้นทางการขนส่งสินค้าทาง

ถนนได้อย่างมีประสิทธิภาพ มีขั้นตอนการคำนวณที่ง่ายและไม่ซับซ้อน เหมาะสมกับเกณฑ์การตัดสินใจเชิงปริมาณและเชิงคุณภาพ และสามารถจัดลำดับทางเลือกที่มีความเหมาะสมมากที่สุดถึงทางเลือกที่มีความเหมาะสมน้อยที่สุด โดยสามารถตัดสินใจเลือกทางเลือกที่ดีที่สุดพร้อมทั้งจัดลำดับทางเลือกด้วยวิธีการตัดสินใจแบบเรียงลำดับความสำคัญเทียบเคียงอุดมคติ อีกทั้งวิธีการประเมินศักยภาพลักษณะทางกายภาพสำหรับการตัดสินใจเลือกเส้นทางการขนส่งสินค้าทางถนนยังเป็นการตัดสินใจบนหลักฐานข้อเท็จจริงเชิงประจักษ์ ลดข้อบกพร่องการตัดสินใจด้วยวิธีการประเมินความเสี่ยงและการประเมินเกณฑ์การตัดสินใจด้วยน้ำหนักความสำคัญที่ขึ้นอยู่กับประสบการณ์และความรู้สึกของผู้ตัดสินใจในขณะนั้น

นอกจากนี้วิธีการตัดสินใจเลือกเส้นทางการขนส่งสินค้าทางถนนที่เสนอยังตอบสนองต่อความต้องการของผู้ตัดสินใจโดยการกำหนดน้ำหนักความสำคัญด้วยกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ ทำให้การตัดสินใจสอดคล้องกับสถานการณ์การตัดสินใจมากขึ้น เช่น ผู้ตัดสินใจอาจให้ความสำคัญกับต้นทุนค่าขนส่ง แต่ในบางกรณีผู้ตัดสินใจอาจให้ความสำคัญกับความตรงต่อเวลาในการขนส่งสินค้ามากที่สุด การกำหนดน้ำหนักความสำคัญให้กับเกณฑ์การตัดสินใจทำให้แก้ปัญหาดังกล่าวได้อย่างเหมาะสม สอดคล้องกับงานวิจัยของ [30, 32-33] ที่ประยุกต์กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์กับการพิจารณาทางเลือกต่าง ๆ ด้วยวิธีการตัดสินใจแบบเรียงลำดับความสำคัญเทียบเคียงอุดมคติ อย่างไรก็ตามคำตอบจากวิธีการตัดสินใจเลือกเส้นทางการขนส่งสินค้าทางถนนที่เสนออาจเกิดการเปลี่ยนแปลงได้ขึ้นอยู่กับข้อมูลเส้นทางการขนส่ง

สินค้าทางถนนและน้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์การตัดสินใจ

สำหรับการศึกษาวิจัยในอนาคตอาจประยุกต์วิธีการแก้ปัญหการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์วิธีอื่นพิจารณาเส้นทางการขนส่งสินค้าทางถนนที่เหมาะสม เช่น วิธีการไวโกร์ (VIKOR) การโปรแกรมเป้าหมาย (Goal Programming: GP) ฯลฯ รวมถึงประยุกต์ใช้แนวคิดระบบตรรกศาสตร์คลุมเครือ (Fuzzy Logic) ร่วมกับวิธีการตัดสินใจแบบเรียงลำดับความสำคัญเทียบเคียงอุดมคติ เป็นต้น

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] นิธิเดช คูหาทองสัมฤทธิ์. การเลือกเส้นทางการขนส่งสินค้าที่เหมาะสม โดยการวิเคราะห์การตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์. วารสารวิชาการและวิจัย มทร. พระนคร. 2560; 11 (1):137-50.
- [2] Farah H, Polus A, Cohen MA. Development of an infrastructure coefficient by an analytic hierarchy process and its relationship to safety. IATSS Res. 2007; 31(1):120-32.
- [3] Handerson M. Human factors in traffic safety: a reappraisal. 1st ed. New South Wales: Traffic Accident Research Unit, Department of Motor Transport; 1971.
- [4] Kopytov E, Abramov D. Multiple-criteria analysis and choice of transportation alternatives in multimodal freight transport system. Transp Telecommun. 2012; 13(2):148-58.

- [5] Kengpol A, Meethom W, Tuominen M. The development of a decision support system in multimodal transportation routing within Greater Mekong sub-region countries. *Int J Prod Econ*. 2012; 140(2):691-701.
- [6] Kengpol A, Tuammee S. The development of a decision support framework for a quantitative risk assessment in multimodal green logistics: an empirical study. *Int J Prod Res*. 2016; 54(4):1020-38.
- [7] Kengpol A, Tuammee S, Tuominen M. The development of a framework for route selection in multimodal transportation. *Int J Logist Manag*. 2014; 25(3):581-610.
- [8] Arunyanart S, Ohmori S, Yoshimoto K. Selection of export route option in GMS region: recommendation for current situation. *J Jpn Ind Manage Assoc*. 2016; 67(2E):193-201.
- [9] Sattayaprasert W, Taneerananon P, Hanaoka S, et al. Creating a risk-based network for HazMat logistics by route prioritization with AHP. *IATSS Res*. 2008; 32(1):74-87.
- [10] Yuan L, Yuan H, Ma Y, et al. Development of a safety evaluation model for provincial highway. *Discret Dyn Nat Soc*. 2014; 2014(1):1-10.
- [11] นิธิเดช คุณาทองสัมฤทธิ์. การเลือกเส้นทางการขนส่งสินค้าที่เหมาะสม โดยตัวแบบโปรแกรมเป้าหมายแบบศูนย์หนึ่ง. *วารสารวิจัยราชภัฏพระนคร สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*. 2560; 12(2):78-91.
- [12] Hwang CL, Yoon K. Multiple attribute decision making: methods and applications. 1st ed. New York: Springer-Verlag; 1981.
- [13] วรพจน์ มีถม. เกณฑ์การประเมินศักยภาพเส้นทางการขนส่งสินค้าทางถนน. *วารสารบริหารธุรกิจเทคโนโลยีมหานคร*. 2556; 10(2):61-80.
- [14] Kaewfak K, Ammarapala V. The decision making of freight route in multimodal transportation. *Suranaree J Sci Technol*. 2018; 25(1):1-10.
- [15] Liu S, Wang J, Fu T. Effects of lane width, lane position and edge shoulder width on driving behavior in under-ground urban expressways: a driving simulator study. *Int J Environ Res Public Health*. 2016; 13(10):1-14.
- [16] Meethom W, Koohathongsumrit N. Design of decision support system for road freight transportation routing using Multilayer Zero One Goal Programming. *Eng j*. 2018; 22(6):185-205.
- [17] นิธิเดช คุณาทองสัมฤทธิ์. การเลือกเส้นทางการขนส่งวัตถุดิบที่เหมาะสม กรณีศึกษาโรงงานผลิตอาหารสำเร็จรูป. *วารสารวิจัย*

- รามคำแหง (วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี). 2560; 20(1):1-17.
- [18] Du J, Jiang Y, Wang K, et al. Evaluation of pilotage dispatching operation for Dalian Port in China based on FCE-AHP method. *J Int Marit Saf Environ Aff Shipping*. 2017; 1(1):11-8.
- [19] Saaty TL. How to make a decision: the analytic hierarchy process. *Eur J Oper Res*. 1990; 48(1):9-26.
- [20] Day J, Bobeva M. A generic toolkit for the successful management of Delphi studies. *Elect J Bus Res Meth*. 2005; 3(2):103-16.
- [21] Barzekar G, Aziz A, Mariapan M, et al. Delphi technique for generating criteria and indicators in monitoring ecotourism sustainability in Northern forests of Iran: case study on Dohezar and Sehezar Watersheds. *Folia For Pol Ser A*. 2011; 53(2):130-41.
- [22] Latif Ra, Dahlan A, Mulud ZA, et al. The Delphi technique as a method to obtain consensus in health care education research. *Educ Med J*. 2017; 9(3):89-102.
- [23] Mangla SK, Kumar P, Barua MK. Risk analysis in green supply chain using fuzzy AHP approach: a case study. *Resour Conserv Recycl*. 2015; 104(12B): 375-90.
- [24] นิธิเดช คุหาทองสัมฤทธิ์. การคัดเลือกผู้ให้บริการโลจิสติกส์ที่เหมาะสมด้วยกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์แบบฟัซซี่ กรณีศึกษาโรงงานผลิตผลิตภัณฑ์ยาง. *วารสารวิชาการ มทร. สุวรรณภูมิ*. 2561; 6(2):182-93.
- [25] Saaty TL. The analytic hierarchy process. 1st ed. New York: McGraw-Hill; 1980.
- [26] Kaynak S, Altuntas S, Dereli T. Comparing the innovation performance of EU candidate countries: an entropy-based TOPSIS approach. *Econ Res-Ekon Istraz*. 2017; 30(1):31-54.
- [27] Aminbakhsh S, Gunduz M, Sonmez R. Safety risk assessment using analytic hierarchy process (AHP) during planning and budgeting of construction projects. *J Safety Res*. 2013; 46(3):99-105.
- [28] Araujo CAS, Wanke P, Siqueira MM. A performance analysis of Brazilian public health: TOPSIS and neural networks application. *Int J Prod Perform Manag*. 2018; 67(9):1526-49.
- [29] Yuvaraj N, Kumar PD. Multiresponse optimization of abrasive water jet cutting process parameters using TOPSIS approach. *Mater Manuf Process*. 2015; 30(5):882-9.
- [30] Nyimbili PH, Erden T, Karaman H. Integration of GIS, AHP and TOPSIS for earthquake hazard analysis. *Nat Hazards*. 2018; 92(3):1523-46.

- [31] Zyoud SH, Funch-Hanusch D. bibliometric-based survey on AHP and TOPSIS techniques. Expert Syst Appl. 2017; 78(15):287-303.
- [32] Sarkar A. A TOPSIS method to evaluate the technologies. Int J Qual Reliab Manag. 2013; 31(1):2-13.
- [33] Karahalios H. The application of the AHP-TOPSIS for evaluating ballast water treatment systems by ship operators. Transp Res Part D Transp Environ. 2017; 52(3A):172-84.

การเปรียบเทียบวิธีการพยากรณ์อัตราเร็วลมที่ระดับความสูง 120 เมตร จังหวัดมุกดาหาร

A Comparison of Forecasting Methods for Wind Speed
at an Altitude of 120 Meters in Mukdahan Provinceวารangkha เรียนสุทธิ์^{1*}, จอมภพ แววศักดิ์²Warangkha Riansut^{1*}, Jompob Waewsak²¹สาขาวิชาคณิตศาสตร์และสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง

Department of Mathematics and Statistics, Faculty of Science, Thaksin University, Phatthalung Campus

²สาขาวิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง

Department of Physics, Faculty of Science, Thaksin University, Phatthalung Campus

*E-mail: warang27@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบวิธีการพยากรณ์อัตราเร็วลม 3 วิธี คือ วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ วิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบบวก และวิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณ อนุกรมเวลอัตราเร็วลมรายชั่วโมงที่ระดับความสูง 120 เมตร จากจังหวัดมุกดาหาร ได้มาจากรศูนย์วิจัยพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยทักษิณ ตั้งแต่วันที่ 1 มิถุนายนถึงวันที่ 1 กรกฎาคม 2558 จำนวน 721 ค่า สำหรับการเปรียบเทียบความถูกต้องของตัวแบบพยากรณ์จะใช้เกณฑ์ร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAPE) และเกณฑ์รากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ที่ต่ำที่สุด ผลการศึกษาพบว่า จากวิธีการพยากรณ์ทั้งหมดที่ได้ศึกษา วิธีที่มีความถูกต้องมากที่สุดคือ วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ มีความผิดพลาดจากการพยากรณ์ร้อยละ 4.9216 (MAPE = 4.9216) หรือมีความผิดพลาดจากการพยากรณ์ 0.5 เมตร/วินาที (RMSE = 0.5) ซึ่งทั้ง 2 เกณฑ์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบความถูกต้องของตัวแบบพยากรณ์ให้ผลเป็นไปในทิศทางเดียวกัน จึงทำให้น่าเชื่อถือได้มากยิ่งขึ้นว่าวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์เป็นวิธีที่มีความเหมาะสมกับอนุกรมเวลาชุดนี้มากที่สุด

คำสำคัญ: อัตราเร็วลม ตัวแบบพยากรณ์ บ็อกซ์-เจนกินส์ การปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลัง

ABSTRACT

This research aimed to compare three methods of forecasting wind speed: Box-Jenkins method, Winters' additive exponential smoothing method, and Winters' multiplicative exponential smoothing method. Time series of hourly wind speed at an altitude of 120 meters in Mukdahan province were gathered from research center in energy and environment, Thaksin university during 1 June to 1 July 2015 of 721 observations. The criteria of the lowest mean absolute percentage error (MAPE) and root mean squared error (RMSE) were used for comparing

Received 08-05-2019

Revised 15-08-2019

Accepted 16-08-2019

the accuracy of the forecasting model. Research findings indicated that for all forecasting methods that were studied, the most accurate method was the Box-Jenkins method. This forecasting method was 4.9216 percent forecasting error (MAPE = 4.9216) or was forecasting error of 0.5 meter/second (RMSE = 0.5). The comparison of the accuracy of the forecasting model for both criteria provided the same result. Therefore, it made more reliable that the Box-Jenkins method was the most suitable method for this time series.

Keywords: Wind speed, Forecasting model, Box-Jenkins, Exponential smoothing

1. บทนำ

ปัจจุบันมีทุ่งกังหันลมผลิตไฟฟ้าเชิงพาณิชย์ที่กำลังดำเนินการในประเทศไทยแล้ว 21 โครงการ กำลังการผลิตติดตั้ง 681.4 เมกะวัตต์ ในพื้นที่ต่าง ๆ ของประเทศไทย ได้แก่ จังหวัดนครราชสีมา จังหวัดชัยภูมิ จังหวัดเพชรบูรณ์ จังหวัดนครราชสีมา จังหวัดสงขลา จังหวัดสมุทรสาคร จังหวัดภูเก็ต และจังหวัดตราด นอกจากนี้ยังมีอีกหลายโครงการที่กำลังอยู่ในระหว่างก่อสร้าง เช่น ทุ่งกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดกำลังการผลิตติดตั้ง 60 เมกะวัตต์ บริเวณภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย ในรูปแบบผู้ผลิตไฟฟ้ารายเล็ก (Small power producer, SPP) ของบริษัทกัลกุล รวมถึงยังมีอีกหลายโครงการที่กำลังอยู่ในระหว่างการพัฒนา ซึ่งเป็นการพัฒนาเพื่อเป็นไปตามแผนการส่งเสริมการผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมของกระทรวงพลังงานและมีเป้าหมายการติดตั้งกังหันลมผลิตไฟฟ้าให้ได้ถึง 3,002 เมกะวัตต์ จากการที่พลังงานลมมีคุณลักษณะที่มีความแปรปรวนสูง เพราะพฤติกรรมของลมที่ไม่ต่อเนื่องและมีการเปลี่ยนแปลงสูง ทำให้การผลิตไฟฟ้าของทุ่งกังหันลมผลิตไฟฟ้ามีลักษณะแปรปรวนตามพฤติกรรมของลม ส่งผลต่อปริมาณและคุณภาพไฟฟ้าที่ผลิตได้จากทุ่งกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่อาจจะส่งผลกระทบต่อระบบกริดของการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค

และการไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย ซึ่งการดำเนินงานของทุ่งกังหันลมผลิตไฟฟ้าจะสามารถผลิตไฟฟ้าออกมาในลักษณะที่เรียกว่า Stochastic และ Intermittency ดังนั้นการคาดการณ์หน่วยผลิตหรือการพยากรณ์หน่วยผลิตไฟฟ้าจากทุ่งกังหันลมผลิตไฟฟ้าจะช่วยให้การวางแผนการผลิตไฟฟ้าจากโรงไฟฟ้าประเภทต่าง ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเหมาะสมกับความต้องการใช้ไฟฟ้าไม่สูงและไม่ต่ำจนเกินไป อย่างไรก็ตาม การพยากรณ์กำลังผลิตไฟฟ้าจากทุ่งกังหันลมผลิตไฟฟ้าจะมีความถูกต้องแม่นยำขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น การพยากรณ์ลมในพื้นที่ของทุ่งกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่มีความถูกต้องแม่นยำสูงและมีความถี่เชิงเวลาที่ละเอียด เช่น รายนาที่หรือรายชั่วโมง ข้อมูลการผลิตไฟฟ้าของทุ่งกังหันลมผลิตไฟฟ้าที่ขึ้นอยู่กับคุณลักษณะของกังหันลมผลิตไฟฟ้า (Wind turbine generator) และเส้นโค้งกำลัง (Power curve) ที่มีความถูกต้อง ข้อมูลเชิงพื้นที่ของโครงการ แบบจำลองการไหลของลม (Wind flow modeling) เชิงพื้นที่ในพื้นที่ศึกษาของโครงการ ซึ่งปัจจุบันมักจะอาศัยแบบจำลองการไหลของลมแบบพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ นอกจากนี้ยังมีการใช้เทคนิคการพยากรณ์ต่าง ๆ เช่น เทคนิคการสร้างตัวแบบพยากรณ์ทางสถิติ (Statistical modeling) เพื่อช่วยให้ผลการพยากรณ์มี

ความถูกต้องแม่นยำสูงขึ้น ด้วยเหตุผลดังกล่าว จึงเป็นที่น่าสนใจที่ควรมีการศึกษาการพยากรณ์ข้อมูลอัตราเร็วลม จากการศึกษางานวิจัยอื่น ๆ พบว่า วรณดา กิรติวิบูลย์ และเจ๊ะอัฐพาน มาหิละ [1] ได้พยากรณ์อัตราเร็วลมราย 3 ชั่วโมง ที่ระดับความสูง 20 เมตร ตามแนวชายฝั่งของอำเภอจะนะ จังหวัดสงขลา ด้วยวิธีการทางสถิติ 2 วิธี คือ วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ และวิธีการแยกส่วนประกอบของอนุกรมเวลา ผลการวิจัยพบว่า วิธีการแยกส่วนประกอบของอนุกรมเวลาในรูปแบบบวกให้ความแม่นยำในการพยากรณ์สูงกว่าวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ วรณดา กิรติวิบูลย์ และเจ๊ะอัฐพาน มาหิละ [2] ได้พยากรณ์อัตราเร็วลมรายชั่วโมง ที่ระดับความสูง 40 เมตร ตามแนวชายฝั่ง อำเภอท่าศาลา จังหวัดนครศรีธรรมราช ด้วยวิธีการทางสถิติ 6 วิธี คือ วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ วิธีการแยกส่วนประกอบของอนุกรมเวลา วิธีการพยากรณ์รวมโดยใช้การเฉลี่ยอย่างง่าย วิธีการพยากรณ์รวมโดยใช้การถ่วงน้ำหนักด้วยการถ่วงน้ำหนักของผลรวมของความคลาดเคลื่อนกำลังสอง วิธีการพยากรณ์รวมโดยใช้การถ่วงน้ำหนักด้วยการถ่วงน้ำหนักของผลรวมของความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ และวิธีการพยากรณ์รวมโดยใช้การถ่วงน้ำหนักด้วยสัดส่วนของค่าจากเวกเตอร์ลักษณะเฉพาะของการวิเคราะห์ตัวประกอบหลัก ผลการวิจัยพบว่า วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ โดยใช้ตัวแบบ SARIMA(1, 1, 1)(0, 1, 1)₂₄ ไม่มีพจน์ค่าคงตัว เป็นวิธีที่เหมาะสมกับอนุกรมเวลาชุดนี้มากที่สุด Keerativibool et al. [3] ได้พยากรณ์อัตราเร็วลมราย 3 ชั่วโมง ที่ระดับความสูง 30 เมตร ตามแนวชายฝั่ง อำเภอจะนะ จังหวัดสงขลา ด้วยวิธีการทางสถิติ 2 วิธี คือ วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ และวิธีการแยกส่วนประกอบของอนุกรมเวลา ผลการวิจัยพบว่า

วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์เป็นวิธีที่ดีกว่าวิธีการแยกส่วนประกอบของอนุกรมเวลา และ Bielecki et al. [4] ได้ศึกษาคุณลักษณะทางสถิติของความผิดพลาดในการพยากรณ์กำลังผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลม ซึ่งการพยากรณ์กำลังผลิตไฟฟ้าจากพลังงานลมเป็นการผสมผสานกันระหว่างเทคนิคทางฟิสิกส์และทางสถิติ โดยเป็นอัลกอริธึมที่มีความสลับซับซ้อนในการพยากรณ์และลดความผิดพลาด ความผิดพลาดดังกล่าวมักจะเกี่ยวข้องกับลมและเส้นโค้งกำลังของกังหันลมผลิตไฟฟ้า การศึกษาดังกล่าวเป็นการศึกษาการพยากรณ์จากกังหันลมผลิตไฟฟ้าเพียงต้นเดียว

จากการศึกษาที่ผ่านมา พบว่า ยังไม่มีเคยมีการศึกษาพยากรณ์อัตราเร็วลมที่ระดับความสูง 120 เมตร จังหวัดมุกดาหาร อีกทั้งการพยากรณ์อัตราเร็วลมที่ระดับความสูง 120 เมตร เป็นสิ่งที่มีประโยชน์เนื่องจากเป็นระดับความสูงของกังหันลมผลิตไฟฟ้าขนาดใหญ่ในปัจจุบันที่มีหอคอยสูงระดับ 120 เมตร ดังนั้นการศึกษาค้นคว้านี้ ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษาวิธีการสร้างตัวแบบพยากรณ์อัตราเร็วลมที่ระดับความสูง 120 เมตร จังหวัดมุกดาหาร โดยใช้วิธีการทางสถิติทั้งหมด 3 วิธี ได้แก่ วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ วิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบบวก และวิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณ จากนั้นจึงคัดเลือกตัวแบบพยากรณ์ที่มีความถูกต้องและเหมาะสมมากที่สุด 1 ตัวแบบ โดยใช้เกณฑ์ร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean absolute percentage error, MAPE) และเกณฑ์รากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean squared error, RMSE) ที่ต่ำที่สุด เพื่อให้ได้ตัวแบบพยากรณ์สำหรับการพยากรณ์อัตราเร็วลมที่ระดับความสูง 120 เมตร จังหวัดมุกดาหาร ในอนาคตต่อไป

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

การวิจัยครั้งนี้ดำเนินการสร้างตัวแบบพยากรณ์อัตราเร็วลม (เมตร/วินาที) โดยใช้โปรแกรม SPSS ซึ่งข้อมูลที่ใช้ในการศึกษาได้มาจากศูนย์วิจัยพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยทักษิณ เป็นอนุกรมเวลาอัตราเร็วลมรายชั่วโมงที่ระดับความสูง 120 เมตร จังหวัดมุกดาหาร ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม 2524 ช่วงเวลา 0.00 น. ถึงวันที่ 1 กรกฎาคม 2558 ช่วงเวลา 0.00 น. จำนวน 302,377 ค่า เนื่องด้วยข้อจำกัดของงบประมาณการเก็บรวบรวมข้อมูล ทำให้การศึกษานี้ไม่สามารถนำอัตราเร็วลมที่เป็นปัจจุบันมาวิเคราะห์ข้อมูลได้ อย่างไรก็ตาม ผู้วิจัยเชื่อว่าลักษณะการเปลี่ยนแปลงของอัตราเร็วลมในอดีตและในปัจจุบันไม่ได้มีความแตกต่างกันมากนัก

ผู้วิจัยคัดเลือกข้อมูลอัตราเร็วลมมาศึกษา ตั้งแต่วันที่ 1 มิถุนายน 2558 ช่วงเวลา 0.00 น. ถึงวันที่ 1 กรกฎาคม 2558 ช่วงเวลา 0.00 น. จำนวน 721 ค่า เนื่องจากเป็นช่วงเวลาที่มัลักษณะของอนุกรมเวลาเหมาะสมกับการสร้างตัวแบบพยากรณ์ อีกทั้งยังเป็นช่วงเวลาที่ใกล้เคียงกับข้อมูลปัจจุบันมากที่สุด ผู้วิจัยได้นำข้อมูลจำนวน 721 ค่า มาแบ่งออกเป็น 2 ชุด ชุดที่ 1 ตั้งแต่วันที่ 1 มิถุนายน 2558 ช่วงเวลา 0.00 น. ถึงวันที่ 29 มิถุนายน 2558 ช่วงเวลา 23.00 น. จำนวน 696 ค่า สำหรับการสร้างตัวแบบพยากรณ์ และชุดที่ 2 ตั้งแต่วันที่ 30 มิถุนายน 2558 ช่วงเวลา 0.00 น. ถึงวันที่ 1 กรกฎาคม 2558 ช่วงเวลา 0.00 น. จำนวน 25 ค่า สำหรับการเปรียบเทียบความถูกต้องของตัวแบบพยากรณ์ ด้วยเกณฑ์ MAPE และ RMSE ที่ต่ำที่สุด ซึ่งข้อมูลชุดที่ 2 ที่ใช้ในการศึกษานี้มีจำนวนไม่ถึงร้อยละ 10 (จำนวน 72 ค่า) เนื่องจากผู้วิจัยต้องการเก็บข้อมูลในช่วงวันที่ 28 - 29 มิถุนายน 2558 ที่พบแนวโน้ม

ที่ลดลง เป็นข้อมูลชุดที่ 1 เพื่อให้ได้ตัวแบบพยากรณ์ที่มีความถูกต้องแม่นยำมากยิ่งขึ้น

เมื่อพิจารณาลักษณะการเคลื่อนไหวของอนุกรมเวลาชุดที่ 1 พบว่า อัตราเร็วลมที่ระดับความสูง 120 เมตร จังหวัดมุกดาหาร มีส่วนประกอบของแนวโน้มทั้งเพิ่มขึ้นและลดลงรวมถึงมีความผันแปรตามฤดูกาล (แสดงรายละเอียดในผลการทดลองและอภิปรายผลภาพที่ 1) นอกเหนือจากการพิจารณารูปของอนุกรมเวลา (Y_t) เทียบกับเวลา (t) แล้ว ผู้วิจัยยังได้ตรวจสอบว่าอนุกรมเวลาชุดนี้มีส่วนประกอบของแนวโน้มและความผันแปรตามฤดูกาลจริงหรือไม่ โดยใช้การทดสอบสมมติฐานดังนี้ [5]

การตรวจสอบว่าอนุกรมเวลาอัตราเร็วลมที่ระดับความสูง 120 เมตร จังหวัดมุกดาหาร มีส่วนประกอบของแนวโน้มหรือไม่ ดำเนินการดังนี้

1.ตรวจสอบข้อสมมติ (Assumption) คืออนุกรมเวลาในแต่ละวันมีการแจกแจงปกติโดยใช้การทดสอบชาปิโร-วิลค์ (Shapiro-Wilk test) เนื่องจากอนุกรมเวลาในแต่ละวันมี 24 ค่า ซึ่งเป็นข้อมูลรายชั่วโมง ($n < 50$) ผลการตรวจสอบพบว่าอัตราเร็วลมในแต่ละวันไม่มีการแจกแจงปกติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

2.ตรวจสอบความเท่ากันของความแปรปรวนโดยใช้การทดสอบของเลวิน ภายใต้การใช้มัธยฐาน (Levene's test based on median) เนื่องจากการทดสอบของเลวิน ภายใต้การใช้มัธยฐาน เป็นการทดสอบความเท่ากันของความแปรปรวนประชากรหลายกลุ่มที่ได้รับการพัฒนามาจากวิธีเลวิน ภายใต้การใช้ค่าเฉลี่ย (Levene's test based on mean) แต่วิธีเลวิน ภายใต้การใช้มัธยฐานจะได้สถิติที่มีความแกร่ง (Robust) ต่อข้อสมมติของการแจกแจงปกติของตัวแปรสุ่มที่พิจารณา จึงเป็น

วิธีที่มีความยืดหยุ่นมากกว่า เนื่องจากสามารถใช้ได้กับข้อมูลที่ไม่ได้มีการแจกแจงปกติด้วย เพราะเมื่อข้อมูลมีลักษณะเบ้ซ้ายหรือเบ้ขวาจะมีผลกระทบกับมัธยฐานน้อยกว่าค่าเฉลี่ย ผลการตรวจสอบความแปรปรวนพบว่า อัตราเร็วลมในแต่ละวันมีความแปรปรวนไม่เท่ากัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

3.ทดสอบมัธยฐานของอนุกรมเวลาในแต่ละวัน โดยใช้สถิติไม่อิงพารามิเตอร์ (Nonparametric statistics) ซึ่งคือ การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวโดยลำดับที่ของครัสคอลล-วอลลิส (Kruskal-Wallis's one-way analysis of variance by rank) เนื่องจากอัตราเร็วลมในแต่ละวันไม่มีการแจกแจงปกติและมีความแปรปรวนไม่เท่ากัน ผลการทดสอบพบว่า อัตราเร็วลมในแต่ละวันมีมัธยฐานแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 (Kruskal-Wallis: $\chi^2 = 481.191$, p-value < 0.0001) หมายความว่า อนุกรมเวลาชุดนี้มีส่วนประกอบของแนวโน้ม ซึ่งอาจจะเป็นแนวโน้มเพิ่มขึ้นหรือลดลงก็ได้

การตรวจสอบว่าอนุกรมเวลาอัตราเร็วลมที่ระดับความสูง 120 เมตร จังหวัดมุกดาหารมีส่วนประกอบของความผันแปรตามฤดูกาลหรือไม่ ดำเนินการดังนี้

1.จากการตรวจสอบแนวโน้ม พบว่า อนุกรมเวลามีส่วนประกอบของแนวโน้ม จึงต้องกำจัดแนวโน้มออกก่อนที่จะทดสอบค่าเฉลี่ยของอนุกรมเวลาในแต่ละชั่วโมง ซึ่งวิธีการกำจัดแนวโน้มมี 2 วิธีคือ ถ้าพิจารณาที่กราฟของอนุกรมเวลาเทียบกับเวลาแล้วพบว่า อนุกรมเวลามีการเคลื่อนไหวหรือมีการแกว่งตัวที่ค่อนข้างคงที่เมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไป กล่าวได้ว่า อนุกรมเวลามีความเหมาะสมกับตัวแบบบวก ควรกำจัดแนวโน้มออกด้วยการลบ แต่ถ้า

อนุกรมเวลามีการเคลื่อนไหวหรือมีการแกว่งตัวที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไป กล่าวได้ว่า อนุกรมเวลามีความเหมาะสมกับตัวแบบคูณ ควรกำจัดแนวโน้มออกด้วยการหาร สำหรับการเคลื่อนไหวของอัตราเร็วลมที่ระดับความสูง 120 เมตร จังหวัดมุกดาหาร ในผลการทดลองและอภิปรายผลภาพที่ 1 พบว่า อนุกรมเวลามีความเหมาะสมกับตัวแบบคูณ จึงกำจัดแนวโน้มออกด้วยการหาร

2. ตรวจสอบข้อสมมุติโดยใช้การทดสอบชาปิโร-วิลค์ สำหรับการตรวจสอบการแจกแจงปกติ เนื่องจากอนุกรมเวลาในแต่ละชั่วโมงมี 29 ค่า ซึ่งเป็นข้อมูลชุดที่ 1 ที่มีจำนวน 29 วัน ($n < 50$) และใช้การทดสอบของเลวิน ภายใต้การใช้มัธยฐานสำหรับการตรวจสอบความเท่ากันของความแปรปรวน ผลการตรวจสอบพบว่า อัตราเร็วลมในแต่ละชั่วโมงหลังจากกำจัดแนวโน้มออกแล้วไม่มีการแจกแจงปกติ แต่มีความแปรปรวนเท่ากัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

3.ทดสอบมัธยฐานของอนุกรมเวลาในแต่ละชั่วโมงหลังจากกำจัดแนวโน้มออกแล้ว โดยใช้สถิติไม่อิงพารามิเตอร์ ซึ่งคือ การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวโดยลำดับที่ของครัสคอลล-วอลลิส เนื่องจากอัตราเร็วลมในแต่ละชั่วโมงหลังจากกำจัดแนวโน้มออกแล้วไม่มีการแจกแจงปกติ ผลการทดสอบพบว่า อัตราเร็วลมในแต่ละชั่วโมงเมื่อปรับแนวโน้มออกด้วยการหารมีมัธยฐานแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 (Kruskal-Wallis: $\chi^2 = 96.593$, p-value < 0.0001) หมายความว่า อนุกรมเวลาชุดนี้มีส่วนประกอบของความผันแปรตามฤดูกาล

จากผลการทดสอบสมมุติฐานข้างต้น สรุปได้ว่า อนุกรมเวลาอัตราเร็วลมที่ระดับความสูง 120 เมตร

จังหวัดมุกดาหาร ชุดที่ 1 ตั้งแต่วันที่ 1 ถึงวันที่ 29 มิถุนายน 2558 จำนวน 696 ค่า มีส่วนประกอบของแนวโน้มและความผันแปรตามฤดูกาล สอดคล้องกับการพิจารณาจากกราฟของอนุกรมเวลา (Y_t) เทียบกับเวลา (t) ดังนั้นวิธีการสร้างตัวแบบพยากรณ์ที่มีความเหมาะสมกับอนุกรมเวลาที่มีทั้งส่วนประกอบของแนวโน้มและความผันแปรตามฤดูกาล ได้แก่ วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ (เมื่อใช้ตัวแบบ Seasonal autoregressive integrated moving average, SARIMA) วิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบบวก และวิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณ วิธีการสร้างตัวแบบพยากรณ์ด้วยวิธีการทางสถิติทั้ง 3 วิธี ดังกล่าว แสดงรายละเอียดดังหัวข้อที่ 2.1 สำหรับหัวข้อที่ 2.2 จะเป็นการเปรียบเทียบความถูกต้องของตัวแบบพยากรณ์ โดยพิจารณาจากเกณฑ์ MAPE และ RMSE ที่ต่ำที่สุด สัญลักษณ์ที่ใช้สำหรับวิธีการสร้างตัวแบบพยากรณ์ในหัวข้อที่ 2.1 แสดงดังนี้

Y_t แทนอนุกรมเวลาอัตราเร็วรวม ณ เวลา t
 $\hat{Y}_t$ และ $\hat{Y}_{t+m}$ แทนค่าพยากรณ์อัตราเร็วรวม ณ เวลา t และเวลา $t + m$ ตามลำดับ โดยที่ m แทนจำนวนช่วงเวลาที่ต้องการพยากรณ์ไปข้างหน้า
 a_t , b_t และ S_t แทนค่าประมาณระยะตัดแกน Y ความชันของแนวโน้ม และความผันแปรตามฤดูกาล ณ เวลา t ตามลำดับ
 α , γ และ δ แทนค่าคงตัวการปรับเรียบ โดยที่ $0 < \alpha < 1$, $0 < \gamma < 1$ และ $0 < \delta < 1$
 t แทนช่วงเวลา ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 1 ถึง n_1 เมื่อ n_1 แทนจำนวนข้อมูลในอนุกรมเวลาชุดที่ 1
 s แทนจำนวนคาบของฤดูกาล

2.1 วิธีการพยากรณ์

2.1.1 วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์

วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์มีความเหมาะสมกับอนุกรมเวลาที่มีทั้งส่วนประกอบของแนวโน้มและความผันแปรตามฤดูกาล มีตัวแบบในรูปทั่วไป คือ SARIMA(p, d, q)(P, D, Q)_s แสดงดังสมการที่ (1) [6] แต่ในกรณีที่อนุกรมเวลาที่มีเพียงส่วนประกอบของแนวโน้มเท่านั้น ตัวแบบจะสามารถลดรูปเหลือเพียง ARIMA (p, d, q) ขั้นตอนการสร้างตัวแบบพยากรณ์โดยวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์สามารถศึกษาได้จากวราภรณ์เรียนสุทธิ [7]

$$\phi_p(B)\Phi_p(B^s)(1-B)^d(1-B^s)^D Y_t = \delta + \theta_q(B)\Theta_Q(B^s)\varepsilon_t \quad (1)$$

เมื่อ ε_t แทนอนุกรมเวลาของความคลาดเคลื่อนที่มีการแจกแจงปกติและเป็นอิสระกันด้วยค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ และความแปรปรวนเท่ากันทุกช่วงเวลา

$\delta = \mu\phi_p(B)\Phi_p(B^s)$ แทนค่าคงตัว (Constant) โดยที่ μ แทนค่าเฉลี่ยของอนุกรมเวลาที่คงที่ (Stationary)

$\phi_p(B) = 1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p$ แทนตัวดำเนินการสหสัมพันธ์ในตัวเองอันดับที่ p กรณีไม่มีฤดูกาล (Non-seasonal autoregressive operator of order p, AR(p))

$\Phi_p(B^s) = 1 - \Phi_1 B^s - \Phi_2 B^{2s} - \dots - \Phi_P B^{Ps}$ แทนตัวดำเนินการสหสัมพันธ์ในตัวเองอันดับที่ P กรณีมีฤดูกาล (Seasonal autoregressive operator of order P, SAR(P))

$\theta_q(B) = 1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_q B^q$ แทนตัวดำเนินการเฉลี่ยเคลื่อนที่อันดับที่ q กรณีไม่มีฤดูกาล

(Non-seasonal moving average operator of order q , $MA(q)$)

$\Theta_Q(B^s) = 1 - \Theta_1 B^s - \Theta_2 B^{2s} - \dots - \Theta_Q B^{Qs}$ แทนตัวดำเนินการเฉลี่ยเคลื่อนที่อันดับที่ Q กรณีนีมีฤดูกาล (Seasonal moving average operator of order Q , $SMA(Q)$)

d และ D แทนลำดับที่ของการหาผลต่างและผลต่างฤดูกาล ตามลำดับ

B แทนตัวดำเนินการถอยหลัง (Backward operator) โดยที่ $B^s Y_t = Y_{t-s}$

2.1.2 วิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบบวก

วิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบบวกมีความเหมาะสมกับอนุกรมเวลาที่มีส่วนประกอบของแนวโน้มที่เป็นเส้นตรงและมีความผันแปรตามฤดูกาล โดยที่อัตราส่วนของความผันแปรตามฤดูกาลต่อค่าแนวโน้มมีค่าคงที่ กล่าวคืออัตราส่วนของความผันแปรตามฤดูกาลต่อค่าแนวโน้มมีค่าไม่เพิ่มขึ้นและไม่ลดลงตามเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป ตัวแบบพยากรณ์แสดงดังสมการที่ (2) [5]

$$\hat{Y}_{t+m} = (a_t + b_t m) + \hat{S}_t \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } a_t &= \alpha(Y_t - \hat{S}_{t-s}) + (1-\alpha)(a_{t-1} + b_{t-1}) \\ b_t &= \gamma(a_t - a_{t-1}) + (1-\gamma)b_{t-1} \\ \hat{S}_t &= \delta(Y_t - a_t) + (1-\delta)\hat{S}_{t-s} \end{aligned}$$

2.1.3 วิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณ

วิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณมีความเหมาะสมกับอนุกรมเวลาที่มีส่วนประกอบของแนวโน้มที่เป็น

เส้นตรงและมีความผันแปรตามฤดูกาล โดยที่อัตราส่วนของความผันแปรตามฤดูกาลต่อค่าแนวโน้มมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป ตัวแบบพยากรณ์แสดงดังสมการที่ (3) [5]

$$\hat{Y}_{t+m} = (a_t + b_t m) \hat{S}_t \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \text{เมื่อ } a_t &= \alpha \frac{Y_t}{\hat{S}_{t-s}} + (1-\alpha)(a_{t-1} + b_{t-1}) \\ b_t &= \gamma(a_t - a_{t-1}) + (1-\gamma)b_{t-1} \\ \hat{S}_t &= \delta \frac{Y_t}{a_t} + (1-\delta)\hat{S}_{t-s} \end{aligned}$$

2.2 การเปรียบเทียบความถูกต้องของตัวแบบพยากรณ์

การวิจัยครั้งนี้ได้คัดเลือกตัวแบบพยากรณ์ที่มีความถูกต้องและเหมาะสมกับอนุกรมเวลาอัตราเร็วลมที่ระดับความสูง 120 เมตร จังหวัดมุกดาหาร โดยการเปรียบเทียบอัตราเร็วลมรายชั่วโมงของข้อมูลชุดที่ 2 ตั้งแต่วันที่ 30 มิถุนายน 2558 ช่วงเวลา 0.00 น. ถึงวันที่ 1 กรกฎาคม 2558 ช่วงเวลา 0.00 น. จำนวน 25 ค่า กับค่าพยากรณ์จากวิธีการทางสถิติทั้ง 3 วิธี เพื่อคำนวณค่า MAPE และ RMSE โดยตัวแบบพยากรณ์ที่ให้ค่า MAPE และ RMSE ต่ำที่สุด จัดเป็นตัวแบบที่มีความถูกต้องและเหมาะสมกับอนุกรมเวลาชุดนี้มากที่สุด เนื่องจากให้ค่าพยากรณ์ที่มีความแตกต่างกับข้อมูลจริงน้อยที่สุด เกณฑ์ MAPE และ RMSE แสดงดังสมการที่ (4) และ (5) ตามลำดับ [5], [8]

$$MAPE = \frac{100}{n_2} \sum_{t=1}^{n_2} \left| \frac{e_t}{Y_t} \right| \quad (4)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n_2} \sum_{t=1}^{n_2} e_t^2} \quad (5)$$

เมื่อ $e_t = Y_t - \hat{Y}_t$ แทนความคลาดเคลื่อน
จากการพยากรณ์อัตราเร็วลม ณ เวลา t

Y_t และ $\hat{Y}_t$ แทนอนุกรมเวลา และ
ค่าพยากรณ์อัตราเร็วลม ณ เวลา t

t แทนช่วงเวลา ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 1 ถึง n_2 โดย
ที่ n_2 แทนจำนวนข้อมูลในอนุกรมเวลาชุดที่ 2

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

จากการพิจารณาลักษณะการเคลื่อนไหวของ
อนุกรมเวลาอัตราเร็วลมรายชั่วโมงที่ระดับความสูง
120 เมตร จังหวัดมุกดาหาร ชุดที่ 1 ตั้งแต่วันที่ 1
มิถุนายน 2558 ช่วงเวลา 0.00 น. ถึงวันที่ 29
มิถุนายน 2558 ช่วงเวลา 23.00 น. จำนวน 696 ค่า
ดังภาพที่ 1 พบว่า อัตราเร็วลมในช่วงวันที่ 1 ถึงวันที่
14 มิถุนายน 2558 มีแนวโน้มลดลง ($b_1 = -0.0021$,
 $t = -3.011$, $p\text{-value} = 0.0029$) อัตราเร็วลมในช่วง
วันที่ 15 ถึงวันที่ 25 มิถุนายน 2558 มีแนวโน้ม
เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ($b_1 = 0.0290$, $t = 24.389$,
 $p\text{-value} < 0.0001$) หลังจากนั้นอัตราเร็วลมมี
แนวโน้มลดลงอีกครั้งหนึ่ง ($b_1 = -0.0305$, $t =$
 -8.964 , $p\text{-value} < 0.0001$) และอัตราเร็วลมมี
ส่วนประกอบของความผันแปรตามฤดูกาลรวมอยู่ด้วย

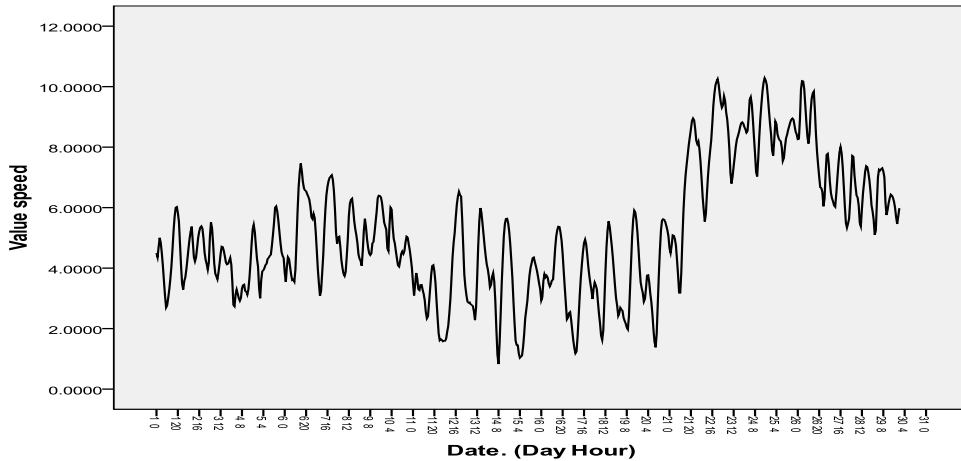
3.1 ผลการสร้างตัวแบบพยากรณ์

3.1.1 ผลของวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์

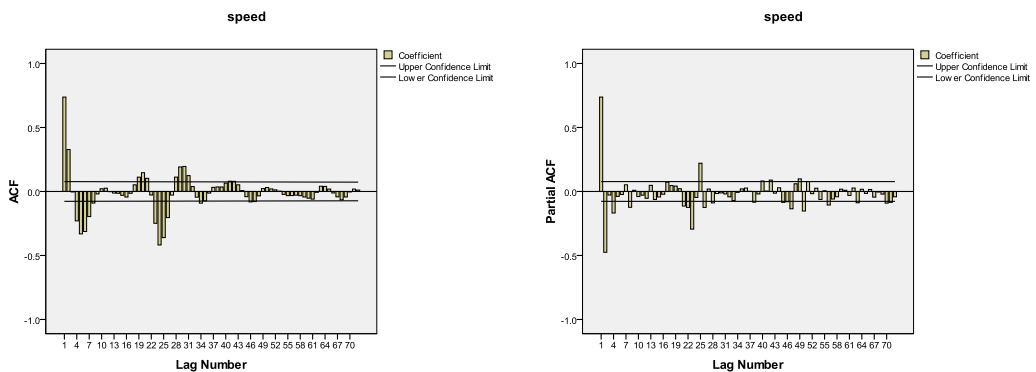
เนื่องจากอนุกรมเวลาชุดนี้มี
ส่วนประกอบของแนวโน้มและความผันแปรตาม
ฤดูกาล ผู้วิจัยจึงกำจัดแนวโน้มออกโดยการหาผลต่าง
ลำดับที่ 1 ($d = 1$) และกำจัดความผันแปรตาม
ฤดูกาลออกโดยการหาผลต่างฤดูกาลลำดับที่ 1 ($D =$
 1 , $s = 24$) ได้กราฟ ACF และ PACF หลังจาก
การแปลงข้อมูลแสดงดังภาพที่ 2 ซึ่งพบว่า อนุกรม
เวลายังมีลักษณะไม่คงที่ (Non-stationary)
โดยกราฟ ACF แสดงให้เห็นว่าสัมพันธ์สหสัมพันธ์
ในตัวเองลดลงอย่างช้า ๆ จึงแปลงข้อมูลอีกครั้งโดย
การหาผลต่างลำดับที่ 2 และผลต่างฤดูกาลลำดับที่ 1
($d = 2$, $D = 1$, $s = 24$) ได้กราฟ ACF และ PACF
หลังจากการแปลงข้อมูลแสดงดังภาพที่ 3 ซึ่งพบว่า
อนุกรมเวลามีลักษณะคงที่ จึงกำหนดตัวแบบ
พยากรณ์ที่เป็นไปได้เริ่มต้น คือ ตัวแบบ SARIMA(3,
2, 3)(1, 1, 1)₂₄ พร้อมกับประมาณค่าพารามิเตอร์
โดยตัวแบบพยากรณ์ที่มีพารามิเตอร์ทุกตัวมี
นัยสำคัญที่ระดับ 0.05 คือ ตัวแบบ SARIMA(2, 2,
2)(1, 1, 1)₂₄ ไม่มีพจน์ค่าคงตัว ดังตารางที่ 1 และ
จากสมการที่ (1) สามารถเขียนเป็นตัวแบบได้ดังนี้

$$\begin{aligned} (1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2)(1 - \phi_1 B^{24})(1 - B)^2(1 - B^{24})Y_t &= (1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2)(1 - \Theta_1 B^{24})\varepsilon_t \\ (1 - \phi_1 B^{24} - \phi_1 B + \phi_1 \phi_1 B^{25} - \phi_2 B^2 + \phi_2 \phi_1 B^{26})(1 - B^{24} - 2B + 2B^{25} + B^2 - B^{26})Y_t &= (1 - \Theta_1 B^{24} - \theta_1 B + \theta_1 \Theta_1 B^{25} - \theta_2 B^2 + \theta_2 \Theta_1 B^{26})\varepsilon_t \\ (1 - B^{24} - 2B + 2B^{25} + B^2 - B^{26} - \phi_1 B^{24} + \phi_1 B^{48} + 2\phi_1 B^{25} - 2\phi_1 B^{49} - \phi_1 B^{26} + \phi_1 B^{50} - \phi_1 B + \phi_1 B^{25} + 2\phi_1 B^2 & \\ - 2\phi_1 B^{26} - \phi_1 B^3 + \phi_1 B^{27} + \phi_1 \phi_1 B^{25} - \phi_1 \phi_1 B^{49} - 2\phi_1 \phi_1 B^{26} + 2\phi_1 \phi_1 B^{50} + \phi_1 \phi_1 B^{27} - \phi_1 \phi_1 B^{51} - \phi_2 B^2 + \phi_2 B^{26} & \\ + 2\phi_2 B^3 - 2\phi_2 B^{27} - \phi_2 B^4 + \phi_2 B^{28} + \phi_2 \phi_1 B^{26} - \phi_2 \phi_1 B^{50} - 2\phi_2 \phi_1 B^{27} + 2\phi_2 \phi_1 B^{51} + \phi_2 \phi_1 B^{28} - \phi_2 \phi_1 B^{52})Y_t & \\ = \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \theta_2 \varepsilon_{t-2} - \Theta_1 \varepsilon_{t-24} + \theta_1 \Theta_1 \varepsilon_{t-25} + \theta_2 \Theta_1 \varepsilon_{t-26} & \end{aligned}$$

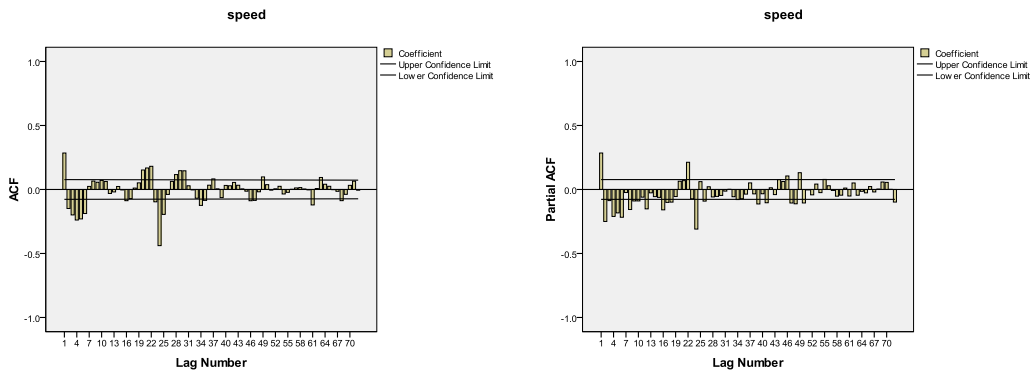
$$Y_t = (2 + \phi_1)Y_{t-1} - (1 + 2\phi_1 - \phi_2)Y_{t-2} + (\phi_1 - 2\phi_2)Y_{t-3} + \phi_2 Y_{t-4} + (1 + \Phi_1)Y_{t-24} - (2 + \phi_1)(1 + \Phi_1)Y_{t-25} \\ + (1 + 2\phi_1 - \phi_2)(1 + \Phi_1)Y_{t-26} - (\phi_1 - 2\phi_2)(1 + \Phi_1)Y_{t-27} - \phi_2(1 + \Phi_1)Y_{t-28} - \Phi_1 Y_{t-48} + \Phi_1(2 + \phi_1)Y_{t-49} \\ - \Phi_1(1 + 2\phi_1 - \phi_2)Y_{t-50} + \Phi_1(\phi_1 - 2\phi_2)Y_{t-51} + \phi_2 \Phi_1 Y_{t-52} + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} - \theta_2 \varepsilon_{t-2} - \theta_1 \varepsilon_{t-24} + \theta_1 \varepsilon_{t-25} \\ + \theta_2 \varepsilon_{t-26}$$



ภาพที่ 1 ลักษณะการเคลื่อนไหวของอนุกรมเวลาอัตราเร็วลมรายชั่วโมงที่ระดับความสูง 120 เมตร ตั้งแต่วันที่ 1 ถึงวันที่ 29 มิถุนายน 2558



ภาพที่ 2 กราฟ ACF และ PACF ของอนุกรมเวลาอัตราเร็วลมที่ระดับความสูง 120 เมตร เมื่อแปลงข้อมูลด้วยการหาผลต่างลำดับที่ 1 และผลต่างฤดูกาลลำดับที่ 1



ภาพที่ 3 กราฟ ACF และ PACF ของอนุกรมเวลาอัตราเร็วลมที่ระดับความสูง 120 เมตร เมื่อแปลงข้อมูลด้วยการหาผลต่างลำดับที่ 2 และผลต่างฤดูกาลลำดับที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าประมาณพารามิเตอร์ของตัวแบบ SARIMA(2, 2, 2)(1, 1, 1)₂₄ ไม่มีพจน์ค่าคงตัว

พารามิเตอร์	AR(1): ϕ_1	AR(2): ϕ_2	MA(1): θ_1	MA(2): θ_2	SAR(1): Φ_1	SMA(1): ϕ_1
ค่าประมาณ	0.74021	-0.17035	0.58499	0.41351	0.18694	0.88541
t	9.572	-2.459	5.732	5.024	3.708	25.312
p-value	< 0.0001	0.014	< 0.0001	< 0.0001	0.0002	< 0.0001

เมื่อแทนค่าประมาณพารามิเตอร์จากตารางที่ 1 จะได้ตัวแบบพยากรณ์แสดงดังสมการที่ (6)

$$\begin{aligned} \hat{Y}_t = & 2.74021Y_{t-1} - 2.65077Y_{t-2} + 1.08091Y_{t-3} - 0.17035Y_{t-4} + 1.18694Y_{t-24} - 3.25246Y_{t-25} \\ & + 3.14630Y_{t-26} - 1.28298Y_{t-27} + 0.20220Y_{t-28} - 0.18694Y_{t-48} + 0.51225Y_{t-49} - 0.49553Y_{t-50} \\ & + 0.20207Y_{t-51} - 0.03185Y_{t-52} - 0.58499e_{t-1} - 0.41351e_{t-2} - 0.88541e_{t-24} + 0.51796e_{t-25} \\ & + 0.36613e_{t-26} \end{aligned} \quad (6)$$

เมื่อ $\hat{Y}_t$ แทนค่าพยากรณ์อัตราเร็วลม ณ เวลา t

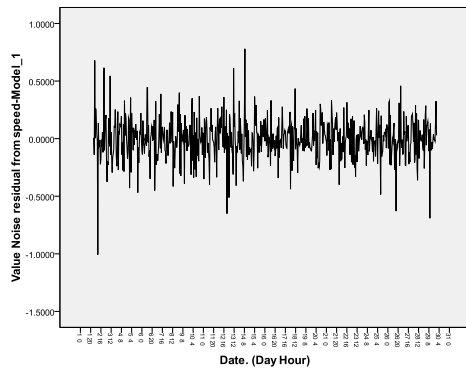
Y_{t-j} แทนอนุกรมเวลาอัตราเร็วลม ณ เวลา t - j

e_{t-j} แทนความคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์อัตราเร็วลม ณ เวลา t - j

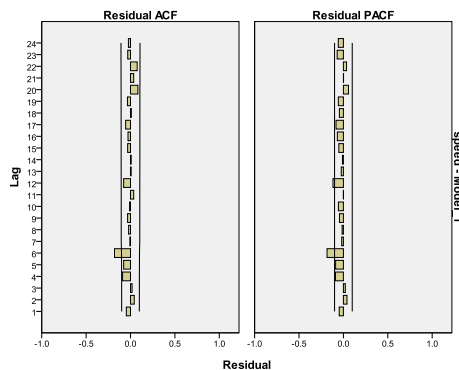
จากการตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแบบพยากรณ์ในสมการที่ (6) โดยพิจารณาที่ค่าความคลาดเคลื่อนดังภาพที่ 4 พบว่า ความคลาดเคลื่อนมีการกระจายตัวรอบค่าศูนย์ และมีการเคลื่อนไหวเป็นอิสระกัน ผลจากการพิจารณากราฟ ACF และ PACF ของค่าความคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์ดังภาพที่ 5 พบว่า ความคลาดเคลื่อนมีการเคลื่อนไหวเป็น

อิสระกัน (ยกเว้นช่วงเวลา 6 มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในตัวและสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในตัวบางส่วนเกินจากขอบเขตเพียงเล็กน้อย ซึ่งไม่มีผลเสียแต่อย่างใด เนื่องจากเป็นความสัมพันธ์ระหว่างความคลาดเคลื่อนช่วงเวลาที่ t กับความคลาดเคลื่อนช่วงเวลาที่ t - 6) และผลการตรวจสอบความเป็นอิสระกันโดยใช้การทดสอบรันส์ (Runs test) พบว่า

ไม่มีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ($Z = 1.795$, $p\text{-value} = 0.073$) ดังนั้นตัวแบบพยากรณ์ที่สร้างขึ้นมีความเหมาะสม



ภาพที่ 4 ค่าความคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์เทียบกับเวลาโดยวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์



ภาพที่ 5 กราฟ ACF และ PACF ของค่าความคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์

3.1.2 ผลของวิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบบวก

จากการสร้างตัวแบบพยากรณ์โดยวิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบบวก ได้ตัวแบบพยากรณ์ดังสมการที่ (7)

$$\hat{Y}_{t+m} = (6.16669 + 0.00248m) + \hat{S}_t \quad (7)$$

เมื่อ $\hat{Y}_{t+m}$ แทนค่าพยากรณ์อัตราเร็วลม ณ เวลา $t + m$ โดยที่ $m = 1$ แทนวันที่ 30 มิถุนายน 2558 ช่วงเวลา 0.00 น.

$\hat{S}_t$ แทนดัชนีฤดูกาล ณ เวลา t รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 2 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า อัตราเร็วลมของช่วงเวลา 3.00 น. ถึง 4.00 น. และช่วงเวลา 13.00 น. ถึง 22.00 น. ของทุกวัน มีค่ามากกว่าช่วงเวลาอื่น ๆ เนื่องจากมีค่าดัชนีฤดูกาลมากกว่า 0

ตารางที่ 2 ดัชนีฤดูกาลของอนุกรมเวลาอัตราเร็วลมที่ระดับความสูง 120 เมตร จากวิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบบวก

ช่วงเวลา	ดัชนีฤดูกาล	ช่วงเวลา	ดัชนีฤดูกาล
0.00 น.	-0.52233	12.00 น.	-0.25343
1.00 น.	-0.57331	13.00 น.	0.23969
2.00 น.	-0.20685	14.00 น.	0.61642
3.00 น.	0.08076	15.00 น.	0.92353
4.00 น.	0.00150	16.00 น.	1.05669
5.00 น.	-0.25582	17.00 น.	1.08807
6.00 น.	-0.52275	18.00 น.	1.03096
7.00 น.	-0.75328	19.00 น.	0.88727
8.00 น.	-0.91695	20.00 น.	0.64588
9.00 น.	-1.05385	21.00 น.	0.36575
10.00 น.	-1.03257	22.00 น.	0.09255
11.00 น.	-0.75282	23.00 น.	-0.18509

จากการตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแบบพยากรณ์ในสมการที่ (7) โดยพิจารณาที่ค่าความคลาดเคลื่อนดังภาพที่ 6 พบว่า ความคลาดเคลื่อนมีการกระจายตัวรอบค่าศูนย์ และการเคลื่อนไหวเป็นอิสระกัน และผลการตรวจสอบความเป็นอิสระกันโดยใช้การทดสอบรันส์ พบว่า ไม่มีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ($Z = -1.397$, $p\text{-value} =$

0.162) ดังนั้นตัวแบบพยากรณ์ที่สร้างขึ้นมีความเหมาะสม

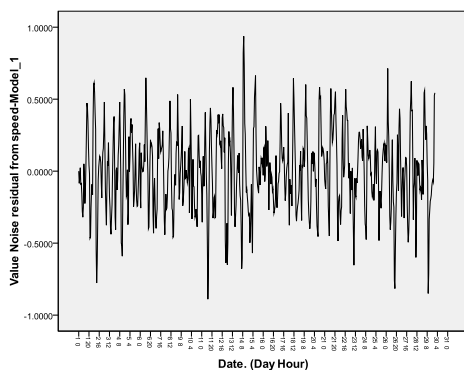
3.1.3 ผลของวิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณ

จากการสร้างตัวแบบพยากรณ์โดยวิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณ ได้ตัวแบบพยากรณ์ดังสมการที่ (8)

$$\hat{Y}_{t+m} = (6.15589 + 0.00513m)\hat{S}_t \quad (8)$$

เมื่อ $\hat{Y}_{t+m}$ แทนค่าพยากรณ์อัตราเร็วลม ณ เวลา $t + m$ โดยที่ $m = 1$ แทนวันที่ 30 มิถุนายน 2558 ช่วงเวลา 0.00 น.

$\hat{S}_t$ แทนดัชนีฤดูกาล รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 3 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า อัตราเร็วลมของช่วงเวลา 13.00 น. ถึง 22.00 น. ของทุกวัน มีค่ามากกว่าช่วงเวลาอื่น ๆ เนื่องจากมีค่าดัชนีฤดูกาลมากกว่า 1

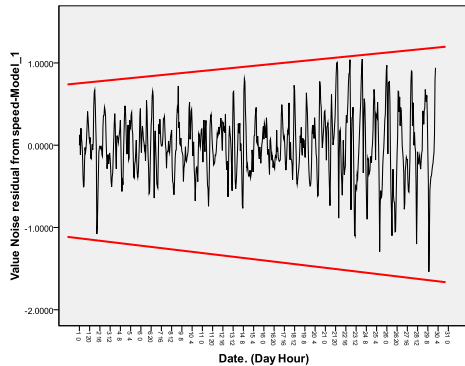


ภาพที่ 6 ค่าความคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์เทียบกับเวลาโดยวิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณ

ตารางที่ 3 ดัชนีฤดูกาลของอนุกรมเวลาอัตราเร็วลมที่ระดับความสูง 120 เมตร จากวิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณ

ช่วงเวลา	ดัชนี ฤดูกาล	ช่วงเวลา	ดัชนี ฤดูกาล
0.00 น.	0.83985	12.00 น.	0.97064
1.00 น.	0.79284	13.00 น.	1.08100
2.00 น.	0.86308	14.00 น.	1.17667
3.00 น.	0.88739	15.00 น.	1.26680
4.00 น.	0.84286	16.00 น.	1.32058
5.00 น.	0.77765	17.00 น.	1.35642
6.00 น.	0.71798	18.00 น.	1.37395
7.00 น.	0.68675	19.00 น.	1.35988
8.00 น.	0.68627	20.00 น.	1.30692
9.00 น.	0.70959	21.00 น.	1.22272
10.00 น.	0.78011	22.00 น.	1.10126
11.00 น.	0.86530	23.00 น.	0.97169

จากการตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแบบพยากรณ์ในสมการที่ (8) โดยพิจารณาที่ค่าความคลาดเคลื่อนดังภาพที่ 7 พบว่า ความคลาดเคลื่อนมีการกระจายตัวรอบค่าศูนย์ แต่มีการเคลื่อนไหวไม่เป็นอิสระกัน กล่าวคือ เมื่อเวลาเพิ่มขึ้น ความผันแปรของความคลาดเคลื่อนมีค่าเพิ่มขึ้น และผลการตรวจสอบความเป็นอิสระกันโดยใช้การทดสอบรันส์ พบว่า มีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05 ($Z = -5.168$, $p\text{-value} < 0.0001$) ดังนั้นตัวแบบพยากรณ์ที่สร้างขึ้นไม่มีความเหมาะสม จึงไม่ควรนำไปพยากรณ์ข้อมูลชุดที่ 2 เพื่อเปรียบเทียบค่า MAPE และ RMSE



ภาพที่ 7 ค่าความคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์เทียบกับเวลาโดยวิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณ

3.2 ผลการเปรียบเทียบความถูกต้องของตัวแบบพยากรณ์

จากการเปรียบเทียบค่าจริงกับค่าพยากรณ์อัตราเร็วลมรายชั่วโมงที่ระดับความสูง 120 เมตร จังหวัดมุกดาหาร ของข้อมูลชุดที่ 2 ตั้งแต่วันที่

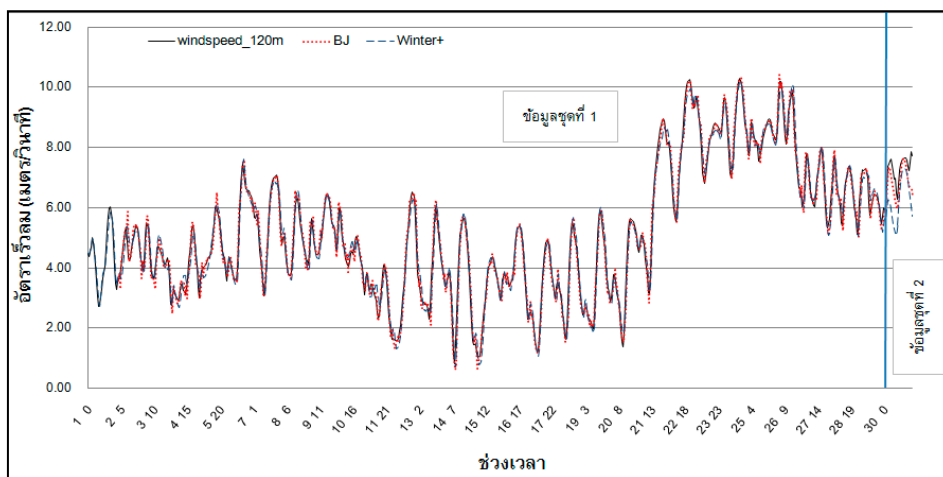
30 มิถุนายน 2558 ช่วงเวลา 0.00 น. ถึงวันที่ 1 กรกฎาคม 2558 ช่วงเวลา 0.00 น. จำนวน 25 ค่า โดยการคำนวณค่า MAPE และ RMSE ในสมการที่ (4) และสมการที่ (5) ตามลำดับ ได้ผลแสดงดังตารางที่ 4 และภาพที่ 8 ซึ่งพบว่า เมื่อใช้ตัวแบบพยากรณ์ของวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ ในสมการที่ (6) ได้ค่า MAPE และ RMSE ต่ำที่สุด ดังนั้นวิธีการพยากรณ์นี้จึงเป็นวิธีที่มีความถูกต้องและเหมาะสมมากที่สุดกับอนุกรมเวลาอัตราเร็วลมรายชั่วโมงที่ระดับความสูง 120 เมตร จังหวัดมุกดาหาร โดยวิธีการพยากรณ์นี้มีความผิดพลาดจากการพยากรณ์ร้อยละ 4.9216 ($MAPE = 4.9216$) หรือมีความผิดพลาดจากการพยากรณ์ 0.5 เมตร/วินาที ($RMSE = 0.5$) ซึ่งทั้ง 2 เกณฑ์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบความถูกต้องของตัวแบบพยากรณ์ให้ผลเป็นไปในทิศทางเดียวกัน จึงทำให้เราเชื่อได้ว่ามากยิ่งขึ้นว่าวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์เป็นวิธีที่มีความเหมาะสมกับอนุกรมเวลาชุดนี้มากที่สุด

ตารางที่ 4 ผลการเปรียบเทียบความถูกต้องของตัวแบบพยากรณ์

ช่วงเวลา	อัตราเร็วลม (เมตร/วินาที)	ค่าพยากรณ์จากวิธีการพยากรณ์	
		บ็อกซ์-เจนกินส์	วินเทอร์แบบบวก
30/6/2015 0:00 น.	5.9095	5.9103	5.6468
30/6/2015 1:00 น.	5.9932	6.1189	5.5983
30/6/2015 2:00 น.	6.7231	6.7392	5.9673
30/6/2015 3:00 น.	7.3818	7.3028	6.2574
30/6/2015 4:00 น.	7.5553	7.3535	6.1806
30/6/2015 5:00 น.	7.6225	7.1403	5.9257
30/6/2015 6:00 น.	7.3963	6.9324	5.6613
30/6/2015 7:00 น.	7.1798	6.7213	5.4332
30/6/2015 8:00 น.	6.9544	6.5182	5.2720
30/6/2015 9:00 น.	6.9642	6.2862	5.1376

ตารางที่ 4 ผลการเปรียบเทียบความถูกต้องของตัวแบบพยากรณ์ (ต่อ)

ช่วงเวลา	อัตราเร็วลม (เมตร/วินาที)	ค่าพยากรณ์จากวิธีการพยากรณ์	
		บ็อกซ์-เจนกินส์	วินเทอร์แบบบวก
30/6/2015 10:00 น.	6.4804	5.9788	5.1614
30/6/2015 11:00 น.	6.2601	6.0542	5.4436
30/6/2015 12:00 น.	6.7519	6.5105	5.9455
30/6/2015 13:00 น.	7.2185	6.9569	6.4411
30/6/2015 14:00 น.	7.4259	7.2902	6.8203
30/6/2015 15:00 น.	7.5503	7.5541	7.1299
30/6/2015 16:00 น.	7.6087	7.6362	7.2655
30/6/2015 17:00 น.	7.6652	7.6112	7.2994
30/6/2015 18:00 น.	7.6631	7.4976	7.2447
30/6/2015 19:00 น.	7.5792	7.3113	7.1035
30/6/2015 20:00 น.	7.3644	7.0339	6.8646
30/6/2015 21:00 น.	7.2232	6.7607	6.5870
30/6/2015 22:00 น.	7.5171	6.6826	6.3162
30/6/2015 23:00 น.	7.8452	6.6181	6.0411
1/7/2015 0:00 น.	7.7110	6.3649	5.7063
MAPE		<u>4.9216</u>	13.9033
RMSE		<u>0.5000</u>	1.1539



ภาพที่ 8 การเปรียบเทียบอัตราเร็วลมและค่าพยากรณ์ ที่ระดับความสูง 120 เมตร จังหวัดมุกดาหาร

ผลการศึกษาครั้งนี้มีความสอดคล้องกับการศึกษาของวรางคณา กิริติวิบูลย์ และเจ๊ะอัฐพาน มาหิละ [2] ที่พบว่า วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์เป็นวิธีที่มีความเหมาะสมมากที่สุดกับอนุกรมเวลาอัตราเร็วลมรายชั่วโมง ที่ระดับความสูง 40 เมตร ตามแนวชายฝั่งอำเภอท่าศาลา จังหวัดนครศรีธรรมราช และสอดคล้องกับการศึกษาของ Keerativibool et al. [3] ที่พบว่า วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์เป็นวิธีที่ดีในการพยากรณ์อัตราเร็วลมราย 3 ชั่วโมง ที่ระดับความสูง 30 เมตร ตามแนวชายฝั่ง อำเภोजะนะ จังหวัดสงขลา แต่มีความขัดแย้งกับการศึกษาของวรางคณา กิริติวิบูลย์ และเจ๊ะอัฐพาน มาหิละ [1] ที่พบว่า วิธีการแยกส่วนประกอบของอนุกรมเวลาในรูปแบบบวกลให้ความแม่นยำในการพยากรณ์สูงกว่าวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ในการพยากรณ์อัตราเร็วลมราย 3 ชั่วโมง ที่ระดับความสูง 20 เมตร ตามแนวชายฝั่งของอำเภोजะนะ จังหวัดสงขลา อาจเนื่องมาจากความแตกต่างของช่วงเวลาในการเก็บรวบรวมข้อมูล ระดับความสูงที่วัดอัตราเร็วลม พื้นที่ที่ศึกษา และวิธีการสร้างตัวแบบพยากรณ์ที่นำมาศึกษาเปรียบเทียบ

ผลการศึกษาครั้งนี้พบว่า วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์มีความถูกต้องและเหมาะสมที่สุดกับอนุกรมเวลาอัตราเร็วลมที่ระดับความสูง 120 เมตร จังหวัดมุกดาหาร อาจเนื่องมาจากการสร้างตัวแบบพยากรณ์ของวิธีนี้จะพิจารณาลักษณะของอนุกรมเวลาว่ามีสหสัมพันธ์กันอย่างไร รวมถึงมีการพิจารณาข้อมูลและความคลาดเคลื่อนในอดีตเพื่อนำมาสร้างเป็นตัวแบบพยากรณ์ที่เหมาะสม โดยวิธีการพยากรณ์นี้สามารถใช้ได้กับอนุกรมเวลาที่มีลักษณะการเคลื่อนไหวทุกรูปแบบ อีกเหตุผลหนึ่งที่ผู้วิจัยคาดว่าวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์มีความเหมาะสมมากกว่าวิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบ

บวกล และวิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณ อาจเนื่องมาจากตัวแบบพยากรณ์ที่ได้จากวิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบบวกล และวิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณมีค่าความชัน (b_1) เป็นบวกล ซึ่งหมายถึงผลที่ได้จากการพยากรณ์อัตราเร็วลมจะเป็นไปในทิศทางเพิ่มขึ้นเท่านั้น ขณะที่อัตราเร็วลมชุดที่ 1 ที่นำมาศึกษามีแนวโน้มทั้งลดลงและเพิ่มขึ้น

การศึกษารังต่อไปควรประยุกต์ใช้วิธีการพยากรณ์วิธีอื่น ๆ เช่น วิธีโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural networks, ANN) รวมทั้งควรเพิ่มเติมข้อมูลอัตราเร็วลมให้เป็นปัจจุบัน เพื่อปรับปรุงตัวแบบพยากรณ์ที่ได้ให้มีความเหมาะสมและมีค่าพยากรณ์ที่มีความคลาดเคลื่อนน้อยที่สุด อีกทั้งเพื่อประโยชน์ในด้านการวางแผนและการพัฒนาเทคโนโลยีกักกันลมภายในประเทศ ควรสร้างตัวแบบพยากรณ์อัตราเร็วลมที่ระดับความสูงอื่น ๆ เช่น 50 และ 100 เมตร เป็นต้น

4. สรุปผลการทดลอง

การวิจัยครั้งนี้ได้นำเสนอวิธีการสร้างและคัดเลือกตัวแบบพยากรณ์ที่เหมาะสมกับอนุกรมเวลาอัตราเร็วลมรายชั่วโมงที่ระดับความสูง 120 เมตร จังหวัดมุกดาหาร โดยใช้ข้อมูลจากศูนย์วิจัยพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยทักษิณ ผลการศึกษพบว่า วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์เป็นวิธีที่มีความถูกต้องและเหมาะสมมากกว่าวิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบบวกล และวิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณ ซึ่งตัวแบบพยากรณ์ของวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ แสดงดังนี้

$$\begin{aligned}\hat{Y}_t = & 2.74021Y_{t-1} - 2.65077Y_{t-2} + 1.08091Y_{t-3} - 0.17035Y_{t-4} + 1.18694Y_{t-24} - 3.25246Y_{t-25} \\ & + 3.14630Y_{t-26} - 1.28298Y_{t-27} + 0.20220Y_{t-28} - 0.18694Y_{t-48} + 0.51225Y_{t-49} - 0.49553Y_{t-50} \\ & + 0.20207Y_{t-51} - 0.03185Y_{t-52} - 0.58499e_{t-1} - 0.41351e_{t-2} - 0.88541e_{t-24} + 0.51796e_{t-25} \\ & + 0.36613e_{t-26}\end{aligned}$$

เมื่อ $\hat{Y}_t$ แทนค่าพยากรณ์อัตราเร็วลม ณ เวลา t

Y_{t-j} แทนอนุกรมเวลาอัตราเร็วลม ณ เวลา $t - j$

e_{t-j} แทนความคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์อัตราเร็วลม ณ เวลา $t - j$

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยพลังงานและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยทักษิณ ที่เอื้อเฟื้อข้อมูลอัตราเร็วลม สำหรับการวิจัยครั้งนี้ และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยทักษิณที่ให้ทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561

6. อ้างอิง

- [1] วรางคณา กิรติวิบูลย์, เจ๊ะอัฐพาน มาหิเละ. ตัวแบบพยากรณ์ความเร็วลม ตามแนวชายฝั่ง จังหวัดสงขลา. ว.วิจัยพลังงาน. 2554; 8(1): 63-72.
- [2] วรางคณา กิรติวิบูลย์, เจ๊ะอัฐพาน มาหิเละ. ตัวแบบพยากรณ์ความเร็วลมตามแนวชายฝั่ง อำเภอท่าศาลา จังหวัดนครศรีธรรมราช. ว.วิจัย มช. 2556; 18(1): 32-50.
- [3] Keerativibool W, Waewsak J, Kanjnasamranwong P. Short-Term Forecast of Wind Speed at Chana District, Songkhla Province Thailand. Proceedings of the 2011 International Conference on Alternative Energy in Developing Countries and Emerging

Economies; 2011 May 25-28; Hat Yai, Thailand, pp. 343-350.

- [4] Bielecki MF, Kemper JJ, Acker TL. Statistical Characterization of Errors in Wind Power Forecasting, Northern Arizona University, U.S.A.; 2014.
- [5] สมเกียรติ เกตุเอี่ยม. เทคนิคการพยากรณ์. พิมพ์ครั้งที่ 2. สงขลา: มหาวิทยาลัยทักษิณ; 2548.
- [6] Box GEP, Jenkins GM, Reinsel GC. Time Series Analysis: Forecasting and Control. 3rd ed. New Jersey: Prentice Hall; 1994.
- [7] วรางคณา เรียนสุทธิ์. ตัวแบบพยากรณ์ราคา เมล็ดกาแฟ. วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ. 2562; 13(1): 141-155.
- [8] มุกดา มั่นมินทร์. อนุกรมเวลาและการพยากรณ์. กรุงเทพฯ: โพรพรินตัง; 2549.

การพยากรณ์ปริมาณการส่งออกปลาหมึกและผลิตภัณฑ์ Forecasting the export quantity of squid and products

วารางคณา เรียนสุทธิ์
Warangkhan Riansut

สาขาวิชาคณิตศาสตร์และสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง
Department of Mathematics and Statistics, Faculty of Science, Thaksin University, Phatthalung Campus
E-mail: warang27@gmail.com

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้คือ การสร้างและคัดเลือกตัวแบบพยากรณ์ที่เหมาะสมกับอนุกรมเวลา ปริมาณการส่งออกปลาหมึกและผลิตภัณฑ์ โดยใช้ข้อมูลจากเว็บไซต์ของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร ตั้งแต่ เดือนมกราคม 2554 ถึงเดือนพฤศจิกายน 2561 จำนวน 95 ค่า ข้อมูลถูกแบ่งออกเป็น 2 ชุด ชุดที่ 1 ตั้งแต่เดือน มกราคม 2554 ถึงเดือนกันยายน 2561 จำนวน 93 ค่า สำหรับการสร้างตัวแบบพยากรณ์ด้วยวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ วิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบบวก และวิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของ วินเทอร์แบบคูณ ชุดที่ 2 ตั้งแต่เดือนตุลาคมถึงเดือนพฤศจิกายน 2561 จำนวน 2 ค่า สำหรับการเปรียบเทียบ ความถูกต้องของค่าพยากรณ์ โดยใช้เกณฑ์เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAPE) และเกณฑ์รากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ที่ต่ำที่สุด ผลการศึกษพบว่า จากวิธีการพยากรณ์ทั้งหมดที่ ได้ศึกษา วิธีที่มีประสิทธิภาพสูงสุด คือ วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ (MAPE = 4.64, RMSE = 215,204)

คำสำคัญ: การพยากรณ์ ตัวแบบพยากรณ์ การส่งออก ปลาหมึกและผลิตภัณฑ์

ABSTRACT

The objective of this study was to construct and select the appropriate forecasting models for the export quantity of squid and products. The data gathered from the website of the Office of Agricultural Economics from January 2011 to November 2018 of 95 values were used and divided into 2 sets. The first set had 93 values from January 2011 to September 2018 for constructing the forecasting models by Box-Jenkins method, Winters' additive exponential smoothing method, and Winters' multiplicative exponential smoothing method. The second set had 2 values from October to November 2018 for comparing the accuracy of the forecasts via the criteria of the lowest mean absolute percentage error (MAPE) and root mean squared error (RMSE). Research findings indicated that for all forecasting methods that had been studied, the most accurate method was Box-Jenkins method (MAPE = 4.64, RMSE = 215,204).

Keywords: Forecast, Forecasting model, Export, Squid and products

Received 08-01-2019
Revised 28-02-2019
Accepted 28-02-2019

1. บทนำ

อาหารทะเลนับเป็นอาหารประเภทหนึ่งที่สำคัญของมนุษย์และกลายเป็นแหล่งสำคัญทางเศรษฐกิจมากยิ่งขึ้น โดย 10 ประเทศที่มีการส่งออกผลิตภัณฑ์อาหารทะเลจำนวนมาก รวมทั้งปลา กุ้ง เปลือกหอย และอื่น ๆ ได้แก่ ประเทศจีน นอร์เวย์ เวียดนาม สหรัฐอเมริกา อินเดีย แคนาดา ซิลิ สวีเดน เนเธอร์แลนด์ และอินโดนีเซีย ตามลำดับ [1] สำหรับประเทศไทยสามารถจับสัตว์น้ำทะเลได้เป็นจำนวนมากในแต่ละปีและมีการนำไปใช้เพื่อการบริโภคในรูปแบบต่าง ๆ กัน ทั้งการบริโภคสด และการนำเข้าสู่ภาคอุตสาหกรรมการผลิตประเภทต่าง ๆ เช่น อาหารทะเลแช่เย็นแช่แข็ง อาหารทะเลกระป๋อง ทำเค็มและตากแห้ง เป็นต้น [2] โดยปลาหมึกเป็นสัตว์น้ำประเภทหนึ่งที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทยรองลงมาจากกุ้ง ซึ่งกองควบคุมการค้าสัตว์น้ำและปัจจัยการผลิต กรมประมง ได้รายงานว่าการผลิตสัตว์น้ำจำพวกปลาหมึกในรูปแบบต่าง ๆ ที่บริโภคภายในประเทศและถูกส่งออกไปยังตลาดต่างประเทศมีปริมาณและมูลค่าเพิ่มขึ้นมาก สำหรับการส่งออกปลาหมึกผ่านทางด่านตรวจสัตว์น้ำท่าอากาศยานสุวรรณภูมิในปี 2560 ส่วนใหญ่เป็นปลาหมึกสดแช่เย็น โดยส่งออกไปยังประเทศเกาหลีใต้ คิดเป็นร้อยละ 97 ของปริมาณการส่งออกปลาหมึกทั้งปี [3] อย่างไรก็ตาม จากการศึกษาปริมาณการส่งออกปลาหมึกและผลิตภัณฑ์เฉลี่ยต่อเดือนจากเว็บไซต์ของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรย้อนหลังตั้งแต่ปี 2554 ถึงปัจจุบันกลับพบว่า ปริมาณการส่งออกปลาหมึกและผลิตภัณฑ์มีแนวโน้มลดลงและมีความผันผวนสูง โดยเฉพาะตั้งแต่ปี 2558 ถึงปี 2561 ปริมาณการส่งออกลดลงเมื่อเทียบกับปีก่อนคิดเป็นร้อยละ 11.97, 13.33, 12.57 และ 6.61

ตามลำดับ [4] อุตสาหกรรมการส่งออกปลาหมึกและผลิตภัณฑ์จะยังคงมีปริมาณการส่งออกลดลงและมีความผันผวนสูงเช่นนี้ตลอดไปหรือไม่ การพยากรณ์ทางสถิตินับเป็นเครื่องมือหนึ่งที่ช่วยตอบคำถามนี้ได้ ด้วยเหตุผลดังกล่าว ผู้วิจัยจึงเริ่มสืบค้นงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพยากรณ์ปริมาณการส่งออกปลาหมึกและผลิตภัณฑ์ พบว่า สุภาภรณ์ กอสูงเนิน [2] ได้ศึกษาการส่งออกปลาหมึกแห้งไปยังสาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว โดยการศึกษาครั้งนี้ไม่ได้ใช้วิธีการพยากรณ์ทางสถิติในการสร้างตัวแบบพยากรณ์ แต่เป็นเพียงการเก็บรวบรวมข้อมูลเชิงคุณภาพเท่านั้น ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะศึกษาการสร้างตัวแบบพยากรณ์ปริมาณการส่งออกปลาหมึกและผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีการทางสถิติ ได้แก่ วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ (Box-Jenkins method) วิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบบวก (Winters' additive exponential smoothing method) และวิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณ (Winters' multiplicative exponential smoothing method) เนื่องจากได้พิจารณาจากลักษณะการเคลื่อนไหวของข้อมูลชุดที่ 1 แล้วพบว่า วิธีการเหล่านี้เป็นวิธีที่มีความเหมาะสมกับอนุกรมเวลาชุดนี้มากกว่าวิธีการพยากรณ์อื่น ๆ เช่น วิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของโฮลต์ (Holt's exponential smoothing method) วิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของบราวน์ (Brown's exponential smoothing method) วิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบแดม (Damped trend exponential smoothing method) วิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังที่มีฤดูกาลอย่างง่าย (Simple seasonal exponential smoothing method) และวิธีการ

พยากรณ์รวม (Combined forecasting method) เป็นต้น หลังจากที่ได้ตัวแบบพยากรณ์แล้ว ผู้วิจัยจะคัดเลือกตัวแบบพยากรณ์ที่มีประสิทธิภาพสูงสุด 1 ตัวแบบ ด้วยเกณฑ์เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean absolute percentage error, MAPE) และเกณฑ์รากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean squared error, RMSE) ที่ต่ำที่สุด

ด้วยเหตุผลของความผันผวนในปริมาณการส่งออกปลาหมึกและผลิตภัณฑ์ดังกล่าว จึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจที่ควรมีการศึกษาถึงปริมาณการส่งออกปลาหมึกและผลิตภัณฑ์ในอนาคต เพื่อที่จะหาแนวทางในการเพิ่มศักยภาพและขีดความสามารถของผู้ประกอบการการส่งออกปลาหมึกและผลิตภัณฑ์ของประเทศไทยให้สามารถแข่งขันกับประเทศอื่น ๆ ได้มากยิ่งขึ้น รวมถึงเป็นแนวทางให้รัฐบาลสามารถออกนโยบายในการสนับสนุนการส่งออกปลาหมึกและผลิตภัณฑ์ได้อย่างเหมาะสม ซึ่งจะนำรายได้มาสู่ประเทศไทยมากยิ่งขึ้น และทำให้เกิดการเจริญเติบโตทางเศรษฐกิจของประเทศต่อไป

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

การวิจัยครั้งนี้ดำเนินการสร้างตัวแบบพยากรณ์ด้วยโปรแกรม SPSS โดยใช้ข้อมูลปริมาณการส่งออกปลาหมึกและผลิตภัณฑ์ (กิโลกรัม) จากเว็บไซต์ของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร [4] ตั้งแต่เดือนมกราคม 2554 ถึงเดือนพฤศจิกายน 2561 จำนวน 95 ค่า ผู้วิจัยได้แบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ชุด ชุดที่ 1 คือ ข้อมูลตั้งแต่เดือนมกราคม 2554 ถึงเดือนกันยายน 2561 จำนวน 93 ค่า สำหรับการสร้างตัวแบบพยากรณ์ด้วยวิธีการทางสถิติ 3 วิธี ได้แก่ วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ วิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลข

ชี้กำลังของวินเทอร์แบบบวก และวิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณ ข้อมูลชุดที่ 2 คือ ข้อมูลตั้งแต่เดือนตุลาคมถึงเดือนพฤศจิกายน 2561 จำนวน 2 ค่า สำหรับการเปรียบเทียบความถูกต้องของค่าพยากรณ์ โดยใช้เกณฑ์ MAPE และ RMSE ที่ต่ำที่สุด โดยสาเหตุที่ผู้วิจัยแบ่งข้อมูลชุดที่ 2 ไว้เพียง 2 ค่า เนื่องจากในการทดลองวิเคราะห์ข้อมูลครั้งแรกได้เก็บข้อมูลชุดที่ 2 ไว้จำนวน 11 ค่า ตั้งแต่เดือนมกราคมถึงเดือนพฤศจิกายน 2561 พบว่า ตัวแบบพยากรณ์ที่ได้จากข้อมูลชุดที่ 1 จำนวน 84 ค่า ตั้งแต่เดือนมกราคม 2554 ถึงเดือนธันวาคม 2560 มีประสิทธิภาพในการพยากรณ์ข้อมูลชุดที่ 2 ไม่ดีเท่าที่ควร โดยมีค่า MAPE ของข้อมูลชุดที่ 2 สูงถึง ร้อยละ 32.61 และมีค่า RMSE ของข้อมูลชุดที่ 2 สูงถึง 1,301,629 กิโลกรัม

การตรวจสอบว่าอนุกรมเวลาปริมาณการส่งออกปลาหมึกและผลิตภัณฑ์มีส่วนประกอบของแนวโน้มหรือไม่ ดำเนินการดังนี้

1. ตรวจสอบข้อสมมุติ (Assumption) คือ อนุกรมเวลาในแต่ละปีมีการแจกแจงปกติโดยใช้การทดสอบคอลโมโกรอฟ-สมิรโนฟ (Kolmogorov-Smirnov test)

2. ตรวจสอบความเท่ากันของความแปรปรวนโดยใช้การทดสอบของเลวินภายใต้การใช้มัธยฐาน (Levene's test based on median)

3. เลือกใช้สถิติสำหรับการทดสอบค่าเฉลี่ยของอนุกรมเวลาในแต่ละปี โดยถ้าอนุกรมเวลาในแต่ละปีมีการแจกแจงปกติและมีความแปรปรวนเท่ากัน จะใช้สถิติอิงพารามิเตอร์ (Parametric statistics) ซึ่งคือการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) แต่ถ้าอนุกรมเวลาในแต่ละปีไม่มีการแจกแจงปกติหรือมีความแปรปรวนไม่เท่ากัน

จะใช้สถิติไม่อิงพารามิเตอร์ (Nonparametric statistics) ซึ่งก็คือ การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียวโดยลำดับที่ของครัสคาล-วอลลิส (Kruskal-Wallis's one-way analysis of variance by rank) ถ้าผลการทดสอบค่าเฉลี่ยของอนุกรมเวลาในแต่ละปีมีนัยสำคัญ หมายความว่า ในแต่ละปีอนุกรมเวลามีค่าเฉลี่ยแตกต่างกัน นั่นคือ อนุกรมเวลามีส่วนประกอบของแนวโน้ม

การตรวจสอบว่าอนุกรมเวลาปริมาณการส่งออกปลาหมึกและผลิตภัณฑ์มีความผันแปรตามฤดูกาลหรือไม่ ดำเนินการดังนี้

1. พิจารณาว่าอนุกรมเวลามีส่วนประกอบของแนวโน้มหรือไม่ ถ้ามีต้องกำจัดแนวโน้มออกก่อนที่จะทดสอบค่าเฉลี่ยของอนุกรมเวลาในแต่ละเดือน ซึ่งวิธีการกำจัดแนวโน้มมี 2 วิธี คือ ถ้าพิจารณาที่กราฟของอนุกรมเวลาเทียบกับเวลาแล้วพบว่าอนุกรมเวลามีการเคลื่อนไหวหรือมีการแกว่งตัวที่ค่อนข้างคงที่เมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไป กล่าวได้ว่าอนุกรมเวลามีความเหมาะสมกับตัวแบบบวก ควรกำจัดแนวโน้มออกด้วยการลบ แต่ถ้าอนุกรมเวลา มีการเคลื่อนไหวหรือมีการแกว่งตัวที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงเมื่อเวลาเปลี่ยนแปลงไป กล่าวได้ว่า อนุกรมเวลา มีความเหมาะสมกับตัวแบบคูณ ควรกำจัดแนวโน้มออกด้วยการหาร

2. ตรวจสอบข้อสมมุติ คือ อนุกรมเวลาในแต่ละเดือนหลังจากกำจัดแนวโน้มออกแล้วมีการแจกแจงปกติและมีความแปรปรวนเท่ากันหรือไม่ เช่นเดียวกับข้อ 1 และ 2 ของการตรวจสอบแนวโน้ม

3. เลือกใช้สถิติทดสอบเช่นเดียวกับข้อ 3 ของการตรวจสอบแนวโน้ม โดยถ้าผลการทดสอบค่าเฉลี่ยของอนุกรมเวลาในแต่ละเดือนหลังจากกำจัดแนวโน้ม

ออกแล้วมีนัยสำคัญ หมายความว่า ในแต่ละเดือนอนุกรมเวลาที่ไม่มีแนวโน้มมีค่าเฉลี่ยแตกต่างกัน นั่นคือ อนุกรมเวลามีส่วนประกอบของความผันแปรตามฤดูกาล

สัญลักษณ์ที่ใช้สำหรับวิธีการสร้างตัวแบบพยากรณ์ในหัวข้อที่ 2.1 – 2.3 แสดงดังนี้

Y_t แทนอนุกรมเวลา ณ เวลา t

ε_t แทนอนุกรมเวลาของความคลาดเคลื่อนที่มีการแจกแจงปกติและเป็นอิสระกันด้วยค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ และความแปรปรวนเท่ากันทุกช่วงเวลา

$\hat{Y}_{t+m}$ แทนค่าพยากรณ์ ณ เวลา $t + m$ โดยที่ m แทนจำนวนช่วงเวลาที่ต้องการพยากรณ์ไปข้างหน้า

a_t , b_t และ $\hat{S}_t$ แทนค่าประมาณ ณ เวลา t แสดงระยะตัดแกน Y , ความชันของแนวโน้ม และความผันแปรตามฤดูกาล ตามลำดับ

α , γ และ δ แทนค่าคงตัวการปรับเรียบ โดยที่ $0 < \alpha < 1$, $0 < \gamma < 1$ และ $0 < \delta < 1$

t แทนช่วงเวลา ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 1 ถึง n_1 เมื่อ n_1 แทนจำนวนข้อมูลในอนุกรมเวลาชุดที่ 1

s แทนจำนวนคาบของฤดูกาล

2.1 การพยากรณ์โดยวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์

การพยากรณ์โดยวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์มีความเหมาะสมกับอนุกรมเวลาที่มีทั้งส่วนประกอบของแนวโน้มและความผันแปรตามฤดูกาล มีตัวแบบในรูปทั่วไป (General model) คือ SARIMA(p, d, q)(P, D, Q)_s แสดงดังนี้ [5]

$$\phi_p(B)\Phi_p(B^s)(1-B)^d(1-B^s)^D Y_t = \delta + \theta_q(B)\Theta_Q(B^s)\varepsilon_t \quad (1)$$

เมื่อ $\delta = \mu\phi_p(B)\Phi_p(B^s)$ แทนค่าคงตัว (Constant) โดยที่ μ แทนค่าเฉลี่ยของอนุกรมเวลาที่คงที่ (Stationary)

$\phi_p(B) = 1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p$ แทนตัวดำเนินการสหสัมพันธ์ในตัวอันดับที่ p กรณีไม่มีฤดูกาล (Non-seasonal autoregressive operator of order p , AR(p))

$\Phi_p(B^s) = 1 - \Phi_1 B^s - \Phi_2 B^{2s} - \dots - \Phi_p B^{ps}$ แทนตัวดำเนินการสหสัมพันธ์ในตัวอันดับที่ P กรณีมีฤดูกาล (Seasonal autoregressive operator of order P , SAR(P))

$\theta_q(B) = 1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_q B^q$ แทนตัวดำเนินการเฉลี่ยเคลื่อนที่ในตัวอันดับที่ q กรณีไม่มีฤดูกาล (Non-seasonal moving average operator of order q , MA(q))

$\Theta_Q(B^s) = 1 - \Theta_1 B^s - \Theta_2 B^{2s} - \dots - \Theta_Q B^{Qs}$ แทนตัวดำเนินการเฉลี่ยเคลื่อนที่ในตัวอันดับที่ Q กรณีมีฤดูกาล (Seasonal moving average operator of order Q , SMA(Q))

d และ D แทนลำดับที่ของการหาผลต่างและผลต่างฤดูกาล ตามลำดับ

B แทนตัวดำเนินการถอยหลัง (Backward operator) โดยที่ $B^s Y_t = Y_{t-s}$

2.2 การพยากรณ์โดยวิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบบวก

การปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบบวกมีความเหมาะสมกับอนุกรมเวลาที่มีส่วนประกอบของแนวโน้มที่เป็นเส้นตรงและมีความผันแปรตามฤดูกาล โดยที่อัตราส่วนของ

ความผันแปรตามฤดูกาลต่อค่าแนวโน้มมีค่าคงที่ กล่าวคือ อัตราส่วนของความผันแปรตามฤดูกาลต่อค่าแนวโน้มมีค่าไม่เพิ่มขึ้นและไม่ลดลงตามเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป ตัวแบบพยากรณ์แสดงดังนี้ [6]

$$\hat{Y}_{t+m} = (a_t + b_t m) + \hat{S}_t \quad (2)$$

เมื่อ $a_t = \alpha(Y_t - \hat{S}_{t-s}) + (1-\alpha)(a_{t-1} + b_{t-1})$,

$$b_t = \gamma(a_t - a_{t-1}) + (1-\gamma)b_{t-1},$$

$$\hat{S}_t = \delta(Y_t - a_t) + (1-\delta)\hat{S}_{t-s}$$

2.3 การพยากรณ์โดยวิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณ

การปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณมีความเหมาะสมกับอนุกรมเวลาที่มีส่วนประกอบของแนวโน้มที่เป็นเส้นตรงและมีความผันแปรตามฤดูกาล โดยที่อัตราส่วนของความผันแปรตามฤดูกาลต่อค่าแนวโน้มมีค่าเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป ตัวแบบพยากรณ์แสดงดังนี้ [6]

$$\hat{Y}_{t+m} = (a_t + b_t m)\hat{S}_t \quad (3)$$

เมื่อ $a_t = \alpha \frac{Y_t}{\hat{S}_{t-s}} + (1-\alpha)(a_{t-1} + b_{t-1})$,

$$b_t = \gamma(a_t - a_{t-1}) + (1-\gamma)b_{t-1},$$

$$\hat{S}_t = \delta \frac{Y_t}{a_t} + (1-\delta)\hat{S}_{t-s}$$

2.4 การเปรียบเทียบความถูกต้องของค่าพยากรณ์

การวิจัยครั้งนี้ได้คัดเลือกตัวแบบพยากรณ์ที่เหมาะสมกับอนุกรมเวลาปริมาณการส่งออกปลาหมึกและผลิตภัณฑ์ โดยการเปรียบเทียบค่าจริงของข้อมูลชุดที่ 2 ตั้งแต่เดือน

ตุลาคมถึงเดือนพฤศจิกายน 2561 กับค่าพยากรณ์ จากวิธีการพยากรณ์ 3 วิธี ได้แก่ วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ วิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์ แบบบวก และวิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณ จากนั้นนำค่าความแตกต่างระหว่างค่าจริงและค่าพยากรณ์มาคำนวณค่า MAPE และ RMSE ซึ่งวิธีการพยากรณ์ที่มีค่า MAPE และ RMSE ต่ำที่สุด จัดเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงสุด จึงมีความเหมาะสมกับอนุกรมเวลาชุดนี้มากที่สุด เกณฑ์ MAPE และ RMSE แสดงดังนี้ [6]

$$MAPE = \frac{100}{n_2} \sum_{t=1}^{n_2} \left| \frac{e_t}{Y_t} \right| \quad \text{และ} \quad RMSE = \sqrt{\frac{1}{n_2} \sum_{t=1}^{n_2} e_t^2} \quad (4)$$

เมื่อ $e_t = Y_t - \hat{Y}_t$ แทนความคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์ ณ เวลา t

Y_t แทนอนุกรมเวลา ณ เวลา t

$\hat{Y}_t$ แทนค่าพยากรณ์ ณ เวลา t

t แทนช่วงเวลา ซึ่งมีค่าตั้งแต่ 1 ถึง n_2 โดยที่ n_2 แทนจำนวนข้อมูลในอนุกรมเวลาชุดที่ 2

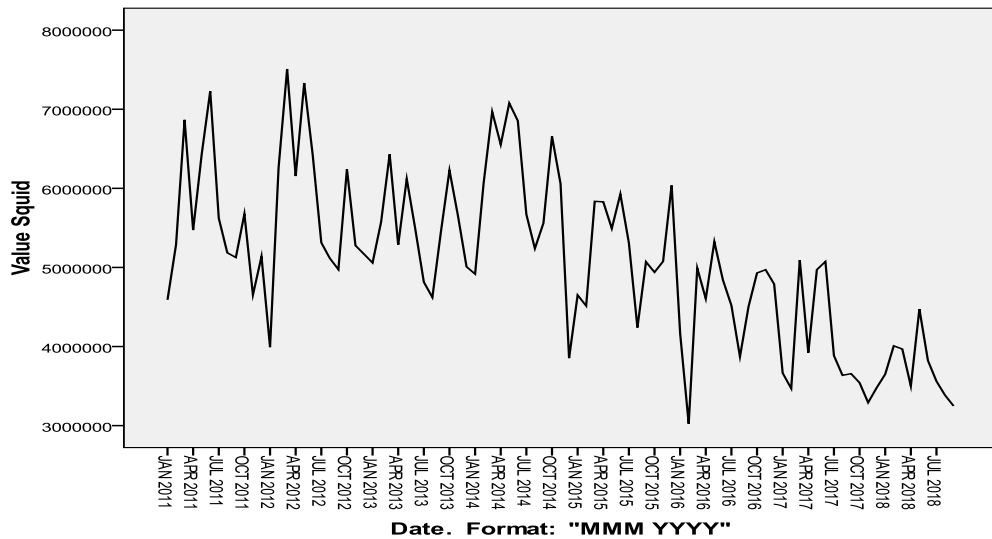
3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

จากการพิจารณาลักษณะการเคลื่อนไหวของอนุกรมเวลาชุดที่ 1 ซึ่งคือ ปริมาณการส่งออกปลาหมึกและผลิตภัณฑ์ ตั้งแต่เดือนมกราคม 2554 ถึงเดือนกันยายน 2561 จำนวน 93 ค่า ดังภาพที่ 1

พบว่า อนุกรมเวลาชุดนี้มีส่วนประกอบของแนวโน้มเพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงเดือนมกราคม 2554 ถึงเดือนธันวาคม 2557 หลังจากนั้นพบว่า อนุกรมเวลามีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจน อีกทั้งอนุกรมเวลาชุดนี้ยังมีความผันแปรตามฤดูกาลรวมอยู่ด้วย นอกเหนือจากการพิจารณากราฟของอนุกรมเวลาเทียบกับเวลาแล้ว ผู้วิจัยยังได้ตรวจสอบว่าอนุกรมเวลาชุดนี้มีส่วนประกอบของแนวโน้มและความผันแปรตามฤดูกาลจริงหรือไม่ ดังนี้

ปริมาณการส่งออกปลาหมึกและผลิตภัณฑ์ในแต่ละปีไม่มีการแจกแจงปกติ แต่มีความแปรปรวนเท่ากัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 จึงตรวจสอบค่าเฉลี่ยในแต่ละปี โดยใช้สถิติไม่อิงพารามิเตอร์ พบว่า ปริมาณการส่งออกในแต่ละปีมีค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.01 (Kruskal-Wallis: $\chi^2 = 51.636$, $p\text{-value} < 0.0001$) หมายความว่า อนุกรมเวลาชุดนี้มีส่วนประกอบของแนวโน้ม

ปริมาณการส่งออกปลาหมึกและผลิตภัณฑ์ในแต่ละเดือนเมื่อปรับแนวโน้มออกด้วยการหารมี การแจกแจงปกติและมีความแปรปรวนเท่ากัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 จึงตรวจสอบค่าเฉลี่ยในแต่ละเดือน โดยใช้สถิติอิงพารามิเตอร์ พบว่า ปริมาณการส่งออกในแต่ละเดือนเมื่อปรับแนวโน้มออกด้วยการหารมีค่าเฉลี่ยแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.01 (ANOVA: $F = 5.813$, $p\text{-value} < 0.0001$) หมายความว่า อนุกรมเวลาชุดนี้มีส่วนประกอบของความผันแปรตามฤดูกาล



ภาพที่ 1 ลักษณะการเคลื่อนไหวของอนุกรมเวลาปริมาณการส่งออกปลาหมึกและผลิตภัณฑ์ ตั้งแต่เดือนมกราคม 2554 ถึงเดือนกันยายน 2561

3.1 ผลการพยากรณ์โดยวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์

เนื่องจากอนุกรมเวลาชุดนี้มีส่วนประกอบของแนวโน้มและความผันแปรตามฤดูกาล ผู้วิจัยจึงกำจัดแนวโน้มออกโดยการหาผลต่างลำดับที่ 1 ($d = 1$) และกำจัดความผันแปรตามฤดูกาลออกโดยการหาผลต่างฤดูกาลลำดับที่ 1 ($D = 1$) ได้กราฟ Autocorrelation function (ACF) และ Partial autocorrelation function (PACF) หลังจากการแปลงข้อมูลแสดงดังภาพที่ 2 ซึ่งพบว่า อนุกรมเวลามีลักษณะคงที่ จึงกำหนดตัวแบบพยากรณ์ที่เป็นไปได้เริ่มต้น คือ ตัวแบบ SARIMA (3, 1, 2) (1, 1, 1)₁₂ พร้อมกับประมาณค่าพารามิเตอร์โดยตัวแบบพยากรณ์ที่มีพารามิเตอร์ทุกตัวมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.01 มีค่า BIC ต่ำที่สุด (BIC = 27.184) และมีค่าสถิติ Ljung-Box Q ไม่มีนัยสำคัญที่ระดับ 0.01 (Ljung-Box Q ณ lag 18 = 16.718, p-value = 0.272) คือ ตัวแบบ SARIMA(2, 1, 1)(1, 1, 0)₁₂ ไม่มีพจน์ค่าคงตัว เมื่อตรวจสอบคุณลักษณะของ

ความคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 พบว่า ความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงปกติ (Kolmogorov-Smirnov Z = 0.984, p-value = 0.287) มีการเคลื่อนไหวเป็นอิสระกัน (Runs test: Z = 0.225, p-value = 0.822) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ ($t = 0.007$, p-value = 0.994) และมีความแปรปรวนเท่ากันทุกช่วงเวลา (Levene statistic = 2.145, p-value = 0.028) ดังนั้นตัวแบบ SARIMA(2, 1, 1)(1, 1, 0)₁₂ ไม่มีพจน์ค่าคงตัว มีความเหมาะสม ซึ่งจากสมการที่ (1) สามารถเขียนเป็นตัวแบบได้ดังนี้

$$\begin{aligned} & (1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2)(1 - \Phi_1 B^{12})(1 - B)(1 - B^{12})Y_t \\ & = (1 - \theta_1 B)\varepsilon_t \\ & (1 - \Phi_1 B^{12} - \phi_1 B + \phi_1 \Phi_1 B^{13} - \phi_2 B^2 + \phi_2 \Phi_1 B^{14}) \\ & \times (1 - B^{12} - B + B^{13})Y_t \\ & = \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & (1 - B^{12} - B + B^{13} - \Phi_1 B^{12} + \Phi_1 B^{24} + \Phi_1 B^{13} - \Phi_1 B^{25} \\
 & - \Phi_1 B + \Phi_1 B^{13} + \Phi_1 B^2 - \Phi_1 B^{14} \\
 & + \Phi_1 \Phi_1 B^{13} - \Phi_1 \Phi_1 B^{25} - \Phi_1 \Phi_1 B^{14} + \Phi_1 \Phi_1 B^{26} \\
 & - \Phi_2 B^2 + \Phi_2 B^{14} + \Phi_2 B^3 - \Phi_2 B^{15} \\
 & + \Phi_2 \Phi_1 B^{14} - \Phi_2 \Phi_1 B^{26} - \Phi_2 \Phi_1 B^{15} + \Phi_2 \Phi_1 B^{27}) Y_t \\
 & = \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1} \\
 Y_t & = (1 + \Phi_1) Y_{t-1} - (\Phi_1 - \Phi_2) Y_{t-2} - \Phi_2 Y_{t-3} \\
 & + (1 + \Phi_1) Y_{t-12} - (1 + \Phi_1)(1 + \Phi_1) Y_{t-13} \\
 & + (\Phi_1 - \Phi_2)(1 + \Phi_1) Y_{t-14} + \Phi_2 (1 + \Phi_1) Y_{t-15} \\
 & - \Phi_1 Y_{t-24} + (1 + \Phi_1) \Phi_1 Y_{t-25} \\
 & - (\Phi_1 - \Phi_2) \Phi_1 Y_{t-26} - \Phi_2 \Phi_1 Y_{t-27} + \varepsilon_t - \theta_1 \varepsilon_{t-1}
 \end{aligned}$$

จากการแทนค่าประมาณพารามิเตอร์ จะได้ตัวแบบพยากรณ์แสดงดังนี้

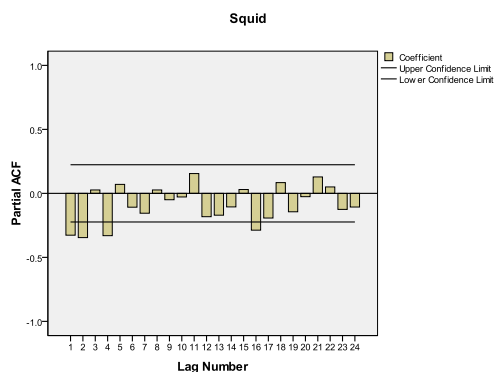
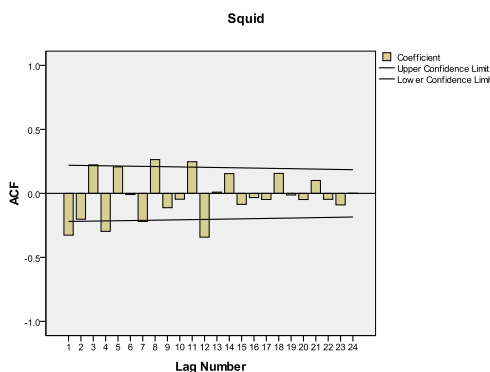
$$\begin{aligned}
 \hat{Y}_t & = 0.06654 Y_{t-1} + 0.45543 Y_{t-2} + 0.47803 Y_{t-3} \\
 & + 0.647 Y_{t-12} - 0.04305 Y_{t-13} \\
 & - 0.29466 Y_{t-14} - 0.30929 Y_{t-15} \\
 & + 0.353 Y_{t-24} - 0.02349 Y_{t-25} \\
 & - 0.16077 Y_{t-26} - 0.16874 Y_{t-27} \\
 & + 0.58932 e_{t-1}
 \end{aligned} \quad (5)$$

เมื่อ $\hat{Y}_t$ แทนค่าพยากรณ์ ณ เวลา t

Y_{t-j} แทนอนุกรมเวลา ณ เวลา $t-j$

e_{t-j} แทนความคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์

ณ เวลา $t-j$



ภาพที่ 2 กราฟ ACF และ PACF ของอนุกรมเวลาปริมาณการส่งออกปลาหมึกและผลิตภัณฑ์ เมื่อแปลงข้อมูลด้วยการหาผลต่างและผลต่างฤดูกาลลำดับที่ 1

3.2 ผลการพยากรณ์โดยวิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบบวก

จากการสร้างตัวแบบพยากรณ์โดยวิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบบวก พบว่า BIC มีค่าเท่ากับ 26.568 และมีค่าสถิติ Ljung-Box Q ไม่มีนัยสำคัญที่ระดับ 0.01 (Ljung-Box Q ณ lag 18 = 20.280, p-value = 0.161) เมื่อตรวจสอบคุณลักษณะของความคลาดเคลื่อนจาก

การพยากรณ์ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 พบว่าความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงปกติ (Kolmogorov-Smirnov Z = 0.690, p-value = 0.727) มีการเคลื่อนไหวเป็นอิสระกัน (Runs test: Z = -0.937, p-value = 0.349) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ (t = 0.135, p-value = 0.893) และมีความแปรปรวนเท่ากันทุกช่วงเวลา (Levene statistic = 1.784,

p-value = 0.074) ดังนั้นตัวแบบพยากรณ์ที่ได้มีความเหมาะสม ตัวแบบพยากรณ์แสดงดังนี้

$$\hat{Y}_{t+m} = (3,601,684.78404 - 25,382.07623m) + \hat{S}_t \quad (6)$$

เมื่อ $\hat{Y}_{t+m}$ แทนค่าพยากรณ์ ณ เวลา $t + m$ โดยที่ $m = 1$ แทนเดือนตุลาคม 2561

$\hat{S}_t$ แทนค่าดัชนีฤดูกาล รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 1 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ปริมาณการส่งออกปลาหมึกและผลิตภัณฑ์ของเดือนมีนาคมถึงเดือนมิถุนายน และเดือนตุลาคมของทุกปี มีค่ามากกว่าเดือนอื่น ๆ เนื่องจากมีค่าดัชนีฤดูกาลมากกว่า 0

ตารางที่ 1 ดัชนีฤดูกาลของอนุกรมเวลาปริมาณการส่งออกปลาหมึกและผลิตภัณฑ์ จากวิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบบวก

เดือน	ดัชนี ฤดูกาล	เดือน	ดัชนี ฤดูกาล
ม.ค.	-851,223	ก.ค.	-198,123
ก.พ.	-386,391	ส.ค.	-598,025
มี.ค.	821,344	ก.ย.	-285,239
เม.ย.	54,215	ต.ค.	348,383
พ.ค.	816,657	พ.ย.	-89,044
มิ.ย.	645,889	ธ.ค.	-278,411

3.3 ผลการพยากรณ์โดยวิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณ

จากการสร้างตัวแบบพยากรณ์โดยวิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณพบว่า BIC มีค่าเท่ากับ 26.580 และมีค่าสถิติ Ljung-Box Q ไม่มีนัยสำคัญที่ระดับ 0.01 (Ljung-Box Q ณ lag 18 = 20.625, p-value = 0.149) เมื่อตรวจสอบ

คุณลักษณะของความคลาดเคลื่อนจากการพยากรณ์ที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 พบว่า ความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงปกติ (Kolmogorov-Smirnov Z = 0.593, p-value = 0.873) มีการเคลื่อนไหวเป็นอิสระกัน (Runs test: Z = -0.520, p-value = 0.603) มีค่าเฉลี่ยเท่ากับศูนย์ ($t = -0.067$, p-value = 0.946) และมีความแปรปรวนเท่ากันทุกช่วงเวลา (Levene statistic = 1.984, p-value = 0.044) ดังนั้นตัวแบบพยากรณ์ที่ได้มีความเหมาะสม ตัวแบบพยากรณ์แสดงดังนี้

$$\hat{Y}_{t+m} = (3,573,819.15467 - 24,886.28799m)\hat{S}_t \quad (7)$$

เมื่อ $\hat{Y}_{t+m}$ แทนค่าพยากรณ์ ณ เวลา $t + m$ โดยที่ $m = 1$ แทนเดือนตุลาคม 2561

$\hat{S}_t$ แทนค่าดัชนีฤดูกาล รายละเอียดแสดงดังตารางที่ 2 ซึ่งสามารถอธิบายได้ว่า ปริมาณการส่งออกปลาหมึกและผลิตภัณฑ์ของเดือนมีนาคมถึงเดือนมิถุนายน และเดือนตุลาคมของทุกปี มีค่ามากกว่าเดือนอื่น ๆ เนื่องจากมีค่าดัชนีฤดูกาลมากกว่า 1

ตารางที่ 2 ดัชนีฤดูกาลของอนุกรมเวลาปริมาณการส่งออกปลาหมึกและผลิตภัณฑ์ จากวิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณ

เดือน	ดัชนี ฤดูกาล	เดือน	ดัชนี ฤดูกาล
ม.ค.	0.82067	ก.ค.	0.96400
ก.พ.	0.92776	ส.ค.	0.88691
มี.ค.	1.16841	ก.ย.	0.94229
เม.ย.	1.01273	ต.ค.	1.06003
พ.ค.	1.16783	พ.ย.	0.95155
มิ.ย.	1.13810	ธ.ค.	0.91386

3.4 ผลการเปรียบเทียบความถูกต้องของค่าพยากรณ์

จากการใช้ตัวแบบพยากรณ์ของวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ ในสมการที่ (5) วิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบบวก ในสมการที่ (6) และวิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณ ในสมการที่ (7) ได้ค่าพยากรณ์สำหรับอนุกรมเวลาชุดที่ 2 ซึ่งคือ ปริมาณการส่งออกปลาหมึกและผลิตภัณฑ์ ตั้งแต่เดือนตุลาคมถึงเดือนพฤศจิกายน 2561 แสดงดังตารางที่ 3 ผลการเปรียบเทียบความถูกต้องระหว่างค่าจริงและค่าพยากรณ์ พบว่า วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงสุด เนื่องจากมีค่า MAPE และ RMSE ต่ำที่สุด หรือให้ค่าพยากรณ์ที่มีความแตกต่างกับข้อมูลจริงน้อยที่สุด โดยวิธีการพยากรณ์นี้มีความผิดพลาดจากการพยากรณ์เพียงร้อยละ 4.64 (MAPE = 4.64) หรือมีความผิดพลาดจากการพยากรณ์ 215,204 กิโลกรัม (RMSE = 215,204) ซึ่งทั้ง 2 เกณฑ์ที่ใช้ในการเปรียบเทียบความถูกต้องของค่าพยากรณ์ให้ผลเป็นไปในทิศทางเดียวกัน จึงทำให้หน้าเชื่อถือได้มากยิ่งขึ้นว่าวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์เป็นวิธีที่มีความเหมาะสมกับอนุกรมเวลาชุดนี้มากที่สุด สำหรับผลการศึกษารั้งนี้ที่พบว่า วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงสุด อาจเนื่องมาจาก

วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์เป็นวิธีที่มีความแม่นยำในการพยากรณ์สูง เพราะมีการสร้างตัวแบบพยากรณ์โดยใช้ทั้งข้อมูลและค่าคลาดเคลื่อนในอดีต ซึ่งมีหลายงานวิจัยที่ยืนยันผลว่าวิธีการนี้เป็นวิธีที่มีความเหมาะสม เช่น การศึกษาของวรารังคนากิริติวิบูลย์ [7] ได้ศึกษาการพยากรณ์ปริมาณการส่งออกยางคอมปาวด์ โดยวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ วิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของโฮลต์ และวิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังที่มีแนวโน้มแบบแฉก ผลการศึกษาพบว่า วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ มีความถูกต้องในการพยากรณ์มากที่สุด การศึกษาของตุนสุรณ ณะปะละ, ธันวาท เจริญศิริ และชนาธิป โสภณพิมล [8] ได้ศึกษาการพยากรณ์ราคาสับปะรดที่ส่งเข้าโรงงานด้วยวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ ผลการศึกษาพบว่าตัวแบบพยากรณ์ที่มีความถูกต้องในการพยากรณ์มากที่สุด คือ ตัวแบบ SARIMA (0, 1, 1) (0, 1, 1)₁₂ และการศึกษาของวรารังคนา เรียนสุทธิ์ และน้ำอ้อย นิสัน [9] ได้ศึกษาการพยากรณ์ปริมาณการส่งออกไก่แปรรูป โดยวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ วิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบบวก วิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณ และวิธีการพยากรณ์รวม ผลการศึกษาพบว่า วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์มีความถูกต้องในการพยากรณ์มากที่สุด

ตารางที่ 3 ค่าจริงและค่าพยากรณ์ของปริมาณการส่งออกปลาหมึกและผลิตภัณฑ์ (กิโลกรัม) ตั้งแต่เดือนตุลาคมถึงเดือนพฤศจิกายน 2561 ค่า MAPE และ RMSE ของวิธีการพยากรณ์ที่ศึกษา

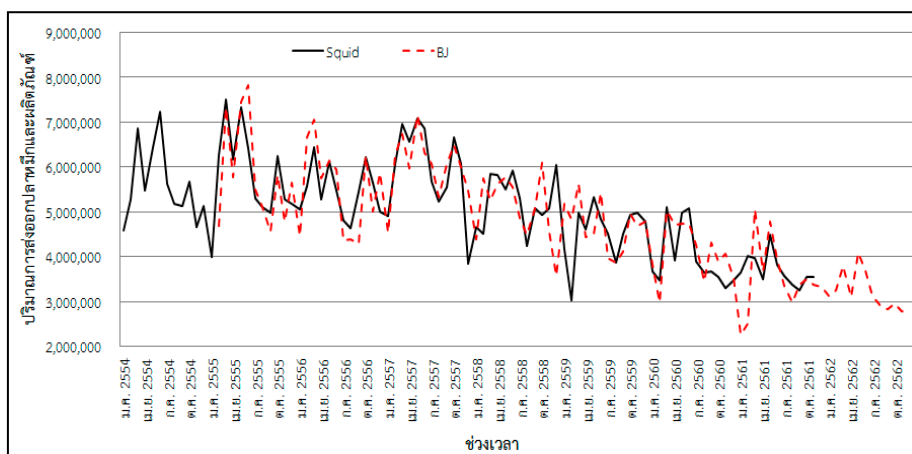
ช่วงเวลา	ปริมาณการส่งออก	ปริมาณการส่งออก จากการพยากรณ์โดยวิธี		
		บ็อกซ์-เจนกินส์	วินเทอร์แบบบวก	วินเทอร์แบบคูณ
ต.ค. 2561	3,537,156	3,500,058	3,924,686	3,761,979
พ.ย. 2561	3,668,723	3,366,648	3,461,876	3,353,308
MAPE		4.64	8.30	7.48
RMSE		215,204	310,616	273,890

เมื่อใช้วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ในการพยากรณ์ ปริมาณการส่งออกปลาหมึกและผลิตภัณฑ์ ตั้งแต่ เดือนธันวาคม 2561 ถึงเดือนธันวาคม 2562 ได้ผล แสดงดังตารางที่ 4 และภาพที่ 3 ซึ่งพบว่า ปริมาณ การส่งออกปลาหมึกและผลิตภัณฑ์ยังคงมีแนวโน้ม ลดลง อย่างไรก็ตาม การเปลี่ยนแปลงของปริมาณ การส่งออกปลาหมึกและผลิตภัณฑ์อาจเกิดจากหลาย สาเหตุ เช่น สถานการณ์การผลิต สถานการณ์ตลาด ปริมาณความต้องการบริโภคภายในและต่างประเทศ สถานะเศรษฐกิจ การนำเข้าและส่งออกระหว่าง ประเทศ หรือปัจจัยอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง ดังนั้นจึงควร

พิจารณาตัวแปรเหล่านี้เพื่อใช้ในการสร้างตัวแบบ พยากรณ์ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยการสร้าง เป็นตัวแบบถดถอย (Regression model) ซึ่งผู้อ่าน สามารถศึกษาวิธีการสร้างตัวแบบลักษณะนี้ได้จาก Montgomery, Peck และ Vining [10] อีกทั้งเมื่อมี ปริมาณการส่งออกปลาหมึกและผลิตภัณฑ์ที่เป็น ปัจจุบันมากยิ่งขึ้นหรือปริมาณการส่งออกมีความผัน พ่วนเพิ่มขึ้น ผู้วิจัยควรนำข้อมูลมาปรับปรุงตัวแบบ เพื่อให้ได้ตัวแบบพยากรณ์ที่มีความเหมาะสมสำหรับ การพยากรณ์ค่าในอนาคตต่อไป

ตารางที่ 4 ค่าพยากรณ์ของปริมาณการส่งออกปลาหมึกและผลิตภัณฑ์ (กิโลกรัม) ตั้งแต่เดือนธันวาคม 2561 ถึง เดือนธันวาคม 2562 โดยวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์

ช่วงเวลา	ค่าพยากรณ์	ช่วงเวลา	ค่าพยากรณ์	ช่วงเวลา	ค่าพยากรณ์
ธ.ค. 2561	3,326,869	พ.ค. 2562	4,083,162	ต.ค. 2562	2,954,628
ม.ค. 2562	3,124,350	มิ.ย. 2562	3,702,523	พ.ย. 2562	2,778,520
ก.พ. 2562	3,255,654	ก.ค. 2562	3,117,912	ธ.ค. 2562	2,820,509
มี.ค. 2562	3,792,140	ส.ค. 2562	2,909,699		
เม.ย. 2562	3,100,761	ก.ย. 2562	2,833,075		



ภาพที่ 3 การเปรียบเทียบอนุกรมเวลาปริมาณการส่งออกปลาหมึกและผลิตภัณฑ์กับค่าพยากรณ์จาก วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์

4. สรุปผลการทดลอง

การวิจัยครั้งนี้ได้นำเสนอวิธีการสร้างและคัดเลือกตัวแบบพยากรณ์ที่เหมาะสมกับอนุกรมเวลา ปริมาณการส่งออกปลาหมึกและผลิตภัณฑ์ โดยใช้ข้อมูลจากเว็บไซต์ของสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร ตั้งแต่เดือนมกราคม 2554 ถึงเดือนพฤศจิกายน 2561 จำนวน 95 ค่า ผู้วิจัยได้แบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ชุด ชุดที่ 1 คือข้อมูลตั้งแต่เดือนมกราคม 2554 ถึงเดือนกันยายน 2561 จำนวน 93 ค่า สำหรับการสร้างตัวแบบพยากรณ์ด้วยวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์ วิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์ แบบบวก และวิธีการปรับเรียบด้วยเส้นโค้งเลขชี้กำลังของวินเทอร์แบบคูณ ชุดที่ 2 คือข้อมูลตั้งแต่เดือนตุลาคมถึงเดือนพฤศจิกายน 2561 จำนวน 2 ค่า สำหรับการเปรียบเทียบความถูกต้องของค่าพยากรณ์ ด้วยเกณฑ์เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAPE) และเกณฑ์รากที่สองของความคลาดเคลื่อน กำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ที่ต่ำที่สุด ผลการศึกษาพบว่า วิธีบ็อกซ์-เจนกินส์เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

5. อ้างอิง

- [1] Shanghai Yangqi อุตสาหกรรมการค้าและการค้า Corp. 10 ประเทศที่มีชื่อเสียงในการส่งออกอาหารทะเล. [Internet]. Shanghai Yangqi Industry & Trade Corp ;2559 [เข้าถึงเมื่อ 4 มกราคม 2562]. จาก <http://th.fishroe.net/news/10-famous-seafood-exportingcountries-11005161.html>
- [2] สุภาภรณ์ กอสูงเนิน. การส่งออกปลาหมึกแห้งไปยังสาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาว. วิทยานิพนธ์ปริญญาโท. มหาวิทยาลัยบูรพา; 2558.
- [3] การวิเคราะห์เส้นทางการส่งออกปลาหมึกสดแช่เย็นไปยังประเทศเกาหลีใต้. [Internet]. กรุงเทพมหานคร : กองควบคุมการค้าสัตว์น้ำและปัจจัยการผลิต กรมประมง. ม.ป.ป. [เข้าถึงเมื่อ 4 มกราคม 2562]. จาก: https://www4.fisheries.go.th/local/file_document/20180226115600_1_file.pdf
- [4] สถิติการส่งออกปลาหมึกและผลิตภัณฑ์ (รวม) ตั้งแต่ปี 2554 ถึง 2561. [Internet]. สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร : กรุงเทพมหานคร ; 2561. [เข้าถึงเมื่อ 4 มกราคม 2562]. จาก: http://impexp.oae.go.th/service/export.php?S_YEAR=2554&E_YEAR=2561&PRODUCT_ID=&wf_search=&WF_SEARCH=Y
- [5] Box GEP, Jenkins GM, Reinsel GC. Time Series Analysis: Forecasting and Control. 3rd ed. New Jersey: Prentice Hall; 1994.
- [6] สมเกียรติ เกตุเอี่ยม. เทคนิคการพยากรณ์. พิมพ์ครั้งที่ 2. สงขลา: มหาวิทยาลัยทักษิณ; 2548.
- [7] วรางคณา กิรติวิบูลย์. การพยากรณ์ปริมาณการส่งออกยางคอมปาวด์. ว.วิทยาศาสตร์ มศว. 2557; 30(2): 41-56.
- [8] ดนุสรณ์ ธนะปาละ, ธันวาท เจริญศิริ, ชนาธิป โสภณพิมล. การพยากรณ์ราคาสับปะรดที่ส่งเข้าโรงงานด้วยวิธีบ็อกซ์-เจนกินส์. ว.วิทยาศาสตร์บูรพา 2559; 21(1):110-118.

- [9] วรารคณา เรี้ยนสุทธี, น้ำอ้อย นิสัน.
การพยากรณ์ปริมาณการส่งออกไก่แปรรูป.
ว.มหาวิทยาลัยนเรศวร: วิทยาศาสตร์และ
เทคโนโลยี 2560; 25(2):140-152.
- [10] Montgomery DC, Peck EA, Vining GG.
Introduction to Linear Regression
Analysis. 4th ed. New York: John Wiley
and Sons; 2006.

การเปรียบเทียบวิธีการหาค่าเหมาะที่สุด ด้วยโซลเวอร์ของโปรแกรม

ไมโครซอฟท์เอกเซล 2007 และ 2019

Comparing methods of optimization in solver of

Microsoft Excel 2007 and 2019

ปรารถนา มินเสน¹, วฐา มินเสน^{2*},

Pradthana Minsan¹, Watha Minsan^{2*},

¹ภาควิชาคณิตศาสตร์และสถิติ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ เชียงใหม่

²กลุ่มวิทยาการข้อมูล ภาควิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เชียงใหม่

¹Department of Mathematics and Statistics, Faculty of Science and Technology, Chiang Mai Rajabhat
University, Chiang Mai

²Data Science Research Center, Department of Statistics, Faculty of Science, Chiang Mai University,
Chiang Mai

*Corresponding author. Tel.:0 5394 3381, Email: wathaminsan@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดในฟังก์ชันเกณฑ์เปรียบเทียบสมรรถนะ 13 ฟังก์ชัน ด้วยโซลเวอร์วิธีนิวตัน-ราฟสัน (NR) และเกรเดียนต์สังยุค (CG) ของโปรแกรมไมโครซอฟท์เอกเซล 2007 และ วิธีเกรเดียนต์ลดรูปแบบวางนัยทั่วไป (GRG) และเชิงวิวัฒน์ (EV) ของโปรแกรมไมโครซอฟท์เอกเซล 2019 จากเกณฑ์การตัดสินใจ 4 วิธี คือ 1. อัตราความสำเร็จมากที่สุด (SR_{max}) 2. ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยต่ำที่สุด (MAE_{min}) 3. อัตราความสำเร็จมากที่สุดและความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำที่สุด (SR_{max} และ SAE_{min}) และ 4. เวลาเฉลี่ยต่ำที่สุด (AT_{min}) เป็นตัวกำหนดวิธีการค้นหาคำตอบที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยในแต่ละสถานการณ์มีจำนวนครั้งการทำซ้ำ 100 รอบ ผลการวิจัยพบว่าเกณฑ์การตัดสินใจลำดับที่ 1. ถึง 3. วิธี EV เป็นวิธีการหาคำตอบที่ดีที่สุด ส่วนเกณฑ์ที่ 4. วิธี NR ใช้เวลาในการหาคำตอบได้เร็วที่สุด

คำสำคัญ: โซลเวอร์ นิวตัน-ราฟสัน เกรเดียนต์สังยุค เกรเดียนต์ลดรูปแบบวางนัยทั่วไป เชิงวิวัฒน์

Abstract

The purposes of this research were to compare the optimization for 13 benchmark functions by solving add-ins between Newton-Raphson (NR) and conjugate gradient (CG) methods in Microsoft Excel 2007 and generalized reduced gradient (GRG) and evolutionary (EV)

Received 24-07-2019

Revised 24-09-2019

Accepted 02-10-2019

methods in Microsoft Excel 2019. The criteria to test optimization for 13 benchmark functions are including: 1. The most success rate (SR_{max}) 2. The lowest mean absolute error (MAE_{min}) 3. The most success rate and the lowest standard deviation absolute error (SR_{max} and SAE_{min}) and 4. The lowest mean time (AT_{min}). For each scenario that was repeated 100 times, the result indicated that EV method is the best solution for the 1-3 criteria. However, the result of the fourth criteria, the NR method provided the lowest time for solving solution.

Keywords: Solver, Newton-Raphson, Conjugate gradient, Generalized reduced gradient, Evolutionary

1. บทนำ

โปรแกรมไมโครซอฟท์เอกเซล (Microsoft Excel) เป็นโปรแกรมหนึ่งบนชุดโปรแกรมไมโครซอฟท์ออฟฟิศ (Microsoft Office) ที่เป็นที่นิยมใช้ในการทำงานสำนักงาน โดยมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ได้ซื้อลิขสิทธิ์โปรแกรมไมโครซอฟท์ออฟฟิศตั้งแต่เวอร์ชัน 2007 จนถึงเวอร์ชัน 2019 ซึ่งเป็นเวอร์ชันปัจจุบัน ให้บุคลากรและนักศึกษาของมหาวิทยาลัยได้ดาวน์โหลดไปใช้กับเครื่องตนเองได้ทั้งในเครื่องประจำโต๊ะทำงานที่อยู่ในมหาวิทยาลัย หรือเครื่องคอมพิวเตอร์ส่วนตัวที่สามารถทำให้โปรแกรมผ่านลิขสิทธิ์ (Activate) โดยผ่านระบบ VPN (Virtual private network) ดังนั้นบุคลากรของทางมหาวิทยาลัยจึงมีโปรแกรมไมโครซอฟท์ออฟฟิศเวอร์ชันใดเวอร์ชันหนึ่งประจำเครื่องเสมอ ในภาควิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ มีจำนวนเครื่องคอมพิวเตอร์ในภาควิชาจำนวนกว่า 200 เครื่อง ทุกเครื่องติดตั้งโปรแกรมไมโครซอฟท์ออฟฟิศทั้งหมด โดยเครื่องคอมพิวเตอร์รุ่นเก่าในห้องปฏิบัติการคอมพิวเตอร์ (Lab computer) จะติดตั้งไมโครซอฟท์ออฟฟิศ 2007 แต่ในเครื่องรุ่นใหม่ก็จะติดตั้งไมโครซอฟท์ออฟฟิศ 2010 2013 2016 หรือ 2019 อย่างใดอย่าง

หนึ่ง แต่ในเครื่องของบุคลากรจะติดตั้งเวอร์ชันใดก็ได้แล้วแต่ความสะดวกในการใช้งานของผู้ใช้ประจำเครื่อง

ในโปรแกรมไมโครซอฟท์เอกเซลมีแอดอินส์ (Add-ins) เพื่อเพิ่มเครื่องมือในการทำงานต่าง ๆ เข้ามาได้ โซลเวอร์ก็เป็นหนึ่งในแอดอินส์ของไมโครซอฟท์เอกเซลที่มีตั้งแต่เวอร์ชัน 97 จนถึงเวอร์ชัน 2019 ที่มหาวิทยาลัยเชียงใหม่มีลิขสิทธิ์ใช้งานในปัจจุบัน โปรแกรมแอดอินส์ของเอกเซลเวอร์ชัน 2007 มีวิธีการในการหาค่าเหมาะที่สุด (Optimization) 2 วิธีการหลักคือ ตัวแบบเชิงเส้น (Linear model) และตัวแบบไม่เชิงเส้น (Non-linear model) ตัวแบบไม่เชิงเส้นยังแบ่งเป็นวิธีการค้นหาคำตอบ 2 วิธี คือ นิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson: NR) และเกรเดียนต์สังยุค (Conjugate gradient: CG) ส่วนในเวอร์ชัน 2010 2013 2016 และ 2019 โซลเวอร์มีวิธีการในการหาค่าเหมาะที่สุดเหมือนกัน คือ มีวิธีการในการหาค่าเหมาะที่สุด 2 วิธีการหลักคือ ตัวแบบเชิงเส้น และ ตัวแบบไม่เชิงเส้น ตัวแบบไม่เชิงเส้นแบ่งเป็นวิธีการค้นหาคำตอบ 2 วิธี คือ วิธีเกรเดียนต์ลดรูปแบบวางนัยทั่วไป (Generalized reduced gradient: GRG) และวิธีเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary: EV) ในส่วนตัวแบบเชิงเส้นทั้ง 4 เวอร์ชันนั้นจะใช้

การค้นหาคำตอบโดยขั้นตอนวิธีการซิมเพล็กซ์ (Simplex algorithm) เป็นหลักและการค้นหาคำตอบก็จะได้ค่าที่เหมาะสมที่สุดกว้าง (Global optimization) เสมอ ดังนั้นในการค้นหาคำตอบในตัวแบบไม่เชิงเส้นจึงเป็นประเด็นที่น่าสนใจในการศึกษาว่าการหาค่าเหมาะที่สุดแต่ละวิธีการได้ผลลัพธ์เป็นอย่างไร

วิธี NR เป็นวิธีที่เก่าแก่ใช้งานทั่วไปจนถึงปัจจุบัน คิดค้นโดย Newton ในปี ค.ศ. 1669 ถูกเผยแพร่โดย William Jones ในปี ค.ศ. 1711 และพัฒนาอย่างต่อเนื่องจนได้รูปแบบที่ใช้ในปัจจุบันโดย Simpson ในปี ค.ศ. 1740 [1] ซึ่งเป็นวิธีที่ใช้ในการแก้สมการที่มีหลายมิติหรือตัวแปร n ตัว วิธี NR ถึงแม้ว่าจะเป็นวิธีที่เก่า แต่ในปัจจุบันก็ยังมีการวิจัยนำมาใช้ในงานวิจัยของตนเอง เช่น เดชาชัย [2] ได้นำวิธี NR ไปใช้แบบจำลองของโหนดแบบสถิตชนิดกำลังคงที่โดยถูกนำไปใช้ร่วมกับการคำนวณโหนดโพลีผลลัพธ์ที่ได้จากการวิจัยสามารถปรับปรุงขั้นตอนวิธี (Algorithm) โหนดโพลีด้วยวิธี NR เป็นต้น

วิธี CG เป็นวิธีการที่เก่าแก่ใช้งานทั่วไปเช่นเดียวกับวิธี NR คิดค้นและพัฒนาโดย Hestenes และ Stiefel [3] ซึ่งวิธี CG นี้ ก็ยังมีการวิจัยสนใจศึกษาเช่นกัน เช่น ไพชนนต์ [4] ได้นำวิธี CG และ กึ่งนิวตัน (Quasi Newton) ไปใช้ในการแก้ปัญหาค่าต่ำสุดแบบไม่มีเงื่อนไข โดยใช้เทคนิคการถอยกลับเงื่อนไขของวูล์ฟ เงื่อนไขที่แรงกว่าของวูล์ฟ และกฎของอาร์มีโย สำหรับการเลือกระยะความยาวขั้นในทิศทางที่ใช้หาจุดต่ำสุด ผลลัพธ์ของงานวิจัยสามารถลดรอบจำนวนการทำซ้ำและจำนวนครั้งของการคำนวณฟังก์ชันในกระบวนการค้นหาตามเส้นได้ เป็นต้น

วิธี GRG ที่คิดค้นและพัฒนาโดย Wilde and Beightler [5] โดยใช้ชื่อว่า The name constrained derivatives ต่อมา Abadie and Carpenter [6] ได้พัฒนาวิธีนี้และใช้ชื่อว่า Generalized reduced gradient โดยชื่อนี้ได้ใช้ต่อมาจนถึงปัจจุบัน รหัสคำสั่ง (Code) ถูกพัฒนาโดย Lasdon et al. [7] Lasdon [8] และ Fylstra et al. [9] มีหลักการคือการคำนวณเกรเดียนต์ ของค่าต่างๆ จนกว่าจะเข้าใกล้ค่าวัตถุประสงค์ ซึ่ง วฐา [10] ได้นำวิธี GRG นี้ไปประมาณค่าดัชนีฤดูกาลในวิธีการแยกส่วนประกอบของข้อมูลอนุกรมเวลาจำนวน 4 ชุด พบว่าวิธีการประมาณค่าดัชนีฤดูกาลในการพยากรณ์วิธีแยกส่วนประกอบด้วย GRG ได้ค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยต่ำที่สุดทุกตัวอย่าง นั้นหมายความว่าวิธี GRG เป็นวิธีการที่ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการประมาณค่าดัชนีฤดูกาลด้วยสัดส่วนต่อค่าแนวโน้มและการคำนวณด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Minitab

วิธี EV เริ่มต้นพัฒนาโปรแกรมโดย Fogel ในปี ค.ศ. 1960 [11] เป็นวิธีการที่เลียนแบบการวิวัฒนาการของสิ่งมีชีวิต และเป็นวิธีในการหาผลเฉลยจากสายของตัวเลข (Strings of numbers) โดยใช้ตัวดำเนินการเช่น การผสมพันธุ์และการกลายพันธุ์ เป็นต้น ขั้นตอนวิธี EV นี้มักใช้ในปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดที่ซับซ้อนมาก เช่น อรณิข [12] ได้ศึกษาการหารูปร่างที่เหมาะสมที่สุดของแพนอากาศด้วยวิธี EV เพราะวิธี EV เป็นวิธีที่ลดเวลาของขั้นตอนการหารูปร่างที่เหมาะสมที่สุดของแพนอากาศและการเพิ่มประสิทธิภาพของปีกในอากาศยานได้ นอกจากนี้วิธี EV เป็นการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบไม่ใช่อนุพันธ์ ทำให้ลดขั้นตอนการคำนวณเชิงอนุพันธ์ที่ซับซ้อนลงได้ เป็นต้น ดังนั้นในงานวิจัยนี้ จึงสนใจเปรียบเทียบวิธี NR CG GRG และ EV กับปัญหาเกณฑ์เปรียบเทียบ

สมรรถนะ (Benchmark problems) จำนวน 13 ปัญหา เพื่อหาข้อสรุปว่า วิธีการใดหาค่าเหมาะที่สุด จากวิธีการตัดสินใจ (Decision method) 4 วิธี ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้จึงเป็นการเปรียบเทียบวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดในปัญหาเกณฑ์เปรียบเทียบสมรรถนะ 13 ปัญหา ด้วยซอฟต์แวร์วิธี NR และ CG ของโปรแกรมไมโครซอฟท์เอกเซล 2007 และ วิธี GRG และ EV ของโปรแกรมไมโครซอฟท์เอกเซล 2019

2. วิธีดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้สนใจวิธีการหาค่าเหมาะที่สุด 4 วิธี โดยใช้ ปัญหาเกณฑ์เปรียบเทียบสมรรถนะ หรือในทางคณิตศาสตร์เรียกว่า ฟังก์ชันเกณฑ์เปรียบเทียบสมรรถนะ (Benchmark functions) 13 ฟังก์ชัน โดยในแต่ละสถานการณ์มีจำนวนครั้งการทำซ้ำ 100 รอบ และใช้อัตราความสำเร็จมากที่สุด (Maximum success rate: SR_{max}) ความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยต่ำที่สุด (Minimum mean absolute error: MAE_{min}) อัตราความสำเร็จมากที่สุดและความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานต่ำที่สุด (SR_{max} and minimum standard deviation absolute error: SR_{max} และ SAE_{min}) และ เวลาเฉลี่ยต่ำที่สุด (Minimum average time: AT_{min}) เป็นวิธีการตัดสินใจ มีรายละเอียดตามลำดับดังนี้

2.1 กำหนดค่าปริยาย (Default) ของวิธีการค้นหาคำตอบของ GRG, EV, NR และ CG

2.1.1 การใช้วิธี GRG และ EV ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ กำหนดค่าปริยายในตัวเลือก (Options) ของซอฟต์แวร์ไว้ดังนี้

- 1) Constraint precision: 0.000001

หมายเหตุ: ในงานวิจัยนี้ เงื่อนไขบังคับ (Constraint) คือ ขอบเขตบน (Upper bound) และ ขอบเขตล่าง (Lower bound)

- 2) Use automatic scaling: true
- 3) Solving limits มี Max time เท่ากับ 5,000 วินาที
- 4) Convergence: 0.0001
- 5) Population size: 100
- 6) Random seed: 0
- 7) Require bounds on variables: true
- 8) Maximum time without improvement: 30
- 9) สำหรับวิธี GRG กำหนด Derivatives: forward and use multistart: true
- 10) สำหรับวิธีการ EV กำหนด Mutation rate: 0.075

2.1.2 การใช้วิธี NR และ CG ในการประมาณค่าพารามิเตอร์ กำหนดค่าปริยายในตัวเลือกของซอฟต์แวร์ไว้ดังนี้

- 1) Precision: 0.000001
- หมายเหตุ:** ความหมายเดียวกับ Constraint precision ใน GRG และ EV
- 2) Use automatic scaling: true
 - 3) Max time เท่ากับ 5,000 วินาที
- หมายเหตุ:** ความหมายเดียวกับ Solving limits ใน GRG และ EV
- 4) Convergence: 0.0001
 - 5) Derivatives: forward
 - 6) Estimates: tangent

วิธี GRG, EV, NR และ CG จะกำหนดคำตอบเริ่มต้นจากค่าสุ่ม (Random) ตามการแจกแจงเอกรูปต่อเนื่อง (Continuous uniform distribution) จาก

ขอบเขตบน และ ขอบเขตล่าง ของแต่ละฟังก์ชัน
เกณฑ์เปรียบเทียบสมรรถนะ

$$f(x_1^*, x_2^*) = 0, \text{ at } x_i^* = (0, 0) \text{ for } i = 1, 2$$

ขอบเขตบน และ ขอบเขตล่าง

$$x_i \in [-32.768, 32.768] \text{ for } i = 1, 2$$

$$f(x_1, x_2) = -20 \exp \left(-0.2 \sqrt{\frac{1}{d} \sum_{i=1}^d x_i^2} \right) - \exp \left(\frac{1}{d} \sum_{i=1}^d \cos(2\pi x_i) \right) + 20 + \exp(1) \quad (1)$$

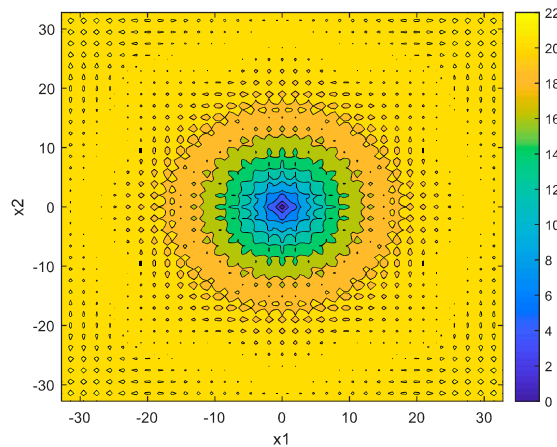
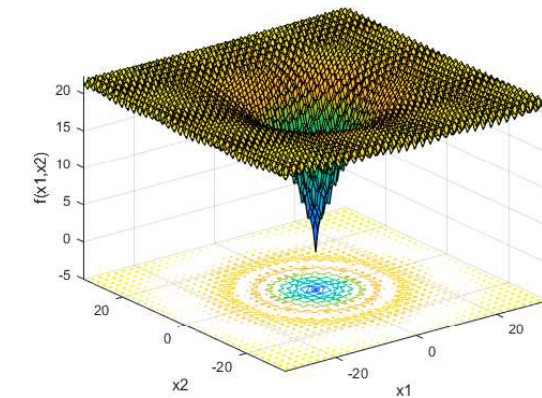
2.2 ฟังก์ชันเกณฑ์เปรียบเทียบสมรรถนะ (Benchmark functions)

ในงานวิจัยนี้ได้กำหนดปัญหาการหาค่า
เหมาะที่สุดเป็นฟังก์ชันเกณฑ์เปรียบเทียบสมรรถนะ
จำนวน 13 ฟังก์ชัน [13-15] ทุกปัญหาเป็นแบบ 2
มิติ นั่นคือ $d=2$ มีรายละเอียดต่อไปนี้

2.2.1 Ackley function (AF) ดังสมการ

ที่ (1) ค่าต่ำสุดวงกว้าง (Global minimum) คือ

ผิว (Surface) และ เส้นชั้นความสูง
(Contour) ของ AF แสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 Ackley function (AF)

2.2.2 Beale function (BeF) ตั้งสมการ

ที่ (2) ค่าต่ำสุดวงกว้าง คือ

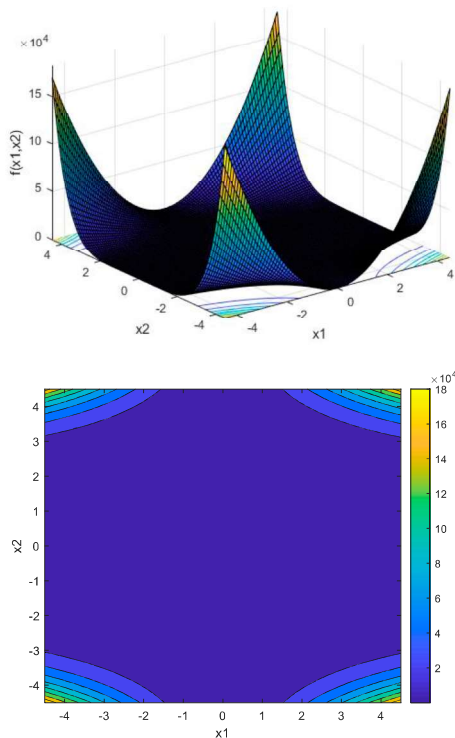
$$f(x_1^*, x_2^*) = 0, \text{ at } x_i^* = (3, 0.5) \text{ for } i = 1, 2$$

ขอบเขตบน และ ขอบเขตล่าง

$$x_i \in [-4.5, 4.5] \text{ for } i = 1, 2$$

$$\begin{aligned} f(x_1, x_2) = & (1.5 - x_1 + x_1 x_2)^2 \\ & + (2.25 - x_1 + x_1 x_2^2)^2 \\ & + (2.625 - x_1 + x_1 x_2^3)^2 \end{aligned} \quad (2)$$

ผิว และ เส้นชั้นความสูง ของ BeF แสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 Beale function (BeF)

2.2.3 Booth function (BoF) ตั้งสมการ

ที่ (3) ค่าต่ำสุดวงกว้าง คือ

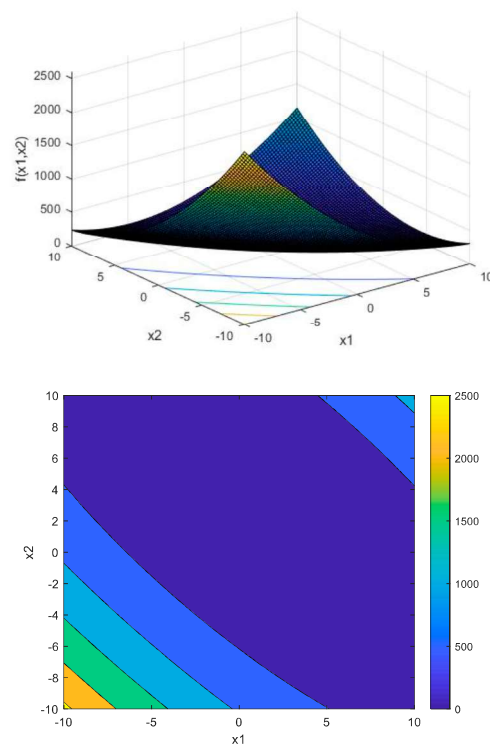
$$f(x_1^*, x_2^*) = 0, \text{ at } x_i^* = (1, 3) \text{ for } i = 1, 2$$

ขอบเขตบน และ ขอบเขตล่าง

$$x_i \in [-10, 10] \text{ for } i = 1, 2$$

$$f(x_1, x_2) = (x_1 + 2x_2 - 7)^2 + (2x_1 + x_2 - 5)^2 \quad (3)$$

ผิว และ เส้นชั้นความสูง ของ BoF แสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 Booth function (BoF)

2.2.4 Bukin No.6 function (BuF) ตั้ง
สมการที่ (4) ค่าต่ำสุดวงกว้าง คือ

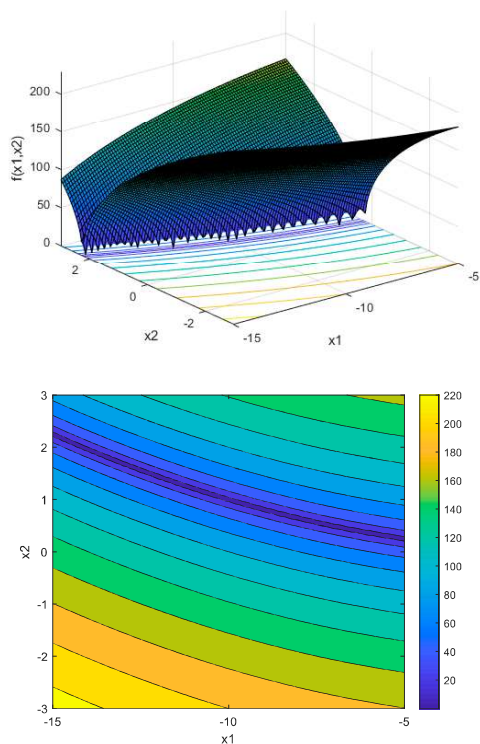
$$f(x_1^*, x_2^*) = 0, \text{ at } x_i^* = (-10, 1) \text{ for } i = 1, 2$$

ขอบเขตบน และ ขอบเขตล่าง

$$x_1 \in [-15, -5], x_2 \in [-3, 3]$$

$$f(x_1, x_2) = 100\sqrt{|x_2 - 0.01x_1^2|} + 0.01|x_1 + 10| \quad (4)$$

ผิว และ เส้นชั้นความสูง ของ BuF แสดงดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 Bukin No.6 function (BuF)

2.2.5 Cross-in-tray function (CF) ตั้ง
สมการที่ (5) ค่าต่ำสุดวงกว้าง คือ

$$f(x_1^*, x_2^*) = -2.06261218,$$

$$\text{at } x_i^* = (\pm 1.34940668535334, \pm 1.349406608602084) \text{ for } i = 1, 2$$

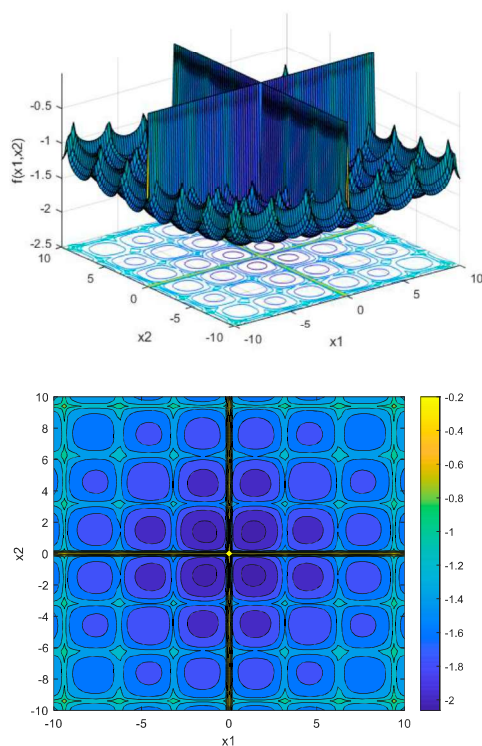
ขอบเขตบน และ ขอบเขตล่าง

$$x_i \in [-10, 10] \text{ for } i = 1, 2$$

$$f(x_1, x_2) = -0.0001(|\sin(x_1)\sin(x_2)| \exp(|100 - \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2}{\pi}}| + 1)^{0.1}) \quad (5)$$

$$\exp(|100 - \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2}{\pi}}| + 1)^{0.1}$$

ผิว และ เส้นชั้นความสูง ของ CF แสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 Cross-in-tray function (CF)

2.2.6 Holder table function (HF) ตั้ง
สมการที่ (6) ค่าต่ำสุดวงกว้าง คือ

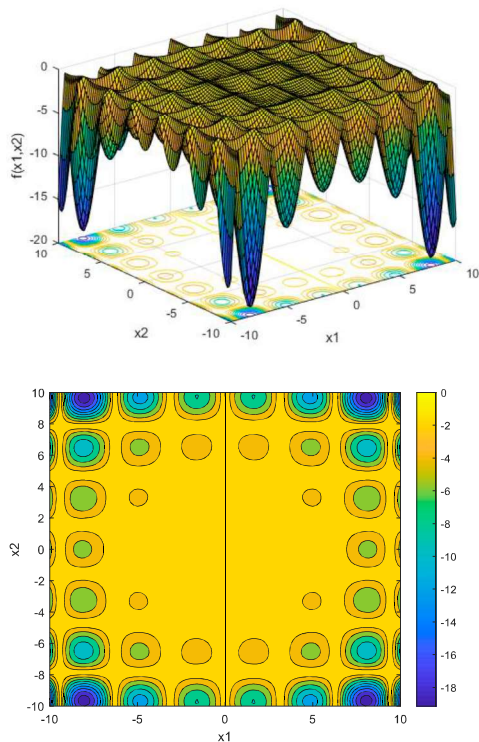
$$f(x_1^*, x_2^*) = -19.2085, \text{ at } x_i^* = (\pm 8.05502, \pm 9.66459) \\ \text{for } i = 1, 2$$

ขอบเขตบน และ ขอบเขตล่าง

$$x_i \in [-10, 10] \text{ for } i = 1, 2$$

$$f(x_1, x_2) = -|\sin(x_1)\cos(x_2)| \\ \exp\left(\left|1 - \frac{\sqrt{x_1^2 + x_2^2}}{\pi}\right|\right) \quad (6)$$

ผิว และ เส้นชั้นความสูง ของ HF แสดงดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 Holder table function (HF)

2.2.7 Levy No.13 function (LF) ตั้ง
สมการที่ (7) ค่าต่ำสุดวงกว้าง คือ

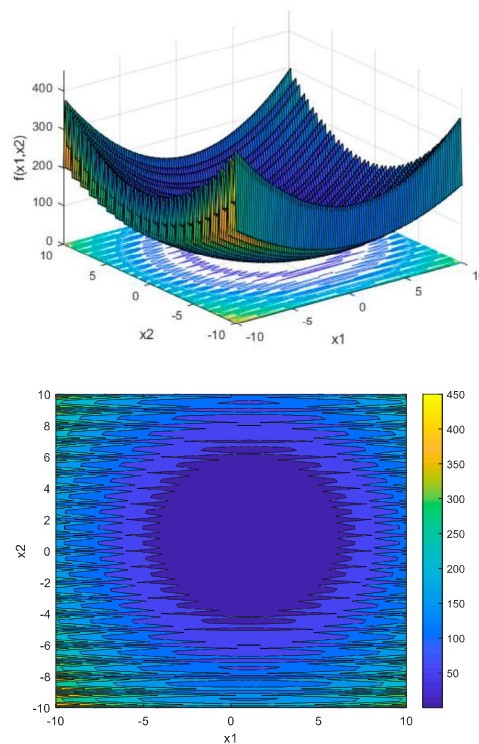
$$f(x_1^*, x_2^*) = 0, \text{ at } x_i^* = (1, 1) \text{ for } i = 1, 2$$

ขอบเขตบน และ ขอบเขตล่าง

$$x_i \in [-10, 10] \text{ for } i = 1, 2$$

$$f(x_1, x_2) = \sin^2(3\pi x_1) + (x_1 - 1)^2 \\ (1 + \sin^2(3\pi x_2)) + (x_2 - 1)^2 (1 + \sin^2(2\pi x_2)) \quad (7)$$

ผิว และ เส้นชั้นความสูง ของ LF แสดงดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 Levy No.13 function (LF)

2.2.8 Rastrigin function (RaF) ตั้งสมการที่ (8) ค่าต่ำสุดวงกว้าง คือ

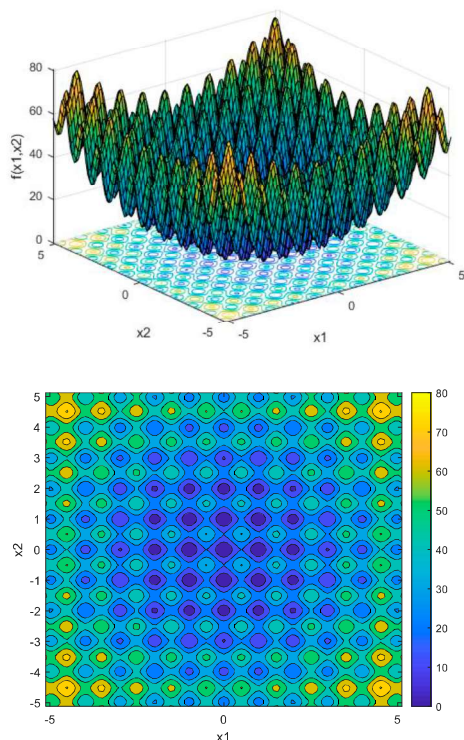
$$f(x_1^*, x_2^*) = 0, \text{ at } x_i^* = (0, 0) \text{ for } i = 1, 2$$

ขอบเขตบน และ ขอบเขตล่าง

$$x_i \in [-5.12, 5.12] \text{ for } i = 1, 2$$

$$f(x_1, x_2) = 10d + \sum_{i=1}^d (x_i^2 - 10 \cos(2\pi x_i)) \quad (8)$$

ผิว และ เส้นชั้นความสูง ของ RaF แสดงดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 Rastrigin function (RaF)

2.2.9 Rosenbrock function (RoF) ตั้งสมการที่ (9) ค่าต่ำสุดวงกว้าง คือ

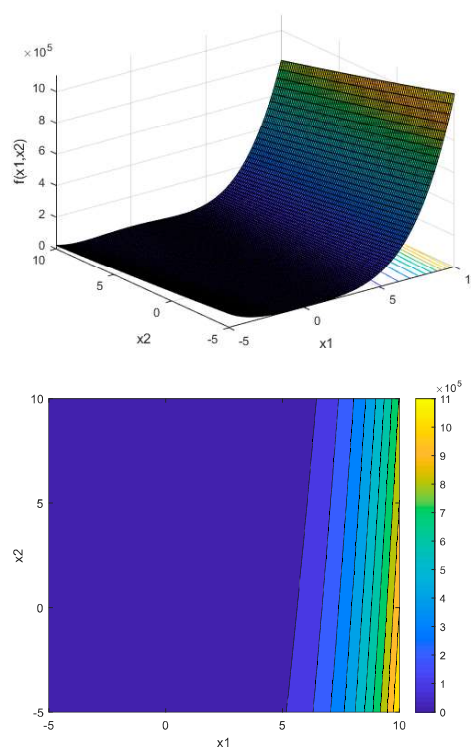
$$f(x_1^*, x_2^*) = 0, \text{ at } x_i^* = (1, 1) \text{ for } i = 1, 2$$

ขอบเขตบน และ ขอบเขตล่าง

$$x_i \in [-5, 10] \text{ for } i = 1, 2$$

$$f(x_1, x_2) = \sum_{i=1}^{d-1} [100(x_{i+1} - x_i^2)^2 + (x_i - 1)^2] \quad (9)$$

ผิว และ เส้นชั้นความสูง ของ RoF แสดงดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 Rosenbrock function (RoF)

2.2.10 Salomon function (SaF) ตั้งสมการที่ (10) ค่าต่ำสุดวงกว้าง คือ

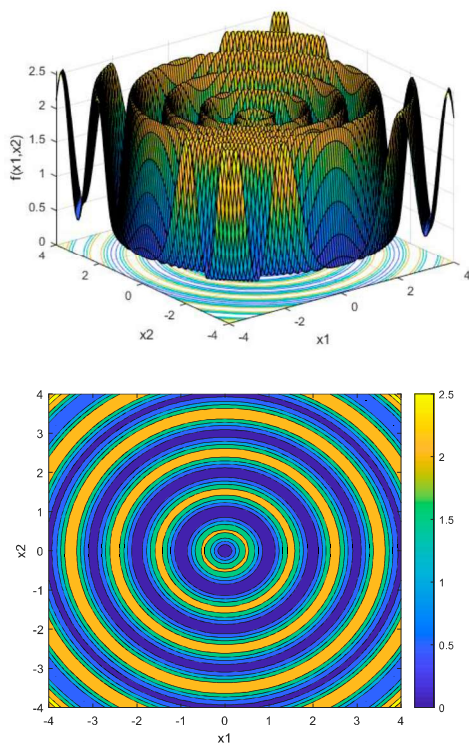
$$f(x_1^*, x_2^*) = 0, \text{ at } x_i^* = (0, 0) \text{ for } i = 1, 2$$

ขอบเขตบน และ ขอบเขตล่าง

$$x_i \in [-4, 4] \text{ for } i=1,2$$

$$f(x_1, x_2) = 1 - \cos(2\pi \sqrt{\sum_{i=1}^d x_i^2}) + 0.1 \sqrt{\sum_{i=1}^d x_i^2} \quad (10)$$

ผิว และ เส้นชั้นความสูง ของ SaF แสดงดังภาพที่ 10



ภาพที่ 10 Salomon function (SaF)

2.2.11 Schwefel function (ScF) ตั้ง

สมการที่ (11) ค่าต่ำสุดวงกว้าง คือ

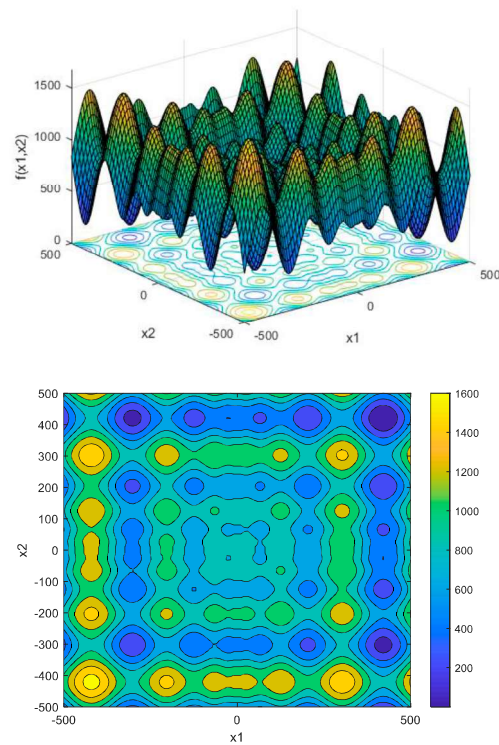
$$f(x_1^*, x_2^*) = 0, \text{ at } x_i^* = (420.9687, 420.9687) \text{ for } i=1,2$$

ขอบเขตบน และ ขอบเขตล่าง

$$x_i \in [-500, 500] \text{ for } i=1,2$$

$$f(x_1, x_2) = 418.9829d - \sum_{i=1}^d x_i \sin(\sqrt{|x_i|}) \quad (11)$$

ผิว และ เส้นชั้นความสูง ของ ScF แสดงดังภาพที่ 11



ภาพที่ 11 Schwefel function (ScF)

2.2.12 Shubert function (ShF) ตั้ง

สมการที่ (12) ค่าต่ำสุดวงกว้าง คือ

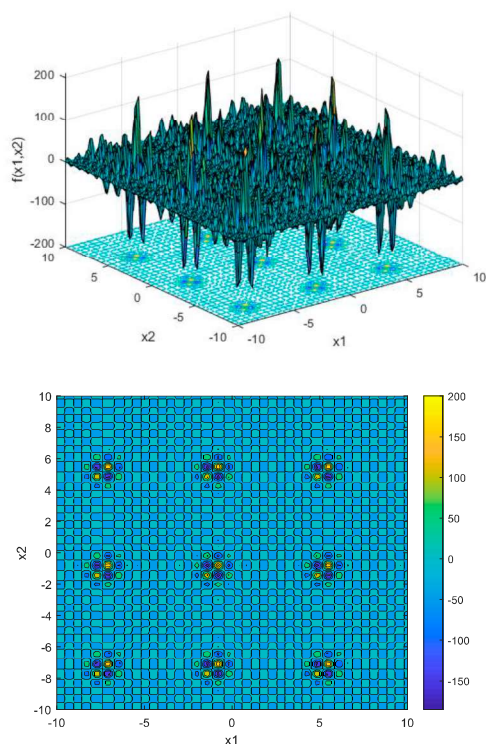
$$f(x_1^*, x_2^*) \approx -186.7309 \text{ มี } x_i^* \text{ จำนวน 18 คู่อันดับ} \\ \text{ที่เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดโดยรวม for } i=1,2$$

ขอบเขตบน และ ขอบเขตล่าง

$$x_i \in [-10, 10] \text{ for } i=1, 2$$

$$f(x_1, x_2) = \left(\sum_{i=1}^5 i \cos((i+1)x_1 + i) \right) \left(\sum_{i=1}^5 i \cos((i+1)x_2 + i) \right) \quad (12)$$

ผิว และ เส้นชั้นความสูง ของ ShF แสดงดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 Shubert function (ShF)

2.2.13 Yang No.2 function (YF) ดังสมการที่ (13) ค่าต่ำสุดวงกว้าง คือ

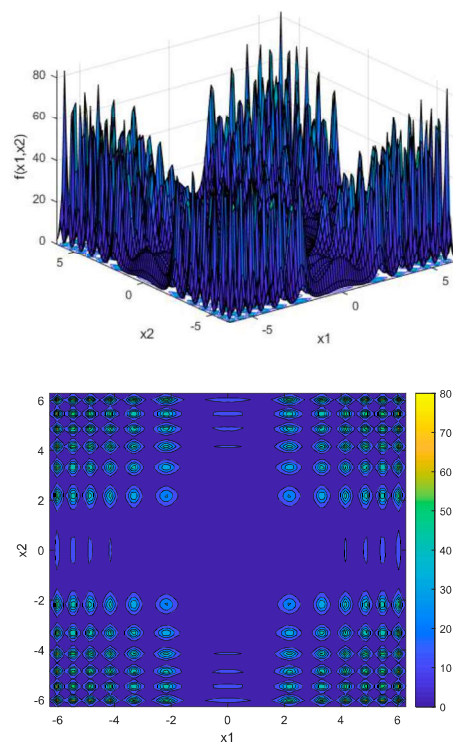
$$f(x_1^*, x_2^*) = 0, \text{ at } x_i^* = (0, 0) \text{ for } i=1, 2$$

ขอบเขตบน และ ขอบเขตล่าง

$$x_i \in [-2\pi, 2\pi] \text{ for } i=1, 2$$

$$f(x_1, x_2) = \left(\sqrt{\sum_{i=1}^d |x_i|} \right) \exp(-\sum_{i=1}^d \sin(x_i^2)) \quad (13)$$

ผิว และ เส้นชั้นความสูง ของ YF แสดงดังภาพที่ 13



ภาพที่ 13 Yang No.2 function (YF)

2.3 จำนวนรอบในการทำซ้ำ (Replication)

ในงานวิจัยนี้กำหนดจำนวนรอบในการทำซ้ำแต่ละสถานการณ์ (R) 100 รอบ โดยในแต่ละรอบกำหนดค่าปริยายของเวลาสูงสุด (Max time) ในแต่ละวิธีการค้นหาคำตอบเท่ากับ 5,000 วินาที หรือประมาณ 83.33 นาที ดังที่กล่าวไว้ใน 3.1

2.4 วิธีการตัดสินใจ (Decision method)

2.4.1 ใช้อัตราความสำเร็จในการค้นหา
คำตอบ (Success rate: SR) ที่มีค่ามากที่สุดเป็น
ตัวกำหนดวิธีการค้นหาคำตอบที่มีประสิทธิภาพมาก
ที่สุด โดยมีสูตรดังสมการที่ (14) และ (15) อัตรา
ความสำเร็จในการค้นหาคำตอบ คือ

$$SR_k = \frac{s}{R} \times 100, \quad k = \text{NR, CG, GRG, EV} \quad (14)$$

เมื่อ s คือ จำนวนครั้งที่หาค่าต่ำสุดวงกว้าง โดย ถ้า
ค่า $e = |f(x_1^*, x_2^*) - f(x_1, x_2)|$ ที่ $e \leq 10^{-5}$ ถือว่า
การหาค่าเหมาะที่สุดในครั้งนั้น มีค่าต่ำที่สุดโดยรวม
 R คือ จำนวนรอบของการทำซ้ำในแต่ละ
สถานการณ์ กำหนด $R=100$

$$SR_{\max} = \text{Max}(SR_{\text{NR}}, SR_{\text{CG}}, SR_{\text{GRG}}, SR_{\text{EV}}) \quad (15)$$

เมื่อ $SR_{\max}$ คือ วิธีการที่ดีที่สุดในการหาคำตอบ

2.4.2 ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย
(Mean absolute error: MAE) โดยมีสูตรดังสมการ
ที่ (16) และ วิธีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดจะเป็น
ค่าต่ำสุดของ MAE ของแต่ละวิธี ดังสมการที่ (17)

$$MAE_k = \sum_{i=1}^{100} \frac{|f(x_1, x_2)_i - f(x_1^*, x_2^*)|}{100}, \quad k = \text{NR, CG, GRG, EV} \quad (16)$$

เมื่อ $f(x_1, x_2)_i$ คือ ค่าที่ต่ำที่สุดรอบที่ i ,
 $i=1,2,3,\dots,100$
 $f(x_1^*, x_2^*)$ คือ ค่าต่ำสุดวงกว้าง

$$MAE_{\min} = \text{Min}(MAE_{\text{NR}}, MAE_{\text{CG}}, MAE_{\text{GRG}}, MAE_{\text{EV}}) \quad (17)$$

เมื่อ $MAE_{\min}$ คือ วิธีการที่ดีที่สุดในการหาคำตอบ

2.4.3 ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ส่วน
เบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation absolute
error: SAE) โดยมีสูตรดังสมการที่ (18)

$$SAE_k = \sqrt{\sum_{i=1}^{100} \frac{(f(x_1, x_2)_i - MAE_k)^2}{100}}, \quad k = \text{NR, CG, GRG, EV} \quad (18)$$

เมื่อ $f(x_1, x_2)_i$ คือ ค่าที่ต่ำที่สุดรอบที่ i ,
 $i=1,2,3,\dots,100$

MAE_k คือ ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย
, $k = \text{NR, CG, GRG, EV}$

และ วิธีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดจะพิจารณาจากวิธี
ที่ให้ $SR_{\max}$ มากที่สุดและมีค่า $SAE_{\min}$ ต่ำสุด เนื่องจาก
การมีอัตราความสำเร็จที่สูงและมีส่วนเบี่ยงเบน
มาตรฐานน้อยนั้นแสดงว่าวิธีการหาคำตอบวิธีการนั้น
เป็นวิธีการที่แกร่ง (Robust) หรืออาจจะกล่าวได้ว่า
เป็นวิธีการที่ทั้งแม่นยำ (Accuracy) และ เที่ยงตรง
(Precision) ต่อคำตอบ ค่า $SAE_{\min}$ ต่ำสุด ดังสมการ
ที่ (19)

$$SAE_{\min} = \text{Min}(SAE_{\text{NR}}, SAE_{\text{CG}}, SAE_{\text{GRG}}, SAE_{\text{EV}}) \quad (19)$$

เมื่อ $SR_{\max}$ และ $SAE_{\min}$ คือ วิธีการที่ดีที่สุดในการ
หาคำตอบ

2.4.4 เวลาเฉลี่ย (Average time: AT)
คือเวลาเฉลี่ยในการหาคำตอบแต่ละรอบ โดยมีสูตร
ดังสมการที่ (20)

$$AT_k = \frac{\sum_{i=1}^{100} T_i}{100}, \quad k = NG, CG, GRG, EV \quad (20)$$

วิธีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดจะเป็นค่าต่ำสุดของ AT ดังสมการที่ (21)

$$AT_{\min} = \text{Min}(AT_{NR}, AT_{CG}, AT_{GRG}, AT_{EV}) \quad (21)$$

เมื่อ $AT_{\min}$ คือ วิธีการที่ดีที่สุดในการหาคำตอบ

2.5 เครื่องคอมพิวเตอร์ที่ใช้ในการประมวลผล

CPU and mainboard: AMD AM4 Ryzen3 2200G

3.5GHz and ASUS Prime A320M-K

RAM: DDR4 (2400) 8 GB

Hard disk: SSD 240 GB

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

การเปรียบเทียบวิธีการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดในฟังก์ชันเกณฑ์เปรียบเทียบสมรรถนะ 13 ฟังก์ชัน ด้วยซอฟต์แวร์วิธี NR และ CG ของโปรแกรมไมโครซอฟท์เอกเซล 2007 และ วิธีการ GRG และ EV ของโปรแกรมไมโครซอฟท์เอกเซล 2019 ได้ผลการวิจัยดังนี้

3.1 SR ที่มีค่ามากที่สุดเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด

จากตารางที่ 1 พบว่า ค่า SR ที่ดีที่สุดเป็นวิธี EV โดยจำนวนฟังก์ชันเกณฑ์เปรียบเทียบ

สมรรถนะ ที่วิธี EV ได้ค่า SR มากที่สุดมีจำนวน 10 ฟังก์ชัน GRG ดีที่สุด 5 ฟังก์ชัน โดยทั้งหมดเป็นวิธีการที่อยู่บนโปรแกรมไมโครซอฟท์เอกเซล 2010 2013 2016 และ 2019 วิธี NR และ CG ดีที่สุด 1 ฟังก์ชัน แต่ไม่สามารถเอาชนะทั้ง 2 วิธีคือ GRG และ EV ได้ทุกฟังก์ชันเกณฑ์เปรียบเทียบสมรรถนะ อย่างไรก็ตามมี 1 ฟังก์ชันเกณฑ์เปรียบเทียบสมรรถนะ ที่ทั้ง 4 วิธีไม่สามารถหาคำตอบที่ถูกต้องได้ นั่นคือปัญหา BuF

3.2 MAE วิธีที่ค่าต่ำสุดเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด

จากตารางที่ 2 พบว่า ค่า MAE ที่ดีที่สุดเป็นวิธี EV โดยจำนวนฟังก์ชันเกณฑ์เปรียบเทียบสมรรถนะ ที่วิธี EV ได้ค่า MAE ต่ำที่สุดมีจำนวน 9 ฟังก์ชัน GRG ดีที่สุด 3 ฟังก์ชัน และ วิธี CG ดีที่สุด 1 ฟังก์ชัน คือ ฟังก์ชัน BoF

3.3 SR มากที่สุดและมีค่า SAE ค่าต่ำสุดเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด

จากตารางที่ 3 พบว่า ค่า SAE ต่ำที่สุดเป็นวิธี EV โดยจำนวนฟังก์ชันเกณฑ์เปรียบเทียบสมรรถนะ ที่วิธี EV ได้ค่า SAE ต่ำที่สุดมีจำนวน 9 ฟังก์ชัน GRG ดีที่สุด 3 ฟังก์ชัน และ วิธี NR ดีที่สุด 1 ฟังก์ชัน คือ ฟังก์ชัน BoF เมื่อพิจารณาร่วมกับ SR พบว่า วิธีที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด คือ วิธี EV มีจำนวนฟังก์ชัน 8 ฟังก์ชัน วิธี GRG 3 ฟังก์ชัน และ สุดท้ายวิธี NR 1 ฟังก์ชัน ไม่พบว่า CG เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพ

ตารางที่ 1 ค่า *SR* ของวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของแต่ละฟังก์ชันเกณฑ์เปรียบเทียบสมรรถนะ

Function	NR	CG	GRG	EV
AF	0	1	12	43*
BeF	51	29	100*	96
BoF	100*	100*	100*	100*
BuF	0	0	0	0
CF	11	17	100*	100*
HF	8	6	100*	100*
LF	2	5	17	100*
RaF	0	1	16	100*
RoF	14	8	100*	98
SaF	0	2	43	100*
ScF	6	5	96	98*
ShF	1	2	94	100*
YF	8	11	78	100*

หมายเหตุ: 1) Max Min

2) * เป็นวิธีที่ดีที่สุด

ตารางที่ 2 ค่า *MAE* ของวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของแต่ละฟังก์ชันเกณฑ์เปรียบเทียบสมรรถนะ

Function	NR	CG	GRG	EV
AF	17.72715	17.62522	5.92782	0.00001*
BeF	0.44868	0.46218	0.00000*	0.03048
BoF	1.341E-11	4.93E-12*	1.21E-11	4.97E-12
BuF	0.05758	0.05697	0.02922	0.01447*
CF	0.29936	0.28498	6.51E-13	4.51E-13*
HF	13.11363	13.31175	7.66E-11*	2.96E-10
LF	33.08004	31.28148	1.07336	0.00000*
RaF	18.67526	14.17808	2.03966	0.00000*
RoF	0.24693	0.68916	0.00000*	0.00483
SaF	0.28887	0.29688	0.05993	0.00000*
ScF	411.33137	375.15197	4.73753	2.36877*
ShF	158.17261	159.01208	5.55588	0.00000*
YF	2.97483	2.40890	0.10785	0.00000*

หมายเหตุ: 1) Max Min

2) * เป็นวิธีที่ดีที่สุด

ตารางที่ 3 ค่า *SAE* ของวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของแต่ละฟังก์ชันเกณฑ์เปรียบเทียบสมรรถนะ

Function	NR	CG	GRG	EV
AF	3.93858	4.19389	3.79961	0.00001*
BeF	0.99449	0.98746	0.00000*	0.14933
BoF	5.35E-12*	1.48E-11	1.95E-11	7.98E-12
BuF	0.02465	0.02273	0.01631	0.01083*
CF	0.17169	0.19049	1.38E-12	6.31E-13*
HF	4.89729	4.83640	2.10E-10*	1.31E-09
LF	27.56965	29.31534	1.20896	0.00000*
RaF	11.22209	9.15178	1.75392	0.00000*
RoF	0.44750	1.31931	0.00000*	0.03431
SaF	0.09989	0.11785	0.05471	0.00000*
ScF	182.38158	175.97635	23.20908	16.58137*
ShF	25.87790	31.06219	22.57442	0.00000*
YF	2.13718	2.18399	0.28085	0.00000*

หมายเหตุ: 1)  Max Min

2) * เป็นวิธีให้ค่า *SAE* ต่ำสุด

ตารางที่ 4 ค่า *AT* (หน่วย: วินาที) ของวิธีการหาค่าเหมาะที่สุดของแต่ละฟังก์ชันเกณฑ์เปรียบเทียบสมรรถนะ

Function	NR	CG	GRG	EV
AF	0.57*	0.60	1.18	47.37
BeF	0.27*	0.28	0.81	44.23
BoF	0.43*	0.58	0.64	47.61
BuF	0.51*	0.58	0.82	46.85
CF	0.68	0.72	0.59*	45.53
HF	0.75*	0.79	4.49	35.49
LF	0.88	0.86*	0.92	45.46
RaF	0.49*	0.52	1.29	46.72
RoF	0.27*	0.49	1.37	44.55
SaF	0.56	0.49*	4.01	47.67
ScF	0.59	0.55*	3.97	46.92
ShF	0.48	0.45*	4.79	45.70
YF	0.47*	0.49	0.84	46.21

หมายเหตุ: 1)  Max Min

2) * เป็นวิธีดีที่สุด

3.4 AT ต่ำสุดเป็นวิธีประสิทธิภาพมากที่สุด

จากตารางที่ 4 พบว่า ค่า AT ต่ำที่สุดเป็นวิธี NR โดยจำนวนฟังก์ชันเกณฑ์เปรียบเทียบสมรรถนะ ที่วิธี NR ได้ค่า AT ต่ำที่สุดมีจำนวน 8 ฟังก์ชัน รองลงมาเป็นวิธี CG ดีที่สุด 4 ฟังก์ชัน และวิธี GRG ดีที่สุด 1 ฟังก์ชัน โดยทั้งสามวิธี NR, CG และ GRG นั้นใช้เวลาในการคำนวณหาคำตอบไม่เกิน 5 วินาที ส่วนวิธี EV นั้นใช้เวลาในการหาคำตอบนานที่สุดแตกต่างจากวิธีการอื่น ๆ โดยเฉลี่ยแล้วใช้เวลาประมาณ 40 วินาที

ผลสรุปนี้สอดคล้องกับงานวิจัย อ้นชานนท์ และคณะ [16] ที่ได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการประมาณค่าพารามิเตอร์ของตัวแบบการพยากรณ์ด้วยเทคนิคการปรับให้เรียบ จากวิธีการประมาณค่าด้วย 4 วิธี คือ NR CG GRG และ EV ผลการศึกษาพบว่า วิธี GRG มีประสิทธิภาพสูงที่สุดสำหรับข้อมูลมีแนวโน้มและมีฤดูกาล และข้อมูลไม่มีแนวโน้มและไม่มีฤดูกาล วิธี EV มีประสิทธิภาพสูงที่สุดสำหรับข้อมูลไม่มีแนวโน้มแต่มีฤดูกาล และวิธี EV, NR และ CG มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันสำหรับข้อมูลมีแนวโน้มแต่ไม่มีฤดูกาล ซึ่งจะเห็นว่าโดยส่วนใหญ่แล้ววิธี GRG และ EV ใช้ได้ดีมากกว่า NR และ CG ที่ใช้ได้เพียงข้อมูลมีแนวโน้มแต่ไม่มีฤดูกาลเท่านั้น

4. สรุปผลการวิจัย

วิธีการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยโซลเวอร์วิธี NR และ CG ของโปรแกรมไมโครซอฟท์เอกเซล 2007 และ วิธี GRG และ EV ของโปรแกรมไมโครซอฟท์เอกเซล 2019 ในปัญหามาตรฐาน 13 ปัญหา พบว่าวิธี EV เป็นวิธีการที่ค้นหาคำตอบที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดทั้งอัตราความสำเร็จที่สูงในการค่าต่ำสุดวงกว้าง และค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ยและ

ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ต่ำ

จึงสรุปได้ว่าถ้าผู้ใช้งานต้องการจะหาคำตอบที่ใกล้เคียงค่าต่ำสุดวงกว้างควรใช้โปรแกรมไมโครซอฟท์เอกเซล 2010 เป็นต้นไปในการค้นหาคำตอบ และควรเลือกวิธี EV ถ้าผู้ใช้งานต้องการคำตอบที่เร็วจากผลงานวิจัยนี้แนะนำว่าผู้ใช้งานควรใช้โปรแกรมไมโครซอฟท์เอกเซล 2010 เป็นต้นไปเช่นกัน เนื่องจาก ผู้ใช้สามารถเลือกใช้วิธี GRG ในการหาคำตอบได้ โดยใช้เวลาเฉลี่ยในการค้นหาคำตอบ 1.98 วินาที ซึ่งแตกต่างจากวิธี NR ที่ใช้เวลา 0.54 วินาที และวิธี GRG 0.57 วินาที อยู่เล็กน้อยเท่านั้น แต่ประสิทธิภาพของคำตอบที่ได้จะดีกว่ามาก

จากผลการวิจัยนี้จะเห็นว่าโปรแกรมไมโครซอฟท์เอกเซลเวอร์ชันเก่า คือ 2007 ต้องให้ความระมัดระวังในการนำไปใช้งานทั้งงานสำนักงานวิจัย หรือ ใช้ในการสอนนักศึกษา เมื่อต้องการหาค่าเหมาะที่สุดด้วยด้วยโซลเวอร์ เนื่องจากการนำโปรแกรมดังกล่าวนี้ไปใช้งานอาจจะได้ผลลัพธ์ที่ไม่เป็นผลดีต่องานต่างๆ ที่กล่าวถึงได้

5. อ้างอิง

- [1] Deuflhard P. A short history of newton's method. Documenta Mathematica. 2012; Suppl ISMP: 25-30.
- [2] เดชาชัย งามประเสริฐ. โหลดโพลีอัลกอริทึมด้วยวิธีนิวตันราฟสันร่วมกับแบบจำลองของโหลดชนิดดัชนี่แรงดันไม่เป็นเชิงเส้น [วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ]. ปทุมธานี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์; 2551.

- [3] Hestenes M, Stiefel E. Methods of conjugate gradients for solving linear systems. J Res Nat Bur Stand. 1952; 49(6): 409-436.
- [4] ไพชยนต์ สิริเสถียรวัฒนา. กระบวนการค้นหาตามเส้นในทิศทางกึ่งนิวตันและเกรเดียนท์สังยุค [วิทยานิพนธ์ปริญญาโท]. นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี; 2545.
- [5] Wilde DJ, Beightler CS. Foundations of optimization. 2nd ed. Englewood Cliffs, N.J.: Prentice-Hall; 1967.
- [6] Abadie J, Carpenter J. Generalization of the Wolfe reduced gradient method to the case of nonlinear constraints. In: Fletcher R, editors. Optimization. New York: Academic Press; 1969; 37-47.
- [7] Lasdon LS, Waren AD, Jain A, et al. Design and testing of a generalized reduced gradient code for nonlinear programming, Acm T Math Software. 1978; 4(1): 34-50.
- [8] Lasdon LS. Nonlinear programming algorithms applications, software, and comparisons, Numerical Optimization [Internet]. SIAM Conference on Numerical Optimization 1984. 1984 June 12-14; Colorado, USA. 1984 [cited 2019 June 19]. p. 41-70. Available form: <http://goo.gl/iDCpnW>.
- [9] Fylstra D, Lasdon L, Watson J, et al. Design and use of the Microsoft Excel Solver, Interfaces. 1998; 28(5): 29-55.
- [10] วรธา มินเสน. การประมาณค่าดัชนีฤดูกาลในวิธีแยกส่วนประกอบด้วย GRG2. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยมหาสารคาม. 2557; Suppl: 243-249.
- [11] Jong DK, Fogel DB, Schwefel HP. A history of evolutionary computation. In: Bäck TH, Fogel DB, Michalewicz Z, editors. Handbook of Evolutionary Computation. IOP Publishing Ltd and Oxford University Press 1997; 1997.
- [12] อรนิช ไตรศักดิ์. การศึกษาการหารูปทรงที่เหมาะสมที่สุดของแพนอากาศด้วยวิธีวิวัฒนาการ [วิทยานิพนธ์ปริญญาโท]. นครราชสีมา: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี; 2559.
- [13] Surjanovic S, Bingham D [Internet]. Virtual library of simulation experiments: test functions and datasets; 2017. [cited 2019 June 19]. Available form: <https://www.sfu.ca/~ssurjano/optimization.html>.
- [14] Global Optimization Benchmarks and AMPGO [Internet]. Test functions index; 2019. [cited 2019 June 19]. Available form: http://infinity77.net/global_optimization/test_functions.html#test-functions-index.

- [15] BenchmarkFcns [Internet]. All Functions; 2019 [cited 2019 June 19]. Available form: <http://benchmarkfcns.xyz/fcns>.
- [16] อัมชานนท์ ทศนันทพรม, วฐา มินเสน และ กุณทลี ไชยสี. การพยากรณ์ด้วยเทคนิคการปรับให้เรียบโดยใช้การประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยโซลเวอร์ในโปรแกรมไมโครซอฟท์เอกเซล 2007 และ 2016. ใน: วฐา มินเสน, ภัทรี ไตรสถิต, มานะชัย รอดชื่น และ คณะ, บรรณาธิการ. การประชุมวิชาการระดับปริญญาตรีสาขาสถิติ ระดับชาติประจำปี 2562; 14 พฤษภาคม 2562; ภาควิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่; 2562. หน้า 205 – 215.

ผลของภาชนะบรรจุต่อคุณภาพของขนมขบเคี้ยวจากข้าวหอมนิล

Effect of package on Hom Nil rice snack qualities

อารัทธา แสงนาค^{1*}, กุลยา ลิ้มรุ่งเรืองรัตน์², วิชmani ยืนยงพุททกาล²,
อัญชลี เรืองเดช³, อุบลรัตน์ สิริภัทรารณ³

Arpathsra Sangnark^{1*}, Kullaya Limroongreunrat², Wichamanee Yuenyongputtakal²,
Anchalee Ruengdech³, Ubonrat Siripatravan³

¹ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

² สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

³ สาขาวิชาเทคโนโลยีทางอาหาร คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

¹Food Science and Technology Division, Faculty of Home Economics Technology,
Rajamangala University of Technology Krungthep

² Food Science Department, Faculty of Science, Burapha University

³Food Technology Department, Faculty of Science, Chulalongkorn University

*Corresponding author Tel: 09 7048 5002, E-mail: arpathsra.s@mail.rmutk.ac.th

บทคัดย่อ

แป้งข้าวหอมนิลที่มีความชื้น 15% มาผลิตเป็นขนมขบเคี้ยวชนิดพองกรอบโดยใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ชนิดสกรูเดี่ยว โดยควบคุมอุณหภูมิของบาร์เรลส่วนทำให้แป้งสุกและบาร์เรลส่วนที่เป็นทางออกของผลิตภัณฑ์เป็น 80 และ 120°C ตามลำดับ และความเร็วรอบของสกรูที่ส่งผ่านวัตถุดิบเป็น 250 รอบต่อนาที จากนั้นศึกษาเปรียบเทียบชนิดของภาชนะบรรจุผลิตภัณฑ์ 2 ชนิด คือ ภาชนะบรรจุที่ทำจากถุงพอลิโพรไพลีน (Oriented polypropylene, OPP) และถุงพอลิโพรไพลีนที่เคลือบด้วยแผ่นเพลวอะลูมิเนียม Oriented polypropylene/metalized aluminium/polypropylene (oriented PP/metalized/PP), metalized OPP (Met OPP)) ต่อคุณภาพของขนมขบเคี้ยว ซึ่งถูกเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 27°C เป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์ พบว่าขนมขบเคี้ยวมีค่าวอเตอร์แอกทิวิตี (a_w) และความชื้นเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความแข็งของขนมขบเคี้ยวลดลงตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา ($p < 0.05$) อย่างไรก็ตามขนมขบเคี้ยวที่เก็บรักษาในภาชนะบรรจุทั้ง 2 ชนิดยังคงเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค ตลอดอายุการเก็บรักษา 12 สัปดาห์

คำสำคัญ: แป้งข้าวหอมนิล ขนมขบเคี้ยว เอ็กซ์ทรูชัน พอลิโพรไพลีน

ABSTRACT

Hom Nil rice flour, moisture contents of 15%, was extruded by a single screw extruder to produce an expanded snack. Barrel temperature of transition and die zones were control at 80

Received 08-02-2019

Revised 01-07-2019

Accepted 04-07-2019

and 120°C, respectively using feed rate of screw was operated at 250 rpm. Two types of the snack packages, oriented polypropylene (OPP) and metallized oriented polypropylene (oriented polypropylene/ metalized aluminium/polypropylene (oriented PP/metalized/PP), metalized OPP (Met OPP)) packages, were used to compare the snack qualities for 12 weeks at control temperature of 27°C. As a results, water activity (a_w), and moisture content of snack were increased with preservation time, while hardness of snack was decreased ($p < 0.05$). However, snacks of the both packages were still accepted by consumer for shelf life period of 12 weeks.

Keyword: Hom Nil rice flour, Snack, extrusion, Oriented polypropylene (OPP), Metallized oriented polypropylene (Met OPP)

1. บทนำ

ขนมขบเคี้ยว (Snack) เป็นอาหารขบเคี้ยวที่มีความต้องการในการบริโภคสูงและมีแนวโน้มที่จะมีการพัฒนาผลิตภัณฑ์หลากหลายขึ้นเรื่อย ๆ เนื่องจากลักษณะของขนมขบเคี้ยวที่สามารถพกพาไปรับประทานได้สะดวก ขนมขบเคี้ยวผลิตมาจากวัตถุดิบจำพวกธัญชาติ ดังนั้นการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ไว้ได้นานควรควบคุมให้ผลิตภัณฑ์มีค่า a_w ต่ำกว่า 0.60 [1] นอกจากนี้ ขนมขบเคี้ยวเป็นผลิตภัณฑ์ประเภทพร้อมรับประทานที่มีความชื้นต่ำ จึงมีความกรอบเป็นลักษณะเด่น และสามารถเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องได้ประมาณ 2-16 สัปดาห์ ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเสื่อมเสียของผลิตภัณฑ์ได้แก่ ความชื้น แก๊สออกซิเจน และแสง โดยปกติผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวมีความชื้นเริ่มต้นประมาณ 9-13% [2] แต่เมื่อผลิตภัณฑ์มีความชื้นเพิ่มขึ้นผลิตภัณฑ์จะเริ่มไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค เนื่องจากมีความกรอบลดลง ส่วนแก๊สออกซิเจนเป็นปัจจัยที่ทำให้เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันและการเหม็นหืนของไขมัน โดยเฉพาะในผลิตภัณฑ์ที่ผ่านการทอดหรือมีไขมันสูง จึงนิยมเติมแก๊สไนโตรเจนแทนที่แก๊สออกซิเจนในการบรรจุเพื่อช่วยลดการเหม็นหืน นอกจากนี้ แสงยัง

ช่วยเร่งปฏิกิริยาออกซิเดชันของไขมันอีกด้วย [3, 4] ดังนั้น บรรจุภัณฑ์ที่นำมาใช้ควรมีสมบัติที่ป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำและแก๊สออกซิเจนได้ดี และควรเป็นบรรจุภัณฑ์ทึบแสง เนื่องจากสามารถป้องกันการซึมของไขมัน (Grease proof) มีความแข็งแรงสามารถทนต่อกระบวนการเติมแก๊สไนโตรเจนได้ รวมทั้งสามารถปิดผนึกได้สนิทและไม่รั่วซึมง่าย พลาสติกโพลิโพรพิลีน (Polypropylene, PP) เป็นพลาสติกที่มีค่าความหนาแน่นประมาณ 0.900 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร มีค่าอัตราการซึมผ่านของไอน้ำต่ำ (Water vapor transmission rate, WVTR = 0.25 กรัมต่อตารางเซนติเมตรต่อวัน ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$) ที่อุณหภูมิ 37.8 °C และความชื้นสัมพัทธ์ 90%) แต่มีค่าการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจนสูง (ค่า O_2 transmission = 2300-3100 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อตารางเมตรต่อวัน ($\text{cm}^3 \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{day}^{-1}$) ที่อุณหภูมิ 23°C) สามารถป้องกันแสงได้ปานกลาง มีความทนทานต่อผลิตภัณฑ์ที่มีกรดและด่างเจือจาง แต่ไม่มีความทนทานต่อสารประกอบไฮโดรคาร์บอนที่มีโครงสร้างเป็นวง [5 – 10] สำหรับ OPP เป็นพลาสติกที่ถูกทำให้มีการจัดเรียงตัวของโมเลกุลของโพลิโพรพิลีนมอนอเมอร์ใหม่และเคลือบด้วย

โพลีเมอร์ของไวนิลิดีนคลอไรด์ (Vinylidene chloride polymer) ส่งผลให้สามารถลดอัตราการซึมผ่านของไอน้ำและแก๊สต่าง ๆ ได้ดีขึ้น และมีค่า O_2 transmission = $1550-2500 \text{ cm}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{day}^{-1}$ [10] ส่วน Met OPP เป็นพลาสติกประเภท OPP ที่เคลือบด้วยเพลาอะลูมิเนียมอีกชั้นหนึ่ง เพื่อทำให้มีสมบัติป้องกันแสงได้ และมีค่า $WVTR = 1.5 \text{ gm}^2 \cdot \text{day}^{-1}$ และมีค่า O_2 transmission = $19-160 \text{ cm}^3 \cdot \text{m}^2 \cdot \text{day}^{-1}$ ที่อุณหภูมิ 38°C และความชื้นสัมพัทธ์ 90% [7, 10] ในการศึกษาอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์อาหารเข้าที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง พบว่า ผู้บริโภคไม่ยอมรับผลิตภัณฑ์หลังการเก็บรักษา 8 สัปดาห์ เนื่องจากผลิตภัณฑ์เริ่มมีกลิ่นหืน [11] อย่างไรก็ตาม ชนิดของบรรจุภัณฑ์ ซึ่งประกอบด้วยฟิล์ม 3 ชั้น โดยบรรจุภัณฑ์ชนิดที่ 1 ประกอบด้วย OPP/metalized/PP และ บรรจุภัณฑ์ชนิดที่ 2 OPP/metalized/PE สามารถเก็บรักษาผลิตภัณฑ์อาหารเข้าพร้อมบริโภคได้ทั้งจากธรรมชาติที่อุณหภูมิ 30°C ได้เป็นระยะเวลา 30 และ 60 วันตามลำดับ [12] เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาและยืดอายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวเพื่อสุขภาพ งานวิจัยนี้จึงศึกษาผลของภาชนะบรรจุ 2 ชนิด คือ OPP และ Met OPP ต่อคุณภาพของขนมขบเคี้ยวจากข้าวหอมนิลที่เก็บรักษาไว้เป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

ข้าวหอมนิลมาบดให้ละเอียดและร่อนผ่านตระแกรงขนาด 80 เมช จากนั้นปรับความชื้นของแป้งข้าวหอมนิลให้มีความชื้น 15% (ทำโดยใช้หลักการของสมดุลมวล คำนวณปริมาณน้ำที่ต้องเติมลงในแป้งข้าวหอมนิลเพื่อให้ได้ความชื้นตามต้องการ จากนั้นเติมน้ำที่คำนวณได้โดยใช้ฟ็อกกี้ และผสมน้ำ

กับแป้งข้าวหอมนิล เพื่อให้น้ำกระจายในแป้งข้าวหอมนิลได้อย่างทั่วถึง โดยใช้เครื่องผสม KitchenAid เป็นเวลา 5 นาที) เพื่อนำมาผลิตขนมขบเคี้ยวชนิดพองกรอบโดยใช้เครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ชนิดสกรูเดียว โดยควบคุมอุณหภูมิของบาร์เรลส่วนทำให้แป้งสุก (Transition zone) และบาร์เรลส่วนที่เป็นทางออก (Die zone) ของผลิตภัณฑ์เป็น 80 และ 120°C ตามลำดับ และความเร็วรอบของสกรูที่ส่งผ่านวัตถุดิบเป็น 250 รอบต่อนาที และตัดขนมขบเคี้ยวให้มีความยาว 10 เซนติเมตร [13] โดยใช้ใบมีดที่ประกอบอยู่ด้านหน้ารูเปิดของเครื่องเอ็กซ์ทรูเดอร์ จากนั้นนำขนมขบเคี้ยวที่ได้มาบรรจุในบรรจุภัณฑ์ 2 ชนิด คือ ถุงพลาสติกชนิด OPP และ Met OPP และปิดผนึกบรรจุภัณฑ์แบบสุญญากาศ เก็บผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิห้อง ($27 \pm 2^\circ\text{C}$) เป็นเวลาประมาณ 12 สัปดาห์ สุ่มตัวอย่างผลิตภัณฑ์มาประเมินคุณภาพทั้งสองสัปดาห์ดังนี้

2.1 ปริมาณความชื้น [14]

นำขนมขบเคี้ยวมาหั่นออกเป็นชิ้นเล็ก ๆ ซึ่งให้น้ำหนักประมาณ 2 กรัม (m) บรรจุในภาชนะอะลูมิเนียมสำหรับหาความชื้น และอบที่อุณหภูมิ 105°C นาน 3 ชั่วโมง จากนั้นทิ้งไว้ให้เย็นในโถดูดความชื้น อบซ้ำจนได้ผลต่างของน้ำหนักที่ชั่งสองครั้งติดต่อกันไม่เกิน 1-3 มิลลิกรัม จะได้น้ำหนักที่เหลือจากการอบ (m_2) คำนวณปริมาณความชื้นโดยใช้น้ำหนักเปียก ปริมาณความชื้น (%) = $(m - m_2) / m \times 100$

2.2 ลักษณะเนื้อสัมผัส

วัดค่าความแข็ง (Hardness) ของขนมขบเคี้ยว ที่มีความยาว 10 เซนติเมตร โดยใช้เครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Stable micro system รุ่น TA-XT2) ใช้หัว 3PB/HDP อัตราเร็วในการเคลื่อนที่ของหัววัดก่อนการทดสอบ 2 มิลลิเมตรต่อวินาที ขณะทำ

การทดสอบเท่ากับ 3 มิลลิเมตรต่อวินาที และ อัตราเร็วหลังการทดสอบเท่ากับ 10 มิลลิเมตรต่อวินาที

2.3 ค่าวอเตอร์แอกติวิตี (a_w)

วิเคราะห์ค่าวอเตอร์แอกติวิตี โดยใช้ Water activity meter (Novasina รุ่น MS1)

2.4 ปริมาณกรดไทโอบาร์บิทูริก (Thiobarbituric Acid, TBA)

วิเคราะห์การเกิดออกซิเดชันของขนมขบเคี้ยว โดยใช้ปริมาณ TBA [15] ซึ่งทำโดยชั่งตัวอย่างจำนวน 10 กรัม เติมน้ำกลั่น 50 มิลลิลิตร นำไปผสมให้เข้ากันด้วยเครื่องปั่น แล้วเทตัวอย่างใส่หลอดกลั่น ล้างตัวอย่างที่เหลือในเครื่องปั่นด้วยน้ำกลั่นจำนวน 47.5 มิลลิลิตร แล้วนำมาเทรวมกันในหลอดกลั่น เติมน้ำสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 4 โมลาร์ จำนวน 2.5 มิลลิลิตร เพื่อให้ได้ความเป็นกรด-เบส 1.5 จากนั้นเติมน้ำป้องกัน การเกิดฟองเล็กน้อย แล้วต่อหลอดกลั่นเข้ากับชุดกลั่น ให้ความร้อนแก่ตัวอย่างด้วยการต้มโดยใช้เตาไฟฟ้า กลั่นจนได้ของเหลว 50 มิลลิลิตร (ภายใน 10 นาทีหลังเดือด) ปิดเตาของเหลวที่ได้มา 5.0 มิลลิลิตร ใส่หลอดที่มีฝาปิด เติมน้ำสารละลายกรดไทโอบาร์บิทูริกจำนวน 5.0 มิลลิลิตร ปิดฝา เขย่า แล้วนำไปต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา 35 นาที เทน้ำกลั่น 5.0 มิลลิลิตรใส่ในหลอดทดลองแทนตัวอย่าง (Blank) นำไปต้มพร้อมกัน หลังจากครบ 35 นาที แล้วนำไปทำให้เย็นจนมีอุณหภูมิห้อง (ภายในระยะเวลา 10 นาที) นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นแสง 538 นาโนเมตร คำนวณปริมาณกรดไทโอบาร์บิทูริกตามสมการปริมาณกรดไทโอบาร์บิทูริก = $7.8 \times$ ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่นแสง 538 นาโนเมตร (มิลลิกรัมมาโลนาดีไฮด์/กิโลกรัม)

2.5 การวัดค่าสี

นำผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวมาวัดค่าสีด้วยเครื่องวัดสี Hunter lab รุ่น Miniscan XE Plus เตรียมตัวอย่าง โดยนำขนมขบเคี้ยวที่มีความยาว 5 เซนติเมตร วางลงในถ้วยสำหรับวัดค่าสี โดยวางตัวอย่างชิดกันไม่ให้มีช่องว่างแล้วนำมาวัดค่าสี รายงานเป็นค่าความสว่าง (L^*) ค่าความเป็นสีแดง-เขียว (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง-น้ำเงิน (b^*)

2.6 การยอมรับประสาทสัมผัส

ประเมินการยอมรับทางประสาทสัมผัสของขนมขบเคี้ยวที่บรรจุในถุงพลาสติกชนิด OPP และ Met OPP ทุก ๆ 4 สัปดาห์เป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์ โดยวิธี 9-Point hedonic scale โดย 1 คะแนน หมายถึง ไม่ชอบมากที่สุด และ 9 คะแนน หมายถึง ชอบมากที่สุด โดยใช้ผู้ทดสอบที่ไม่ได้รับการฝึกฝน 30 คน

วางแผนการทดลองแบบ Completely randomized design (CRD) ทดลอง 3 ซ้ำ และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's new multiple range test (DMRT) ส่วนการยอมรับทางประสาทสัมผัสวางแผนการทดลองแบบ RCBD (Randomized complete block design) เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's new multiple range test (DMRT) ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

การศึกษานิตของบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสมในการเก็บรักษาลักษณะขนมขบเคี้ยวจากข้าวหอมนิล ทำโดยแปรชนิดของบรรจุภัณฑ์ที่ใช้บรรจุผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยว 2 ชนิด คือ ถุงพลาสติกชนิด OPP และ Met OPP บรรจุขนมขบเคี้ยวในบรรจุภัณฑ์ทั้ง 2 ชนิด และปิดผนึกบรรจุภัณฑ์แบบสุญญากาศ

เก็บผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิห้อง ($27 \pm 2^{\circ}\text{C}$) เป็นเวลา 12 สัปดาห์ สุ่มตัวอย่างผลิตภัณฑ์มาประเมินคุณภาพทุก 2 สัปดาห์ ซึ่งบรรจุภัณฑ์ OPP สมบัติใส ทนความร้อนสูง เหมาะสมหรับใช้บรรจุอาหารร้อน และป้องกันการซึมผ่านของแก๊สและไอน้ำได้ดี สำหรับบรรจุภัณฑ์ Met OPP นั้นผลิตจากการเคลือบ OPP ด้วยไอของ อะลูมิเนียม จึงทำให้มีความมันวาว มีสมบัติคล้ายกับ OPP และสามารถป้องกันแสงได้เนื่องจากมี อะลูมิเนียมเคลือบอยู่ จึงเหมาะสำหรับอาหารที่มีความไวต่อแสง เช่น อาหารทอด ขนมขบเคี้ยว ฯลฯ จากผลการทดลองพบว่า ผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวที่ บรรจุในบรรจุภัณฑ์ทั้ง 2 ชนิด มีค่า a_w และปริมาณ ความชื้นเพิ่มขึ้นตลอดการเก็บรักษา 12 สัปดาห์อย่าง มีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) แสดงดังตารางที่ 1 โดย ผลิตภัณฑ์ที่บรรจุใน OPP มีค่า a_w เพิ่มขึ้นจาก 0.46 เป็น 0.62 และมีปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้นจาก 9.27% เป็น 9.80% ในขณะที่ผลิตภัณฑ์ที่บรรจุใน Met OPP มีค่า a_w อยู่ในช่วง 0.475-0.630 และมีปริมาณ ความชื้นอยู่ในช่วง 9.17-9.44% การเพิ่มขึ้นของ ค่า a_w และปริมาณความชื้นนั้นเกิดขึ้นเนื่องจาก สภาพบรรยากาศในการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์มีปริมาณ ความชื้นสัมพัทธ์ประมาณ 80% ซึ่งสูงกว่าปริมาณ ความชื้นสัมพัทธ์ในชั้นอาหาร ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ ของไอน้ำในบรรยากาศสู่ชั้นอาหาร ถึงแม้ว่า ถุงพลาสติกชนิด OPP และ Met OPP จะมีสมบัติ ป้องกันการซึมผ่านของแก๊สและไอน้ำได้ดี แต่ก็ไม่สามารถป้องกันการซึมผ่านของไอน้ำได้ทั้งหมด ดังนั้นจึงมีไอน้ำในบรรยากาศบางส่วนสามารถซึมผ่าน ไปยังชั้นอาหารได้ ซึ่งเรียกกระบวนการนี้ว่า การดูดซับความชื้นของอาหาร จากผลการทดลอง พบว่าค่า a_w ของผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวจากข้าวหอม นิลที่บรรจุในถุงพลาสติกชนิด OPP และ Met OPP

มีค่าเพิ่มขึ้น 33.34 และ 32.63% ตามลำดับ นอกจากนี้ ปริมาณความชื้นของขนมขบเคี้ยวจาก ข้าวหอมนิลที่บรรจุในถุงพลาสติกชนิด OPP และ Met OPP เพิ่มขึ้น 5.72 และ 2.94% ตามลำดับ เช่นกัน ทั้งนี้เนื่องจาก การดูดซับความชื้นของ อาหารนั้นจะรับความชื้นในบรรยากาศเข้าไปอยู่ เฉพาะบริเวณผิวนอกของอาหาร โดยน้ำที่เพิ่มเข้าไป จะไม่เกิดการสร้างพันธะกับสารในอาหารหรือเกิดขึ้น เล็กน้อย จึงจัดเป็นปริมาณน้ำอิสระในชั้นอาหาร (Free water) ซึ่งส่งผลให้อาหารมี a_w และความชื้น เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตาม ขนมขบเคี้ยวที่บรรจุใน พลาสติกชนิด Met OPP มีการเพิ่มขึ้นของค่า a_w และความชื้น ต่ำกว่าขนมขบเคี้ยวที่บรรจุในพลาสติก ชนิด OPP ทั้งนี้อาจเนื่องมาจาก พลาสติกชนิด Met OPP มีค่า WVTR น้อยกว่า พลาสติกชนิด OPP [5-10]

การวิเคราะห์ค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์ พบว่า ผลิตภัณฑ์ที่บรรจุในถุงพลาสติกทั้ง 2 ชนิด มีค่าความแข็งลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดย ค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์มีค่าแปรผกผันกับค่า a_w และปริมาณความชื้นของอาหาร ทั้งนี้มีสมบัติเป็น สารที่สามารถลดค่าอุณหภูมิทรานซิชัน (T_g) ของ อาหารได้ (Plasticizer) เมื่ออาหารมีปริมาณความชื้น เพิ่มมากขึ้นส่งผลให้อุณหภูมิทรานซิชันของอาหาร ลดต่ำลง ทำให้อาหารมีลักษณะนิ่มขึ้นหรือเรียกว่า สภาวะเหนียวคล้ายยาง (Rubbery) ทำให้ค่า ความแข็งของผลิตภัณฑ์ตัวอย่างลดลง ซึ่งถ้าอาหารมี ความชื้นสูงมากขึ้นเรื่อย ๆ จะทำให้ผลิตภัณฑ์มี ลักษณะนิ่ม [16, 17] และอาจไม่เป็นที่ยอมรับของ ผู้บริโภค อย่างไรก็ตาม ขนมขบเคี้ยวที่เก็บรักษาใน ถุงพลาสติกชนิด Met OPP มีค่าความแข็งลดลงเพียง 16.91% ในขณะที่ ขนมขบเคี้ยวที่เก็บรักษาใน ถุงพลาสติกชนิด OPP มีค่าความแข็งลดลงถึง

27.95% ทั้งนี้เนื่องมาจากพลาสติกชนิด OPP มีค่า WVTR เป็น 16.67 เท่า ของ Met OPP

ตารางที่ 2 แสดงค่า TBA ของผลิตภัณฑ์ที่เก็บรักษาไว้เป็นเวลา 12 สัปดาห์ โดยค่า TBA แสดงถึงการเกิดกลิ่นหืนของอาหาร โดยวิเคราะห์ปริมาณของสาร Malonaldehyde ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์อันดับ 2 (Secondary product) ที่เกิดจากปฏิกิริยาออกซิเดชันของอาหาร ซึ่งเป็นสารสำคัญทำให้เกิดกลิ่นหืนของอาหาร ทำให้อาหารไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค ซึ่งการเกิดกลิ่นหืนนั้นจะเกิดขึ้นเมื่อมีน้ำมันหรือไขมันเป็นองค์ประกอบของอาหาร โดยน้ำมันจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับแก๊สออกซิเจนในอากาศทำให้เกิดสารอนุมูลอิสระแบบปฏิกิริยาลูกโซ่ และเมื่อมีอนุมูลอิสระมากขึ้นก็ทำให้เกิดกลิ่นหืนขึ้น แต่จากผลการทดลองพบว่าผลิตภัณฑ์ที่เก็บรักษาในถุงพลาสติก OPP และ Met OPP และเก็บไว้เป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์นั้น มีค่า TBA ไม่แตกต่างจากผลิตภัณฑ์เริ่มต้นการทดลอง นั้นแสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์ที่บรรจุในถุงพลาสติกทั้ง 2 ชนิด ไม่เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา 12 สัปดาห์ นอกจากนี้ การเพิ่มขึ้นของ TBA ของขนมขบเคี้ยวที่บรรจุในภาชนะบรรจุทั้งสองชนิดมีค่าใกล้เคียงกันหลังจากเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์ คือ TBA เพิ่มขึ้นประมาณ 0.01-0.02 mg Malonaldehyde/kg ทั้งนี้อาจเนื่องจากผลิตภัณฑ์ได้จากเครื่องเอกซ์ทรูเดอร์นั้นผลิตจากข้าวหอมนิลเพียงชนิดเดียว ซึ่งข้าวหอมนิลนั้นมีไขมันเป็นองค์ประกอบเพียงเล็กน้อย จึงทำให้ไม่มีสารตั้งต้นในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน ทำให้ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่า TBA ของผลิตภัณฑ์

การเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวในถุงพลาสติกทั้ง 2 ชนิด เป็นเวลา 12 สัปดาห์ ส่งผลให้

ค่าความสว่าง (L^*) ของผลิตภัณฑ์ลดลงเล็กน้อย เนื่องจากผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) ในระหว่างการเก็บรักษา ซึ่งผลของปฏิกิริยาเมลลาร์ดทำให้เกิดสารประกอบที่ให้สีน้ำตาล ส่งผลให้ค่าความสว่างของผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวลดลง [18] แต่ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงของค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) ดังตารางที่ 3 จากผลการยอมรับทางประสาทสัมผัสของผู้บริโภคที่ทดสอบชิมตัวอย่างผลิตภัณฑ์ที่เก็บไว้ในถุงพลาสติกชนิด OPP และ Met OPP พบว่า เมื่อเวลาผ่านไป 12 สัปดาห์ ผู้บริโภคให้คะแนนการยอมรับในผลิตภัณฑ์ที่เก็บในถุงพลาสติกชนิด Met OPP ในด้านสี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบรวมไม่แตกต่างกับผลิตภัณฑ์ที่เริ่มต้นทดลอง ในขณะที่คะแนนการยอมรับด้านเนื้อสัมผัสและความชอบรวมของตัวอย่างที่เก็บในถุงพลาสติกชนิด OPP มีค่าแตกต่างกันเล็กน้อยตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา แต่อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ การใช้ถุงพลาสติกชนิด OPP และ Met OPP เก็บรักษาผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวให้ผลการทดลองด้านต่าง ๆ ไม่แตกต่างกัน (ตารางที่ 4)

4. สรุปผลการทดลอง

การบรรจุผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวจากข้าวหอมนิลในถุงพลาสติกชนิด Met OPP และ ปิดผนึกแบบสุญญากาศ ทำให้น้ำมันขบเคี้ยวดังกล่าวมีค่าความแข็งและค่าความสว่างลดลงเพียงเล็กน้อย ในขณะที่ค่าความชื้น และ TBA ของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยเท่านั้น นอกจากนี้ ผลิตภัณฑ์ยังคงเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคหลังจากเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 12 สัปดาห์ ส่วนถุงพลาสติกชนิด OPP สามารถป้องกันการซึมผ่านของแก๊สออกซิเจน

ได้ค่อนข้างต่ำ จึงอาจไม่เหมาะกับการบรรจุแบบ
สุญญากาศ

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับเงินสนับสนุนการดำเนินการ
วิจัยจากโครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษา
งบประมาณปี พ.ศ. 2554 สำนักงานคณะกรรมการ
การอุดมศึกษา (สกอ.) กลุ่มเรื่องการเพิ่มมูลค่าสินค้า
เกษตรเพื่อการส่งออกและลดการนำเข้า

6. อ้างอิง

- [1] อีรพร คงบังเกิด. การปนเปื้อนของอาหารจาก
จุลินทรีย์และการเจริญในอาหาร การเสื่อมเสีย
และการถนอมอาหารชนิดต่างๆ. เอกสาร
ประกอบการสอน: จุลชีววิทยาอุตสาหกรรม
อาหาร (103311). ภาควิชาอุตสาหกรรมเกษตร
คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและ
สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร; 2545.
- [2] Han YJ, Tran TTT, Le WM. Corn snack with
high fiber content: Effects of different fiber
types on the product quality. LWT- Food
Sci Tech. 2018;96:1-6.
- [3] ศศิเกษม ทองยงค์, พรณี เดชกำแหง. เคมี
อาหารเบื้องต้น. กรุงเทพฯ: โอ เอส พริ้นติ้ง
เฮาส์; 2530.
- [4] ปุ่น คงเจริญเกียรติ, สมพร คงเจริญเกียรติ.
บรรจุภัณฑ์อาหาร. กรุงเทพมหานคร: แพค
เมทส์; 2541.
- [5] Hernandez RJ, Selke SEM, Culter JD. Plastics
Packaging: Properties, Processing,
Applications and Regulations. Cincinnati:
Hanser Gardner Publications, Inc; 2000.
- [6] Robertson GL. Structure and related
properties of plastic polymers. In
Robertson GL, editor. Food Packaging:
Principles and Practice. 2nd ed. Florida:
Taylor & Francis Group, LLC; 2006.
- [7] Biron M. Thermoplastics and
thermoplastic composites. Burlington:
Elsevier, Ltd; 2007.
- [8] Odian G. Principles of polymerization. 4th
ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc.;
2004.
- [9] Keller LE. 1991. Oriented polypropylene
film structure. United states Patent US
5019447. 1991 May 28.
- [10] Oxygen transmission rate Online
Resources [Internet]. Tucson: Poly Print
Inc. [updated 2008; cited 2019 June 13]
Available from: <http://www.polyprint.com/flexographic-otr.htm>.
- [11] เยาวดี คุปตะพันธ์, ดวงจันทร์ เสงส์สวัสดิ์,
วันเพ็ญ มีสมญา และคณะ. การประเมิน
คุณภาพทางโภชนาการและศึกษาอายุการเก็บ
ของผลิตภัณฑ์อาหารเข้าที่มีคุณค่าทาง
โภชนาการสูง: รายงานผลการวิจัยฉบับ
สมบูรณ์. กรุงเทพมหานคร: สถาบันวิจัยและ
พัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์; 2546.
- [12] รัชดา สาดตระกูลวัฒนา. การพัฒนาอาหารเข้า
พร้อมบริโภคอัดแท่งจากธัญพืช [วิทยานิพนธ์
ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต].
กรุงเทพมหานคร: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย;
2542.

- [13] Sangnark A, Limroongreungrat K, Yuenyongputtakal W, et al. Effect of Hom Nil rice flour moisture content, barrel temperature, and screw speed of a single screw extruder on snack properties. *International Food Research Journal*. 2015; 22(5):2155-61.
- [14] AOAC. *Official Method of Analysis*. 17th ed. Arillington, Virginia: The Association of Official Analytical Chemists; 2000.
- [15] Pearson D. *Laboratory Techniques in Food Analysis*. New York: Wiley; 1976.
- [16] Rowland SP. *Water in Polymers*, ACS Symposium. Series 127. Washington, D.C.: American Chemical Society; 1980.
- [17] Labuza T, Roe K, Payne C, et al. Storage stability of dry food systems: Influence of state changes during drying and storage. In: *Drying 2004 - Proceedings of the 14th International Drying Symposium (IDS 2004)*; 2004 August 22-25; São Paulo, Brazil. Campinas: State Univ., Chemical Engineering School; 2004. p. 48-68.
- [18] Bastos DM, Monaro É, Siguemoto É, et al. Maillard reaction products in processed food: pros and cons. In Valdez B., editor. *Food industrial processes-methods and equipment*. Rijeka: IntechOpen; 2012. p. 281- 300.

Synthesis, characterization and antimicrobial activity of organometallic Ru(II) complex containing phenylthiourea ligand

Rachna Neang¹, Parichad Chuklin¹, Saowanit Saithong¹,
Sauwalak Phongpaichit², Luksamee Vittaya³, Nararak Leesakul^{1*}

¹Department of Chemistry and Center for Innovation in Chemistry, Faculty of Science,
Prince of Songkla University, Hat Yai, Songkhla

²Natural Products Research Center and Department of Microbiology, Faculty of Science, Prince of
Songkla University, Hat Yai, Songkhla 90110, Thailand

³Faculty of Science and Fisheries Technology, Rajamangala University of Technology Srivijaya,
Sikao, Trang

* Corresponding author: Tel.: 0 7428 8421 , Fax.: 0 7455 8841

E-mail: nararak.le@psu.ac.th

Abstract

A novel organometallic ruthenium(II)-*p*-cymene complex, [Ru(η^6 -*p*-cymene)(ptu)₂Cl]SH, where ptu= *N*-phenylthiourea, was synthesized. Its structure was characterized by single crystal x-ray diffraction, elemental analysis and spectroscopic techniques (¹H-NMR and FTIR). The geometrical structure of the complex was tetrahedral, distorted by η^6 π -bonding to the *p*-cymene ring, with one chloro ligand and two molecules of ptu ligand. Antibacterial and antifungal activities were investigated. The [Ru(η^6 -*p*-cymene)(ptu)₂Cl]SH complex produced MIC/MBC values of 32/32 μ g/mL against methicillin resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA), *Staphylococcus aureus* ATCC25923 (SA) and flucytosine-resistant *Cryptococcus neoformans* ATCC90113 flucytosine – resistant, CN90113 but apparently exhibited no antifungal against *Microsporum gypseum* clinical isolate.

Keywords: Ruthenium(II), Thiourea derivative, Antimicrobial activity

1. INTRODUCTION

The pathogenic bacteria *Staphylococcus aureus* (SA), Methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA) and *Escherichia coli* (EC) have a great impact on human health. Microorganisms with extensive resistance to antimicrobial agents cause serious health concerns in the global fight against infectious diseases [1-3].

Increasingly, more effective, less toxic treatments with wider ranges of activity are being developed from research in pharmaceutical inorganic chemistry, which is a branch of coordination chemistry [4, 5]. Considered to be versatile

compounds, organometallic ruthenium (II) complexes have been extensively studied. Ru(II) can be coordinated through a strong bond with thiol groups [6] and can also form stable complexes with several types of monodentate nitrogen (N), oxygen (O) sulfur (S), and phosphine (P) donor ligands as well as with bidentate (S,O-; O,O-; N,O-; N,N-) ligands [7-9]. Ru (II) complexes acquire redox potential and permit electron transfer and ligand-ligand exchange due to the various +2, +3 and +4 oxidation states of the complexes [10, 11]. Its inertness towards displacement in arene substitution makes the ruthenium (II) ion stable in the

Received 06-06-2019

Revised 19-07-2019

Accepted 22-07-2019

+2 oxidation state [7]. Geometrically diverse Ru (II) complexes with a hydrophobic arene ligand and a hydrophilic metal center [12] can be stable in air [13, 14]. The Ru(II) complexes, $[\text{Ru}(\eta^6\text{-p-cymene})\text{X}_2]_2$ (X=Cl, I or NCS) and $[\text{H}_4\text{Ru}_4(\eta^6\text{-p-benzene})_4]^{2+}$ [13] have been reported biologically active.

Phenylthiourea is a derivative of thiourea. Its biological activities and applications were reported to be antiviral, antibacterial, antimalarial, antimicrobial, antitumor [15-17], and antifungal [18, 19]. Phenylthiourea and Ru(II) complexes are interesting compounds that present advantageous biotic activity. They are emerging in the pharmaceutical and medical fields through a variety of evolving processes.

Here we report an organometallic ruthenium compound with a half-sandwich, tetrahedral geometry distorted by $\eta^6 \pi$ -bonding to the phenyl ring on Ru(II). The compound comprises one chloro ligand and two molecules of ptu ligand. The complex is evolving as a promising antibacterial and antifungal agent.

2. MATERIALS AND METHODS

Material

All chemicals purchased for this study were used as received. $[\text{RuCl}(\eta^6\text{-p-cymene})(\mu\text{-Cl})_2]$ was obtained from Merck. Chloroform, dichloromethane, acetonitrile and diethyl ether solvents were reagent grade purchased from RCI Labscan.

2.1 Instrumentation

The melting point of the obtained complex was determined using Thomas-Hoover, Unimelt 0-360 °C equipment. Elemental analysis data was acquired by CHNS-O Analyzer, (CEvInstruments Flash EA 1112 Series, Thermo Quest, Italy). FTIR spectra were produced between 4000 – 400 cm^{-1} on a BX Perkin Elmer FTIR spectrophotometer. Measurements were performed on samples pressed into KBr

pellets. ^1H -NMR data were acquired on Varian BRUKER AVANCE 300 FT-NMR equipment and 300 MHz spectrometer using MeOH-d solvent. Tetramethylsilane ($\text{Si}(\text{CH}_3)_4$) was used as the internal standard. The absorption of the complex was recorded in the range of 200 – 400 nm on the Specord S100 model using a standard cuvette with a path length of 1 cm. Deuterium and tungsten were used as light sources for ultraviolet and visible regions, respectively.

A single crystal of $[\text{Ru}(\text{p-cymene})(\text{ptu})_2\text{Cl}]\text{SH}$ was analyzed with a Bruker APEX-II CCD diffractometer using graphite-monochromated Mo $\text{K}\alpha$ radiation ($\lambda = 0.71073 \text{ \AA}$). The diffraction pattern was formed from 33925 reflections. The raw data were interpreted by SMART, SAINT v8.34A and SADABS software [20] and the structure was solved by SHELXS [21]. All non-hydrogen was refined by the anisotropic thermal parameters. A riding model was used to refine calculations with all hydrogen atoms placed in ideal positions. The materials and molecular graphics for publication were prepared with the WinGXv2014.1 [22] and Mercury3.6 [23] programs. Crystallographic data of $[\text{Ru}(\text{p-cymene})(\text{ptu})_2\text{Cl}]\text{SH}$ were placed in the Cambridge Crystallographic Data Center and can be provided on request, using the access code CCDC1917489, via http://www.ccdc.cam.ac.uk/data_request/cif (or from the Cambridge Crystallographic Data Centre, 12 Union Road, Cambridge CB21EZ, U.K.; fax: +44 1223 336 033 or email deposit@ccdc.cam.ac.uk). The X-ray data are presented in the supplementary data.

2.2 Synthesis pathway of $[\text{Ru}(\text{p-cymene})(\text{ptu})_2\text{Cl}]\text{SH}$ complex

The novel complex of $[\text{Ru}(\text{p-cymene})(\text{ptu})_2\text{Cl}]\text{SH}$ was synthesized by the reaction between *N*-phenylthiourea (ptu) with dichloro (p-cymene) ruthenium (II) dimer in a typical one-pot process, using

a solution of dichloro (*p*-cymene) ruthenium(II) dimer (0.306 g, 0.5 mmol) and *N*-phenylthiourea (ptu) (0.182 g, 1.0 mmol) in 20 ml of dichloromethane. The solution was left to evaporate at room temperature to reduce the mixture volume and was crystallized by adding 3 ml of acetonitrile. The obtained dark orange crystal was filtered and washed three times with chloroform (3 ml x 3). Yield: 43.45%. Melting point: 168 – 170 °C. Anal Calcd. For $\text{RuC}_{24}\text{H}_{35}\text{N}_4\text{S}_3\text{ClO}_2$ (644.59): C, 45.75; H, 5.48; N, 8.69. Found: C, 45.85; H, 4.78; N, 8.83. IR: 2970 (vs² C-H), 1529 (vC=C), 1328 (vC_{ph}-N), 3219 (vN-H), 698 (vC=S), 891 (vC-H bending of para disubstituted benzene), 510 ($\delta\text{Ru-S}$) cm^{-1} . ¹H NMR (300 MHz, CD₃OH) 8 signals: δ (ppm): 7.47 (t, 2H, JHH = 7.5 Hz), 7.35 (t, 4H, JHH = 7.5 Hz), 7.26 (d, 4H, JHH = 7.5 Hz), 5.64 (d, 2H, JHH = 5.5 Hz), 5.52 (d, 2H, JHH = 5.5 Hz), 2.93 (m, 1H, JHH = 7.0 Hz), 2.23 (s, 3H), 1.33 (d, 6H, JHH = 7.0 Hz).

2.3 Antimicrobial assay

The synthesized [Ru (*p*-cymene)(ptu)₂Cl]SH compound was tested against methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA) SK1, *Staphylococcus aureus* ATCC25923, and *Escherichia coli* ATCC25922 using a colorimetric modification method of the Clinical and laboratory standards institute (CLSI) M07-A9 [24], slightly modified. The testing compound was prepared in dimethyl sulfoxide (DMSO). Minimal inhibitory concentration (MIC) represents the lowest concentration of synthesized compound with violet color of resazurin indicating

growth inhibition. The test media at MIC concentration and higher were dropped on nutrient agar plate and incubated under appropriate conditions. Minimal bactericidal concentration (MBC) was verified as no growth at the lowest concentration of the test compound. Vancomycin and gentamicin were used as the positive controls of antibacterial inhibition.

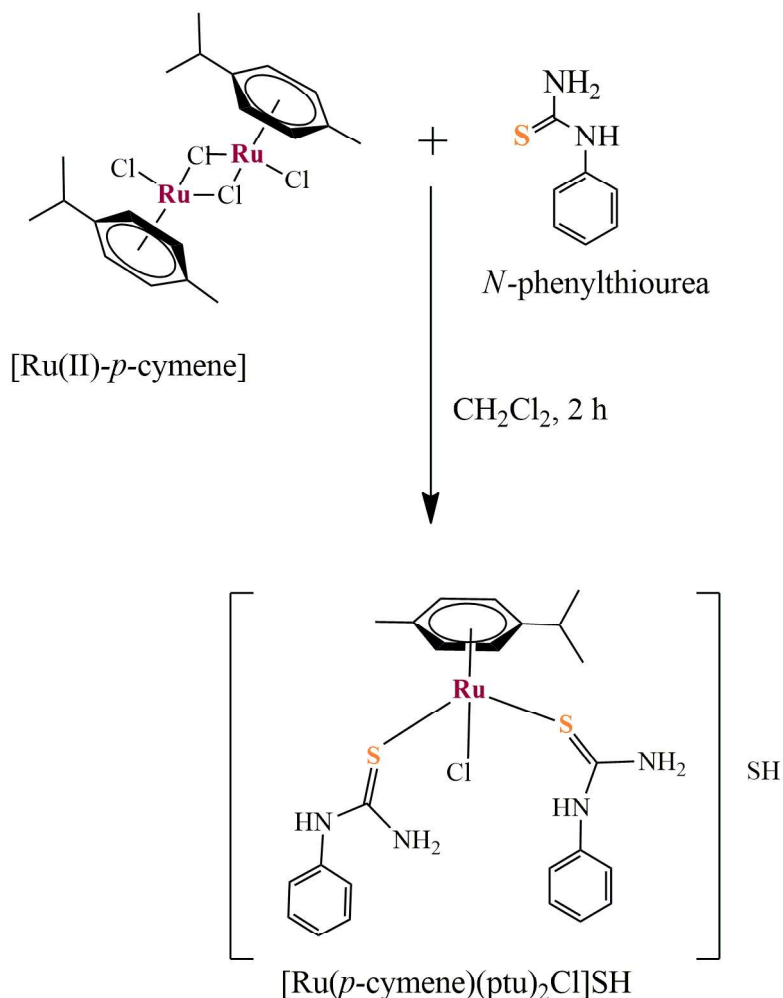
2.4 Antifungal assay

The MIC of the synthesized compound was tested against yeast (*Cryptococcus neoformans* ATCC90113), using a modification of the microbroth dilution CLSI M27-A3 [25] and against a clinical isolate of *Microsporum gypseum* MU-SH4, using a modification of the microbroth dilution CLSI M38-A2 [26]. The plates were incubated for 48 h at 35 °C for *C. neoformans* and at room temperature for *M. gypseum* (MG). The streaking method on Sabouraud's dextrose agar was taken to determine the minimal fungicidal concentration (MFC) of the [Ru(*p*-cymene)(ptu)₂Cl]SH compound. A clinical standard of Amphotericin B was used as positive inhibitory control for yeast and miconazole for *M. gypseum* testing.

3. RESULTS AND DISCUSSION

Synthesis and characterization

The novel [Ru(*p*-cymene)(ptu)₂Cl]SH complex was synthesized at ambient temperature by the reaction of Ru(II)-*p*-cymene with the *N*-phenylthiourea ligand through the S donor in dichloromethane (Scheme 1).



Scheme 1. Synthesis pathway of [Ru(*p*-cymene)(ptu)₂Cl]SH complex

To produce ¹H-NMR spectra, the [Ru(*p*-cymene)(ptu)₂Cl]SH complex was measured in solution in MeOH-d₆. The main characteristic peaks were identified for the phenyl ring on Ru(II) and the efficient ptu ligand. The coordination of Ru(II) with p-ptu ligands produced a downfield shift from 7.26 to 7.47 ppm. Similarly, the coordination with *p*-cymene ligands is located between 5.52 and 5.64 ppm (see from Index S1). Elemental analysis results confirmed the theoretical values for percentages of C, H and N atoms.

The FTIR characteristic spectrum of the [Ru(*p*-cymene)(ptu)₂Cl]SH complex (see from Index S2) displays peaks assigned to the ptu ligand coordinated to the Ru²⁺ metal center. As a result of this coordination, the shift in the νC=S vibrational frequency of the complex (698 cm⁻¹) occurred at a lower stretching frequency (789 cm⁻¹) than that of the free ptu ligand. As previously reported [27], this shift is due to electron π back-bonding from the d orbital of Ru²⁺ to the π* orbital of the ptu ligand. Also, an important vibrational frequency attributed to Ru-S stretching was detected at 510 cm⁻¹.

With regard to the obtained dark orange crystal, the crystallographic data of the $[\text{Ru}(p\text{-cymene})(\text{ptu})_2\text{Cl}]\text{SH}$ complex is collected in Table 1 and Index S3. The Ru(II) complex exhibits a tetrahedral geometry distorted by $\eta^6 \pi$ -bonding of the *p*-cymene ring, with one Cl atom and two molecules of ptu contributed by the S donor atom (Figure 1). Certain selected bond distances and bond angles are shown in Table 2. The Ru-Cl distance for Ru-Cl1 is 2.4160(6) Å, which approximately corresponds to distances reported for related complexes: $[(\eta^6\text{-}p\text{-cymene})\text{RuCl}_2(\text{PPh}_2\text{Py})]$, 2.4107 to 2.4111 Å [28] and $[(\eta^6\text{-}p\text{-cymene})\text{Ru}(\text{3-acetylpyridine})\text{Cl}_2]$, 2.3986 to 2.1970 Å [29]. The interatomic distances Ru-S1 and Ru-S2 are 2.4106(6) and 2.3962(7) Å, respectively, which are close to distances reported for the complexes $[(\eta^6\text{-}p\text{-cymene})\text{RuCl}_2(\text{PPh}_3)(\text{imidazolidine-2-thione})]\text{PF}_3$, 2.399(13) Å [31] and $[(\eta^6\text{-}p\text{-cymene})\text{Ru}(\text{SCH}_2\text{COO})_2]$, 2.3943(11) to 2.3992(10) Å [31]. The distances for Ru-(*p*-cymene) are 2.159(2) to 2.253(2) Å, which are comparable to the distances reported for $[(\eta^6\text{-}p\text{-cymene})\text{Ru}(\text{3-acetylpyridine})\text{Cl}_2]$, 2.154 to 2.1209 Å [29]. The angles S1-Ru1-Cl1 and S2-Ru1-Cl1 measure 90.42(3)° and 87.63(2)°, respectively, which correspond to measurements for the same angles in a related Ru(II) complex: 90.11(4)° in $[(\eta^6\text{-}p\text{-cymene})\text{RuCl}_2(\text{PPh}_3)(\text{imidazolidine-2-thione})]\text{PF}_3$ [30]. The S1-Ru-S2 angle measures 80.19(2)°, which is close to the angle of 80.71(4)° in the related Ru(II) complex $[(\eta^6\text{-}p\text{-cymene})\text{Ru}(\text{SCH}_2\text{COO})_2]$ [30]. The S atom of HS⁻ (S3') interacts intermolecularly via H-bonding with the H1A, H2, and H3A atoms of the $[\text{Ru}(p\text{-cymene})(\text{ptu})_2\text{Cl}]$. The distances H1A...S3', H2...S3' and H3A...S3' are 3.374(2), 3.175(2) and 3.240(2) Å, respectively. In addition, the Cl atom

interacts intramolecularly with the H1B atom via H-bonding with a distance of 3.231(2) Å (Figure 2, Figure 3 and Table 3).

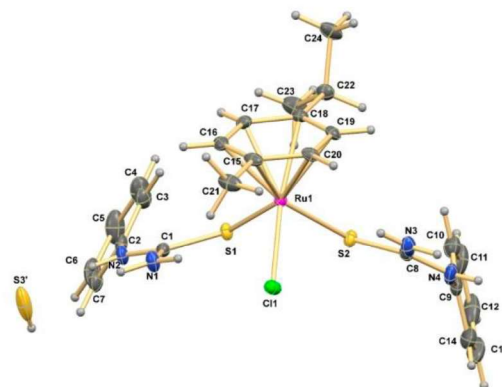


Figure 1. An ORTEP structure of the $[\text{Ru}(p\text{-cymene})(\text{ptu})_2\text{Cl}]\text{SH}$ complex with numbered atoms

Table 1. Crystallographic data of the $[\text{Ru}(p\text{-cymene})(\text{ptu})_2\text{Cl}]\text{SH}$ complex

Empirical formula	C ₂₄ H ₃₁ ClN ₄ RuS ₃
Formula weight	608.23
Wavelength	0.71073 Å
Crystal system	Triclinic
Space group	$P\bar{1}$
Unit cell dimensions	$a = 6.6265$ Å $b = 12.6582(4)$ Å $c = 17.6833(4)$ Å $\alpha = 73.3800(10)^\circ$ $\beta = 80.8120(10)^\circ$ $\gamma = 75.5900(10)^\circ$
Temperature	273 (2) K
Z	2
Density (calculated)	1.474 Mg/m ³
Absorption coefficient	0.918 mm ⁻¹
Volume	1370.31(7) Å ³
Goodness-of-fit on F^2	1.023
Final R indices $[I > 2\sigma(I)]$	$R1 = 0.0317$, $wR2 = 0.0669$
R indices (all data)	$R1 = 0.0478$, $wR2 = 0.0719$

Table 2. Selected bond lengths (Å) and angle (°) for the [Ru(*p*-cymene)(ptu)₂Cl]SH complex

Lengths			
Ru(1)-C(17)	2.159(2)	Ru(1)-C(15)	2.253(2)
Ru(1)-C(19)	2.187(2)	Ru(1)-S(2)	2.3962(7)
Ru(1)-C(18)	2.198(2)	Ru(1)-S(1)	2.4106(6)
Ru(1)-C(16)	2.203(2)	Ru(1)-Cl(1)	2.4160(6)
Ru(1)-C(20)	2.216(2)	S(3')-H(3')	0.85(4)
Angles			
C(17)-Ru(1)-S(2)	124.07(7)	C(18)-Ru(1)-S(2)	95.05(7)
C(19)-Ru(1)-S(2)	91.63(7)	C(16)-Ru(1)-S(2)	161.98(7)
C(18)-Ru(1)-S(2)	95.05(7)	C(20)-Ru(1)-S(2)	114.55(8)
C(16)-Ru(1)-S(2)	161.98(7)	C(15)-Ru(1)-S(2)	150.77(8)
C(20)-Ru(1)-S(2)	114.55(8)	C(17)-Ru(1)-S(1)	86.06(7)
C(15)-Ru(1)-S(2)	150.77(8)	C(19)-Ru(1)-S(1)	140.98(7)
C(17)-Ru(1)-S(1)	86.06(7)	C(18)-Ru(1)-S(1)	104.50(7)
C(19)-Ru(1)-S(1)	140.98(7)	C(16)-Ru(1)-S(1)	97.44(8)
C(20)-Ru(1)-S(1)	163.27(8)	C(16)-Ru(1)-Cl(1)	110.31(7)
C(15)-Ru(1)-S(1)	129.00(8)	C(20)-Ru(1)-Cl(1)	97.78(7)
S(2)-Ru(1)-S(1)	80.19(2)	C(15)-Ru(1)-Cl(1)	90.31(7)
C(17)-Ru(1)-Cl(1)	146.74(7)	S(2)-Ru(1)-Cl(1)	87.63(2)
C(19)-Ru(1)-Cl(1)	127.58(7)	S(1)-Ru(1)-Cl(1)	90.42(2)

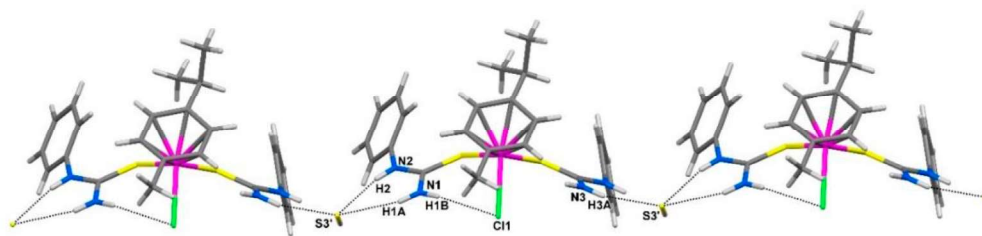


Figure 2. Hydrogen-bond interaction of [Ru(*p*-cymene)(ptu)₂Cl]SH complex

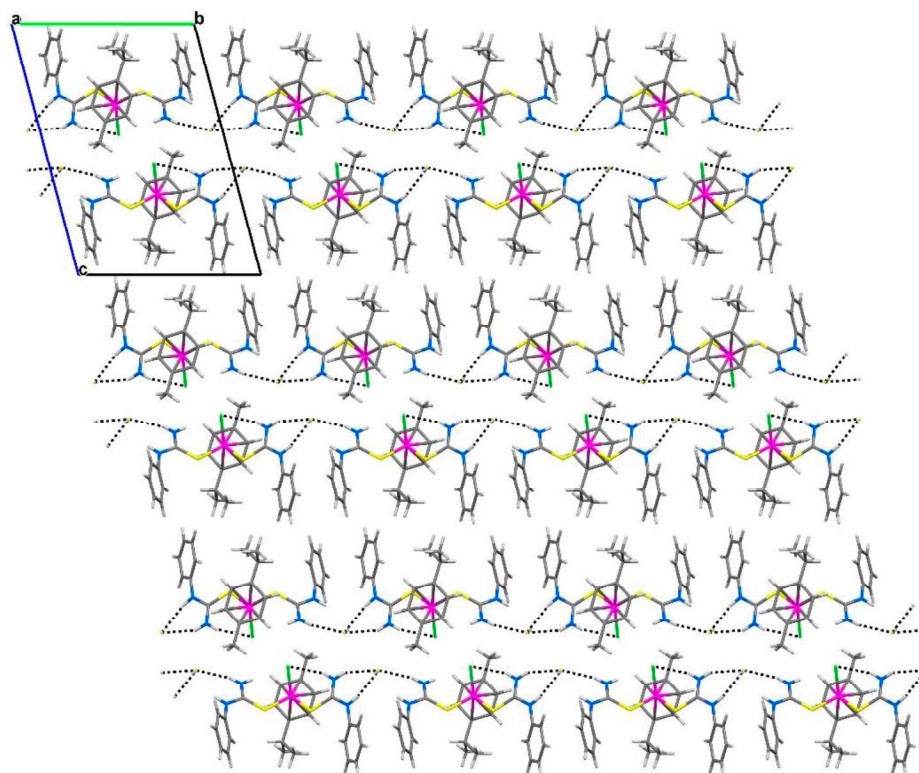


Figure 3. Hydrogen-bond packing interaction of $[\text{Ru}(p\text{-cymene})(\text{ptu})_2\text{Cl}]\text{SH}$

Table 3. Hydrogen-bond of $[\text{Ru}(p\text{-cymene})(\text{ptu})_2\text{Cl}]\text{SH}$ complex

D-H...A	Distance of (D-H)	Distance of (H...A)	Distance of (D...A)	Angle of (DHA)
N(1)-H(1A)...S(3')	0.86	2.61	3.374(2)	148.9
N(1)-H(1B)...Cl(1)	0.86	2.50	3.231(2)	143.1
N(2)-H(2)...S(3')	0.86	2.33	3.175(2)	166.2
N(3)-H(3A)...S(3')#1	0.86	2.40	3.240(2)	166.2

D= N atom (donor), A= S or Cl atom (acceptor) Symmetry transformations used to generate equivalent atoms: #1 x-1, y+1, z

3.1 Antibacterial and antifungal assay

Antimicrobial activity was determined by colorimetric broth microdilution. The $[\text{Ru}(p\text{-cymene})(\text{ptu})_2\text{Cl}]\text{SH}$ complex showed equal inhibition against Gram-positive bacteria of *S. aureus* (SA) and Methicillin-resistant *S. aureus* (MRSA) with the MIC/MBC values of 32/32 $\mu\text{g/mL}$. The

$[\text{Ru}(p\text{-cymene})(\text{ptu})_2\text{Cl}]\text{SH}$ complex also exhibited an inhibitory activity against yeast (*C. neoformans*, MIC/MFC 32/32 $\mu\text{g/mL}$) but it did not exhibit the inhibitory activity against *Microsporum gypseum* MU-SH4 clinical isolate, while the starting materials of the dinuclear complex of $\text{Ru}_2\text{Cl}_4(p\text{-cymene})_2$ and free ptu ligand did not show inhibitory activity.

However, the MIC/MBC values of the commercial antibacterial drug like vancomycin and the MIC/MFC values of the commercial antifungal drug Amphotericin B indicate stronger activity than the $[\text{Ru}(p\text{-cymene})(\text{ptu})_2\text{Cl}]\text{SH}$ complex (Table 4). This might be due to the lipophilic character of the synthesized

complex which should be able to penetrate the cell membrane lipid layer of the studied bacteria and yeast. The experimental data revealed that the $[\text{Ru}(p\text{-cymene})(\text{ptu})_2\text{Cl}]\text{SH}$ compound showed moderate antibacterial and antifungal activities.

Table 4. MIC and MBC or MFC values

Code	Bacteria ($\mu\text{g/mL}$)						Yeast($\mu\text{g/mL}$)		Filamentous fungus ($\mu\text{g/mL}$)	
	SA		MRSA		EC		CN90113		MG	
	MI C	MB C	MI C	MB C	MI C	MB C	MI C	MFC	MI C	MF C
$[\text{Ru}(p\text{-cymene})(\text{ptu})_2\text{Cl}]\text{SH}$	32	32	32	32	NA	NA	32	32	NA	NA
$\text{Ru}_2\text{Cl}_4(p\text{-cymene})_2$	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
ptu	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Vancomycin	0.5	1	1	2	-	-	-	-	-	-
Gentamicin	-	-	-	-	0.5	-	-	-	-	-
Amphotericin B	-	-	-	-	-	-	0.25	0.5	-	-

SA= *Staphylococcus aureus* ATCC25923, MRSA= methicillin-resistant *Staphylococcus aureus*, EC=*Escherichia coli* ATCC25922, CN90113= *Cryptococcus neoformans* ATCC90113 flucytosine-resistant, MG = *Microsporum gypseum* clinical isolate, MIC= minimal inhibitory concentration ($\mu\text{g/mL}$), MBC= minimal bactericidal concentration ($\mu\text{g/mL}$), MFC= minimal fungicidal concentration ($\mu\text{g/mL}$), NA = non active

4. CONCLUSIONS

The half sandwich $[\text{Ru}(p\text{-cymene})(\text{ptu})_2\text{Cl}]\text{SH}$ complex has a distorted pseudo-tetrahedral geometry coordinated via the S donor of the ptu ligand. The complex exhibited moderate antibacterial and antifungal activity against methicillin-resistant *S. aureus* (MRSA), *S. aureus* ATCC25923 and flucytosin-resistant *C. neoformans* ATCC90113 with the value of MIC/MBC or MFC of 32/32 $\mu\text{g/mL}$.

5. ACKNOWLEDGMENTS

We would like to express our heartfelt thanks to the Royal Scholarship under Her Royal Highness Princess Maha Chakri Sirindhorn Education Project and Graduate School, Prince of Songkla University for giving the opportunity and financial support to Ms.Rachna Neang to study her Master's Degree at the Department of Chemistry, Faculty of Science. We also acknowledge the Center for Innovation in Chemistry (PERCH-CIC), the Commission on Higher Education and the Ministry of Education and Faculty of

Science, PSU for financial support. We also would like to thank the Natural Products Research Center and Department of Microbiology, Faculty of Science for the facilities used for antimicrobial activity testing and the Faculty of Science and Fisheries Technology, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Trang campus for partial financial support. Authors would like to thank Mr. Thomas Duncan Coyne for assistance with the English.

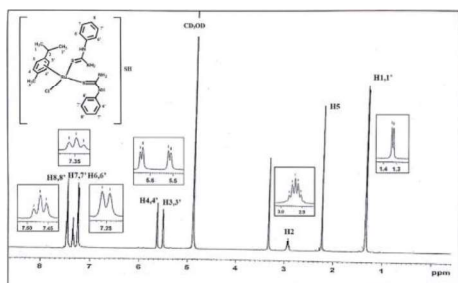
6. REFERENCES

- [1] Enright MC, Robinson DA, Randle G, Feil EJ, Grundmann H, Spratt BG. The evolutionary history of methicillin-resistant *Staphylococcus aureus* (MRSA). *PNAS USA* 2002; 99(11):7687-92.
- [2] Elizaquivel P, Aznar R. Comparison of four commercial DNA extraction kits for PCR detection of *Listeria monocytogenes*, *Salmonella*, *Escherichia coli* O157:H7, and *Staphylococcus aureus* in fresh, minimally processed vegetables. *J Food Protect* 2008; 71(10):2110-4.
- [3] Kabbani AT, Hammud HH, Ghannoum AM. Preparation and antibacterial activity of copper and cobalt complexes of 4-chloro-3-nitrobenzoate with a nitrogen donor ligand. *Chem Pharm Bull* 2007; 55(3):446-50.
- [4] Beckford F, Dourth D, Shaloski M, Didion J, Thessing J, Woods J, Crowell V, Gerasimchuk N, Gonzalez-Sarrias A, Seeram NP. Half-sandwich ruthenium-arene complexes with thiosemicarbazones: Synthesis and biological evaluation of $[(\eta^6\text{-p-cymene})\text{Ru}(\text{piperonalthiosemicarbazones})\text{Cl}]\text{Cl}$ complexes. *J Inorg Biochem* 2011; 105(8):1019-29.
- [5] Sun D, Zhang W, Yang E, Li N, Liu H, Wang W. Investigation of antibacterial activity and related mechanism of a ruthenium(II) polypyridyl complex. *Inorg Chem Commun* 2015; 56:17-21.
- [6] Zhang P, Sadler PJ. Advances in the design of organometallic anticancer complexes. *J Organomet Chem* 2017; 839:5-14.
- [7] Pastuszko A, Majchrzak K, Czyz M, Kupcewicz B, Budzisz E. The synthesis, lipophilicity and cytotoxic effects of new Ruthenium(II) arene complexes with chromone derivatives. *J Inorg Biochem*. 2016; 159:133-41.
- [8] Chuklin P, Chalermpanaphan V, Nhukeaw T, Saithong S, Chainok K, Phongpaichit S, Ratanaphan A, Leesakul N. Synthesis, x-ray structure of organometallic Ruthenium (II) p-cymene complexes based on P- and N-donor ligands and their in vitro antibacterial and anticancer studies. *J Organomet Chem* 2017; 846:242-50.
- [9] Pantić DN, Arandelović S, Radulović S, Roller A, Arion VB, Grgurić-Šipka S. Synthesis, characterisation and cytotoxic activity of organoruthenium (II)-halido complexes with 1H-benzimidazole-2-carboxylic acid. *J Organomet Chem* 2016; 819:61-8.
- [10] Allardyce CS, Dyson PJ. Ruthenium in medicine: current clinical uses and future prospects. *Platin Met Rev* 2001;45(2): 62-9.
- [11] Chen J, Peng F, Zhang Y, Li B, She J, Jie X, Zou Z, Chen M, Chen L. Synthesis, characterization, cellular uptake and apoptosis-inducing properties of two highly cytotoxic cyclometalated ruthenium(II) beta-carboline complexes. *Eur J Med Chem* 2017; 140:104-17.

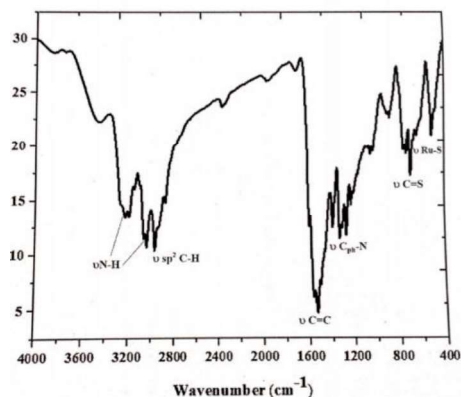
- [12] Raj KR, Ramesh R, Małecki J. Synthesis and structure of arene Ruthenium (II) benzhydrazone complexes: antiproliferative activity, apoptosis induction and cell cycle analysis. *J Organomet Chem* 2018; 862:95-104.
- [13] Allardyce CS, Dyson PJ, Ellis DJ, Salter PA, Scopelliti R. Synthesis and characterisation of some water soluble ruthenium (II)–arene complexes and an investigation of their antibiotic and antiviral properties. *J Organomet Chem* 2003; 668(1):35-42.
- [14] Nikolić S, Osenica DM, Filipović V, Dojčinović B, Arandelović S, Radulović S. Strong in vitro cytotoxic potential of new ruthenium–cymene complexes. *Organometallics*. 2015; 34(14):3464-73.
- [15] Mansour AM. Structural studies and biological activity evaluation of Pd(II), Pt(II) and Ru(II) complexes containing N-phenyl, N'-(3-triazolyl) thiourea. *Appl Organomet Chem* 2018; 32(1):3928.
- [16] Saeed S, Rashid N, Jones PG, Ali M, Hussain R. Synthesis, characterization and biological evaluation of some thiourea derivatives bearing benzothiazole moiety as potential antimicrobial and anticancer agents. *Eur J Med Chem* 2010; 45(4):1323-31.
- [17] Shakeel A, Altaf A. Thiourea derivatives in drug design and medicinal chemistry: A Short Rev 2016;10 p.
- [18] Criado JJ, Rodríguez-Fernández E, García E, Hermosa MR, Monte E. Thiourea derivatives of α -aminoacids. Synthesis and characterization of Ni(II), Cu(II) and Pt(II) complexes with l-valinate derivatives antifungal activity. *J Inorg Biochem* 1998; 69(1):113-9.
- [19] Del CR, Criado JJ, García E, Hermosa MR, Jiménez-Sánchez A, Manzano JL, Monte E, Rodríguez-Fernández E, Sanz F. Thiourea derivatives and their Nickel(II) and Platinum(II) complexes: Antifungal activity. *J Inorg Biochem* 2002; 89(1):74-82.
- [20] Bruker, SMART, SAINT and SADABS, Bruker AXS Inc, Madison, Wisconsin, USA, 2013.
- [21] Sheldrick GM. Crystal structure refinement with SHELXL. *Acta Crystallogr C* 2015; 71(Pt 1):3-8.
- [22] Farrugia L. WinGX and ORTEP for windows: an update. *J Appl Crystallogr* 2012; 45(4):849-54.
- [23] Clare F, Macrae IJB, James AC, Paul RE, Patrick M, Elna P, Lucia R, Robin T, Jacco van de S, Peter AW. Mercury CSD 2.0 – new features for the visualization and investigation of crystal structures. *Appl Crystallogr* 2008; 41: 466–70.
- [24] Franklin RC III, MD Matthew AW, MD, MBA, FIDSA Jeff A, PhD Michael ND, PharmD, FIDSA George ME, MD Mary JF, PhD, MPH Dwight JH, PhD David WH, MD Janet AH, MCLS, MT(ASCP) Jean BP, PhD, D(ABMM) Mair P, MD, FRCP, FRCPATH Jana MS, MMSc Richard BT, Jr, PhD Maria MT, BS, MT(ASCP) John DT, MD Melvin PW, MD Barbara LZ, PhD. Methods for dilution antimicrobial susceptibility tests for bacteria that grow aerobically; approved standard—ninth edition CLSI 2012;32.
- [25] Clinical and Laboratory Standards Institute. Reference method for broth dilution antifungal susceptibility testing of yeasts; approved standard-Third edition. 2008.

- [26] Clinical and Laboratory Standards Institute. Reference method for broth dilution antifungal susceptibility testing of filamentous fungi; approved standard- Second edition. 2008.
- [27] Akinchan NT, Drożdżewski PM, Battaglia LP. Crystal structure and spectroscopic characterization of bis(N-phenylthiourea). *J Chem Crystallogr* 2002; 32(3):91-7.
- [28] Ralte L, Patrick JC, Rao KM. Study of reactivity of p-cymene ruthenium(II) dimer towards diphenyl-2-pyridylphosphine : Synthesis, characterization and molecular structures of $[(\eta^6\text{-p-cymene})\text{RuCl}_2(\text{PPh}_2\text{Py})]$ and $[(\eta^6\text{-p-cymene})\text{RuCl}(\text{PPh}_2\text{Py})]\text{BF}_4$. *J Chem Sci* 2004; 116(1):21-7.
- [29] Grgurić-Šipka S, Ivanović I, Rakić G, Todorović N, Gligoričević N, Radulović S, Arion VB, Keppler BK, Tešić ŽLj. Ruthenium(II)-arene complexes with functionalized pyridines: Synthesis, characterization and cytotoxic activity. *Eur J Med Chem* 2010; 45(3):1051-8.
- [30] Hanif M, Nawaz MA, Babak MV, Iqbal J, Roller A, Keppler BK. Ruthenium(II)($\eta^6\text{-arene}$) complexes of thiourea derivatives: synthesis, characterization and urease inhibition. *Molecules*. 2014;19(6):8080-92.
- [31] Henderson W, Kilpin TD, Nicholson BK. (p-cymene) thioglycollato ruthenium (II) dimer; a complex with an ambi-basic S, O-donor ligand. *Struct Chem* 2007;19(2):199-202.

Index



S1. ^1H -NMR spectrum of $[\text{Ru}(p\text{-cymene})(\text{ptu})_2\text{Cl}]\text{SH}$ complex in CD_3OH



S2. FTIR spectrum of $[\text{Ru}(p\text{-cymene})(\text{ptu})_2\text{Cl}]\text{SH}$ complex, KBr disk

S 3. Related X-ray data

Table 2. Atomic coordinates ($\times 10^4$) and equivalent isotropic displacement parameters ($\text{\AA}^2 \times 10^3$) of $[\text{Ru}(p\text{-cymene})(\text{ptu})_2\text{Cl}]\text{SH}$. $U(\text{eq})$ is defined as one third of the trace of the orthogonalized U_{ij} tensor.

	x	y	z	$U(\text{eq})$
Ru(1)		685(1)	4526(1)	3202(1)
Cl(1)	2188(1)	4246(1)	4421(1)	41(1)
S(1)	4007(1)	3649(1)	2632(1)	35(1)
N(1)	4019(4)	1914(2)	3902(1)	49(1)
C(1)	4784(4)	2282(2)	3164(2)	35(1)
S(2)	2231(1)	6140(1)	2670(1)	38(1)
N(2)	6268(4)	1549(2)	2855(1)	44(1)
C(2)	7319(4)	1702(2)	2081(2)	43(1)
S(3')	7218(2)	-669(1)	4260(1)	104(1)

	x	y	z	$U(\text{eq})$
N(3)	-419(4)	7056(2)	3722(1)	51(1)
C(3)	6291(5)	2209(3)	1405(2)	59(1)
N(4)	1673(4)	8170(2)	2905(2)	58(1)
C(4)	7423(8)	2313(3)	670(2)	83(1)
C(5)	9530(8)	1902(4)	610(3)	98(2)
C(6)	10555(6)	1381(3)	1273(3)	79(1)
C(7)	9454(5)	1282(2)	2008(2)	57(1)
C(8)	1074(4)	7179(2)	3129(2)	40(1)
C(9)	3275(5)	8459(2)	2295(2)	57(1)
C(10)	3160(6)	8486(3)	1523(2)	66(1)
C(11)	4715(8)	8805(3)	951(3)	95(2)
C(12)	6347(9)	9102(4)	1144(5)	123(2)
C(13)	6492(8)	9087(4)	1899(5)	118(2)
C(14)	4954(7)	8765(3)	2489(3)	90(1)
C(15)	-1965(4)	3728(2)	3888(2)	41(1)
C(16)	-989(4)	3182(2)	3306(2)	42(1)
C(17)	-709(4)	3802(2)	2502(2)	37(1)
C(18)	-1422(4)	4973(2)	2264(1)	35(1)
C(19)	-2394(4)	5522(2)	2867(2)	37(1)
C(20)	-2654(4)	4919(2)	3660(2)	40(1)
C(21)	-2237(5)	3093(3)	4742(2)	62(1)
C(22)	-1180(4)	5645(3)	1409(2)	45(1)
C(23)	809(5)	5182(3)	943(2)	70(1)
C(24)	-3107(5)	5727(3)	1007(2)	62(1)

Table 3. Bond lengths [$\text{\AA}$] and angles [$^\circ$] of $[\text{Ru}(p\text{-cymene})(\text{ptu})_2\text{Cl}]\text{SH}$.

Ru(1)-C(17)	2.159(2)
Ru(1)-C(19)	2.187(2)
Ru(1)-C(18)	2.198(2)
Ru(1)-C(16)	2.203(2)
Ru(1)-C(20)	2.216(2)
Ru(1)-C(15)	2.253(2)
Ru(1)-S(2)	2.3962(7)
Ru(1)-S(1)	2.4106(6)
Ru(1)-Cl(1)	2.4160(6)
S(1)-C(1)	1.710(3)
N(1)-C(1)	1.317(3)
N(1)-H(1A)	0.8600
N(1)-H(1B)	0.8600
C(1)-N(2)	1.338(3)
S(2)-C(8)	1.700(3)
N(2)-C(2)	1.416(3)
N(2)-H(2)	0.8600
C(2)-C(7)	1.381(4)
C(2)-C(3)	1.381(4)
S(3')-H(3')	0.85(4)
N(3)-C(8)	1.324(4)

Table 3. Bond lengths [Å] and angles [°] of [Ru(*p*-cymene)(ptu)₂Cl]SH.

N(3)-H(3A)	0.8600
N(3)-H(3B)	0.8600
C(3)-C(4)	1.383(5)
C(3)-H(3)	0.9300
N(4)-C(8)	1.342(4)
N(4)-C(9)	1.424(4)
N(4)-H(4A)	0.8600
C(4)-C(5)	1.361(6)
C(4)-H(4)	0.9300
C(5)-C(6)	1.364(6)
C(5)-H(5)	0.9300
C(6)-C(7)	1.374(5)
C(6)-H(6)	0.9300
C(7)-H(7)	0.9300
C(9)-C(10)	1.369(5)
C(9)-C(14)	1.384(5)
C(10)-C(11)	1.375(5)
C(10)-H(10)	0.9300
C(11)-C(12)	1.349(7)
C(11)-H(11)	0.9300
C(12)-C(13)	1.349(8)
C(12)-H(12)	0.9300
C(13)-C(14)	1.384(7)
C(13)-H(13)	0.9300
C(14)-H(14)	0.9300
C(15)-C(16)	1.387(4)
C(15)-C(20)	1.419(4)
C(15)-C(21)	1.501(4)
C(16)-C(17)	1.422(4)
C(16)-H(16)	0.9300
C(17)-C(18)	1.398(4)
C(17)-H(17)	0.9300
C(18)-C(19)	1.421(4)
C(18)-C(22)	1.513(4)
C(19)-C(20)	1.397(4)
C(19)-H(19)	0.9300
C(20)-H(20)	0.9300
C(21)-H(21A)	0.9600
C(21)-H(21B)	0.9600
C(21)-H(21C)	0.9600
C(22)-C(23)	1.518(4)
C(22)-C(24)	1.526(4)
C(22)-H(22)	0.9800
C(23)-H(23A)	0.9600
C(23)-H(23B)	0.9600

Table 3. Bond lengths [Å] and angles [°] of [Ru(*p*-cymene)(ptu)₂Cl]SH.

C(23)-H(23C)	0.9600
C(24)-H(24A)	0.9600
C(24)-H(24B)	0.9600
C(24)-H(24C)	0.9600
C(17)-Ru(1)-C(19)	67.10(10)
C(17)-Ru(1)-C(18)	37.42(10)
C(19)-Ru(1)-C(18)	37.82(9)
C(17)-Ru(1)-C(16)	38.02(10)
C(19)-Ru(1)-C(16)	78.93(10)
C(18)-Ru(1)-C(16)	68.08(10)
C(17)-Ru(1)-C(20)	79.08(10)
C(19)-Ru(1)-C(20)	37.01(9)
C(18)-Ru(1)-C(20)	67.75(9)
C(16)-Ru(1)-C(20)	66.06(11)
C(17)-Ru(1)-C(15)	67.14(10)
C(19)-Ru(1)-C(15)	66.90(10)
C(18)-Ru(1)-C(15)	80.18(9)
C(16)-Ru(1)-C(15)	36.25(10)
C(20)-Ru(1)-C(15)	37.01(10)
C(17)-Ru(1)-S(2)	124.07(7)
C(19)-Ru(1)-S(2)	91.63(7)
C(18)-Ru(1)-S(2)	95.05(7)
C(16)-Ru(1)-S(2)	161.98(7)
C(20)-Ru(1)-S(2)	114.55(8)
C(15)-Ru(1)-S(2)	150.77(8)
C(17)-Ru(1)-S(1)	86.06(7)
C(19)-Ru(1)-S(1)	140.98(7)
C(18)-Ru(1)-S(1)	104.50(7)
C(16)-Ru(1)-S(1)	97.44(8)
C(20)-Ru(1)-S(1)	163.27(8)
C(15)-Ru(1)-S(1)	129.00(8)
S(2)-Ru(1)-S(1)	80.19(2)
C(17)-Ru(1)-Cl(1)	146.74(7)
C(19)-Ru(1)-Cl(1)	127.58(7)
C(18)-Ru(1)-Cl(1)	165.08(7)
C(16)-Ru(1)-Cl(1)	110.31(7)
C(20)-Ru(1)-Cl(1)	97.78(7)
C(15)-Ru(1)-Cl(1)	90.31(7)
S(2)-Ru(1)-Cl(1)	87.63(2)
S(1)-Ru(1)-Cl(1)	90.42(2)
C(1)-S(1)-Ru(1)	110.81(9)
C(1)-N(1)-H(1A)	120.0
C(1)-N(1)-H(1B)	120.0
H(1A)-N(1)-H(1B)	120.0
N(1)-C(1)-N(2)	117.0(2)

Table 3. Bond lengths [Å] and angles [°] of [Ru(*p*-cymene)(ptu)₂Cl]SH.

N(1)-C(1)-S(1)	121.93(19)
N(2)-C(1)-S(1)	121.0(2)
C(8)-S(2)-Ru(1)	110.86(10)
C(1)-N(2)-C(2)	129.1(2)
C(1)-N(2)-H(2)	115.4
C(2)-N(2)-H(2)	115.4
C(7)-C(2)-C(3)	119.2(3)
C(7)-C(2)-N(2)	117.8(3)
C(3)-C(2)-N(2)	122.9(3)
C(8)-N(3)-H(3A)	120.0
C(8)-N(3)-H(3B)	120.0
H(3A)-N(3)-H(3B)	120.0
C(2)-C(3)-C(4)	119.5(3)
C(2)-C(3)-H(3)	120.2
C(4)-C(3)-H(3)	120.2
C(8)-N(4)-C(9)	125.6(2)
C(8)-N(4)-H(4A)	117.2
C(9)-N(4)-H(4A)	117.2
C(5)-C(4)-C(3)	120.4(4)
C(5)-C(4)-H(4)	119.8
C(3)-C(4)-H(4)	119.8
C(4)-C(5)-C(6)	120.6(4)
C(4)-C(5)-H(5)	119.7
C(6)-C(5)-H(5)	119.7
C(5)-C(6)-C(7)	119.6(4)
C(5)-C(6)-H(6)	120.2
C(7)-C(6)-H(6)	120.2
C(6)-C(7)-C(2)	120.6(4)
C(6)-C(7)-H(7)	119.7
C(2)-C(7)-H(7)	119.7
N(3)-C(8)-N(4)	117.0(2)
N(3)-C(8)-S(2)	122.6(2)
N(4)-C(8)-S(2)	120.4(2)
C(10)-C(9)-C(14)	119.5(4)
C(10)-C(9)-N(4)	122.1(3)
C(14)-C(9)-N(4)	118.4(4)
C(9)-C(10)-C(11)	119.8(4)
C(9)-C(10)-H(10)	120.1
C(11)-C(10)-H(10)	120.1
C(12)-C(11)-C(10)	120.4(5)
C(12)-C(11)-H(11)	119.8
C(10)-C(11)-H(11)	119.8
C(13)-C(12)-C(11)	120.9(6)
C(13)-C(12)-H(12)	119.6
C(11)-C(12)-H(12)	119.6

Table 3. Bond lengths [Å] and angles [°] of [Ru(*p*-cymene)(ptu)₂Cl]SH.

C(12)-C(13)-C(14)	120.0(5)
C(12)-C(13)-H(13)	120.0
C(14)-C(13)-H(13)	120.0
C(9)-C(14)-C(13)	119.4(5)
C(9)-C(14)-H(14)	120.3
C(13)-C(14)-H(14)	120.3
C(16)-C(15)-C(20)	118.3(2)
C(16)-C(15)-C(21)	121.6(3)
C(20)-C(15)-C(21)	120.1(3)
C(16)-C(15)-Ru(1)	69.91(15)
C(20)-C(15)-Ru(1)	70.05(14)
C(21)-C(15)-Ru(1)	130.22(18)
C(15)-C(16)-C(17)	120.7(3)
C(15)-C(16)-Ru(1)	73.84(15)
C(17)-C(16)-Ru(1)	69.31(14)
C(15)-C(16)-H(16)	119.6
C(17)-C(16)-H(16)	119.6
Ru(1)-C(16)-H(16)	129.7
C(18)-C(17)-C(16)	121.8(2)
C(18)-C(17)-Ru(1)	72.80(14)
C(16)-C(17)-Ru(1)	72.67(15)
C(18)-C(17)-H(17)	119.1
C(16)-C(17)-H(17)	119.1
Ru(1)-C(17)-H(17)	127.6
C(17)-C(18)-C(19)	116.8(2)
C(17)-C(18)-C(22)	122.7(2)
C(19)-C(18)-C(22)	120.5(2)
C(17)-C(18)-Ru(1)	69.78(14)
C(19)-C(18)-Ru(1)	70.65(13)
C(22)-C(18)-Ru(1)	129.99(17)
C(20)-C(19)-C(18)	121.6(2)
C(20)-C(19)-Ru(1)	72.63(14)
C(18)-C(19)-Ru(1)	71.53(14)
C(20)-C(19)-H(19)	119.2
C(18)-C(19)-H(19)	119.2
Ru(1)-C(19)-H(19)	129.1
C(19)-C(20)-C(15)	120.7(2)
C(19)-C(20)-Ru(1)	70.36(14)
C(15)-C(20)-Ru(1)	72.93(14)
C(19)-C(20)-H(20)	119.6
C(15)-C(20)-H(20)	119.6
Ru(1)-C(20)-H(20)	129.5
C(15)-C(21)-H(21A)	109.5
C(15)-C(21)-H(21B)	109.5
H(21A)-C(21)-H(21B)	109.5

Table 3. Bond lengths [Å] and angles [°] of [Ru(*p*-cymene)(ptu)₂Cl]SH.

C(15)-C(21)-H(21C)	109.5
H(21A)-C(21)-H(21C)	109.5
H(21B)-C(21)-H(21C)	109.5
C(18)-C(22)-C(23)	113.8(2)
C(18)-C(22)-C(24)	109.3(2)
C(23)-C(22)-C(24)	110.8(3)
C(18)-C(22)-H(22)	107.6
C(23)-C(22)-H(22)	107.6
C(24)-C(22)-H(22)	107.6
C(22)-C(23)-H(23A)	109.5
C(22)-C(23)-H(23B)	109.5
H(23A)-C(23)-H(23B)	109.5

Table 3. Bond lengths [Å] and angles [°] of [Ru(*p*-cymene)(ptu)₂Cl]SH.

C(22)-C(23)-H(23C)	109.5
H(23A)-C(23)-H(23C)	109.5
H(23B)-C(23)-H(23C)	109.5
C(22)-C(24)-H(24A)	109.5
C(22)-C(24)-H(24B)	109.5
H(24A)-C(24)-H(24B)	109.5
C(22)-C(24)-H(24C)	109.5
H(24A)-C(24)-H(24C)	109.5
H(24B)-C(24)-H(24C)	109.5

Symmetry transformations used to generate equivalent atoms:

Table 4. Anisotropic displacement parameters (Å² × 10³) of [Ru(*p*-cymene)(ptu)₂Cl]SH. The anisotropic displacement factor exponent takes the form: $-2\pi^2 [h^2 a^{*2} U^{11} + \dots + 2 h k a^* b^* U^{12}]$

	U ¹¹	U ²²	U ³³	U ²³	U ¹³	U ¹²
Ru(1)	22(1)	29(1)	31(1)	-9(1)	-2(1)	-3(1)
Cl(1)	35(1)	51(1)	36(1)	-16(1)	-7(1)	-2(1)
S(1)	29(1)	28(1)	42(1)	-7(1)	3(1)	-1(1)
N(1)	59(2)	34(1)	41(1)	-3(1)	2(1)	2(1)
C(1)	33(1)	30(1)	43(1)	-12(1)	-5(1)	-5(1)
S(2)	34(1)	30(1)	52(1)	-16(1)	4(1)	-7(1)
N(2)	52(1)	27(1)	44(1)	-9(1)	-2(1)	5(1)
C(2)	50(2)	26(1)	52(2)	-16(1)	2(1)	-4(1)
S(3')	161(1)	48(1)	56(1)	-1(1)	8(1)	39(1)
N(3)	68(2)	39(1)	42(1)	-17(1)	-5(1)	4(1)
C(3)	68(2)	50(2)	55(2)	-22(2)	-1(2)	1(2)
N(4)	85(2)	30(1)	60(2)	-17(1)	-10(2)	-6(1)
C(4)	118(4)	68(2)	51(2)	-21(2)	4(2)	1(2)
C(5)	129(4)	64(3)	76(3)	-21(2)	47(3)	-7(3)
C(6)	72(2)	51(2)	102(3)	-28(2)	28(2)	-4(2)
C(7)	55(2)	38(2)	75(2)	-24(2)	5(2)	0(1)
C(8)	48(2)	32(1)	38(1)	-10(1)	-14(1)	2(1)
C(9)	63(2)	23(1)	80(2)	-8(1)	-16(2)	-5(1)
C(10)	73(2)	44(2)	76(2)	-10(2)	1(2)	-18(2)
C(11)	114(4)	49(2)	109(4)	-17(2)	31(3)	-24(2)
C(12)	89(4)	48(3)	210(7)	-24(4)	38(4)	-23(2)
C(13)	69(3)	53(3)	236(7)	-33(4)	-24(4)	-22(2)
C(14)	94(3)	41(2)	143(4)	-19(2)	-46(3)	-13(2)
C(15)	25(1)	56(2)	41(1)	-1(1)	-6(1)	-16(1)
C(16)	35(1)	36(1)	55(2)	-2(1)	-11(1)	-16(1)
C(17)	34(1)	41(2)	43(1)	-16(1)	-6(1)	-12(1)
C(18)	29(1)	44(2)	33(1)	-8(1)	-9(1)	-10(1)

Table 4. Anisotropic displacement parameters ($\text{\AA}^2 \times 10^3$) of $[\text{Ru}(p\text{-cymene})(\text{ptu})_2\text{Cl}]\text{SH}$. The anisotropic displacement factor exponent takes the form: $-2\pi^2[h^2a^{*2}U^{11} + \dots + 2hkab^*U^{12}]$

	U ¹¹	U ²²	U ³³	U ²³	U ¹³	U ¹²
C(19)	24(1)	40(1)	43(1)	-7(1)	-9(1)	1(1)
C(20)	22(1)	57(2)	38(1)	-14(1)	-2(1)	-3(1)
C(21)	46(2)	85(2)	45(2)	10(2)	-7(1)	-26(2)
C(22)	47(2)	51(2)	35(1)	-5(1)	-7(1)	-12(1)
C(23)	51(2)	106(3)	39(2)	-5(2)	0(1)	-13(2)
C(24)	52(2)	86(2)	37(2)	-5(2)	-14(1)	-2(2)

Table 5. Hydrogen coordinates ($\times 10^4$) and isotropic displacement parameters ($\text{\AA}^2 \times 10^3$) of $[\text{Ru}(p\text{-cymene})(\text{ptu})_2\text{Cl}]\text{SH}$

	x	y	z	U(eq)
H(1A)	4475	1230	4162	59
H(1B)	3063	2358	4123	59
H(2)	6634	892	3170	53
H(3A)	-958	7598	3944	61
H(3B)	-850	6435	3884	61
H(3)	4849	2478	1445	71
H(4A)	1035	8673	3151	69
H(4)	6741	2665	213	100
H(5)	10277	1979	112	117
H(6)	11992	1093	1227	95
H(7)	10153	929	2461	69
H(10)	2032	8288	1386	79
H(11)	4642	8817	428	114
H(12)	7386	9320	751	147
H(13)	7626	9294	2024	141
H(14)	5047	8754	3010	107
H(16)	-513	2403	3444	50
H(17)	-33	3418	2124	45
H(19)	-2868	6302	2731	45
H(20)	-3285	5303	4042	48
H(21A)	-2942	3612	5053	92
H(21B)	-3055	2544	4794	92
H(21C)	-890	2719	4926	92
H(22)	-1133	6413	1410	54
H(23A)	864	5645	409	105
H(23B)	2003	5183	1187	105
H(23C)	817	4424	940	105
H(24A)	-2958	6153	465	93
H(24B)	-3244	4982	1026	93
H(24C)	-4332	6096	1278	93
H(3')	8350(60)	-440(30)	4150(20)	74

Table 6. Torsion angles [$^\circ$] of $[\text{Ru}(p\text{-cymene})(\text{ptu})_2\text{Cl}]\text{SH}$.

Ru(1)-S(1)-C(1)-N(1)	-20.1(2)
Ru(1)-S(1)-C(1)-N(2)	162.60(19)
N(1)-C(1)-N(2)-C(2)	178.4(3)
S(1)-C(1)-N(2)-C(2)	-4.2(4)
C(1)-N(2)-C(2)-C(7)	137.0(3)
C(1)-N(2)-C(2)-C(3)	-45.7(4)
C(7)-C(2)-C(3)-C(4)	-1.7(5)
N(2)-C(2)-C(3)-C(4)	-179.0(3)
C(2)-C(3)-C(4)-C(5)	1.1(6)
C(3)-C(4)-C(5)-C(6)	0.2(7)
C(4)-C(5)-C(6)-C(7)	-0.9(6)
C(5)-C(6)-C(7)-C(2)	0.3(5)
C(3)-C(2)-C(7)-C(6)	1.0(4)
N(2)-C(2)-C(7)-C(6)	178.5(3)
C(9)-N(4)-C(8)-N(3)	178.6(3)
C(9)-N(4)-C(8)-S(2)	-0.7(4)
Ru(1)-S(2)-C(8)-N(3)	2.5(3)
Ru(1)-S(2)-C(8)-N(4)	-178.27(19)
C(8)-N(4)-C(9)-C(10)	61.2(4)
C(8)-N(4)-C(9)-C(14)	-121.4(3)
C(14)-C(9)-C(10)-C(11)	0.6(5)
N(4)-C(9)-C(10)-C(11)	177.9(3)
C(9)-C(10)-C(11)-C(12)	-0.6(6)
C(10)-C(11)-C(12)-C(13)	0.3(7)
C(11)-C(12)-C(13)-C(14)	0.0(8)
C(10)-C(9)-C(14)-C(13)	-0.3(5)
N(4)-C(9)-C(14)-C(13)	-177.7(3)
C(12)-C(13)-C(14)-C(9)	0.0(7)
C(20)-C(15)-C(16)-C(17)	-0.7(4)
C(21)-C(15)-C(16)-C(17)	-178.7(2)
Ru(1)-C(15)-C(16)-C(17)	-53.1(2)
C(20)-C(15)-C(16)-Ru(1)	52.5(2)

Table 6. Torsion angles [°] of [Ru(*p*-cymene)(ptu)₂Cl]SH.

C(21)-C(15)-C(16)-Ru(1)	-125.6(2)
C(15)-C(16)-C(17)-C(18)	-0.9(4)
Ru(1)-C(16)-C(17)-C(18)	-56.1(2)
C(15)-C(16)-C(17)-Ru(1)	55.2(2)
C(16)-C(17)-C(18)-C(19)	1.6(3)
Ru(1)-C(17)-C(18)-C(19)	-54.39(19)
C(16)-C(17)-C(18)-C(22)	-178.7(2)
Ru(1)-C(17)-C(18)-C(22)	125.3(2)
C(16)-C(17)-C(18)-Ru(1)	56.0(2)
C(17)-C(18)-C(19)-C(20)	-0.9(3)
C(22)-C(18)-C(19)-C(20)	179.4(2)
Ru(1)-C(18)-C(19)-C(20)	-54.9(2)
C(17)-C(18)-C(19)-Ru(1)	53.96(19)
C(22)-C(18)-C(19)-Ru(1)	-125.7(2)
C(18)-C(19)-C(20)-C(15)	-0.5(4)

Table 6. Torsion angles [°] of [Ru(*p*-cymene)(ptu)₂Cl]SH.

Ru(1)-C(19)-C(20)-C(15)	-54.9(2)
C(18)-C(19)-C(20)-Ru(1)	54.4(2)
C(16)-C(15)-C(20)-C(19)	1.3(4)
C(21)-C(15)-C(20)-C(19)	179.4(2)
Ru(1)-C(15)-C(20)-C(19)	53.7(2)
C(16)-C(15)-C(20)-Ru(1)	-52.4(2)
C(21)-C(15)-C(20)-Ru(1)	125.7(2)
C(17)-C(18)-C(22)-C(23)	-33.9(4)
C(19)-C(18)-C(22)-C(23)	145.7(3)
Ru(1)-C(18)-C(22)-C(23)	56.2(4)
C(17)-C(18)-C(22)-C(24)	90.6(3)
C(19)-C(18)-C(22)-C(24)	-89.8(3)
Ru(1)-C(18)-C(22)-C(24)	-179.3(2)

Symmetry transformations used to generate equivalent atoms:

Table 7. Hydrogen bonds of [Ru(*p*-cymene)(ptu)₂Cl]SH [Å and °].

D-H...A	d(D-H)	d(H...A)	d(D...A)	<(DHA)
(1)-H(1A)...S(3')	0.86	2.61	3.374(2)	148.9
N(1)-H(1B)...Cl(1)	0.86	2.50	3.231(2)	143.1
N(2)-H(2)...S(3')	0.86	2.33	3.175(2)	166.2
N(3)-H(3A)...S(3')#1	0.86	2.40	3.240(2)	166.2

Symmetry transformations used to generate equivalent atoms: #1 x-1,y+1,z

Least-squares planes (x,y,z in crystal coordinates) and deviations from them
(* indicates atom used to define plane)

$$4.7415 (0.0156) x + 7.1502 (0.0058) y - 5.8516 (0.0524) z = 4.7415 (0.0210)$$

$$* -1.0014 (0.0035) \text{ C3}$$

$$* 0.1935 (0.0008) \text{ N4}$$

$$* 0.0396 (0.0043) \text{ C4}$$

$$* 0.7803 (0.0039) \text{ C5}$$

$$* 0.5054 (0.0036) \text{ C6}$$

$$* -0.5174 (0.0044) \text{ C7}$$

Rms deviation of fitted atoms = 0.6019

$$-1.9834 (0.0094) x + 10.5791 (0.0108) y + 0.5997 (0.0292) z = 8.4387 (0.0167)$$

Angle to previous plane (with approximate esd) = 75.187 (0.105)

$$* -0.0021 (0.0023) \text{ C9}$$

$$* 0.0029 (0.0025) \text{ C10}$$

$$* -0.0019 (0.0029) \text{ C11}$$

$$* 0.0000 (0.0036) \text{ C12}$$

$$* 0.0008 (0.0035) \text{ C13}$$

$$* 0.0003 (0.0027) \text{ C14}$$

Rms deviation of fitted atoms = 0.0017

ความเข้มข้นและอัตราการปลดปล่อยแก๊สเรดอนจากตัวอย่างหินที่ใช้ในการก่อสร้าง
บริเวณทางตอนเหนือของจังหวัดยะลา

Radon concentration and radon exhalation rate from rock samples
used for construction at northern part of yala province

พวงทิพย์ แก้วทับทิม^{1*}, พชिरารัฐ โสลา², ทิพวรรณ คงภักดี¹

Pungtip Kaewtubtim^{1*}, Phachirarat Sola², Tippawan Kongpakdee¹

¹แผนกวิชาฟิสิกส์ ภาควิชาวิทยาศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี

²สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) อำเภอบางกรัณท์ จังหวัดนครนายก

¹Physics Section, Department of Science, Faculty of Science and Technology,
Prince of Songkla University, Pattani Campus

² Thailand Institute of Nuclear Technology (Public Organization), Nakhon Nayok, Thailand

*Corresponding author. Tel: 0 7331 2201 ext. 1833, Email: pungtip.k@psu.ac.th

บทคัดย่อ

พื้นที่ทางตอนเหนือของจังหวัดยะลาเป็นพื้นที่ที่มีปริมาณธาตุยูเรเนียม-238 ในดินสูง อาจส่งผลให้ในพื้นที่นี้มีความเข้มข้นของแก๊สเรดอนในอาคาร และในวัสดุก่อสร้างสูงด้วย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาความเข้มข้นและอัตราการปลดปล่อยแก๊สเรดอนจากวัสดุก่อสร้างประเภทหิน จำนวน 27 ตัวอย่าง โดยใช้เทคนิค Close-Can และวัดแก๊สเรดอนด้วยเครื่อง ATMOS 12 dpx ผลการศึกษาพบว่าความเข้มข้นของแก๊สเรดอน อัตราการปลดปล่อยแก๊สเรดอน และปริมาณรังสียังผลมีค่าเฉลี่ย $49.24 \pm 8.43 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, $16.56 \pm 3.00 \text{ mBq}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ และ $1.24 \pm 0.21 \text{ mSv}\cdot\text{y}^{-1}$ ตามลำดับ โดยความเข้มข้นของแก๊สเรดอนในตำบลลิถล มีค่าสูงกว่าค่าอ้างอิง ($300 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ที่กำหนดโดย WHO) และในส่วนของปริมาณรังสียังผลพบว่ามีตำบลลิถล เกรอ และกอตตือระ มีค่าสูงกว่าค่าอ้างอิง คือ $1 \text{ mSv}\cdot\text{y}^{-1}$ กำหนดโดย ICRP

คำสำคัญ : ความเข้มข้นของแก๊สเรดอน อัตราการปลดปล่อยแก๊สเรดอน หินก่อสร้าง ตอนเหนือของจังหวัดยะลา

ABSTRACT

The concentration of uranium-238 in soil at the north of Yala province were high, which may cause of high indoor radon concentration and building materials in this area. Therefore, this research aims to study the radon concentration and radon exhalation rate from rock used for building materials 27 samples using Close-Can technique with ATMOS 12 dpx. This study found that the radon concentration, radon exhalation rate and the effective dose are average

Received 11-06-2019
Revised 06-09-2019
Accepted 16-09-2019

49.24 ± 8.43 Bq·m⁻³, 16.56 ± 3.00 mBq·kg⁻¹·h⁻¹ and 1.24 ± 0.21 mSv·y⁻¹, respectively. The radon concentration in Lidon sub district are higher than acceptable level (300 Bq·m⁻³ as recommended by WHO). For the effective dose in Lidon sub district, Kero sub district and Koto Tuera sub district are higher than the annual exposure limit (1 mSv·y⁻¹ as recommended by ICRP).

Keywords: Radon concentration, Radon exhalation rate, Rock used for construction Northern part of Yala Province

1. บทนำ

เรดอน (Radon) เป็นแก๊สกัมมันตรังสีที่มีอยู่โดยทั่วไปตามธรรมชาติ มีอยู่ 3 ไอโซโทปโดยไอโซโทปที่อันตรายที่สุด คือเรดอน-222 ที่มาจากการสลายตัวของอนุกรมยูเรเนียม ซึ่งเป็นอนุกรมกัมมันตรังสีที่มีอยู่ทั่วไปในดิน หิน และหินบนพื้นโลก ทั้งนี้เรดอน-222 มีสถานะเป็นแก๊สที่ไม่มีสี ไม่มีกลิ่น ไม่สามารถสัมผัสได้ด้วยประสาทสัมผัสของมนุษย์ และมีครึ่งชีวิต 3.82 วัน ซึ่งนานพอที่จะแพร่กระจายจากแหล่งกำเนิด ผ่านดิน ไปสู่อากาศ และเข้าไปสะสมภายในอาคาร โดยปัจจุบันประชาชนใช้ชีวิตอยู่ภายในอาคารเป็นส่วนใหญ่ เมื่อประชาชนผู้ที่อยู่อาศัยในอาคารบ้านเรือนสูดดมเอาแก๊สเรดอนเข้าไปในร่างกายก็จะไปสะสมในปอด และจากการที่แก๊สเรดอนเป็นแก๊สกัมมันตรังสี มีการสลายตัวไปเป็นโปโลเนียม (Polonium) โดยในระหว่างการสลายตัวนี้จะเกิดอนุภาคแอลฟาที่มีพลังงาน 5.48 MeV ที่ทำให้อะตอมที่เคลื่อนที่ผ่านเกิดการแตกตัวเป็นไอออน (Ionization) อะตอมของเนื้อเยื่อที่ถูกทำลายโดยกระบวนการนี้จะเกิดความเสียหาย และเนื่องจากโปโลเนียมที่มาจากสลายตัวของเรดอนเป็นสารกัมมันตรังสีที่อยู่ในสถานะของแข็ง ไปจับตัวอยู่ในเนื้อเยื่อปอด และเกิดการสลายตัวต่อไปอีกเนื่องจากไม่เสถียร รังสีแอลฟาพลังงานสูงที่สุดที่ถูก

ปลดปล่อยออกมาจากโปโลเนียมจะทะลุทะลวงทำลายเซลล์ที่อยู่โดยรอบได้โดยตรง [1]

จากการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างแก๊สเรดอนกับโรคมะเร็งปอดในเมืองกาลิเซีย ประเทศสเปน พบว่าแก๊สเรดอนมีความสัมพันธ์กับโรคมะเร็งปอดอย่างมีนัยสำคัญ [2] นอกจากนี้ ในปี 1988 องค์การวิจัยโรคมะเร็งนานาชาติ (International agency for research on cancer หรือ IARC) กำหนดให้แก๊สเรดอนเป็นสารก่อมะเร็งปอดอันดับที่สองรองจากบุหรี่ แหล่งที่มาของแก๊สเรดอนที่เข้าไปสะสมในอาคารบ้านเรือนอาจมาจากทั้งภายนอกอาคาร เช่น ถ้าหากอาคารบ้านเรือนถูกปลูกสร้างในพื้นที่ที่มีลักษณะทางธรณีวิทยาที่เป็นหินแกรนิต จะทำให้แก๊สเรดอนที่ถูกปล่อยออกมาจากหินแกรนิตเข้าไปสะสมในบ้านในปริมาณสูง ซึ่งมีงานวิจัยที่ศึกษาอัตราการปลดปล่อยแก๊สเรดอนจากหินแกรนิต พบว่าเป็นหินที่ปลดปล่อยแก๊สเรดอนออกมาในปริมาณสูง [3, 4] นอกจากนี้ แก๊สเรดอนที่เข้าไปสะสมในอาคารบ้านเรือนอาจมาจากภายในอาคาร ทั้งนี้ เนื่องจากวัสดุก่อสร้างโดยส่วนใหญ่มีการปลดปล่อยแก๊สเรดอนออกมาอยู่แล้ว แต่จะมีปริมาณสูงหรือไม่ขึ้น ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของวัสดุก่อสร้าง เช่น วัสดุก่อสร้างประเภทหิน ถึงแม้ว่าปกติแล้ว ในอุตสาหกรรมก่อสร้างจะใช้หินปูนที่มีการปลดปล่อยแก๊สเรดอนในปริมาณต่ำกว่าหินแกรนิตมาก แต่จากงานวิจัยพบว่า

หินปูนในบางพื้นที่ก็มีการปลดปล่อยแก๊สเรดอนออกมาสูงเหมือนกัน [5] ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มาของหินที่นำมาใช้เป็นวัสดุก่อสร้างด้วย เพราะหินปูนที่ใช้ก่อสร้างถูกนำมาจากภูเขาหินปูนซึ่งอาจมีหินแกรนิตแทรกตัวอยู่ภายใต้ภูเขาหินปูนนี้ ส่งผลให้หินปูนมีการปลดปล่อยแก๊สเรดอนออกมาในปริมาณสูงด้วย

สำหรับพื้นที่ทำการศึกษาซึ่งอยู่ทางตอนเหนือของจังหวัดยะลา มีสภาพทางธรณีวิทยาของพื้นที่เป็นภูเขาหินแกรนิตสลับซับซ้อน มีการทำเหมืองแร่ดีบุกในพื้นที่ และจากการศึกษาปริมาณยูเรเนียมในพื้นที่ผิวดิน ในพื้นที่จังหวัดยะลา พบว่ามีค่า 4.88 ± 0.36 ppm แสดงว่าพื้นที่จังหวัดยะลามีศักยภาพทางเรดอนสูง [6] ดังนั้นหินที่ใช้เป็นวัสดุก่อสร้างในพื้นที่น่าจะมี ความเข้มข้นของแก๊สเรดอนสูงด้วย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจที่จะศึกษาระดับความเข้มข้นของแก๊สเรดอนและอัตราการปลดปล่อยแก๊สเรดอนจากวัสดุก่อสร้างประเภทหิน เพื่อเป็นข้อมูลในการนำไปใช้ในการพัฒนาคุณภาพชีวิตของผู้ที่อยู่อาศัยภายในอาคารให้ดีขึ้น และงานวิจัยนี้จะศึกษาความเข้มข้นและอัตราการปลดปล่อยแก๊สเรดอนจากวัสดุก่อสร้าง โดยการตรวจวัดรังสีแอลฟาด้วยเครื่อง ATMOS 12 dpx

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการทดลอง

2.1 วัสดุ อุปกรณ์

2.1.1 ถังใส่ตัวอย่าง (ถังสเตนเลสทรงกระบอก มีฝาปิดและมีท่อต่อที่ฝา)

2.1.2 เครื่อง ATMOS 12 dpx บริษัท Gammadata ประเทศสวีเดน จากสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) อำเภอองครักษ์ จังหวัดนครนายก

2.1.3 ถูบไฟฟ้า ยี่ห้อ Memmert

2.1.4 ตู้อัดควัน

2.1.5 เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์

2.1.6 บั้มสุญญากาศ ยี่ห้อ Edwards

2.1.7 เครื่องบอกพิกัดทางภูมิศาสตร์

2.1.8 กระบอกถ่านกัมมันต์

2.1.9 ถาดใส่ตัวอย่าง

2.1.10 เกจวัดสุญญากาศ

2.1.11 ถุงซิปล็อค

2.1.12 ตู้อัดฝาล้าง

2.2 วิธีดำเนินการ

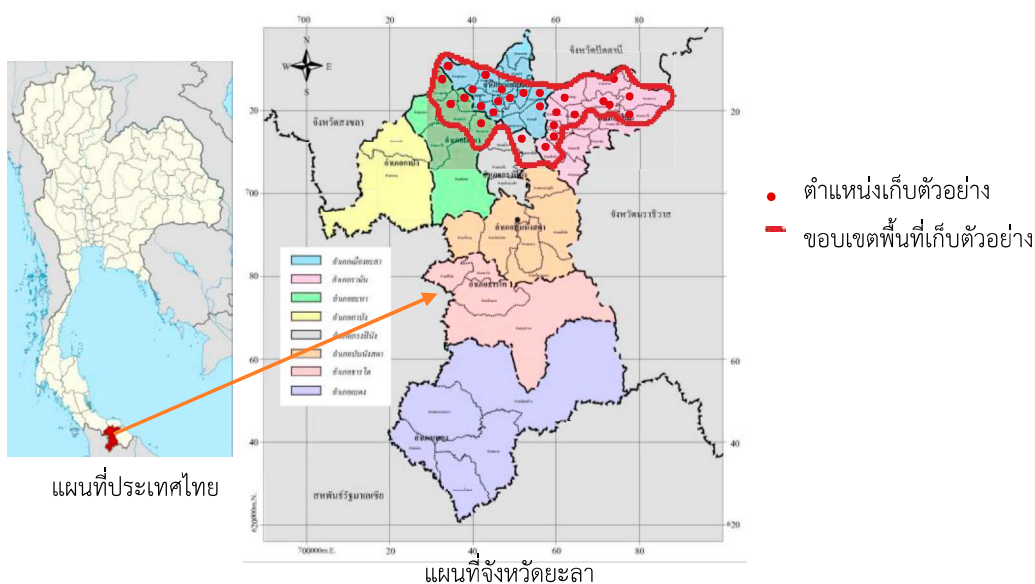
สุ่มเก็บตัวอย่างวัสดุก่อสร้างประเภทหิน โดยการซื้อจากร้านขายอุปกรณ์ก่อสร้างในพื้นที่ 4 อำเภอ ของจังหวัดยะลา (อำเภอเมือง รามัน ยะหา และกรงปินัง) รวม 27 ตำบล ดังแสดงตำแหน่งที่เก็บตัวอย่างในภาพที่ 1 ตัวอย่างจะถูกนำมาอบที่อุณหภูมิ 230°C เป็นระยะเวลาประมาณ 12 hr เพื่อไล่ความชื้นออกจากตัวอย่าง หลังจากนั้นชั่งตัวอย่างที่อบแล้ว ให้ได้น้ำหนัก 1,000 g แล้วใส่ในถาดสเตนเลส โดยเกลี่ยให้ตัวอย่างกระจายตัวสม่ำเสมอ แล้ววางลงในกึ่งกลางของถังวัด (Chambers) ซึ่งถังวัดนี้จะเป็นถังสเตนเลสทรงกระบอกที่ทราบปริมาตร และมีฝาปิด โดยในส่วนฝาปิดจะมีการต่อท่อเพื่อเชื่อมต่ออากาศภายในกับภายนอกถังไว้ เมื่อใส่ตัวอย่างในถังแล้วปิดฝาล้างให้สนิท เพื่อไม่ให้อากาศจากภายในถังรั่วออกมาภายนอกได้ ทำการทดสอบการรั่วซึมของอากาศภายในถัง โดยการต่อบั้มสุญญากาศเข้ากับท่อถังวัด และต่อเกจวัดสุญญากาศเข้ากับอีกท่อหนึ่ง โดยให้เข็มของเกจวัดสุญญากาศอ่านค่าได้ 4 inHg แล้วถอดท่อที่ต่อกับบั้มสุญญากาศออก หลังจากนั้นตั้งถังทิ้งไว้ประมาณ 2 hr โดยระหว่างนี้ต้องคอยสังเกตเข็มเกจวัดสุญญากาศว่าค่ายังอยู่เท่าเดิมหรือไม่ ถ้าอ่านค่าได้เท่าเดิมจนถึงเวลาที่กำหนดแสดงว่าถังวัดไม่มีการรั่วซึม เมื่อไม่มีการรั่วซึมแล้วก็ทำให้อากาศ

ภายในถังกลับมามีความดันเท่ากับอากาศภายนอกถัง โดยการเติมอากาศเข้าไปในถังผ่านการต่อกระบอก ถ่านกัมมันต์ (Activated carbon) เข้ากับท่อที่ฝาถัง แล้วสามารถอ่านค่าที่เกจวัดสุญญากาศได้ 0 inHg หลังจากนั้นถอดกระบอกถ่านกัมมันต์ และเกจวัดสุญญากาศออกจากถังวัด เก็บถังวัดไว้เป็นระยะเวลา 7 วัน เพื่อให้ตัวอย่างวัสดุก่อสร้างปลดปล่อยแก๊สเรดอนออกมาภายในถังวัด เมื่อครบเวลาที่กำหนดสามารถวัดความเข้มข้นของแก๊สเรดอนได้ด้วยเครื่อง-ATMOS 12 dpx ดังแสดงในภาพที่ 2 ความเข้มข้นของแก๊สเรดอนภายในภาชนะจะได้ข้อมูลตามภาพที่ 3 ค่าที่อ่านได้มีหน่วยเป็น $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ซึ่งนำข้อมูลที่ได้ไป

คำนวณหาความเข้มข้นของแก๊สเรดอนที่จุดสมมูล อัตราการปลดปล่อยแก๊สเรดอน และปริมาณรังสียังผลรายปีได้จากสมการต่อไปนี้ ตามลำดับ [7]

$$C(t) = C_{\infty}(1 - e^{-\lambda t}) \quad (1)$$

เมื่อ $C(t)$ คือ ความเข้มข้นของแก๊สเรดอนที่ได้จากถังวัด ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$) C_{∞} คือ ความเข้มข้นของแก๊สเรดอนที่จุดสมมูล ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$) λ คือ ค่าคงที่การสลายตัวของแก๊สเรดอน (s^{-1}) และ t คือ ระยะเวลาที่ผ่านไป (s)



ภาพที่ 1 ตำแหน่งเก็บตัวอย่างวัสดุก่อสร้าง

ซึ่งค่าความเข้มข้นของแก๊สเรดอนที่ได้จากเครื่อง ATMOS 12 dpx จะได้ออกมาในหน่วย $\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ซึ่งค่าที่ได้มานี้สามารถนำไปคำนวณหาอัตราการปลดปล่อยแก๊สเรดอนได้จากสมการต่อไปนี้ [8]

$$E = C_{\infty} \lambda \left(\frac{V}{S} \right) \quad (2)$$

หรือ

$$E = C_{\infty} \lambda \left(\frac{V}{m} \right) \quad (3)$$

เมื่อ E คือ อัตราการปล่อยแก๊สเรดอน ($\text{Bq}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{s}^{-1}$) V คือ ปริมาตรถังวัด (m^3) m คือ มวลของตัวอย่าง (kg) และ S คือ พื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง (m^2) C_{∞} คือ ความเข้มข้นของแก๊สเรดอนที่จุดสมดุล ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$) และ λ คือ ค่าคงที่การสลายตัวของแก๊สเรดอน (s^{-1})

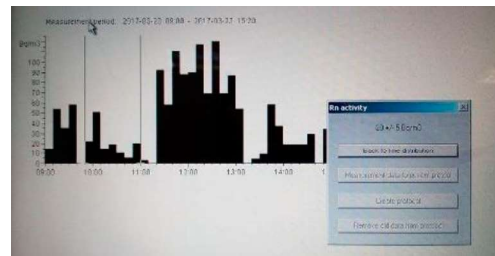


ภาพที่ 2 การวัดความเข้มข้นของแก๊สเรดอนในวัสดุก่อสร้างด้วยเครื่อง ATMOS 12 dpx [8]

นอกจากนี้ คำนวณหาปริมาณรังสีภัยผลรายปีที่ผู้อยู่อาศัยมีโอกาสได้รับ (ไม่เกิน $1 \text{ mSv}\cdot\text{y}^{-1}$) จากสมการต่อไปนี้ [1]

$$H = C_{\infty} \times F \times T \times D \quad (4)$$

เมื่อ H คือ ปริมาณรังสีภัยผลรายปี ($\text{mSv}\cdot\text{y}^{-1}$) C_{∞} คือ ความเข้มข้นของแก๊สเรดอนที่จุดสมดุล ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$) F คือ Equilibrium factor สำหรับภายในอาคารมีค่าเท่ากับ 0.4, T คือ Exposure period มีค่าเท่ากับ $7,000 \text{ h}\cdot\text{y}^{-1}$ และ D คือ Dose Conversion Factor = $9 \times 10^{-9} \text{ mSv} (\text{Bq}\cdot\text{h}\cdot\text{m}^{-3})^{-1}$



ภาพที่ 3 ข้อมูลค่าความเข้มข้นของแก๊สเรดอนที่ได้จากเครื่อง ATMOS 12dpx [8]

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

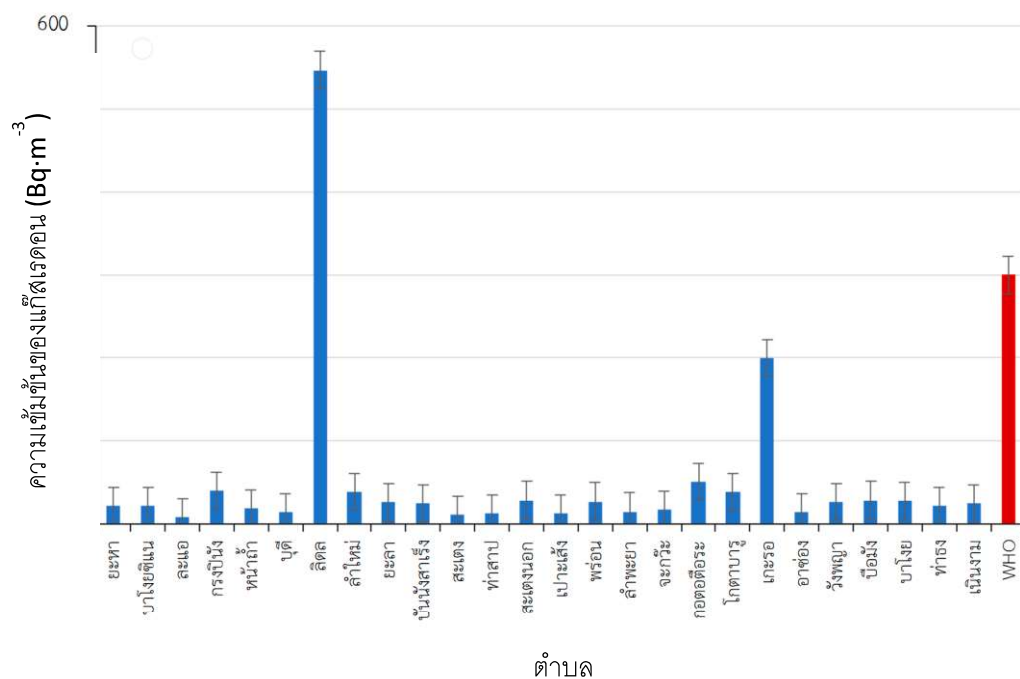
จากการนำตัวอย่างวัสดุก่อสร้างประเภทหินในพื้นที่ทางตอนเหนือของจังหวัดยะลา มาศึกษาความเข้มข้น อัตราการปลดปล่อยแก๊สเรดอน และปริมาณรังสีภัยผล ผลการศึกษาแสดงไว้ในตารางที่ 1 ภาพที่ 4 - 6 โดยพบว่า ความเข้มข้นของแก๊สเรดอน อัตราการปลดปล่อยแก๊สเรดอน และปริมาณรังสีภัยผลจากตัวอย่างหินมีค่าอยู่ระหว่าง 7.01 ± 7.01 ถึง $547.21 \pm 44.90 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$, 3.12 ± 0.94 ถึง $165.46 \pm 13.58 \text{ mBq}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ และ 0.18 ± 0.18 ถึง $13.79 \pm 1.13 \text{ mSv}\cdot\text{y}^{-1}$ ตามลำดับ ความเข้มข้นแก๊สเรดอน อัตราการปลดปล่อยแก๊สเรดอน และปริมาณรังสีภัยผลในแต่ละตำบลส่วนใหญ่มีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าสูงที่สุดในตำบลลิเล รองลงมาคือตำบลเกาะรอ

ตารางที่ 1 ค่าความเข้มข้น ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$) อัตราการปลดปล่อยแก๊สเรดอน ($\text{mBq}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) และปริมาณรังสียังผล ($\text{mSv}\cdot\text{y}^{-1}$)

อำเภอ	ตำบล	ความเข้มข้นของ แก๊สเรดอน ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$)	อัตราการปลดปล่อย แก๊สเรดอน ($\text{mBq}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)	ปริมาณรังสียังผล ($\text{mSv}\cdot\text{y}^{-1}$)
ยะหา	ตาชี	27.89±7.97	8.43±2.41	0.70±0.20
	ยะหา	21.11±7.04	6.38±2.13	0.53±0.18
	บาโงยซีแน	21.48±3.22	6.49±0.97	0.54±0.08
	ละแอ	7.01±7.01	3.36±3.36	0.18±0.18
กรงปินัง	กรงปินัง	39.46±5.26	11.93±1.59	0.99±0.13
เมือง	หน้าถ้ำ	18.50±6.61	6.99±2.50	0.47±0.17
	บุตี	13.50±4.50	4.08±1.36	0.34±0.11
	ลิตล	547.24±44.90	165.46±13.58	13.79±1.13
	ลำใหม่	38.05±11.81	14.38±4.46	0.96±0.30
	ยะลา	25.18±6.99	7.61±2.11	0.63±0.18
	บันนังสาเร้ง	24.74±5.50	7.48±1.66	0.62±0.14
	สะเตง	10.33±3.10	3.12±0.94	0.26±0.08
รามัน	ท่าสาป	12.59±5.60	3.81±1.69	0.32±0.14
	สะเตงนอก	27.89±6.97	10.54±2.64	0.70±0.18
	เปาะเส้ง	12.01±4.00	5.77±1.92	0.30±0.10
	พร่อน	26.39±7.11	7.98±2.15	0.67±0.18
	ลำพะยา	14.37±6.53	4.34±1.97	0.36±0.16
	จะก๊วะ	16.97±8.48	8.14±4.07	0.43±0.21
	กอดตืออระ	49.91±6.51	15.09±1.97	1.26±0.16
	โกตาบารู	37.40±9.10	17.95±4.37	0.94±0.23
	เกะรอ	199.25±15.02	75.31±5.68	5.02±0.38
	อาซ่อง	13.25±5.30	5.01±2.00	0.33±0.13
	วังพญา	25.98±7.28	9.82±.75	0.65±0.18

ตารางที่ 2 (ต่อ) ค่าความเข้มข้น ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$) อัตราการปลดปล่อยแก๊สเรดอน ($\text{mBq}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) และปริมาณรังสี
ยังผล ($\text{mSv}\cdot\text{y}^{-1}$)

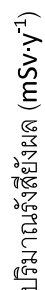
อำเภอ	ตำบล	ความเข้มข้นของ แก๊สเรดอน ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$)	อัตราการปลดปล่อย แก๊สเรดอน ($\text{mBq}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$)	ปริมาณรังสียังผล ($\text{mSv}\cdot\text{y}^{-1}$)
รามัน	วังพญา	25.98 ± 7.28	9.82 ± 7.75	0.65 ± 0.18
	ป้อมม้ง	27.89 ± 7.97	10.54 ± 3.01	0.70 ± 0.20
	บาโงย	26.76 ± 7.49	10.11 ± 2.83	0.67 ± 0.19
	ท่าธง	20.66 ± 11.36	9.92 ± 5.46	0.52 ± 0.29
	เนินงาม	23.66 ± 4.98	7.15 ± 1.51	0.60 ± 0.13
เจดีย์	-	49.24 ± 8.43	16.56 ± 3.00	1.24 ± 0.21
WHO	-	300	-	-
ICRP	-	-	-	1



ภาพที่ 4 ความเข้มข้นของแก๊สเรดอน ($\text{Bq}\cdot\text{m}^{-3}$) จากตัวอย่างหิน



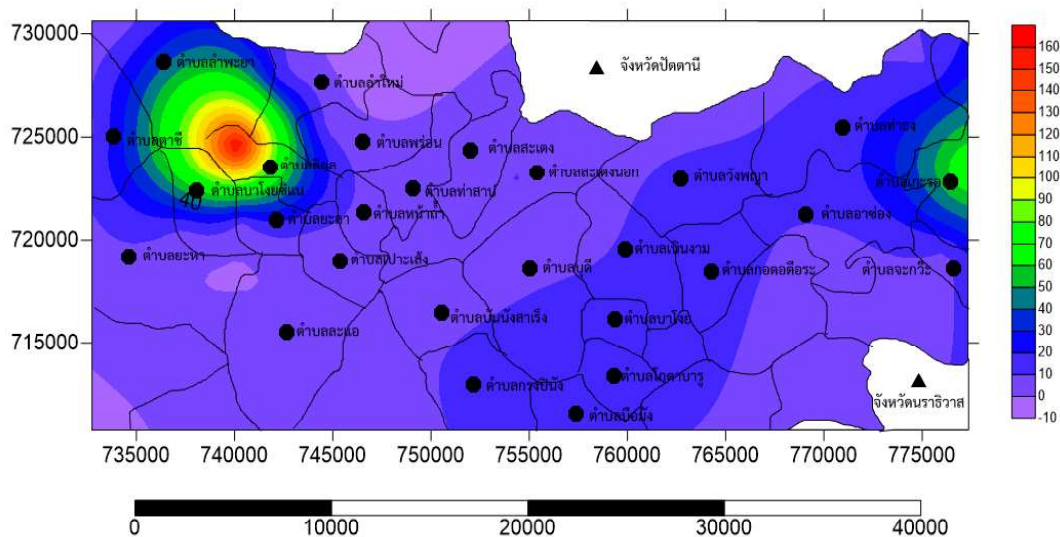
ภาพที่ 5 อัตราการปลดปล่อยแก๊สเรดอน ($\text{mBq}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$) จากตัวอย่างหิน



ภาพที่ 6 ปริมาณรังสียังผล (mSv.y⁻¹) จากตัวอย่างหิน

จากผลการศึกษาจะเห็นได้ว่าความเข้มข้นของแก๊สเรดอนในตัวอย่งหินในตำบลลิถล มีค่าสูงกว่าค่าอ้างอิงคือ $300 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ ซึ่งกำหนดโดยองค์การอนามัยโลก (WHO) สำหรับปริมาณรังสียังผลพบว่ามีค่าสูงกกว่าค่าอ้างอิงคือ $1 \text{ mSv}\cdot\text{y}^{-1}$ ซึ่งกำหนดโดยคณะกรรมการการระหว่างประเทศด้านการป้องกันรังสี (ICRP) ทั้งนี้ การที่ความเข้มข้นของแก๊สเรดอนมีค่าสูงที่สุดในตำบลลิถล เนื่องจากตำบลลิถลมีโรงม่หินตั้งอยู่ในพื้นที่ ซึ่งหินที่นำมาเข้าโรงม่หินส่วนใหญ่เป็นหินที่มาจากแหล่งภูเขาหินยะลา ซึ่งอยู่ในพื้นที่ [10] ประกอบกับตำบลลิถลมีสภาพทางธรณีวิทยาเป็นเทือกหินแกรนิตอยู่บริเวณใกล้ ๆ และหินแกรนิตเป็นหินที่มีการปลดปล่อยแก๊สเรดอนในปริมาณสูง [3,4,11] ดังนั้น เป็นไปได้ว่าอาจจะมีหินแกรนิตแทรกซอนในภูเขาหินปูน บริเวณตำบลลิถล อย่างไรก็ตามบางตำบลที่มีสภาพทางธรณีวิทยาเป็นหินแกรนิตแต่มีปริมาณความเข้มข้นของแก๊สเรดอนไม่สูงมากนักอาจเป็นเพราะหินที่ใช้เป็นวัสดุก่อสร้างเป็นหินที่ถูกสังข้อ

มาจากที่อื่น อย่างไรก็ตาม เมื่อเปรียบเทียบอัตราการปลดปล่อยแก๊สเรดอนในตัวอย่างวัสดุก่อสร้างประเภทหินจากงานวิจัยนี้กับตัวอย่างหินที่ใช้ในการก่อสร้างในต่างประเทศ พบว่า มีค่าต่ำกว่าอัตราการปลดปล่อยแก๊สเรดอนเฉลี่ยในหินที่ใช้ในประเทศอียิปต์ [12] ประเทศแคนาดา [3] และประเทศซาอุดีอาระเบีย [13] และเมื่อเปรียบเทียบอัตราการปลดปล่อยแก๊สเรดอนในตัวอย่างวัสดุก่อสร้างประเภทหินจากงานวิจัยนี้กับวัสดุก่อสร้างประเภทอื่น พบว่าตัวอย่างวัสดุก่อสร้างประเภทหินนี้มีค่าอัตราการปลดปล่อยแก๊สเรดอนต่ำกว่า วัสดุก่อสร้างทำมาจากยิปซัม หินอ่อน เซรามิก และหินแกรนิต [14] และเมื่อนำข้อมูลอัตราการปลดปล่อยแก๊สเรดอนในตัวอย่างหิน มาเขียนแผนที่คอนทัวร์ ดังแสดงไว้ในภาพที่ 7 พบว่า มีค่าอัตราการปลดปล่อยแก๊สเรดอนสูงทางทิศตะวันตกเฉียงเหนือของพื้นที่ศึกษา ซึ่งอยู่บริเวณระหว่างตำบลลำพะยา ตำบลตาชี ตำบลบาโจยซิแน และตำบลลิคิล ทั้งนี้ เนื่องจากบริเวณดังกล่าวมีลักษณะทางธรณีวิทยาเป็นหินแกรนิต



ภาพที่ 7 อัตราการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกในตัวอย่างหิน ในบริเวณตอนเหนือ ของจังหวัดยะลา

4. สรุปผลการทดลอง

ผลการวิเคราะห์อัตราการปลดปล่อยแก๊สเรดอนจากวัสดุก่อสร้าง ทางตอนเหนือของจังหวัดยะลา พบว่าตัวอย่างหินมีความเข้มข้นของแก๊สเรดอนอยู่ระหว่าง 7.01 ± 7.01 ถึง $547.21 \pm 44.90 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ เฉลี่ย $49.24 \pm 8.43 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ อัตราการปลดปล่อยแก๊สเรดอนมีค่าอยู่ระหว่าง 3.12 ± 0.94 ถึง $165.46 \pm 13.58 \text{ mBq}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ เฉลี่ย $16.56 \pm 3.00 \text{ mBq}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{h}^{-1}$ และปริมาณรังสียังผลมีค่าอยู่ระหว่าง 0.18 ± 0.18 ถึง $13.79 \pm 1.13 \text{ mSv}\cdot\text{y}^{-1}$ เฉลี่ย $1.24 \pm 0.21 \text{ mSv}\cdot\text{y}^{-1}$ โดยพบว่า ตัวอย่างหินมีค่าความเข้มข้นของแก๊สเรดอน อัตราการปลดปล่อยแก๊สเรดอน และปริมาณรังสียังผลมีค่าสูงที่สุดในตำบลลิตร และเกาะรอ ตามลำดับ ส่วนตำบลอื่นๆ มีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกัน โดยความเข้มข้นของแก๊สเรดอนในตำบลลิตร มีค่าสูงกว่าค่าอ้างอิง คือ $300 \text{ Bq}\cdot\text{m}^{-3}$ กำหนดโดย WHO และในส่วนของปริมาณรังสียังผลพบว่ามีตำบลลิตร เกาะรอ และกอดตือระ มีค่าสูงกว่าค่าอ้างอิง คือ $1 \text{ mSv}\cdot\text{y}^{-1}$ กำหนดโดย ICRP

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตปัตตานี ที่สนับสนุนทุนวิจัยและสถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) อำเภอดงคราย จังหวัดนครนายกที่ให้ใช้เครื่องมือบางส่วน

6. อ้างอิง

- [1] ธีรพงศ์ ศรีสุวรรณ, ไพฑูรย์ วรรณพงษ์, เฉลิมวัฒน์ ต้นตสวัสดิ์. อิทธิพลของวัสดุปิดผิวที่มีต่อการปล่อยก๊าซเรดอนจากวัสดุก่อสร้าง

ประเภทคอนกรีต ซึ่งมีฟอสโฟอิมปซัมเป็นส่วนผสม. วารสารวิจัยและสาระสถาปัตยกรรม/การผังเมือง. 2555; 9:105-11.

- [2] Barbosa-Lorenzo R, Ruano-Ravina A, Caramésd SC, et al.. Residential radon and lung cancer. An ecologic study in Galicia, Spain. Medicina Clínica (Barc). 2015; 144:304-8.
- [3] Chen J, Rahman MN, Atiya IA. Radon exhalation from building materials for decorative use. J Environ Radioact. 2010; 101:317-22.
- [4] Sakoda A, Hanamoto K, Ishimori Y, et al. Radioactivity and radon emanation fraction of the granites sampled at Misasa and Badgastein. Appl Radiat Isot. 2008; 66:648-52.
- [5] Gillmorea GK, Phillipsb PS, Denmanc AR., et al. . Radon in the Creswell Crags Permian limestone caves. J Environ Radioact. 2002; 62:165-179.
- [6] พงทิพย์ แก้วทับทิม. รายงานวิจัยเรื่องการตรวจปริมาณยูเรเนียมในดินพื้นผิว พื้นที่จังหวัดยะลาด้วยแกมมาสเปกโตรมิเตอร์. ปัตตานี: มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์; 2545.
- [7] Sola P, Srinuttrakul W, Laoharajanaphan S, et al.. Estimation of indoor radon and the annual effective dose from building materials by ionization chamber measurement. J Radioanal Nucl Chem. 2014; 302:1531-5.

- [8] สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) อำเภอบางกรวย จังหวัดนครนายก
- [9] Kovler K, Perevalov A, Steiner V, et al . Radon exhalation of cementitious materials made with coal fly ash: Part 1 – scientific background and testing of the cement and fly ash emanation. J Environ Radioact. 2005; 82:321-334.
- [10] กรมอุตสาหกรรมพื้นฐานและการเหมืองแร่ กระทรวงอุตสาหกรรม. แร่ หิน ดิน ทราย. [Internet].; 2550 [cited 2560 มีนาคม 19]. Available from: <https://www.dpim.go.th>.
- [11] Pereira. Estimation of the radon production rate in granite rocks and evaluation of the implications for geogenic radon potential maps: A case study in Central Portugal. J Environ Radioact. 2017; 166(2):270-7.
- [12] Moharram BM, Suliman MN, Zahran NF, et al. ^{238}U , ^{232}Th content and radon exhalation rate in some. Egyptian building materials. Ann Nucl Energ. 2012; 45:138-43.
- [13] Al-Jarallah, M. Radon exhalation from granites used in Saudi Arabia. J Environ Radioact. 2001; 53:91-8.
- [14] Al-Azmi D, Okeyode IC, Alatisse OO, et al . Setup and procedure for routine measurements of radon exhalation rates of building materials. Radiat Meas. 2018; 112:6-10.

คำแนะนำสำหรับผู้เขียน

วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ รับบทความทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ต้องเป็นต้นฉบับ ไม่เคยตีพิมพ์ หรือเผยแพร่ที่ไหนมาก่อน มีจุดประสงค์เพื่อเผยแพร่ความรู้ และผลงานวิชาการทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และมีการตรวจสอบคุณภาพอย่างเคร่งครัด

1. หลักเกณฑ์การส่งบทความ

- 1.1 บทความเปิดรับทั้งจากบุคคลภายในและภายนอกมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
- 1.2 บทความมีรูปแบบการเขียนตามที่กำหนดไว้
- 1.3 บทความต้องมีความยาวประมาณ 6 -12 หน้า ในรูปแบบ 2 คอลัมน์
- 1.4 หากเป็นบทความที่มาจากการประชุมวิชาการ ต้องใส่อ้างอิงเชิงบรรณานุกรมให้ทราบว่ามาจากงานประชุมวิชาการใด และเปลี่ยนชื่อบทความพร้อมทั้งปรับเนื้อหาให้เป็นบทความที่สมบูรณ์ (ไม่น้อยกว่าร้อยละ 40)
- 1.5 การส่งบทความ เพื่อผ่านการพิจารณาจากกองและประเมินคุณภาพจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้องผ่าน รูปแบบ Online

โดยจัดส่งไฟล์อิเล็กทรอนิกส์ผ่าน <https://www.tci-thaijo.org/index.php/rmutk> เริ่มจากการกรอกข้อมูลตามแบบฟอร์มส่งบทความเพื่อพิจารณาให้สมบูรณ์ บทความจะได้รับการพิจารณาจากกองจากผู้ทรงคุณวุฒิ 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) 1 นิ้ว หรือ 2.54 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 B5 (JIS) 18.2 x 25.7 ซม.

3.3 รูปแบบตัวอักษร

บทความภาษาไทย ใช้ TH SarabunPSK

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ Time New Roman

3.4 ชื่อเรื่อง

บทความภาษาไทย ใช้ชื่อเรื่องทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ขนาด 16 ตัวหนา (พิมพ์กลางหน้ากระดาษควรเป็นชื่อที่สั้น กระทัดรัด ได้ใจความตรงกับวัตถุประสงค์และเนื้อเรื่อง)

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ชื่อเรื่อง ขนาด 16 ตัวหนา (พิมพ์กลางหน้ากระดาษ)

3.5 ชื่อผู้เขียนและชื่อผู้ร่วมงาน

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 14 ตัวหนา (พิมพ์กลางหน้ากระดาษ)

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 12 ตัวหนา (พิมพ์กลางหน้ากระดาษ)

3.6 สถานที่ทำงาน เบอร์โทรศัพท์ และ E-mail

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 12 ตัวปกติ (พิมพ์กลางหน้ากระดาษ)

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 10 ตัวปกติ (พิมพ์กลางหน้ากระดาษ)

3.7 คำว่า บทคัดย่อ/Abstract

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 16 ตัวหนา

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 12 ตัวหนา

3.8 เนื้อความใน บทคัดย่อ/Abstract

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 14 ตัวปกติ (พิมพ์แบบเต็มขอบ)

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 11 ตัวปกติ (พิมพ์แบบเต็มขอบ)

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

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 14 ตัวปกติ

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 11 ตัวปกติ

3.10 ชื่อหัวเรื่องใหญ่

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 16 ตัวหนา (พิมพ์แบบชิดซ้าย)

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 12 ตัวหนา (พิมพ์แบบชิดซ้าย)

3.11 ชื่อหัวเรื่องย่อย

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 14 ตัวหนา (พิมพ์แบบชิดซ้าย)

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 11 ตัวหนา (พิมพ์แบบชิดซ้าย)

3.12 คำว่า กิตติกรรมประกาศ/Acknowledgement และคำว่า เอกสารอ้างอิง/Reference

(ใส่หมายเลขลำดับหัวเรื่องด้วย)

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 16 ตัวหนา

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 12 ตัวหนา

3.13 สมการหรือพจน์ทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน

ควรเขียนโดยใช้ Equation Editor โดยจัดแยกบรรทัด และมีเลขกำกับอยู่ในวงเล็บเล็ก จัดพิมพ์ด้วย Microsoft Word

4. ส่วนประกอบของบทความแต่ละประเภท

4.1 บทความวิจัย

A. ส่วนปก

1. **ชื่อบทความ (Title)** ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ควรกะทัดรัด ไม่ยาวเกินไป ชื่อเรื่องต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ
2. **ชื่อผู้เขียน (Authors)** ชื่อเต็ม นามสกุลเต็ม ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ของผู้เขียนทุกคน สำหรับผู้เขียนประสานงานให้ใส่ที่อยู่ให้ละเอียด พร้อมทั้งหมายเลขโทรศัพท์/โทรสาร และ E-mail 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 และควรอ้างอิงทฤษฎีหรือเปรียบเทียบการทดลองของผู้อื่นที่เกี่ยวข้องประกอบ เพื่อให้ผู้อ่านเห็นด้วยตามหลักการหรือคัดค้านทฤษฎีที่มีอยู่เดิม รวมทั้งแสดงให้เห็นถึงการนำไปใช้ประโยชน์ และการให้ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต
- รูปภาพ/กราฟ ให้อยู่ในเนื้อเรื่องของบทความ ขนาดตัวอักษรสามารถอ่านได้ชัดเจนเหมาะสมกับขนาดของรูปภาพ/กราฟ โดยบันทึกเป็นไฟล์ที่มีนามสกุล JPG มีความละเอียดไม่ต่ำกว่า 300 dpi เท่านั้น ถ้าเป็นภาพถ่ายควรส่งภาพต้นฉบับ และในกรณีที่เปลี่ยนรูปถ่ายให้ชัดโดยใช้หมึกสีดำที่มีความคมชัด หมายเลขรูปภาพ/กราฟให้เป็นเลขอารบิก และอยู่ด้านล่างของรูปภาพ/กราฟ
- ตาราง ให้อยู่ในเนื้อเรื่องของบทความ หมายเลขตารางให้เป็นเลขอารบิก และอยู่ด้านบนของตาราง

4. **บทสรุป (CONCLUSION)** สรุปประเด็น และสาระสำคัญที่ได้จากการวิจัย
5. **กิตติกรรมประกาศ (ACKNOWLEDGEMENTS)** เป็นการแสดงความขอบคุณแก่ผู้ให้ความช่วยเหลือให้การวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เพียงสั้นๆ (อาจมีหรือไม่ก็ได้)
6. **เอกสารอ้างอิง (REFERENCES)** เป็นรายการเอกสารอ้างอิงที่ใช้เป็นหลักในการค้นคว้าวิจัยที่ได้รับการตรวจสอบเพื่อนำมาเตรียมรายงาน และมีการอ้างอิงถึงเฉพาะเอกสารที่ปรากฏในบทความเท่านั้น การอ้างอิงให้จัดเรียงตามลำดับที่อ้างอิงเป็นตัวเลขในเครื่องหมาย [x] และให้เริ่มต้นเรียงลำดับเอกสารจากที่พบในเนื้อหา ก่อนเป็น [1] หากผู้เขียนมีมากกว่า 3 คน ให้ใส่ชื่อ 3 คนแรก แล้วตามด้วย และคณะหรือ et al.

การอ้างอิงเอกสารในเนื้อเรื่องบทความ (In-text Citations) การอ้างอิงเอกสารในเนื้อเรื่อง ให้ใช้ระบบแวนคูเวอร์ (Vancouver style) สามารถดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้ที่

<http://library.md.chula.ac.th/guide/vancouver2011.pdf>

ตัวอย่างการเขียนเอกสารอ้างอิง

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, et al. Immunobiology. 5th ed. New York: Garland Publishing; 2001.
- รังสรรค์ ปัญญาธิคุณ. โรคติดเชื้อของระบบประสาทกลางในประเทศไทย. กรุงเทพฯ: เรือนแก้วการพิมพ์; 2536.

บทความจากวารสาร (Articles in Journals)

รูปแบบพื้นฐาน ชื่อผู้แต่ง(Author)/ชื่อบทความ(Title of the article)/ชื่อวารสาร(Title of the Journal)/ปีที่พิมพ์(Year); ปีที่ของวารสาร(Volume)(ฉบับที่(No.)):หน้า(Pages).

- ชนิดรา ดำรงกิจ, ใหม่ น้อยพิทักษ์, วิบูลย์ ตั้งวิโรตมณกุล และคณะ.การศึกษาสมบัติทางกลและส่วนผสมทาง เคมีของรอยเชื่อมเหล็กกรางรถไฟ. 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 มี.ค. 2554]. จาก: www.localfund.in.th/files/NHSO-intro1-6.pdf

การอ้างอิงบทความที่นำเสนอในการประชุม หรือสรุปผลการประชุม (Conference paper)

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

- ชีระ 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.

4.2 บทความวิชาการ

A. ส่วนปก

มีส่วนประกอบเหมือนบทความวิจัย แต่ไม่ต้องมีบทคัดย่อ เขียนให้อยู่ในกระดาษจำนวน 1 หน้า เท่านั้น

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. เอกสารอ้างอิง (REFERENCES) ใช้ตามที่วารสารกำหนด

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ (Peer Review)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์กาญจนา ชินสำราญ	รองศาสตราจารย์ปิยะพร คามภิรภาพพันธ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์เมฆชาติ สุรกุล	ผู้ช่วยศาสตราจารย์อรรถวิทย์ อุปัทมภานนท์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์นพรัตน์ ภัยวิมุติ	นายศราวุธ ใจเย็น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิชาญ ช่วยพันธ์	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ลักษมี วิทยา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์อัศพงศ์ พันธุ์พุกษ์	นางสาวประนัฎา พิมสี
นายพิษณุ ทองขาว	ผู้ช่วยศาสตราจารย์รวิทย์ จันทร์สุวรรณ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ครุฑิต กำลั้งกล้า	ผู้ช่วยศาสตราจารย์วุฒิวัฒน์ คงรัตนประเสริฐ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัชวาลย์ สุขมัน	นายปราโมทย์ ฉลองรัตนสกุล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชูศักดิ์ กมลขันติธร	รองศาสตราจารย์จรรยา เจริญเนตรกุล
นายสาคร วุฒิพัฒน์พันธ์	ผู้ช่วยศาสตราจารย์นพรัตน์ มะเท
รองศาสตราจารย์ชนิษฐา เจริญลาภ	นายสันหวัจน์ ทองแดง
นางสาวพิชามณูช น้อยสุวรรณ	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณรงค์ชัย วิวัฒนาช่าง
นางสาวเลิศลักษณ์ แก้ววิมล	นายสุริยา โชคเพิ่มพูน
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ภูริวัตร คัมภิรภาพพัฒน์	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ไอลส คนซื่อ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์เอื้อมฟ้า นาคโต	ผู้ช่วยศาสตราจารย์จันทรเจตฉาย สังเกตกิจ
นางสาววรรณา เนื่องมัจฉา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร.ปฎิภาณ ถิ่นพระบาท
ผู้ช่วยศาสตราจารย์เอื้อมฟ้า นาคโต	นายเกยุร ดวงอุปมา
นางสาวกฤติกา นรจิตร	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิรินาถ ศรีอ่อนนวล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธรรมา เจียรธรวานิช	ผู้ช่วยศาสตราจารย์จิรพงษ์ จิตตโคตร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์สวัสดี ศรีเมืองธน	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชาญยุทธ์ กาญจนพิบูลย์
นางสาวจิรวดี ผลประเสริฐ	ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมรักษ์ รอดเจริญ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปรกรณ์เกียรติ์ เสวตเมธิกุล	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ทักษิณา เครือหงส์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์อภิชาติ ศรีชาติ	ผู้ช่วยศาสตราจารย์หงษ์ศิริ ภิชัยดิกลชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์นิดา แก้วหาวงษ์	ผู้ช่วยศาสตราจารย์อชฌาณัท รัตนเลิศ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ไกรลิ่ง สามารถ	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ศิวดล กัญญาคำ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชัชฎา หนูสาย	ผู้ช่วยศาสตราจารย์อชฌาณัท รัตนเลิศนุสรณ์
นางสาวนันทิยา มากะเต	ผู้ช่วยศาสตราจารย์กฤติกา ตันประเสริฐ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธีรพัฒน์ ชมภูคำ	รองศาสตราจารย์พรรณจิรา วงศ์สวัสดิ์

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.....

E-mail.....โทรศัพท์.....

โทรสาร..... โทรศัพท์ (มือถือ).....

ข้าพเจ้าขอรับรองว่าบทความนี้ ☐ เป็นผลงานของข้าพเจ้าแต่เพียงผู้เดียว☐ เป็นผลงานของข้าพเจ้าและผู้ร่วมงานตามชื่อที่ระบุในบทความจริง

โดยบทความนี้ไม่เคยลงตีพิมพ์ในวารสารใดมาก่อน และจะไม่นำบทความนี้ส่งไปเพื่อพิจารณาตีพิมพ์
ในวารสารอื่นภายใน 90 วัน นับจากวันที่ข้าพเจ้าได้ส่งบทความฉบับนี้ และยินยอมว่าบทความที่ตีพิมพ์ลงใน
วารสารวิจัย มทร. กรุงเทพ ถือเป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ลงชื่อ.....

(.....)



หนังสือรับรองการตีพิมพ์บทความ
วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ขอรับรองว่าบทความ.....

เรื่อง

โดย

ได้ผ่านการประเมินจากคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ
และตีพิมพ์ในวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ
ปีที่..... ฉบับที่ (..... - พ.ศ.)

(.....)

บรรณาธิการวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ขั้นตอนการจัดทำวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ

