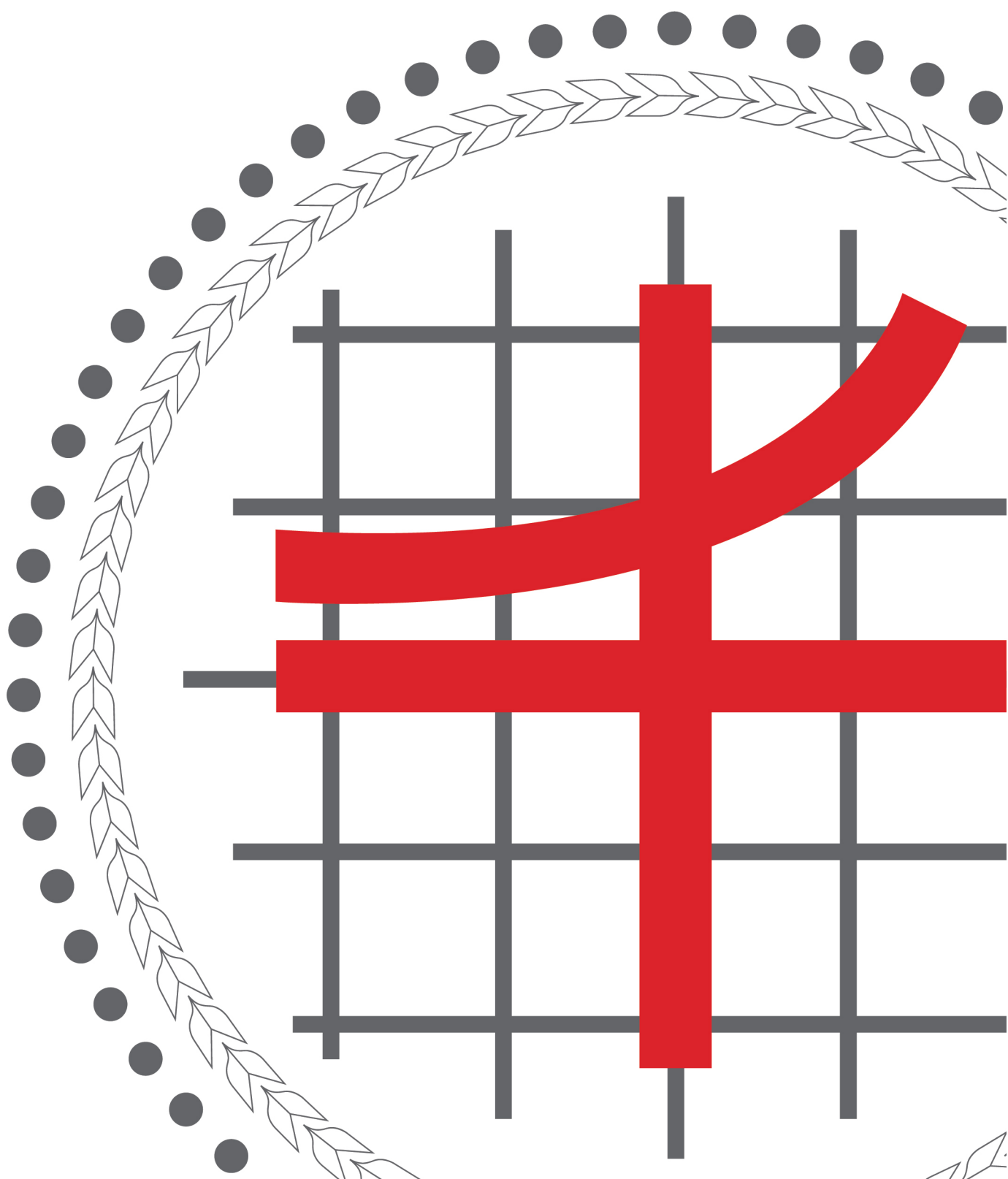


Srinakharinwirot University Engineering Journal

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

Vol. 17 No.1 (January - April 2022)

ISSN : 2774 - 0269 (Online)



วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เป็นวารสารในศูนย์ข้อมูลดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (Thai – Journal Citation Index Centre: TCI) กลุ่มที่ 2 พ.ศ. 2563-2567 เลขมาตรฐานสากลประจำวารสาร 2774-0269 (Online) เพื่อเผยแพร่บทความวิจัยและบทความวิชาการ ด้านวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีวิศวกรรมเคมี วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมชีวการแพทย์ และสาขาใกล้เคียงอื่นๆ ทั้งในเชิงทฤษฎีและเชิงปฏิบัติ เป็นภาษาอังกฤษหรือภาษาไทยที่มีบทความภาษาอังกฤษ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ จึงกำหนดให้จัดทำโครงการจัดทำวารสารทางวิชาการขึ้น โดยจัดพิมพ์เป็นประจำทุกปี ปีละ 3 ฉบับ ฉบับที่ 1 ช่วงเดือนมกราคม – เมษายน ฉบับที่ 2 ช่วงเดือนพฤษภาคม – สิงหาคม และฉบับที่ 3 ช่วงเดือนกันยายน – ธันวาคม ซึ่งบทความที่ได้รับการตีพิมพ์ทุกบทความจะผ่านการทบทวนโดยผู้ทรงคุณวุฒิอย่างน้อย 2 คนต่อบทความ (Peer-review) และประเมินบทความในลักษณะเป็นผู้ทรงคุณวุฒิที่ประเมินบทความไม่ทราบชื่อผู้แต่งและผู้แต่งไม่ทราบชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ หรือ Double Blinded review และสงวนสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พุทธศักราช 2521 และเผยแพร่แบบออนไลน์ทั่วประเทศ

วัตถุประสงค์

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (วศม) มีวัตถุประสงค์เพื่อคัดสรรและเผยแพร่บทความวิจัยและบทความวิชาการทางด้านวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีในสาขาวิศวกรรมเคมี วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมชีวการแพทย์ และสาขาใกล้เคียงอื่นๆ ทั้งในเชิงทฤษฎีและเชิงปฏิบัติ

เจ้าของ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

กองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

63 หมู่ 7 ตำบลองครักษ์ อำเภองครักษ์

จังหวัดนครนายก 26120

โทร. 0 2649 5000 ต่อ 27560

<http://eng.swu.ac.th> และ <https://www.tci-thaijo.org/index.php/sej>

อีเมล journalengswu@gmail.com

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ที่ปรึกษากองบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมภพ รอดอัมพร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์กิตติ สถาพรประสาธน์

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
รองคณบดีฝ่ายแผนและพัฒนา

รายนามคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ

ศาสตราจารย์ ดร.ทงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์ อัครเอกมอลิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.เอเดรียน อีแวน ฟลัด	สถาบันสิรินธรวิทยเมธี
ศาสตราจารย์ ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์ จันทน์ไทย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร. พานิช วุฒิพฤษชัย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ยอดสุดใจ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ โสภางค์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.อริศม ฤกษ์บุตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
รองศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย เปรมฤดีปรีชาชาญ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงพรรณ กริชชาญชัย ศฤงคารินทร์	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต ชาลีรักษ์ตระกูล	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.เตือนใจ สมบูรณ์วิวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร. ธนียา เกาศล	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รองศาสตราจารย์ ดร.ประจวบ กล่อมจิตร	มหาวิทยาลัยศิลปากร
รองศาสตราจารย์ ดร.วรงค์ ปวรจารย์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

บรรณาธิการอำนวยการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิไลดา หวังพานิช

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.ประชา บุญยานิชกุล

กองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.สงกรานต์ วิริยะศาสตร์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.จันจิรา จัปศิลป์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.นิลวรรณ ชุ่มฤทธิ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.สุนิธิ สุภาพ	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

รองศาสตราจารย์ ดร.วุฒิพล ชาราธิ์เศรษฐ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชาดา ตันติสถิระพงษ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประมวล ชูรัตน์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงษ์ คงประเสริฐ	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
อาจารย์ ดร.สุธิดา ทีปักษ์พันธุ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
อาจารย์นาวิ รุจิรามพ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ศาสตราจารย์ ดร.ทนงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์ อัครเอกผาลิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.เอเดรียน อีแวน พลัด	สถาบันสิริวิทยเมธี
ศาสตราจารย์ ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์ จำนงไทย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.พานิช วุฒิพุกษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ยอดสุดใจ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ โสภางค์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.อริคม ฤกษ์บุตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
รองศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย เปรมฤดีปรีชาชาญ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงพรรณ กริชชาญชัย ศฤงคารินทร์	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต ชาลธิ์รักษตระกูล	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.เตือนใจ สมบูรณ์วิวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.ธนียา เกาศล	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รองศาสตราจารย์ ดร.ประจวบ กล่อมจิตร	มหาวิทยาลัยศิลปากร
รองศาสตราจารย์ ดร.วรงค์ ปวรอาจารย์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผู้ช่วยบรรณาธิการ

นางสาวยุพาพร ประไพย์

บทบรรณาธิการ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ได้จัดพิมพ์ขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่ผลงานวิชาการ ผลงานวิจัย และแลกเปลี่ยนแนวคิด ความรู้ ความก้าวหน้าใหม่ ด้านวิศวกรรมศาสตร์อย่างต่อเนื่องมาเป็นระยะเวลากว่า 15 ปี โดยบทความทุกเรื่องได้ผ่านการพิจารณาถ้อยแถลงและประเมินคุณภาพตามกระบวนการจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้องจากหลายสถาบันการศึกษา ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ฉบับนี้ ได้นำเสนอบทความจำนวนทั้งสิ้น 7 บทความ เป็นบทความวิจัยจำนวน 7 บทความ โดยบทความทั้งหมดเป็นผลงานวิจัยพื้นฐานและผลงานวิจัยประยุกต์ในสาขาต่างๆ ทางวิศวกรรมศาสตร์ ซึ่งผลงานที่เผยแพร่ในครั้งนี้เป็นผลงานวิจัยที่มุ่งเน้นไปที่การประยุกต์ใช้งานและการแก้ปัญหาเชิงปฏิบัติการที่เข้ากับสถานการณ์ปัจจุบัน

กองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ หวังเป็นอย่างยิ่งว่า วารสารฉบับนี้จะเป็นเวทีทางวิชาการ ที่จะกระตุ้นการผลิตผลงานและแลกเปลี่ยนเรียนรู้ของนักวิจัย นักวิชาการและผู้อ่านทุกท่าน ทั้งนี้ เพื่อการมีส่วนร่วมในการสร้างสรรค์งานวิจัยอันจะเป็นการส่งเสริมการพัฒนาประเทศ ตามแนวนโยบายประเทศไทย 4.0 ในโอกาสนี้กองบรรณาธิการขอขอบคุณกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ในการประเมินบทความ ให้ความเห็นที่เป็นประโยชน์ และมีส่วนร่วมในการพัฒนาคุณภาพและมาตรฐานของวารสารฯ ฉบับนี้เสมอ สุดท้ายนี้หากมีข้อเสนอแนะประการใดทางกองบรรณาธิการฯ ยินดีรับฟังข้อเสนอแนะเพื่อการปรับปรุงและพัฒนาวารสารให้มีคุณภาพยิ่งขึ้น

รองศาสตราจารย์ ดร.ประชา บุญยานิชกุล

บรรณาธิการวารสาร

สารบัญ

บทความวิจัย

การสร้างแผนภาพการสอบเทียบของถังน้ำมันทรงกระบอกในแนวนอน Generation of Calibration Chart for Horizontal Cylindrical Fuel Tank สาธิต รุ่งฤดีสมบัติกิจ	1
การวิเคราะห์สมรรถนะของอัลกอริทึมต่อต้านการชนกันภายใต้วิธีการประมาณจำนวนแท็กที่เกิดการชนกันที่แม่นยำสำหรับระบบอาร์เอฟไอดี Performance Analysis of Tag Anti-Collision Algorithms Under Accurate the Number of Colliding Tag Estimation Method for RFID Systems นรรัตน์ วัฒนมงคล	17
การออกแบบและสร้างระบบไอโอทีสำหรับบ้านจำลองแบบอัจฉริยะที่ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ The Design and Construction of Smart the IoT System for Modeling House Controlled by Microcontroller ชัยพร อัดโตดดร นิตคม อริยพิมพ์	29
จลนศาสตร์และการจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แขนกลด้วยโปรแกรมแมทแล็บ Kinematics and Motion Modeling of a Robotic Arm using MATLAB Program สุรัชย์ เหมหิรัญ ดิฐภัทร ต้นประดิฐ	40
การศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกในเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นในท่อพินปลา The Study of Paddy Drying in Zig Zag Pipe Spouted Bed Dryer ณัฐพงษ์ วงศ์บับพา ทวิช จิตรสมบูรณ์	53
การศึกษาปัจจัยการคัดเลือกผู้รับเหมาปรับปรุงอาคาร โดยใช้วิธีกระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น A Study of Factors for Selection of Building Renovation Contractors Using Analysis Hierarchical Process มงคล อัครดิลกฤทธิ์ รพีรัศม์ วัชรโรทัย	64
ผลของความชื้นต่อประสิทธิภาพการสีข้าวขาวของเครื่องสีขนาดเล็ก Effect of paddy moisture content on milling rice recovery of small milling machine สมพจน์ คำแก้ว	82

การสร้างแผนภาพการสอบเทียบของถังน้ำมันทรงกระบอกในแนวนอน

Generation of Calibration Chart for Horizontal Cylindrical Fuel Tank

สาธิต รุ่งฤดีสมบัติกิจ

สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต กรุงเทพฯ 10510

Satit Rungrudesombatkit

Industrial Engineering Technology, Faculty of Engineering, Kasem Bundit University, Bangkok, 10510

Corresponding author Email: satit.run@kbu.ac.th

(Received: September 1, 2021; Revised: November 11, 2021; Accepted: January 4, 2022)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแผนภาพการสอบเทียบถังน้ำมันทรงกระบอกในแนวนอน ด้วยวิธีการสอบเทียบแบบเปียกของถังน้ำมันทรงกระบอกในแนวนอนขนาด 1,300 ลิตร มีฝาปิดหัวท้ายเป็นแผ่นเรียบ โดยใช้น้ำเป็นตัวกลางในการสอบเทียบ มีขั้นตอนดังต่อไปนี้คือ 1) การกำหนดขอบเขตขั้นตอนและจำนวนครั้งการเติมน้ำ 2) การจัดทำขั้นตอนการเติมน้ำแต่ละครั้ง 3) การเตรียมแบบมาตราและอุปกรณ์ 4) การเติมน้ำเข้าถังพร้อมทั้งวัดระดับความสูงของน้ำ 5) การนำเสนอข้อมูลต่อเนื่อง ผลการวิจัยพบว่า แผนภาพการสอบเทียบของถังน้ำมันในแนวนอนที่ได้จากความสัมพันธ์ในรูปแบบตัวแบบคณิตศาสตร์ระหว่างปริมาตรกับระดับความสูงของน้ำสามารถนำไปอ้างอิงในการสร้างสเกลวัดปริมาตรได้ โดยมีความผิดพลาดและความไม่แน่นอนในการประมาณค่าปริมาตรอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่ตกลงกันไว้ระหว่างบริษัทกับลูกค้า

คำสำคัญ: แผนภาพการสอบเทียบ ถังน้ำมันทรงกระบอกในแนวนอน ค่าความผิดพลาด ความไม่แน่นอนในการวัด

ABSTRACT

This research aimed to create a calibration chart for a horizontal cylindrical fuel tank with the wet calibration method of a 1,300-liter horizontal cylindrical fuel tank that was covered with flat sheets at the ends by using water as a medium for calibration. The calibration had the following steps: 1) establishing criteria for water filling in stages 2) development of a filling steps schedule 3) setting up standards and equipment 4) filling the tank with water to the desired height; and 5) continuous information presentation. The finding revealed that the calibration chart of a horizontal fuel tank, which is derived from the mathematical model between the volume and height of water, can be referenced to create a volumetric scale. The errors and uncertainty in volumetric interpolation were in accordance with the criteria agreed between the company and the customer.

Keyword: Calibration chart, horizontal cylindrical fuel tank, errors, measurement uncertainty.

1. บทนำ

บริษัท พี.เค.วอเตอร์ปั๊มซิสเต็ม จำกัด เป็นผู้ประกอบ
กิจการจำหน่ายอุปกรณ์ทั้งหมดที่ใช้ในระบบปั๊มน้ำ ซ่อม

บำรุงปั๊มน้ำ และติดตั้งระบบปั๊มน้ำเพลิงโดยมีถังบรรจุ
น้ำมันดีเซลเป็นอุปกรณ์เสริม ประสบปัญหาที่เกี่ยวข้องกับ
ค่าขีดขึ้นหมายมาตราหรือสเกลวัดปริมาตรถังน้ำมัน ณ

ระดับต่างๆ ไม่สอดคล้องกับปริมาตรของน้ำมันที่ใส่ลงไป ในถัง จึงทำให้เกิดข้อโต้แย้งกันระหว่างบริษัทกับลูกค้า ทำให้ไม่สามารถส่งมอบถังบรรจุน้ำมันให้กับลูกค้าได้

โดยก่อนที่จะส่งมอบถังบรรจุน้ำมันนั้น บริษัทฯ จะทำการสอบเทียบแบบเปียก โดยหาความสอดคล้องระหว่างปริมาตรกับระดับความสูงของของเหลวที่ใส่ลงไปถัง ซึ่งเป็นวัตถุประสงค์ของการสอบเทียบ ขณะที่ในปัจจุบันจะนิยมใช้กล้องส่องเลเซอร์ 3 มิติ (3D Laser Scanning) ซึ่งเป็นการสอบเทียบแบบแห้ง (Dry Calibration) หรือการสอบเทียบด้วยวิธีเรขาคณิต (Geometrical Method) [1] เพื่อหาระยะความกว้าง ความสูงและระดับของเหลวภายในถังแล้วนำไปประมวลผล สรุปผลด้วยคอมพิวเตอร์ออกมาเป็นตารางสอบเทียบประจำถัง (Tank Calibration Table) ถ้าต้องการทราบค่าปริมาตรของเหลวภายในถังก็สามารถทำได้โดยการประมาณค่าในช่วง (Interpolation) จากตารางสอบเทียบประจำถัง อย่างไรก็ตามบริษัทฯ เลือกที่จะใช้วิธีการสอบเทียบแบบเปียกแทนการใช้กล้องส่องเลเซอร์ 3 มิติ เนื่องจากมีข้อจำกัดด้านค่าใช้จ่ายและมองว่าเกินความจำเป็น เพราะบริษัทฯ ไม่ได้มีวัตถุประสงค์ในการวัดปริมาตรเพื่อการซื้อขายหรือคำนวณภาษีอากร แต่เป็นการวัดปริมาตรเพื่อการสำรองน้ำมันไว้ใช้สำหรับระบบต้นกำลังของปั๊มดับเพลิงในกรณีฉุกเฉินเท่านั้น

จากการสอบถามถึงขั้นตอนต่างๆของการสอบเทียบแบบเปียกจากพนักงาน พบว่า หลังจากสอบเทียบถังบรรจุน้ำมันที่บริษัทฯ แล้ว จึงได้ทำการขนย้ายไปติดตั้ง ณ สถานที่ตั้งของลูกค้า โดยก่อนที่จะดำเนินการส่งมอบพนักงานจะสอบเทียบถังบรรจุน้ำมันอีกครั้ง โดยเติมน้ำจากภาชนะที่ทราบค่าปริมาตรลงในถังบรรจุ แล้วเปรียบเทียบกับระดับปริมาตรบนหลอดมองระดับ (Sight Glass) โดยไม่ได้คำนึงถึงค่าความเอียงของถังบรรจุน้ำมันก่อนและหลังการสอบเทียบ จึงคาดว่าความเอียงของถังน่าจะเป็นสาเหตุสำคัญของปัญหาค่าปริมาตรที่เติมลงไปแล้วไม่สอดคล้องกับปริมาตรที่อ่านจากสเกลวัดปริมาตรดังกล่าวข้างต้น

โดยนิยามแล้ว การสอบเทียบ หมายถึง วิธีการเปรียบเทียบผลการวัดโดยมาตรวัดปริมาตรของเหลวเทียบกับแบบมาตรฐานภายใต้เงื่อนไขที่กำหนดชัดเจน

(Specific Conditions) [2] ดังนั้น หากการสอบเทียบมิได้เป็นไปตามเงื่อนไขที่กำหนด เช่นในกรณีที่มีการขนย้ายถังบรรจุดังกล่าวแล้วทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งตำแหน่งและการเอียงของถัง จะมีผลต่อความแม่นยำในการสอบเทียบอย่างมาก [3]

การสอบเทียบอาจแสดงโดยประพจน์ ฟังก์ชันการสอบเทียบ แผนภาพการสอบเทียบ เส้นกราฟการสอบเทียบหรือตารางการสอบเทียบ ในบางกรณีอาจประกอบด้วยค่าตรวจแก้ที่เพิ่มหรือคูณเข้าไปกับค่าบ่งชี้ซึ่งมาพร้อมกับความไม่แน่นอนในการวัดที่เกี่ยวข้อง [4] การบรรจุของเหลวที่ถูกต้องเหมาะสมจะสำเร็จได้ก็ต่อเมื่อผ่านการสร้างแผนภาพการสอบเทียบให้กับถังบรรจุ [5]

Aguilar และ Villegas [6] ได้เสนอขั้นตอนการสร้างแผนภาพการสอบเทียบของถังบรรจุในแนวนอนที่มีหน้าตัดเป็นรูปวงรี เพื่อปรับค่าความผิดพลาดและความไม่แน่นอนในการประมาณค่าปริมาตรให้เหมาะสม การสอบเทียบใช้วิธีตวงปริมาตร (Volumetric Method) ด้วยข้อมูลจำนวน 21 คู่ แต่จะมีข้อมูลอยู่ 11 คู่ที่นำมาใช้ในการกำหนดจำนวนครั้งและปริมาตรในการเติมของเหลวตามจุดเชบิเชฟ (Chebyshev Nodes) เพื่อลดค่าความผิดพลาดจากการประมาณค่าในช่วง (Interpolation) โดยการสร้างฟังก์ชันการประมาณค่าในช่วง (Interpolation Function) ของค่าปริมาตรของเหลวในถังบรรจุให้มีค่าความผิดพลาดต่ำกว่าค่าความผิดพลาดสูงสุดที่ยอมรับได้ (Maximum Permissible Errors: MPE) และทำให้ผลต่างระหว่างปริมาตรจากการสอบเทียบกับปริมาตรจากฟังก์ชันการประมาณค่าในช่วงมีค่าต่ำกว่าความไม่แน่นอนในการวัดแบบขยาย (Expanded Uncertainty: U)

การกำหนดจำนวนครั้งและปริมาตรในการเติมของเหลวตามจุดเชบิเชฟ (Chebyshev Nodes) จะทำให้ได้คู่ข้อมูลที่ระดับความสูงเป็นช่วงๆ ถ้าต้องการทราบค่าปริมาตรที่ค่าความสูงที่ตกกระทบบetween ข้อมูลค่าความสูง 2 ค่า จำเป็นจะต้องทำการประมาณค่าในช่วง (Interpolation) เพื่อที่จะลดข้อผิดพลาดจากการประมาณในช่วง จึงต้องเชื่อมต่อช่องว่างระหว่างค่าระดับความสูงแต่ละค่าด้วยการนำเสนอข้อมูลอย่างต่อเนื่องจากฟังก์ชันต่างๆ เช่น

ฟังก์ชันเชิงเส้น (Linear Function) ฟังก์ชันพหุนาม (Polynomial Function) และฟังก์ชันหรือความสัมพันธ์ในรูปตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ระหว่างปริมาตรกับความสูงภายในถังบรรจุแนวนอน (Mathematical Model of the Relationship between Volume and Height of Horizontal Storage Tank) [6] เป็นต้น

หลังจากสอบถามและสำรวจสภาพทั่วไปเสร็จสิ้นแล้ว จึงได้แจ้งให้บริษัทฯ ทราบถึงสาเหตุที่คาดว่าจะก่อให้เกิดข้อผิดพลาดในการสอบเทียบ และขอดำเนินการสอบเทียบใหม่อีกครั้ง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อสร้างแผนภาพการสอบเทียบประจำถังบรรจุน้ำมันทรงกระบอกแนวนอน ขนาด 1,300 ลิตรที่มีฝาปิดหัวท้ายเป็นแผ่นเรียบด้วยวิธีการสอบเทียบแบบเปียก เพื่อนำแผนภาพการสอบเทียบไปใช้ในการประมาณค่าปริมาตรและอ้างอิงในการสร้างสเกลวัดปริมาตร โดยมีค่าความผิดพลาดและความไม่แน่นอนในการประมาณค่าปริมาตรภายใต้เงื่อนไขที่ตกลงกันไว้ระหว่างบริษัทฯ กับลูกค้า

2. วัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย

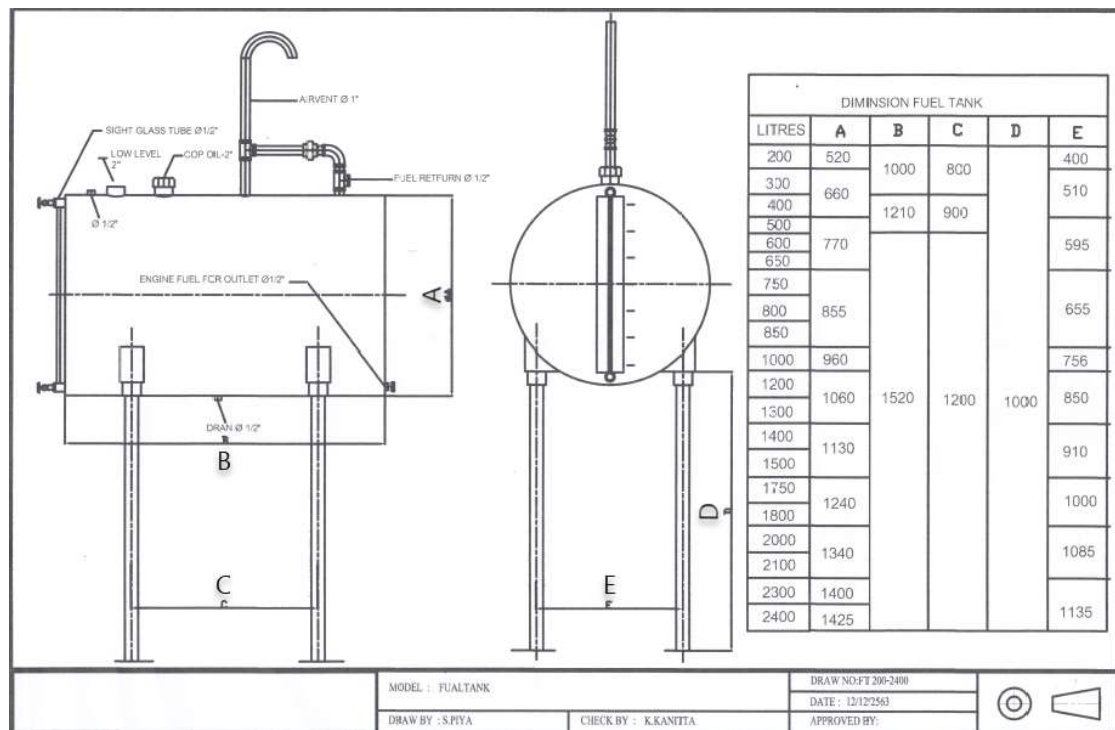
2.1 แบบแปลนของถังบรรจุน้ำมัน

แบบแปลนจะช่วยให้ทราบถึงตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์ประจำถังที่อาจมีผลต่อความแม่นยำในการสอบเทียบ เช่น ตำแหน่งติดตั้งของหลอดมองระดับปริมาตร ดังรูปที่ 1

จากรูปที่ 1 จะเห็นได้ว่าตำแหน่งติดตั้งของหลอดมองระดับปริมาตรอยู่ที่ปลายถังซึ่งจะมีผลทำให้ความเอียงของถัง (Inclination) มีอิทธิพลต่อการอ่านค่าปริมาตร [3] นอกจากนี้ ขนาดและระยะต่างๆ ของถังบรรจุ เช่น เส้นผ่านศูนย์กลาง ความยาวของถัง ล้วนเป็นข้อมูลที่จำเป็นเบื้องต้นในการคำนวณหาขีดชั้นหมายมาตราหรือขีดสเกล (Scale Interval) เพื่อใช้ในการสอบเทียบในขั้นตอนต่อไป

2.2 เครื่องวัดความสูงของของเหลวภายในถัง

เครื่องวัดความสูงของของเหลวภายในถังอยู่ในรูปของหลอดมองระดับของเหลว (Sight Glass Tube) ติดตั้งถาวรกับผนังถังบรรจุน้ำมันมีขีดชั้นหมายมาตราทำจากโลหะ และสามารถนำไปใช้ในการสอบเทียบได้ทันที



รูปที่ 1 แบบแปลนของถังบรรจุน้ำมัน (Fuel Tank Drawing)

2.3 ถังบรรจุของเหลว

ถังบรรจุที่ใช้ในการทดลองเป็นรูปทรงกระบอก แนวนอนทำด้วยโลหะเชื่อมปิดหัวท้ายทั้งสองด้านด้วยแผ่นโลหะเรียบ มีปริมาตรบรรจุสูงสุดใช้งานเท่ากับ 1,300 ลิตร ติดตั้งอยู่ในอาคารทางด้านทิศเหนือซึ่งได้รับแสงแดดน้อย และอาจติดตั้งให้เอียงได้เล็กน้อยเพื่อสะดวกในการถ่ายน้ำออกจากน้ำมัน โดยก่อนที่จะทำการสอบเทียบจะต้องดำเนินการตรวจสอบสภาพทั่วไป เช่น ตรวจสอบการโค้งแอ่นของถัง ตรวจสอบการเอียงของถัง ตรวจสอบการรั่วไหลของถัง วาล์ว ข้อต่อและรอยเชื่อมต่างๆ โดยเติมของเหลวลงในถังให้เต็มตามปริมาตรสูงสุดใช้งานเป็นเวลาอย่างน้อย 6 ชั่วโมง [7]

2.4 วัสดุและอุปกรณ์อื่นๆ

วัสดุและอุปกรณ์อื่นๆที่จำเป็นในการวิจัย ได้แก่

1) เครื่องวัดอุณหภูมิอินฟราเรดหน้าจอแอลซีดี ความละเอียด 0.1 องศาเซลเซียส

2) เครื่องวัดความเอียงดิจิทัล(Digital Inclinator) ความละเอียด 0.05 องศา

3) มาตรวัดน้ำอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Water Meter) เนื่องด้วยส่วนแสดงค่าของมาตรวัดน้ำ ควรแสดงปริมาตรได้ละเอียดอย่างน้อยเท่ากับ 0.5% ของปริมาตรของเหลวภายในถังบรรจุในแนวนอนที่มีพื้นที่หน้าตัดมากที่สุดด้วยความสูงของเหลวเท่ากับ 10 มม. [3] สำหรับงานวิจัยนี้ ถังบรรจุของเหลวมีค่าเส้นผ่านศูนย์กลาง (D) 1.06 ม. ความยาว (L) 1.52 ม. ดังนั้นจึงควรเลือกมาตรวัดน้ำที่สามารถแสดงปริมาตรด้วยค่าความละเอียดอย่างน้อยเท่ากับ $0.5\% \times 1.06 \times 1.52 \times 0.01 \times 1000 = 0.08$ ล. หรือเท่ากับ 0.08 ลิตร ดังนั้นสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ จึงเลือกมาตรวัดน้ำซึ่งมีสมรรถนะการใช้งานตามมาตรฐาน ISO 4064 ความละเอียด 0.01 ลิตร

4) เครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์ สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ได้เลือกวิธีการชั่งน้ำหนักของเหลวที่ผ่านมาตรวัดปริมาตรของเหลวแทนการวัดด้วยถังตวงแบบมาตรา (Prover Tank) ซึ่งจะช่วยให้ผลการสอบเทียบมีความแม่นยำอยู่ในระดับที่น่าพอใจ [2] กระทำได้ง่ายและเสียค่าใช้จ่ายอยู่ในระดับที่ยอมรับได้เพียงพอกับเงินที่ลงทุนไป

หลักการเลือกเครื่องมือตามมาตรฐาน ISO 10012-1 กล่าวไว้ว่า เครื่องมือมาตรฐานที่นำมาเพื่อให้เครื่องมือวัดอื่น ๆ ได้ใช้ในการเปรียบเทียบ จะต้องมีความถูกต้องสูงกว่าความถูกต้องของเครื่องมือที่ได้รับการสอบเทียบ 3 เท่าขึ้นไป [8] ดังนั้น อย่างน้อยที่สุดเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์ควรมีความละเอียด (d) ดังแสดงในสมการที่ 1

$$d \leq 1/3 \times MPE \quad (1)$$

เมื่อ MPE = ค่าความผิดพลาดสูงสุดที่ยอมรับได้ของ
ปริมาตรที่ต้องการทดสอบ (%)

d = ความละเอียดของเครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์

กรณีของการสอบเทียบถังบรรจุของเหลวในแนวนอน จะไม่มีการกำหนดค่าความผิดพลาดสูงสุดที่ยอมรับได้ (Maximum Possible Error: MPE) ดังนั้น การกำหนดค่าความผิดพลาดสูงสุดที่ยอมรับได้ จึงต้องอาศัยค่าความไม่แน่นอนในการวัดค่าปริมาตรของเหลวภายในถังด้วยการใช้ค่าตัวเลขจากการอ่านค่าสเกล สำหรับการตรวจสอบให้คำรับรองชั้นแรกค่าความไม่แน่นอนในการวัดต้องมีค่าน้อยกว่า 0.5% เทียบกับปริมาตร [3] ดังนั้นค่าความไม่แน่นอนที่ยอมรับได้ของมาตรวัด ควรแสดงค่าด้วยความละเอียดอย่างน้อย $= 0.5\% \times 1.06 \times 1.52 \times 0.01 \times 1000 = 0.08$ ลิตร

นั่นคือ MPE จะมีค่าเท่ากับ 0.08 ล. แทนค่า MPE ในสมการที่ 1 จะได้ $d \leq 1/3(0.08)$ ล. = 0.027 ล. ในที่นี้ให้ $d = 0.01$ ล. หรือประมาณ 0.01 กก. (ความหนาแน่นของน้ำมีค่าประมาณ 1 กิโลกรัม/ลิตร) ดังนั้น เครื่องชั่งที่ใช้ในการสอบเทียบควรมีความละเอียด (d) เท่ากับ 0.01 กก.

5) ของเหลวสำหรับการสอบเทียบแบบเปียก ในที่นี้ได้เลือกน้ำเป็นตัวกลางแทนน้ำมันสำหรับการสอบเทียบ เพราะหากใช้ผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมจะทำให้ค่าความไม่แน่นอนในการวัดเพิ่มขึ้น เนื่องจากผลิตภัณฑ์ปิโตรเลียมมีการเปลี่ยนแปลงปริมาตรไปประมาณ 5 เท่า เมื่อเทียบกับการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของน้ำ หากมีการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่มีค่าเท่ากัน [3]

3. วิธีการวิจัย

ทำการสอบเทียบแบบเปียก โดยประยุกต์จากเอกสารของสำนักงานกลางชั่งตวงวัด [3] ซึ่งมีขั้นตอนต่างๆ ดังนี้

3.1 การกำหนดขอบเขตขั้นตอนและจำนวนครั้งในการเติมน้ำ

การกำหนดขอบเขตขั้นตอนและจำนวนครั้งในการเติมน้ำเข้าไปในถัง จะต้องกำหนดค่าขั้นหมามาตร (Interval Scale: S) หรือค่าความละเอียด (Resolution) [2] ให้อยู่ในช่วง $(0.004m.)DL \leq S (m^3) \leq (0.01m.)DL$ [3] ในที่นี้ $D = 1.06 m.$, $L = 1.52 m.$ จะได้ $0.006 m^3 \leq S (m^3) \leq 0.016 m^3$ ดังนั้นจึงให้ $S = 0.01 m^3$ (10 ลิตร)

ส่วนค่าปริมาตรสูงสุดที่ยอมรับได้ในการเติมแต่ละครั้ง (Maximum Filling Step Volume) ที่ส่วนหัว/ท้าย (Fore/end Section) และกึ่งกลางถัง (Middle Section) คำนวณได้ด้วยสมการที่ 2 และ 3 [3] ตามลำดับดังนี้

$$\text{Fore/end} \quad \Delta V \leq \frac{0.85944}{D} \left(1 + \frac{0.21173}{D^{2/3}} \right) \quad (2)$$

$$\text{Middle} \quad \Delta V \leq \left(\frac{0.7382}{D^{1/3}} \right) \quad (3)$$

เมื่อ ΔV = ค่าปริมาตรสูงสุดที่ยอมรับได้ในการเติมแต่ละครั้ง

D = ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในถัง

ตารางที่ 1 การจัดทำขั้นตอนการเติมน้ำในแต่ละครั้ง

	Filling Range (l.)	Filling Step Volume (% of Tank Volume)	Filling Step Volume (Adjusted:S=10 l.)	No. of Filling Steps	Adjusted Filling Steps	Filling Volume	Filling Step Volume(%)	Cumulative Volume(%)
1	0 to 13	<= 1% = 6.5 l.	10	>= 2	2	20	2%	2%
2	13 to 65	<= 1% = 13 l.	10	>= 4	4	40	3%	5%
3	65 to 195	<= 2% = 26 l.	20	>= 5	6	120	9%	14%
4	195 to 390	<= 4% = 52 l.	50	>= 3	4	200	15%	29%
5	390 to 910	<= 8% = 104 l.	90	>= 4	6	540	42%	71%
6	910 to 1105	<= 4% = 52 l.	50	>= 3	4	200	15%	86%
7	1105 to 1235	<= 2% = 26 l.	20	>= 5	6	120	9%	95%
8	1235 to 1287	<= 1% = 13 l.	10	>= 4	4	40	3%	98%
9	1287 to 1300	<= 1% = 6.5 l.	10	>= 2	2	20	2%	100%

เมื่อปริมาตรถัง (Tank Volume) = 1,300 ล., $D=106$ ซม. ที่ส่วนหัว/ท้าย $\Delta V = 0.008$ ที่กึ่งกลางถัง $\Delta V = 0.156$ เมื่อคิดเป็นค่าปริมาตรจะได้ $\Delta V = 0.008(1,300) = 10.64$ ล. และ $\Delta V = 0.156(1,300) = 202.78$ ล.

3.2 การจัดทำขั้นตอนการเติมน้ำในแต่ละครั้ง

ถังบรรจุของเหลวในแนวนอน ตามมาตรฐาน DIN 6608 sheet 1 [3] จะมีตารางขั้นตอนการเติมของเหลวในแต่ละครั้งแบบสำเร็จรูปจำนวน 15 ขนาดมาตรฐาน

แต่เนื่องจากถังของบริษัทฯ ไม่เป็นไปตามมาตรฐานดังกล่าว จึงอ้างอิงตารางของ PTB Testing Instructions [3] มาปรับใช้ในการจัดทำขั้นตอนการเติมน้ำลงในถังบรรจุขนาด 1,300 ลิตร ซึ่งจะทำให้ได้การจัดทำขั้นตอนการเติมน้ำในแต่ละครั้ง (Filling Step Schedule) ดังตารางที่ 1

จากตารางที่ 1 จะเห็นว่ากำหนดขั้นตอนการเติมน้ำ เป็นการกำหนดปริมาตรน้ำก่อนเติมลงถังในแต่ละครั้ง ให้เป็นจำนวนเท่าของค่าขั้นหมามาตร (S) ห่างกันเป็นช่วงๆ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดปัญหาความไม่แน่นอนในการวัดระดับความสูงของน้ำ ลดค่าความผิดพลาดจากการประมาณค่าในช่วง (Interpolation) และยังเป็นการลดเวลาในการปฏิบัติงานสอบเทียบได้อีกด้วย

การเติมน้ำจะมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น โดยเติมด้วยจำนวนน้อยๆบริเวณก้นถัง แล้วค่อยๆเพิ่มขึ้นเมื่อถึงบริเวณ

(Metering Equipment) โดยก่อนที่จะนำมาตรวจวัดไปใช้งาน จะต้องสอบเทียบกับมาตรฐานอ้างอิง (Reference Standard) ที่มีลำดับความสำคัญที่สูงกว่าเสียก่อน ซึ่งในที่นี้ได้เลือกใช้เครื่องชั่งอิเล็กทรอนิกส์มาทำการสอบเทียบมาตรวัดน้ำด้วยวิธีชั่งน้ำหนักทางอ้อม [2]

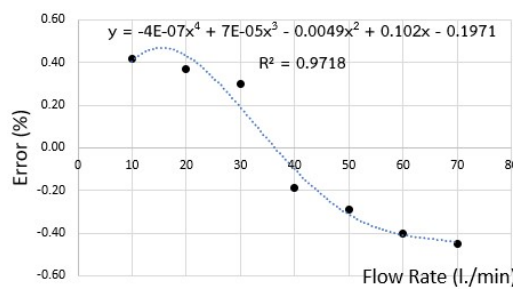
ทั้งนี้ Suttanarak และ Shusuwan [2] ได้นำภาชนะรองรับน้ำจากมาตรวัดที่ต้องการสอบเทียบไปชั่งน้ำหนัก โดยในที่นี้ ได้เลือกเครื่องชั่งที่มีชั้นหมายมาตราที่อ่านได้ละเอียด 0.01 กก. ซึ่งมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ $1/3$ ของค่าความไม่แน่นอนที่ยอมรับได้ดังที่ได้แสดงในหัวข้อที่ 2.4 จากนั้นจึงทดสอบมาตรวัดที่อัตราการไหลแตกต่างกัน 7 อัตราการไหล โดยทำซ้ำ 2 ครั้งในแต่ละอัตราการไหลและทำการบันทึกอุณหภูมิน้ำในภาชนะและค่าปริมาตรจากมาตรวัดโดยอ่านน้ำหนักจากภาชนะรองรับน้ำบนเครื่องชั่งตัวอย่างเช่น อ่านจากเครื่องชั่งได้ 49.84 กก. (หักน้ำหนักภาชนะแล้ว) ให้บันทึกค่า 49.84 ล. ดังตารางที่ 2

การเตรียมแบบมาตรฐาน (Standard) เป็นการจัดลำดับความสำคัญจากระดับต่ำไประดับสูง แบบมาตรฐานใช้งาน (Working Standards) จัดเป็นลำดับความสำคัญที่ต่ำที่สุด แบบมาตรฐานใช้งานที่ได้รับความนิยมคือ อุปกรณ์มาตรวัด

Flowrate	Indication	Indication	Temperature	Correction	Correction	Measured Deviation after Correction		
Range	of Meter	of Tranfer Tank	of Transfer Tank	Factor for the Effect of	Volume	$\%Error(@T_o, Patm) = \frac{(Vm - Vop)}{Vop} \times 100\%$		
(l/min)	Vm (l)	Vp (l)	(°C)	Temp. on Steel	Vop (l)	Vm-Vop	(%)	Mean Value (%)
10	50	49.84	34.5	1.00015075	49.832488	0.1675122	0.34%	0.42%
	50	49.76	34.5	1.00015075	49.752500	0.2475002	0.50%	
20	50	49.73	34.4	1.00014740	49.722671	0.2773291	0.56%	0.37%
	50	49.92	34.4	1.00014740	49.912643	0.0873571	0.18%	
30	50	49.79	34.5	1.00015075	49.782495	0.2175047	0.44%	0.30%
	50	49.93	34.5	1.00015075	49.922474	0.0775258	0.16%	
40	50	49.98	34.5	1.00015075	49.972467	0.0275333	0.06%	-0.19%
	50	50.23	34.4	1.00014740	50.222597	-0.222597	-0.44%	
50	50	50.15	34.5	1.00015075	50.142441	-0.1424410	-0.28%	-0.29%
	50	50.16	34.5	1.00015075	50.152440	-0.1524395	-0.30%	
60	50	50.20	34.6	1.00015410	50.192265	-0.192265	-0.38%	-0.40%
	50	50.22	34.8	1.00016080	50.211926	-0.211926	-0.42%	
70	50	50.22	34.8	1.00016080	50.211926	-0.211926	-0.42%	-0.45%
	50	50.25	34.9	1.00016415	50.241753	-0.241753	-0.48%	
								PASS (≤ ± 0.5%)

จากนั้นจึงนำปริมาตรที่อ่านจากมาตรวัดน้ำ (V_m) ลบด้วยปริมาตรน้ำในภาชนะที่อุณหภูมิอ้างอิง 30°C (V_{op}) [2] จะได้ค่าความผิดพลาดของมาตรวัด ($\%Error@T_o, P_{atm}$) ดังแสดงในตารางที่ 2

จากตารางที่ 2 มาตรวัดน้ำมีค่าความผิดพลาดไม่เกิน $\pm 0.5\%$ [3] ดังนั้น เราจึงสามารถนำค่าความผิดพลาดของมาตรวัดน้ำที่แต่ละอัตราการไหลนี้ไปหาความสัมพันธ์ ซึ่งจะได้ความสัมพันธ์ในรูปของฟังก์ชันพหุนาม ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ฟังก์ชันพหุนามของอุปกรณ์มาตรวัดน้ำ

จากรูปที่ 2 แสดงฟังก์ชันพหุนามกำลังสี่ (4^{th} Degree Polynomial Function) ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (Coefficient of Determination: R^2) เท่ากับ 0.97181 จะเห็นได้ว่าฟังก์ชันพหุนามนี้มีความสมมูลกับข้อมูลมาก

เราสามารถนำฟังก์ชันพหุนามนี้ไปใช้เป็นตัวแทนของคุณลักษณะมาตรวัดน้ำได้ โดยพิจารณาอัตราการไหลระบุ (Nominal Flow Rate: Q_n) ที่ 35 ล./นาที ($Q_n = Q_{\max}/2$) [9] ซึ่งในที่นี้มาตรวัดน้ำใช้งานมีค่า $Q_{\max} = 70$ ล./นาทีเมื่อแทนค่าอัตราการไหลระบุลงในฟังก์ชันพหุนามในรูปที่ 2 จะได้ค่าความผิดพลาด ($\%Error$) ดังสมการที่ 4

$$y = -4 \times 10^{-7}(35^4) + 7 \times 10^{-5}(35^3) - 0.0049(35^2) + 0.102(35) - 0.1971 = -0.23\% \quad (4)$$

จากสมการที่ 4 จะได้ว่า ค่าความผิดพลาดของมาตรวัดน้ำ ($\%Meter Error$) มีค่าเท่ากับ -0.23%

3.4 การเติมน้ำเข้าถังพร้อมกับการวัดระดับความสูง

ก่อนเติมน้ำเข้าถังจะต้องล้างทำความสะอาด และตรวจสอบภายในถังว่ามีสิ่งสกปรก เศษวัสดุตกค้างหรือไม่ การเติมน้ำจะใช้วิธีปั้มน้ำด้วยมือ (Hand Pump) จากด้านล่างเข้าทางด้านบนของถัง และต้องรอคอยช่วงระยะเวลาหนึ่ง (ควรเป็นช่วงระยะเวลาเท่ากันแต่ละการวัดปริมาตร) จนมั่นใจว่าระดับน้ำภายในถังนิ่งแล้วจึงทำการวัดระดับความสูงของน้ำภายในถัง

ในการเติมน้ำเข้าสู่ถัง เพื่อให้เราสามารถใช้ค่าความ

ตารางที่ 3 การตรวจแก้ค่าปริมาตรที่เติมลงไปในแต่ละครั้งด้วยตัวแปรแก้ไขค่า (K)

Volume Step $\Delta V: (L.)$	Filled Volume V: (L.)	Correction: K $= -\frac{\%MeterError}{100} \times \Delta V$ K: (L.)	$\Delta V_{err} = \Delta V - K$ $\Delta V_{err}: (L.)$	Actual Reading of the Meter	Filled Volume (%)	Filled Height (mm)	Difference (mm)	L./mm
0	0	-	-	-	0	Dead Stock	Dead Stock	-
1	20	20	-	-	1.54	Dead Stock	Dead Stock	-
2	40	60	0.09	59.91	59.91	3.08	81	0.74
3	120	180	0.27	119.73	179.63	9.23	188	1.12
4	200	380	0.46	199.54	379.18	15.38	330	1.41
5	540	920	1.24	538.76	917.94	41.54	675	1.57
6	200	1120	0.46	199.54	1117.48	15.38	810	1.48
7	120	1240	0.27	119.73	1237.21	9.23	912	1.18
8	40	1280	0.09	39.91	1277.11	3.08	951	1.03
9	20	1300	0.05	19.95	1297.07	1.54	970	1.05

ผิดพลาดของมาตรวัดได้ตลอดช่วงการคำนวณปริมาตรให้สอดคล้องกับระดับความสูงของน้ำภายในถัง จะต้องเติมน้ำผ่านมาตรวัดด้วยอัตราการไหลระบุ (Nominal Flow Rate) ที่ 35 ลิ./นาที่ เท่ากันทุกครั้งในแต่ละปริมาตรซึ่งเป็นอัตราการไหลที่มาตรวัดน้ำทำงานได้อย่างปกติทั้งต่อเนื่องและไม่ต่อเนื่อง โดยมีค่าความคลาดเคลื่อนของมาตรวัดน้ำไม่เกินไปกว่าอัตราเพื่อเหลือเผื่อขาด [10] หรือไม่เกินกว่าค่าความผิดพลาดสูงสุดที่ยอมรับได้

เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิจะส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของน้ำจึงต้องแก้ค่าปริมาตรที่อ่านได้จากมาตรวัด ส่วนค่า ลิ./มม. แสดงให้เห็นว่าปริมาตรน้ำที่เติมลงไปมีลักษณะไม่เป็นเชิงเส้น ดังแสดงในตารางที่ 3

3.5 การนำเสนอข้อมูลอย่างต่อเนื่อง

เนื่องด้วย ข้อมูลจากการสอบเทียบที่ให้ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรกับระดับความสูงของน้ำ เป็นการนำเสนอข้อมูลเพียงบางช่วงเท่านั้น หากต้องการทราบข้อมูลที่อยู่ระหว่างช่วงจะต้องทำการประมาณค่าในช่วง ซึ่งจะทำให้ค่าที่ประมาณได้เกิดความผิดพลาด ดังนั้นจึงต้องทำการลดข้อผิดพลาดจากการประมาณค่า โดยนำเสนอข้อมูลอย่างต่อเนื่องด้วยแผนภาพการสอบเทียบ ซึ่งอาจอยู่ในรูปแบบของความสัมพันธ์ต่างๆ เช่น ความสัมพันธ์เชิงเส้น (Linear Function) ความสัมพันธ์แบบพหุนาม (Polynomial Function) เป็นต้น และเพื่อให้การประมาณค่าในช่วงถูกต้องแม่นยำ จึงได้นำขั้นตอนการสร้างแผนภาพการสอบเทียบให้เหมาะสมของ Aguilar และ Villegas [6] โดยการพิจารณาจากฟังก์ชันที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปริมาตรกับระดับความสูงของน้ำที่จะนำมาประมาณค่าในช่วง ในรูปแบบคณิตศาสตร์ระหว่างปริมาตรกับระดับความสูงของน้ำในถังบรรจุแนวนอน ดังนี้

ในกรณีติดตั้งถังบรรจุของเหลวในแนวนอนแล้วพบว่ายังไม่เกิดการเอียง หรือก่อนและหลังการสอบเทียบยังมีมุมเอียงเท่ากับศูนย์ จากการศึกษาของ Barderas และ Rodea [11] พบว่า พื้นที่เซกเมนต์ (Segment Area) ของเหลวที่เติมลงไปในถังทรงกระบอกความยาว L รัศมี R ระดับความสูงของเหลว H ความยาวส่วนโค้งของเซกเมนต์ S และ θ คือมุมรองรับเซกเมนต์ แสดงได้ดังสมการที่ 5

$$\text{Segment Area} = \frac{1}{2} R^2 (\theta - \sin \theta) \quad (5)$$

$$\text{เมื่อ} \quad \theta = \frac{S}{R} = 2 \cos^{-1} \left(\frac{R-H}{R} \right) \quad (6)$$

ดังนั้น ปริมาตรของเหลว dV สามารถคำนวณได้จากพื้นที่เซกเมนต์ของของเหลวที่เติมลงไปในถังคูณด้วยความยาวของทรงกระบอก dx ดังแสดงในสมการที่ 7

$$dV = \frac{1}{2} R^2 (\theta - \sin \theta) dx \quad (7)$$

แต่หากติดตั้งถังบรรจุของเหลวในแนวนอนแล้วเกิดการเอียง ซึ่งจะมีผลต่อความแม่นยำในการสอบเทียบอย่างมาก และจะส่งผลให้มุมของเซกเมนต์เปลี่ยนแปลงไปตามความยาวของทรงกระบอก ดังนั้น ในกรณีนี้หากทำการอินทิเกรตค่าปริมาตรของเหลว dV จะได้ดังสมการที่ 8

$$V = \frac{R^2}{2} \int_0^L \theta(x) - \sin \theta(x) dx \quad (8)$$

เมื่อ $\theta(x)$ = มุมของเซกเมนต์ที่เปลี่ยนแปลงไปตามความยาวของทรงกระบอก dx

ถ้าให้ β คือ มุมเอียงของถังทรงกระบอก และ h คือระดับความสูงของของเหลวฝั่งฐานถึงที่สูงกว่า จะได้ว่า

$$\theta(x) = 2 \cos^{-1} \left(\frac{R - (x \tan(\beta) + h)}{R} \right) \quad (9)$$

แทนค่า $\theta(x)$ จากสมการที่ 9 ลงในสมการที่ 8 จะได้สมการที่ 10

$$V = R^2 \int_0^L \cos^{-1} u - u \sqrt{1 - u^2} dx \\ = -\frac{R^3}{\tan \beta} \int_{u_0}^{u_L} \cos^{-1} u - u \sqrt{1 - u^2} du \quad (10)$$

$$\text{เมื่อ} \quad u = \frac{R - (x \tan(\beta) + h)}{R}$$

ถ้าทำการอินทิเกรตสมการที่ 10 จะได้สมการที่ 11

$$V = \frac{R^3}{\tan \beta} \left(u_0 \cos^{-1} u_0 - \frac{1}{3} \sqrt{1 - u_0^2} (u_0^2 + 2) - u_L \cos^{-1} u_L + \frac{1}{3} \sqrt{1 - u_L^2} (u_L^2 + 2) \right) \quad (11)$$

$$\text{เมื่อ } u_0 = 1 - \frac{h}{R} \text{ และ } u_L = u_0 - \frac{L \tan \beta}{R}$$

นำตัวแบบคณิตศาสตร์จากสมการที่ 11 มาทดลองใช้ โดยกำหนดให้ มุมเอียงของถังทรงกระบอก (β) = 0.01° จะได้ว่า $h=H$ กำหนดให้ $h=H= 0.986$ m ถ้านำสมการที่ 11 ไปสร้างสูตรด้วยโปรแกรม MS Excel ในเซลล์ F9 จะได้ปริมาตรของเหลว $V=1,300$ ล. ดังการคำนวณในรูปที่ 3

การกำหนดให้มุมเอียงของถัง (β) = 0.01° ดังกล่าว เปรียบเสมือนการติดตั้งถังแล้วทำให้เกิดการเอียงน้อยมาก หรือแทบจะไม่เกิดการเอียงเลยจึงทำให้สามารถนำสมการที่ 7 ของ Barderas และ Rodea [11] มาคำนวณหาค่าปริมาตรของเหลว (V) ได้ โดยให้ $h=H= 0.986$ m. จากสมการที่ 6 จะได้ $\theta = 299^\circ (5.211 \text{ rad})$ นำค่า θ นี้แทนค่าในสมการที่ 7 จะได้ $V = 1,299.9$ ล. ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับปริมาตรที่คำนวณได้จากตัวแบบคณิตศาสตร์ ดังรูปที่ 3 ดังนั้น เราจึงสามารถนำตัวแบบคณิตศาสตร์จากสมการที่ 11 ไปคำนวณหาปริมาตรของน้ำเมื่อถังเอียงที่มุมต่างๆได้

อย่างไรก็ดี ไม่ว่าจะนำฟังก์ชันหรือความสัมพันธ์แบบใดก็ตาม ไปใช้ในการนำเสนอข้อมูลอย่างต่อเนื่องด้วยการสร้างแผนภาพการสอบเทียบโดยอาศัยข้อมูลเพียงบางส่วนจากการสอบเทียบแบบเปื่อยยอมจะทำให้การประมาณค่าในช่วงมีโอกาสผิดพลาดได้ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องปรับค่าความผิดพลาด (%Error) และความไม่แน่นอนในการวัดให้อยู่ภายใต้เงื่อนไขค่าความผิดพลาดสูงสุดที่ยอมรับได้ (Maximum Permissible Errors: MPE) และค่าความไม่

แน่นอนในการวัดแบบขยาย (Expanded Uncertainty: U) ดังแสดงในสมการที่ 12 และสมการที่ 13 ตามลำดับ

$$\%Error < MPE \quad (12)$$

$$U = k \sqrt{u_{\text{instrument}}^2 + u_{\text{adjustment curve}}^2} \quad (13)$$

เมื่อ $u_{\text{instrument}}$ คือ ค่าความไม่แน่นอนในการวัดของเครื่องมือ

$u_{\text{adjustment curve}}$ คือ ความไม่แน่นอนในการประมาณค่าเมื่อนำฟังก์ชันมาสร้างแผนภาพการสอบเทียบ

k คือ ตัวประกอบครอบคลุม

ค่าความไม่แน่นอนในการวัดของเครื่องมือ ในที่นี้คือค่าความไม่แน่นอนในการวัดของอุปกรณ์มาตรวัดน้ำ ได้มาจากค่าความผิดพลาดของมาตรวัดน้ำ (%Meter Error) ดังแสดงในสมการที่ 4 ส่วนความไม่แน่นอนในการประมาณค่าปริมาตร เมื่อนำฟังก์ชันมาสร้างแผนภาพการสอบเทียบได้จากความเบี่ยงเบนมาตรฐานของความผิดพลาดตกค้าง (Standard Deviation of Residual Errors) ตลอดช่วงการคำนวณปริมาตร ดังรูปที่ 4 (ในหัวข้อผลการวิจัยและอภิปรายผล) โดยมีค่าผลต่างระหว่างปริมาตรน้ำที่เติมลงไปในแต่ละช่วง กับปริมาตรจากการประมาณค่าในช่วงด้วยฟังก์ชันต้องไม่เกินค่าความไม่แน่นอนในการวัดแบบขยายดังแสดงในสมการที่ 14

$$|V_{fn} - V| \leq U \quad (14)$$

F9									
=(F4*3)/(\$C\$3)*((F7*ACOS(F7))-((SQRT(1-F7^2))/3)*((F7^2)+2))-F8*(ACOS(F8))+((SQRT(1-F8^2))/3)*((F8^2)+2)))									
1	Math	Model	(β) Degree	(β) radian					
2			0.01	0.000175					
3			tan (β) =	0.000175					
4			H = xtan(β) + h						
5			H = Ltan0.000175 + h						
6			H = 0 + h						
7			∴ h = H						
8			∴ h = H = 0.986 m						
9			∴ V = 1,300 l.						
10									

รูปที่ 3 การคำนวณปริมาตรของเหลวเปรียบเทียบระหว่างตัวแบบคณิตศาสตร์กับสมการของ Barderas และ

Rodea

4. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 การรายงานผลการสอบเทียบ

ก่อนที่จะเติมของเหลวได้บันทึกค่ามุมเอียงของถังน้ำมันไว้เท่ากับ 0.95° เมื่อเติมของเหลวเข้าสู่ถังบรรจุน้ำมาตรวัดน้ำด้วยอัตราการไหลคงที่ จะได้ผลดังตารางที่ 3 และหลังจากสอบเทียบแล้ว ทำการวัดค่ามุมเอียงของถังอีกครั้งพบว่ามีความเท่ากับ 0.95° เช่นเดิม

อย่างไรก็ดี มาตรวัดจะมีค่าความผิดพลาดเนื่องจากไม่มีการชดเชยค่าอุณหภูมิ และจะต้องปรับค่าปริมาตรจากสถานะสอบเทียบไปอยู่ที่สถานะอ้างอิง เพื่อตรวจสอบมาตรวัดว่ามีค่าความผิดพลาดเกินกว่า $\pm 0.5\%$ หรือไม่

ดังนั้น ในการรายงานผลการสอบเทียบ จึงต้องนำค่าปริมาตรที่เติมลงไปในแต่ละครั้งไปตรวจแก้ก่อนด้วยตัวแปรแก้ไขค่าความผิดพลาด (K) จึงจะได้ปริมาตรจากมาตรวัดที่แท้จริง (Actual Reading of Meter) ดังตารางที่ 3

4.2 การนำเสนอข้อมูลอย่างต่อเนื่อง

จากตารางที่ 3 จะเห็นได้ว่า ข้อมูลการสอบเทียบมีใช้ข้อมูลที่ให้ความสัมพันธ์ของปริมาตรกับระดับความสูงอย่างต่อเนื่อง แต่เป็นเพียงปริมาตรที่ระดับความสูงต่างๆ เป็นช่วงๆ เพื่อที่จะลดความผิดพลาดจากการประมาณค่าในช่วงระหว่างค่าความสูง 2 ค่า จึงได้นำตารางที่ 3 ไปทำการนำเสนอข้อมูลอย่างต่อเนื่องด้วยฟังก์ชันต่างๆ โดยให้ค่าความผิดพลาดและความไม่แน่นอนในการวัดอยู่ภายใต้เงื่อนไขค่าความผิดพลาดสูงสุดที่ยอมรับได้ (MPE) และค่าความไม่แน่นอนในการวัดแบบขยาย (U) ดังแสดงในตารางที่ 4, 5 และ 6 ตามลำดับ

จากตารางที่ 4 เป็นการหาค่าความผิดพลาดและค่าความไม่แน่นอนในการวัดเมื่อนำเสนอด้วยฟังก์ชันเชิงเส้น (กรณีถึงเอียง 0.95°) จะเห็นว่าเมื่อนำค่าปริมาตรที่ได้จากฟังก์ชันเชิงเส้น (V_{fn1}) มาเปรียบเทียบกับค่าปริมาตรที่ได้จากการเติมน้ำ (V) จะพบว่ามีค่าความผิดพลาด (%Error) เกินเกณฑ์ (Fail) ค่าความผิดพลาดสูงสุดที่ยอมรับได้ (MPE) เกือบทุกช่วงการสอบเทียบ

ส่วนตารางที่ 5 เป็นการนำเสนอด้วยฟังก์ชันพหุนาม พบว่ามีค่าความผิดพลาด (%Error) ที่ผ่านเกณฑ์ (Pass) ค่าความผิดพลาดสูงสุดที่ยอมรับได้มากกว่าเมื่อนำเสนอด้วยฟังก์ชันเชิงเส้น

และถ้าหาค่าความผิดพลาดและค่าความไม่แน่นอนในการวัดเมื่อนำเสนอด้วยตัวแบบคณิตศาสตร์ (กรณีถึงเอียง 0.95°) จะพบว่าเมื่อนำค่าปริมาตรที่ได้จากตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ (V_{fn3}) มาเปรียบเทียบกับปริมาตรที่ได้จากการเติมน้ำ (V) จะมีค่าความผิดพลาด (%Error) ที่ผ่าน

ตารางที่ 4 ค่าความผิดพลาดและความไม่แน่นอนในการวัดแบบขยายเมื่อนำเสนอด้วยฟังก์ชันเชิงเส้น ($fn1$)

	h (mm)	V (L.)	V_{fn1} (L.)	%Error < MPE		$ V_{fn1} - V $ (L.)	$u(y_i)$ (L.)	$U = ku(y)$ (L.)	$ V_{fn1} - V \leq U$ (L.)
				%Error	MPE=0.5%				
1	81	59.91	43.29	-27.733	FAIL	16.61	6.85	118.88	PASS
2	188	179.63	196.83	9.573	FAIL	17.20	20.55	118.88	PASS
3	330	379.17	400.58	5.647	FAIL	21.41	43.38	118.88	PASS
4	675	917.93	895.62	-2.430	FAIL	22.31	105.01	118.88	PASS
5	810	1117.47	1089.34	-2.518	FAIL	28.13	127.84	118.88	PASS
6	912	1237.21	1235.70	-0.122	PASS	1.514	141.54	118.88	PASS
7	951	1277.10	1291.66	1.140	FAIL	14.55	146.10	118.88	PASS
8	970	1297.06	1318.92	1.686	FAIL	21.86	148.38	118.88	PASS
						$u(y) =$	59.44		

ตารางที่ 5 ค่าความผิดพลาดและความไม่แน่นอนในการวัดเมื่อนำเสนอด้วยฟังก์ชันพหุนาม (fn2)

	h	V	Vfn2	%Error <MPE		$ V_{fn2} - V $	$u(y_i)$	$U = ku(y)$	$ V_{fn2} - V \leq U$
	(mm)	(.)	(.)	%Error	MPE=0.5%				
1	81	59.91	58.33	-2.639	FAIL	1.58	0.32	5.56	PASS
2	188	179.63	178.06	-0.878	FAIL	1.58	0.96	5.56	PASS
3	330	379.17	373.56	-1.481	FAIL	5.62	2.03	5.56	FAIL
4	675	917.93	919.97	0.223	PASS	2.04	4.91	5.56	PASS
5	810	1117.47	1116.99	-0.043	PASS	0.48	5.98	5.56	PASS
6	912	1237.21	1243.08	0.475	PASS	5.87	6.62	5.56	FAIL
7	951	1277.10	1284.24	0.559	FAIL	7.14	6.83	5.56	FAIL
8	970	1297.06	1302.66	0.432	PASS	5.60	6.94	5.56	FAIL
						$u(y) =$	2.78		

เกณฑ์ (Pass) ค่าความผิดพลาดสูงสุดที่ยอมรับได้ (MPE) มากกว่าเมื่อนำเสนอด้วยฟังก์ชันเชิงเส้นกับฟังก์ชันพหุนาม และเมื่อนำเสนอด้วยตัวแบบคณิตศาสตร์จะผ่านเกณฑ์ (Pass) ค่าความไม่แน่นอนในการวัดแบบขยายได้

ทุกช่วงการสอบเทียบ ดังแสดงในตารางที่ 6

ทั้งนี้ ค่า $u(y_i)$ คำนวณได้จากส่วนของรากที่สองในสมการที่ 13 โดยการแทนค่า $u_{\text{instrument}} = -0.23\%$ ที่ได้จากสมการที่ 4 และค่า $u_{\text{adjustment curve}}$ ที่ได้จากความ

เบี่ยงเบนมาตรฐานของความผิดพลาดตกค้าง (Standard Deviation of Residual Error) [6],[12] แล้วเปลี่ยนค่า $u(y_i)$ จากหน่วยเป็นเปอร์เซ็นต์ให้มึหน่วยเป็นลิตรโดยการคูณด้วยค่าปริมาตร (V) ที่ระดับความสูงต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4, 5 และ 6 ทั้งนี้ ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐานของความผิดพลาดตกค้างคำนวณได้จากโปรแกรม MS Excel ซึ่งในกรณีของฟังก์ชันเชิงเส้น (fn1) จะมีค่าเท่ากับ 11.44%

ตารางที่ 6 ค่าความผิดพลาดและความไม่แน่นอนในการวัดเมื่อนำเสนอด้วยตัวแบบคณิตศาสตร์

	h	V	Vfn3	%Error <MPE		$ V_{fn3} - V $	$u(y_i)$	$U = ku(y)$	$ V_{fn3} - V \leq U$
	(mm)	(L.)	(L.)	%Error	MPE=0.5%				
1	81	59.91	58.89	-1.699	FAIL	1.02	0.24	4.08	PASS
2	188	179.63	177.36	-1.265	FAIL	2.27	0.71	4.08	PASS
3	330	379.17	376.20	-0.784	FAIL	2.97	1.49	4.08	PASS
4	675	917.93	921.82	0.424	PASS	3.89	3.61	4.08	PASS
5	810	1117.47	1117.78	0.028	PASS	0.31	4.39	4.08	PASS
6	912	1237.21	1241.23	0.325	PASS	4.02	4.86	4.08	PASS
7	951	1277.10	1281.13	0.315	PASS	4.03	5.02	4.08	PASS
8	970	1297.06	1297.84	0.060	PASS	0.78	5.10	4.08	PASS
						$u(y) =$	2.04		

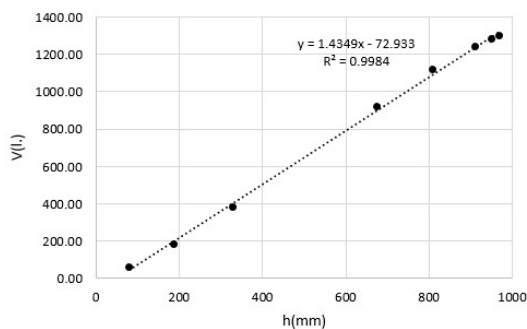
SUMMARY OUTPUT (fn1)		SUMMARY OUTPUT (fn2)		SUMMARY OUTPUT (fn3)	
Regression Statistics		Regression Statistics		Regression Statistics	
Multiple R	0.331004	Multiple R	0.921635	Multiple R	0.931972
R Square	0.109564	R Square	0.849412	R Square	0.868572
Adjusted R Square	-0.03884	Adjusted R Square	0.824314	Adjusted R Square	0.846667
Standard Error	11.43967	Standard Error	0.483066	Standard Error	0.319101
Observations	8	Observations	8	Observations	8

รูปที่ 4 ความเบี่ยงเบนมาตรฐานของความผิดพลาดตกค้างเมื่อนำเสนอข้อมูลอย่างต่อเนื่องด้วยฟังก์ชันต่างๆ

ฟังก์ชันพหุนาม (fn2) เท่ากับ 0.48% และตัวแบบคณิตศาสตร์ (fn3) มีค่าเท่ากับ 0.32% ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 4

เมื่อได้ค่า $u(y_i)$ ตลอดช่วงการสอบเทียบแล้วจึงนำมาคำนวณค่าความไม่แน่นอนรวม (Combined Standard Uncertainty: $u(y)$ [13] แล้วนำมาคูณด้วยตัวประกอบครอบคลุม (k) ซึ่งในที่นี้ ถ้ากำหนดให้ระดับความเชื่อมั่นเท่ากับ 95% ดังนั้น $k=2$ [14] จะได้ค่าความไม่แน่นอนแบบขยาย $U = 2u(y)$ ดังแสดงในตารางที่ 4, 5 และ 6

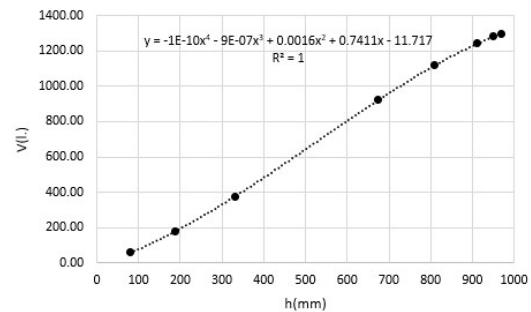
เมื่อนำข้อมูลจากตารางที่ 4 ไปสร้างแผนภาพการสอบเทียบด้วยโปรแกรม MS Excel จะได้ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 แผนภาพการสอบเทียบที่ได้จากฟังก์ชันเชิงเส้น

จากรูปที่ 5 จะเห็นว่าแผนภาพการสอบเทียบที่ได้จากฟังก์ชันเชิงเส้นมีค่า R^2 เข้าใกล้ 1 มีความสอดคล้องกับ Agboola และคณะ [5] ที่ใช้โปรแกรม MS Excel ในการสร้างแผนภาพการสอบเทียบได้ค่า R^2 ใกล้เคียง 1 เช่นเดียวกัน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า แผนภาพการสอบเทียบจากฟังก์ชันเชิงเส้นสมรูปกับข้อมูลที่ได้จากการเติมน้ำ

ส่วนแผนภาพการสอบเทียบที่ได้จากฟังก์ชันพหุนามมีค่า R^2 เท่ากับ 1 ดังแสดงในรูปที่ 6



รูปที่ 6 แผนภาพการสอบเทียบที่ได้จากฟังก์ชันพหุนาม

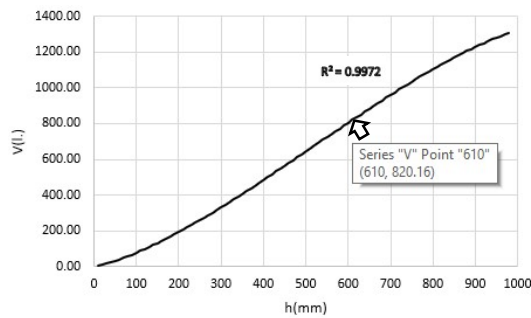
จากรูปที่ 6 แสดงแผนภาพการสอบเทียบที่ได้จากฟังก์ชันพหุนามมีค่า R^2 เท่ากับ 1 ดังนั้น แผนภาพการสอบเทียบนี้ถือว่ามีความสมรูปกับข้อมูลการเติมน้ำเช่นกัน

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าแผนภาพการสอบเทียบที่ได้จากฟังก์ชันพหุนามจากงานวิจัยนี้ จะให้ค่า $R^2=1$ ก็ตาม แต่ถ้าหากพิจารณาจากตารางที่ 5 จะเห็นได้ว่า ฟังก์ชันพหุนามมีค่าความผิดพลาด (%Error) ที่ไม่ผ่านเกณฑ์ (Fail) หรือไม่อยู่ภายใต้เงื่อนไขค่าความผิดพลาดสูงสุดที่ยอมรับได้ (MPE) และค่าความไม่แน่นอนในการวัดแบบขยาย (U) อยู่หลายช่วงการสอบเทียบ

ดังนั้น การใช้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเพียงอย่างเดียวอาจไม่เพียงพอที่จะสรุปว่าแผนภาพการสอบเทียบที่มีค่า R^2 ใกล้เคียง 1 หรือ R^2 เท่ากับ 1 จะมีความถูกต้องน่าเชื่อถือ ดังนั้นจึงต้องแสดงให้เห็นว่าฟังก์ชันหรือตัวแบบคณิตศาสตร์ที่ใช้ในการสร้างแผนภาพการสอบเทียบผ่านเกณฑ์ (Pass) หรืออยู่ภายใต้เงื่อนไขความผิดพลาดสูงสุดที่ยอมรับได้กับความไม่แน่นอนในการวัดแบบขยายอีกด้วย

เมื่อนำข้อมูลจากตารางที่ 6 ไปสร้างแผนภาพการสอบเทียบที่ได้จากตัวแบบคณิตศาสตร์ด้วยโปรแกรม MS

Excel โดยคำนวณค่าปริมาตรที่ระดับความสูงจาก 10 มม. ไปถึง 980 มม. โดยกำหนดให้ความละเอียดของสเกลในแกนนอน (Minor Scale) เท่ากับ 10 มม. จะได้ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 แผนภาพการสอบเทียบจากตัวแบบคณิตศาสตร์

จากรูปที่ 7 จะเห็นว่าแผนภาพการสอบเทียบจากตัวแบบคณิตศาสตร์ มีลักษณะเส้นโค้งคล้ายกับแผนภาพการสอบเทียบจากฟังก์ชันพหุนามในรูปที่ 6 โดยมีค่า R^2 ใกล้เคียงกับ 1 แต่แผนภาพการสอบเทียบด้วยตัวแบบคณิตศาสตร์ สามารถผ่านเกณฑ์ (Pass) หรืออยู่ภายใต้เงื่อนไขค่าความผิดพลาดที่ยอมรับได้สูงสุด (MPE) และความไม่แน่นอนแบบขยาย (U) ได้มากกว่า ดังตารางที่ 6

ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่า แผนภาพการสอบเทียบที่ได้จากตัวแบบคณิตศาสตร์มีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งานมากที่สุดเมื่อเทียบกับฟังก์ชันเชิงเส้นและฟังก์ชันพหุนาม บริษัทฯสามารถที่จะนำไปใช้ในการประมาณค่าในช่วง (Interpolation) หรือใช้อ้างอิงสำหรับการสร้างสเกลวัดปริมาตรของหลอดมอระดပ်ให้ถูกต้องแม่นยำได้

5. สรุปและข้อเสนอแนะ

บริษัท พี.เค.วอเตอร์ปี้ม ซิสเท็ม จำกัด ประสบปัญหา ค่าขีดขั้้นหมายมาตราหรือสเกลวัดปริมาตรถังน้ำมัน ณ ระดับต่างๆ ไม่สอดคล้องกับปริมาตรของน้ำมันที่ใส่ลงไป ในถัง จึงทำให้เกิดข้อโต้แย้งกันระหว่างบริษัทกับลูกค้า และไม่สามารถส่งมอบให้กับลูกค้าได้ ดังนั้นบริษัทฯจึงได้ทำหนังสือขอความอนุเคราะห์ให้อาจารย์เข้าไปให้บริการทางวิชาการ เพื่อเข้ามาช่วยหาสูตรทางวิชาการที่น่าเชื่อถือ ได้มาอ้างอิงและจัดทำโปรแกรมในการคำนวณถังน้ำมัน

จากการสอบถามพนักงานในขั้นตอนการสอบเทียบแบบเปียกในเบื้องต้นพบว่า สาเหตุเกิดจากการขนย้ายถังบรรจุน้ำมันจากบริษัทฯ ไปติดตั้ง ณ สถานที่ตั้งของลูกค้า ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทั้งตำแหน่งและการเอียงของถัง ซึ่งจะมีผลต่อความแม่นยำในการสอบเทียบเป็นอย่างมาก นอกจากนี้ ยังพบสาเหตุเพิ่มเติมเกี่ยวกับการติดตั้งหลอดมอระดပ်ไว้ที่ปลายถัง ซึ่งจะทำให้ค่าความเอียงของถัง (Inclination) มีอิทธิพลต่อการอ่านค่าปริมาตรได้อีกด้วย

ดังนั้น จึงมีความจำเป็นที่พนักงานจะต้องบันทึกค่ามุมเอียงก่อนและหลังการสอบเทียบทุกครั้ง โดยค่าที่ได้จะต้องเท่ากัน และหากพบว่ามุมเอียงก่อนและหลังการสอบเทียบมีค่าแตกต่างกัน จะต้องทำการสอบเทียบใหม่

ในการสอบเทียบได้ประยุกต์การสอบเทียบแบบเปียกจากเอกสารของสำนักงานกลางชั่งตวงวัด มีขั้นตอนดังนี้ 1) การกำหนดขอบเขตขั้นตอนและจำนวนครั้งในการเติมน้ำ 2) การจัดทำขั้นตอนการเติมน้ำแต่ละครั้ง 3) การเตรียมแบบมาตราและอุปกรณ์ 4) การเติมน้ำเข้าถังพร้อมกับการวัดระดับความสูงของน้ำและ 5) การนำเสนอข้อมูลอย่างต่อเนื่อง

ในการกำหนดขอบเขตขั้นตอนและจำนวนครั้งในการเติมน้ำ จะเริ่มจากการกำหนดค่าขั้นหมายมาตราหรือค่าความละเอียดของสเกลวัดปริมาตร ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการกำหนดปริมาตรต่ำสุดของการเติมของเหลวในแต่ละครั้ง (Minimum Filling Step Volume) [3] ได้ ส่วนการกำหนดปริมาตรสูงสุดที่ยอมรับได้ในการเติมน้ำแต่ละครั้ง (Maximum Filling Step Volume) สามารถคำนวณได้จากสมการของ Verch และ Bonke และกราฟค่าสูงสุดที่ยอมรับได้ของปริมาตรที่เติมแต่ละครั้งสัมพันธ์ [3]

ในการจัดทำขั้นตอนการเติมน้ำแต่ละครั้งได้อ้างอิงตารางของ PTB Testing Instructions [3] ซึ่งคล้ายกับการเติมของเหลวตามจุดเชบิเชฟ (Chebyshev Nodes) คือเติมของเหลวในปริมาณน้อยๆบริเวณใกล้กันถึง และจะเพิ่มปริมาณมากขึ้นบริเวณกึ่งกลางถึง และเติมของเหลวในปริมาณน้อยลงอีกครั้งเมื่อระดับน้ำใกล้เต็มถึงบรรจุ ด้วยวิธีการเติมของเหลวเช่นนี้ นอกจากจะช่วยลดความผิดพลาดจากการประมาณค่าในช่วงแล้ว ยังช่วยลดเวลา

ในการปฏิบัติงานสอบเทียบได้มาก สำหรับงานวิจัยในครั้งนี้จะเก็บข้อมูลเพื่อทำการสอบเทียบเพียง 9 คู่ น้อยกว่า Aguilar และ Villegas [6] ที่เก็บข้อมูลเพื่อทำการสอบเทียบ 21 คู่ โดยมีข้อมูลอยู่ 11 คู่ที่นำมาใช้กำหนดจำนวนครั้งและปริมาตรในการเติมของเหลวตามจุดเชิพ

จากนั้นจึงนำข้อมูลการสอบเทียบมาสร้างแผนภาพการสอบเทียบ โดยการนำเสนอข้อมูลอย่างต่อเนื่องด้วยฟังก์ชันต่างๆ และตัวแบบคณิตศาสตร์ที่พิจารณาถึงค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ว่าฟังก์ชันนั้นมีความสมรูปกับข้อมูลหรือไม่ และยังต้องพิจารณาค่าความผิดพลาดและค่าความไม่แน่นอนในการวัดว่าอยู่ภายใต้เงื่อนไขค่าความผิดพลาดสูงสุดที่ยอมรับได้ (MPE) และค่าความไม่แน่นอนในการวัดแบบขยาย (U) หรือไม่อีกด้วย

ผลการวิจัยพบว่าเมื่อเกิดการเอียงของถัง แผนภาพการสอบเทียบจากตัวแบบคณิตศาสตร์จะให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด เพราะมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจใกล้ 1 ซึ่งแสดงว่าตัวแบบคณิตศาสตร์สามารถสร้างแผนภาพการสอบเทียบที่สมรูปกับข้อมูลการเติมน้ำ อีกทั้งยังผ่านเกณฑ์หรืออยู่ภายใต้เงื่อนไขค่าความผิดพลาดสูงสุดที่ยอมรับได้ (MPE) และค่าความไม่แน่นอนในการวัดแบบขยาย (U) ได้มากกว่าเมื่อเทียบกับฟังก์ชันเชิงเส้นและฟังก์ชันพหุนาม

ข้อเสนอแนะในการนำงานวิจัยไปใช้ประโยชน์คือ 1) บริษัทสามารถนำเสนอข้อมูลอย่างต่อเนื่องด้วยแผนภาพสอบเทียบจากตัวแบบคณิตศาสตร์โดยมีค่าความผิดพลาดและความไม่แน่นอนในการประมาณค่าปริมาตรอยู่ภายใต้เงื่อนไขที่สามารถตกลงกันได้ระหว่างบริษัทกับลูกค้า ทั้งนี้เนื่องจากลูกค้าให้ข้อมูลว่า ระดับน้ำมันที่ต้องสำรองในถังกรณีฉุกเฉินไม่ควรน้อยกว่าครึ่งถังหรือไม่ต่ำกว่าระดับความสูง 675 มม. ดังนั้น แม้ว่าตัวแบบคณิตศาสตร์ในตารางที่ 6 จะมีอยู่บางช่วงที่ไม่สามารถผ่านเกณฑ์ (Fail) เงื่อนไขความผิดพลาด (%Error) ที่ระดับต่ำกว่า 675 มม. แต่ก็ยังเป็นเงื่อนไขที่พอจะยอมรับได้ 2) บริษัทสามารถนำแผนภาพการสอบเทียบนี้ไปใช้ในการอ้างอิงสำหรับการสร้างสเกลวัดปริมาตรให้กับลูกค้าได้ แต่ต้องให้ข้อมูลกับลูกค้าว่า สเกลวัดปริมาตรจะมีความถูกต้องแม่นยำเมื่อระดับความสูงของของเหลวมีค่าไม่น้อยกว่า 675 มม. หาก

ระดับของเหลวมีค่าต่ำกว่าครึ่งถังจะทำให้สเกลวัดปริมาตรอ่านค่าผิดพลาดได้มากถึง 2% 3) หากต้องการประมาณค่าในช่วง (Interpolation) โดยใช้แผนภาพการสอบเทียบจากโปรแกรม MS Excel จะสามารถทำได้โดยการเลื่อนเมาส์ไปยังระดับความสูงที่ต้องการทราบค่าปริมาตรที่สอดคล้องกัน เช่น ถ้าต้องการทราบค่าปริมาตรที่ระดับความสูง 610 mm ให้เลื่อนเมาส์ไปยังเส้นโค้งใกล้ๆ ระดับความสูง 610 mm โปรแกรม MS Excel จะบอกค่าปริมาตรที่สอดคล้อง ซึ่งในที่นี้จะอ่านค่าได้เท่ากับ 820.16 ลิตร เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 7 4) หากต้องการความถูกต้องแม่นยำในการสอบเทียบมากขึ้น ควรเลือกใช้ถังตวงแบบมาตรา (Prover Tank) ซึ่งเป็นแบบมาตราอ้างอิง (Reference Standards) ที่มีลำดับความสำคัญของแบบมาตรา (Standard) ที่สูงกว่าอุปกรณ์มาตรวัดน้ำซึ่งเป็นแบบมาตราใช้งาน (Working Standards) ที่มีลำดับความสำคัญในระดับต่ำที่สุด มาแทนวิธีการชั่งน้ำหนักทางอ้อมด้วยเครื่องชั่งน้ำหนักอิเล็กทรอนิกส์ การที่บริษัทฯ เลือกใช้วิธีการชั่งน้ำหนักทางอ้อมเนื่องจาก ลูกค้ามิได้มีวัตถุประสงค์ในการนำถังบรรจุน้ำมันไปซื้อขายน้ำมันเพื่อการค้าขาย การเพียงแต่ต้องการนำมาใช้ในการสำรองน้ำมันสำหรับระบบปั๊มดับเพลิงกรณีฉุกเฉินเท่านั้น 5) พนักงานสามารถลดเวลาในการปฏิบัติงานสอบเทียบได้โดยอ้างอิงตาราง PTB Testing Instructions [3] มาปรับใช้ในการจัดทำขั้นตอนการเติมน้ำมันในถังบรรจุ ซึ่งสอดคล้องกับ Aguilar และ Villegas [6] ที่ได้ประยุกต์ใช้เชิพโหนด (Chebyshev Node) มากำหนดจำนวนครั้งในการเติมน้ำ 6) บริษัทอาจยกเลิกขั้นตอนการสอบเทียบที่บริษัทฯ ให้เหลือแต่ขั้นตอนติดตั้งให้ลูกค้าเพียงแห่งเดียว เพื่อตัดปัญหาการเปลี่ยนแปลงตำแหน่งและการเอียงของถัง 7) เพื่อป้องกันการเติมน้ำมันล้นถัง บริษัทจะต้องแจ้งให้ลูกค้าทราบว่า ไม่ควรเติมน้ำมันลงในถังเกินกว่าปริมาตรสูงสุดใช้งาน 1,300 ลิตร แม้ว่าถังจะมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.06 ม. ความยาว 1.52 ม. จะสามารถเติมได้ถึงระดับความสูงที่ใกล้เคียงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถังบรรจุ ซึ่งหากเทียบเป็นปริมาตรจะได้เท่ากับ 1,341 ลิตร รายละเอียดการคำนวณปริมาตรดังกล่าวโดยใช้ตัวแบบ

ปีที่ 17 ฉบับที่ 1 เดือน มกราคม – เมษายน พ.ศ. 2565

F9																			
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P	Q	R	S
1	Math Model	(β) Degree	(β) radian			105.9 cm													
2		0.01	0.000175			1059 mm													
3		tan(β) =	0.000175			h =	1.059 m												
4		H = x tan(β) + h				R =	0.53 m												
5		H = L tan(β) + h				β =	0.000175 rad												
6		H = 0 + h				L =	1.52 m												
7		∴ h = H				Uo =	-0.99811												
8		if h = H = 1.059 m				UL =	-0.99861												
9		∴ V = 1,341 L				V =	1.341306 m³												
10						V =	1341 L												

รูปที่ 8 การคำนวณปริมาตรเมื่อระดับความสูงของเหลวใกล้เคียงกับขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของถังบรรจุ

คณิตศาสตร์และสมการของ Barderas และ Rodea [11] ด้วยโปรแกรม MS Excel สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 8

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณ คุณชนิษฐา กินวารี กรรมการ

ผู้จัดการบริษัท พีเค วอเตอร์ปั๊มซิสเต็ม จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการทำงานวิจัย ตลอดจนสนับสนุนอุปกรณ์สถานที่และบุคลากร และขอขอบคุณ คุณปิยะ แซ่แต้ วิศวกรบริษัทฯ ที่ช่วยเหลือในการทดลองและเก็บข้อมูล

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] V. Knyva, M. Knyva and J. Rainys, "New Approach to Calibration of Vertical Fuel Tanks," *Elektronika Ir Elektrotechnika*, vol. 19, no. 8, pp. 37-40, 2013.
- [2] J. Suttanarak and S. Shusuwan, *Calculation of Volumetric Calibration Results (Revised Edition)*. Nonthaburi, Central Bureau of Weights & Measures, 2015, pp. 347-416.
- [3] V. Visutthatham and S. Shusuwan, *Fixed Storage Tank in the form of Horizontal Cylinder*. Nonthaburi, Central Bureau of Weights & Measures, 2002.
- [4] National Institute of Metrology (Thailand), *JCGM 200:2008 (En/Th) International Vocabulary of Metrology – Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM)*. Pathum Thani: National Institute of Metrology (Thailand), 2008.
- [5] O. O. Agboola, P. P. Ikubanni, R. A. Ibikunle, A. A. Adediran and B. T. Ogunsemi, "Generation of Calibration Charts for Horizontal Petroleum Storage Tanks Using Microsoft Excel," *MAPAN32*, pp. 321–327, 2017.
- [6] J. J. Aguilar-Mamani and Z. Villegas, "Model of Optimization of Error and Uncertainty in Generation of Calibration Charts for Horizontal Storage Tank," in *Phys.: Conf. ser*, Bristol, 2021, pp. 1-8.
- [7] Department of Petroleum Resources (DPR), *Procedure Guide for the Determination of the Quantity and Quality of Petroleum and Petroleum Products at Custody Transfer Point*. Victoria Island, Lagos: Department of Petroleum Resources, 2019.
- [8] Play Solution Technology (2021, June 10). Why Calibration - Why is Calibration Important? [Online]. Available: <https://www.playsotec.com>
- [9] Beta Valve Systems Ltd. (2011, June 13). Water Meter Data Sheets Explained - ISO 4064 [Online]. Available: <https://www.betavalve.com>
- [10] Central Bureau of Weights and Measures (2021, June 10). The water volume meter of

- the accuracy class (CLASS) B compared to the accuracy class according to the new Ministry's notification [Online]. Available: <http://www.cbwmthai.org>
- [11] A. V. Barderas and B. S. S. G. Rodea, "How to Calculate the Volumes of Partially Full Tanks," *International Journal of Engineering and Technology*, vol. 53, no. 4, pp. 1-7, 2016.
- [12] V. Barwick, *Preparation of Calibration Curve: A Guide for Best Practice*. Department of Trade and Industry as part of the National Measurement System Valid Analytical Measurement (VAM) Program, 2003.
- [13] EA Laboratory Committee, "Calculation of the Standard Uncertainty of the Output Estimate," in *Evaluation of the Uncertainty of Measurement in Calibration*, EA European Accreditation, 2013, pp. 8-11.
- [14] Working Group 1 of the Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM/WG1), "G.6 Summary and conclusions," in *JCGM 100:2008 Evaluation of Measurement Data-Guide to the Expression of Uncertainty in Measurement*, Bureau international des poids et mesures (BIPM), 2008, pp. 88-89.

การวิเคราะห์สมรรถนะของอัลกอริทึมต่อต้านการชนกันภายใต้วิธีการประมาณจำนวน แท็กที่เกิดการชนกันที่แม่นยำสำหรับระบบอาร์เอฟไอดี

Performance Analysis of Tag Anti-Collision Algorithms Under Accurate the Number of Colliding Tag Estimation Method for RFID Systems

นรรรัตน์ วัฒนมงคล

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

169 ถนนลงหาดบางแสน ตำบลแสนสุข อำเภอเมือง จังหวัดชลบุรี 20131

Norrrat Wattanamongkhon

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University

Longhad Bangsaen Road, Saensook, Mueang, ChonBuri 20131

*Corresponding author Email: norrrat@eng.buu.ac.th

(Received: September 27, 2020; Revised: December 2, 2020; Accepted: February 17, 2021)

บทคัดย่อ

ในกระบวนการของการระบุตัวตนในระบบอาร์เอฟไอดีนั้นเมื่อมีแท็กจำนวนหนึ่งต้องการส่งสัญญาณไปหาเครื่องอ่านในเวลาใกล้เคียงกันจะเกิดการชนกันขึ้น ปัญหาการชนกันของแท็กมีความสำคัญอย่างมาก เนื่องจากส่งผลถึงเวลาประวิงที่ใช้ในการระบุตัวตน การใช้พลังงานของแท็กในการติดต่อสื่อสาร หรือการใช้งานแบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณงานวิจัยฉบับนี้นำเสนอสมการคณิตศาสตร์ใหม่เพื่อใช้ในการวิเคราะห์สมรรถนะการทำงานของอัลกอริทึมต่อต้านการชนกันสำหรับระบบอาร์เอฟไอดีซึ่งประกอบด้วย 4 อัลกอริทึมคือ สล็อตอะโลฮาแบบปรับขนาดเฟรมได้ สล็อตอะโลฮาแบบปรับขนาดเฟรมและข้ามไม่ใช้สล็อตได้ อัลกอริทึมทรูแบบปรับขนาดเฟรมได้ และอัลกอริทึมทรูแบบปรับขนาดเฟรมและข้ามไม่ใช้สล็อตได้ จากผลการทดสอบพบว่าอัลกอริทึมทรูแบบปรับขนาดเฟรมและข้ามไม่ใช้สล็อตได้จะให้ประสิทธิภาพสูงสุดเท่ากับ 0.52 เมื่อมีแท็กที่เกิดการชนกันในระบบจำนวน 100 แท็ก

คำสำคัญ: อาร์เอฟไอดี อัลกอริทึมต่อต้านการชน สล็อตอะโลฮา โพรโทคอลแบบปรับตัวได้

ABSTRACT

In the process of identification in RFID systems, a number of tags were required to send signals to nearby readers, a collision would occur. It is very important because it affects the access delay in identification, power consumption of tags, or bandwidth utilization. In this research, we present a novel mathematical models for the performance analysis of tag anti-collision algorithms for RFID systems, including AF-SA, AFS-SA, TA-AF and TA-AFSS. From the experimental results we found that the TA-AFSS algorithm provides the highest efficiency as 0.52 for the number of 100 collided tags in the system.

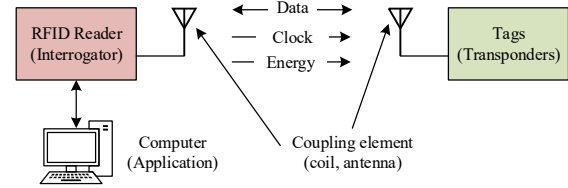
Keyword: RFID, anti-collision algorithm, slotted aloha, adaptive protocol.

1. บทนำ

อาร์เอฟไอดี [1] (Radio Frequency Identification: RFID) คือเทคโนโลยีระบุตัวตนอัตโนมัติแบบไม่สัมผัส สามารถระบุตัวตนของวัตถุเป้าหมายได้อย่างอัตโนมัติผ่านการสื่อสารข้อมูลแบบสองทาง (Full-duplex) โดยใช้สัญญาณคลื่นวิทยุแบบกระจายในทุกทิศทาง (Omni-directional) ซึ่งสามารถทำงานได้อย่างสะดวก ถูกต้อง และรวดเร็ว แทนที่จะต้องใช้การนับหรือจดบันทึกด้วยมนุษย์ที่อาจเกิดข้อผิดพลาดได้ง่ายและยังทำงานในสิ่งแวดล้อมที่อันตรายได้ ปัจจุบันได้มีการนำเอาเทคโนโลยี RFID มาใช้งานอย่างแพร่หลาย เช่น กระบวนการผลิต ระบบคลังสินค้า โลจิสติกส์ ระบบรักษาความปลอดภัย ระบบบริหารจัดการจราจร หรือระบบการสาธารณสุข ซึ่งต่างจากเทคโนโลยีระบุตัวตนแบบไร้สายชนิดอื่นๆ เช่น การอ่านบาร์โค้ด (Barcode) หรือคิวอาร์โค้ด (QR-code) ที่อาศัยคลื่นอินฟราเรดที่ต้องรับส่งสัญญาณในแนวเส้นตรง หากมีสิ่งกีดขวางมาบังจะไม่สามารถสื่อสารถึงกันได้

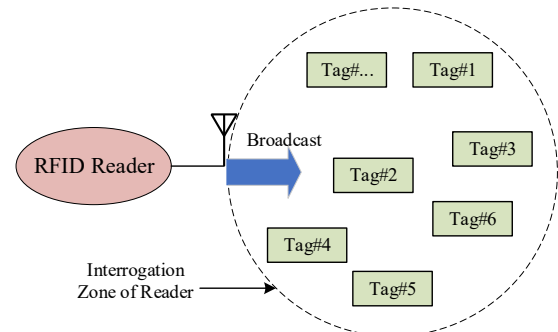
โดยทั่วไประบบ RFID ประกอบไปด้วย 3 ส่วนหลัก คือเครื่องอ่าน (Reader หรือ Interrogator) แท็กหรือทรานสปอนเดอร์ (Tag หรือ Transponder) มีลักษณะเป็นสติกเกอร์หรือชิปที่มีขนาดเล็กและระบบบริหารจัดการ (Management system) [1] ดังแสดงในรูปที่ 1 ทั้งเครื่องอ่านและแท็กจะมีอุปกรณ์สายอากาศอยู่ด้านในซึ่งถูกใช้สำหรับรับและส่งสัญญาณ โดยแท็กจะถูกติดหรือฝังลงในวัตถุที่ต้องการอ่านข้อมูล จากนั้นเครื่องอ่านจะรวบรวมและถ่ายโอนข้อมูลที่ได้รับมาจากระบบบริหารจัดการเพื่อทำการประมวลผลข้อมูลอย่างเป็นลำดับตามความต้องการที่แตกต่างกันของการนำไปใช้งาน ในระบบ RFID ทุกๆ แท็กจะมีหมายเลขประจำตัวของตนเองซึ่งได้จากการเข้ารหัสแมนเชสเตอร์ (Manchester coding) ดังนั้นเครื่องอ่านจะสามารถระบุตัวตนของแท็กที่ทราบเท่าที่มันยังได้รับหมายเลขประจำตัวของแท็กนั้นอยู่ ปัจจุบันแท็กที่ถูกนำมาใช้งานส่วนใหญ่จะเป็นแบบพาสซีฟ (Passive tag) คือแท็กที่ไม่ต้องมีแหล่งพลังงานบรรจุไว้ที่ตัวเอง แต่จะใช้การเหนี่ยวนำพลังงานจากเครื่องอ่านผ่าน

สายอากาศที่ฝังอยู่ภายในโดยต้องอยู่ในระยะไม่ห่างกันนัก



รูปที่ 1 ส่วนประกอบที่สำคัญของระบบ RFID

จากรูปที่ 2 ในขั้นตอนของการสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านและแท็กของระบบ RFID หนึ่งๆ หากมีแท็กจำนวนตั้งแต่ 2 แท็กขึ้นไปในรัศมีการแพร่กระจายสัญญาณของเครื่องอ่าน (Interrogation zone of reader) หรือมีแท็กหนึ่งอยู่ในรัศมีการส่งสัญญาณของเครื่องอ่านมากกว่าหนึ่งเครื่องจะเกิดการแลกเปลี่ยนข่าวสารผ่านช่องสัญญาณความถี่เดียวกันและในเวลาเดียวกัน จึงนำไปสู่ปัญหาการชนกันของแท็กเกิดข้อมูล ส่งผลให้ไม่มีแท็กใดเลยที่สามารถส่งแท็กเกิดของตนเองไปยังเครื่องอ่านได้สำเร็จ การชนกันของแท็กเกิดเป็นปัญหาที่สำคัญมากในระบบ RFID [1,2] เพราะส่งผลให้การใช้พลังงานของแท็กมากขึ้น มีข้อจำกัดในการประมวลผลและเวลาประวิงของการส่งข่าวสารก็มากขึ้นด้วย ยิ่งไปกว่านั้น ยังส่งผลให้เกิดข้อจำกัดในการพัฒนาและเกิดผลกระทบต่อการนำไปประยุกต์ใช้งาน



รูปที่ 2 รัศมีการสื่อสารระหว่างเครื่องอ่านและแท็ก

ดังนั้นในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์นำเสนออัลกอริทึมที่แก้ปัญหการชนกันของแท็กได้อย่างมีประสิทธิภาพและสมการคณิตศาสตร์ที่สามารถวิเคราะห์สมรรถนะของอัลกอริทึมได้อย่างรวดเร็วสำหรับระบบอาร์เอฟไอดี

ภายใต้สมมติฐานที่สามารถประมาณจำนวนแท็กที่เกิดการชนกันได้อย่างแม่นยำ

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการสืบค้นงานวิจัยและรวบรวมข้อมูลในอดีตจนถึงปัจจุบันที่ผ่านมามีนักวิจัยได้นำเสนอโพรโทคอลเพื่อแก้ปัญหาการชนกันในระบบ RFID แบบไร้สาย สามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มหลักคือ โพรโทคอลแก้ปัญหาการชนกันของแท็ก (Tag anti-collision protocols) และอีกกลุ่มคือโพรโทคอลแก้ปัญหาการชนกันของเครื่องอ่าน (Reader anti-collision protocols) [1-4] ซึ่งในงานวิจัยฉบับนี้สนใจกลุ่มที่เสนอโพรโทคอลแก้ปัญหาการชนกันของแท็ก เนื่องจากเป็นปัญหาที่มักเกิดขึ้นได้ทั่วไปเมื่อนำไปใช้งานจริง อัลกอริทึมที่นำเสนอในปัจจุบันจะอาศัยเทคโนโลยีการเข้าถึงช่องสัญญาณแบบแบ่งเวลา (Time Division Multiple Access: TDMA) เนื่องจากเป็นวิธีการเข้าถึงช่องสัญญาณที่มีความซับซ้อนน้อย โดยเราสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 กลุ่มคือ อัลกอริทึม ALOHA-based [5]-[7] และอัลกอริทึม Tree-based [8]-[11]

แนวคิดพื้นฐานของอัลกอริทึม ALOHA-based คือการแบ่งช่วงเวลาออกเป็นไทม์สล็อตเพื่อให้แท็กแต่ละตัวสามารถสื่อสารกับเครื่องอ่านได้ในแต่ละไทม์สล็อตโดยใช้อัลกอริทึมการปรับค่าความน่าจะเป็น (Probability anti-collision algorithms) จึงช่วยลดโอกาสการชนกันของแท็กเกิดลงได้ แทนที่จะอนุญาตให้แท็กแต่ละตัวสามารถติดต่อกับเครื่องอ่านที่มีอยู่เครื่องเดียวได้อย่างอิสระซึ่งจะส่งผลให้เกิดการชนกันบ่อยมาก ด้วยอัลกอริทึมนี้สามารถพัฒนาต่อได้ง่ายและนำไปประยุกต์เพื่อระบุตัวตนของแท็กจำนวนเท่าใดก็ได้ ดังนั้นอัลกอริทึม ALOHA-based จึงถูกนำไปใช้งานอย่างแพร่หลายเพื่อแก้ปัญหาการชนกันสำหรับระบบ RFID ตัวอย่างอัลกอริทึมในกลุ่มนี้ที่ถูกนำเสนอ [5]-[7] เช่น ALOHA, Slotted ALOHA, Frame Slotted ALOHA (FSA) และ Dynamic Frame Slotted ALOHA (DFSA) อัลกอริทึมกลุ่มนี้อาจจะเกิดปัญหาที่มีบางแท็กไม่สามารถติดต่อกับ

เครื่องอ่านได้เลยซึ่งปัญหาเหล่านี้จะเพิ่มมากขึ้นตามจำนวนแท็กที่มากขึ้น ส่วนอีกกลุ่มหนึ่งคือ อัลกอริทึม Tree-based จะกำหนดค่าความน่าจะเป็นตายตัว (Deterministic anti-collision algorithms) โดยการประยุกต์ใช้หลักความเป็นคู่และความแน่นอน (Duality and certainty principle) เพื่อแก้ปัญหาการชนกันของแท็กโดยการแบ่งแยกแท็กที่เกิดการชนกันออกเป็นกลุ่มย่อยต่อเนื่องกันไปเรื่อยๆ จนกระทั่งแท็กทุกตัวได้รับการระบุตัวตนสำเร็จ ซึ่งถือเป็นข้อดีเมื่อเทียบกับอัลกอริทึม ALOHA-based ส่วนข้อด้อยคือมีการคำนวณที่ซับซ้อนและใช้เวลาประมวลผลนานกว่า โดยเฉพาะอย่างยิ่ง เมื่อมีแท็กจำนวนมากอยู่ในรัศมีการสื่อสารของเครื่องอ่าน ตัวอย่างอัลกอริทึมในกลุ่มนี้ [8]-[11] เช่น Binary Tree (BT), Modified Binary Tree (MBT), Query Tree (QT) และ Optimal Query Tracking Tree (OQTT)

2.1 Slotted ALOHA (SA)

อัลกอริทึม SA เป็นอัลกอริทึมแรกที่ได้รับการพัฒนาต่อจาก ALOHA โดยจะให้ค่าวิสัยสามารถ (Throughput) เพิ่มขึ้นจากเดิม 2 เท่า ในระบบ RFID เมื่อพิจารณาว่ามีเครื่องอ่านหนึ่งเครื่องและมีแท็กจำนวนหนึ่งอยู่ในรัศมีการส่งสัญญาณระหว่างกันโดยใช้ช่องสัญญาณสื่อสารร่วมกัน ซึ่งถูกจัดสรรเวลาเป็นไทม์สล็อต (Timeslot) ที่มีขนาดเล็กๆ จำนวนหนึ่ง โดยอนุญาตให้แท็กสามารถส่งแท็กเกิดข้อมูลได้ที่ตำแหน่งเริ่มของแต่ละสล็อตเท่านั้น (ซึ่งเดิมระบบ ALOHA จะอนุญาตให้แท็กส่งแท็กเกิดของตนได้ทันที ส่งผลให้เกิดการชนบ่อยครั้งเพราะในระหว่างส่งแท็กเกิดของแท็กแต่ละตัวหากมีการส่งซ้อนเหลื่อมกันแม้เพียงเล็กน้อย เครื่องอ่านก็จะพิจารณาว่าเกิดการชนกันทันที) ในขณะที่เครื่องอ่านจะทำหน้าที่ควบคุมจำนวนสล็อตและจัดสรรช่องทางการสื่อสารกับแท็กในช่วงเวลาที่จำกัดของแต่ละสล็อต หลังจากเครื่องอ่านส่งคำสั่งกระจายออกไป เมื่อไหร่ก็ตามที่แท็กได้รับสัญญาณนี้จะส่งหมายเลขประจำตัวของตนเองออกไปที่ตำแหน่งเริ่มต้นของสล็อต ถ้ามีเพียงแคแท็กเดียวตอบสนอง เครื่องอ่านก็จะสามารถระบุตัวตนของแท็กนั้นได้สำเร็จ (Success) แต่หาก

มีแท็กตั้งแต่ 2 ตัวขึ้นไปส่งสัญญาณออกมาพร้อมกันจะเกิดการชนกันขึ้น (Collision) ส่งผลให้เครื่องอ่านไม่สามารถระบุตัวตนของแท็กใดได้เลย ดังนั้นแท็กที่เกิดการชนกันทั้งหมดจะต้องเริ่มต้นติดต่อกับเครื่องอ่านซ้ำไปเรื่อยๆ ซึ่งจะต้องใช้พลังงานและเวลาประวิงในการประมวลผลมากขึ้น ปัญหานี้จะรุนแรงมากขึ้น เมื่อมีจำนวนแท็กมากขึ้น นอกจากนั้นแล้ว ในกรณีที่ไม่มีแท็กใดเลยส่งสัญญาณกลับมาที่เครื่องอ่านจะเกิดสล็อตว่าง (Idle) ซึ่งจะเป็นการเสียโอกาสในการส่งข้อมูล

2.2 Frame Slotted ALOHA (FSA)

ข้อบกพร่องหลักของอัลกอริทึม SA คือประสิทธิภาพการทำงานจะลดลงมาก เมื่อจำนวนแท็กในระบบเพิ่มขึ้น โอกาสในการชนกันก็จะมากขึ้นตามไปด้วย อัลกอริทึม Frame Slotted ALOHA (FSA) จึงถูกนำเสนอเพื่อเอาชนะปัญหานี้ โดยกำหนดให้แท็กแต่ละตัวจะได้รับอนุญาตให้ส่งข้อมูลได้เพียงครั้งเดียวเท่านั้นในแต่ละเฟรม [6] (ในหนึ่งเฟรมประกอบด้วยสล็อตจำนวนหนึ่งซึ่งมีจำนวนคงที่) เพื่อลดโอกาสในการชนลง จึงสามารถเพิ่มค่าวิสัยสามารถ (Throughput) ของระบบได้

จากรูปที่ 3 แสดงขั้นตอนการทำงานของอัลกอริทึม FSA ในหนึ่งเฟรมมี 3 สล็อต ในขณะที่มีแท็กที่เกิดการชนกันเริ่มต้นคือ A, B, ..., E เมื่อพิจารณาเฟรมแรกจะมีเพียงแท็ก C เท่านั้นที่ส่งสำเร็จ แท็กที่เหลือทั้งหมดจะสุ่มเลือกสล็อตอีกครั้งในเฟรมถัดไป ซึ่งมีแท็กที่ส่งแพ็กเก็ตสำเร็จคือ E ในขณะที่แท็ก A, B และ D ยังคงชนกันอยู่ จากนั้นแท็กที่เหลืออยู่จะดำเนินตามขั้นตอนเช่นนี้วนซ้ำไปเรื่อยๆ จนกระทั่งถึงเฟรมที่ 4 แท็กทุกตัวสามารถส่งแพ็กเก็ตได้สำเร็จ จากตัวอย่างนี้จะเห็นว่าในขั้นตอนการแก้ปัญหาการชนกันของแท็กทั้งหมดนี้ระบบจะต้องใช้เวลาไปทั้งหมดเท่ากับ 12 สล็อต ในจำนวนนี้จะเกิดสล็อตว่างสะสมรวมเท่ากับ 3 สล็อต

Frame#	1			2			3			4		
Slot#	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
Tag#	A,D	B,E	C	A,B,D	E		A	B,D			D	B
A,B,C,D,E			A,B,D,E			A,B,D			B,D			สิ้นสุด

รูปที่ 3 ตัวอย่างการทำงานของอัลกอริทึม FSA

2.3 Dynamic Frame Slotted ALOHA (DFSA)

ข้อเสียเปรียบที่หลักของอัลกอริทึม FSA คือโดยทั่วไปเครื่องอ่านจะไม่ทราบจำนวนแท็ก เนื่องจากทุกเฟรมจะมีความยาวเท่ากันหรือมีจำนวนสล็อตในแต่ละเฟรมคงที่ ดังนั้นจึงเกิดปัญหาที่สำคัญ 2 เหตุการณ์คือ 1. เมื่อจำนวนสล็อตในแต่ละเฟรมน้อยกว่าจำนวนแท็กที่มีอยู่มาก ดังนั้นอาจเกิดการชนกันในหลายสล็อตของเฟรม ส่งผลให้เครื่องอ่านไม่สามารถระบุตัวตนได้เป็นระยะเวลานาน และ 2. เมื่อจำนวนสล็อตของเฟรมมีค่ามากกว่าจำนวนแท็กที่มีอยู่จะเกิดสล็อตว่างจำนวนมาก ด้วยเหตุนี้จึงได้มีนักวิจัยนำเสนออัลกอริทึม Dynamic Frame Slotted ALOHA (DFSA) เพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว โดยประเด็นหลักที่นำเสนอคือความยาวของเฟรมจะเปลี่ยนแปลงไปตามจำนวนแท็ก ร่วมกับใช้วิธีการประมาณจำนวนแท็กซึ่งมีความสำคัญอย่างมาก แต่วิธีการประมาณจำนวนแท็กไม่มีอัลกอริทึมที่กำหนดเป็นมาตรฐาน

จากรูปที่ 4 เมื่อใช้อัลกอริทึม DFSA ในการแก้ปัญหาการชน เมื่อมีแท็ก A, B, ..., E ในเฟรมแรกจะใช้ขนาด 5 สล็อต ซึ่งเท่ากับจำนวนแท็กที่เกิดการชนกัน โดยเหลืออีก 2 แท็กที่ยังส่งไม่สำเร็จ จากนั้นในเฟรมที่ 2 จะใช้เฟรมขนาด 2 สล็อต แต่ไม่ยังคงส่งไม่สำเร็จเช่นเดิม ดังนั้นในเฟรมที่ 3 จะใช้เฟรมขนาด 2 สล็อต เช่นเดิมและส่งได้สำเร็จในที่สุด โดยใช้เวลาไปทั้งหมดเท่ากับ 9 สล็อต และในจำนวนนี้จะเกิดสล็อตว่างสะสมเท่ากับ 2 สล็อต ซึ่งใช้จำนวนสล็อตในการแก้ปัญหการชนน้อยกว่าตัวอย่างในรูปที่ 3 เมื่อพิจารณาจำนวนแท็กที่เกิดการชนเริ่มต้นเท่ากับ

Frame#	1					2		3	
Slot#	1	2	3	4	5	1	2	1	2
Tag#		E	C	B,D	A	B,D		B	D
A,B,C,D,E					B,D		B,D		สิ้นสุด

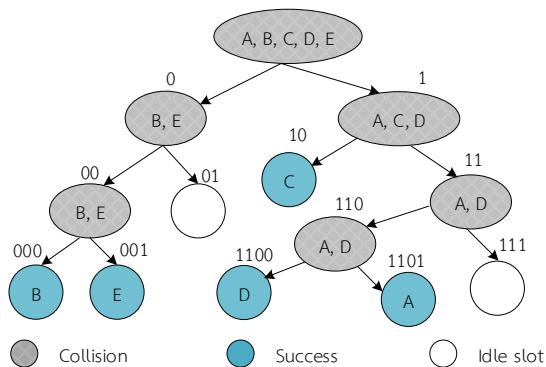
รูปที่ 4 ตัวอย่างการทำงานของอัลกอริทึม DFSA

2.4 Binary tree algorithm (BTA)

ตามหลักการพื้นฐานของอัลกอริทึมต้นไม้ หลังจากที่เกิดการชนกันของแท็กขึ้นจะเข้าสู่กระบวนการแก้ปัญหาการชน แท็กอื่นๆ ที่ไม่เกี่ยวข้องกับการชนจะต้องรอ

จนกระทั่งปัญหาการชนกันได้รับการแก้ไข เริ่มต้นจะแบ่งแท็กที่เกิดการชนทั้งหมดออกเป็น 2 กลุ่มคือ 0 และ 1 ซึ่งจะพิจารณาจากหมายเลขประจำตัวแท็กทีละบิต โดยกลุ่มบิต 0 จะได้รับการพิจารณาก่อนเสมอ ในขณะที่แท็กในกลุ่มบิต 1 จะต้องรอจนกระทั่งแท็กทุกตัวในกลุ่มบิต 0 สำเร็จ (มีเพียงแท็กเดียวที่ส่งข้อมูลในสล็อตนั้น) ทุกๆ ครั้งที่เกิดการชนกันจะแบ่งแยกแท็กออกเป็น 2 กลุ่มเช่นเดิมพร้อมกับพิจารณาบิตในลำดับถัดไป กระบวนการเช่นนี้จะวนซ้ำไปเรื่อยๆ จนกระทั่งแท็กทุกตัวได้รับการระบุตัวตนสำเร็จ

จากรูปที่ 5 แสดงตัวอย่างการทำงานของอัลกอริทึม BTA เมื่อมีแท็กที่เกิดการชนกันเริ่มต้นคือ A, B, ..., E โดยจะเริ่มแก้ปัญหาการชนในกลุ่มบิต 0 ทางซ้ายมือก่อนเสมอในแนวลึกลับซ้ายกับรากของต้นไม้ จนกระทั่งแท็กเหล่านั้นส่งแพ็กเก็ตได้สำเร็จ จากนั้นจึงแก้ปัญหาการชนต่อไปในกลุ่มบิต 1 จากรูปนี้จะใช้เวลาในการแก้ปัญหาการชนกันทั้งหมด 12 สล็อต โดยมีสล็อตว่างจำนวน 2 สล็อต สำหรับแท็กที่เกิดการชนกันจำนวน 5 แท็ก ซึ่งแสดงให้เห็นว่าจากหลักการแก้ปัญหาการชนกันของแท็กด้วยอัลกอริทึม Tree-based จะมีประสิทธิภาพสูงกว่าอัลกอริทึม ALOHA-based เนื่องจากวิธีการแบ่งแยกกลุ่มจะทำให้โอกาสในการชนกันของแท็กลดลงอย่างรวดเร็ว ในขณะที่อัลกอริทึม ALOHA-based จะนำแท็กที่เกิดการชนกันทั้งหมดไม่ว่าเกิดขึ้นที่ตำแหน่งในสล็อตใดของเฟรมก็ตามก็ต้องทำการสุ่มเลือกสล็อตเพื่อส่งแพ็กเก็ตในเฟรมถัดไปเสมอ จึงมีโอกาสเป็นไปได้สูงที่แท็กบางตัวอาจใช้เวลานานกว่าที่จะได้รับการระบุตัวตนสำเร็จ

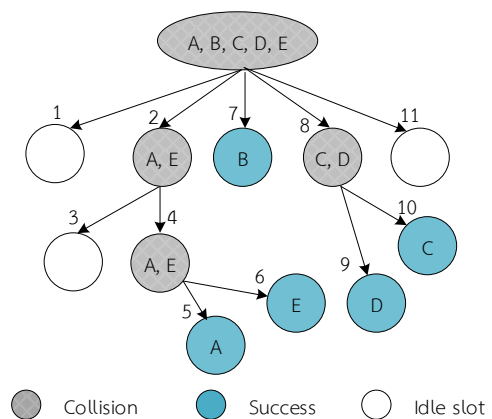


รูปที่ 5 ตัวอย่างการทำงานของอัลกอริทึม BTA

2.5 Adaptive Tree algorithm (ATA)

อัลกอริทึม Adaptive Tree algorithm (ATA) จะเป็นอัลกอริทึมที่ถูกพัฒนาให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นจาก Tree-based โดยทั่วไป โดยอาศัยแนวความคิดการปรับขนาดเฟรมเช่นในอัลกอริทึม ALOHA-based ดังนั้นจึงถือเป็นการเอาข้อดีของทั้งเทคนิคการแบ่งแยกกลุ่มและเทคนิคการปรับขนาดของเฟรมได้เอง ส่งผลให้ใช้เวลาในการระบุตัวตนน้อยลงในขณะที่จำนวนสล็อตก็มีความเหมาะสมกับจำนวนแท็กที่เหลืออยู่ในขณะนั้นด้วย ซึ่งขั้นตอนการแก้ปัญหาการชนโดยใช้เทคนิคเช่นนี้จะต้องอาศัยอัลกอริทึมที่สามารถประมาณจำนวนแท็กได้อย่างถูกต้องและรวดเร็ว

จากรูปที่ 6 แสดงตัวอย่างการทำงานของอัลกอริทึม ATA เมื่อมีแท็กที่เกิดการชนกันเริ่มต้นจำนวน 5 แท็ก คือ A, B, ..., E และได้แสดงหมายเลขลำดับสล็อตที่ถูกใช้แก้ปัญหาการชนกันของแท็กเพื่อให้สามารถเปรียบเทียบและเข้าใจกลไกการทำงานได้ง่ายยิ่งขึ้น เริ่มต้นจากการแบ่งแยกออกเป็น 5 สล็อต ให้เท่ากับจำนวนแท็กที่มีอยู่ในรอบแรกนี้แท็ก B สามารถสุ่มเลือกสล็อตเพื่อส่งแพ็กเก็ตได้สำเร็จ ในขณะที่แท็ก A และ E ยังคงสุ่มเลือกได้สล็อตเดียวกัน จึงเกิดการชนกันขึ้นอีก ดังนั้นจึงต้องแบ่งแยกกลุ่มเพื่อแก้ปัญหาการชนต่อเนื่องไปเรื่อยๆ จนกระทั่งสำเร็จ ในขณะที่แท็ก C และ D เมื่อเกิดการชนก็จะต้องรอเวลาและดำเนินการเช่นเดียวกัน จากตัวอย่างนี้จะใช้เวลาในการแก้ปัญหาการชนกันของแท็กทั้งหมด 11 สล็อต และมีสล็อตว่าง 3 สล็อต ซึ่งดีกว่าอัลกอริทึม BTA



รูปที่ 6 ตัวอย่างการทำงานของอัลกอริทึม ATA

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

จากงานวิจัยในอดีต [5-11] มักนำเอาเทคนิคการปรับขนาดเฟรมเองได้ (Adaptive frame size) และเทคนิคการข้ามไม่ใช้งานสล็อต (Skipping slotted) มาใช้เพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของอัลกอริทึมให้สูงขึ้นทั้งในกลุ่ม ALOHA-based และ Tree-based ด้วยเหตุนี้เราจึงได้นำเสนอสมการคณิตศาสตร์เพื่อใช้วิเคราะห์สมรรถนะของอัลกอริทึมต่อต้านการชนกันของแท็กในระบบ RFID จำนวน 4 อัลกอริทึม ซึ่งประกอบด้วย 1. Adaptive Frame Slotted Aloha (AF-SA) 2. Adaptive Frame and Skipping Slotted Aloha (AFS-SA) 3. Tree algorithm with Adaptive Frame (TA-AF) และ 4. Tree algorithm with Adaptive Frame and Skipping Slotted (TA-AFSS) ภายใต้สมมติฐานว่าเครื่องอ่านสามารถประมาณจำนวนแท็กที่มีอยู่ในปัจจุบันได้ในระดับสล็อต เนื่องจากมีงานวิจัยจำนวนมากที่นำเสนอวิธีการประมาณจำนวนแท็กที่มีความแม่นยำ [12-16] โดยอาศัยการประมวลผลภายหลังการชนกันของแท็กที่ยังเครื่องอ่านเพื่อคำนวณหาจำนวนแท็กที่เหลืออยู่ในแต่ละเฟรมหรือในแต่ละสล็อต ดังนั้นอัลกอริทึมที่นำเสนอในงานวิจัยนี้จึงสามารถลดการใช้งานสล็อตลงได้อย่างชัดเจน และส่งผลให้แท็กได้รับการระบุตัวตนได้รวดเร็วยิ่งขึ้น

ในงานวิจัยนี้จะแสดงสมการคณิตศาสตร์สำหรับวิเคราะห์สมรรถนะของอัลกอริทึมที่นำเสนอในรูปแบบของจำนวนสล็อตโดยเฉลี่ยที่ต้องการใช้ระบุตัวตนของแท็กทั้งหมด N แท็ก (Average number of required slots, $\bar{L}_N$) ซึ่งค่านี้สามารถนำไปประเมินเวลาประวิงของระบบการใช้พลังงานในการสื่อสาร หรือปริมาณการใช้แบนด์วิดท์ของช่องสัญญาณ สำหรับแท็กที่เกิดการชนกันทั้งหมดจำนวน N แท็ก (โดยที่ $N \geq 2$) และในหนึ่งเฟรมจะมีจำนวน M สล็อต เนื่องจากเรานำเสนออัลกอริทึมที่ปรับขนาดเฟรมของได้มาใช้เป็นเทคนิคพื้นฐาน ดังนั้นจึงต้องกำหนดให้จำนวนสล็อตในแต่ละเฟรมเท่ากับจำนวนแท็ก ($M = N$) ที่เกิดการชนกันทั้งหมด โดยมีรายละเอียดดังนี้

3.1 Adaptive Frame Slotted Aloha (AF-SA)

อัลกอริทึม AF-SA จะใช้หลักการเช่นเดียวกับงานวิจัยอื่นๆ ที่ได้นำเสนอแล้วคือการปรับขนาดเฟรมตามจำนวนแท็กที่เกิดการชนกัน โดยเครื่องอ่านจะสามารถทราบจำนวนแท็กที่เหลืออยู่หลังจากประมวลผลเมื่อสิ้นสุดในแต่ละเฟรมโดยไม่สนใจว่าจะเกิดการชนกันที่สล็อตใด ดังนั้นก่อนเริ่มต้นการแก้ปัญหาการชนกันของแท็กในแต่ละเฟรมเครื่องอ่านจะกำหนดจำนวนสล็อตในแต่ละเฟรมให้มีค่าเท่ากับจำนวนแท็กที่เกิดการชนกันคงเหลืออยู่ในปัจจุบันจนกระทั่งแท็กทุกตัวได้รับการระบุตัวตนสำเร็จ โดยขั้นตอนแก้ปัญหาการชนกันของอัลกอริทึม AF-SA จะเหมือนกับอัลกอริทึม DFSA โดยสามารถพิจารณาได้จากรูปที่ 4 ดังนั้นจะสามารถแสดงสมการคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณหาจำนวนสล็อตโดยเฉลี่ยที่ต้องการใช้ระบุตัวตนของแท็กทั้งหมด N แท็กได้เป็น

$$\bar{L}_N = N + p_c \bar{L}_c \quad (1)$$

สำหรับกรณีที่ไม่เกิดการชนกันของแท็กเลยจะได้ว่า $\bar{L}_0 = 0$ และ p_c คือความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ที่แท็กเกิดการชนกันขึ้นทั้งหมดในแต่ละเฟรม โดยที่

$$p_c = \frac{(N-1)!}{N^{N-1}} \sum_{R_c}^N \left(\binom{N}{k_1, k_2, \dots, k_N} \frac{1}{\prod_{j=0}^N \left(\sum_{i=1}^N I(k_i = j) \right)!} \right) \quad (2)$$

R_c คือรูปแบบของการสุ่มเลือกในแต่ละสล็อตเฉพาะกรณีที่เกิดการชนกันที่เป็นไปได้ทั้งหมด สามารถเขียนเงื่อนไขแทนด้วยสมการ (3)

$$R_c = \{k_1, k_2, \dots, k_N \mid \sum_{i=1, k_i > 1}^N k_i = c\} \quad (3)$$

จากสมการ (2) เทอมของ $\sum_{k_1, k_2, \dots, k_N}^N (\cdot)$ คือผลรวมของการเลือกสล็อตของแท็กที่เป็นไปได้ทั้งหมดของ $k_1, k_2, \dots, k_N$

ซึ่งเป็นจำนวนแท็กที่สุ่มเลือกหมายเลขสล็อต 1,2,...,N ตามลำดับ เช่น ถ้าในหนึ่งเฟรมมีจำนวนสล็อตเท่ากับ 3 จะมีรูปแบบการเลือกสล็อตของแท็กที่แตกต่างกันทั้งหมด 3 รูปแบบคือ 1) $k_1=1, k_2=1, k_3=1$ 2) $k_1=2, k_2=1, k_3=0$ และ 3) $k_1=3, k_2=0, k_3=0$ โดยที่ $\sum_{i=1}^N k_i = N$ เมื่อ $N \geq 2$ และ $k_i \geq 0$ และค่าสัมประสิทธิ์ทวินาม (Multinomial coefficient) ในสมการ (2) มีค่าเท่ากับ

$$\binom{N}{k_1, k_2, \dots, k_N} = \frac{N!}{k_1! k_2! \dots k_N!} \quad (4)$$

ฟังก์ชันตัวบ่งชี้ (Indicator function) ในสมการ (2) คือ $I(k_i = j)$ จะให้ค่าเป็น 1 เมื่อเงื่อนไขเป็นจริง และจะให้ค่าเป็น 0 เมื่อเงื่อนไขเป็นเท็จ

3.2 Adaptive Frame and Skipping Slotted

Aloha (AFS-SA)

อัลกอริทึม AFS-SA ได้รับการพัฒนาต่อจากอัลกอริทึม AF-SA โดยการเพิ่มเทคนิคการข้ามสล็อต (Skipping slot) ร่วมกับเทคนิคการปรับขนาดเฟรมตัวเอง ซึ่งสามารถเกิดเหตุการณ์ข้ามไม่ใช้งานสล็อตได้ 2 รูปแบบดังแสดงในรูปที่ 7 โดยรูปที่ 7(ก) กรณีที่มีจำนวนแท็กตั้งแต่ 2 แท็กขึ้นยังไม่ได้สุ่มเลือกสล็อตใดเลย จนกระทั่งเหลือสล็อตสุดท้ายซึ่งจะเกิดการชนกันอย่างแน่นอน และรูปที่ 7(ข) แท็กทั้งหมดได้สุ่มเลือกสล็อตไปในช่วงแรกแล้ว และยังเหลือสล็อตอีกจำนวนหนึ่งที่ไม่ถูกใช้งานแน่นอน จึงสามารถลดการใช้สล็อตเหล่านี้ได้

เราจะสามารถแสดงสมการคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณหาจำนวนสล็อตโดยเฉลี่ยที่ต้องการใช้ระบุตัวตนของแท็กทั้งหมด N แท็กได้เป็น

$$\bar{L}_N = N + p_c \bar{L}_c - p_{skip} \bar{L}_{skip} \quad (5)$$

เมื่อ $\bar{L}_c$ คือจำนวนสล็อตโดยเฉลี่ยที่ต้องการใช้ระบุตัวตนของแท็กในกรณีที่แท็กเกิดการชนกัน $\bar{L}_{skip}$ คือจำนวนสล็อตโดยเฉลี่ยที่ต้องการใช้ระบุตัวตนของแท็กใน

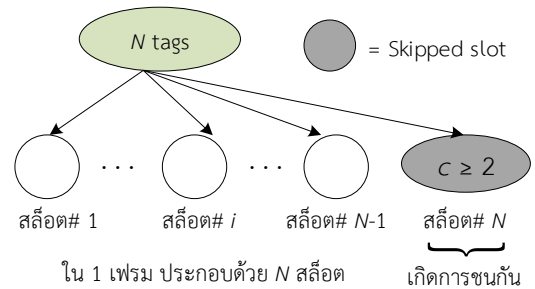
เหตุการณ์กรณีที่เกิดเหตุการณ์ข้ามไม่ใช้งานสล็อต และ p_{skip} คือความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ที่สามารถข้ามไม่ใช้งานสล็อตได้ซึ่งมี 2 รูปแบบดังแสดงในรูปที่ 7 โดยที่

$$p_{skip} = \frac{(N-1)!}{N^{N-1}} \sum_{R_{skip}}^N \left[\binom{N}{k_1, k_2, \dots, k_N} \frac{1}{\prod_{j=0}^N \left(\sum_{i=1}^N I(k_i = j) \right)!} \right] \quad (6)$$

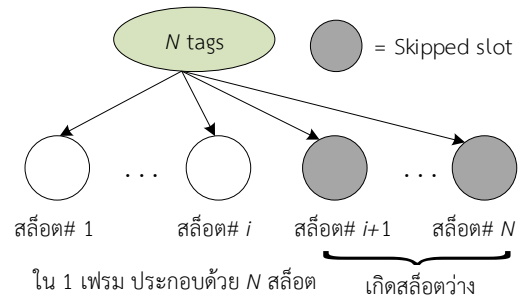
R_{skip} คือรูปแบบที่เป็นไปได้ทั้งหมดของการสุ่มเลือกในแต่ละสล็อตที่สามารถข้ามสล็อตไม่ใช้งานสล็อตได้ สามารถเขียนแทนด้วยสมการ (7)

$$R_{skip} = \{k_1, \dots, k_i, \dots, k_N \mid \begin{cases} k_N \geq 0 \text{ or} \\ k_{i+1} = k_{i+2} = \dots = k_N = 0 \end{cases} \quad (7)$$

สำหรับ p_c และ R_c ยังคงสามารถคำนวณได้จากสมการ (2) และ (3) ตามลำดับเช่นเดิม



(ก) รูปแบบที่ 1



(ข) รูปแบบที่ 2

รูปที่ 7 รูปแบบเหตุการณ์การข้ามไม่ใช้งานสล็อต

3.3 Tree algorithm with Adaptive Frame (TA-AF)

เหตุผลที่สำคัญที่ทำให้สมรรถนะของอัลกอริทึมต้นไม้คือการกำหนดให้ขนาดของเฟรมมีค่าคงที่ (Fixed frame size, Q) และอยู่ในรูปกำลังสอง (ตามการเข้ารหัสแมนเชสเตอร์ที่เป็นเลขไบนารี) เช่น $Q = 2, 4, 8, \dots$ ถึงแม้จะมีนักวิจัยนำเสนอว่าควรกำหนด Q มีค่าคงที่เป็นเท่าใดเพื่อให้ได้สมรรถนะที่ต่ำสุดตลอดเวลา แต่เนื่องจากจำนวนแท็กที่เกิดการชนกันเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอทุกครั้งที่ผ่านการแก้ปัญหาการชนกันกระทั่งแท็กทุกตัวได้รับการระบุตัวตนสำเร็จจึงเกิดแนวความคิดการปรับขนาดเฟรมได้ตามจำนวนแท็กที่มีอยู่ในปัจจุบันโดยอาศัยอัลกอริทึมที่สามารถประมาณจำนวนแท็กได้อย่างแม่นยำในทุกๆ สล็อต เราจึงได้นำเสนออัลกอริทึม TA-AF ซึ่งมีความแตกต่างจากอัลกอริทึมอื่นที่เคยเสนอมามากตรงที่การกำหนดขนาดของเฟรมที่ไม่อยู่ในรูปของเลขจำนวนเต็มยกกำลังสอง เพราะหากแท็กสุ่มเลือกสล็อตได้สำเร็จแล้วจึงอ่านหมายเลขประจำตัวแท็กต่อเนื่องกันไป การทำเช่นนี้จะช่วยลดโอกาสการเกิดสล็อตว่างได้เพิ่มขึ้น ในขณะที่หลักการแก้ปัญหาการชนในแนวลึกของกลุ่มทางซ้ายมือก่อน จากนั้นค่อยแก้ปัญหาการชนในกลุ่มขวามือต่อเนื่องกันไปเรื่อยๆ ซึ่งจะระจนกระทั่งแท็กในกลุ่มซ้ายมือได้รับการระบุตัวตนสำเร็จทั้งหมดก่อน

เราจะสามารถแสดงสมการคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณหาจำนวนสล็อตโดยเฉลี่ยที่ต้องการใช้ระบุตัวตนของแท็กทั้งหมดได้เป็น

$$\bar{L}_N = \frac{1}{(1 - N^{1-N})} \left[N + \sum_{c=2}^{N-1} \binom{N}{c} \frac{(N-1)^{N-c}}{N^{N-1}} \bar{L}_c \right] \quad (8)$$

จากสมการ (8) จะอยู่ในรูปของสมการรีเคอร์ซีฟ (Recursive equation) เนื่องจากต้องมีการคำนวณแบบวนซ้ำเพื่อหาค่า $\bar{L}_c$ ซึ่งเราไม่สามารถหาค่า $\bar{L}_N$ ใดๆ ได้โดยตรง ดังนั้นนอกจากนั้นเรายังสังเกตได้ว่ามีความแตกต่างกันกับสมการ (1) ซึ่งแท็กทั้งหมดที่เกิดการชนกันไม่ว่าตำแหน่งสล็อตใดจะนำไปแก้ปัญหาในเฟรมถัดๆ ไปเสมอ แต่ใน

สมการ (8) จะพิจารณาจำนวนแท็กที่เกิดการชนกันในระดับสล็อตเพื่อแก้ปัญหาการชนกันจนกระทั่งสำเร็จ

3.4 Tree algorithm with Adaptive Frame and Skipping Slotted (TA-AFSS)

ในการทำงานเดียวกัน อัลกอริทึม TA-AFSS ก็ได้รับการพัฒนาต่อจากอัลกอริทึม TA-AF โดยการเพิ่มเทคนิคการข้ามไม่ใช้งานสล็อตเข้าไปพร้อมกับเทคนิคการปรับขนาดเฟรมได้เอง โดยการเกิดเหตุการณ์ข้ามไม่ใช้งานสล็อตสามารถพิจารณาได้จากอัลกอริทึม AFS-SA ในหัวข้อ 3.2 และรูปที่ 7 ดังนั้นเราจะสามารถแสดงสมการคณิตศาสตร์เพื่อคำนวณหาจำนวนสล็อตโดยเฉลี่ยที่ต้องการใช้ระบุตัวตนของแท็กทั้งหมดได้เป็น

$$\bar{L}_N = \frac{1}{(1 - N^{1-N})} \left[N + \sum_{c=2}^{N-1} \binom{N}{c} \frac{(N-1)^{N-c}}{N^{N-1}} \bar{L}_c - p_{skip} \bar{L}_{skip} \right] \quad (9)$$

เมื่อ $\bar{L}_{skip}$ คือจำนวนสล็อตโดยเฉลี่ยที่ต้องการใช้ระบุตัวตนของแท็กในเหตุการณ์กรณีที่เกิดเหตุการณ์ข้ามไม่ใช้งานสล็อต และ p_{skip} คือความน่าจะเป็นของเหตุการณ์ที่สามารถข้ามไม่ใช้งานสล็อตได้ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ (6)

3.5 การวัดประสิทธิภาพการทำงานของอัลกอริทึม

นอกจากการประเมินความสามารถในการทำงานของอัลกอริทึมที่นำเสนอจากจำนวนสล็อตโดยเฉลี่ยที่ต้องการใช้ระบุตัวตนของแท็กที่สามารถลดจำนวนการใช้สล็อตในการแก้ปัญหาการชนกันของแท็กเมื่อพิจารณาที่จำนวนแท็กค่าหนึ่งแล้ว เรายังสามารถประเมินประสิทธิภาพ (Efficiency) การทำงานของอัลกอริทึมได้ในอีกมุมมองหนึ่ง ด้วยการนอร์มอลไลซ์ค่าจำนวนแท็กด้วยนวนการใช้สล็อตในการแก้ปัญหาการชนกันของแท็กซึ่งจะเห็นความสามารถของอัลกอริทึมในภาพรวมทั้งหมด โดยสามารถเขียนอยู่ในรูปสมการคณิตศาสตร์ได้เป็น

$$Efficiency = \frac{N}{\bar{L}_N} \quad (10)$$

4. ผลการทดลอง

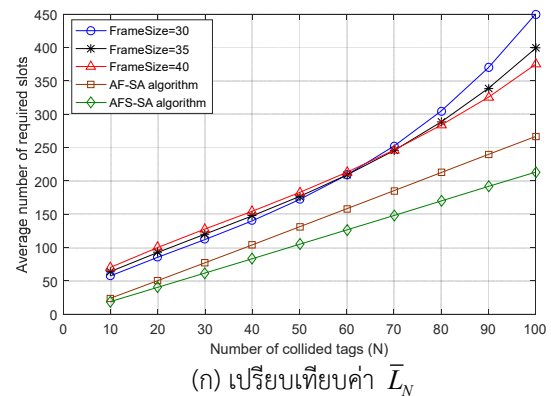
ในหัวข้อนี้จะแสดงผลการทดสอบสมรรถนะของอัลกอริทึมที่นำเสนอและเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมบางส่วนที่มีผู้ได้นำเสนอมาแล้ว โดยการเปรียบเทียบจำนวนการใช้สล็อตในการแก้ปัญหาการชนกันของแท็กและค่าประสิทธิภาพของอัลกอริทึม ในการทดลองเราจะกำหนดแกนนอนเป็นค่าจำนวนแท็กโดยเปลี่ยนค่าเป็น 10, 20, 30,..., 100 แท็ก ตามลำดับ

4.1 การทดสอบสมรรถนะของอัลกอริทึม AF-SA และ AFS-SA

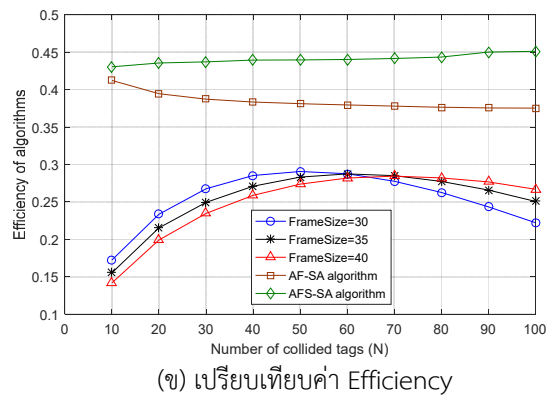
จากรูปที่ 8 จะแสดงผลการเปรียบเทียบค่า $\bar{L}_N$ ของอัลกอริทึมที่เรานำเสนอคือ AF-SA และ AFS-SA รวมถึงการเปรียบเทียบกับอัลกอริทึม FSA ที่มีผู้เสนอมาแล้ว ซึ่งประกอบด้วยกรณีที่กำหนดจำนวนสล็อตต่อเฟรมให้คงที่เป็น 30, 35 และ 40 จากรูป 8(ก) เช่นที่ค่า $N=100$ แท็ก เมื่อ Framesize เท่ากับ 30, 35 และ 40 สล็อตจะต้องใช้สล็อตเป็นจำนวนเฉลี่ยเท่ากับ 450, 400 และ 375 สล็อต เมื่อพิจารณาจะเห็นว่าอัลกอริทึม FSA จะใช้จำนวนสล็อตในการแก้ปัญหาการชนมากกว่าอัลกอริทึมที่เราได้นำเสนอซึ่งมีค่าเท่ากับ 266 และ 213 ตามลำดับ เนื่องจากอัลกอริทึมสามารถปรับขนาดเฟรมได้ตามจำนวนแท็กที่มีอยู่ในเวลานั้น เพราะจำนวนสล็อตต่อเฟรมสำหรับแก้ปัญหาการชนกันจะมีค่าเหมาะสมกับจำนวนแท็กเพียงค่าหนึ่งเท่านั้น ในขณะที่อัลกอริทึมที่นำเสนอคือ AFS-SA ซึ่งมีเทคนิคการข้ามไม่ใช้งานสล็อตจะดีกว่า AF-SA อย่างชัดเจน โดยเฉพาะเมื่อจำนวนแท็กในระบบมีจำนวนมากและจะต้องใช้จำนวนสล็อตในการแก้ปัญหามากขึ้น จึงเกิดเหตุการณ์ที่สามารถข้ามไม่ใช้งานสล็อตมากขึ้นด้วย

จากรูป 8(ข) จะแสดงผลการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพ (Efficiency) ซึ่งจะเห็นว่าอัลกอริทึม FSA จะให้ค่าประสิทธิภาพสูงขึ้นในช่วงแรกจนมีค่าสูงที่สุดและมีค่าลดลงตามจำนวนแท็กที่เพิ่มมากขึ้นตามลำดับ โดยค่าสูงที่สุดนี้อธิบายได้ว่าจำนวนสล็อตต่อเฟรมสำหรับแก้ปัญหาการชนกันจะมีค่าเหมาะสมกับจำนวนแท็กเพียงค่าหนึ่งเท่านั้น เช่นที่ Framesize=30 สล็อต จะให้ค่า

ประสิทธิภาพสูงสุดเป็น 0.29 เมื่อมีจำนวน $N=50$ แท็ก ส่วนอัลกอริทึมที่นำเสนอคือ AF-SA จะมีประสิทธิภาพลดลงเพียงเล็กน้อยต่อเนื่องไปตลอดตามจำนวนการเพิ่มขึ้นของแท็ก เหตุผลที่ประสิทธิภาพลดลงเนื่องจากการใช้จำนวนสล็อตเพื่อแก้ปัญหาการชนกันมากขึ้น ส่งผลให้เกิดสล็อตที่ไม่ได้งานจำนวนมากขึ้นตามไปด้วย ดังนั้นอัลกอริทึม AFS-SA จึงมีส่วนช่วยลดการใช้งานสล็อตได้จำนวนมาก ส่งผลให้ประสิทธิภาพสูงขึ้นตามจำนวนแท็กที่เพิ่มขึ้นดังรูปนั่นเอง



(ก) เปรียบเทียบค่า $\bar{L}_N$



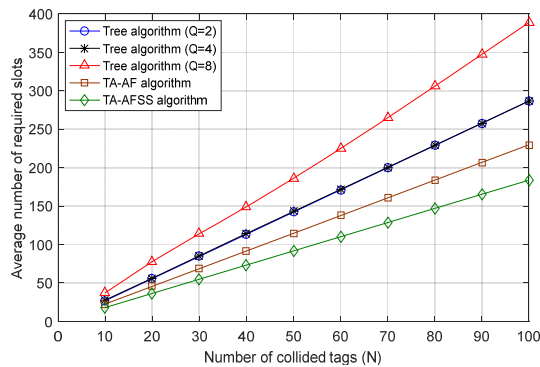
(ข) เปรียบเทียบค่า Efficiency

รูปที่ 8 สมรรถนะของอัลกอริทึม AF-SA และ AFS-SA

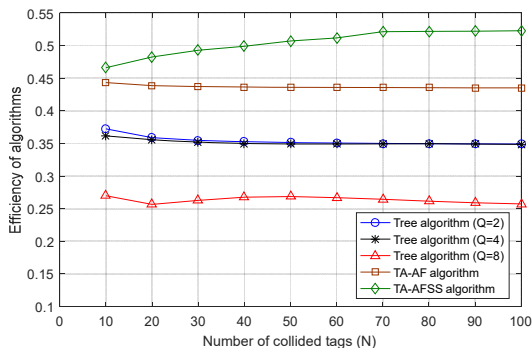
4.2 การทดสอบสมรรถนะของอัลกอริทึม TA-AF และ TA-AFSS

จากรูปที่ 9 จะแสดงผลการเปรียบเทียบค่า $\bar{L}_N$ ของอัลกอริทึมที่เรานำเสนอคือ TA-AF และ TA-AFSS รวมถึงการเปรียบเทียบกับอัลกอริทึม Tree algorithm ที่มีผู้เสนอมาแล้วซึ่งประกอบด้วยกรณีที่ Q-ary = 2, 4 และ

8 สล็อต ตามลำดับ เมื่อพิจารณาจากรูปที่ 9(ก) จะเห็นว่า กรณี Q -ary = 8 สล็อต จะใช้สล็อตเพื่อแก้ปัญหาการชนกันมากที่สุดเท่ากับ 389 สล็อต ที่ค่า $N=100$ แท้ก็ ในขณะที่ Q -ary = 2 และ 4 สล็อต มีค่าใกล้เคียงกันมากต้องการใช้สล็อตเป็นจำนวนโดยเฉลี่ยเท่ากับ 286 สล็อต โดยอัลกอริทึมที่นำเสนอคือ TA-AF และ TA-AFSS จะใช้จำนวนสล็อตน้อยลงเป็น 230 และ 184 สล็อต ตามลำดับ เนื่องจากเทคนิคการปรับขนาดเฟรมและเทคนิคการข้ามไม่ใช้งานสล็อต



(ก) การเปรียบเทียบค่า $\bar{L}_N$



(ข) การเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพ

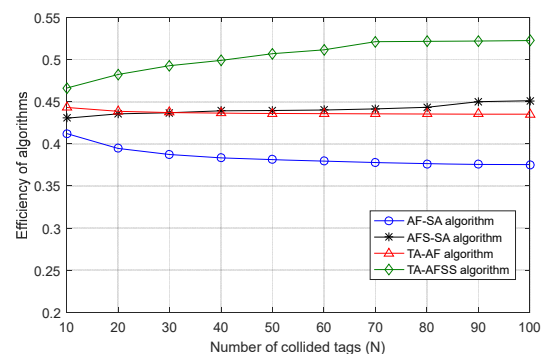
รูปที่ 9 สมรรถนะของอัลกอริทึม TA-AF และ TA-AFSS

จากรูปที่ 9(ข) จะแสดงผลการเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพ โดยภาพรวมจะเห็นว่าอัลกอริทึม TA-AF และ TA-AFSS จะให้ค่าประสิทธิภาพค่อนข้างคงที่ถึงแม้ว่าจำนวนแท็กจะเพิ่มมากขึ้น (ซึ่งแตกต่างจาก AFS-SA และ AFS-SA อย่างชัดเจน) และมีความสอดคล้องกับจำนวนการใช้สล็อตในรูปที่ 9(ก) โดยเรียงลำดับ

ประสิทธิภาพของอัลกอริทึมจากสูงสุดจนถึงต่ำสุดตามลำดับคือ TA-AFSS, TA-AF, $Q = 2, 4$ และ 8 โดยเมื่อพิจารณาที่ค่า $N=100$ แท้ก็ จะมีค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 0.52, 0.43, 0.35, 0.35 และ 0.26 ตามลำดับ

4.3 ประสิทธิภาพของอัลกอริทึมทั้งหมดที่นำเสนอ

จากรูปที่ 10 จะแสดงการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมทั้งหมดที่นำเสนอในงานวิจัย เมื่อพิจารณาจากรูปจะพบว่าในภาพรวมจะมีประสิทธิภาพเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยถึงแม้ว่าจะมีจำนวนแท็กในระบบเพิ่มมากขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นถึงข้อดีว่าอัลกอริทึมที่นำเสนอทั้งหมดนี้มีประสิทธิภาพในการแก้ปัญหาการชนได้ดีในทุกๆ สถานการณ์ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง อัลกอริทึม TA-AFSS ที่มีเทคนิคการข้ามไม่ใช้งานสล็อตจะช่วยลดจำนวนการใช้สล็อตได้จำนวนมากและมีผลต่อการเพิ่มประสิทธิภาพของระบบอย่างชัดเจน นอกจากนั้นผลลัพธ์นี้ยังแสดงให้เห็นว่าเทคนิคการข้ามไม่ใช้งานสล็อตสามารถช่วยอัลกอริทึม AFS-SA ให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นเทียบเท่ากับ TA-AF ได้ ในกรณีที่แท็กในระบบมีจำนวนมากๆ ทั้งนี้เมื่อพิจารณาที่ค่า $N=100$ แท้ก็ เมื่อเรียงลำดับประสิทธิภาพของอัลกอริทึมทั้งหมดจากสูงสุดจนถึงต่ำสุดตามลำดับคือ TA-AFSS, AFS-SA, TA-AF และ AF-SA จะมีค่าประสิทธิภาพเท่ากับ 0.52, 0.45, 0.43 และ 0.37 ตามลำดับ



รูปที่ 10 ประสิทธิภาพของอัลกอริทึมที่นำเสนอทั้งหมด

5. สรุป

งานวิจัยฉบับนี้นำเสนอการวิเคราะห์สมรรถนะของอัลกอริทึมต่อต้านการชนกันสำหรับระบบอาร์เอฟไอดีซึ่ง

ประกอบด้วยอัลกอริทึม AF-SA, AFS-SA, TA-AF และ TA-AFSS โดยอาศัยเทคนิคการปรับขนาดเฟรมได้เองและเทคนิคการข้ามไม่ใช้งานสล็อต เราได้นำเสนอสมการคณิตศาสตร์เพื่อประเมินประสิทธิภาพการทำงานของอัลกอริทึมโดยพิจารณาจากจำนวนสล็อตโดยเฉลี่ยที่ต้องการใช้ระบุตัวตนของแท็กทั้งหมดและค่าประสิทธิภาพการทำงานของอัลกอริทึม

จากผลการทดสอบพบว่าอัลกอริทึมทั้งหมดที่นำเสนอภาพรวมจะมีประสิทธิภาพเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยถึงแม้ว่าจะมีจำนวนแท็กในระบบเพิ่มมากขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นถึงข้อดีว่าอัลกอริทึมที่นำเสนอทั้งหมดนี้มีเสถียรภาพในการแก้ปัญหาการชนได้ดีในทุกๆ สถานการณ์ โดยอัลกอริทึม TA-AFSS มีประสิทธิภาพสูงสุด ในขณะที่ประสิทธิภาพของอัลกอริทึม TA-AF มากกว่า AFS-SA เล็กน้อยเมื่อมีแท็กที่เกิดการชนในระบบจำนวนมากๆ ส่วนอัลกอริทึม AF-SA มีประสิทธิภาพต่ำที่สุด นอกจากนั้นยังสรุปได้ว่าเทคนิคการข้ามไม่ใช้งานสล็อตส่งผลให้ประสิทธิภาพของระบบสูงขึ้นมากกว่าเทคนิคปรับขนาดเฟรมได้เอง

6. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ได้สนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยและพัฒนาสัญญาเลขที่ วจพ. 6/2560

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Finkenzeller, *RFID Handbook: Fundamental and applications in contactless smart cards and radio frequency identification, near-field communication*. The 3rd Edition, John Wiley and Sons, 2010.
- [2] D. K. Klair, K. W. Chin, R. Raad, "A survey and tutorial of rfid anti-collision protocols," *IEEE Commu. Surveys & Tutorial*, vol. 12, no. 3, pp. 400-421, 2010.
- [3] D. H. Shih, P. L. Sun, D. C. Yen, and S. M. Huang, "Taxonomy and survey of rfid anti-collision protocols: short survey," *Computer Commu.*, vol. 29, no. 11, 2006, pp. 2150–2166.
- [4] Z. Tang and Y. He, "Research of multi-access and anti-collision protocols in rfid systems," in *IEEE International Workshop on Anti-counterfeiting, Security, Identification*. Xiamen, China, 2007, pp. 377–380.
- [5] D. K. Klair, K.-W. Chin, and R. Raad, "An investigation into the energy efficiency of pure and slotted Aloha based rfid anti-collision protocols," in *IEEE WoWMoM*, Helsinki, Finland, 2007.
- [6] H. Wu and Y. Zeng, "Efficient framed slotted aloha protocol for rfid tag anticollision," *IEEE Trans. Automation Science and Eng.*, vol. 8, no. 3, pp. 581-588, 2011.
- [7] C. F. Lin and F. Y. S. Lin, "Efficient estimation and collision-group-based anticollision algorithms for dynamic frame-slotted aloha in rfid networks," *IEEE Trans. Automation Sci. and Eng.*, vol. 7, no. 4, pp. 840–48, Oct. 2010.
- [8] H. Wu, Y. Zeng, J. Feng, and Y. Gu, "Binary tree slotted aloha for passive rfid tag anti-collision," *IEEE Trans. Parallel Distrib. Syst.*, vol. 1, pp. 19–31, 2013.
- [9] J. Shin, B. Jeon, and D. Yang, "Multiple rfid tags identification with M-ary query tree scheme," *IEEE Comm. Letters*, vol. 17, no. 3, 2013.
- [10] X. Jia, Q. Feng, and C. Ma, "An efficient anti-collision protocol for rfid tag identification," *IEEE Communication Letter*, vol. 14, no. 11, pp. 1014–1016, 2010.

- [11] J. H. Choi, D. Lee, and H. Lee, “Query tree-based reservation for efficient rfid tag anti-collision,” *IEEE Communication Letter*, vol. 11, no. 1, pp. 85–87, 2007.
- [12] J. B. Eom and T. J. Lee, “Accurate tag estimation for dynamic framed-slotted aloha in rfid systems,” *IEEE Communication Letter*, vol. 14, no. 1, pp. 60–62, 2010.
- [13] W.T. Chen, “An accurate tag estimate method for improving the performance of a rfid anti-collision algorithm based on dynamic frame length aloha,” *IEEE Trans. Automation Science and Eng.*, vol. 6, no. 1, pp. 9-15, 2009.
- [14] H. Wu and Y. Zeng, “Bayesian tag estimate and optimal frame length for anti-collision aloha rfid system,” *IEEE Trans. Automation Science and Eng.*, vol. 7, no. 4, pp. 963-969, 2010.
- [15] T. F. La Porta, G. Maselli, and C. Petrioli, “Anti-collision protocols for single-reader rfid systems: temporal analysis and optimization,” *IEEE Trans. Mobile Computing*, vol. 10, no. 2, pp. 267-279, 2011.
- [16] Y. C. Lai, L. Y. Hsiao, and B. S. Lin., “Optimal slot assignment for binary tracking tree protocol in rfid tag identification,” *IEEE/ACM Trans. on Networking*, vol. 23, no. 1, pp. 255–268, 2015.

การออกแบบและสร้างระบบไอโอทีสำหรับบ้านจำลองแบบอัจฉริยะที่ควบคุมด้วย ไมโครคอนโทรลเลอร์

The Design and Construction of Smart the IoT System for Modeling House Controlled by Microcontroller

นิติคม อริยพิมพ์ ชัยพร อัดโดดดร*

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยภาคตะวันออกเฉียงเหนือ

199/19 ถนนมิตรภาพ อำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น 40000

Nitikom Ariyapim Chaiporn Addoddorn*

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Northeastern University

199/19 Mittraphap Rd., Mueang District, KhonKaen 40000

*Corresponding author E-mail : chaiporn.add@neu.ac.th

(Received: August 2, 2021; Revised: December 8, 2021; Accepted: April 21, 2022)

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบและสร้างระบบไอโอทีสำหรับบ้านจำลองแบบอัจฉริยะที่ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งนำมาทำในรูปแบบการประยุกต์ใช้ระบบไอโอทีกับบ้านจำลองเพื่อศึกษาความเป็นไปได้ก่อนใช้งานกับบ้านจริง ทำให้บ้านธรรมดากลายเป็นบ้านอัจฉริยะ โดยการประยุกต์ใช้ระบบไอโอทีจะประกอบด้วย ESP8266 ใช้ในการรองรับการเชื่อมต่อเครือข่ายมาตรฐาน IEEE 802.11b/g/n ให้สามารถเชื่อมต่อกับเครือข่าย WiFi ได้เพื่อให้บอร์ดเชื่อมต่อกับอินเทอร์เน็ต และใช้ MQ-2 ในการตรวจวัดแก๊สและควัน ใช้ PIR HC-SR501 ในการตรวจจับความเคลื่อนไหว ใช้ตัวตรวจจับแสงในการตรวจสอบสถานะการทำงานของหลอดไฟ และควบคุมการเปิด-ปิดหลอดไฟด้วยสมาร์ทโฟน จากการทดสอบ พบว่า การตรวจจับแก๊สและควัน สามารถตรวจจับได้ระดับความเข้มข้นของแก๊สที่ช่วง 10 – 10,000 ppm แจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชันไลน์ การตรวจจับการเคลื่อนไหวโดยใช้โมดูล PIR HC-SR501 ในการตรวจจับการเคลื่อนไหวต่างๆ สามารถทำงานได้ปกติในระยะ 1-4 เมตร แจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชันไลน์ และการตรวจสอบสถานะการทำงานของหลอดไฟผ่านแอปพลิเคชัน Blynk ปรากฏว่าเซนเซอร์รับค่าได้ที่ 23 - 24 ที่ระยะ 30 เซนติเมตร และเซนเซอร์รับค่าได้ที่ 79 - 99 ที่ระยะ 20 เซนติเมตร ส่วนการเปิด-ปิดของหลอดไฟสั่งผ่านแอปพลิเคชัน Blynk ด้วยสมาร์ทโฟน สามารถทำงานเปิด-ปิดหลอดไฟได้ตามที่ต้องการ ทำให้ช่วยอำนวยความสะดวก ความสบาย และลดขั้นตอนบางอย่างในชีวิตประจำวันของเราได้เป็นอย่างมาก

คำสำคัญ: ระบบไอโอที บ้านจำลองแบบอัจฉริยะ ไมโครคอนโทรลเลอร์

Abstract

This paper presents the design and construction of smart the IoT system for modeling house controlled by microcontroller. This is done in the form of applying the IoT system to the modeling

house to study the feasibility before using it in the real house make an ordinary home into a smart home by the application of the IoT system will consist of ESP8266 used to support network connection standards IEEE 802.11b/g/n to be able to connect to a WiFi network so that the board can connect to the Internet and use MQ-2 in gas and smoke detection, use PIR HC-SR501 to detect motion, use a light detector to monitor the working status of the lamp and control the on-off lamp with a smartphone. From the test, it was found that the gas and smoke detection can detect gas concentrations in the range of 10 – 10,000 ppm notify via Line application, motion detection using the PIR module HC-SR501 to detect various movements can work normally within 1-4 meters notify via Line application and checking the operating status of the lamp via the Blynk application, it revealed that the sensor was rated at 23 to 24 at a distance of 30 cm and 79 to 99 at a distance of 20 cm, the on-off of the lamp via the Blynk application with a smartphone can turn on and off the lamp as needed. It makes greatly facilitates, comfort and reduces some of the steps in our daily lives.

Keywords: The IoT system, Smart modeling house, Microcontroller.

1. บทนำ

ปัจจุบันอินเทอร์เน็ตนับเป็นปัจจัยที่ 5 สำหรับคนในยุคปัจจุบันไปแล้ว จากเดิมการใช้คอมพิวเตอร์เพียงแค่รับ-ส่งอีเมลล์ ก้าวมาสู่โลกของ World Wide Web ที่ท่องไปได้ทุกทีในช่วงอดีตไม่กี่ปีมานี้แล้ว เทคโนโลยีมีความก้าวหน้าขึ้นเรื่อย ๆ คอมพิวเตอร์ก็ฉลาดขึ้นเรื่อย ๆ ล่าสุดมีเทคโนโลยีใหม่ที่เรียกว่าระบบไอโอที หรือ Internet of Things (IoT) หรือ อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง เป็นยุคที่นำทุกอย่างเชื่อมเข้าหากันหมดด้วยเครือข่าย อินเทอร์เน็ต อุปกรณ์เครื่องใช้ไฟฟ้าแทบทุกอย่างกลายเป็น Smart device อย่างสมบูรณ์แบบมนุษย์สามารถพูดคุยกับอุปกรณ์ และสิ่งต่างๆ นับล้านชิ้นผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ตได้ ไม่ว่าจะเป็นเครื่องจักรในโรงงาน รถยนต์ เครื่องใช้ภายในบ้าน และอื่นๆ อีกมากมาย ที่เข้ามาช่วยทำให้การใช้ชีวิตของคนเราเปลี่ยนไปในทิศทางที่ดีขึ้น สะดวกขึ้น และปลอดภัยยิ่งขึ้น ตัวอย่างการนำระบบไอโอทีไปใช้กับสรรพสิ่งแล้วเกิดประโยชน์ที่น่าสนใจ เช่น Smart Home เปลี่ยนบ้านธรรมดา ให้กลายเป็นบ้านอัจฉริยะ [1,2,3] นำนวัตกรรมที่ช่วยอำนวยความสะดวกสบายเข้ามาใช้ภายในบ้าน ระบบไอโอทีเป็น

เทคโนโลยีที่สามารถทำให้เครื่องใช้ไฟฟ้าในบ้านเราทำงานได้เองเพียงแค่เราสัมผัสเพียงปลายนิ้ว เช่น การสั่งให้เปิด-ปิดไฟ ในขณะที่เราไม่อยู่บ้าน การสั่งปรับอุณหภูมิเครื่องปรับอากาศ เช่น เมื่อตัววัดอุณหภูมิภายในห้องแจ้งว่าตอนนี้อุณหภูมิภายในห้องร้อนเกินไป สามารถสั่งให้เครื่องปรับอากาศเปิดทันทีภายในอุณหภูมิที่ต้องการ หรือสามารถสั่งให้เครื่องปรับอากาศทำงานรอไว้ในขณะที่ระหว่างทางการกลับบ้าน เพื่อที่ห้องจะได้เย็นคอยต้อนรับการกลับมาได้พอดี แจ้งเตือนเมื่อผู้มาหา แจ้งเตือนระบบน้ำ, ระบบไฟ แจ้งเตือนอันตรายต่าง ๆ เมื่อลิ้มปิดแก๊ส หรือน้ำล้นจากอ่างล้างจาน เป็นต้น

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดที่จะสร้างบ้านในรูปแบบจำลองเพื่อใช้ในการศึกษา และทำการทดสอบเกี่ยวกับระบบไอโอทีในการใช้งานเกี่ยวกับระบบแจ้งเตือนต่างๆ ผ่านโทรศัพท์มือถือ และควบคุมการเปิด-ปิดหลอดไฟผ่านโทรศัพท์มือถืออีกด้วย

2. ทฤษฎีและหลักการที่เกี่ยวข้อง

2.1 อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things)
อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง [4, 5] คือ การที่อุปกรณ์

อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ สามารถเชื่อมโยงหรือส่งข้อมูลถึงกัน ได้ด้วยอินเทอร์เน็ต โดยไม่ต้องป้อนข้อมูล การเชื่อมโยงนี้ ง่ายจนทำให้เราสามารถสั่งการควบคุมการใช้งานอุปกรณ์ อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ผ่านทางเครือข่ายอินเทอร์เน็ตได้ ไป จนถึงการเชื่อมโยงการใช้งานอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ ผ่านทางเครือข่ายอินเทอร์เน็ตเข้ากับการใช้งานอื่นๆ จน เกิดเป็นบรรดา Smart ต่างๆ ได้แก่ Smart Device, Smart Grid, Smart Home [6,7], Smart Network, Smart Intelligent Transportation, Smart farm [8]ทั้งหลายที่เราเคยได้ยินนั่นเอง ซึ่งแตกต่างจากในอดีตที่ อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เป็นเพียงสื่อกลางในการส่งและ แสดงข้อมูลเท่านั้น

2.2 ระบบ Network ที่เชื่อมต่อระหว่างอุปกรณ์

ในการเชื่อมต่ออุปกรณ์ต่างๆ เข้ากับเครือข่าย อินเทอร์เน็ต และสามารถสั่งงานที่เราต้องการได้นั้น จึง จำเป็นต้องมีนักพัฒนาด้านอิเล็กทรอนิกส์และระบบสั่ง การหรือโค้ดโปรแกรม เพื่อใช้สั่งการอุปกรณ์ต่างๆ เนื่องจากระบบไอโอทีที่มีพื้นฐานอยู่บนระบบฝังตัว หรือ สมองกลฝังตัว (Embedded System) คือ ระบบ ประมวลผลที่ใช้ชิปหรือไมโครโปรเซสเซอร์ที่ออกแบบมา โดยเฉพาะ เป็นระบบคอมพิวเตอร์ขนาดเล็กที่ฝังไว้ใน อุปกรณ์ เครื่องใช้ไฟฟ้า และเครื่องเล่นอิเล็กทรอนิกส์ ต่างๆ ซึ่งต้องมีอินเทอร์เน็ตเป็นโครงสร้างพื้นฐาน แต่ ส่วนประกอบหนึ่งที่มีความสำคัญก็คือระบบฝังตัว

ปัจจุบันมีอุปกรณ์มากมายถูกผลิตขึ้นมาเพื่อให้ นักพัฒนาสามารถนำไปใช้ต่อยอดสร้างชิ้นงานเชื่อมต่อเข้า กับระบบไอโอที โดยมีคุณสมบัติที่สามารถเชื่อมต่อระบบ เครือข่ายคอมพิวเตอร์ไร้สาย (Wireless LAN หรือ Wi-Fi) ได้ แบ่งออกเป็นกลุ่มๆ ดังนี้

กลุ่มที่ 1 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์สำหรับ ระบบไอโอที บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์กลุ่มนี้ ผู้ผลิต ออกแบบและสร้างขึ้นมาให้เราสามารถพัฒนาโปรแกรมลง ในไมโครคอนโทรลเลอร์บนบอร์ด ควบคุมอินพุตและ เอาต์พุตเชื่อมต่ออุปกรณ์เพื่อตรวจจับหรือแสดงผลได้ตาม ต้องการ พร้อมใส่อุปกรณ์ที่เชื่อมต่อเครือข่ายแบบไร้สาย

Wi-Fi มาบนบอร์ดไม่จำเป็นต้องต่อเพิ่มเติมเอง ยกตัวอย่างเช่น Electric Imps, Spark Core, Arduino Yun, Intel Edison, Wireless Router ต่างๆ

กลุ่มที่ 2 โมดูลสื่อสารไร้สายระบบไอโอที โมดูล บางตัวที่มีคุณสมบัติสามารถเป็นอุปกรณ์ ระบบไอโอทีได้ ยกตัวอย่างเช่น โมดูล ESP8266 ซึ่งราคาไม่สูง สามารถทา งานได้ในระดับหนึ่ง แม้ปัจจุบันยังมีอยู่ไม่มากและเข้าถึง ยาก แต่ในอนาคตอันใกล้คาดว่าจะมีโมดูลแบบนี้ออกมา อีกหลายตัวแน่นอน ซึ่ง ESP8266 สามารถทำงาน Standalone เนื่องจากภายในมีไมโครคอนโทรลเลอร์อยู่ (แต่ไม่สามารถโปรแกรมแบบทั่วไปได้) ต้องพัฒนา เฟิร์มแวร์ให้ทำงานตามความต้องการ กลุ่มนักพัฒนาที่ สนใจได้แบ่งปันข้อมูลดังกล่าวไว้ ผู้ใช้อาจดาวน์โหลด เฟิร์มแวร์ที่มีการทำงานตามที่เราต้องการมาติดตั้งใช้งาน

กลุ่มที่ 3 บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์และโมดูล สื่อสารไร้สาย ทำงานร่วมกันเป็นระบบไอโอที กลุ่มนี้เป็น การประยุกต์ใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ต่างๆ ที่เรา ค้นเคย ร่วมกับโมดูลสื่อสารไร้สายที่มีให้เลือกหลากหลาย ตามความต้องการ เขียนแอปพลิเคชันให้ทำงานในลักษณะ คล้ายกับกลุ่มที่ 1 เพียงแต่เราต้องจับคู่เชื่อมต่อบอร์ดกับ โมดูลต่างๆ เอง ยกตัวอย่างเช่น การใช้ Arduino ร่วมกับ Wi-Fi Shield หรือ UART Wi-Fi การใช้ Raspberry Pi กับ USB Wi-Fi Dongle เพียงเท่านี้ก็สามารถเชื่อมต่อกับ ระบบเครือข่ายได้

2.3 ไมโครคอนโทรลเลอร์ (NodeMCU)

NodeMCU คือ แพลตฟอร์มหนึ่งที่ใช้ช่วยในการสร้าง โปรเจกต์ระบบไอโอทีที่ประกอบไปด้วย Development Kit (ตัวบอร์ด) และ Firmware (Software บนบอร์ด) ที่ เป็น open source สามารถเขียนโปรแกรมด้วยภาษา Lau ได้ ทำให้ใช้งานได้ง่ายขึ้น มาพร้อมกับโมดูล WiFi (ESP8266) ซึ่งเป็นหัวใจสำคัญในการใช้เชื่อมต่อกับ อินเทอร์เน็ตนั่นเอง ตัวโมดูล ESP8266นั้นมีอยู่ด้วยกัน หลายรุ่นมาก ตั้งแต่เวอร์ชันแรกที่เป็น ESP-01 ไล่ไปเรื่อยๆจนปัจจุบันมีถึง ESP-12 แล้ว และที่ฝังอยู่ใน NodeMCU version แรกนั้นก็ เป็น ESP-12 แต่ใน

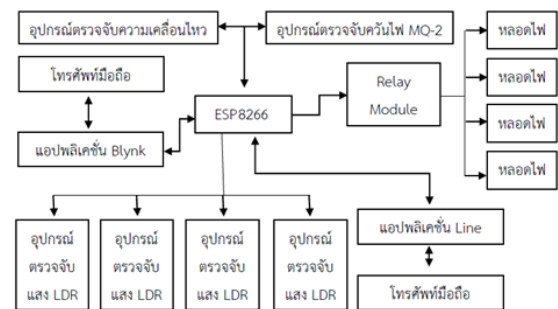
version2 นั้นจะใช้เป็น ESP-12E แทน ซึ่งการใช้งานโดยรวมก็ไม่แตกต่างกันมากนัก NodeMCU นั้นมีลักษณะคล้ายกับ Arduino ตรงที่มีพอร์ต Input Output built in มาในตัว สามารถเขียนโปรแกรมคอนโทรลอุปกรณ์ I/O ได้โดยไม่ต้องผ่านอุปกรณ์อื่นๆ และเมื่อไม่นานมานี้ก็มีนักพัฒนาที่สามารถทำให้ Arduino IDE ใช้งานร่วมกับ NodeMCU ได้ จึงทำให้ใช้ภาษา C/C++ ในการเขียนโปรแกรมได้ ทำให้เราสามารถใช้งานมันได้หลากหลายมากยิ่งขึ้น NodeMCU ตัวนี้สามารถทำอะไรได้หลายอย่างมากโดยเฉพาะเรื่องที่เกี่ยวข้องกับระบบไอโอทีไม่ว่าจะเป็นการทำ Web Server ขนาดเล็ก การควบคุมการเปิดปิดไฟผ่าน WiFi และอื่นๆอีกมากมาย

3. การออกแบบและสร้างระบบไอโอทีสำหรับบ้านจำลองแบบอัจฉริยะ

3.1 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของระบบ

การทำงานจะถูกแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 การตรวจสอบควันไฟและแก๊ส เมื่อตัวอุปกรณ์ตรวจจับควันไฟได้จะทำงานก็ต่อเมื่อได้ตรวจวัดควันในอากาศ เมื่อทำการตรวจวัดได้ก็จะประมวลผลไปยัง ESP8266 เพื่อส่งการแจ้งเตือนไปยังโทรศัพท์ผ่านแอปพลิเคชัน Line ส่วนที่ 2 การตรวจจับความเคลื่อนไหว PIRHC-SR501 จะส่งข้อมูลมายัง ESP8266 เพื่อแจ้งเตือนส่งข้อมูลไปยังโทรศัพท์มือถือผ่านแอปพลิเคชัน Line ส่วนที่ 3 การตรวจสอบสถานะการทำงานของหลอดไฟผ่านโทรศัพท์มือถือนั้นสามารถตรวจสอบได้โดยใช้ตัว LDR Sensor จะทำการเปลี่ยนความต้านทานไปตามปริมาณแสงที่ตกกระทบ ทำให้เกิดความนำไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป จากนั้นส่งข้อมูลไปยัง ESP8266 ทำงานโดยเมื่อมีแสงมาตกกระทบถ้าหากแสงมีปริมาณน้อยค่าที่ได้จะมีน้อยลงตามปริมาณแสงและถ้าหากแสงมีปริมาณมากจะมีค่ามากขึ้นตามปริมาณแสง สามารถตรวจสอบผ่านแอปพลิเคชัน Blynk ส่วนที่ 4 การควบคุมการเปิด-ปิดไฟภายในบ้านผ่านแอปพลิเคชัน Blynk เมื่อทำการเปิด-ปิดไฟผ่านโทรศัพท์มือถือ ก็จะประมวลผลไปยัง ESP8266 และจะ

สั่งงานให้รีเลย์ทำงาน ซึ่งรีเลย์ทำหน้าที่เป็นสวิตช์เมื่อสวิตช์ถูกสั่งทำงานแหล่งจ่ายก็จะจ่ายไฟเข้าวงจรก็จะทำให้คอมโพสิตติด ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 บล็อกไดอะแกรมการทำงานของระบบไอโอทีสำหรับบ้านจำลองแบบอัจฉริยะ

3.2 บ้านจำลอง

การออกแบบบ้านจำลอง 1 หลัง จำนวน 4 ห้อง ดำเนินการประยุกต์ใช้ระบบไอโอทีกับบ้านจำลอง ขนาดบ้านจำลอง กว้าง 60 เซนติเมตร ยาว 60 เซนติเมตร ดังแสดงในรูปที่ 2 และ 3



รูปที่ 2 ลักษณะของบ้านจำลอง



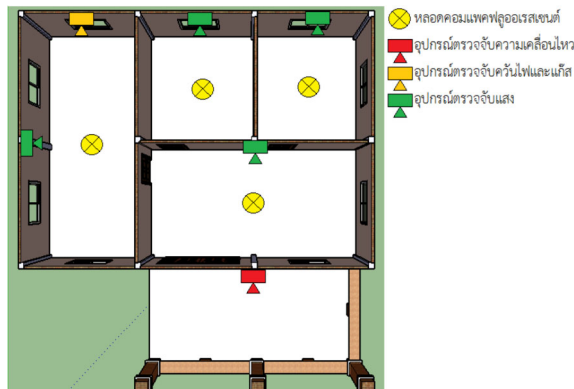
รูปที่ 3 ลักษณะของบ้านจำลองที่ถ่ายจากภาพจริง

3.3 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์

การออกแบบติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆมีดังนี้ อุปกรณ์ตรวจจับควันไฟและแก๊สอัตโนมัติ 1 จุด แจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชัน Line อุปกรณ์ตรวจจับความเคลื่อนไหวภายในบ้าน 1 จุด แจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชัน Line

ปีที่ 17 ฉบับที่ 1 เดือน มกราคม – เมษายน พ.ศ. 2565

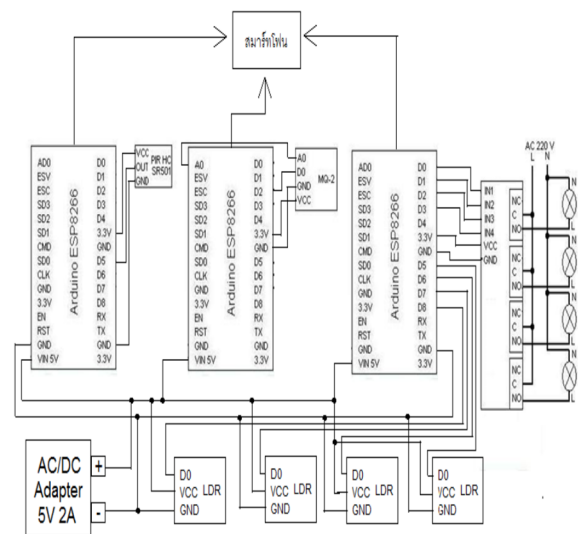
อุปกรณ์ตรวจจับระบบเปิด-ปิด หลอดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์ 4 หลอดผ่านแอปพลิเคชัน Blynk สามารถตรวจสอบสถานะการทำงานของโคมไฟได้ และอุปกรณ์ตรวจจับแสง ดังแสดงในรูปที่ 4

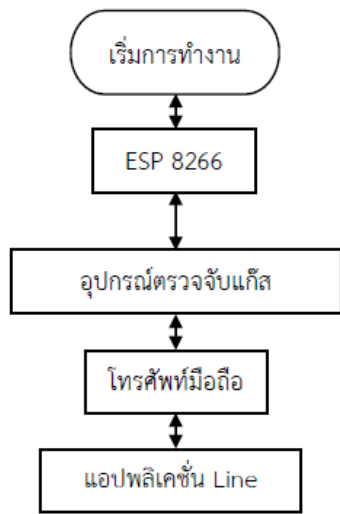


รูปที่ 4 ตำแหน่งการติดตั้งอุปกรณ์ในบ้านจำลอง

3.4 วงจรควบคุมการทำงาน

วงจรควบคุมการทำงานจะถูกแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 วงจรการตรวจสอบควันไฟและแก๊ส ตัวอุปกรณ์ตรวจจับควันไฟจะทำงานก็ต่อเมื่อได้ตรวจวัดควันในอากาศ เมื่อทำการตรวจวัดได้ก็จะประมวลผลไปยัง ESP8266 เพื่อส่งการแจ้งเตือนไปยังโทรศัพท์ผ่านแอปพลิเคชัน Line ส่วนที่ 2 วงจรอุปกรณ์ตรวจจับความเคลื่อนไหว PIRHC-SR501 จะส่งข้อมูลมายัง ESP8266 เพื่อแจ้งเตือนส่งข้อมูลไปยังโทรศัพท์มือถือผ่านแอปพลิเคชัน Line ส่วนที่ 3 วงจรการตรวจสอบสถานะการทำงานของหลอดไฟผ่านโทรศัพท์มือถือผ่านแอปพลิเคชัน Blynk และส่วนที่ 4 วงจรควบคุมการเปิด-ปิดไฟภายในบ้านผ่านแอปพลิเคชัน Blynk ดังแสดงในรูปที่ 5 และ 6

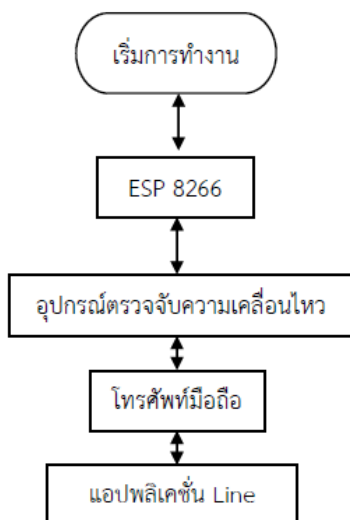




รูปที่ 7 การตรวจจับควันไฟและแก๊ส

3.5.2 การทำงานการตรวจจับความเคลื่อนไหว

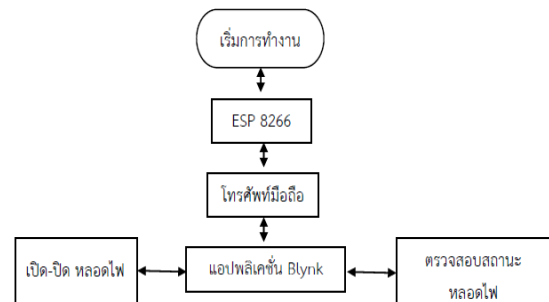
เมื่อตัวอุปกรณ์ตรวจจับความเคลื่อนไหว (Passive infrared) ตรวจจับความเคลื่อนไหวได้ก็จะทำการประมวลผลและจะสั่งงานให้ ESP8266 ทำงานโดยจะส่งค่าไปยังโทรศัพท์เพื่อแจ้งเตือนแอปพลิเคชัน Line ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 การตรวจจับความเคลื่อนไหว

3.5.3 การควบคุมการเปิด-ปิดหลอดไฟและการตรวจสอบสถานะการทำงานหลอดไฟ

เมื่อทำการเปิด-ปิดไฟผ่านโทรศัพท์มือถือ ก็จะส่งผลประมวลไปยัง ESP8266 โดยจะทำงานผ่านแอปพลิเคชัน Blynk จะสั่งงานให้รีเลย์ทำงาน ซึ่งรีเลย์ทำหน้าที่เป็นสวิตช์ เมื่อสวิตช์ถูกสั่งทำงานแหล่งจ่ายก็จะจ่ายไฟเข้าวงจรก็จะทำให้คอมไฟฟาดิต ดังแสดงในรูปที่ 9

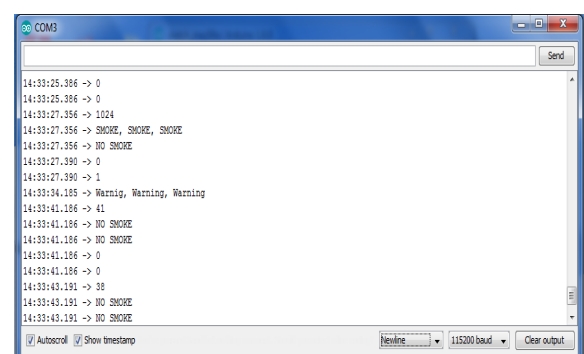


รูปที่ 9 การควบคุมการเปิด-ปิดหลอดไฟและการตรวจสอบสถานะการทำงานหลอดไฟ

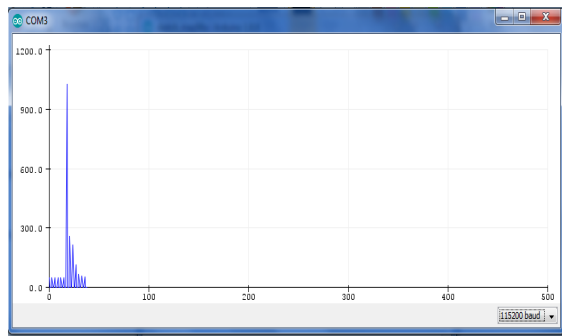
4. ผลการทดสอบ

4.1 การทดสอบการตรวจจับควันไฟและแก๊สแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชัน Line

เริ่มจากนำอุปกรณ์ตรวจจับ MQ-2 ต่อเข้ากับบอร์ด ESP8266 เมื่อตัวอุปกรณ์ที่ยังไม่ได้รับค่าแก๊ส และควันไฟสถานะของตัวอุปกรณ์ตรวจจับ MQ-2 จะแสดงไฟสถานะเป็นสีแดง โดยตัวอุปกรณ์ตรวจจับ MQ-2 สามารถตรวจจับแก๊สจำพวก LPG, Propane, Hydrogen, Methane, Butane, Smoke ตรวจจับได้ระดับความเข้มข้นของแก๊สในช่วง 10 – 10,000 ppm ดังแสดงในรูปที่ 10 และ 11

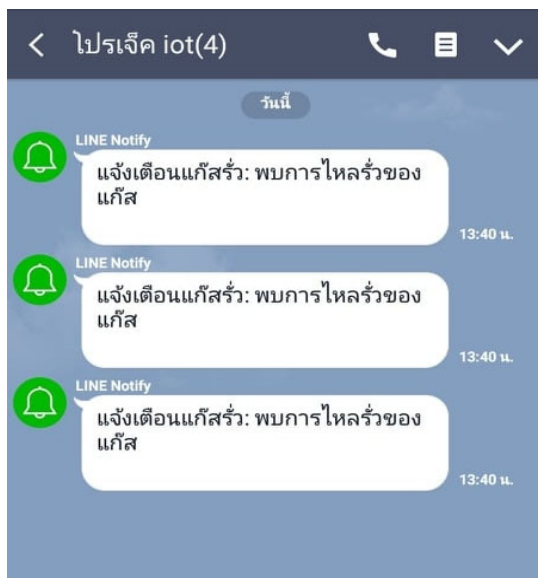


รูปที่ 10 การแสดงผลเมื่อตัวอุปกรณ์ MQ-2 รับค่าได้



รูปที่ 11 กราฟแสดงผลเมื่อตัวอุปกรณ์ MQ-2 รับค่าได้

เมื่อมีกลุ่มควัน ก๊าซ แก๊ส มาโดนบริเวณอุปกรณ์ตรวจจับ MQ-2 จะมีการส่งสัญญาณ analog ไปยัง ESP8266 หากมีความหนาแน่นของ ก๊าซ แก๊ส ควัน ก็จะมีค่า analog ที่สูงขึ้นส่งไปยัง ESP8266 เมื่อ ESP8266 รับสัญญาณจากอุปกรณ์ตรวจจับ MQ-2 หากยังไม่สูงพอ (ที่ตั้งไว้ 400) จะไม่ส่งการแจ้งเตือนมายังแอปพลิเคชัน Line แต่หากต่ำกว่า ค่าที่ตั้งไว้ไฟสีแดงจะสว่าง ในทางกลับกันหากมีกลุ่มควัน แก๊ส ก๊าซ มีความหนาแน่นขึ้นสูงกว่าค่าที่ตั้งไว้ ไฟสีเขียวจะสว่างเพื่อเตือนว่าไม่ปลอดภัย ก็ จะส่งการแจ้งเตือนมายังแอปพลิเคชัน Line ดังแสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 12 การแจ้งเตือนในแอปพลิเคชัน Line

ในตารางที่ 1 แสดงผลจากการทดสอบจำนวน 10 ครั้ง โดยทดสอบในระยะห่าง 1 เซนติเมตร และระยะห่าง 2

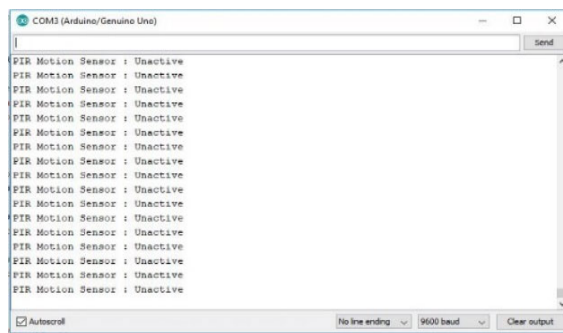
เซนติเมตร ในการทดสอบที่ระยะห่าง 1 เซนติเมตร ทั้ง 10 ครั้ง ได้ค่าสูงสุดที่ 1460 ppm และค่าต่ำสุดที่ 1118 ppm และในการทดสอบที่ระยะห่าง 2 เซนติเมตร ทั้ง 10 ครั้ง ได้ค่าสูงสุดที่ 760 ppm และค่าต่ำสุดที่ 646 ppm โดยมีการแจ้งเตือนทุกครั้ง

ตารางที่ 1 การทดสอบการรับค่าควันไฟและแก๊สด้วยอุปกรณ์ตรวจจับ MQ-2 แจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชัน Line

ครั้งที่	ระยะห่าง 1 เซนติเมตร	ระยะห่าง 2 เซนติเมตร	แจ้งเตือนผ่าน แอปพลิเคชัน Line
1	รับค่าได้ 1400 ppm	รับค่าได้ 760 ppm	แจ้งเตือน
2	รับค่าได้ 1248 ppm	รับค่าได้ 684 ppm	แจ้งเตือน
3	รับค่าได้ 1460 ppm	รับค่าได้ 712 ppm	แจ้งเตือน
4	รับค่าได้ 1420 ppm	รับค่าได้ 760 ppm	แจ้งเตือน
5	รับค่าได้ 1124 ppm	รับค่าได้ 646 ppm	แจ้งเตือน
6	รับค่าได้ 1223 ppm	รับค่าได้ 649 ppm	แจ้งเตือน
7	รับค่าได้ 1129 ppm	รับค่าได้ 740 ppm	แจ้งเตือน
8	รับค่าได้ 1118 ppm	รับค่าได้ 721 ppm	แจ้งเตือน
9	รับค่าได้ 1215 ppm	รับค่าได้ 655 ppm	แจ้งเตือน
10	รับค่าได้ 1211 ppm	รับค่าได้ 662 ppm	แจ้งเตือน

4.2 การทดสอบการตรวจจับการเคลื่อนไหวแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชัน Line

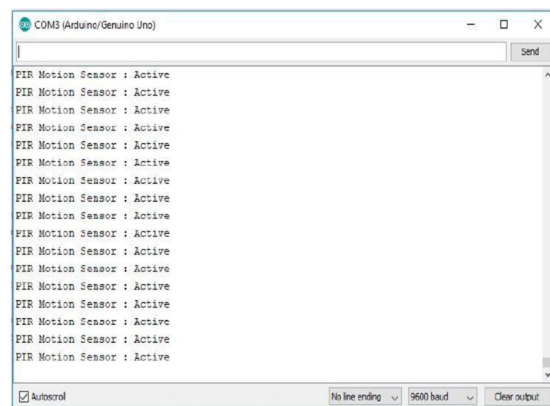
การทดสอบที่ 1 จากการทดสอบโดยที่ไม่มีอะไรเคลื่อนไหวในระยะที่อุปกรณ์ตรวจจับได้ 1-4 เมตร สามารถตรวจจับได้ ค่าที่ได้คือ 0 (Unactive) ดังแสดงในรูปที่ 13



รูปที่ 13 การทดลองการตรวจจับการเคลื่อนไหว

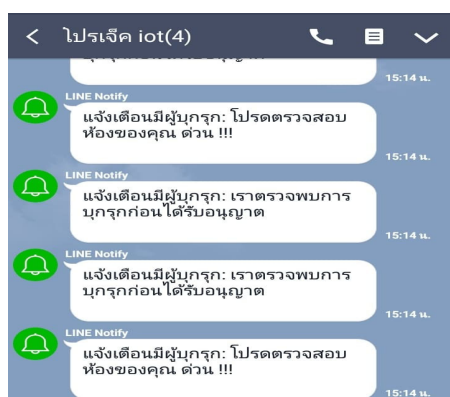
โดยที่ไม่มีอะไรเคลื่อนไหว

การทดสอบที่ 2 จากการทดสอบโดยที่ใช้คนเดินผ่านในระยะที่อุปกรณ์ตรวจจับสามารถตรวจจับได้ 1-4 เมตร (Active) ดังแสดงในรูปที่ 14 และเมื่อตัวอุปกรณ์ตรวจจับสามารถตรวจจับการเคลื่อนไหวได้ ส่งการแจ้งเตือนไปยังแอปพลิเคชัน Line ดังแสดงในรูปที่ 15



รูปที่ 14 การทดสอบการตรวจจับการเคลื่อนไหว

โดยที่ใช้คนเดินผ่าน



รูปที่ 15 การแจ้งเตือนการตรวจจับการเคลื่อนไหว

ในตารางที่ 2 แสดงผลจากการทดสอบจำนวน 10 ครั้ง โดยทดสอบทั้งหมด 4 ระยะ คือ ระยะห่าง 1 เมตร ระยะห่าง 2 เมตร ระยะห่าง 3 เมตร และระยะห่าง 4 เมตร ในการทดสอบที่ระยะห่าง 1 เมตร 2 เมตร 3 เมตร ทั้ง 10 ครั้ง พบว่า การแจ้งเตือนทั้งหมด 10 ครั้ง และในทดสอบที่ระยะห่าง 4 เมตร โดยทดสอบทั้งหมด 10 ครั้ง มีการแจ้งเตือน 7 ครั้ง ไม่มีการแจ้งเตือน 3 ครั้ง

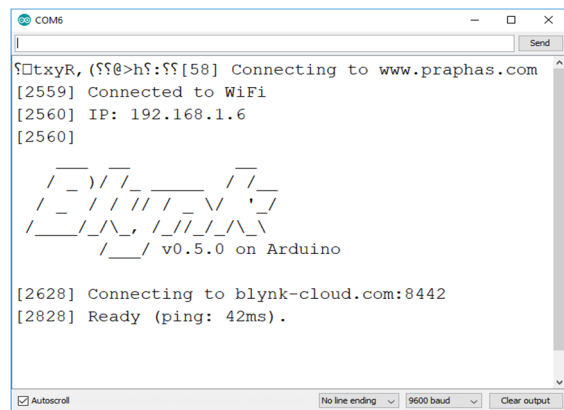
ตารางที่ 2 การทดสอบการตรวจจับการเคลื่อนไหวแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชัน Line

ครั้งที่	ระยะห่าง 1 เมตร	ระยะห่าง 2 เมตร	ระยะห่าง 3 เมตร	ระยะห่าง 4 เมตร
1	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน
2	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน
3	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	ไม่แจ้งเตือน
4	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน
5	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	ไม่แจ้งเตือน
6	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน
7	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน
8	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	ไม่แจ้งเตือน
9	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน
10	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน

4.3 การทดสอบการเปิด-ปิดหลอดไฟผ่านแอปพลิเคชัน Blynk

เริ่มจากการนำอุปกรณ์รีเลย์จำนวน 4 ช่องนำมาควบคุมการทำงานของหลอดไฟจำนวน 4 หลอด โดยจะมีพอร์ตที่ใช้งานเป็นเอาต์พุตได้โดยตรงจำนวน 9 ขาด้วยกัน คือ DO-D8 และโค้ดที่เขียนลงในตัวบอร์ดไม่ต้องเขียนอะไรเพิ่มเติม การสั่งงานปิดเปิดจะถูกส่งมาจากแอปพลิเคชัน Blynk ดังแสดงในรูปที่ 16

ปีที่ 17 ฉบับที่ 1 เดือน มกราคม – เมษายน พ.ศ. 2565



รูปที่ 16 การเชื่อมต่อ ESP8266 กับแอปพลิเคชัน Blynk

บอร์ด ESP32 ทำการเชื่อมต่อ WIFI ตามที่กำหนดไว้แล้วแสดง IP ที่ได้รับจาก Router มา จากนั้นจะเชื่อมต่อไปยัง BLYNK SERVER ถ้าเชื่อมต่อสำเร็จจะแสดงข้อความตามรูปที่ 16 มาถึงตอนนี้บอร์ด ESP8266 ก็พร้อมสำหรับการควบคุมผ่านแอปพลิเคชัน Blynk แล้ว ดังแสดงในรูปที่ 17



รูปที่ 17 การทดสอบการเปิด-ปิดหลอดไฟผ่านแอปพลิเคชัน Blynk

ในตารางที่ 3 แสดงผลจากการทดสอบการเปิด-ปิดหลอดไฟผ่านแอปพลิเคชัน Blynk จำนวน 10 ครั้ง ทั้งหมด 4 หลอด สามารถเปิด-ปิดได้ทั้งหมด 10 ครั้ง ทั้งหมด 4 หลอด ค่าความถูกต้องเป็น 100 เปอร์เซ็นต์

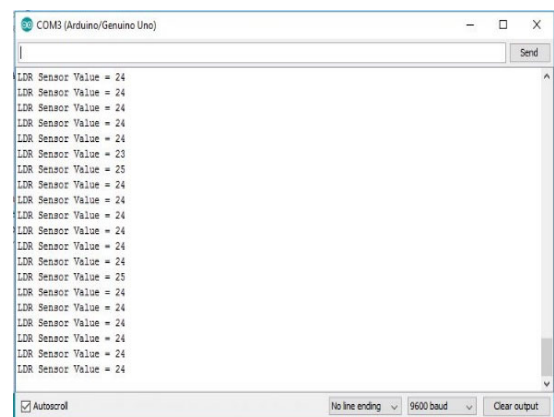
ตารางที่ 3 การทดสอบการเปิด-ปิดหลอดไฟผ่านแอปพลิเคชัน Blynk

ครั้งที่	หลอดที่ 1		หลอดที่ 2		หลอดที่ 3		หลอดที่ 4		ค่าความถูกต้อง (%)
	เปิด	ปิด	เปิด	ปิด	เปิด	ปิด	เปิด	ปิด	
1	สว่าง	ดับ	สว่าง	ดับ	สว่าง	ดับ	สว่าง	ดับ	100
2	สว่าง	ดับ	สว่าง	ดับ	สว่าง	ดับ	สว่าง	ดับ	100
3	สว่าง	ดับ	สว่าง	ดับ	สว่าง	ดับ	สว่าง	ดับ	100
4	สว่าง	ดับ	สว่าง	ดับ	สว่าง	ดับ	สว่าง	ดับ	100
5	สว่าง	ดับ	สว่าง	ดับ	สว่าง	ดับ	สว่าง	ดับ	100
6	สว่าง	ดับ	สว่าง	ดับ	สว่าง	ดับ	สว่าง	ดับ	100
7	สว่าง	ดับ	สว่าง	ดับ	สว่าง	ดับ	สว่าง	ดับ	100
8	สว่าง	ดับ	สว่าง	ดับ	สว่าง	ดับ	สว่าง	ดับ	100
9	สว่าง	ดับ	สว่าง	ดับ	สว่าง	ดับ	สว่าง	ดับ	100
10	สว่าง	ดับ	สว่าง	ดับ	สว่าง	ดับ	สว่าง	ดับ	100

4.4 การตรวจสอบสถานะการทำงานของหลอดไฟผ่านแอปพลิเคชัน Blynk

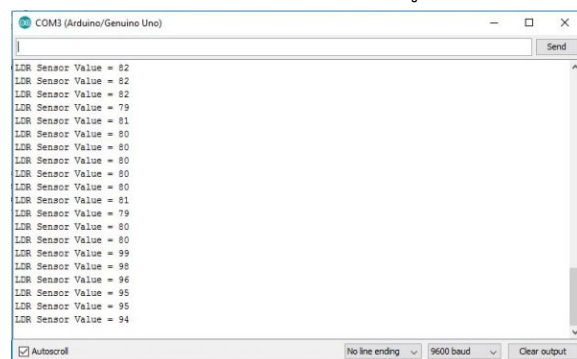
ตัว LDR Sensor จะทำการเปลี่ยนความต้านทานไปตามปริมาณแสงที่ตกกระทบ ทำให้เกิดความนำไฟฟ้าที่เปลี่ยนแปลงไป จากนั้นจะส่งข้อมูลไปยัง ESP 8266 เพื่อส่งต่อไปยังแอปพลิเคชัน Blynk เพื่อแสดงผลการตรวจสอบสถานะการทำงานของหลอดไฟ

การทดสอบที่ 1 ทดสอบโดยใช้ไฟจากแฟลชโทรศัพท์มือถือถ่ายรูปส่องแสงในระยะ 30 เซนติเมตรปรากฏว่าเซนเซอร์รับค่าได้ที่ 23 ถึง 24 ดังแสดงในรูป 18



รูปที่ 18 การตรวจสอบสถานะการทำงานของหลอดไฟในระยะ 30 เซนติเมตร

การทดสอบที่ 2 ทดสอบใช้โดยใช้แฟลชจากโทรศัพท์มือถือส่องแสงในระยะ 20 เซนติเมตร ปรากฏว่าเซนเซอร์รับค่าได้ที่ 79 ถึง 99 ดังแสดงในรูป 19



รูปที่ 19 การตรวจสอบสถานการณ์ทำงานของหลอดไฟในระยะ 20 เซนติเมตร

ในตารางที่ 4 แสดงผลการทดสอบการตรวจสอบสถานะการทำงานของหลอดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์ผ่านแอปพลิเคชัน Blynk สรุปได้ว่า เมื่อทำการทดสอบทั้งหมด 10 ครั้ง โดยแยกการทดสอบเป็น 5 ส่วน ดังนี้ หลอดที่ 1 หลอดที่ 2 หลอดที่ 3 หลอดที่ 4 และเปิดทั้งหมด 4 หลอดพบว่า มีการแจ้งเตือนทั้งหมด 10 ครั้ง ค่าความถูกต้องเป็น 100 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 4 การทดสอบการตรวจสอบสถานะการทำงานของหลอดคอมแพคฟลูออเรสเซนต์ผ่านแอปพลิเคชัน Blynk

ครั้งที่	หลอดที่ 1	หลอดที่ 2	หลอดที่ 3	หลอดที่ 4	ทั้งหมด 4 หลอด	ค่าความถูกต้อง (%)
1	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	100
2	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	100
3	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	100
4	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	100
5	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	100

ครั้งที่	หลอดที่ 1	หลอดที่ 2	หลอดที่ 3	หลอดที่ 4	ทั้งหมด 4 หลอด	ค่าความถูกต้อง (%)
6	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	100
7	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	100
8	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	100
9	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	100
10	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	แจ้งเตือน	100

5. บทสรุป

จากการทดสอบการประยุกต์ใช้งานระบบไอโอทีที่บ้านจำลอง จะพบว่า การตรวจจับควันไฟและแก๊สสามารถทำงานได้ปกติ โดยตัวอุปกรณ์ตรวจจับ MQ-2 สามารถตรวจจับแก๊สจำพวก LPG, Propane, Hydrogen, Methane, Butane, Smoke ตรวจจับได้ระดับความเข้มข้นของแก๊สที่ช่วง 10 – 10,000 ppm หากต่ำกว่าค่าที่ตั้งไว้ไฟสีแดงจะสว่าง ในทางกลับกันหากมีกลุ่มควัน แก๊ส ก๊าซ มีความหนาแน่นขึ้นสูงกว่าค่าที่ตั้งไว้ไฟสีเขียวจะสว่างเพื่อเตือนว่าไม่ปลอดภัย ก็จะส่งการแจ้งเตือนมายังแอปพลิเคชัน Line การตรวจจับการเคลื่อนไหวโดยใช้โมดูล PIR HC-SR501 จะตรวจจับทุกอย่างที่เคลื่อนไหวในระยะ 1-4 เมตร เมื่อตัวอุปกรณ์ตรวจจับสามารถตรวจจับการเคลื่อนไหวได้ ก็จะส่งการแจ้งเตือนไปยังแอปพลิเคชัน Line การเปิด-ปิดของหลอดไฟผ่านแอปพลิเคชัน Blynk ด้วยโทรศัพท์มือถือสามารถทำงานเปิด-ปิดหลอดไฟได้ตามที่ต้องการ ส่วนการตรวจสอบสถานะการทำงานของหลอดไฟผ่านแอปพลิเคชัน Blynk ทดสอบโดยใช้แฟลชจากโทรศัพท์มือถือส่องแสงในระยะ 30 เซนติเมตร ปรากฏว่าเซนเซอร์รับค่าได้ที่ 23 ถึง 24 และทดสอบโดยใช้แฟลชจากโทรศัพท์มือถือส่องแสงในระยะ 20 เซนติเมตร ปรากฏว่าเซนเซอร์รับค่าได้ที่ 79 ถึง 99 จะเห็นว่าการนำ

ระบบไอโอทีที่ใช้กับสรรพสิ่งแล้วเกิดประโยชน์อย่างมาก เช่น Smart Home เปลี่ยนบ้านธรรมดาให้กลายเป็นบ้านอัจฉริยะ ทำให้ช่วยอำนวยความสะดวกสบาย และลดขั้นตอนบางอย่างในชีวิตประจำวันของเราได้เป็นอย่างมาก

6. ข้อเสนอแนะ

1. ควรใช้อุปกรณ์กล้องมาใช้ร่วมกับอุปกรณ์ตรวจจับความเคลื่อนไหวเพื่อให้ประสิทธิภาพการทำงานแม่นยำมากยิ่งขึ้น
2. ควรสามารถตั้งเวลาการเปิด-ปิด ของหลอดไฟได้ เพื่อให้สะดวกต่อการใช้งานโดยตั้งเวลาเปิด-ปิดหลอดไฟโดยอัตโนมัติ
3. ควรเพิ่มชุดวัดแรงดัน กระแสของบ้านจำลอง เพื่อเช็คขนาดกระแสที่ใช้ในบ้านจำลองเพื่อไม่ให้เกินกำลังของอะแดปเตอร์
4. ควรเพิ่มชุดตรวจอุณหภูมิภายในบ้าน เพื่อวัดอุณหภูมิบอกสถานะทางโทรศัพท์มือถือ
5. ควรเพิ่มอุปกรณ์สำรองไฟ ในกรณีเกิดไฟฟ้าดับ เพื่อแผงวงจรควบคุมจะได้ไม่เกิดการเสียหาย

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] P.Luengwongsakorn, W. Lilakiatsakun and S. Phoomvuthisarn, “Home Surveillance Security Systems Using an ESP8266 Embedded Device”, *Journal of Information Science and Technology*, vol. 7, no. 2, pp. 44-55, Jul.-Dec. 2017.
- [2] V. Ricquebourg, D. Menga, B. Marhic and L. Delahoche, “The Smart Home Concept: our immediate Future” , *in ICELIE 2006*, Hammamet, Tunisia, 2006, pp. 23-26.
- [3] R. Kadam, P. Mahamuni and Y. Parikh, “Smart Home System”, *IJIRAE*, ISSN: 2349-2163, vol. 2, no. 1, pp. 81-86, Jan. 2015.
- [4] C. Stolojescu, C. Crisan and P. Butunoi, “An IoT-Based Smart Home Automation System” , *Sensors 2021*, no. 11, pp.1-23, May 2021.
- [5] M. Elkhodr, S. Shahrestani and H. Cheung, “A Smart Home Application based on the Internet of Things Management Platform” , *in DSDIS 2015*, Sydney, Australia, 2015, pp. 491-496.
- [6] V.Jyothi, M. Gopi Krishna, B. Raveendranadh and D. Rupalin, “ IOT Based Smart Home System Technologies” , *International Journal of Engineering Research and Development*, vol. 13, no. 2,pp. 31-37, Feb. 2017.
- [7] S. Kousalya, G. Reddi Priya, R. Vasanthi and B. Venkatesh, “ IOT Based Smart Security and Smart Home Automation” , *IJERT*, ISSN: 2278-0181, vol. 7, no. 04, April 2018.
- [8] P. Durongdumrongchai and C. Addoddorn, “Iot System Model for The Automatic Chicken Farm Controlled by Microcontroller” , *JEET 2020*, vol. 7, no.2, pp. 73-86, 2020.

จลนศาสตร์และการจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แขนกลด้วยโปรแกรมแมทแลบ Kinematics and Motion Modeling of a Robotic Arm using MATLAB Program

สุรัชย์ เหมหิรัญ¹ ดิฐภัทร ตันประดิษฐ์^{2*}

^{1,2}คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

เลขที่ 2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพมหานคร 10120

Surachai Hemhirun¹ Ditthaphat Tanpradit^{2*}

^{1,2}Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep

2 Nanlinji Road, Tungmahamek, Sathorn, Bangkok, 10120

*Corresponding author Email: ditthaphat.t@mail.rmutk.ac.th

(Received: September 1, 2021; Revised: December 16, 2021; Accepted: April 21, 2022)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาจลนศาสตร์และการจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แขนกลด้วยโปรแกรมแมทแลบสำหรับระบุพิกัดปลายแขนกล โดยหุ่นยนต์แขนกลมีข้อต่อหมุนอิสระ 4 แกน ถูกสร้างขึ้นจากโปรแกรมสร้างโมเดล 3 มิติ จากนั้นนำมาวิเคราะห์ทางจลนศาสตร์และสร้างแบบจำลองด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink การทดสอบประกอบด้วย 2 ส่วนคือ ส่วนแรกเป็นการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง และส่วนที่สองเป็นการจำลองการเคลื่อนที่แบบต่อเนื่องด้วยการเขียนตัวอักษร วิธีการทดสอบใช้การแสดงผลของหุ่นยนต์แขนกลโมเดล 3 มิติ เปรียบเทียบกับแบบจำลองทางจลนศาสตร์ ผลการทดสอบพบว่าค่าพิกัดปลายแขนกลและค่ามุมการหมุนของข้อต่อทั้งหมดมีความถูกต้องและมีพื้นที่ทำงานตามแกน x, y และ z ในช่วง 52 ถึง 239, -234 ถึง 234 และ 0 ถึง 228 มิลลิเมตร ตามลำดับ และแบบจำลองแสดงผลการเขียนตัวอักษรได้ถูกต้องสมบูรณ์ นอกจากนี้ทั้งยังพบว่าการปัดเศษทศนิยมของมุมข้อต่อส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนในการระบุพิกัดปลายแขนกล

คำสำคัญ: แบบจำลองจลนศาสตร์ การจำลองการเคลื่อนที่ จลนศาสตร์ไปข้างหน้า จลนศาสตร์ผกผัน

ABSTRACT

This research aimed to study kinematics and motion modeling of a robot arm using MATLAB program for the identification of the end-effector (EE) coordinates. The robot arm has a 4 degree-of-freedom (DOF) which was created by a 3-D modeling program. After that, the kinematics model was analyzed, and the program was simulated by MATLAB/Simulation program. The test consisted of two parts. The first part is to validate the kinematics model while the second part is to simulate continuous motion by writing an English alphabet. The test method uses the display of a robotic arm from a 3-D model compared with the kinematic model. the results showed that the kinematic calculation of the model revealed the EE coordinates, and all the joint angle values were accurate, causing the work area along x, y, and z-axes in the range of 52 to 239, -234 to 234, and 0 to 228 mm. respectively.

The simulation showed correct and perfect writing. In addition, it was found that the round-off of the joint angle value affects the error in specifying the coordinates of the EE.

Keyword: Kinematics model, Motion modeling, Forward kinematics, Inverse kinematics.

1. บทนำ

หุ่นยนต์แขนกล (Robot arm) เป็นการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ที่มีกลไกและข้อต่อคล้ายกับแขนของมนุษย์เพื่อใช้ปฏิบัติงานหรือกิจกรรมที่มีรูปแบบแน่นอนและทำงานเป็นระยะเวลานาน เช่น งานจับวัตถุ (Object grasping) งานจับและวางวัตถุ (Pick and Place) ตลอดจนงานที่ประยุกต์ให้ปลายแขนกลถือเครื่องมือ (Handling tools) ในงานเชื่อมประสานชิ้นงานที่อาศัยการควบคุมแบบต่อเนื่อง เป็นต้น โดยหุ่นยนต์แขนกลอุตสาหกรรม (Industrial robots) ใช้การสั่งการควบคุมด้วยแป้นสอน (Thach pendant) บันทึกตำแหน่งพิกัดต่าง ๆ ลงในหน่วยความจำจากนั้นให้โปรแกรมทำงานตามลำดับเพื่อสั่งงานมอเตอร์ประจำข้อต่อแต่ละข้อต่อให้หมุนในทิศทางใดและเป็นมุมเท่าไรที่จะทำให้ส่วนปลายของแขนกลเคลื่อนที่ไปยังตำแหน่งที่ต้องการได้ จากความสัมพันธ์ระหว่างการเคลื่อนที่เชิงมุม (Angular Motion) ของข้อต่อกับการเคลื่อนที่เชิงเส้น (Linear Motion) ของปลายแขนกลสามารถอธิบายลำดับขั้นตอนวิธี (Algorithm) ด้วยการศึกษาจลนศาสตร์ของหุ่นยนต์ (Robotics Kinematics) ที่เป็นศาสตร์ด้านหุ่นยนต์ที่มีความหลากหลายตามลักษณะแบบชนิดและลำดับชั้นความอิสระ (Degree of Freedom, DOF) ของหุ่นยนต์แขนกลที่อาศัยหลักการพื้นฐานที่จำเป็นสำหรับการพัฒนาหุ่นยนต์แขนกล [1] เริ่มจากการวิเคราะห์ทางจลนศาสตร์ของหุ่นยนต์แขนกลที่ต้องการศึกษาที่สามารถแบ่งได้สองแนวทาง ได้แก่ 1) การใช้หุ่นยนต์แขนกลอุตสาหกรรมจริงเป็นต้นแบบในการศึกษา [2], [3] เช่น การใช้หุ่นยนต์แขนกล Staubli RX 90 ศึกษาการป้อนค่ามุมการหมุนในแต่ละข้อต่อ เพื่อสั่งงานให้ส่วนปลายแขนกลเขียนตัวอักษรภาษาอังกฤษ อีกทั้งใช้แขนกลเป็นเครื่องมือในการเก็บ

ข้อมูลการเคลื่อนที่เพื่อนำมาทดสอบความถูกต้องเปรียบเทียบกับการศึกษาทางทฤษฎี [4] หรือการใช้หุ่นยนต์แขนกล KUKA KR5 ARC เพื่อศึกษาค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นกับข้อต่อของหุ่นยนต์ และได้เสนอวิธีการวัดมุมข้อต่อแขนกลด้วยเลเซอร์แทรกเกอร์ ผู้วิจัยได้นำข้อมูลที่ได้นำมาเปรียบเทียบความถูกต้องกับผลจากการคำนวณค่าทางจลนศาสตร์ของหุ่นยนต์ [5] และ 2) การใช้หุ่นยนต์ที่สร้างขึ้นเองเป็นต้นแบบในการศึกษา [6], [7] ร่วมกับการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการคำนวณทางวิศวกรรม (MATLAB) ในการสร้างแบบจำลองทางจลนศาสตร์ของหุ่นยนต์แขนกลเพื่อป้อนอาหารให้กับผู้สูงอายุ [8] และในแนวทางเดียวได้มีการศึกษาพิกัดตำแหน่ง (x, y, z) ของส่วนปลายแขนกลระหว่างหุ่นยนต์แขนกล (Actual Robot) กับแบบจำลองหุ่นยนต์แขนกล (Simulated Robot) ที่กำหนดการเคลื่อนที่ด้วยการกำหนดตำแหน่ง (Waypoint) ผลการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองที่สร้างขึ้นด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์แสดงค่าพิกัดตำแหน่งสอดคล้องกับหุ่นยนต์แขนกลต้นแบบแต่ยังคงมีค่าร้อยละความผิดพลาดที่ต้องมีการปรับปรุงในอนาคต [9] สอดคล้องกับการใช้แบบจำลองหุ่นยนต์แขนกลจากการประยุกต์ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบชิ้นส่วน (Computer-Aided Design, CAD) ร่วมกับโปรแกรมช่วยคำนวณทางวิศวกรรม (Computer-Aided Engineering, CAE) [10-13] จากทั้งสองแนวทางแสดงให้เห็นว่าเมื่อนำผลการวิเคราะห์ทางทฤษฎีมาเปรียบเทียบกับต้นแบบหุ่นยนต์แขนกล พบว่าค่าความผิดพลาดเกิดขึ้นจากกลไกข้อต่อแขนกล (Mechanical error) ร่วมกับการวัดตำแหน่งหรือมุมการหมุนของข้อต่อแขนกลที่เกิดความคลาดเคลื่อน (Measurement error) ขึ้น ดังนั้นเพื่อเป็นการทดสอบ

การวิเคราะห์ทางจลนศาสตร์ที่ถูกต้อง ผู้วิจัยขอเสนอแนวทางการใช้แบบจำลองหุ่นยนต์แขนกล (แทนการใช้แขนกลจริงหรือแขนกลจากการสร้างขึ้นเอง)

โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาจลนศาสตร์ไปข้างหน้าและจลนศาสตร์ผกผันของหุ่นยนต์แขนกล และทดสอบความถูกต้อง (Verification) ของการคำนวณค่าทางทฤษฎีเทียบกับการแสดงผลของแบบจำลองที่สร้างขึ้น อีกทั้งทำให้สามารถกำหนดพื้นที่การทำงาน (Work Area) และสร้างเส้นทางการเคลื่อนที่ของปลายแขนกล เพื่อเป็นข้อมูลประกอบการตัดสินใจสำหรับการสร้างหุ่นยนต์แขนกลจริงได้ต่อไป

2. ระเบียบวิธีวิจัย

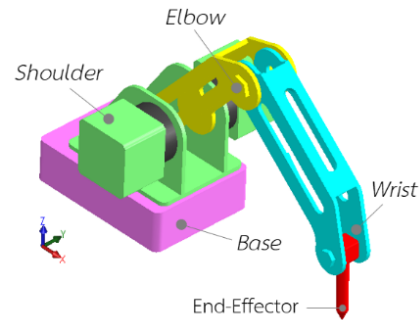
การศึกษาจลนศาสตร์และการจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แขนกล มีหัวข้อการดำเนินการ 6 หัวข้อ ได้แก่ 1) การสร้างแบบจำลองหุ่นยนต์แขนกล 2) พารามิเตอร์และการกำหนดกรอบอ้างอิง 3) สมการจลนศาสตร์ไปข้างหน้า 4) การวิเคราะห์จลนศาสตร์ผกผัน 5) การจำลองการเคลื่อนที่ และ 6) ค่าความคลาดเคลื่อนจากการบิดเบือน ทั้งหมดมีรายละเอียดในแต่ละหัวข้อดังนี้

2.1 การสร้างแบบจำลองหุ่นยนต์แขนกล

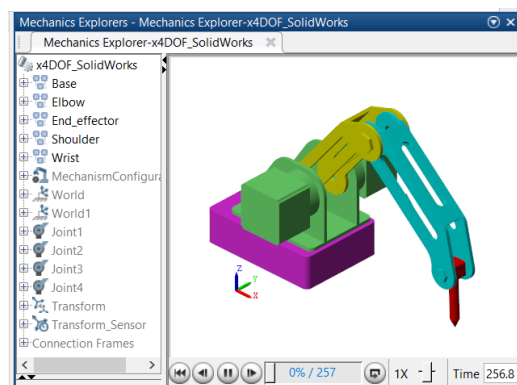
แบบจำลองหุ่นยนต์แขนกลสร้างจากโปรแกรมสร้างโมเดล 3 มิติเพื่อใช้เป็นต้นแบบในการวิเคราะห์ทางจลนศาสตร์ โดยหุ่นยนต์แขนกลมีลักษณะแบบข้อต่อ (Articulated arm) ประกอบด้วย ชิ้นส่วนแขนกล จำนวน 5 ชิ้น และมีข้อต่อหมุนอิสระ (Revolute Joint) จำนวน 4 ข้อต่อ ได้แก่ ฐานหมุน (Base Rotation) หัวไหล่ (Shoulder) ข้อศอก (Elbow) และข้อมือ (Wrist) และออกแบบให้ปลายแขนกล (End-Effector) มีลักษณะแหลมใช้สำหรับอ้างอิงตำแหน่งตามระบบพิกัดฉาก (Cartesian Coordinate System) ดังรูปที่ 1

เมื่อได้โมเดลของหุ่นยนต์แขนกลแล้วทำการส่งออกโมเดล (Export) ด้วยฟังก์ชัน Simscape Multibody Link จากนั้นนำเข้า (Import) โมเดลเข้าโปรแกรม MATLAB ดังรูปที่ 2 เพื่อให้สามารถสั่งการหุ่นยนต์แขนกล

ให้เคลื่อนที่ได้ตามต้องการนั้นต้องอาศัยทฤษฎีพื้นฐานของหุ่นยนต์ที่เริ่มจากพิจารณาโครงสร้าง พารามิเตอร์และการกำหนดกรอบอ้างอิงแขนกล ดังได้อธิบายในหัวข้อต่อไป



รูปที่ 1 โมเดล 3 มิติของหุ่นยนต์แขนกล



รูปที่ 2 แบบจำลองหุ่นยนต์แขนกล (MATLAB)

2.2 พารามิเตอร์และการกำหนดกรอบอ้างอิง

การอ้างอิงพิกัดส่วนตัวหรือกรอบอ้างอิง (Frames of Reference) ในแต่ละข้อต่อหมุน เริ่มจากกรอบอ้างอิงที่ฐาน เป็น 0 และนับลำดับต่อไปจนถึงกรอบอ้างอิงสุดท้าย เป็น 4 ที่ปลายแขนกล ตามหลักการของ เดนาวิท-ฮาเทนเบิร์ก (Denavit-Hartenberg, DH) ที่ได้ถูกนำมาใช้เป็นมาตรฐานการอธิบายแบบจำลองหุ่นยนต์แขนกล [14-16] ในรูปแบบตารางเรียกว่า DH Parameter ที่ประกอบด้วยพารามิเตอร์ a_i , α_i , d_i และ θ_i

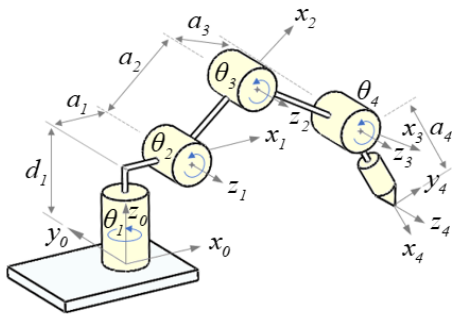
a_i คือ ระยะห่างแกน z_{i-1} ถึงแกน z_i ตามแกน x_i

α_i คือ มุมบิด แกน z_{i-1} กับแกน z_i รอบแกน x_i

d_i คือ ระยะห่างแกน x_{i-1} ถึงแกน x_i ตามแกน z_{i-1}

θ_i คือ มุมบิด แกน x_{i-1} กับแกน x_i รอบแกน z_{i-1}

การวางตัวตามแกน (axis) ในแต่ละจุดของกรอบอ้างอิงเป็นไปตามกฎ 4 ข้อ คือ 1) แกน z-axis กำหนดทิศทางตามแกนของข้อต่อหมุน (Revolute Joint) 2) แกน x-axis กำหนดทิศทางให้ตั้งฉากกับ z_i และ z_{i-1} 3) แกน y-axis กำหนดทิศทางตามกฎมือขวา (Right-hand rule) และ 4) แนวแกน x_i ที่กำหนดขึ้นตามข้อ 2) ต้องตัดกับแนวแกน z_{i-1} ดังรูปที่ 3 และนำเสนอค่าพารามิเตอร์ของแขนกลในรูปแบบตาราง ดังตารางที่ 1 เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับการสร้างสมการจลนศาสตร์ไปข้างหน้าต่อไป



รูปที่ 3 กรอบอ้างอิงและพารามิเตอร์ของหุ่นยนต์ [17]

ตารางที่ 1 DH พารามิเตอร์ของหุ่นยนต์แขนกล

Joint (i)	a_i	α_i	d_i	θ_i
1	a_1	$\pi / 2$	d_1	θ_1
2	a_2	0	0	θ_2
3	a_3	0	0	θ_3
4	a_4	0	0	θ_4

ข้อมูลค่าความยาวของชิ้นส่วนแขนกลแต่ละชิ้น $a_1 = 20 \text{ mm}$ $a_2 = 100 \text{ mm}$ $a_3 = 121 \text{ mm}$ $a_4 = 53 \text{ mm}$ $d_1 = 72 \text{ mm}$

2.3 สมการจลนศาสตร์ไปข้างหน้า

การคำนวณตำแหน่งที่ส่วนปลายของหุ่นยนต์แขนกลที่อาศัยข้อมูลมุมการหมุนของข้อต่อต่างๆ (Joint angles, $\theta_1 - \theta_4$) สามารถทำได้ด้วยการหาสมการจลนศาสตร์ไปข้างหน้า (Forward Kinematics, FK) ที่ได้จากการแปลงเมทริกซ์เอกพันธ์ (Homogeneous transformation matrices, T) ประกอบด้วยเมทริกซ์การหมุน (Rotation

matrix, $R(\theta)$) และเวกเตอร์ตำแหน่ง (Position Vector, $P(\theta)$) ดังสมการที่ (1) ร่วมกับข้อมูลจากตารางที่ 1 ด้วยการแทนค่าพารามิเตอร์ของหุ่นยนต์แขนกลตามลำดับของข้อต่อหมุนทั้ง 4 ข้อต่อ ลงในสมการที่ (2)

โดย T_i^{i-1} คือ การแปลงเมทริกซ์เอกพันธ์ของกรอบอ้างอิงในแกนข้อต่อที่อยู่ติดกัน ตัวอย่างเช่น กรอบอ้างอิงปัจจุบันอยู่ที่ข้อต่อหมุนลำดับที่ i เป็น 1 แกนข้อต่อที่อยู่ติดกันก่อนหน้า คือ 0 จาก $(i-1)$ จะได้เป็น T_1^0 หมายถึง การแปลงพิกัดอ้างอิงจากกรอบอ้างอิงที่ 1 เทียบกลับไปยังกรอบอ้างอิงที่ 0 หรือที่ฐานของหุ่นยนต์แขนกลนั่นเอง การทำเช่นนี้ตามลำดับจนถึงชิ้นส่วนสุดท้ายของแขนกล จากนั้นนำเมทริกซ์มาคูณกัน ดังสมการที่ (3)

$$T_i^{i-1} = \begin{bmatrix} R_i^{i-1}(\theta) & P_i^{i-1}(\theta) \\ 0 & I \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & p_x \\ r_{21} & r_{22} & r_{23} & p_y \\ r_{31} & r_{32} & r_{33} & p_z \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$= \begin{bmatrix} \cos\theta_i & -\sin\theta_i & 0 & d_i \\ \sin\theta_i \cos\alpha_i & \cos\theta_i \cos\alpha_i & -\sin\alpha_i & -a_i \sin\alpha_i \\ \sin\theta_i \sin\alpha_i & \cos\theta_i \sin\alpha_i & \cos\alpha_i & a_i \cos\alpha_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$T_4^0 = T_1^0 T_2^1 T_3^2 T_4^3 \quad (3)$$

ภายหลังการแปลงเมทริกซ์ตำแหน่งแถวสุดท้าย (Last column) ในแนวตั้งของ $T_4^0(:,4)$ แสดงข้อมูลพิกัดตำแหน่งส่วนปลายแขนกลตามแนวแกน x, y และ z (p_{4x}^0 , p_{4y}^0 และ p_{4z}^0) ตามลำดับดังสมการที่ (4) – (6) และสามารถคำนวณหามุมท่าทางของส่วนปลายแขนกล (Orientation, φ) จากสมการที่ (7)

$$p_{4x}^0 = c\theta_1 [(a_1 + a_2 c\theta_2) + a_3 c(\theta_2 + \theta_3) + a_4 c(\varphi)] \quad (4)$$

$$p_{4y}^0 = s\theta_1 [(a_1 + a_2 c\theta_2) + a_3 c(\theta_2 + \theta_3) + a_4 c(\varphi)] \quad (5)$$

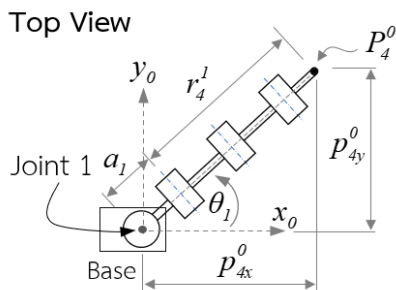
$$p_{4z}^0 = a_2 s\theta_2 + a_3 s(\theta_2 + \theta_3) + a_4 s(\varphi) + d_1 \quad (6)$$

$$\varphi = \theta_2 + \theta_3 + \theta_4 \quad (7)$$

เมื่อ S และ C ย่อมาจาก $\sin$ และ $\cos$ ตามลำดับ ร่วมกับข้อมูลพารามิเตอร์ของหุ่นยนต์แขนกล เมื่อแทนค่าลงในสมการที่ (4) - (6) ที่เป็นสมการจลนศาสตร์ไปข้างหน้า ทำให้สามารถคำนวณหาค่าตำแหน่งปลายแขนกลตามพิกัด x , y และ z ได้

2.4 การวิเคราะห์จลนศาสตร์ผกผัน

จากความสะดวกในการสั่งงานให้ปลายแขนกลเคลื่อนที่ไปยังพิกัด x , y และ z ตามกำหนดนั้นต้องวิเคราะห์ด้วยจลนศาสตร์ผกผัน (Inverse Kinematics, IK) เพื่อคำนวณค่ามุมการหมุนของข้อต่อทั้ง 4 (Joint angles, $\theta_1 - \theta_4$) ด้วยวิธีการทางเรขาคณิต (Geometric Approach) [14] ร่วมกับวิธีการแก้ปัญหาคณิตศาสตร์ (Algebraic Solution Approach) [4] มีรายละเอียดดังนี้ การหาค่ามุมข้อต่อที่ 1 (θ_1) เริ่มจากข้อมูลของพิกัดที่ปลายแขนกล (P_4^0) เทียบกับกรอบอ้างอิงที่ฐาน จากมุมมองด้านบนทำให้เห็นการวางตัวของหุ่นยนต์แขนกลในระนาบ $x_0 - y_0$



รูปที่ 4 มุมมองด้านบนที่กรอบอ้างอิงที่ 4 เทียบกับกรอบอ้างอิงที่ 0

จากรูปที่ 4 มมองประกอบของความยาวตามแกน x (p_{4x}^0) และตามแกน y (p_{4y}^0) ทำให้สามารถคำนวณค่ามุมการหมุนของข้อต่อที่ 1 ด้วยสมการที่ (8)

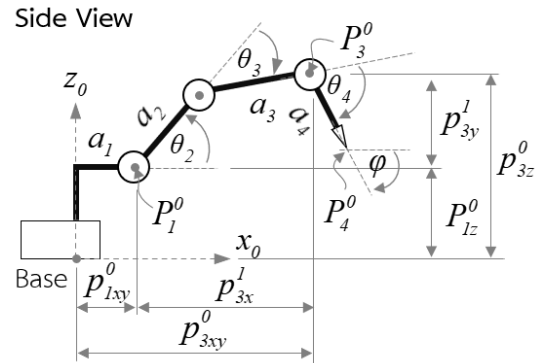
$$\theta_1 = \text{atan2}(p_{4y}^0, p_{4x}^0) \quad (8)$$

การหาค่ามุมข้อต่อที่ 2 (θ_2) และค่ามุมข้อต่อที่ 3 (θ_3) นั้นพิจารณาในช่วงข้อต่อหมุนที่ 2, 3 และ 4 หรือที่

พิกัด (p_3^1) ดังรูปที่ 6 โดยเริ่มจากการคำนวณหาพิกัดข้อต่อหมุนที่กรอบอ้างอิงที่ 3 เทียบกับกรอบอ้างอิงที่ 0 (P_3^0) ก่อนด้วยการย้อนกลับการแปลงเมทริกซ์เอกพันธ์ดังสมการที่ (9)

$$P_3^0 = T_3^0 = T_4^0 \text{inv}(T_4^3) \quad (9)$$

จากมุมมองด้านข้างทำให้เห็นการวางตัวของหุ่นยนต์แขนกลในระนาบ $x_0 - z_0$ ผลจากการคำนวณหาค่า (P_3^0) ที่มีองค์ประกอบย่อยใน 3 มิติ คือ ($p_{3x}^0, p_{3y}^0, p_{3z}^0$) ซึ่งเมื่อแสดงลงในระนาบ 2 มิติ ความยาวตามแนวแกน x_0 (p_{3xy}^0) เกิดจากผลลัพธ์ (Resultants) ขององค์ประกอบในแนวแกน x (p_{3x}^0) และ y (p_{3y}^0) ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 มุมมองด้านข้างที่กรอบอ้างอิงที่ 3 เทียบกับกรอบอ้างอิงที่ 0

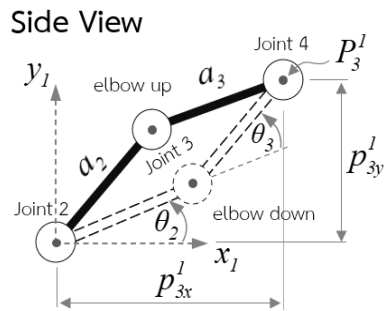
การคำนวณค่าพิกัด (P_3^1) มีองค์ประกอบของความยาวตามแกน x (p_{3x}^1) และแกน y (p_{3y}^1) สมการที่ (10) และ (11) ตามลำดับ ซึ่งได้จากการลบด้วยระยะของ (P_{1xy}^0) และ (P_{1z}^0) ตามลำดับ

$$p_{3x}^1 = a_2 c \theta_2 + a_3 c (\theta_2 + \theta_3) \quad (10)$$

$$p_{3y}^1 = a_2 s \theta_2 + a_3 s (\theta_2 + \theta_3) \quad (11)$$

รูปที่ 6 แสดงมุมมองด้านข้างของหุ่นยนต์แขนกลที่กรอบอ้างอิงที่ 3 เทียบกับกรอบอ้างอิงที่ 1 สามารถ

คำนวณหาค่ามุมการหมุนของข้อต่อที่ 3 ด้วยสมการที่ (12) ภายหลังกการคำนวณค่ามุมการหมุนของข้อต่อที่ 3 (θ_3) แล้วแทนค่าลงในสมการที่ (13) และ (14) เพื่อหาค่ามุมการหมุนของข้อต่อที่ 2 ได้



รูปที่ 6 มุมมองด้านข้างที่กรอบอ้างอิงที่ 3 เทียบกับกรอบอ้างอิงที่ 1

$$\theta_3 = \text{acos} \left[\frac{(p_{3x}^I)^2 + (p_{3y}^I)^2 - (a_2)^2 - (a_3)^2}{2a_2a_3} \right] \quad (12)$$

$$s\theta_2 = \frac{p_{3y}^I(a_2 + a_3c\theta_3) \pm p_{3x}^I(a_3s\theta_3)}{(p_{3x}^I)^2 + (p_{3y}^I)^2} \quad (13)$$

$$c\theta_2 = \frac{p_{3x}^I(a_2 + a_3c\theta_3) \mp p_{3y}^I(a_3s\theta_3)}{(p_{3x}^I)^2 + (p_{3y}^I)^2} \quad (14)$$

$$\theta_2 = \text{atan} \left[\frac{s\theta_2}{c\theta_2} \right] \quad (15)$$

$$= \text{atan} \frac{p_{3y}^I(a_2 + a_3c\theta_3) \pm p_{3x}^I(a_3s\theta_3)}{p_{3x}^I(a_2 + a_3c\theta_3) \mp p_{3y}^I(a_3s\theta_3)}$$

เครื่องหมาย ($\pm$) ใช้ระบุท่าทางของแขนกล ดังรูปที่ 6 กรณีแขนกลขึ้นที่ 2 (a_2) หรือขึ้นข้อศอกเคลื่อนที่ขึ้นและท่อนแขนกลขึ้นที่ 3 เคลื่อนที่ลงเรียกว่า “elbow up” และในทิศทางตรงกันข้ามเรียกว่า “elbow down” เช่นเดียวกับการสร้างแบบจำลองหุ่นยนต์แขนกลแบบ 2 ข้อต่อหมุน (2-R robot) [10] เนื่องจากหุ่นยนต์แขนกลที่ได้ออกแบบมีขึ้นข้อศอกเคลื่อนที่ขึ้นแบบ “elbow up”

ทำให้การแสดงเครื่องหมายค่ามุมข้อต่อที่ 2 เป็นบวก (+) และเครื่องหมายค่ามุมข้อต่อที่ 3 เป็นลบ (-)

การหาค่ามุมข้อต่อที่ 4 (θ_4) จากการนำมุมที่แสดงทิศทางของปลายแขนกล (φ หรือมุม $\phi = -90^\circ$) ดังรูปที่ 5 เพื่อให้ทิศทางของแนวแกนปลายแขนกลตั้งฉากกับระนาบของแขนกลเคลื่อนที่ไป จากนั้นหักลบด้วยค่ามุมที่ได้จากการคำนวณตามสมการที่ (12) และ (15) ตามลำดับสามารถคำนวณค่ามุมการหมุนข้อต่อที่ 4 จากดังสมการที่ (16)

$$\theta_4 = \varphi - \theta_2 - \theta_3 \quad (16)$$

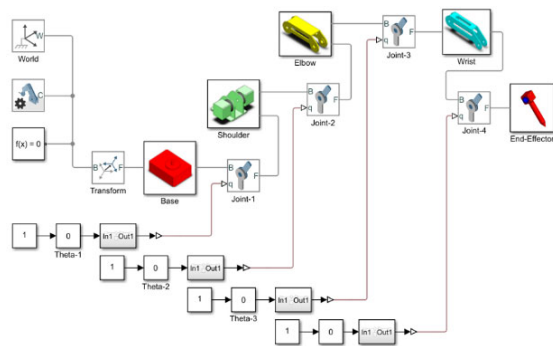
ทั้งนี้เมื่อผู้ใช้งานกำหนดพิกัดตำแหน่ง x, y และ z และทิศทางมุม φ ลงในสมการจลนศาสตร์ผกผันจะสามารถคำนวณค่ามุมการหมุนทั้ง 4 ($\theta_1 - \theta_4$) ได้

2.5 การจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แขนกล

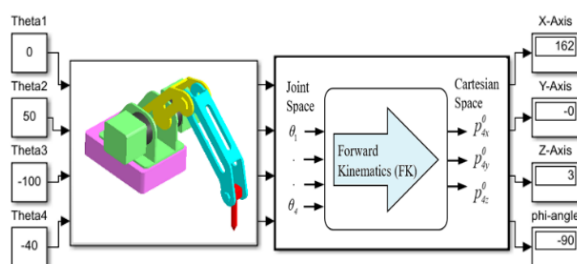
การจำลองการเคลื่อนที่ที่ใช้โปรแกรม Simulink ซึ่งเป็นโปรแกรมย่อย (Tool Block) ชุดหนึ่งของโปรแกรม MATLAB [18] แบ่งการสร้างเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนแรกเป็นการสั่งการควบคุมด้วยการกำหนดข้อมูลจากการสร้างแผนภาพบล็อกไดอะแกรม สำหรับรับค่ามุมการหมุน (In-put joint space) เพื่อผู้ใช้งาน (User) สั่งการควบคุมได้ ดังรูปที่ 7 จากนั้นสร้างฟังก์ชันบล็อกที่ภายในบรรจุสมการจลนศาสตร์ไปข้างหน้าและสมการจลนศาสตร์ผกผัน (MATLAB Function) ดังรูปที่ 8 และรูปที่ 9 ตามลำดับ ทำให้สามารถสั่งการควบคุมแขนกลในรูปแบบการระบุมุมการหมุนของข้อต่อทั้ง 4 ($\theta_1 - \theta_4$) และสั่งการด้วยการระบุพิกัดอ้างอิงตามแกน x, y และ z ส่วนที่สองเป็นการสั่งการควบคุมแบบต่อเนื่องด้วยการกำหนดพิกัดแบบชุดข้อมูล ตามเส้นทางการเคลื่อนที่ (Waypoint) ของปลายแขนกลตามลำดับวิธีการเขียนตัวอักษรภาษาอังกฤษ มี 2 ขั้นตอน ได้แก่

ขั้นตอนที่ 1 การกำหนดพิกัดให้ปลายแขนกลเขียนตัวอักษรพิมพ์ใหญ่ในภาษาอังกฤษ จำนวน 5 ตัว “A”, “E”, “I”, “O” และ “U” เช่นเดียวกับงานวิจัย [4] และ

เพิ่มเติมวิธีการเขียนตัวอักษรที่มีลำดับการเขียนและการยกเลิกปลายกาแบบการเขียนด้วยมือ โดยกำหนดความสูงของตัวอักษรเท่ากับ 30 mm และความกว้างตามสัดส่วนของตัวอักษร ดังรูปที่ 10 แสดงขั้นตอนการเขียนอักษร “A” และ “I” มี 3 ขั้นตอน อักษร “E” มี 4 ขั้นตอน และอักษร “O” และ “U” ไม่มีขั้นตอนการยกเลิกปลายแกนกลขึ้นขณะเขียนตัวอักษร ตัวอย่างเช่น การเขียนอักษร “A” ดังรูปที่ 11 จากพิกัดตำแหน่งนำมาสร้างสมการเชิงเส้น และบันทึกในรูปแบบตาราง (Excel) ที่ระบุพิกัดจุด x, y และ z ลงในแถว (Row) และบรรทัด (Column) จำนวน 60 บรรทัด ซึ่งการแสดงผลการเขียนแสดงลงระนาบ x-y แกน z แสดงการยก ขึ้น-ลง ของปลายแกนกลในขณะเขียนตัวอักษรเท่านั้น ดำเนินการในลักษณะเดียวกันกับตัวอักษรตัวอื่นๆ ตามลำดับ

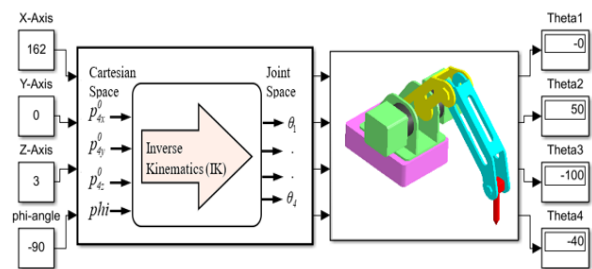


รูปที่ 7 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมของแบบจำลอง

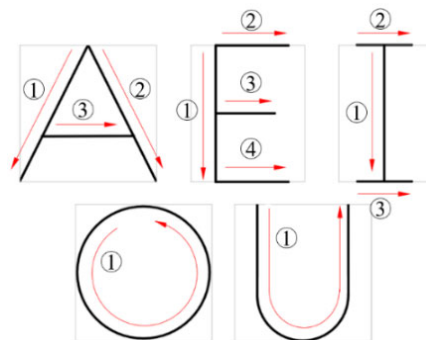


รูปที่ 8 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมที่ใช้แสดงผลการวิเคราะห์จลนศาสตร์ไปข้างหน้า

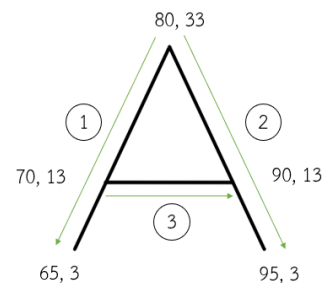
ขั้นตอนที่ 2 การสั่งการควบคุมแบบต่อเนื่องด้วยข้อมูลพิกัดตำแหน่งตามตาราง (Lookup Tables Block) ของลำดับข้อมูลที่ได้ออกแบบการเคลื่อนที่ ดังรูปที่ 12



รูปที่ 9 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมที่ใช้แสดงผลการวิเคราะห์จลนศาสตร์ผกผัน



รูปที่ 10 วิธีการเขียนตัวอักษรของแต่ละตัวอักษร



รูปที่ 11 พิกัดจุดตามลำดับวิธีการเขียนตัวอักษร “A”

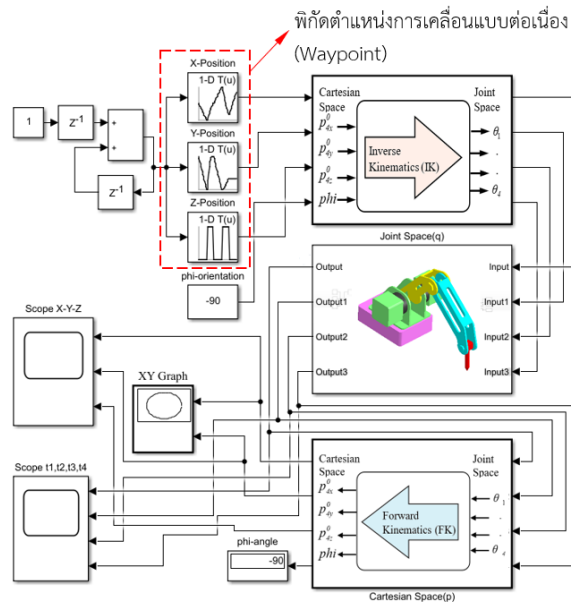
2.6 ค่าความคลาดเคลื่อนจากการปิดเศษ

ผลการวิเคราะห์ทางจลนศาสตร์ ค่าที่ได้จากการคำนวณเป็นจำนวนจริงมีการจำกัดจำนวนตำแหน่งทศนิยม (Decimal Place, D.P.) ด้วยวิธีการปิดเศษ เมื่อนำไปคำนวณต่อจะทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อน (Computation error) สะสมทำให้ผลคำตอบสุดท้ายเกิดค่าความคลาดเคลื่อน (Error) ดังสมการที่ 17

$$Error = |x_{sam} - x_{round-off}| \quad (17)$$

ปีที่ 17 ฉบับที่ 1 เดือน มกราคม – เมษายน พ.ศ. 2565

เมื่อ x_{sam} คือ ค่าจริงที่ได้จากแบบจำลอง และ $x_{round.off}$ ค่าที่ได้จากการปัดเศษ



รูปที่ 12 แผนภาพบล็อกไดอะแกรมที่ใช้แสดงการจำลอง การสั่งการควบคุมการเคลื่อนที่ของปลายแขนกล

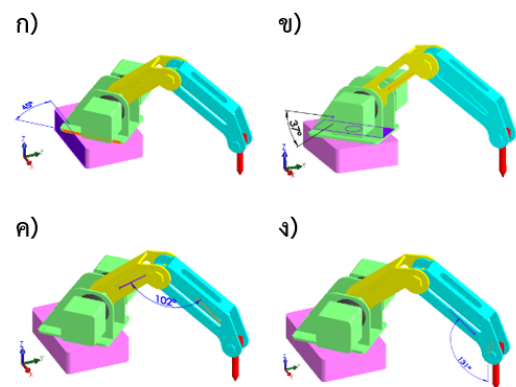
3. ผลการทดสอบและอภิปรายผล

การทดสอบมี 4 ส่วน ได้แก่ 1) การเก็บข้อมูลการแสดงผลของหุ่นยนต์แขนกล เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างมุมข้อต่อกับพิกัดปลายแขนกล 2) การทดสอบแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ 3) การทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ผกผัน และ 4) ใช้การเปรียบเทียบระหว่างผลการคำนวณค่าทางคณิตศาสตร์ของแบบจำลองจากโปรแกรม MATLAB/Simulink กับและการแสดงผลของโมเดลหุ่นยนต์แขนกล และ 4) ผลการจำลองการเคลื่อนที่แบบต่อเนื่อง มีผลการทดสอบและการอภิปรายผล ดังนี้

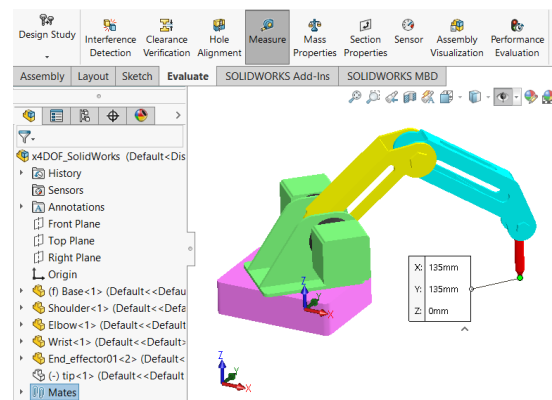
3.1 การเก็บข้อมูลการแสดงผลของหุ่นยนต์แขนกล

เริ่มจากกำหนดค่ามุมการหมุนทั้ง 4 ข้อต่อให้กับแบบจำลองหุ่นยนต์แขนกล ดังแสดงรูปที่ 13 ก) ถึง ง) ที่แสดงค่ามุมข้อต่อ (Joints, $\theta_1 - \theta_4$) ตามลำดับ จากนั้นใช้เครื่องมือวัด (Measure) ของโปรแกรมวัดตำแหน่งที่ส่วนปลายแขนกล จากการแสดงผลค่าตำแหน่งพิกัดจาก x, y

และ z ดังแสดงรูปที่ 14 และบันทึกผลข้อมูลลงใน ตารางที่ 2 ทำการดำเนินการเก็บข้อมูลจำนวน 10 ชุดข้อมูล [19]



รูปที่ 13 มุมข้อต่อหมุนทั้ง 4 ก) ข้อต่อที่ 1 (45 deg) ข) ข้อต่อที่ 2 (37 deg) ค) ข้อต่อที่ 3 (102 deg หรือ -78 deg) ง) ข้อต่อที่ 4 (131 deg หรือ -49 deg) ตามลำดับ



รูปที่ 14 ค่าพิกัดที่ปลายแขนกลของโมเดลหุ่นยนต์แขนกล จากโปรแกรมสร้างโมเดล 3 มิติ

ผลการทดสอบกำหนดค่ามุมการหมุนที่ข้อต่อหมุนทั้ง 4 ที่ มีช่วงการเปลี่ยนแปลงที่ทำให้การแสดงผลของโปรแกรมไม่เกิดความผิดพลาดขึ้น คือ θ_1 ช่วง (78 deg ถึง -78 deg) เนื่องจากต้องการพื้นที่ทำงานเฉพาะส่วนหน้าในระนาบ x-y เท่านั้น, θ_2 ช่วง (1 deg ถึง 100 deg) กำหนดมุมเป็นบวก (+), θ_3 ช่วง (-10 deg ถึง -164 deg) และ θ_4 ช่วง (-11 deg ถึง -156 deg) กำหนดมุมเป็นลบ (-) จากข้อมูลการแสดงผลของหุ่นยนต์แขนกล ทำให้ทราบพื้นที่การทำงาน (Work Area) ที่สามารถยื่น

และหดให้ปลายแขนกลในระยะตามแนวแกน x (52 mm ถึง 239 mm) ระยะตามแนวแกน y (-234 mm ถึง 234 mm) และระยะตามแนวแกน z (0 mm ถึง 228 mm) ทั้งนี้การแสดงผลข้อมูลของแบบจำลองเป็นการปิดเศษเป็นเลขจำนวนเต็มแบบไม่มีจุดทศนิยม เพื่อเป็นชุดข้อมูลสำหรับนำไปทดสอบความถูกต้องเปรียบเทียบกับแบบจำลองทางจลนศาสตร์ต่อไป

ตารางที่ 2 ข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างมุมการหมุนข้อต่อกับค่าพิกัดปลายแขนกล

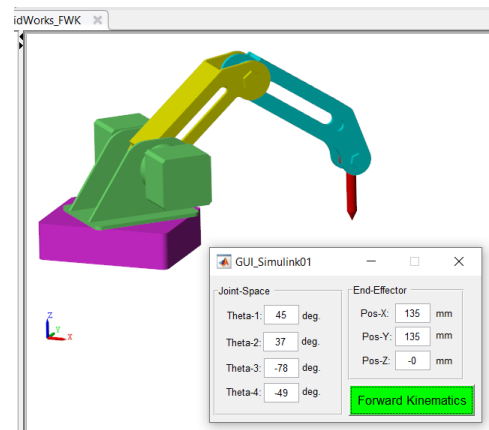
ลำดับ	มุมข้อต่อ (deg)				ค่าพิกัด (mm)		
	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4	x	y	z
1	0	85	-164	-11	52	0	0
2	0	70	-140	-20	96	0	0
3	0	2	-12	-80	239	0	0
4	78	1	-10	-81	50	234	0
5*	45	37	-78	-49	135	135	0
6	-45	77	-152	-15	52	-52	0
7	-78	1	-10	-81	52	-234	0
8	20	69	-137	-22	95	35	0
9	4	87	-158	-19	65	5	5
10	0	100	-34	-156	52	0	228

หมายเหตุ *ข้อมูลตัวอย่างการแสดงผล รูปที่ 14 และ 15

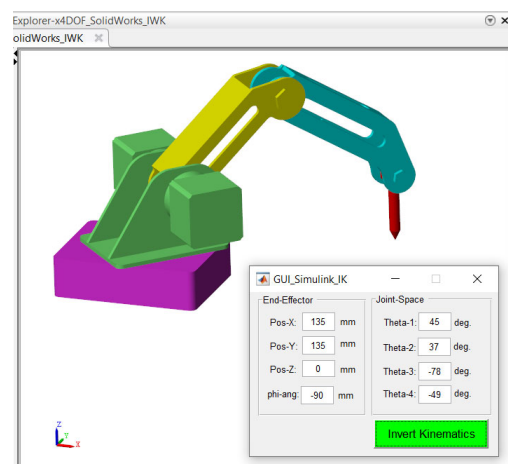
3.2 การทดสอบแบบจำลองจลนศาสตร์

เพื่อทดสอบความถูกต้องของแบบจำลองจลนศาสตร์ที่สร้างด้วยโปรแกรม MATLAB ซึ่งมี 2 ส่วน ได้แก่ 1) แบบจำลองจลนศาสตร์ไปข้างหน้า และแบบจำลองจลนศาสตร์ผกผัน มีรายละเอียดการทดสอบดังนี้ แบบจำลองจลนศาสตร์ไปข้างหน้า ใช้ข้อมูลมุมการหมุนของข้อต่อทั้ง 4 ($\theta_1 - \theta_4$) ข้อต่อที่ปรากฏดัง ตารางที่ 2 จำนวน 10 ชุดข้อมูล ระบุลงในหน้าต่างรับค่าของแบบจำลองที่สร้างขึ้นตามลำดับ ดังรูปที่ 15 การแสดงผลของแบบจำลองสามารถแสดงการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แขนกลไปยังตำแหน่งที่ระบุและการแสดงผลการคำนวณหาพิกัดปลายแขนกลตามแกน x, y และ z ได้ถูกต้อง เช่นเดียวกับข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างมุมการหมุนข้อต่อกับค่าพิกัดปลายแขนกล และ 2) แบบจำลอง

จลนศาสตร์ผกผัน ใช้ข้อมูลพิกัดปลายแขนกลตามแกน x, y และ z ที่ปรากฏดังตารางที่ 2 จำนวน 10 ชุดข้อมูล ระบุลงในหน้าต่างรับค่าของแบบจำลองรวมกับการกำหนดมุมท่าทางของปลายแขนกลที่ต้องการ (ϕ) หรือมุม $\phi = -90^\circ$ เพื่อให้ปลายแขนกลตั้งฉากกับระนาบ x-y ที่เป็นระนาบการแสดงผลการเขียนตัวอักษรในการทดสอบการจำลองการเคลื่อนที่แบบต่อเนื่อง (ต่อไป) ดังรูปที่ 16 เป็นภาพการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แขนกลไปยังตำแหน่งที่ระบุและแสดงค่าผลการคำนวณหามุมและทิศทางการหมุนของข้อต่อแขนกล ทั้ง 4 ข้อต่อ (Joints, $\theta_1 - \theta_4$) ได้ถูกต้องเช่นเดียวกับการแสดงผลของหุ่นยนต์ต้นแบบและสอดคล้องกับตารางข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างมุมการหมุนข้อต่อกับค่าพิกัดส่วนปลายแขนกล



รูปที่ 15 ค่าพิกัดปลายแขนกลของแบบจำลองจากโปรแกรม MATLAB



รูปที่ 16 ค่ามุมข้อต่อหมุนทั้ง 4 ของแบบจำลองจากโปรแกรม MATLAB

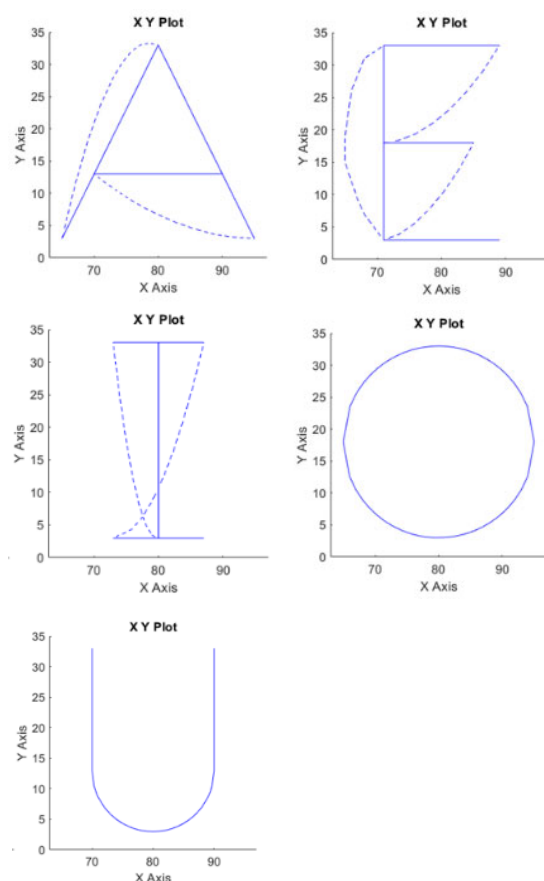
แบบจำลองที่สร้างขึ้นทำให้ผู้ใช้สะดวกต่อการใช้งาน ด้วยการระบุเพียงพิกัดปลายทางก็สามารถรู้ผลการคำนวณในแต่ละข้อต่อได้ ซึ่งมีประโยชน์ต่อการเรียนการสอนรวมถึงการอบรมบุคลากรในการควบคุมแขนกลพื้นฐานในโรงงานอุตสาหกรรมได้หรือสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับสั่งการควบคุมแบบต่อเนื่อง เช่น การเขียนตัวอักษร ดังการทดสอบต่อไป

3.4 ผลการจำลองการเคลื่อนที่ของแบบจำลองหุ่นยนต์แขนกล

แบบจำลองสร้างจากโปรแกรม MATLAB/Simulink เริ่มจากนำข้อมูลพิกัดตำแหน่งตามแกน x, y และ z (คำสั่งการเขียนตัวอักษร) สู้ฟังก์ชันย่อยการคำนวณค่าจลนศาสตร์ผกผัน (IK) เพื่อหาค่ามุมข้อต่อทั้ง 4 และผลการคำนวณที่ได้เป็นจำนวนจริงมีตำแหน่งทศนิยม 13 จุด และใช้หลักการปัดเศษ (Rounding) จำกัดให้เหลือทศนิยม 2 จุด (2 D.P.) จากนั้นนำข้อมูลนี้คำนวณค่าจลนศาสตร์ไปข้างหน้า (FK) จนได้ค่าพิกัดตำแหน่ง x, y และ z นำมาแสดงผลการเขียนตัวอักษรด้วยเส้นขอบ (Border line) ลงในระนาบ x-y ส่วนแกน z แสดงจังหวะการยกด้วยเส้นประ (Hidden line) ตามขั้นตอนวิธีการเขียนตัวอักษร ผลการเขียนตัวอักษร “A”, “E” และ “I” ดังรูปที่ 17 และการเขียนตัวอักษร “O” และ “U” จะไม่แสดงเส้นประ ทั้งนี้คำนวณในแต่ละข้อต่อที่ทำการปัดเศษทศนิยมเป็น 2 จุด เมื่อนำไปคำนวณต่อจนถึงคำตอบสุดท้ายได้ค่าพิกัดตำแหน่งถูกต้อง เช่นเดียวกับชุดข้อมูลพิกัดตำแหน่งการสั่งการเขียนตัวอักษร จึงสรุปได้ว่าผลการจำลองการเคลื่อนที่ของแบบจำลองสามารถเขียนตัวอักษรภาษาอังกฤษทั้ง 5 ตัวได้อย่างถูกต้องแม่นยำ

นอกจากนี้ผู้วิจัยได้ศึกษาค่าความคลาดเคลื่อนจากการปัดเศษของมุมข้อต่อแขนกลที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ว่ามีผลต่อคำตอบสุดท้าย หรือไม่ โดยทดลองปัดเศษทศนิยมลงเป็น 1 จุด (1 D.P.) และ 0 จุด (0 D.P.) หรือจำนวนเต็ม ตามลำดับ พบว่าการปัดเศษทศนิยมลงเป็น 1 จุด ยังคงทำให้ผลการเขียนตัวอักษรมีความถูกต้อง ดังรูปที่ 18 (รูปทางซ้าย) และ รูปที่ 19 (รูปทางซ้าย) โดย

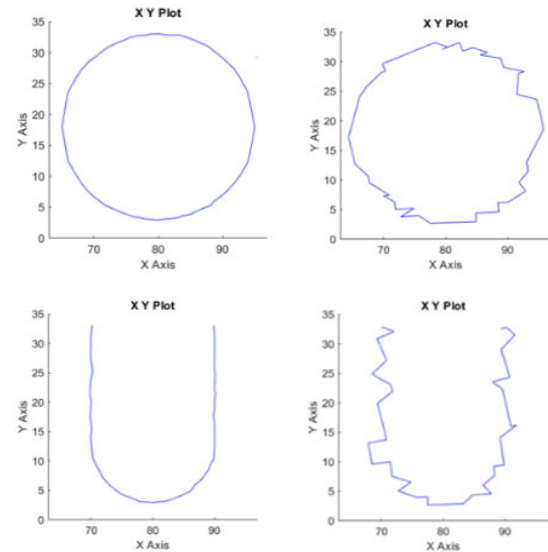
เกิดค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์สูงสุดตามแนวแกน x เท่ากับ 0.2 มิลลิเมตร และ y เท่ากับ 0.1 มิลลิเมตร แต่การปัดเศษเป็นเลขจำนวนเต็มทำให้การแสดงผลการเขียนตัวอักษรเกิดความไม่สมบูรณ์ตามคำสั่งที่ได้ออกแบบไว้ ดังรูปที่ 18 (รูปทางขวา) และ รูปที่ 19 (รูปทางขวา) และเกิดความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์สูงสุดตามแนวแกน x เท่ากับ 2.1 มิลลิเมตร และ y เท่ากับ 1.0 มิลลิเมตร เพิ่มขึ้นทั้งนี้เนื่องมาจากการปัดเลขทศนิยมลงทำให้เกิดค่าความคลาดเคลื่อนสะสมจากการคำนวณที่ส่งผลต่อคำตอบสุดท้ายนั่นเอง



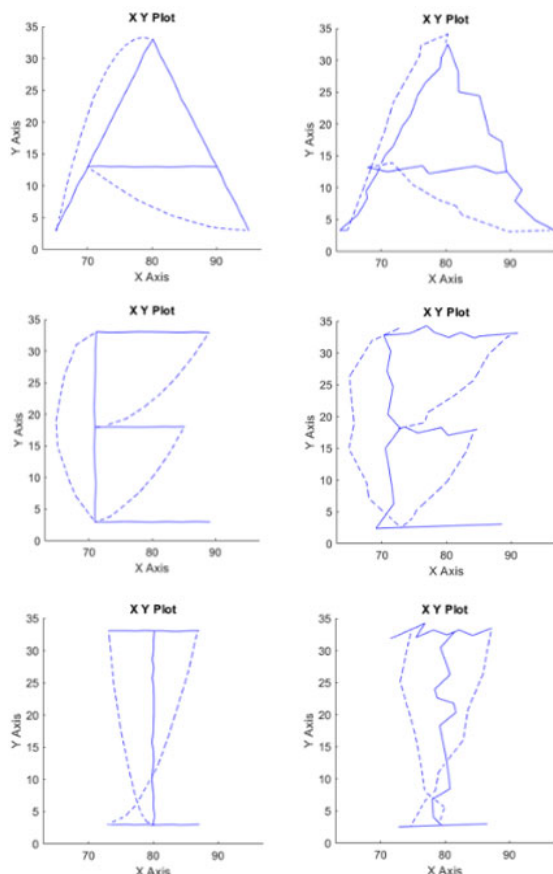
รูปที่ 17 ตัวอักษรที่เกิดจากแบบจำลองหุ่นยนต์แขนกล

ประโยชน์ที่ได้จากการทดสอบทำให้ทราบถึงข้อจำกัดของมุมข้อต่อแขนกลที่เกิดค่าความผิดพลาดจากการปัดเศษ สอดคล้องกับงานวิจัย [4] ที่พบว่าผลของการเขียนตัวอักษรเกิดความไม่สมบูรณ์เนื่องจากเกิดความผิดพลาด

จากมุมข้อแขนกล และเพื่อลดความผิดพลาดจากการศึกษาด้วยแขนกลจริงในด้านกลไกแขนกลหมุน (Mechanism error) การวัดขนาดแขนกลและการวัดมุมข้อต่อต่างๆ ที่ผิดพลาด (Measurement error) ทั้งหมดนี้จะส่งผลต่อการคำนวณทางทฤษฎี [5] ซึ่งงานวิจัยนี้ได้นำเสนอแนวทางการใช้หุ่นยนต์แขนกลจำลองจากโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (แทนการใช้แขนกลจริงหรือสร้างขึ้นเอง) ทำให้การแสดงผลการเคลื่อนที่ของปลายแขนกลและผลการคำนวณทางจลนศาสตร์ที่มีความถูกต้องแม่นยำสามารถใช้เป็นข้อมูลในการออกแบบและสร้างแขนกลจริงได้ต่อไป



รูปที่ 19 การเขียนตัวอักษร “O” และ “U” ที่ค่าการบิดเศษของมุมข้อต่อเป็น ก) 1 D.P. และ ข) 0 D.P.



รูปที่ 18 การเขียนตัวอักษร “A”, “E” และ “I” ที่ค่าการบิดเศษมุมข้อต่อเป็น ก) 1 D.P. และ ข) 0 D.P.

4. สรุป

การประยุกต์ใช้แบบจำลองหุ่นยนต์แขนกลที่สร้างจากโปรแกรมสร้างโมเดล 3 มิติ เพื่อเป็นต้นแบบในการศึกษาทางทฤษฎีและการวิเคราะห์สร้างแบบจำลองจลนศาสตร์รวมกับการสร้างการจำลองการเคลื่อนที่แบบเสมือนจริงตามผู้ใช้งานออกแบบด้วยโปรแกรม MATLAB/Simulink ทำให้ผู้ใช้งานสามารถกำหนดค่าพิกัดที่ต้องการและแสดงผลการคำนวณพร้อมกับแสดงการเคลื่อนที่ให้ผู้ใช้งานสังเกตการเปลี่ยนแปลง นอกจากนี้ได้เสนอผลจากการบิดเศษค่าจำนวนจริงของมุมข้อต่อแขนกลลงที่ส่งผลต่อคำตอบสุดท้ายทำให้ค่าความแม่นยำในการระบุตำแหน่งลดลงตามการอภิปรายผลการทดลอง

ประโยชน์ที่ได้จากงานวิจัยนี้และแนวทางพัฒนาในอนาคตคือได้แนวทางการนำโปรแกรมคอมพิวเตอร์ (ซอฟต์แวร์ทางวิศวกรรม) มาวิเคราะห์ทางจลนศาสตร์พร้อมกับพิสูจน์ทางทฤษฎีและสามารถนำไปต่อยอดจัดสร้างชุดส่งเสริมการเรียนการสอน การฝึกอบรมแก้ปัญหาในชั้นเรียนที่ผู้เรียนหรือผู้ฝึกอบรมไม่เข้าใจศาสตร์พื้นฐานทางหุ่นยนต์แขนกล ทั้งนี้การสร้างแบบจำลองทำให้ผู้ออกแบบทราบพื้นที่การทำงานของ

หุ่นยนต์แขนกลรวมถึงข้อจำกัดของความละเอียดมุมข้อต่อที่ไม่ส่งผลต่อค่าความผิดพลาดที่เกิดขึ้นก่อนการตัดสินใจสร้างหุ่นยนต์แขนกลจริงและเนื่องจากงานวิจัยนี้ได้เสนอการกำหนดการเคลื่อนที่รูปแบบตารางข้อมูลพิกัดจุดเท่านั้นทำให้มีโอกาสในการพัฒนาการสั่งการควบคุมแบบอัตโนมัติหรือพัฒนาระบบให้เกิดการเรียนรู้ด้วยตนเอง (Machine Learning) ในการกำหนดเส้นทางการเคลื่อนที่ของแขนกลได้ในอนาคต

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ และให้การสนับสนุนซอฟต์แวร์ที่มีลิขสิทธิ์ SolidWorks EDU Edition 2010-2011 NETWORK Serial Number 25734@rmutk-4c2643252 และขอขอบพระคุณบริษัท MathWorks MATLAB R2021a License 9389346 MathWorks Trial-13 Sep 2021.

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] I. Suleiman, E. Salam, and Y. Tanimu, "DEVELOPMENT OF A ROBOT ARM: A REVIEW," in *8th National Engineering Conference*, Niger State, Nigeria, 2018, pp. 1-5.
- [2] T. Chen, J. Lin, D. Wu, and H. Wu, "Research of Calibration Method for Industrial Robot Based on Error Model of Position," *Applied Sciences*, vol. 11, no. 3, pp. 1287, 2021.
- [3] R. van der Aalst, "Dynamic identification of a Mitsubishi PA- 1 0 robotic manipulator," Eindhoven University of Technology (Technische Universiteit Eindhoven) , Netherlands, Eindhoven, Apr. 2008.
- [4] B. Panomruttanarug, W. Pornsukvittoon, and J. Pakkawanit, "A study of forward and inverse

kinematics for 6- Link Robot Arm (Staubli RX 90)," *Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, vol. 27, no. 2, pp. 241-252, 2017.

- [5] C. R. Auttapoom Loungthongkam, "A Study of Random Errors For Six Degrees of Freedom Robotic Arm Joints," in *IE NETWORK 2020*, Chonburi, Thailand, 2020, pp. 1-6.
- [6] V. Pratheep, M. Chinnathambi, E. Priyanka, P. Ponmurugan, and P. Thiagarajan, "Design and Analysis of six DOF Robotic Manipulator," in *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1055, no. 1, IOP Publishing, 2021, pp. 1-10.
- [7] H. Al-Qahtani, A. A. Mohammed, and M. Sunar, "Dynamics and control of a robotic arm having four links," *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol. 42, no. 5, pp. 1841-1852, 2017.
- [8] K. Kruthika, B. K. Kumar, and S. Lakshminarayanan, "Design and development of a robotic arm," in *I4C 2016*, Bangalore, India, 2016, pp. 1-4.
- [9] M. A. M. Adzeman, M. H. M. Zaman, M. F. Nasir, M. Faisal, and S. M. M. Ibrahim, "Kinematic Modeling of A Low Cost 4 DOF Robot Arm System," *International Journal of Emerging Trends in Engineering Research*, vol. 8, no. 10, 2020.
- [10] M. Gouasmi, M. Ouali, B. Fernini, and M. h. Meghatria, " Kinematic modelling and simulation of a 2-R robot using solidworks and verification by MATLAB/ Simulink," *International Journal of Advanced Robotic Systems*, vol. 9, no. 6, pp. 245, 2012.

- [11] T. Parthasarathy, V. Srinivasaragavan, and S. Santhanakrishnan, "ADAMS- MATLAB co-simulation of a serial manipulator," in *ICMME 2016*, Elazig, Turkey, 2017, pp. 1-6.
- [12] S. B. Hussain and F. Kanwal, "Design of a 3 DOF robotic arm," in *INTECH 2016*, Dublin, Ireland, 2016, pp. 145-149.
- [13] F. Ionescu, "Modelling and simulation in mechatronics," in *IFAC MCPL 2007*, Sibiu, Romania, 2007, pp. 301-312.
- [14] M. A. Qassem, I. Abuhadrous, and H. Elaydi, "Modeling and Simulation of 5 DOF educational robot arm," in *ICACC 2010*, Shenyang, China, 2010, pp. 569-574.
- [15] S. M. Mariappan and A. Veerabathiran, "Modelling and simulation of multi spindle drilling redundant SCARA robot using SolidWorks and MATLAB/ SimMechanics," *Revista Facultad de Ingenieria Universidad de Antioquia*, no. 81, pp. 63-72, 2016.
- [16] G. GÎLCĂ, "KINEMATICS ANALYSIS AND MODELING IN MATLAB OF THE 6 DOF ROBOTIC ARM," *Fiability & Durability/Fiabilitate si Durabilitate*, no. 1, pp. 180-187, 2020.
- [17] T. Younas, M. Khan, S. Urooj, N. Bano, and R. Younas, "Four Degree of Freedom Robotic Arm," in *ICETAS 2017*, Salmabed, Bahrain, 2017, pp. 1-4.
- [18] B. Guangbing, L. Shizhao, and Z. Hong, "Kinematics modeling of a 4 - DOF robotic arm," in *MSMEE 2017*, Dalian, China, 2017, pp. 400-408.
- [19] P. Somrerak, T. Komkrich, S. Charoon, L. Jirapong, and P. Sai-yan, "The development of 3-axis robot arm for material handling," in *IE Network conference*, Phetchaburi, Thailand, 2012, pp. 1248-1253.

การศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกในเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นในท่อพินปลา

The Study of Paddy Drying in Zig Zag Pipe Spouted Bed Dryer

ณัฐพงษ์ วงศ์บัปพา* ทวิช จิตรสมบุญ

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, นครราชสีมา, 30000

Nuttapong Wongbubpa* Tawit Chitsomboon

School of Mechanical Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology,

Nakhon Ratchasima, 30000

*Corresponding author Email: Nuttapong1441.W@gmail.com

(Received: March 5, 2021; Revised: April 19, 2022; Accepted: April 25, 2022)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาถึงความสามารถขั้นต้นในการลดความชื้นของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่นในท่อพินปลา เครื่องอบแห้งต้นแบบนี้ใช้แนวคิดใหม่ที่สามารถอบแห้งได้อย่างรวดเร็ว โดยการบังคับให้ข้าวเปลือกไหลในท่ออบแห้งแบบเป็นช่องสลับไปมา เทคนิคนี้ช่วยห้วงเวลาการเป่าพ่นให้ยาวนานขึ้นกว่าปกติและยังทำให้เกิดการคลุกเคล้าระหว่างเมล็ดพืชกับอากาศร้อนที่มากขึ้น ซึ่งจะเกิดการอบแห้งที่รวดเร็วและใช้พลังงานความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพ ในงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษการทำงานขั้นต้นด้วยการอบแห้งข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 น้ำหนัก 4 kg ที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80 100 และ 120°C ความเร็วลมในการอบแห้ง 16 m·s⁻¹ อบแห้งในท่ออบแห้งที่ทำจากช่องมุม 90 องศา แบบ 8 ช่อง และแบบ 16 ช่อง ผลการทดสอบพบว่า การอบแห้งในท่อแบบ 16 ช่อง ให้อัตราการอบแห้งสูงกว่าแบบ 8 ช่อง การอบแห้งที่อุณหภูมิสูงให้อัตราการอบแห้งสูงกว่าที่อุณหภูมิต่ำ การอบแห้งในท่อแบบ 16 ช่อง ใช้พลังงานปฐมภูมิจำเพาะ (Primary Specific Energy Consumption, SEC_{Heater}) ในการอบแห้งต่ำกว่าการอบแห้งในท่อแบบ 8 ช่อง ในขณะที่พลังงานทุติยภูมิจำเพาะ (Secondary Specific Energy Consumption, SEC_{Blower}) สำหรับการอบแห้งในท่อแบบ 8 ช่อง มีค่าต่ำกว่าการอบแห้งในท่อแบบ 16 ช่อง การอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำให้ค่าพลังงานกระตุ้นที่ทำให้เกิดการระเหยออกจากเมล็ดข้าวเปลือกมากกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง เช่นเดียวกับการอบแห้งในท่อแบบ 8 ช่อง จะให้ค่าพลังงานกระตุ้นที่มากกว่าการอบแห้งในท่อแบบ 16 ช่อง ค่าพลังงานกระตุ้นของการทดลองมีค่าอยู่ระหว่าง 43.78 – 170.74 kJ·mol⁻¹

คำสำคัญ: เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าพ่นในท่อพินปลา อัตราการอบแห้ง การใช้พลังงาน พลังงานกระตุ้น

ABSTRACT

The objective of this research was studied on the drying potentiality of paddy in Zig - zag piped spouted bed dryer. The prototype of the dryer was designed and fabricated in the modern concept which can rapidly dry according to the enforcement of paddy flow in the test section. This technique is used to provide the extended drying period and well mixing of paddy and hot air in the dryer which affected in reducing the drying time and increasing in energy consumption efficiency in the dryer. The

4 kg Khao Dawk Mali 105 rice specie paddy is testing material mixing. Using the 80°C, 100°C and 120°C hot air as the working fluid at the air velocity of 16 m·s⁻¹. Two type of the 90° elbow test section (8 and 16 turning elbow) are used in this experiment. The experimental results show that at high air temperature 16 turning elbow pipe performs higher drying rate and consumes lower primary specific energy (SEC_{Heater}) than 8 turning elbow pipe. While 8 turning elbow pipe gives lower secondary specific energy (SEC_{Blower}) than 16 turning elbow pipe. The lower hot air temperature required the more activated energy in evaporating the moisture of paddy grain than higher hot air temperature. Likewise, 8 turning elbow test section yields more activated energy than 16 turning elbow test section. As the activated energy of 43.78 to 170.74 kJ·mol⁻¹ were used in this experiment.

Keyword: Zig Zag Pipe Spouted Bed Dryer, Drying Rate, Energy Consumption, Activation Energy.

1. บทนำ

เครื่องอบแห้งผลิตผลทางการเกษตรถือเป็นเทคโนโลยีที่มีบทบาทสำคัญต่อผู้ประกอบการด้านการแปรรูปผลผลิตเกษตรและอาหารเป็นอย่างมาก เนื่องจากวัตถุดิบที่ใช้ในแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อจำหน่ายคือผลผลิตทางการเกษตรยังมีความชื้นสูง กระบวนการดังกล่าวจำเป็นต้องมีการลดความชื้นเข้ามาเกี่ยวข้องด้วยเสมอ โดยเฉพาะอย่างยิ่งข้าวเปลือกซึ่งเป็นผลผลิตทางการเกษตรที่มีปริมาณมากในฤดูการเก็บเกี่ยว และมีความชื้นค่อนข้างสูงถึงประมาณ 22 – 25 %wb. [1] จึงจำเป็นต้องลดความชื้นให้อยู่ในเกณฑ์มาตรฐานช่วง 12 – 14 %wb [1] ก่อนการเก็บรักษาเพื่อรอการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ ทั้งนี้เพื่อป้องกันความเสียหายอันเกิดจากเชื้อราและเพื่อให้สามารถยืดอายุการเก็บให้ยาวนานยิ่งขึ้น นักวิจัยจำนวนมากได้ทำการพัฒนาเทคโนโลยีเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกเพื่อแก้ไขปัญหาต่าง ๆ ดังเช่น แก้ไขปัญหาข้อจำกัดในเรื่องแรงงานและพื้นที่สำหรับการตากแบบลาน และแก้ไขปัญหาการเสื่อมสภาพจากการจัดเก็บในขณะที่ข้าวเปลือกยังมีความชื้นสูงอยู่ เทคนิคการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยแบบต่าง ๆ ที่คิดค้นและพัฒนาขึ้นจะช่วยทำให้สามารถอบแห้งข้าวเปลือกได้อย่างรวดเร็ว ประหยัดพลังงาน และได้คุณภาพข้าวที่ดีหลังจากการอบแห้ง ซึ่งมีจุดเด่นและจุดด้อยแตกต่างกัน

ไป ดังเช่น การสร้างเครื่องอบแห้งโดยให้เมล็ดข้าวอยู่กับที่ (Fixed – bed dryer) การสร้างเครื่องอบแห้งโดยให้เมล็ดข้าวไหล (Moving – bed dryer) เป็นต้น ในปี 2006 T. Chitsomboon et al. [2] ได้ศึกษาอัตราการอบแห้งและการใช้พลังงานของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระ (เป็นลักษณะที่เมล็ดข้าวตกลงอย่างอิสระจากที่สูงสวนทางกับการไหลของอากาศร้อนที่เป่าขึ้นในท่ออบแห้ง) โดยพบว่าเครื่องอบแห้งชนิดนี้สามารถลดความชื้นข้าวเปลือกจำนวน 1.5 kg จาก 23.75 %db ให้เหลือ 15.5 %db ในเวลาประมาณ 30 s และพบว่าอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานของเครื่องอบแห้งมีค่าอยู่ในช่วง 1.43 – 3.14 MJ·kg_{water}⁻¹ ในปี 2008 K. Pechnumkheaw et al. [3] รายงานว่าความเร็วมีผลอย่างมากต่ออัตราการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งข้าวแบบหล่นอิสระอย่างต่อเนื่อง โดยพบว่าเวลาของการอบแห้งลดลงจาก 150 min เหลือ 82 min และ 130 min เหลือ 60 min เมื่อเปลี่ยนความเร็วอากาศอบแห้งจาก 1 m·s⁻¹ เป็น 4 m·s⁻¹ ในปี 2012 C. Nimmol [4] ทำการศึกษาประสิทธิภาพการใช้พลังงานของกระบวนการลดความชื้นข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่ใช้ท่ออบแห้งชนิดท่อเกลียว กระบวนการลดความชื้นของวัสดุของเครื่องอบแห้งแบบนี้จะเกิดขึ้นภายในท่อแนวดิ่งที่ใช้เป็นท่ออบแห้ง (Drying

column) ซึ่งอากาศร้อนที่ใช้เป็นตัวกลางในการลดความชื้นจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็วสูงไปพร้อมกับวัสดุที่ต้องการลดความชื้น ส่งผลให้ความชื้นในวัสดุระเหยไปพร้อมกับกระแสอากาศ จากการทดลองพบว่าเครื่องอบแห้งที่พัฒนาโดยใช้หอบแห้งชนิดเกลียวนั้นสามารถลดความชื้นของข้าวเปลือกได้ถึงมากถึง 4.4 - 10.3 %db ภายในระยะเวลาอันสั้น (ต่ำกว่า 5 s) และความชื้นต่ำสุดของข้าวเปลือกที่ผ่านการลดความชื้นมีค่าเท่ากับ 17.7 %db และอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานต่ำสุดของงานวิจัยมีค่าเท่ากับ $1.78 \text{ MJ} \cdot \text{kg}_{\text{water}}^{-1}$ ในปี 2018 K. Jaito et al. [5] ได้ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบพาหะลมหมุนเวียน ทำการทดสอบ 2 รูปแบบคือ การอบแห้งแบบไม่ติดตั้งไซโคลน และติดตั้งไซโคลน ทำการประเมินคุณภาพข้าวจากค่าความชื้นและค่าร้อยละต้นข้าว รวมทั้งประเมินสมรรถนะในการอบแห้งจากค่าอัตราการอบแห้งและความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะ (SEC) ผลการทดสอบพบว่า การอบแห้งแบบไม่ติดตั้งไซโคลนที่อัตราการป้อน $6.35 \text{ kg} \cdot \text{min}^{-1}$ ให้คุณภาพข้าวเปลือกหลังอบแห้งดีที่สุดและอัตราการอบแห้งสูงสุด โดยมีค่า SEC ต่ำสุด เท่ากับ $5.44 \text{ MJ} \cdot \text{kg}_{\text{water}}^{-1}$ ขณะที่การอบแห้งแบบติดตั้งไซโคลนนั้นสามารถนำอากาศที่ผ่านการอบแห้งแล้วกลับมาใช้ใหม่ได้ แต่จะให้อัตราการอบแห้งที่ลดลงและมีความสิ้นเปลืองพลังงานจำเพาะของการอบแห้งที่สูงขึ้น เนื่องจากอากาศที่นำกลับมาใช้ใหม่มีความชื้นสูง ทำให้ความสามารถในการระเหยน้ำออกจากข้าวเปลือกในคอลัมน์ต่ำลง เป็นผลให้จำนวนรอบในการอบแห้งเพิ่มขึ้นการใช้พลังงานจึงมากขึ้นตามไปด้วย ในปี 2020 S. Sritunyakorn et al. [6] ได้ทำการศึกษาผลของอุณหภูมิอากาศอบแห้งต่อการอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นหล่นอิสระ โดยพิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิที่มีผลต่ออัตราส่วนความชื้น รวมถึงวิเคราะห์ค่าของพลังงานที่ใช้ในการอบแห้งและคุณภาพข้าวเปลือกหลังการขัดสีด้วย ผลการทดลองพบว่าการอบแห้งด้วยอากาศอบแห้งอุณหภูมิสูงจะส่งผลทำให้

อัตราส่วนความชื้นลดลง ใช้เวลาการอบแห้งน้อยลง และ การใช้พลังงานรวมจำเพาะในการอบแห้งมีแนวโน้มลดลงด้วยเช่นกัน ในขณะที่เปอร์เซ็นต์ข้าวต้นของข้าวเปลือกหลังการอบแห้งมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงขึ้น เช่นเดียวกับค่าดัชนีความขาวพบว่ามีค่าลดลงเล็กน้อย (0.7 %) เช่นกันเมื่อเทียบกับข้าวอ้างอิง ในปี 2020 N. Wongbubpa et al. [7] ได้คิดค้นเทคนิคการอบแห้งข้าวเปลือกรูปแบบใหม่ โดยนำเสนอการคำนวณเชิงตัวเลขรูปแบบการไหลของอากาศอบแห้งแบบขนานในหอบแห้งแนวดิ่งแบบเป็นช่วงขึ้น โดยหวังว่าการปรับเปลี่ยนพฤติกรรมการไหลของอากาศให้มีลักษณะเป็นแบบช่วง (Pulse flow) จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการอบแห้งให้ดียิ่งขึ้น หลักการทำงานของระบบดังกล่าวจะเป็นการป้อนอากาศอบแห้งจากด้านล่างของหอบแห้ง เมล็ดข้าวเปลือกที่เคลื่อนที่ในหอบแห้งภายใต้การไหลของลมร้อนแบบเป็นช่วงจะเกิดการเคลื่อนที่แบบ ขึ้น - ลง ตลอดความสูงของหอบแห้งซึ่งเชื่อว่าจะช่วยให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและการถ่ายเทความชื้นระหว่างอากาศกับเมล็ดข้าวเปลือกได้ดีและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น และในปี 2021 N. Wongbubpa et al [8] ได้รายงานผลการศึกษาการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกในหอบแห้งแบบลมร้อนด้วยวิธีการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์เพื่อศึกษาอิทธิพลของรูปแบบการไหลของอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วง (Pulse flow) ที่จะส่งผลต่อพฤติกรรมเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกภายในหอบแห้ง ผลการจำลองพบว่าการสร้างการไหลของอากาศอบแห้งแบบเป็นช่วง (Pulse flow) สามารถเพิ่มระยะการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกในหอบแห้งได้มากกว่าความยาวของหอบแห้ง ความเร็วของการไหลในหอบแห้งมีสภาวะไม่คงที่ขึ้นอยู่กับรูปแบบของช่วงอากาศที่กำหนด ซึ่งทำให้เกิดความปั่นป่วนสำหรับการไหลได้เป็นอย่างดีและส่งผลกระทบต่อค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ด้วยเช่นกัน

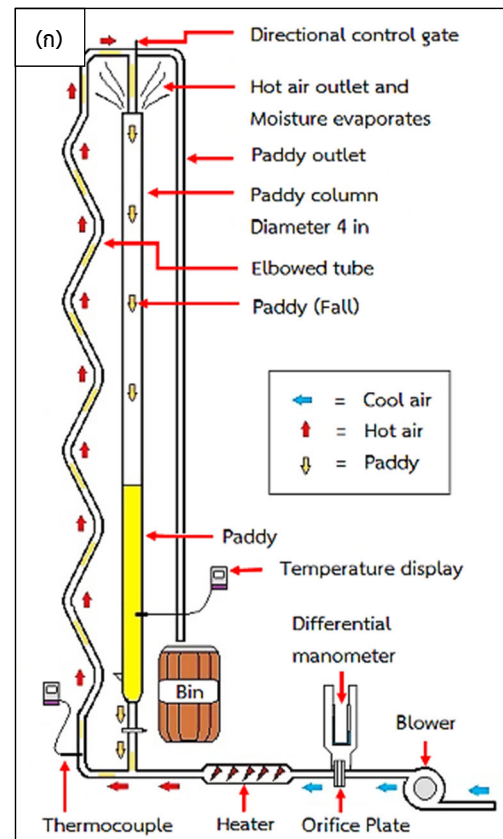
ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้นำเสนอการอบแห้งข้าวเปลือกรูปแบบใหม่ โดยใช้การเป่าพ่นลมร้อนที่ใช้เป็นอากาศ

อบแห้งให้พามาเมล็ดข้าวเปลือกเคลื่อนที่ไปพร้อม ๆ กันในท่ออบแห้ง โดยได้ออกแบบให้ท่ออบแห้งมีลักษณะเป็นท่อฟันปลา (Zig - Zag) เรียงตัวยาวขึ้นไปในแนวตั้ง เพื่อช่วยหน่วงเวลาการเคลื่อนที่ของเมล็ดข้าวเปลือกและทำให้เกิด การไหลปั่นป่วนคลุกเคล้าระหว่างข้าวเปลือกและอากาศอบแห้งยิ่งขึ้น ทำการศึกษาถึงความสามารถขึ้นต้นของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าฟันในท่อฟันปลา โดยเป็นการเปรียบเทียบการอบแห้งข้าวเปลือกในท่ออบแห้งที่เป็นข้องอแบบ 8 และแบบ 16 ข้องอ เมื่อได้รับผลกระทบจากอุณหภูมิของอากาศอบแห้งที่แตกต่างกัน โดยคาดหวังว่าวิธีการนี้จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการถ่ายเทความร้อนให้สูงขึ้น

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 เครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าฟันในท่อฟันปลา

ต้นแบบของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบเป่าฟันในท่อฟันปลา แสดงดังรูปที่ 1 มีการหลักการทำงานและส่วนประกอบดังต่อไปนี้ เริ่มจากเครื่องเป่าลม (Blower) ของ Makita รุ่น UB1100 ที่ถูกควบคุมความเร็วด้วยอุปกรณ์ปรับแรงดันไฟฟ้า (Variac) ของ Yamabishi รุ่น S-260-10M ดูดอากาศจากสิ่งแวดล้อมผ่านชุด Orifice plate เข้าสู่เครื่องทำความร้อน (Heater) ที่ควบคุมอุณหภูมิด้วยชุดควบคุมแบบ PID ของ Shinko รุ่น JCS - 33A เพื่อใช้เป็นอากาศอบแห้ง อากาศอบแห้งนี้จะเคลื่อนที่เข้าสู่ท่ออบแห้งแบบข้องอ (Elbowed tube) ซึ่งเป็นท่ออบแห้งที่วางตัวในแนวตั้งแบบฟันปลา (Zig - Zag) ในขณะเดียวกันข้าวเปลือกขึ้นจะถูกปล่อยจากถังพัก (Paddy column) และถูกลำเลียงไปพร้อม ๆ กับอากาศอบแห้งให้เข้าสู่ส่วนล่างของท่ออบแห้ง และถูกนำออกที่ทางปลายท่อด้านบน แล้วตกลงสู่ถังพัก (Paddy column) เพื่อรอการอบแห้งในรอบต่อไป



รูปที่ 1 (ก) ระบบของเครื่องอบแห้งต้นแบบที่ใช้ทดสอบ

(ข) เครื่องอบแห้งต้นแบบ

การทำงานลักษณะนี้ทำให้ข้าวเปลือกมีเวลาอยู่ในท่ออบแห้งนานยิ่งขึ้นส่งผลให้ระยะเวลาที่ข้าวเปลือกสัมผัสกับอากาศอบแห้งเพิ่มมากขึ้น ข้าวเปลือกขึ้นและอากาศอบแห้งจะเคลื่อนที่ในทิศทางเดียวกันด้วยการเป่าพ่นเมล็ดข้าวให้ไหลไปตามกระแสอากาศ อากาศอบแห้งที่ไหลเข้าสู่ท่ออบแห้งที่เป็นช่องจะมีความเร็วสูง และเกิดความปั่นป่วนในการไหลเพิ่มขึ้นเกิดการแลกเปลี่ยนความร้อนและความชื้นได้เป็นอย่างดี จึงคาดว่าจะช่วยลดระยะเวลาการอบแห้ง อีกทั้งยังจะทำให้อัตราการอบแห้งสูงมากขึ้นอีกด้วย

ต้นแบบเครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้นในการทดลองนี้เป็นเครื่องอบแห้งขนาดเล็กมีเส้นผ่านศูนย์กลางของท่ออบแห้งขนาด 0.0381 m (1.5 in) ความยาวท่ออบแห้งที่เป็นช่องโดยรวม 5.26 m ทั้งแบบที่เป็น 8 ช่อง และ 16 ช่อง แสดงดังรูปที่ 2 ความยาวของถังพักข้าวเปลือก (Paddy column) 3 m เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.1016 m (4 in) ใช้เครื่องทำความร้อน (Heater) ขนาด 4 kW มอเตอร์พัดลม (Blower) ขนาด 1.2 kW ซึ่งสามารถปรับความร้อนและความเร็วลมได้



รูปที่ 2 ท่ออบแห้งแบบ 8 และ 16 ช่อง

2.2 การศึกษาความสามารถของเครื่องอบแห้งต้นแบบ

ศึกษาความสามารถในการทำงานขั้นต้นของเครื่องอบแห้งต้นแบบโดยใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้งที่ 80 100 และ 120°C โดยวัดอุณหภูมิอากาศที่ทางเข้าห้องอบแห้งด้วย Thermocouple type K และควบคุมอุณหภูมิด้วยชุดควบคุมแบบ PID ในการทดสอบใช้ความเร็วอากาศอบแห้งเฉลี่ย $16 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ ซึ่งได้จากการตรวจวัดด้วยชุด Differential manometer และ Orifice plate ทำการทดลองโดยใช้ข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 จำนวน 4 kg ที่อัตราการป้อนข้าวเปลือก $1.44 \text{ kg}\cdot\text{min}^{-1}$ ความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 21.4 %wb ทดสอบอบแห้งด้วยท่ออบแห้งแบบ 8 และ 16 ช่อง

ในขณะทำการอบแห้งข้าวเปลือก ข้าวเปลือกจะไหลเวียนอย่างช้า ๆ และเป็นขั้น ๆ ทำการเก็บตัวอย่างข้าวเปลือกที่ตกลงสู่ถังพัก (Paddy column) ตามระยะเวลาที่กำหนดในนาที่ที่ 0 1 2 4 8 12 16 20 และตัวอย่างถัดไปจะเก็บตัวอย่างทุก 5 นาที จนกระทั่งถึงค่าความชื้นข้าวเปลือกที่ต้องการ (ประมาณ 14 %wb) จึงยุติการทดลอง ตัวอย่างข้าวเปลือกที่เก็บไว้จะนำไปวิเคราะห์หาค่าความชื้น ด้วยวิธีอบลมร้อน (Hot air oven) ที่อุณหภูมิ 103°C เป็นเวลา 72 h [9] เมื่อครบเวลาแล้วจะนำมาชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งน้ำหนัก แล้วจึงคำนวณค่าความชื้นของเมล็ดข้าวเปลือกต่อไป

2.3 การประเมินสมรรถนะการอบแห้ง

การประเมินสมรรถนะในการอบแห้งจะพิจารณาจากเวลาในการอบแห้ง อัตราการอบแห้ง พลังงานที่ใช้ในการอบแห้ง และพลังงานกระตุ้นที่ทำให้เกิดการระเหยน้ำออกจากเมล็ดข้าวเปลือก

2.3.1 อัตราการอบแห้ง (Drying rate)

นำข้อมูลการทดลองมาวิเคราะห์ในรูปของอัตราการอบแห้ง การคำนวณแสดงดังสมการ (1) [10]

$$D.R. = \frac{M_{w,i} - M_{w,f}}{t_{total}} \quad (1)$$

โดย D.R. คือ อัตราการอบแห้ง หน่วย $\%wb \cdot s^{-1}$, $M_{w,i}$ คือ ร้อยละความชื้นข้าวเปลือกเริ่มต้น หน่วย $\%wb$, $M_{w,f}$ คือ ร้อยละความชื้นข้าวเปลือกสุดท้าย หน่วย $\%wb$ และ t_{total} คือ ระยะเวลารวมในการอบแห้ง หน่วย s

2.3.2 พลังงานที่ใช้ในกระบวนการลดความชื้น (Specific Energy Consumption, SEC)

อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานความร้อนปฐภูมิ จำเพาะหรือพลังงานที่ใช้ในการระเหยน้ำออก จะคำนวณในรูปของพลังงานความร้อนที่ใช้ในการเพิ่มอุณหภูมิให้กับอากาศที่ผ่านเครื่องทำความร้อน การคำนวณแสดงดังสมการ (2) [10]

$$Q = \dot{m}_a [(1 - W_a) C_a + W_a C_v] (T_{out} - T_{in}) \Delta t \quad (2)$$

โดย Q คือ พลังงานความร้อนที่ใช้เพิ่มอุณหภูมิให้อากาศ หน่วย MJ, $\dot{m}_a$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแห้ง หน่วย $kg \cdot s^{-1}$, W_a คือ ความชื้นสัมบูรณ์อากาศที่ทางเข้าเครื่องทำความร้อน หน่วย $kg \cdot kg_{dry \ air}^{-1}$, C_a คือ ความร้อนจำเพาะอากาศแห้งเฉลี่ย หน่วย $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$, C_v คือ ความร้อนจำเพาะของไอน้ำในอากาศเฉลี่ย หน่วย $kJ \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$, T_{out} คือ อุณหภูมิอากาศออกจากเครื่องทำความร้อน หน่วย $^{\circ}C$, T_{in} คือ อุณหภูมิอากาศก่อนเข้าเครื่องทำความร้อน หน่วย $^{\circ}C$ และ Δt คือ ระยะเวลาอบแห้งรวมเฉพาะช่วงที่มีข้าวเปลือกอยู่ในท่ออบแห้ง หน่วย s

อัตราการไหลเชิงมวล ($\dot{m}_a$) การคำนวณแสดงดังสมการ (3) [10]

$$\dot{m}_a = \rho A \bar{V} \quad (3)$$

โดย $\dot{m}_a$ คือ อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศแห้ง หน่วย $kg \cdot s^{-1}$, ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศอบแห้งเฉลี่ย หน่วย $kg \cdot m^{-3}$, A คือ พื้นที่หน้าตัดของท่ออบแห้ง หน่วย m^2 และ $\bar{V}$ คือ ความเร็วเฉลี่ยตลอดหน้าตัดเครื่องอบแห้ง หน่วย $m \cdot s^{-1}$

น้ำหนักแห้งของข้าวเปลือกเริ่มต้นเฉลี่ย (w_d) การคำนวณแสดงดังสมการ (4) [10]

$$W_d = W_i (1 - m_{w,i}) \quad (4)$$

โดย W_d คือ น้ำหนักแห้งของข้าวเปลือก หน่วย kg, W_i คือ น้ำหนักข้าวเปลือกชื้นเริ่มต้น หน่วย kg และ $m_{w,i}$ คือ เศษส่วนความชื้นมาตรฐานเปียกเริ่มต้นของข้าวเปลือก (0.214 wb)

ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากการอบแห้ง (Δw_w) การคำนวณแสดงดังสมการ (5) [10]

$$\Delta W_w = W_d (M_{d,i} - M_{d,f}) \quad (5)$$

โดย ΔW_w คือ ปริมาณน้ำที่ระเหยออกจากการอบแห้ง หน่วย kg, $M_{d,i}$ คือ ร้อยละความชื้นเริ่มต้น หน่วย $\%db$ และ $M_{d,f}$ คือ ร้อยละความชื้นสุดท้าย หน่วย $\%db$

ดังนั้นอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานปฐภูมิจำเพาะ (Primary Specific Energy Consumption, SEC_{Heater}) ของเครื่องอบแห้งจึงคำนวณได้ดังสมการ (6) [10]

$$SEC_{Heater} = \frac{Q}{\Delta W_w} \quad (6)$$

อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานทุติยภูมิจำเพาะ (Secondary Specific Energy Consumption, SEC_{Blower}) หรือพลังงานที่ใช้สำหรับเครื่องเป่าลมของเครื่องอบแห้ง คำนวณได้ดังสมการ [10]

$$SEC_{Blower} = \left(\frac{V \cdot I}{w_i - w_f} \right) \Delta t \quad (7)$$

โดย V และ I คือ แรงดันไฟฟ้า หน่วย volt และ กระแสไฟฟ้า หน่วย amp ที่จ่ายให้กับเครื่องเป่าลมตามลำดับ w_i คือ น้ำหนักข้าวเปลือกชื้นเริ่มต้น หน่วย

kg, w_f คือ น้ำหนักข้าวเปลือกขึ้นสุดท้าย หน่วย kg และ Δt คือ ระยะเวลาอบแห้งรวมเฉพาะช่วงที่มีข้าวเปลือกอยู่ในท่ออบแห้ง หน่วย s

2.3.3 พลังงานกระตุ้นที่ทำให้เกิดการระเหยนํ้าออกจากเมล็ดข้าวเปลือก (Activation energy)

พลังงานกระตุ้นหรือพลังงานต่ำสุดที่กระตุ้นให้เกิดการระเหยนํ้าออกจากเมล็ดข้าวเปลือก การวิเคราะห์หาค่าพลังงานกระตุ้นประเมินตามสมการอาร์เรเนียส (Arrhenius equation) แสดงดังสมการที่ (8) [11]

$$D_{eff} = D_0 \exp\left(\frac{-E_a}{RT}\right) \quad (8)$$

โดย D_{eff} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล หน่วย $m^2 \cdot s^{-1}$, D_0 คือ ค่าคงที่ของสมการอาร์เรเนียส หน่วย $m^2 \cdot s^{-1}$, E_a คือ ค่าพลังงานกระตุ้น หน่วย $J \cdot mol^{-1}$, R คือ ค่าคงที่ของก๊าซ ($8.314 J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$) และ T คือ อุณหภูมิข้าวเปลือก หน่วย K

สัมประสิทธิ์การแพร่ความชื้นประสิทธิผล (D_{eff}) สำหรับการอบแห้งที่ใช้ระยะเวลานาน การคำนวณแสดงดังสมการ (9) [12]

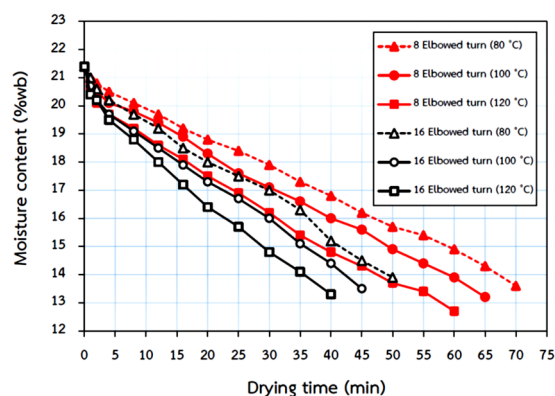
$$MR_t = \frac{8}{\pi^2} \exp\left(\frac{-D_{eff} \pi^2 t}{4L^2}\right) \quad (9)$$

โดย MR_t คือ อัตราส่วนความชื้นเฉลี่ยที่เวลาใด ๆ ไม่มีหน่วย, t คือ เวลาในการอบแห้ง หน่วย s และ L คือ ความหนาของเมล็ดข้าวเปลือก หน่วย m

3. ผลและวิจารณ์

3.1 ผลการอบแห้ง

จากการทดสอบอบแห้งข้าวเปลือกด้วยเครื่องอบแห้งแบบเป่าฟันในท่อฟันปลา พบว่าพฤติกรรมการลดลงของความชื้นมีลักษณะดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 การลดลงของความชื้นกับเวลา

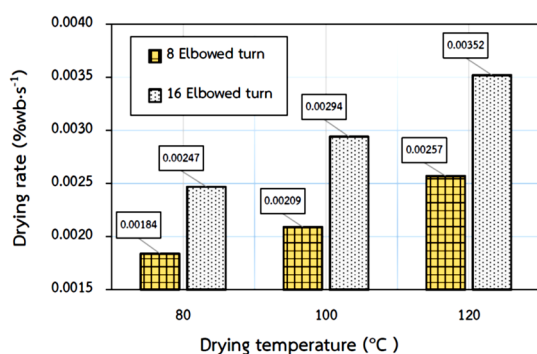
เมื่อพิจารณาความชื้นข้าวเปลือกกับเวลาในการอบแห้งพบว่า ความชื้นข้าวเปลือกลดลงอย่างรวดเร็วและคงที่ตลอดช่วงที่ทำการศึกษา (21.4 - 14 %wb) โดยเฉพาะเมื่อทำการอบแห้งโดยใช้ท่ออบแห้งแบบ 16 ช่อง เนื่องจากการอบแห้งในท่ออบแห้งนี้เมล็ดข้าวมีเวลาอยู่ในท่ออบแห้งได้นานกว่าแบบ 8 ช่อง อีกทั้งการอบแห้งในท่อแบบ 16 ช่อง คาดว่าอากาศอบแห้งที่ไหลภายในท่อ จะเกิดการหมุนวนที่มากกว่าท่ออบแห้งแบบ 8 ช่อง เนื่องจากมีช่วงหักงอของท่ออบแห้งที่มากกว่า (ในตำแหน่งที่มีการหักงอของท่อจะถือเป็นอุปสรรคที่ช่วยขัดขวาง และช่วยหมุนวนการไหลของอากาศและเมล็ดข้าวให้เคลื่อนที่ช้าลง) ซึ่งจะส่งผลดีต่อการอบแห้งที่ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนและความชื้นระหว่างเมล็ดข้าวกับอากาศได้มากขึ้น และเมื่อทำการเพิ่มอุณหภูมิอากาศอบแห้งพบว่าทำให้ความชื้นข้าวเปลือกและเวลาที่ใช้ในการอบแห้งมีค่าลดลงอีกด้วย เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้ข้าวเปลือกได้รับความร้อนในการระเหยนํ้ามากขึ้น อีกทั้งอากาศที่ร้อนนั้นมีค่าความชื้นสัมพัทธ์ต่ำ ทำให้สามารถรับความชื้นในรูปไอนํ้าที่ระเหยออกจากเมล็ดข้าวได้ดียิ่งขึ้น จึงทำให้เมล็ดข้าวสามารถคายความชื้นออกจากเมล็ดได้อย่างรวดเร็ว ส่งผลให้เวลารวมสำหรับการอบแห้งลดลงตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้องกับผลการอบแห้งของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกแบบข้าวหล่นอิสระ [2] [3] เครื่องอบแห้งแบบพาหะลมที่ใช้ท่ออบแห้งชนิดท่อเกลียว [4] และเครื่องอบแห้งแบบเป่าฟันหล่นอิสระ [6] ที่แสดง

ให้เห็นว่าอุณหภูมิอากาศอบแห้งส่งผลกระทบต่ออัตราการอบแห้งของเครื่องอบแห้งข้าวเปลือกเป็นอย่างมาก

ส่วนลักษณะความชื้นที่ลดลงอย่างคงที่อาจเป็นผลเนื่องจากการใช้ความเร็วลมและอุณหภูมิอากาศอบแห้งที่สูง จึงทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนที่มีประสิทธิภาพสูงเป็นผลให้สามารถลดความชื้นได้เร็วและคงที่ตลอดการอบแห้ง

3.2 อัตราการอบแห้ง (Drying rate)

จากการทดสอบพบว่าอุณหภูมิอากาศอบแห้งเป็นปัจจัยหลักที่มีผลต่อการเพิ่มอัตราการอบแห้งอย่างชัดเจน โดยเมื่ออุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงขึ้นอัตราการอบแห้งจะเพิ่มขึ้นด้วยเช่นกัน เช่นเดียวกันกับเมื่อพิจารณาชนิดของท่ออบแห้งจะเห็นได้ว่าท่ออบแห้งแบบ 16 ช่องอ สามารถเพิ่มอัตราการอบแห้งได้มากกว่าแบบ 8 ช่องอ ที่ทุก ๆ อุณหภูมิ ผลของอัตราการอบแห้งในช่วงความชื้น 21.4 - 14 %wb แสดงดังรูปที่ 4



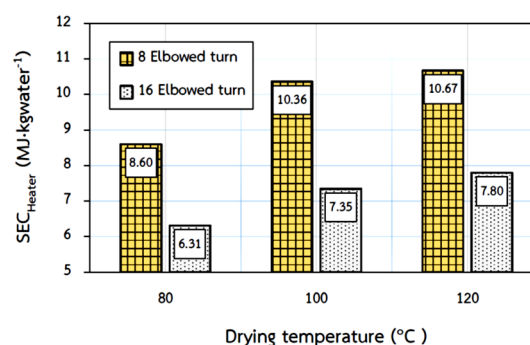
รูปที่ 4 อัตราการอบแห้งกับอุณหภูมิอากาศอบแห้ง

จากรูปที่ 4 อัตราการอบแห้งที่เพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิอากาศอบแห้งนั้น สามารถอธิบายได้ตามสมการของ Fick's Law Diffusion [13] ซึ่งปริมาณมวลสารที่ออกจากเมล็ดข้าวเปลือกขึ้นกับค่าสัมประสิทธิ์การแพร่ตามสมการดังกล่าว และสัมประสิทธิ์การแพร่ของสมการนั้นขึ้นอยู่กับอุณหภูมิของเมล็ดข้าวเปลือกด้วย เมื่ออุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงขึ้นทำให้อุณหภูมิของเมล็ดข้าวสูงขึ้นตามเนื่องจากเกิดการถ่ายเทความร้อนไปแหล่งที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า ค่าสัมประสิทธิ์การแพร่จึงมีค่าสูงขึ้นตามอุณหภูมิ

ของเมล็ด และทำให้เกิดการถ่ายเทมวลสารออกจากเมล็ดข้าวเปลือกได้มากขึ้น จึงทำให้อัตราการอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงมีค่ามากตาม

3.3 พลังงานปฏิกิริยาจำเพาะในการอบแห้ง (Primary Specific Energy Consumption, SEC_{Heater})

อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานปฏิกิริยาจำเพาะ (SEC_{Heater}) ที่คำนวณได้ มีค่าอยู่ระหว่าง 6.31 - 10.67 $MJ \cdot kg_{water}^{-1}$ กรณีการอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C ใช้ท่ออบแห้งแบบ 8 ช่องอ พบว่ามีการใช้พลังงานปฏิกิริยาจำเพาะมากที่สุด ส่วนกรณีที่ใช้พลังงานปฏิกิริยาจำเพาะที่น้อยที่สุดพบในการอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80°C ใช้ท่ออบแห้งแบบ 16 ช่องอ ซึ่งมีค่าประมาณ 6.31 $MJ \cdot kg_{water}^{-1}$ อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานปฏิกิริยาจำเพาะของเครื่องอบแห้งแสดงดังรูปที่ 5



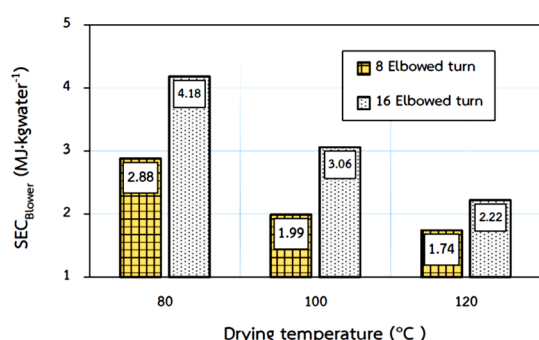
รูปที่ 5 พลังงานปฏิกิริยาจำเพาะกับอุณหภูมิอากาศอบแห้ง

จากรูปที่ 5 พบว่าเมื่ออุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงขึ้นแนวโน้มการใช้พลังงานปฏิกิริยาจำเพาะของเครื่องอบแห้งมีค่าสูงขึ้นไปด้วย เนื่องจากถึงแม้ว่าการใช้อุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงจะสามารถทำให้ความชื้นถ่ายเทออกจากเมล็ดข้าวเปลือกได้รวดเร็วขึ้น แต่ข้อจำกัดเนื่องจากเวลาที่ใช้ในการถ่ายเทความร้อนมีค่าคงที่ (ความเร็วอากาศอบแห้งคงที่) ความร้อนส่วนหนึ่งจึงสูญเสียไปกับอากาศขาออกโดยไม่สามารถถ่ายเทให้กับข้าวเปลือกได้ทัน จึงทำให้อัตราการใช้พลังงานต่อมวลน้ำเพิ่มขึ้นแนวโน้มนี้คล้ายกันทั้งท่ออบแห้งแบบ 8 ช่องอ และแบบ 16 ช่องอ โดยท่ออบแห้งแบบ 16 ช่องอ มีแนวโน้มการ

เพิ่มขึ้นของพลังงานปฏิกิริยาจำเพาะต่ำกว่า ทั้งนี้เพราะสามารถหน่วงเวลาการอบแห้งได้นานกว่าท่ออบแห้งแบบ 8 ข้องอ

3.4 พลังงานทุติยภูมิจำเพาะในการอบแห้ง (Secondary Specific Energy Consumption, SEC_{Blower})

อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานทุติยภูมิจำเพาะ (SEC_{Blower}) ที่ใช้สำหรับเครื่องเป่าลม มีค่าอยู่ระหว่าง $1.74 - 4.18 \text{ MJ} \cdot \text{kg}_{\text{water}}^{-1}$ กรณีการอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 80°C ใช้ท่ออบแห้งแบบ 16 ข้องอ พบว่ามีการใช้พลังงานทุติยภูมิจำเพาะมากที่สุด ส่วนกรณีที่ใช้พลังงานทุติยภูมิจำเพาะน้อยที่สุดพบในการอบแห้งที่อุณหภูมิอากาศอบแห้ง 120°C ใช้ท่ออบแห้งแบบ 8 ข้องอ ซึ่งมีค่าประมาณ $1.74 \text{ MJ} \cdot \text{kg}_{\text{water}}^{-1}$ อัตราการสิ้นเปลืองพลังงานพลังงานทุติยภูมิจำเพาะของเครื่องอบแห้งแสดงดังรูปที่ 6



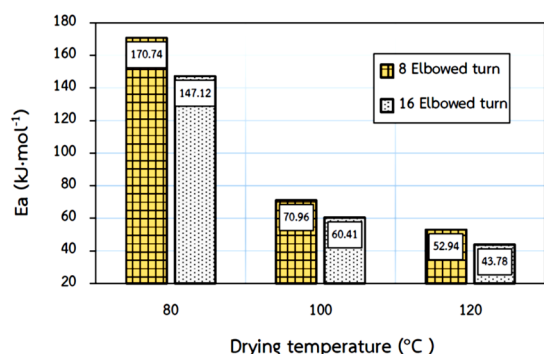
รูปที่ 6 พลังงานทุติยภูมิจำเพาะกับอุณหภูมิอากาศอบแห้ง

ชนิดของข้องอที่ใช้เป็นท่ออบแห้งข้าวเปลือกมีผลต่อพลังงานปฏิกิริยาจำเพาะและทุติยภูมิจำเพาะ กล่าวคือเมื่อใช้ท่ออบแห้งแบบ 16 ข้องอ พบว่ามีการใช้พลังงานปฏิกิริยาจำเพาะต่ำแต่ใช้พลังงานทุติยภูมิจำเพาะสูงกว่าท่ออบแห้งแบบ 8 ข้องอ เนื่องจากการเพิ่มข้องอให้กับท่ออบแห้งเสมือนเป็นการสร้างอุปสรรคต่อการไหลอากาศ ซึ่งจะส่งผลทำให้อากาศอบแห้งเกิดการไหลปั่นป่วนและทำให้ต้องสูญเสียความดันในท่ออบแห้งเพิ่มขึ้น ถึงแม้ว่าการเพิ่มข้องอจะทำให้ต้องใช้พลังงานทุติยภูมิจำเพาะที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากต้องเอาชนะความดันที่สูงตามการเพิ่มขึ้นของ

ข้องอเพื่อให้อากาศมีอัตราการไหลเท่าเดิม แต่ผลกระทบจากการการไหลของอากาศที่ปั่นป่วนมีอิทธิพลที่ดีกว่าในแง่ของการใช้พลังงานน้อย เนื่องจากเมล็ดข้าวเกิดการคลุกเคล้ากับอากาศร้อนในท่ออบแห้งได้ดี ซึ่งลักษณะการไหลดังกล่าวจะสามารถอุ่นให้เมล็ดข้าวมีอุณหภูมิที่สูงและพาความชื้นไปกับอากาศได้มาก จากปัจจัยที่กล่าวมาข้างต้นนี้ส่งผลให้การอบแห้งมีประสิทธิภาพสูง ดังแสดงในรูปที่ 3 และ 4 ซึ่งสามารถขจัดน้ำออกจากเมล็ดข้าวเปลือกได้มากและส่งผลต่ออัตราการสิ้นเปลืองพลังงานรวม (SEC_{Heater} และ SEC_{Blower}) สำหรับการอบแห้งในท่ออบแห้งแบบ 16 ข้องอ ต่ำกว่าแบบ 8 ข้องอ กล่าวคือถึงแม้จะต้องใช้พลังงานให้กับเครื่องเป่าลมสูงขึ้นแต่ก็ยังคงมีความคุ้มค่าในการเลือกใช้งาน เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลของอุณหภูมิที่ส่งผลต่อความสิ้นเปลืองพลังงานทุติยภูมิจำเพาะ (รูปที่ 6) พบว่าอุณหภูมิอากาศอบแห้งสูงขึ้นแนวโน้มการใช้พลังงานทุติยภูมิจำเพาะลดลง เนื่องจากอุณหภูมิอากาศที่สูงส่งผลให้ความหนาแน่น (Density) ของอากาศลดลง ทำให้อัตราการไหลเชิงมวลของอากาศลดลงตาม (ดังแสดงในสมการที่ 3) ทั้งนี้อุณหภูมิอากาศที่สูงขึ้นยังส่งผลต่อค่าความหนืด (Viscosity) ของอากาศทำให้ความดันที่เกิดขึ้นในท่ออบแห้งลดลง อากาศสามารถเคลื่อนตัวได้ง่าย จึงทำให้พลังงานทุติยภูมิจำเพาะมีค่าลดลงตามไปด้วย

3.5 พลังงานกระตุ้นที่ทำให้เกิดการระเหยน้ำออกจากเมล็ดข้าวเปลือก (Activation energy)

ค่าพลังงานกระตุ้นหรือพลังงานต่ำสุดที่กระตุ้นให้เกิดการระเหยน้ำออกจากเมล็ดข้าวเปลือกของการทดสอบด้วยเครื่องอบแห้งนี้มีค่าอยู่ระหว่าง $43.78 - 170.74 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1}$ โดยพบว่า กรณีการอบแห้งที่อุณหภูมิสูงจะให้ค่าพลังงานกระตุ้นสำหรับการระเหยน้ำน้อยกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำ เช่นเดียวกับการทดสอบอบแห้งในท่อแบบ 16 ข้องอ ก็จะทำให้ค่าพลังงานกระตุ้นสำหรับการระเหยน้ำน้อยกว่าการทดสอบอบแห้งในท่อแบบ 8 ข้องอ ค่าพลังงานกระตุ้นของเครื่องอบแห้งแสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 พลังงานกระตุ้นกับอุณหภูมิอากาศอบแห้ง

เนื่องจากอุณหภูมิอากาศอบแห้งเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อกระบวนการอบแห้ง หากอุณหภูมิอากาศอบแห้งน้อยการระเหยน้ำออกจากเมล็ดข้าวเปลือกก็เกิดขึ้นได้ยากเมื่อเทียบกับการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง ดังนั้นการอบแห้งที่อุณหภูมิต่ำจึงต้องใช้พลังงานกระตุ้นที่มากกว่าการอบแห้งที่อุณหภูมิสูง เพื่อกระตุ้นให้เกิดการระเหยน้ำออกจากเมล็ดข้าว เช่นเดียวกันกับกรณีการทดสอบเพิ่มช่องให้ออกท่ออบแห้ง จากที่ได้กล่าวไว้แล้วในหัวข้อที่ผ่านมาว่าการเพิ่มช่องให้ออกท่ออบแห้งสามารถลดเวลาการอบแห้งและเพิ่มอัตราการอบแห้งได้ เพื่อสนับสนุนข้อมูลที่กล่าวไว้แล้วนั้นดังจะเห็นได้จากค่าพลังงานกระตุ้น (รูปที่ 7) ของการทดสอบอบแห้งในท่อแบบ 16 ช่อง จะให้ค่าพลังงานกระตุ้นต่ำกว่าการทดสอบอบแห้งในท่อแบบ 8 ช่อง ในทุก ๆ อุณหภูมิ

4. สรุปผล

การศึกษาขั้นต้นถึงความสามารถของเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นในท่อพ่นปลาเมื่ออบแห้งข้าวเปลือกพันธุ์ขาวดอกมะลิ 105 พบว่าเครื่องอบแห้งมีสภาวะการทำงานที่เหมาะสมเมื่อใช้ท่ออบแห้งแบบ 16 ช่อง มีอัตราการสิ้นเปลืองพลังงานปฏิกิริยาจำเพาะต่ำสุด เท่ากับ $6.31 \text{ MJ} \cdot \text{kg}_{\text{water}}^{-1}$ และให้อัตราการอบแห้งสูงสุดที่ $12.67 \% \text{wb} \cdot \text{h}^{-1}$ ผลที่ได้แสดงให้เห็นว่า เครื่องอบแห้งที่พัฒนาขึ้นมีศักยภาพสูง สามารถนำไปใช้ในการลดความชื้นขั้นต้นของข้าวเปลือกที่มีความชื้นสูง เช่น ข้าวเปลือกที่เก็บเกี่ยวใหม่ อีกทั้งการเพิ่มช่องให้ออกท่อที่

ใช้เป็นท่ออบแห้งทำให้ช่วยลดเวลาในการอบแห้ง และทำให้อัตราการอบแห้งเพิ่มขึ้น รวมทั้งช่วยลดการใช้พลังงานปฏิกิริยาจำเพาะให้ต่ำลงอีกด้วย

5. กิตติกรรมประกาศ

ด้วยความระลึกถึง รองศาสตราจารย์ ดร. ทวีขจิตร์สมบุญรณ คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีที่ให้ทุนสนับสนุนการวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Department of Agriculture, *Quality and Inspection of Thai Hom Mali Rice*. Bangkok, Thailand: Jirawat express co., ltd., 2004.
- [2] T. Chitsomboon, S. Khaengkarn and K. Pechnumkheaw, "Free-fall-paddy rice dryer: A fast and energy efficient dryer," in *The 2nd Conference on Energy Network of Thailand*, 2006.
- [3] K. Pechnumkheaw, S. Meesukchaosumran and T. Chitsomboon, "Effect of Air Velocity on Drying Rate of Paddy Using Continuous Free-fall Technique," in *The 22nd Conference on Mechanical Engineering Network of Thailand*, 2008.
- [4] C. Nimmol, "Energy Efficiency of Paddy Dehydration Process using Pneumatic Dryer with Spiral- pipe Drying Column," *KKU Research Journal*, vol. 17, no. 1, pp. 97-109, 2012.
- [5] K. Jaito, N. Prangpru, T. Treeamnu, J. Jokkew, K. Treeamnu and T. Chuenatsadongkot, "Paddy Drying with Circulating Pneumatic Dryer," in *The 19th TSAE National Conferences*, Kasetsart University, Thailand, 2018.

- [6] S. Sritunyakorn, K. Suluksna and T. Chitsomboon, “ Effect of Drying Air Temperature on Paddy Drying Using Spouted Free Fall Bed Dryer,” in *The 34th Conference on Mechanical Engineering Network of Thailand*, 2020.
- [7] N. Wongbubpa, K. Treeamnuk and T. Treeamnuk, “Kinematics motion of paddy in hot air pulse flow,” in *The 13th TSAE International Conferences*, Suranaree University of Technology, Thailand, 2020.
- [8] N. Wongbubpa, T. Yabsungnoen, K. Treeamnuk, T. Treeamnuk and P. Prakotmak, “ Computer Simulation Study of Paddy Motion in Hot Air Drying Chamber,” in *The 22nd TSAE National Conferences*, Khon Kaen University, Thailand, 2021.
- [9] S. Soponronnarit, *Drying Grains and Some Types of Foods*. 7th ed. Bangkok, Thailand: KMITT, 1997.
- [10] N. Wongbubpa, “ Operating Cures of The Elbowed Spouted Bed Paddy Dryer,” M.S. Thesis, Mechanical Engineering, Suranaree University of Technology, pp. 93-97, 2014.
- [11] T.M. Afzal and T. Abe, “ Diffusion in potato during far infrared radiation drying,” *Journal of food engineering*, vol. 37, no. 4, pp. 353-365, 1998.
- [12] J. Crank, *The Mathematics of Diffusion*. 2nd ed. Oxford: Clarendon Press, 1975, pp. 47-53.
- [13] Er. R.K. Rajput, *Heat and Mass Transfer*. India: S. Chand & Company Ltd, 2000.

การศึกษาปัจจัยการคัดเลือกผู้รับเหมาปรับปรุงอาคาร

โดยใช้วิธีกระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น

A Study of Factors for Selection of Building Renovation Contractors

Using Analysis Hierarchical Process

รพีรัศม์ วัชรไทย์ มงคล อัสวาทิลกฤติ*

บัณฑิตวิทยาลัยการจัดการและนวัตกรรม สาขาการจัดการอสังหาริมทรัพย์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

126 ถนนประชาธิปไตย แขวงบางมด เขตทุ่งครุ กรุงเทพฯ 10140

Rapeerat Vatcharotai Mongkol Ussavadilokrit*

Graduate School of Management and Innovation, Real Estate Management Program

King Mongkut's University of Technology Thonburi

126 Pracha Uthit Rd., Bang Mod, Thung Khru, Bangkok 10140, Thailand

*Corresponding author Email: mongkol.uss@kmutt.ac.th

(Received: August 30, 2021; Revised: April 15, 2022; Accepted: April 25, 2022)

บทคัดย่อ

อาคารที่มีการก่อสร้างและผ่านการใช้งานมาแล้วมักจะมีการชำรุดเสื่อมโทรมเสียหายตามกาลเวลา ทั้งในส่วนองอาคาร และวัสดุตกแต่งต่างๆ อีกทั้งการใช้ประโยชน์พื้นที่อาคารอาจเปลี่ยนแปลงไปตามวัตถุประสงค์การใช้งานในแต่ละช่วงเวลา เจ้าของอสังหาริมทรัพย์จึงต้องมีการปรับปรุงพื้นที่อาคารเพื่อให้พื้นที่ใช้สอยสามารถใช้งานได้เหมาะสมมากยิ่งขึ้น แต่ทั้งนี้โครงการปรับปรุงมักพบปัญหาและข้อจำกัดต่างๆ อยู่เสมอ ทำให้การคัดเลือกผู้รับเหมาปรับปรุงอาคารที่มีศักยภาพที่ดีจึงเป็นส่วนสำคัญที่ช่วยให้งานสำเร็จได้ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยการคัดเลือกผู้รับเหมาปรับปรุงอาคารโดยใช้วิธีกระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น ซึ่งงานวิจัยได้มีการรวบรวมข้อมูลจากทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง รวมถึงการสัมภาษณ์และทำแบบสอบถามจากฝ่ายเจ้าของโครงการในระดับวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อมจำนวน 10 ท่าน ที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการคัดเลือกผู้รับเหมาปรับปรุงอาคาร ผลการวิจัยพบว่าปัจจัยหลักในการคัดเลือกผู้รับเหมาปรับปรุงแบ่งเป็น 4 ด้าน คือ 1) ด้านคุณภาพ 2) ด้านความน่าเชื่อถือ 3) ด้านราคาและการเงิน และ 4) ด้านระยะเวลาการทำงาน โดยปัจจัยย่อยต่างๆ ที่สำคัญมากที่สุด คือ 1) ระยะเวลาในการดำเนินงานที่เหมาะสมเสร็จตามกำหนด 2) มาตรฐานและคุณภาพในการทำงานที่ดี 3) ราคาต่ำกว่าคู่แข่ง และ 4) ความซื่อสัตย์สุจริต ตามลำดับ สุดท้ายนี้ผู้พัฒนาอสังหาริมทรัพย์สามารถนำน้ำหนักของปัจจัยหลักและปัจจัยย่อยไปใช้เป็นแนวทางการพิจารณาตัดสินใจคัดเลือกผู้รับเหมาปรับปรุงอาคารในโครงการระดับวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อมได้ต่อไป

คำสำคัญ : การคัดเลือกผู้รับเหมา งานปรับปรุงอาคาร วิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม กระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น

ABSTRACT

Buildings that have been built and that have been used are often damaged over time in both the building and decoration materials. In addition, the utilization of the building space may change according to the purpose of use during each period. Real estate owners therefore need to renovate the building space to make the usable space more suitable. However, renovation projects always encounter various problems and limitations. Therefore, the selection of building renovating contractors with good potential is an important part of helping the work to be successful. The objective of this research was to study the factors for selecting building improvement contractors by using the hierarchical analysis process. The research collected data from related theories and research, including interviews and questionnaires from ten small and medium-sized enterprise project owners involved in the selection of building renovation contractors. The results showed that the main factors in selecting contractors for renovation works were divided into 4 aspects: 1) quality, 2) reliability, 3) price and finance, and 4) working time. The most important minor factors are 1) reasonable time to complete as scheduled, 2) good standards and quality of work, 3) lower prices than competitors, and 4) honesty, respectively. Finally, real estate developers can use the weight of the main and minor factors as a guideline for considering the selection of contractors for renovation works in small and medium-sized enterprise projects.

Keyword: Selection of contractors, Building renovation, Small and Medium Enterprises, Analytic Hierarchy Process.

1. บทนำ

โดยทั่วไปธุรกิจอสังหาริมทรัพย์ไทยมีการเติบโตตลอดเวลาตามเศรษฐกิจของประเทศ แต่ด้วยสภาวะเศรษฐกิจ 3 ปีที่ผ่านมามีแนวโน้มชะลอตัว [1] ความต้องการของผู้บริโภคมีกำลังซื้ออสังหาริมทรัพย์ใหม่หดตัวรวมถึงวัสดุสิ่งของ สิ่งปลูกสร้างถาวรหรืออสังหาริมทรัพย์มีการเสื่อมสภาพตามกาลเวลา และผู้อยู่อาศัยมีความต้องการปรับเปลี่ยนลักษณะการใช้ประโยชน์เพิ่มขึ้น จึงต้องมีการดูแลรักษาปรับปรุงอาคารเพื่อพักอาศัยและเพื่อการพาณิชย์กรรมให้อยู่ในสภาพสมบูรณ์เหมาะสมแก่การใช้งาน ด้วยสถานการณ์ในปัจจุบัน ปี 2020-2021 มีโรคระบาด COVID-19 ประชากรมีอำนาจในการใช้จ่ายใช้สอยลดลง [2]-[4] ทำให้การซื้อสิ่งปลูกสร้างใหม่มีโอกาสน้อยลง การ

ปล่อยสินเชื่อยากมากขึ้น ประชากรอยู่อาศัยที่บ้านมากขึ้น ทำให้ธุรกิจรับเหมาปรับปรุงอสังหาริมทรัพย์เริ่มมีบทบาทและความต้องการสูงขึ้น โดยผู้รับเหมาปรับปรุงอาคารสามารถแบ่งออกได้เป็นหลายรูปแบบ ตั้งแต่ บริษัทขนาดใหญ่ ขนาดกลาง ขนาดเล็ก ไปจนถึงบุคคลทั่วไปที่รับจ้างทำงาน [5], [6] ซึ่งงานปรับปรุงอาคารมีหลากหลายปัญหาเกิดขึ้น เช่น การทิ้งงาน, วัสดุไม่ตรงตามรายละเอียดของแบบ, สัญญาคลุมเครือ, การเบิกเงิน, การโยกย้ายทีมงาน, ความไม่รับผิดชอบ และการรับประกัน เป็นต้น บ่งบอกถึงความจำเป็นของผู้บริโภคที่ต้องมีการคัดเลือกผู้รับเหมาที่ดีและเหมาะสม เพื่อให้งานปรับปรุงสำเร็จเรียบร้อยได้ตามที่ตกลงกันไว้ [7]

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาปัจจัยการคัดเลือกผู้รับเหมาปรับปรุงอาคาร ด้วยวิธีกระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น เพื่อใช้เป็นแนวทางในการพิจารณาตัดสินใจคัดเลือกผู้รับเหมาปรับปรุงอาคารต่อไป

1.1 วัตถุประสงค์การวิจัย

1) เพื่อศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการคัดเลือกผู้รับเหมาปรับปรุงอาคาร ทั้งประเภทเพื่อการพักอาศัย พาณิชยกรรม และอุตสาหกรรม

2) เพื่อวิเคราะห์จัดลำดับความสำคัญของปัจจัยที่มีผลต่อการคัดเลือกผู้รับเหมาปรับปรุงอาคาร ในระดับวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม โดยใช้กระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 กระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น

กระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น (Analysis Hierarchy Process; AHP) เป็นเทคนิคที่ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์การตัดสินใจทางเลือกที่เหมาะสมทั้งบุคคลและหมู่คณะ ได้รับความนิยมนำมาใช้แพร่หลายในระดับสากล สามารถนำไปใช้ง่ายและสามารถทำการประเมินผลทั้งที่เป็นเชิงปริมาณและคุณภาพได้อย่างมีความสอดคล้องกันของเหตุผล โดยใช้หลักการแบ่งองค์ประกอบของปัญหาออกเป็นส่วนๆ ในรูปของแผนภูมิตามลำดับชั้นและมีการให้ค่าน้ำหนักของแต่ละองค์ประกอบมาคำนวณค่าน้ำหนักและนำไปสู่ค่าเชิงลำดับความสำคัญของแต่ละทางเลือก ซึ่งทางเลือกมีความสำคัญสูงสุดนำมาประกอบการตัดสินใจ โดยมีโครงสร้างเลียนแบบกระบวนการคิดของมนุษย์สามารถแปลงความรู้เชิงจิตใจให้อยู่ในรูปของตัวเลขและสามารถป้องกันการจัดลำดับความสำคัญที่ไม่เป็นธรรมได้

กระบวนการนี้ถูกนำมาใช้ในการวิเคราะห์เพื่อช่วยในการตัดสินใจคัดเลือก ทางเลือกที่เหมาะสม เกี่ยวข้องกับการตัดสินใจแบบพิจารณาหลายปัจจัย หรือ แบบ Multiple Criteria Making (MCDM) เพื่อให้ผลการตัดสินใจที่ถูกต้องตรงกับเป้าหมาย กระบวนการนี้ได้มีการ

คิดค้นเมื่อปลายทศวรรษที่ 1970 โดย Prof. Thomas Saaty โดยเริ่มจากการกำหนดเป้าหมาย (Goal) เกณฑ์หลัก (Criteria) เกณฑ์ย่อย (Sub criteria) และทางเลือก (Alternatives) ตามลำดับ แล้วนำข้อมูลที่ได้นำมาวิเคราะห์หาทางเลือกที่ดีที่สุด เพื่อนำไปใช้วางแผนกลยุทธ์ในด้านต่างๆ [8]

จากการศึกษาทฤษฎีกระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้นในครั้งนี้ มีขั้นตอนการตัดสินใจคล้ายความคิดมนุษย์และมีความละเอียด ชัดเจน จึงได้ถูกนำมาใช้เป็นเครื่องมือในการคัดเลือกผู้รับเหมาปรับปรุงอาคารในงานวิจัยครั้งนี้

2.2 แนวคิดและทฤษฎีการคัดเลือกผู้รับเหมา

การจัดหาผู้รับเหมา เป็นขั้นตอนในระดับต้นๆของโครงการก่อสร้าง ซึ่งเป็นหน้าที่ของเจ้าของโครงการหรือผู้ที่เกี่ยวข้องเป็นผู้จัดหาผู้รับจ้าง วิธีการจัดหาผู้รับจ้างจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับว่าเจ้าของโครงการจะเลือกใช้ [9]

วิธีการคัดเลือกผู้รับจ้าง หรือผู้รับเหมา มีลักษณะการให้บริการตามทฤษฎีของ (Beard, Laulakis and Wundram, 2001) ซึ่งจะคล้ายกับวิธีการคัดเลือกผู้รับจ้างในระบบอื่นๆ มีวิธีการตั้งแต่ การคัดเลือกบริษัทเดียว (Sale Source) ไปจนถึง การประกวดราคา (Open Competition) โดยจะตัดสินใจเลือกบริษัทที่เสนอราคาต่ำที่สุด [10]

เกณฑ์การคัดเลือกผู้รับเหมาภาคเอกชน การคัดเลือกผู้รับเหมาจากเจ้าของโครงการเอกชนได้มีการกำหนดการคัดเลือกผู้รับเหมาไว้ด้วยเช่นกัน โดยส่วนใหญ่จะนิยมกำหนดเกณฑ์คุณสมบัติด้านเทคนิคเบื้องต้นเพื่อใช้คัดเลือกผู้มีสิทธิ์เสนอราคา หลังจากผู้รับเหมาทำการเสนอราคาทุกรายเรียบร้อยแล้ว ส่วนใหญ่ผู้ที่เสนอราคาต่ำที่สุด 1-3 ราย จะได้ถูกคัดเลือกมาเปรียบเทียบกับในเรื่องของรายละเอียดต่างๆก่อนจะทำการต่อรองราคา พร้อมทั้งมีการปรับแก้รายละเอียดทางเทคนิคบางส่วนให้เหมาะสมตามที่ผู้รับเหมาเสนอเพื่อให้ได้ราคาต่ำสุด ถึงจะทำการตกลงเซ็นสัญญาร่วมงานกัน

การคัดเลือกผู้รับเหมาก่อสร้างตามทฤษฎี สามารถแบ่งเป็นเกณฑ์หลักที่มีความสำคัญในการคัดเลือกผู้รับเหมา

และนำมาประยุกต์ใช้ในการกำหนดปัจจัยหลักสำคัญ 5 ประการที่มีผลต่อการตัดสินใจเลือกใช้บริการบริษัทรับเหมาก่อสร้างในพื้นที่จังหวัดสงขลาทั้งในด้านประสิทธิภาพการทำงาน ปริมาณงาน ความรับผิดชอบของผู้รับเหมา ความเชี่ยวชาญในการบริหารโครงการ บุคลากรหลักและความเชี่ยวชาญด้านเทคนิคการก่อสร้างที่มีคุณภาพสามารถสร้างผลงานที่ผ่านมาให้ประสบความสำเร็จได้ตามวัตถุประสงค์ [9]

2.3 คุณสมบัติของผู้รับเหมาก่อสร้าง

คุณสมบัติของผู้รับเหมาก่อสร้างประกอบด้วย คุณสมบัติหลักและคุณสมบัติย่อย ดังนี้

1. ผลงานที่ผ่านมาในอดีตและปัจจุบัน ได้แก่ ประสิทธิภาพของผู้รับเหมาก่อสร้าง, ผลงานที่ผ่านมาของผู้รับเหมาก่อสร้าง การพิจารณาในด้านคุณภาพ ด้านเวลา ประวัติการทำงาน และความผิดพลาดที่ผ่านมา, ปริมาณงานที่รับผิดชอบอยู่ในปัจจุบัน

2. การก่อสร้างและการบริหารโครงการ ผู้รับเหมาควรมีคุณสมบัติดังนี้ ความสามารถในการบริหารจัดการคุณภาพงาน ระยะเวลาการทำงานโครงการ ความสามารถในการก่อสร้าง ระยะเวลาในการก่อสร้างน้อย ผู้รับเหมาก่อสร้างสามารถดำเนินงานก่อสร้างได้อย่างรวดเร็วตามแผนงานที่ตกลงกันไว้ การเข้าถึงผู้รับเหมาก่อสร้าง มีการดำเนินงานที่โปร่งใส ซื่อสัตย์ สุจริต ตรงไปตรงมา สามารถตรวจสอบได้ง่าย [11]

จากทฤษฎีที่กล่าวมา หน้าที่ของเจ้าของโครงการจะเป็นผู้จัดหาผู้รับจ้าง วิธีการจัดหาผู้รับจ้างจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับลักษณะประเภทงานและขนาดโครงการ จากการรวบรวมงานวิจัยทำให้ทราบถึงหลักเกณฑ์การคัดเลือกผู้รับเหมาชัดเจนมากขึ้น สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการกำหนดปัจจัยหลักสำคัญที่มีผลต่อการตัดสินใจเลือกใช้บริการผู้รับเหมาก่อสร้างอาคารในด้านต่างๆ คือ คุณภาพการทำงานของบุคลากรที่มีความรู้ ประสิทธิภาพความสามารถ ความน่าเชื่อถือ บริษัทมีชื่อเสียง มีผลงานที่ผ่านมา การเงินและราคา สภาพคล่องทางการเงิน การ

คัดเลือกจากเกณฑ์ราคาต่ำ การรับประกันผลงาน รวมถึงการวางแผน บริหารและจัดการที่ดี

2.4 การปรับปรุงอสังหาริมทรัพย์

การปรับปรุงอาคาร คือ การทำให้อาคารมีสุขลักษณะที่ดีขึ้น (Hygienic Propose) สามารถทำโดยการตรวจสอบความเสียหายทั้งที่มองเห็นและไม่เห็น เนื่องจากอาคารเก่าที่อาจเกิดการเสื่อมสภาพชำรุดทรุดโทรมเกิดขึ้น การอยู่อาศัยหรือใช้สอยอาคารบ้านเรือนต่างๆ เจ้าของสถานที่จะนิยมทำความสะอาดเฉพาะภายนอกและภายใน แต่ในมุมอับสายตาหรือบริเวณที่ไม่สามารถเข้าถึงได้ มักจะเป็นแหล่งสะสมของสิ่งสกปรก อาจสร้างปัญหาการสะสมเชื้อโรคและอับชื้น ในการรักษาสภาพบ้านให้คงอยู่ใช้สอยที่ยาวนานมากขึ้น (Longer Life Propose) โดยทั่วไปอาคารที่ไม่ได้รับการดูแลรักษาอาจจะมีอายุการใช้งานสั้นประมาณ 40-50 ปี โดยการใช้งานอาคารยังคงสภาพความปลอดภัยเต็มประสิทธิภาพ ถ้าไม่ได้มีการต่อเติม การใช้สอยที่ผิดประเภท รวมถึงการก่อสร้างที่ถูกหลักวิศวกรรมและตรงตามแบบ ก็มีผลต่ออายุการใช้งาน ในทางปฏิบัติควรจะต้องปรับปรุงเล็กน้อยทุก 10 ปี และควรปรับปรุงครั้งใหญ่ทุกๆ 20 ปี อาคารก็จะมีอายุยืนยาวนานมากขึ้น อาจจะอยู่ได้ 80-100 ปี [12]

จากแนวคิดการปรับปรุงอสังหาริมทรัพย์คือ การทำให้อาคารมีสุขลักษณะที่ดีขึ้น (Hygienic Propose) รวมถึงการเปลี่ยนแปลงลักษณะของพื้นที่ใช้สอยให้เหมาะกับการใช้งานปัจจุบัน เพื่อให้ความรู้สึกเหมือนได้อยู่บ้านใหม่และตรงตามวัตถุประสงค์การใช้มากที่สุด อาคารเก่าที่อาจเกิดการเสื่อมสภาพชำรุดทรุดโทรมเกิดขึ้น โดยทั่วไปอาคารที่ไม่ได้รับการดูแลรักษาอาจจะมีอายุการใช้งานสั้น เพราะฉะนั้นจึงควรจะต้องปรับปรุงให้สิ่งปลูกสร้างและอาคารมีอายุยืนยาวนานมากขึ้น ขั้นตอนสำคัญของการดำเนินงานปรับปรุงอสังหาริมทรัพย์ ได้แก่ การกำหนดโครงการ (Project Identification) การศึกษาแผนการลงทุน (Feasibility Study) การออกแบบ (Design) การดำเนินการก่อสร้าง (Construction) การทดสอบและการ

ส่งมอบงาน รวมถึงการประกันผลงาน (Maintenance Phase)

2.5 วิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม (SMEs)

วิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม (Small and Medium Enterprises : SMEs) เป็นส่วนสำคัญของการขับเคลื่อนเศรษฐกิจของประเทศไทยที่ภาครัฐบาลมักจะมีนโยบายช่วยเหลือให้การสนับสนุนโดยตลอด ถือเป็นธุรกิจที่มีการดำเนินงานมายาวนานและเป็นกลุ่มธุรกิจที่สร้างรายได้ให้กับประเทศค่อนข้างสูง

การดำเนินงานของวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม มีรูปแบบในการประกอบการของบุคคลธรรมดา คณะบุคคลหรือห้างหุ้นส่วนสามัญที่มีใช้นิติบุคคลคือ ห้างหุ้นส่วนจำกัด บริษัทจำกัด และกิจการร่วมค้า ตามพระราชบัญญัติส่งเสริมวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม

สำนักงานส่งเสริมวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม (สสว.) ได้ขยายความระบุไว้ถึงความหมายของกิจการข้างต้น และได้มีการปรับเปลี่ยนขอบเขตใหม่ในปี 2557 เป็นกิจการผลิตสินค้า, กิจการค้าส่งและค้าปลีก, กิจการให้บริการ รวมถึงการศึกษา การบันเทิง การขนส่ง การสุขภาพ การก่อสร้างและอสังหาริมทรัพย์ การโรงแรม การหอพัก ร้านอาหารภัตตาคาร การขายอาหาร ขายเครื่องดื่ม การให้เช่าอุปกรณ์บันเทิง อีกทั้งได้กำหนดนิยามของ SMEs : กฎกระทรวงกำหนดจำนวนการจ้างงานและมูลค่าทรัพย์สินถาวรของวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม ให้ไว้ ณ วันที่ 11 กันยายน พ.ศ.2545 และมีการปรับเปลี่ยนนิยามของ SMEs ใหม่ (กฎกระทรวง) โดยกำหนดลักษณะของวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม พ.ศ. 2562 ตามตารางที่ 1 [13]

แนวคิดและทฤษฎีของกลุ่มผู้บริโภคในระดับวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อมได้รับการสนับสนุนจากทางภาครัฐมากที่สุดและมีจำนวนมากพอที่จะศึกษาและเก็บข้อมูลเพื่อใช้ในการวิจัยในครั้งนี้

2.6 กฎหมายที่เกี่ยวข้อง

การปรับปรุงหรือรีโนเวท (Renovate) ปัจจุบันนิยมนำอาคารเก่ามาปรับปรุง (Renovate) บูรณะ ดัดแปลง

ซ่อมแซม ต่อเติม หรือแก้ไข ซึ่งเป็นการทำอาคารเก่าที่มีความเสื่อมโทรมหรือเสื่อมสภาพตามกาลเวลาให้กลับมาสามารถใช้ประโยชน์ได้ใหม่ ซึ่งทำให้ประหยัดทรัพยากรและเวลาที่จะต้องทำการก่อสร้างใหม่ทั้งหมด และในบางกรณียังสามารถทำให้อาคารมีรูปลักษณะที่โดดเด่นน่าสนใจ แต่ในเชิงกฎหมายการปรับปรุงอาคารมีความจำเป็นต้องขออนุญาตดำเนินการตามกฎหมายควบคุมอาคาร โดยการดัดแปลงอาคาร หมายถึง การเปลี่ยนแปลง ต่อเติม เพิ่ม/ลด หรือขยายลักษณะขอบเขต แบบ พื้น ที่ รูปทรง สัดส่วน น้ำหนัก เนื้อที่ของโครงสร้างอาคารหรือส่วนต่างๆของอาคารซึ่งได้ก่อสร้างไว้แล้วให้ผิดเปลี่ยนไปจากเดิม [14]

การปรับปรุงอสังหาริมทรัพย์ มีกฎหมายที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงซ่อมแซม โดยมีการระบุไว้ในพระราชบัญญัติ ควบคุมอาคาร พ.ศ.2522 มาตรา 4 ในพระราชบัญญัตินี้ ระบุไว้ว่า อาคาร หมายถึง ตึก บ้าน เรือน โรง ร้าน แพ คลังสินค้า สำนักงาน และสิ่งที่สร้างขึ้นอย่างอื่น ซึ่งบุคคลอาจเข้าอยู่หรือเข้าใช้สอยได้ โดยคัตมาบางส่วนที่เกี่ยวข้อง “ดัดแปลง” หมายถึง การเปลี่ยนแปลง ต่อเติม เพิ่ม/ลด หรือขยายซึ่งลักษณะขอบเขต แบบ รูปทรง สัดส่วน น้ำหนัก เนื้อที่ ของโครงสร้างของอาคารหรือส่วนต่างๆ ของอาคารซึ่งได้ก่อสร้างไว้แล้วให้ผิดไปจากเดิม และมีใช้การซ่อมแซมหรือการดัดแปลงที่กำหนดในกฎกระทรวง “ซ่อมแซม” หมายถึง ซ่อมหรือเปลี่ยนส่วนต่างๆ ของอาคารให้คงสภาพเดิม [15]

3. การดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยเริ่มจากการศึกษาและรวบรวมข้อมูลพื้นฐานของกลุ่มผู้บริโภคระดับวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อมที่มีผลต่อการคัดเลือกผู้รับเหมาปรับปรุงอาคาร ซึ่งพิจารณาปัจจัยในการตัดสินใจคัดเลือกผู้รับเหมาปรับปรุงอาคาร ทั้งประเภทเพื่อการพักอาศัย พาณิชยกรรม และอุตสาหกรรม พร้อมวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีความสำคัญ โดยแบ่งเป็นขั้นตอนหลักๆ ดังนี้

ตารางที่1 ขอบเขตวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม

ลักษณะวิสาหกิจ	วิสาหกิจขนาดย่อม				วิสาหกิจขนาดกลาง	
	รายย่อย		ขนาดย่อม			
	รายได้ต่อปี (ล้านบาท)	การจ้างงาน (คน)	รายได้ต่อปี (ล้านบาท)	การจ้างงาน (คน)	รายได้ต่อปี (ล้านบาท)	การจ้างงาน (คน)
การผลิต	ไม่เกิน 1.8	ไม่เกิน 5	ไม่เกิน 100	ไม่เกิน 50	เกิน 100-500	เกิน 50-200
การค้าส่ง/ค้าปลีก/บริการ	ไม่เกิน 1.8	ไม่เกิน 5	ไม่เกิน 50	ไม่เกิน 30	เกิน 50-300	เกิน 30-100

3.1 การเก็บรวบรวมข้อมูลปัจจัยหลักและปัจจัยย่อย

การสัมภาษณ์เพื่อรวบรวมข้อมูลปัจจัยหลักและปัจจัยย่อยจากผู้เชี่ยวชาญที่มีประสบการณ์เกี่ยวข้องกับผู้รับเหมาปรับปรุงอาคารในด้านต่างๆมากกว่า 16 โครงการต่อท่าน โดยมีปัจจัยที่ได้จากการสัมภาษณ์ แสดงดังตารางที่ 2 โดยสามารถจัดรวมกลุ่มได้ปัจจัยหลัก 4 ปัจจัยที่สำคัญ ได้แก่

1. ปัจจัยด้านคุณภาพการทำงาน
2. ปัจจัยด้านความน่าเชื่อถือ
3. ปัจจัยด้านการเงินและราคา
4. ปัจจัยด้านระยะเวลาการทำงาน

โดยผู้วิจัยได้นำข้อมูลปัจจัยจากการสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญมาสร้างกรอบในการศึกษา ดังนี้

1) **ปัจจัยด้านคุณภาพการทำงาน** : เป็นปัจจัยที่บ่งบอกถึงคุณสมบัติและประสิทธิภาพของบุคลากร ทีมงานที่มีความรู้ ทักษะ ความสามารถ ประสบการณ์ ความถนัดและความชำนาญ ในด้านการปรับปรุงสิ่งปลูกสร้างที่เกิดขึ้นตรงตามผลงานที่กำหนดไว้ ให้ประสบความสำเร็จสมบูรณ์จากลักษณะของปัจจัยด้านคุณภาพ

2) **ปัจจัยด้านความน่าเชื่อถือ** : เป็นปัจจัยสำคัญที่แสดงถึงความมั่นคง เชื่อมั่น คาดหวังในความสำเร็จที่จะเกิดขึ้นตามเงื่อนไขที่ได้ตกลงกันไว้ และเจ้าของงานกล้าที่จะตัดสินใจเลือก จากลักษณะของปัจจัยด้านความน่าเชื่อถือ

3) **ปัจจัยด้านราคาและการเงิน** : เป็นปัจจัยพื้นฐานที่สะท้อนถึงงบประมาณของโครงการและส่งผลกระทบต่อรายการประกอบแบบและแบบในการปรับปรุงโครงการใน

กรณีที่เกินงบประมาณ) เนื่องจากงบประมาณมีอย่างจำกัด ต้องถูกจัดสรรอย่างเหมาะสม และคุ้มค่ามากที่สุด เพื่อให้บรรลุเป้าหมายของผู้บริโภค (Owner) มากที่สุด จากลักษณะปัจจัยด้านราคาและการเงินมีความสำคัญสูงมากต่อการตัดสินใจหรือเกือบจะทุกสินค้า ผลิตภัณฑ์และบริการล้วนแล้วต้องมองถึงราคาและการเงินเป็นหลัก

4) **ปัจจัยด้านระยะเวลาการทำงาน** : เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญในการตัดสินใจคัดเลือกผู้รับเหมาปรับปรุงอาคารเพื่อให้ตอบโจทย์ในเวลาที่เหมาะสมตามที่เจ้าของอสังหาริมทรัพย์ ต้องการ ปัจจัยด้านเวลา เป็นสิ่งที่ต้องใช้ทักษะ ความสามารถในการวางแผน บริหารจัดการ ควบคุมทรัพยากรบุคคล วัตถุดิบ ระบบขนส่ง การเงิน รวมไปถึงสภาพอากาศและสิ่งแวดล้อม ล้วนแล้วเป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการควบคุมด้านเวลาทั้งหมด ในการประกอบธุรกิจต่างๆ โอกาสและเวลาถือเป็นสิ่งสำคัญสูง ถ้าเสียไปแล้วไม่สามารถย่นเวลาหรือชดเชยกลับคืนมาได้ เฉพาะฉะนั้น ปัจจัยด้านระยะเวลาการทำงานถือเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ควรให้ความสำคัญ

จากลักษณะของปัจจัยทั้งหมด ผ่านการรวบรวมข้อมูลทั้งปัจจัยหลักและปัจจัยย่อยที่ได้จากการสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญทั้ง 5 ท่าน ได้สรุปรวมไว้ดังตารางที่ 3

3.2 วิธีการวิเคราะห์ประเมินผล

การวิจัยได้นำปัจจัยที่ได้มาทำตามกระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับขั้น(Analysis Hierarchy Process: AHP) โดยการสร้างเครื่องมือ ทำแบบสอบถามการคัดเลือกปัจจัยที่มีความสำคัญ สมเหตุสมผลและมีความน่าเชื่อถือ

ตารางที่ 2 ปัจจัยสำหรับการคัดเลือกผู้รับเหมา

คุณลักษณะของผู้เชี่ยวชาญ (เกี่ยวกับอสังหาริมทรัพย์)	ประสบการณ์ (ครั้ง)	ปัจจัยที่ได้
เจ้าของธุรกิจ ซื้ออสังหาฯ เพื่อปรับปรุงขยาย	>16	คุณภาพ, ความรู้, ความสามารถ, ราคา,ความน่าเชื่อถือ, ระยะเวลา, มีการวางแผนงานที่ดี
เจ้าของธุรกิจคลินิก >10 สาขา , ลงทุนด้านอสังหาฯ	>20	ราคา, ความน่าเชื่อถือ, ระยะเวลา, คุณภาพ, ความรับผิดชอบ, มีการรับประกันผลงาน, ราคาต่อรองได้, ราคาต่ำกว่าคู่แข่ง
พนักงานบริษัทสินทรัพย์มือสองแห่งหนึ่ง แผนกปรับปรุงสินทรัพย์ ระดับผู้จัดการ	>300	ราคา, คุณภาพงาน, ระยะเวลา,ความสามารถ, การวางแผนงาน, การบริหารงาน, อุปกรณ์ครบถ้วน, ตรงต่อเวลา ,มีเงินทุนจดทะเบียน, สภาพคล่อง, มีความรับผิดชอบ, มีความรู้, ความสามารถ, เชี่ยวชาญ, ระยะเวลาจัดตั้ง, ประวัติบริษัทฯ, ความซื่อสัตย์
เจ้าของธุรกิจ โรงงานอุตสาหกรรมและทำธุรกิจห้องเช่า หอพัก	>16	ซื่อสัตย์ ตรงต่อเวลา รักษาคำพูด, ผลงานที่ผ่านมา, การรับประกันผลงาน, มีความพร้อมในการเริ่มงานสูง, มีความยืดหยุ่นในการแก้ไขเปลี่ยนแปลง, มีระยะเวลาในการดำเนินงานที่เหมาะสม, ราคาเหมาะสม
พนักงานบริษัทอสังหาฯ แห่งหนึ่ง ด้านสถาปนิก ระดับผู้อำนวยการ	>20	คุณภาพงาน, ความรู้, ความสามารถ ด้านวิศวกร, วางแผนงาน, ประสานงานดี, มีมาตรฐาน, มีผู้ร่วมงานหรือพันธมิตรที่ดี, บริษัทมีชื่อเสียง, การรีวิวนผลงานที่ผ่านมา

ตารางที่ 3 ปัจจัยหลักและปัจจัยย่อยที่ได้จากการรวบรวมข้อมูลและสอบถามจากผู้เชี่ยวชาญ

เป้าหมาย (Goal)	เกณฑ์หลัก (Criteria)	เกณฑ์ย่อย (Sub Criteria)
รับรู้ปัจจัยการคัดเลือกผู้รับเหมาปรับปรุงอสังหาริมทรัพย์	คุณภาพการทำงาน	1. บุคลากรมีความรู้ ความสามารถ ประสบการณ์สูง 2. มีการประสานงานที่ดี 3. มีมาตรฐานและคุณภาพการทำงานที่ดี 4. มีนวัตกรรม เทคโนโลยี และอุปกรณ์ครบถ้วน 5. มีผู้ร่วมงานหรือพันธมิตรที่ดี
	ความน่าเชื่อถือ	1. ระยะเวลาจัดตั้งและประวัติบริษัท 2. เงินทุนจดทะเบียนบริษัท/ผู้รับเหมา 3. บริษัทมีชื่อเสียง และการรีวิวนผลงานที่ผ่านมา 4. การรับประกันผลงานและความรับผิดชอบของผู้รับเหมา 5. ความสุจริต ซื่อสัตย์ ตรงไปตรงมา รักษาคำพูด

ตารางที่ 3 ปัจจัยหลักและปัจจัยย่อยที่ได้จากการรวบรวมข้อมูลและสอบถามจากผู้เชี่ยวชาญ (ต่อ)

เป้าหมาย (Goal)	เกณฑ์หลัก (Criteria)	เกณฑ์ย่อย (Sub Criteria)
รับรู้ปัจจัยการคัดเลือก ผู้รับเหมาปรับปรุง อสังหาริมทรัพย์	การเงินและราคา	1. มีสภาพคล่องทางการเงินสูง 2. มีความยืดหยุ่นในการแก้ไขเปลี่ยนแปลงปริมาณงาน 3. มีราคาต่ำ(ถูก) กว่าคู่แข่ง 4. สามารถต่อรองราคาได้
	ระยะเวลาการทำงาน	1. มีการวางแผนงานที่ดี 2. มีการบริหารจัดการที่ดี 3. มีระยะเวลาในการดำเนินงานที่เหมาะสม เสร็จตามกำหนด 4. มีความพร้อมในการเริ่มงานสูง

3.2.1 แบบสอบถามวัดระดับความสำคัญของปัจจัยที่มี ผลต่อการคัดเลือกผู้รับเหมาปรับปรุงอาคาร

ผู้ทำวิจัยได้รวบรวมปัจจัยต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับทฤษฎีการคัดเลือกผู้รับเหมาปรับปรุงอาคารเพื่อนำมาใช้ในการพัฒนารูจกิจอสังหาริมทรัพย์ โดยสร้างตารางแบบสอบถามในรูปแบบของตารางเมทริกซ์ เปรียบเทียบการตัดสินใจแบบเป็นคู่ (Pair Wise Comparison) แบบสอบถามจะต้องมีคำถามเกี่ยวกับการเปรียบเทียบความสำคัญของปัจจัยที่มีผลในการคัดเลือกผู้รับเหมาปรับปรุงอาคาร และให้ค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยในระดับ 1 คือเท่ากัน และระดับ 2 คือ (น้อยที่สุด) ถึง 9 คือ (มากที่สุด) โดยการเลือกให้คะแนนเพียงด้านใดด้านหนึ่ง (ด้านซ้าย หรือ ด้านขวา) เพียงด้านเดียวที่ให้ค่าความสำคัญของปัจจัยที่สูงกว่าอีกฝั่ง หรือให้ค่าความสำคัญเท่ากัน คือ 1 โดยการใส่เครื่องหมายในช่องว่างที่เรียกว่า Rating Scale หรือการเปรียบเทียบระหว่างปัจจัย [16]

การออกแบบสอบถามก่อนที่จะนำไปใช้สอบถามและสัมภาษณ์ ได้ผ่านการตรวจสอบวิเคราะห์ดัชนีความสอดคล้อง (Index of item objective congruence : IOC) โดยผู้เชี่ยวชาญหรือผู้ทรงคุณวุฒิ จำนวน 5 ท่าน โดยมีประสบการณ์ในการทำงานด้านอสังหาริมทรัพย์มากกว่า 7-27 ปี อยู่ในระดับผู้จัดการถึงระดับกรรมการผู้จัดการ ผล

การตรวจสอบอยู่ในเกณฑ์ช่วง 0.6-1.0 ถือว่าผ่านเกณฑ์ [17]

3.2.2 การหาค่าน้ำหนักจากการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น ของปัจจัยหลักและปัจจัยรอง

กระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น (Analysis Hierarchy Process : AHP) หลังจากได้ข้อมูลแบบสอบถามพร้อมสัมภาษณ์จากผู้เชี่ยวชาญ ผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องและผู้ให้ข้อมูลเพิ่มเติมแล้ว ทำให้ทราบปัจจัยที่ผู้เชี่ยวชาญคะแนนน้ำหนักไว้ ซึ่งในแต่ละท่านก็มีเหตุผลที่แตกต่างกันมีประเด็นและให้ข้อมูลปัจจัยที่สำคัญออกมาเป็นผลลัพธ์ที่มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน โดยสามารถแสดงโครงสร้างลำดับชั้นของปัจจัยหลักและปัจจัยรองได้ (ตามรูปที่1) รวมผู้เชี่ยวชาญทั้งหมด 5 ท่าน นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์โดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น ดังนี้

1) นำคะแนนค่าน้ำหนักที่ได้จากผู้เชี่ยวชาญระบุไว้มาใส่ตารางค่าน้ำหนัก

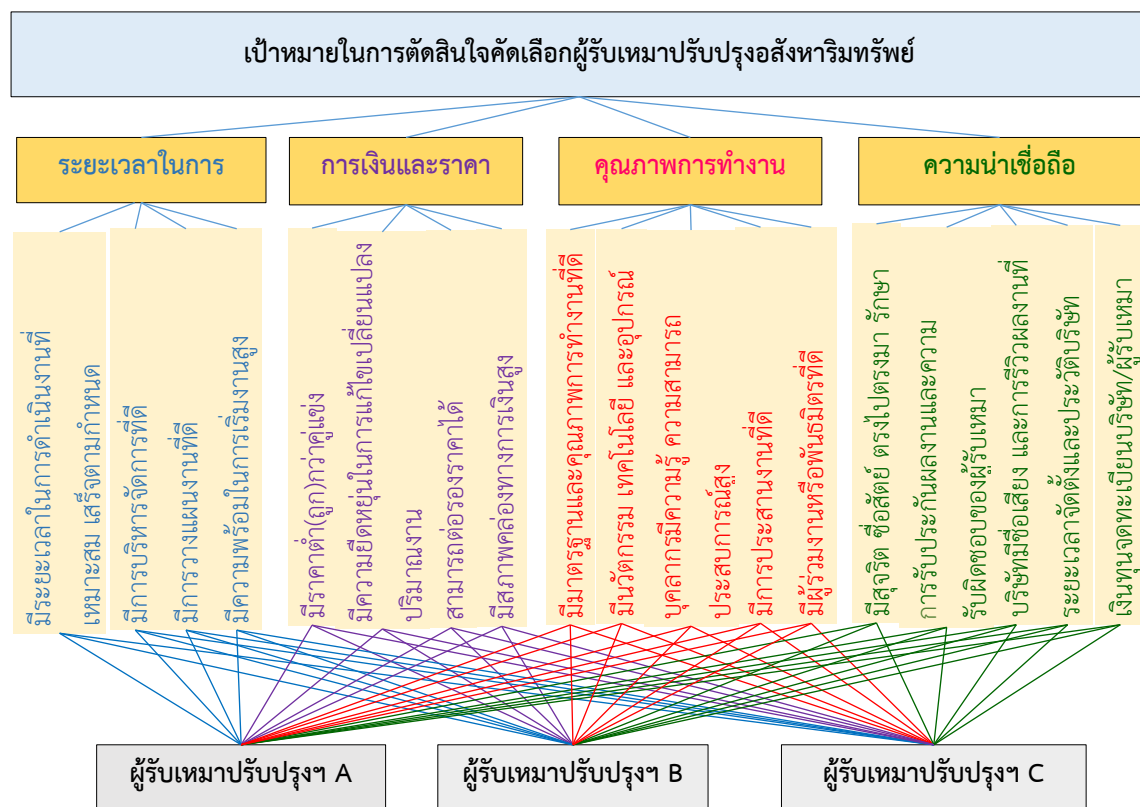
2) นำค่าน้ำหนักที่ได้ไปแปลงให้อยู่ในรูปร้อยละ เพื่อให้ได้ผลรวมเท่ากับ 1 หรือการหาค่าเฉลี่ยเรขาคณิต (Geometric Mean)

3) นำตัวแปรผลสุดท้ายมาสู่กระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น และประมวลผลจากทฤษฎีวิเคราะห์เชิงลำดับชั้นแสดงค่าน้ำหนัก ด้วยความสอดคล้องของข้อมูล (C.R.) ที่ใช้สำหรับการตัดสินใจ โดยแนวทางการวัดความ

สอดคล้องของข้อมูลจะส่งผลให้เกิดประโยชน์ในการตรวจสอบหาความไม่สอดคล้องของข้อมูลที่ได้จากการออกแบบสอบถามที่ไม่ตรงกับความเป็นจริงที่กรอกไว้ ซึ่งอัตราการแสดงผลที่ไม่สอดคล้องจะอยู่ในรูปแบบตัวเลข หากค่าที่ได้ต่ำกว่าหรือเท่ากับ 0.1 คือการแสดงผลดังกล่าวจะอยู่ในช่วงเกณฑ์ที่ยอมรับได้ แต่ถ้าหาก มากกว่า 0.1 ผล

นั้นจะแสดงค่าความไม่สอดคล้องเกิดขึ้น จะไม่สามารถนำค่า Eigenvector มาใช้ได้

หลังจากได้ปัจจัยทั้งหมด นำไปออกแบบสอบถามพร้อมสัมภาษณ์จากกลุ่มผู้เชี่ยวชาญอีก 5 ท่าน เพื่อเปรียบเทียบปัจจัยทีละคู่และให้น้ำหนักความสำคัญของทั้ง 18 ปัจจัย โดยใช้กระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น (AHP) เป็นเครื่องมือ ดังตารางที่ 4



รูปที่1 แผนภูมิโครงสร้างลำดับชั้นของปัจจัยหลักและปัจจัยรองในการเปรียบเทียบหาตัวเลือก

จากนั้นนำข้อมูลที่ได้จากแบบสอบถามมาวิเคราะห์ด้วยกระบวนการเชิงลำดับชั้น AHP โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel เป็นเครื่องมือการทำตารางเมทริกซ์และใส่สูตรสมการตามทฤษฎี เพื่อคำนวณค่าในสูตรแปลงออกมาเป็นตัวเลขค่าน้ำหนักความสำคัญ นำมาแทนค่าในสมการ จะได้ค่า (Eigen Value) ; $\lambda_{\max}$ โดยที่ค่า n คือขนาดของเมทริกซ์ A ตามสมการ (1) หาดัชนีความสอดคล้องกัน (Consistency index) ตามสมการ (2) ตรวจสอบค่าสัดส่วนความสอดคล้อง (Consistency Ratio : CR) ตามสมการ (3) โดยหาค่า RI (Random

Index) หรือ ค่าดัชนีสุ่ม ซึ่งแปรผันตามขนาดของเมทริกซ์ได้จากตารางที่ 5 ดังนี้ [18]

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n} \left(\frac{k_1}{w_1} + \frac{k_2}{w_2} + \dots + \frac{k_n}{w_n} \right) \quad (1)$$

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (2)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (3)$$

ตารางที่ 4 ข้อมูลคุณลักษณะของผู้เชี่ยวชาญ (ทำแบบสอบถาม)

คุณลักษณะของผู้เชี่ยวชาญ (เกี่ยวกับฝ่ายเจ้าของอสังหาริมทรัพย์)	เพศ	อายุ (ปี)	ระดับการศึกษา	ประสบการณ์ (ครั้ง)	ตำแหน่งการ ทำงาน
พนักงานบริษัทอสังหาฯแห่งหนึ่ง	หญิง	35-44	ปริญญาโท	4-6	ผู้จัดการ
นักลงทุน ซื้ออสังหาฯ ปลอยเช่า	ชาย	35-44	ปริญญาตรี	4-6	เจ้าของกิจการ
นักสถาปนิก(ออกแบบ ควบคุมงาน) และที่ปรึกษา	ชาย	35-44	ปริญญาโท	>11	เจ้าของกิจการ
เจ้าของธุรกิจอะไหล่เครื่องจักรใหญ่ และทำธุรกิจห้องเช่า ซื้ออสังหาฯ ปรับปรุงขาย	หญิง	35-44	ปริญญาตรี	>11	เจ้าของกิจการ
เจ้าของกิจการโรงแรมและร้านอาหาร	ชาย	55-64	ปริญญาตรี	>11	เจ้าของกิจการ

ตารางที่ 5 เทียบ RI (Random Index) หรือ ค่าดัชนีสุ่ม

N (ขนาดเมตริกซ์)	3	4	5	6	7	8	9	10
RI	0.52	0.89	1.11	1.25	1.35	1.4	1.45	1.49

การตรวจสอบค่าสัดส่วนความสอดคล้อง ต้องมีค่า CR ดังต่อไปนี้

$CR > 0.1$: แสดงว่า ค่าคะแนนไม่สอดคล้องกัน ถึงว่าไม่ผ่านเกณฑ์ ต้องมีการปรับแก้คะแนนความสำคัญใหม่

ค่าคะแนนความสำคัญจากการเปรียบเทียบสัดส่วนความสอดคล้องผ่านเกณฑ์ [19]

$CR \leq 0.1$: สำหรับการวิเคราะห์ปัจจัยที่เกินกว่า 5 ปัจจัย

$CR \leq 0.09$: สำหรับการวิเคราะห์ปัจจัยที่เกินกว่า 4 ปัจจัย

$CR \leq 0.05$: สำหรับการวิเคราะห์ปัจจัยที่เกินกว่า 3 ปัจจัย

4 การวิเคราะห์ข้อมูล

ค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยหลักและปัจจัยรองในการคัดเลือกผู้รับเหมาปรับปรุงอาคาร มีดังนี้

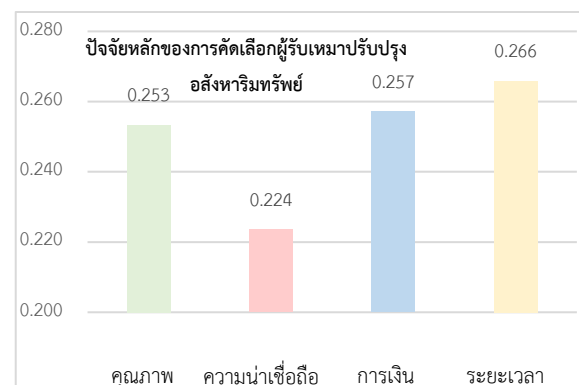
4.1 ค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยหลัก

ผลการประเมินค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยหลักจากการตอบแบบสอบถามและสัมภาษณ์จากกลุ่มเป้าหมายผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 5 ชุด พบว่าปัจจัยหลักที่ได้ในการศึกษาวิจัยมีทั้งหมด 4 ปัจจัยหลัก ได้ทำการตรวจสอบค่าความสอดคล้องของข้อมูล (Consistency ratio : CR)

ครั้งที่ 1 : ค่า $CR = 0.118$ และหลังจากอธิบายและสอบถามผู้เชี่ยวชาญอีกครั้ง ได้ทำการปรับแก้ใหม่

ครั้งที่ 2 : ค่า $CR = 0.099$

ผลการวิเคราะห์แสดงการเปรียบเทียบรายคู่ของปัจจัยหลัก มีค่าน้ำหนักความสำคัญ (Weight Vector W) หรือค่า Eigenvector เรียงลำดับจากมากไปน้อย ของปัจจัยหลักทั้งหมด 4 ปัจจัย คือ ด้านระยะเวลาในการทำงาน (0.266) ด้านการเงินและราคา (0.257) ด้านคุณภาพ (0.253) ด้านความน่าเชื่อถือ (0.224) ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยหลักของการคัดเลือกผู้รับเหมาฯ

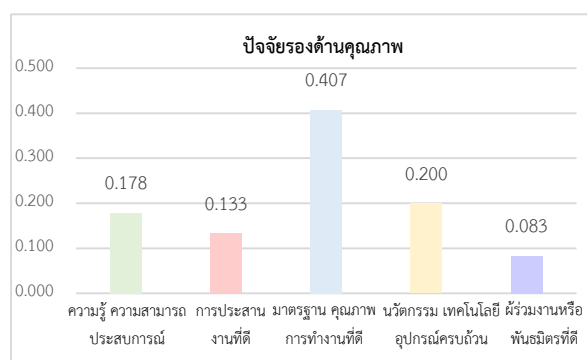
4.2 คำนวณน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยรอง

ผลการประเมินค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยรองแบ่งตามหัวข้อปัจจัยหลัก ดังนี้

4.2.1 ผลการประเมินค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยด้านคุณภาพการทำงาน

ผลการประเมินค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยรองด้านคุณภาพการทำงาน พบว่าปัจจัยรองด้านคุณภาพที่ได้ในการศึกษาวิจัยมีทั้งหมด 5 ปัจจัย ได้ทำการตรวจสอบค่าความสอดคล้องของข้อมูล (Consistency ratio : CR) ครั้งที่ 1 : ค่า CR = 0.074 อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

ผลการวิเคราะห์แสดงการเปรียบเทียบรายคู่ของปัจจัยรองด้านคุณภาพ มีค่าน้ำหนักความสำคัญ (Weight Vector W) หรือค่า Eigenvector เรียงลำดับจากมากไปน้อย ของปัจจัยหลักทั้งหมด 5 ปัจจัย คือ ด้านมาตรฐานคุณภาพการทำงานที่ดี (0.407) ด้านนวัตกรรม เทคโนโลยี และอุปกรณ์ครบถ้วน (0.200) ด้านบุคลากรมีความรู้ ความสามารถ ประสบการณ์สูง (0.178) ด้านการประสานงานที่ดี (0.133) ด้านผู้ร่วมงานหรือพันธมิตรที่ดี (0.083) ดังรูปที่ 3



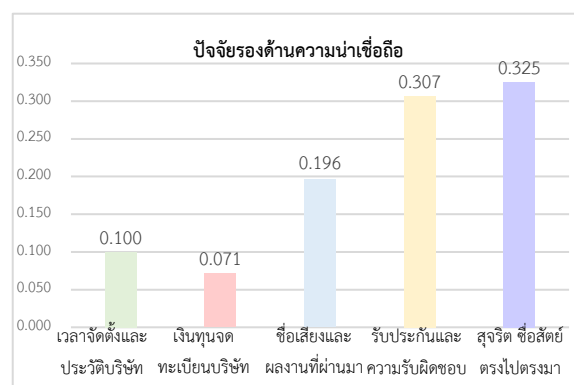
รูปที่ 3 แสดงค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยรองด้านคุณภาพของการคัดเลือกผู้รับเหมาฯ

4.2.2 ผลการประเมินค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยด้านความน่าเชื่อถือ

ผลการประเมินค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยรองด้านความน่าเชื่อถือ พบว่าปัจจัยรองด้านความน่าเชื่อถือที่ได้ในการศึกษาวิจัยมีทั้งหมด 5 ปัจจัย ได้ทำการตรวจสอบค่าความสอดคล้องของข้อมูล (Consistency ratio : CR)

ครั้งที่ 1 : ค่า CR = 0.045 อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ ผลการประเมิน

ผลการวิเคราะห์แสดงการเปรียบเทียบรายคู่ของปัจจัยรองด้านความน่าเชื่อถือ มีค่าน้ำหนักความสำคัญ (Weight Vector W) หรือค่า Eigenvector เรียงลำดับจากมากไปน้อย ของปัจจัยหลักทั้งหมด 5 ปัจจัย คือ ด้านความสุจริต ซื่อสัตย์ ตรงไปตรงมา รักษาคำพูด (0.325) การรับประกันผลงานและความรับผิดชอบของผู้รับเหมา (0.307) ด้านบริษัทมีชื่อเสียง และการริเริ่มผลงานที่ผ่านมา (0.196) ระยะเวลาจัดตั้งและประวัติบริษัท (0.100) ด้านเงินทุนจดทะเบียนบริษัท/ผู้รับเหมา (0.071) ดังรูปที่ 4

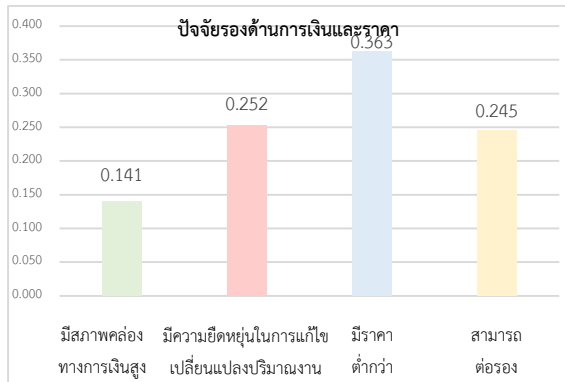


รูปที่ 4 แสดงค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยรองด้านความน่าเชื่อถือของการคัดเลือกผู้รับเหมาฯ

4.2.3 ผลการประเมินค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยด้านการเงินและราคา

ผลการประเมินค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยรองด้านการเงินและราคา พบว่าปัจจัยรองด้านการเงินและราคาที่ได้ในการศึกษาวิจัยมีทั้งหมด 4 ปัจจัยหลัก คือ มีสภาพคล่องทางการเงินสูง มีความยืดหยุ่นในการแก้ไขเปลี่ยนแปลงปริมาณงาน มีราคาต่ำ(ถูก)กว่าคู่แข่ง สามารถต่อรองราคาได้ ได้ทำการตรวจสอบค่าความสอดคล้องของข้อมูล (Consistency ratio : CR) ครั้งที่ 1 : ค่า CR = 0.030 อยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ผลการวิเคราะห์แสดงการเปรียบเทียบรายคู่ของปัจจัยรองด้านการเงินและราคา มีค่าน้ำหนักความสำคัญ (Weight Vector W) หรือค่า Eigenvector เรียงลำดับจากมากไปน้อย ของปัจจัยหลัก

ทั้งหมด 4 ปัจจัย คือ ด้านมีราคาต่ำ(ถูก)กว่าคู่แข่ง (0.363) มีความยืดหยุ่นในการแก้ไขเปลี่ยนแปลงปริมาณงาน (0.252) ด้านสามารถต่อรองราคาได้ (0.245) มีสภาพคล่องทางการเงินสูง (0.141) ดังรูปที่ 5

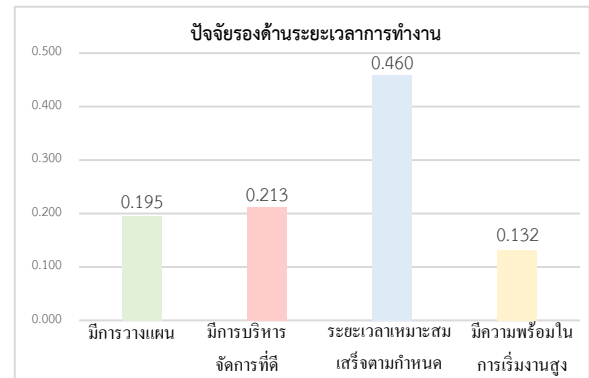


รูปที่ 5 แสดงค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยรองด้านการเงินและราคาของการคัดเลือกผู้รับเหมาฯ

4.2.4 ผลการประเมินค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยด้านระยะเวลาในการทำงาน

ผลการประเมินค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยรองด้านการเงินและราคา พบว่าปัจจัยรองด้านคุณภาพที่ได้ในการศึกษาวิจัยมีทั้งหมด 4 ปัจจัยหลัก คือ ด้านการวางแผนงานที่ดี ด้านการบริหารจัดการที่ดี มีระยะเวลาในการดำเนินงานที่เหมาะสม เสร็จตามกำหนด และด้านมีความพร้อมในการเริ่มงานสูง ได้ทำการตรวจสอบค่าความสอดคล้องของข้อมูล (Consistency ratio : CR) ครั้งที่ 1 : ค่า CR = 0.005

ผลการวิเคราะห์แสดงการเปรียบเทียบรายคู่ของปัจจัยรองด้านการเงินและราคา มีค่าน้ำหนักความสำคัญ (Weight Vector W) หรือค่า Eigenvector เรียงลำดับจากมากไปน้อย ของปัจจัยหลักทั้งหมด 4 ปัจจัย คือ ด้านระยะเวลาในการดำเนินงานที่เหมาะสม เสร็จตามกำหนด (0.460) ด้านการบริหารจัดการที่ดี (0.213) ด้านการวางแผนงานที่ดี (0.195) และด้านมีความพร้อมในการเริ่มงานสูง (0.132) ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 แสดงค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยรองด้านระยะเวลาในการทำงานของการคัดเลือกผู้รับเหมาฯ

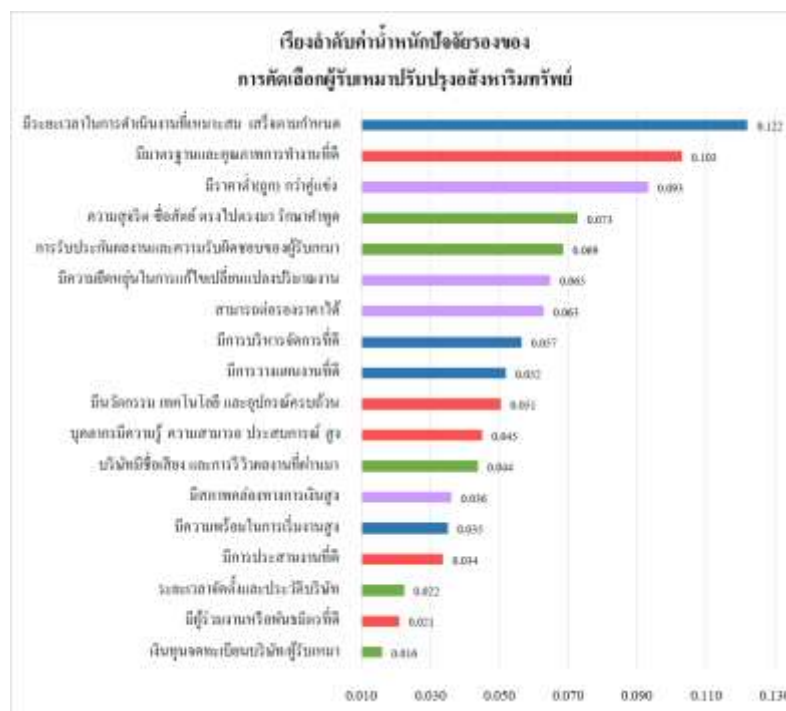
4.3 ผลการวิเคราะห์หาความสำคัญของปัจจัยในการคัดเลือกผู้รับเหมาปรับปรุงอาคาร

จากการประเมินผลความสำคัญของปัจจัยหลักและปัจจัยรองที่ได้วิเคราะห์ไปแล้ว นำค่าน้ำหนักคะแนนที่ได้ให้ ความสำคัญของปัจจัยทั้งหมด สามารถสรุปค่าน้ำหนักความสำคัญของทุกปัจจัย และจัดลำดับความสำคัญของปัจจัยรอง ตามตารางที่ 6 เมื่อได้ค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยหลักและปัจจัยรองทั้งหมดมาแล้ว นำมาจัดเรียงลำดับความสำคัญตั้งแต่มากไปน้อย และสร้างแผนภูมิเปรียบเทียบค่าน้ำหนักความสำคัญของแต่ละปัจจัย ได้ดังรูปที่ 7

จากตารางและแผนภูมิ แสดงค่าน้ำหนักความสำคัญ และจัดเรียงลำดับความสำคัญมากไปน้อย ของปัจจัยรองที่มีผลต่อการคัดเลือกผู้รับเหมาปรับปรุงอาคาร ทั้งประเภทเพื่อการพักอาศัย พาณิชยกรรม และอุตสาหกรรม เมื่อนำปัจจัยหลัก และแยกย่อยปัจจัยรอง จะเห็นว่าความสำคัญของปัจจัยหลัก ระยะเวลาในการทำงานมีความสำคัญสูง และมีความสำคัญต่อการตัดสินใจมากที่สุดสำหรับจุดเริ่มต้นของการคัดเลือกผู้รับเหมา และเมื่อนำค่าน้ำหนักของปัจจัยหลักมาคูณค่าน้ำหนักกับปัจจัยรอง พบว่า ปัจจัยด้านระยะเวลาในการดำเนินงานที่เหมาะสม และเสร็จตามกำหนด เป็นปัจจัยที่มีความสำคัญสูงสุด และผู้บริโภคนำความสำคัญในปัจจัยอื่นๆรองลงมาตาม รูปที่ 7

ตารางที่ 6 สรุปค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยและปัจจัยรองทั้งหมด

การศึกษาแนวทางการคัดเลือกผู้รับเหมาปรับปรุงอสังหาริมทรัพย์					
เกณฑ์หลัก (Criteria)	ค่าน้ำหนัก ความสำคัญ (ปัจจัยหลัก)	เกณฑ์ย่อย (Sub Criteria)	ค่าน้ำหนัก ความสำคัญ (ปัจจัยรอง)	ค่าน้ำหนัก ความสำคัญ (ปัจจัยรอง)รวม	ลำดับ ความสำคัญ ของปัจจัย
	A		B	A x B = C	
คุณภาพการทำงาน	0.253 CR 0.074	1. บุคลากรมีความรู้ ความสามารถ ประสบการณ์ สูง	0.178	0.045	11
		2. มีการประสานงานที่ดี	0.133	0.034	15
		3. มีมาตรฐานและคุณภาพการทำงานที่ดี	0.407	0.103	2
		4. มีนวัตกรรม เทคโนโลยี และอุปกรณ์ครบถ้วน	0.200	0.051	10
		5. มีผู้ร่วมงานหรือพันธมิตรที่ดี	0.083	0.021	17
ความน่าเชื่อถือ	0.224 CR 0.045	1. ระยะเวลาจัดตั้งและประวัติบริษัท	0.100	0.022	16
		2. เงินทุนจดทะเบียนบริษัท/ผู้รับเหมา	0.071	0.016	18
		3. บริษัทมีชื่อเสียง และการวิวัฒนาการที่ผ่านมา	0.196	0.044	12
		4. การรับประกันผลงานและความรับผิดชอบของผู้รับเหมา	0.307	0.069	5
		5. ความสุจริต ซื่อสัตย์ ตรงไปตรงมา รักษาความซื่อสัตย์	0.325	0.073	4
การเงินและราคา	0.257 CR 0.030	1. มีสภาพคล่องทางการเงินสูง	0.141	0.036	13
		2. มีความยืดหยุ่นในการแก้ไขเปลี่ยนแปลงปริมาณงาน	0.252	0.065	6
		3. มีราคาต่ำ(ถูก) กว่าคู่แข่ง	0.363	0.093	3
		4. สามารถต่อรองราคาได้	0.245	0.063	7
ระยะเวลาในการ ทำงาน	0.266 CR 0.005	1. มีการวางแผนงานที่ดี	0.195	0.052	9
		2. มีการบริหารจัดการที่ดี	0.213	0.057	8
		3. มีระยะเวลาในการดำเนินงานที่เหมาะสม เสร็จตามกำหนด	0.460	0.122	1
		4. มีความพร้อมในการเริ่มงานสูง	0.132	0.035	14
				1.000	



รูปที่ 7 แสดงแผนภูมิค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยรองทั้งหมด (เรียงลำดับจากมากไปน้อย)

5 สรุปอภิปราย นำไปใช้ และข้อเสนอแนะของงานวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 การศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการคัดเลือกผู้รับเหมาปรับปรุงอาคาร

งานวิจัยครั้งนี้ การสัมภาษณ์จากกลุ่มเป้าหมาย ผู้บริโภคที่มีประสบการณ์ตรงเกี่ยวข้องกับผู้รับเหมาปรับปรุงอาคาร เพื่อประเภทเพื่อการพักอาศัย พาณิชยกรรม และอุตสาหกรรม ผู้เชี่ยวชาญจำนวน 5 ท่าน การสัมภาษณ์พบปัจจัยหลักทั้งหมด 4 ปัจจัย ได้แก่ปัจจัยด้านคุณภาพการทำงาน ความน่าเชื่อถือ ราคาและการเงิน และระยะเวลาการทำงาน เป็นปัจจัยหลักที่ส่งผลต่อการตัดสินใจคัดเลือกผู้รับเหมาปรับปรุงอาคารในระดับวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม

5.1.2 การวิเคราะห์จัดลำดับความสำคัญของปัจจัยที่มีผลต่อการคัดเลือกผู้รับเหมาปรับปรุงอาคาร

งานวิจัยการทำแบบสอบถามและสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญ ฝ่ายเจ้าของงานอีกหนึ่งกลุ่ม จำนวน 5 ท่าน พบว่ากลุ่มเป้าหมายทั้งหมดเป็นผู้บริโภคระดับวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อมที่มีประสบการณ์เกี่ยวข้องกับผู้รับเหมาปรับปรุงอาคาร

ผลการประเมินค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยหลักในกลุ่มเป้าหมายให้ค่าน้ำหนักคะแนนความสำคัญเรียงลำดับจากมากไปน้อย ทั้งหมด 4 ปัจจัย คือ ด้านระยะเวลาในการทำงาน (0.266) ด้านการเงินและราคา (0.257) ด้านคุณภาพ (0.253) และด้านความน่าเชื่อถือ (0.224)

ผลการประเมินค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยรองได้ทั้งหมด 18 ปัจจัย โดยแบ่งตามหัวข้อปัจจัยหลักทั้ง 4 ปัจจัย

ผลการประเมินค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยรองด้านคุณภาพ ในกลุ่มเป้าหมายให้ค่าน้ำหนักคะแนนความสำคัญเรียงตามลำดับจากมากไปน้อย ทั้งหมด 5 ปัจจัย คือ ด้านมาตรฐานคุณภาพการทำงานที่ดี (0.407) ด้านนวัตกรรม เทคโนโลยี และอุปกรณ์ครบถ้วน (0.200) ด้านบุคลากรมีความรู้ ความสามารถ ประสบการณ์สูง (0.178) ด้านการประสานงานที่ดี (0.133) ด้านผู้ร่วมงานหรือพันธมิตรที่ดี (0.083)

ผลการประเมินค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยรองด้านความน่าเชื่อถือ ในกลุ่มเป้าหมายให้ค่าน้ำหนักคะแนนความสำคัญเรียงตามลำดับจากมากไปน้อย ทั้งหมด 5 ปัจจัย คือ ด้านความสุจริต ซื่อสัตย์ ตรงไปตรงมา รักษาคำพูด (0.325) การรับประกันผลงานและความรับผิดชอบของผู้รับเหมา (0.307) บริษัทมีชื่อเสียงและการรีวิวผลงานที่ผ่านมา (0.196) ระยะเวลาจัดตั้งและประวัติบริษัท (0.100) และด้านเงินทุนจดทะเบียนบริษัท/ผู้รับเหมา (0.071)

ผลการประเมินค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยรองด้านการเงินและราคา ในกลุ่มเป้าหมายให้ค่าน้ำหนักคะแนนความสำคัญเรียงตามลำดับจากมากไปน้อย ทั้งหมด 4 ปัจจัย คือ มีราคาต่ำ(ถูก)กว่าคู่แข่ง (0.363) มีความยืดหยุ่นในการแก้ไขเปลี่ยนแปลงปริมาณงาน (0.252) สามารถต่อรองราคาได้ (0.245) และมีสภาพคล่องทางการเงินสูง (0.141)

ผลการประเมินค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยรองด้านระยะเวลาในการทำงาน ในกลุ่มเป้าหมายให้ค่าน้ำหนักคะแนนความสำคัญเรียงตามลำดับจากมากไปน้อย ทั้งหมด 4 ปัจจัย คือ ระยะเวลาในการดำเนินงานที่เหมาะสม เสร็จตามกำหนด (0.460) การบริหารจัดการที่ดี (0.213) การวางแผนงานที่ดี (0.195) และมีความพร้อมในการเริ่มงานสูง (0.132)

5.2 อภิปรายผลการวิจัย

จากผลการวิจัยสามารถอภิปรายผลการวิจัยได้ดังนี้

ผลการวิจัยที่พบว่า ปัจจัยด้านระยะเวลาในการดำเนินงานที่เหมาะสม เสร็จตามกำหนด มีค่าน้ำหนักความสำคัญสูงสุด เมื่อเทียบกับงานวิจัยของ พลสามารถไชยชนะ [16] พบว่า มีความแตกต่างกับการคัดเลือกระบบป้องกันดินพังโดยวิธี AHP ในการคัดเลือกที่มีปัจจัยหลักคือ ด้านราคา ระยะเวลาที่ใช้ในการทำงาน คุณภาพและผลกระทบด้านความปลอดภัย และสภาพแวดล้อมในการทำงาน โดยแบ่งข้อมูลกลุ่มความต้องการเป็น 3 กลุ่ม ผู้รับเหมาหลัก, ผู้รับเหมาช่วง, เจ้าของโครงการกับบริษัทที่ปรึกษา ซึ่งให้ความสำคัญเรื่องคุณภาพและผลกระทบด้านความปลอดภัยมากที่สุด เนื่องจากระบบป้องกันดินพังมี

อัตราความเสี่ยงต่อชีวิตมนุษย์สูง ถ้าเกิดความเสียหายจากการทำงานที่ผิดพลาดหรือไม่ได้มาตรฐานจะได้รับอันตรายถึงชีวิตได้ เพราะฉะนั้นคุณภาพและความปลอดภัยจึงเป็นสิ่งสำคัญสูงสุด บ่งบอกถึงการคัดเลือกรองานป้องกันดินพังและงานปรับปรุงอาคาร ให้ความสำคัญในเรื่องคุณภาพงานค่อนข้างมาก โดยงานป้องกันดินพังจะเน้นความปลอดภัยสูงสุด และงานปรับปรุงอาคารเน้นด้านเวลาสูงสุด แสดงว่าลักษณะของการทำงานและกระบวนการมีความแตกต่างกัน จึงให้ความสำคัญต่อบ้างที่ต่างกัน

ผลการวิจัยพบว่า การคัดเลือกผู้รับเหมาปรับปรุงอาคารมีปัจจัยย่อยในด้าน การบริหารจัดการที่ดี บริษัทมีชื่อเสียงและการริ้วผลงานที่ผ่านมา บุคลากรมีความรู้ความสามารถ ประสบการณ์สูง มีความสำคัญในระดับปานกลาง ซึ่งมีปัจจัยหลายด้านมีความสอดคล้องกับแนวคิดงานวิจัยของ พรรัตน์ พงษ์ประเสริฐ และ วิรุฬ ภิรมยาภรณ์ [11] ที่ศึกษาแนวคิดการคัดเลือกผู้รับเหมาก่อสร้างของผู้ประกอบการโครงการบ้านจัดสรร ระดับราคา 1-4 ล้านบาท ในจังหวัดนนทบุรี ผลจากการศึกษาเห็นได้ว่า เกณฑ์ในการคัดเลือกคุณสมบัติของผู้รับเหมาทั้งหมด 19 คุณสมบัติ สรุปผลการวิจัยผู้ประกอบการในธุรกิจอสังหาริมทรัพย์ให้ความสำคัญกับปัจจัยหลักสูงสุดคือ การก่อสร้างและการบริหารโครงการ รองลงมาคือ ผลงานที่ผ่านมาในอดีตและปัจจุบัน และความสำคัญของปัจจัยย่อยสูงสุดคือ ประสบการณ์ของผู้รับเหมาก่อสร้าง ผลงานที่ผ่านมาของผู้รับเหมา และ ความสามารถในการบริหารโครงการ แต่ในส่วนของการงานวิจัยนี้พบว่า งานปรับปรุงอาคารในโครงการระดับวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม มีปัจจัยที่ควรให้ความสำคัญในด้านระยะเวลาในการดำเนินงานเสร็จตามกำหนดสูงสุด เนื่องจากการทำงานปรับปรุงอาคารบางโครงการมีการใช้สอยพื้นที่หรือประกอบกิจการเดิมอยู่ แต่ถูกจำกัดพื้นที่บางส่วนเพื่อการทำงานปรับปรุงอาคาร ส่งผลให้ปัจจัยด้านระยะเวลาของงานปรับปรุงอาคารมีความสำคัญสูงสุด เมื่อเทียบกับงานรับเหมาก่อสร้างบ้านใหม่ของโครงการจัดสรร ในด้านความสามารถในการบริหารจัดการที่ดี คุณสมบัติของผู้รับเหมาโครงการจัดสรร มีลักษณะเป็น

งานโครงการที่ต้องสร้างจำนวนหลายหลัง (Units) การบริหารงานจึงมีความสำคัญสูงและมีรายละเอียดตั้งแต่ต้นจนจบทั้งหลัง แต่งานปรับปรุงอาคารมีความเสี่ยงที่อาจจะพบปัญหาหรือความเสียหายที่เกิดขึ้นในส่วนที่ไม่สามารถสำรวจได้ในช่วงเริ่มงาน งานปรับปรุงอาคารจึงไม่สามารถที่จะบริหารจัดการให้เหมือนงานสร้างใหม่ได้ เพราะฉะนั้นปัจจัยด้านการบริหารจัดการงานปรับปรุงอาคารที่ได้จากการศึกษาในงานวิจัยนี้จึงมีความสำคัญอยู่ในลำดับที่ 8

จากนั้นผลการวิจัยการคัดเลือกผู้รับเหมาปรับปรุงอาคารด้านเจ้าของงานให้ความสำคัญกับปัจจัยด้านระยะเวลาสูงสุด ซึ่งมีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ รังสิมา หนูตุก และ ดร.รชฏ ขำบุญ [20] ที่ได้ศึกษาปัจจัยการตัดสินใจเลือกรับงานก่อสร้างแบบการสร้างใหม่และแบบต่อเติม(ด้านผู้รับเหมา) โดยใช้ทฤษฎีการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น AHP เป็นเครื่องมือ ผลจากการศึกษาวิจัยพบว่า กระบวนการตัดสินใจเลือกรับงานก่อสร้าง ผู้รับเหมาจะอาศัยประสบการณ์ โดยเลือกใช้ปัจจัย 5 ปัจจัยเป็นองค์ประกอบหลัก คือ มูลค่า/กำไร พนักงาน ขนาดสิ่งปลูกสร้าง สิ่งอำนวยความสะดวก(สาธารณูปโภค) และ เวลากับสภาพอากาศมีความสำคัญน้อยที่สุดใน 5 ปัจจัย แสดงให้เห็นถึงมุมมองของผู้บริโภค(เจ้าของงาน)ที่มีความต้องการให้ระยะเวลาการทำงานแล้วเสร็จเร็วที่สุดหรือตามกำหนดที่ตกลงกันได้ เนื่องจากเจ้าของงานมีความกังวลใจในเรื่องระยะเวลาการทำงานของผู้รับเหมา ส่วนด้านผู้รับเหมาให้ความสนใจกับเรื่องราคาและกำไรมากที่สุด โดยให้ความสำคัญด้านระยะเวลาน้อยที่สุด

หากกล่าวถึงผลการวิจัยการคัดเลือกผู้รับเหมาปรับปรุงอาคารในเกณฑ์ย่อย ปัจจัยที่มีความสำคัญ คือ มีการบริหารจัดการที่ดี มีการวางแผนงานที่ดี บุคลากรมีความรู้ ความสามารถ ประสบการณ์สูง มีความพร้อมในการเริ่มงานสูง (รวมถึงการสำรวจหน้างาน การเตรียมการและเคลียร์แบบ) และมีการประสานงานที่ดี พบว่ามีความสอดคล้องกับงานวิจัยของ ภาณุเดช เหลืองประเสริฐ [12] ที่ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อความล่าช้าของงานรีโนเวทอาคาร โดยกระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น ได้

วิเคราะห์ปัจจัยย่อยแบ่งกลุ่มตามปัจจัยหลักพบว่าปัจจัยที่มีความสำคัญสูงสุด 5 อันดับแรก คือ 1.ขาดการวางแผนในการใช้งานเครื่องจักรและคนงาน 2.การสำรวจโครงสร้างเดิมไม่ละเอียด 3.การใช้บุคลากรไม่เหมาะสมกับงาน 4.การวางแผนงานก่อสร้างไม่สอดคล้องกับหน้างานจริง 5.แบบที่ได้มาไม่สอดคล้องกับงานที่ทำการก่อสร้าง หากเปรียบเทียบกันจะพบว่ามีความสอดคล้องกันในเรื่องของปัจจัยย่อย เมื่อนำมาวิเคราะห์ถึงหัวข้อปัจจัยหลักของการคัดเลือกผู้รับเหมาปรับปรุงอาคาร จากผลสรุปบ่งบอกถึงเจ้าของงานให้ความสำคัญกับปัจจัยด้านระยะเวลาในการดำเนินงานและคุณภาพการทำงานสูงสุด เนื่องจากผลกระทบต่อความล่าช้าของงานปรับปรุงอาคาร ตามที่ได้กล่าวมา

5.3 ข้อเสนอแนะของงานวิจัย

5.3.1 ข้อเสนอแนะการนำไปใช้ประโยชน์

งานวิจัยฉบับนี้ได้วิเคราะห์ถึงปัจจัยในการคัดเลือกผู้รับเหมาปรับปรุง อาคาร ทั้งประเภทเพื่อการพักอาศัย พาณิชยกรรม และอุตสาหกรรมของผู้บริโภคในระดับวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อม โดยนำค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยจากผลสรุปของงานวิจัยมาใช้ในการเสนอแนะ สำหรับผู้ที่เกี่ยวข้องกับการปรับปรุงอสังหาริมทรัพย์จะได้รับข้อมูลในมุมมองของธุรกิจอสังหาริมทรัพย์ เพิ่มมากขึ้นและสามารถนำทฤษฎีปัจจัยต่างๆไปต่อยอดเพิ่มเติมได้ ดังนี้

1) เจ้าของบ้านหรือเจ้าของงานที่ต้องการปรับปรุงอาคาร ทั้งประเภทเพื่อการพักอาศัย พาณิชยกรรม และอุตสาหกรรมในระดับวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อมสามารถนำปัจจัยที่ได้จากงานวิจัยไปปรับใช้เป็นแนวทางในการคัดเลือกผู้รับเหมาปรับปรุงอาคารในองค์กรของท่าน และประยุกต์ใช้กับงานคัดเลือกผู้รับเหมาประเภทอื่นที่ลักษณะใกล้เคียงได้

2) ผู้ประกอบการรับเหมาปรับปรุงอาคาร ทั้งประเภทเพื่อการพักอาศัย พาณิชยกรรม และอุตสาหกรรม สามารถนำทฤษฎีและปัจจัยที่มีความสำคัญในผลสรุปงานวิจัยไปใช้สร้างมาตรฐานของการทำงานเพื่อสร้างภาพลักษณ์ใน

มุมมองของผู้บริโภคในระดับวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อมให้ดีขึ้น โดยการพัฒนาศักยภาพ ด้านระยะเวลาในการทำงานที่รวดเร็ว งานมีคุณภาพในระดับมาตรฐานสากล ราคาเหมาะสมหรือเทียบเท่าราคากลาง และมีความน่าเชื่อถือ รวมถึงปัจจัยที่สำคัญด้านอื่นๆ สามารถนำไปพัฒนาต่อยอดเพื่อเป็นที่ยอมรับของวงการอสังหาริมทรัพย์ได้

3) ผู้ที่เกี่ยวข้องกับงานปรับปรุงอาคาร ทั้งประเภทเพื่อการพักอาศัย พาณิชยกรรม และอุตสาหกรรม สามารถนำปัจจัยหลักและปัจจัยรองจากผลสรุปค่าความสำคัญของแต่ละปัจจัยไปใช้สร้างกฎเกณฑ์ที่สอดคล้องกับมาตรฐานสากล เพื่อให้ทุกคนสามารถเข้าใจและรับรู้ได้ถึงคุณสมบัติพื้นฐานของการคัดเลือกผู้รับเหมาในมุมมองเจ้าของโครงการ

5.3.2 ข้อเสนอแนะงานวิจัยในอนาคต

1) จากการทำแบบสอบถาม ผู้เชี่ยวชาญมีความต้องการให้นำผลงานวิจัยฉบับนี้ไปพัฒนาต่อยอด การสร้างระบบแอปพลิเคชันการจับคู่ (Sharing Economy) ในการคัดเลือกผู้รับเหมาปรับปรุงอาคารในระบบออนไลน์โดยใช้ปัจจัยที่สำคัญทั้งหมดจากทฤษฎีที่ได้กล่าวมา คือ ด้านระยะเวลาในการทำงาน, ด้านการเงินและราคา ด้านคุณภาพและด้านความน่าเชื่อถือ เป็นเกณฑ์หลักในการพิจารณาแนวทางการทำงานวิจัยต่อไปในอนาคต

2) งานวิจัยฉบับนี้สามารถนำทฤษฎีและผลงานวิจัยสำหรับปัจจัยการคัดเลือกผู้รับเหมาปรับปรุงอาคารในทัศนคติผู้บริโภคระดับวิสาหกิจขนาดกลางและขนาดย่อมไปศึกษาเพื่อประยุกต์ใช้กับงานวิจัยการปรับปรุงอาคารในลักษณะงานธุรกิจเฉพาะมากขึ้น เช่น ธุรกิจโรงแรม ธุรกิจร้านอาหาร ธุรกิจบ้านเช่า ฯลฯ เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของปัจจัยและนำไปใช้ในการคัดเลือกผู้รับเหมาปรับปรุงอาคารได้อย่างเหมาะสมต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] Pattarat (2020, December 8) . 3 years, the purchasing power of real estate shrinks 90

- billion! 75% of Thai people slow down to buy a house, their ability to buy is lower [Online]. Available: <https://positioningmag.com/1309568>
- [2] T. Chankisen. (2020, April 15). How has COVID-19 changed Thai consumers? Insights into behavior and purchasing decisions in the pre-during-post-crisis period [Online]. Available: <https://thestandard.co/how-coronavirus-change-customer-buying-behaviour-before-and-after/>
- [3] Prachachat. (2021, January 2). Covid-19 changes the world. "Business" adjusts around the direction of new problems [Online]. Available: <https://www.prachachat.net/economy/news-584527>
- [4] 360 degree daily manager (2020, April 2). COVID-19 has severely impacted Thai real estate [Online]. Available: <https://www.reic.or.th/News/RealEstate/441783>
- [5] P. Lunkam. (2021, June 25). Business/Industry Outlook 2021-2023: Construction Materials Business [Online]. Available: <https://www.krungsri.com/th/research/industry/industry-outlook/Construction-Construction-Materials/Construction-Contractors/IO/io-Construction-Contractors-21>
- [6] TERRABKK. (2017, November 14). 10 Contractor Cheats [Online]. Available: 10 Contractor Scams (terrabkk.com)
- [7] Home Builder Association. (2020, May 19). 10 things to know before choosing a house builder [Online]. Available: 10 Things to Know Before Choosing a Home Builder Company - Home Builder Association (hba-th.org).
- [8] Thomas L. Saaty, "A scaling method for priorities in hierarchical structures", *Journal of Mathematical Psychology*, vol. 15, pp. 234-281, 1977.
- [9] R. Phiharn. , "The Factors Affecting the Decision Making in Choosing the Service of a Construction Company: A Case Study of People in Songkhla Province," M.S. thesis, Faculty of Management Sciences Prince of Songkla University, 2016.
- [10] W. Chomphukhiew, "Contractor Selection Process for Wellhead Platform Construction" Senior Project, Faculty of Engineering, Burapha University, 2012.
- [11] P. Pongprasert and W. Piromyaporn, "The Contractors Selection of New Developer for 1-4 Million Baht Housing Project in Nonthaburi Province. " *Engineering Journal of Siam University*, vol.15, no.31, pp.2-11, 2015.
- [12] P. Luangprasert, "A Study of Factors Influencing Delay of Building Renovation Project using Analytic Hierarchy Process," M.S. thesis, King Mongkut's University of Technology Thonburi, 2015
- [13] Office of Small and Medium Enterprises Promotion (OSMEP). (2019, November 29). SME definition [Online]. Available: <https://www.sme.go.th/th/cms-detail.php?modulekey=332&id=1334>
- [14] A. EAKARTIT. (2021, February 10). Renovate an old building, do I need a permit? [Online].

Available:

<https://www.eakanake.xyz/renovate/>

- [15] Building control law. (2021, August 6). Building Control Act, B.E. 2522 [Online]. Available: <https://asa.or.th/laws-and-regulations/cba/>
- [16] P. Chaichana, “ Incorporating Subjective Factors in Soil Protection System Prequalification Model by AHP,” Senior Project, Faculty of Engineering King Mongkut’s University of Technology Thonburi, 2008
- [17] R. Rovinelli and R. Hambleton, “On the use of content specialists in the assessment of criterion-referenced test item validity,” *Dutch Journal of Educational Research*, vol. 2, pp.49-60. 1977.
- [18] S. Opananon and P. Lertsanti, “Analysis of the logistics impact of relocating cash distribution centers in banking using a hierarchical analysis process (AHP) ,” *Chulalongkorn Business Review*, vol. 31, no.3 issue 121, pp.2-19, 2014.
- [19] A. Ruengkrit. “ Improving Factors of Green Packaging Product for Sugar Industry : An Application of AHP Technique,” M.S. thesis , Chula Logistics and Supply Chain Management Interdisciplinary Programs, Graduate School, 2010.
- [20] R Nookduk and R. Khumboon, “ Factors Affecting the Decisions on Choosing House Building Contractors,” M.S. thesis, College of Innovative Business and Accountancy (CIBA), Dhurakij Pundit University, Graduate School, 2018.

ผลของความชื้นต่อประสิทธิภาพการสีข้าวขาวของเครื่องสีขนาดเล็ก Effect of Paddy Moisture Content on Milling Rice Recovery of Small Milling Machine

สมพจน์ คำแก้ว

ห้องปฏิบัติการนวัตกรรมวิศวกรรมอบแห้งทางการเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

เลขที่ 1 หมู่ที่ 6 ตำบลกำแพงแสน อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

Sompot Khomkaew

Drying-Agri-Innovation Engineering Kasetsart University Kamphaeng Saen Campus,

1 M.6 Kamphaeng Saen District, Nakhon Pathom 73140, Thailand.

Email: Sku18me@gmail.com

(Received: November 1, 2021; Revised: April 29, 2022; Accepted: April 29, 2022)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลกระทบของความชื้นข้าวเปลือกต่อประสิทธิภาพการสีข้าวโดยนำข้าวเปลือกสายพันธุ์หอมมะลิ 105 มาทดสอบกับเครื่องสีข้าวขนาดเล็กที่สามารถสีข้าวเปลือกได้ครั้งละไม่เกิน 10 กิโลกรัม ค่าความชื้นเริ่มต้นเฉลี่ย 11.8 เปอร์เซ็นต์ พบว่าค่าความชื้นที่เหมาะสมของข้าวเปลือกมีค่าเท่ากับ 12.1 เปอร์เซ็นต์ อัตราการไหลข้าวเปลือกเฉลี่ย 2.85 กิโลกรัมต่อนาที ผลของความชื้นของข้าวเปลือกมีผลต่อประสิทธิภาพการสีข้าวได้ ข้าวขาวเต็มเมล็ดเฉลี่ย 3.89 กิโลกรัม ข้าวหักเฉลี่ย 0.69 กิโลกรัม ข้าวลีบเฉลี่ย 1.32 กิโลกรัม รำข้าวเฉลี่ย 1.19 กิโลกรัม แกลบข้าวเฉลี่ย 2.09 กิโลกรัม สิ่งเจือปน 1.21 กิโลกรัม และค่าเปอร์เซ็นต์ความขาวของข้าวเฉลี่ย 0.63 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้เวลาเฉลี่ยทั้งหมดในการสีข้าวมีค่าเท่ากับ 4.74 นาที

คำสำคัญ: เครื่องสีข้าวขนาดเล็ก ความชื้น ประสิทธิภาพการสีข้าว

ABSTRACT

This research aimed to study the effect of paddy moisture on milling rice recovery. Thai Hom Mali rice 105, varieties were tested with a small rice milling machine. Not more than 10 kg, the average initial moisture content was 11.8 % and the average time of milling was 4.74 minutes, the average paddy flow rate was 2.85 kg/min. It was found that the milling Rice recovery was 3.89 kg, average broken rice 0.69 kg, average withered rice 1.32 kg, rice bran 1.19 kg, rice husk average 2.09 kg, impurity 1.21 kg, and whiteness of average rice 0.63%.

Keywords: Small milling machine, Moisture content, Milling Rice Recovery.

1. บทนำ

ในกระบวนการแปรรูปผลิตผลทางการเกษตรของข้าวเปลือกยังไม่สามารถทำได้ด้วยตนเองต้องพึ่งพาเครื่องจักรกลการเกษตร โดยนำไปให้โรงสีข้าวขนาดเล็ก ขนาดกลางและขนาดใหญ่ในการแปรรูปข้าวเปลือก ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อสภาพของข้าวขาวนั้นคือค่าความชื้นข้าวเปลือก ดังนั้นงานวิจัยนี้มีจุดประสงค์ศึกษาผลของความชื้นต่อประสิทธิภาพการสีข้าวเปลือกครั้งละประมาณ 10 กิโลกรัม สำหรับครัวเรือนโดยทั่วไปสามารถสีข้าวไว้บริโภคเองในครัวเรือน อันเป็นแนวทางของหลักปรัชญาเศรษฐกิจพอเพียง

ปัจจุบันได้มีการพัฒนาเครื่องสีข้าวกล้องขนาดเล็ก โดยมีชุดลูกกลิ้งยางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 150 มิลลิเมตร ยาว 75 มิลลิเมตร จำนวน 3 ชุด ขับด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 1 แรงม้า สามารถสีได้ครั้งละ 1 กิโลกรัม หลังจากสีข้าวกล้องออกมาแล้ว มีการสูบลมข้าวกล้องที่สีได้ออกมา 10 กรัม เพื่อนำมาตรวจวัดนับจำนวนเมล็ดข้าวที่ดีและที่เสีย พบว่าจากการทดลอง 3 ครั้ง ได้ค่าเฉลี่ยเปอร์เซ็นต์เมล็ดดีเท่ากับ 85.14 เปอร์เซ็นต์ และได้มีการพัฒนาเครื่องสีข้าวขนาดกลางแบบ 2 ระบบ คือสามารถสีได้ทั้งข้าวกล้องและข้าวขัดขาวโดยมีชุดลูกกลิ้งยาง จำนวน 3 ชุด สามารถสีข้าวเปลือกได้ครั้งละ 10 กิโลกรัม โดยสามารถสีข้าวกล้องได้ในเวลา 24 นาที และสามารถสีข้าวขาวได้ในเวลา 35 นาที [1]

ต่อมามีการใช้ความเข้มแสงสูง (EBI) เพื่อตรวจความขาวข้าวกล้องภายหลังเปลี่ยนแปลงปริมาณแสงเล็กน้อยขนาด 5 กิโลเกรย์ ทำให้สีข้าวกล้อง ($P > 0.05$) และการขัดขาว ($P < 0.05$) ค่าอะมิโลสและความเหนียวของข้าวลด ($P < 0.05$) โครงสร้างผลึกข้าวไม่มีการเปลี่ยนรูปแต่ค่าจุลภาคของข้าวตัวอย่างไม่เปลี่ยนแปลงตามปริมาณแสงลดลง ($P < 0.05$) ผลที่ได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องเก็บตัวอย่างข้าวในช่วงการเก็บรักษาข้าวกล้องและข้าวขาว 120 วัน ทำให้กรดไขมันอิสระของตัวอย่างข้าวที่ฉายรังสีเพิ่มขึ้นในอัตราที่ช้ากว่าตัวอย่างที่ไม่ได้ฉายรังสี ฤทธิ์ของไลเปสถูกยับยั้งสัมพันธ์กับจำนวนแบคทีเรียที่ทั้งหมดลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) ผลการวิจัย

ชี้ให้เห็นถึงศักยภาพของ (EBI) ในการปรับปรุงคุณภาพและยืดอายุการเก็บรักษาข้าวกล้องและข้าวขาวในระหว่างการเก็บ [2]

ซึ่งคุณสมบัติของแป้งจากข้าวขัดมันที่ผ่านกรรมวิธีสีข้าวเหนียว มีผลให้อะมิโลสต่ำและสูงด้วยความเร็วรอบที่ระดับต่างกันคือ 1050, 950 และ 750 รอบ/นาที ที่ช่วงเวลาที่ 20, 40 และ 60 วินาที เพื่อเปรียบเทียบกับแป้งข้าวกล้องและความสามารถในการละลายของแป้งข้าวเหนียวที่ต่ำกว่าแป้งข้าวกล้องอย่างมาก แต่สำหรับแป้งข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสต่ำและที่มีอะมิโลสสูงจะไม่เปลี่ยนแปลง ความหนืดสูงสุดของแป้งข้าวเจ้าที่มีอะมิโลสต่ำและสูงมีผลมากจากระยะเวลาการสีมากขึ้น ในขณะที่ความหนืดมีผลมาจากความเร็วรอบสูงขึ้นส่งผลให้คุณสมบัติการวางของ (WRF) มีผลมากกว่า(LARF) และ (HARF) ระยะเวลาการสีเป็นตัวกำหนดคุณสมบัติทางความร้อนมากกว่าความเร็วการสีข้าว ซึ่งพบว่าทั้งระยะเวลาการสีข้าวและความเร็วรอบส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติทางเคมีกายภาพและการย่อยของแป้งข้าวเจ้าในระดับที่แตกต่างกัน [3]

การรักษาคุณภาพผลิตผลของเมล็ดพืชเป็นสิ่งสำคัญสำหรับการผลิตข้าวเพื่อตรวจสอบอิทธิพลของเทคนิคการจัดการน้ำแบบต่างๆ ต่อคุณภาพเมล็ดพืช และการดูดซึมน้ำในข้าวภายใต้ระบบการผลิตเมล็ดตรงและแบบปลูกถ่ายข้าวหอมมะลิสองสายพันธุ์ (บาสมาดิ-515 และเจนับบาสมาดิ) ข้าวที่ปลูกในบ่อ (TPR) และข้าวเมล็ดโดยตรงแห้ง (DDSR) ระบบบริหารจัดการการให้น้ำ 3 ระบบ โดยยึดตามความตึงของความชื้นในดิน (SMT) น้ำท่วมต่อเนื่อง (> -10 kPa SMT) ทำให้เปียกและแห้งแบบ (AWD, -20 kPa SMT) และข้าวแอโรบิก (-40 kPa SMT) การปลูกข้าวในระบบ (DDSR) ทำได้เทียบเท่ากับ (TPR) เปอร์เซ็นต์ของข้าวหัก เมล็ดชอล์ค เมล็ดแห้งและเมล็ดที่บวมสูงกว่า 5–8 เปอร์เซ็นต์, 20, 19 เปอร์เซ็นต์, 2 เปอร์เซ็นต์ภายใต้ระบบ (DDSR) อย่างไรก็ตาม ปริมาณอะไมโลเพคตินจากเคอร์เนลและการดูดซึมน้ำของเมล็ดต่ำกว่า 9 เปอร์เซ็นต์และ 11 เปอร์เซ็นต์ภายใต้ระบบ (DDSR) ในการจัดการชลประทาน (AWD) พบว่าเปอร์เซ็นต์คุณภาพของข้าวหัก

ข้าวกล้องเพิ่มขึ้นเท่ากับ 11 เปอร์เซ็นต์ความขาวเท่ากับ 15 เปอร์เซ็นต์ และเปอร์เซ็นต์ปริมาณโปรตีนเมล็ดเท่ากับ 11 เปอร์เซ็นต์ [4]

อนึ่งการศึกษาเพื่อตัดแปลงพื้นผิวข้าวขาวและการดูดซับวิตามินในสภาพแวดล้อมอัลตราโซนิคปรับพื้นผิวจากเรียบเป็นผิวรุปรุน ในการวิเคราะห์ทางสัณฐานวิทยาพบว่า Sonication มีผลต่อการกระจายตัวและการทำลายของเปลือกพื้นผิวข้าวและเหนียวน้ำแม่สนามแม่เหล็กทำให้เกิดการก่อตัวของไมโครพอร์ผนังเซลล์และการสลายตัวของเอนโดสเปิร์มที่เป็นแหล่งในเม็ดแป้งแต่ละเม็ด เทคนิคการแช่ข้าว (Sonication) ในสารละลายของกรด (Pantothenic vitamin B5) ทำให้สามารถดูดซับวิตามินเข้าไปในเมล็ดข้าวขาวได้และการดูดซับวิตามินบี 5 ในข้าวขาวโซนิเคตสูงกว่าข้าวขาวที่ไม่โซนิเคตถึง 14.0 เปอร์เซ็นต์ ในการศึกษาจุลนาศาสตร์บ่งชี้ว่าอัตราการดูดซับในข้าวขาวที่มีรูพรุนสูงกว่าข้าวที่ไม่ผ่านการกรอง 93.9 เปอร์เซ็นต์ การตรวจสอบการดูดซับพบว่ากลไกการดูดซับที่ต่างกันซึ่งบ่งชี้บทบาทที่สำคัญของการปรับเปลี่ยนพื้นผิวรูพรุนของเมล็ดข้าวขาวในกระบวนการผลิต [5]

ดังนั้นการพัฒนาเครื่องสีข้าวขนาดเล็กแบบเปิดสำหรับครัวเรือน โดยสามารถสีข้าวเปลือกพันธุ์ข้าวขาวดอกมะลิ จำนวน 5 กิโลกรัม ได้ข้าวเฉลี่ย 3.65 กิโลกรัม ในเวลา 15 นาที และ สามารถสีข้าวเปลือกพันธุ์ข้าวสันป่าตอง 1 จำนวน 5 กิโลกรัม ได้ข้าวเฉลี่ย 3.75 กิโลกรัม ในเวลา 13.7 นาที เครื่องสีข้าวกล้องขนาดเล็กที่มีจำหน่ายในท้องตลาด มีชุดลูกกลิ้งยางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 101.6 มิลลิเมตร ยาว 44.45 มิลลิเมตร จำนวน 2 ชุด ขับด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 1/3 แรงม้า มีกำลังการผลิต 20 กิโลกรัมต่อชั่วโมง รุ่น MS 50 BM มีชุดลูกกลิ้งยางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 101.6 มิลลิเมตร ยาว 40.64 มิลลิเมตร จำนวน 3 ชุด ขับด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 1/2 แรงม้า มีกำลังการผลิต 50-60 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และรุ่น MS 100 BM มีชุดลูกกลิ้งยางขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 152.40 มิลลิเมตร ยาว 76.20 มิลลิเมตร จำนวน 3 ชุด ขับด้วยมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 1 แรงม้ามีกำลังการผลิต 150-160 กิโลกรัมต่อชั่วโมง [6]

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ประสิทธิภาพการสีข้าว (Milling Rice Recovery)

ประสิทธิภาพการสีข้าวหาได้จากสมการที่ (1) [1]

$$MRR = \left(\frac{A+B+C+D}{T} \right) \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ

MRR คือ ประสิทธิภาพการสีข้าว (%)

A คือ ปริมาณปลายข้าว (kg/hr)

B คือ ปริมาณข้าวเต็ม (kg/hr)

C คือ ปริมาณต้นข้าว (kg/hr)

D คือ ปริมาณข้าวหัก (kg/hr)

T คือ ปริมาณป้อนข้าวเปลือก (kg/hr)

2.2 ประสิทธิภาพการสีข้าว (Head Rice Recovery)

ประสิทธิภาพการสีข้าวหาได้จากสมการที่ (2) [1]

$$HRR = \left(\frac{B+C}{T} \right) \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ

HRR คือ ประสิทธิภาพการสีข้าว (%)

B คือ ปริมาณข้าวเต็ม (kg/hr)

C คือ ปริมาณต้นข้าว (kg/hr)

T คือ ปริมาณป้อนข้าวเปลือก (kg/hr)

2.3 ปริมาณการขัดสี (Degree of polish)

ปริมาณการขัดสีหาได้จากสมการที่ (3) [1]

$$DOP = \left(1 - \frac{W_1}{W_2} \right) \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ

DOP คือ ปริมาณการขัดสี (%)

W_1 คือ น้ำหนักข้าวเต็มเมล็ด (g)

W_2 คือ น้ำหนักข้าวเต็มเมล็ดข้าวกล้อง (g)

2.4 สมรรถนะการสีข้าวเปลือก (Milling Capacity of Paddy)

สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4 [1]

$$MC_p = \left(\frac{T}{t} \right) \quad (4)$$

เมื่อ

MC_p คือ สมรรถนะการสีข้าวเปลือก (kg of paddy/hr)

T คือ ปริมาณเมล็ดข้าวเปลือกที่ถูกล้าง (kg)

t คือ เวลาที่ใช้ในการสีข้าว (hr)

2.5 สมรรถนะการสีข้าวสาร (Milling Capacity of Rice)

สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 5 [1]

$$MC_r = \left(\frac{R}{t} \right) \quad (5)$$

เมื่อ

MC_r คือ สมรรถนะการสีข้าวสาร (kg of rice/hr)

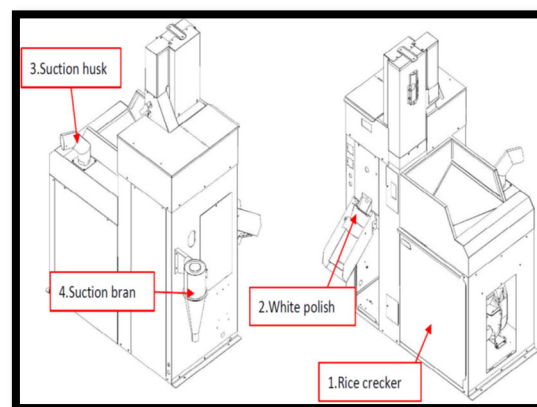
R คือ ปริมาณเมล็ดข้าวสารทั้งหมดที่สีได้ (kg)

t คือ เวลาที่ใช้ในการสีข้าว (hr)

การหาค่าความขาวของข้าวด้วยเครื่องวัดความขาวของข้าวสารด้วยเครื่อง Kett C-600 Whiteness Tester เฟอร์เซ็นต์การสีข้าวได้ช่วงการวัด 5.0~69.9 (ค่าความละเอียด 0.1) อุณหภูมิการทำงานอุณหภูมิ 5-40 องศาเซลเซียสและความชื้น 30-85% RH

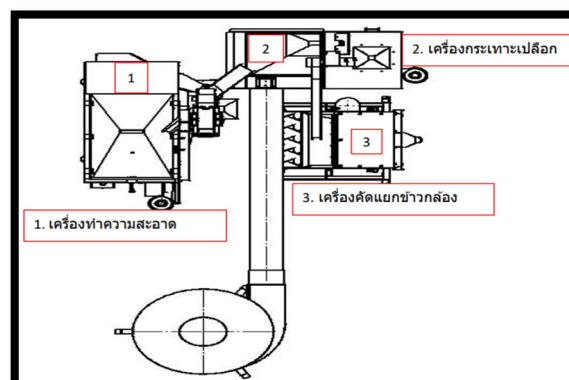
3.ระเบียบวิธีการทดลอง

ขั้นตอนการทดสอบตรวจสอบเครื่องสีข้าวให้อยู่ในสภาพใช้งานได้นำข้าวเปลือกซึ่งนำหนักก่อนป้อนเข้าสู่ช่องบรรจุ (Hopper) ตามรูปที่ 1 เครื่องสีข้าวเปลือกและจับเวลาในการทำงานและทำสุ่มเก็บตัวอย่างข้าวจากช่องทางที่ข้าวผ่านจำนวน 3 ตัวอย่างใน หนึ่งรอบการทดสอบ



รูปที่ 1 แสดงต้นแบบระบบเครื่องสีข้าวกล้องและข้าวขาว

หาความสัมพันธ์ระหว่างความเร็วรอบของ ชิ้นส่วนต่างๆ ของเครื่องสีข้าวขนาดเล็กโดยหาความเร็วรอบของระบบการกะเทาะข้าวเปลือกระบบขัดขาว ระบบคัดแยกข้าวเปลือกออกจากข้าวกล้องและทำความสะอาดข้าวเปลือกก่อนทำการทดสอบ โดยใช้ข้าวเปลือกจำนวน 10 กิโลกรัม มาทำการคัดแยกสิ่งเจือปนตามรูปที่ 2 จากนั้นทำการชั่งน้ำหนักข้าวเปลือกและสิ่งเจือปนทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้งต่อ 3 ตัวอย่าง



รูปที่2 แสดงอุปกรณ์คัดแยกทำความสะอาดข้าวเปลือก

การวัดค่าความชื้นข้าวเปลือกโดยใช้เครื่องมือวัดค่าความชื้น (Moisture meter) ยี่ห้อ Kett รุ่น PM-450 แบบระบบดิจิตอล โดยเปิดสวิทช์เครื่องวัดความชื้นนำข้าวเปลือกป้อนเข้าสู่ช่องบรรจุ (Hopper) กดปุ่มวัดความชื้นอ่านค่าและบันทึกผลทำซ้ำจำนวน 3 ครั้งตามรูปที่ 3

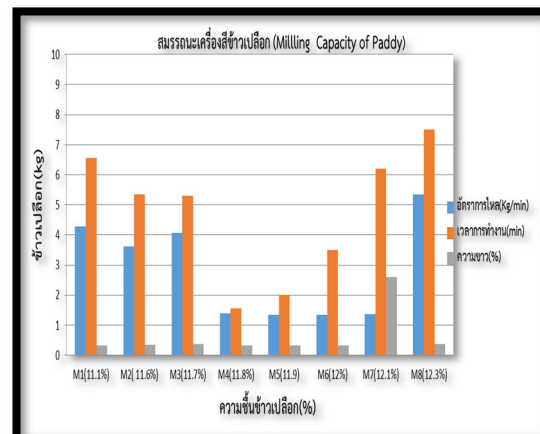


รูปที่ 3 แสดงเครื่องวัดความชื้นข้าวเปลือกแบบดันไฟฟ้า

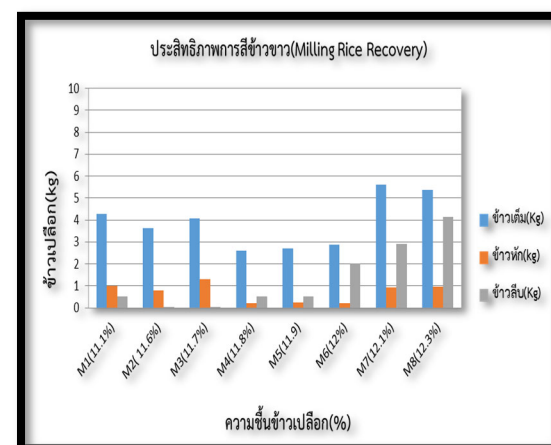
4. ผลการทดลอง

กำหนดค่าความชื้นเริ่มต้นของข้าวเปลือกหอมมะลิ 105 ที่นำมาทดสอบหาสมรรถนะของเครื่องสีข้าว ความสามารถเพิ่มความความขาวของข้าวขาวและประสิทธิภาพการสีและการแตกหักของข้าวขาว ผลจากค่าความชื้นของเครื่องสีข้าวขนาดเล็กมีค่าความชื้น 11.1 เปอร์เซ็นต์ 11.6 เปอร์เซ็นต์ 11.7 เปอร์เซ็นต์ 11.8 เปอร์เซ็นต์ 11.9 เปอร์เซ็นต์ 12.0 เปอร์เซ็นต์ 12.1 เปอร์เซ็นต์ และ 12.3 เปอร์เซ็นต์ โดยการป้อนข้าวเปลือกครั้งละ 10 กิโลกรัม จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักข้าวเปลือกกับเปอร์เซ็นต์ ความชื้นเหมาะสมสำหรับข้าวเปลือกเพื่อหาสมรรถนะเครื่องสีข้าวขนาดเล็กทดสอบตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม มอก.888-2532 พบว่าความขาวสูงสุด 2.61 เปอร์เซ็นต์ ค่าความชื้นข้าวเปลือก 12.1 เปอร์เซ็นต์ อัตราการไหลของข้าวเปลือก 1.36 กิโลกรัมต่อนาที และใช้เวลาในการสีข้าวทั้งสิ้น 6.2 นาที ตามรูปที่ 4

จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักข้าวเปลือกกับเปอร์เซ็นต์ความชื้นข้าวเปลือกเพื่อหาสมรรถนะเครื่องสีข้าวขนาดเล็ก พบว่าน้ำหนักข้าวเต็มเมล็ดสูงสุด 5.6 กิโลกรัม ค่าความชื้นข้าวเปลือกที่ 12.1 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักข้าวหัก 0.93 กิโลกรัม ข้าวสับ 2.92 กิโลกรัมและใช้เวลาในการสีข้าว 6.2 นาที ตามรูปที่ 5

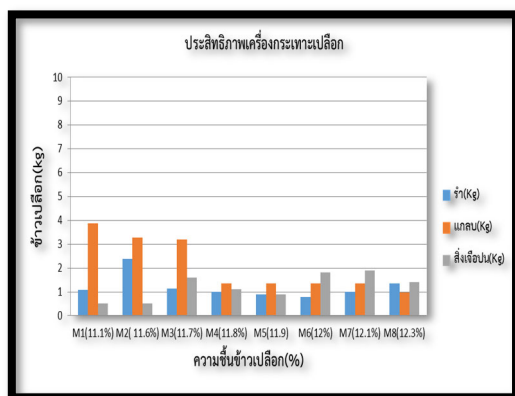


รูปที่ 4 Effect of moisture content on milling capacity of paddy



รูปที่ 5 Relationship between moisture content and head rice recovery

จากความสัมพันธ์ระหว่างน้ำหนักข้าวเปลือกกับเปอร์เซ็นต์ค่าความชื้นข้าวเปลือกที่ลดลง เพื่อหาสมรรถนะเครื่องสีข้าวขนาดเล็กพบว่าน้ำหนักสิ่งเจือปนข้าวน้อยที่สุด 0.5 กิโลกรัม และค่าความชื้นเปลือก 11.1 เปอร์เซ็นต์ และ 11.6 เปอร์เซ็นต์ ค่าเฉลี่ยน้ำหนักกลบ 3.575 กิโลกรัม ซึ่งค่าเฉลี่ยน้ำหนักรำข้าว 1.725 กิโลกรัม และใช้เวลาเฉลี่ยในการสีข้าวสารทั้งสิ้น 5.955 นาที ตามรูปที่ 6



รูปที่ 6 Relationship between moisture content and milling rice recovery

5. สรุป

การศึกษาด้านประสิทธิภาพการสีข้าวของเครื่องสีข้าวขนาดเล็กสัมพันธ์กับอิทธิพลค่าความชื้นข้าวเปลือกที่เพิ่มขึ้นและลดลง จากการทดลองพบว่าความชื้นเหมาะสมของข้าวเปลือกมีค่าเท่ากับ 12.1 เปอร์เซ็นต์ ส่งผลให้ข้าวสารมีค่าความขาวเพิ่มขึ้นเท่ากับ 2.61 เปอร์เซ็นต์ น้ำหนักข้าวหัก 0.93 กิโลกรัม และข้าวสับ 2.92 กิโลกรัม ซึ่งใช้เวลาในการสีข้าว 6.2 นาที หลังจากนั้นทำการลดค่าความชื้นข้าวเปลือกมาที่ 11.1 เปอร์เซ็นต์ และ 11.6 เปอร์เซ็นต์พบว่าค่าเฉลี่ยสิ่งเจือปนมีค่าเท่ากับ 0.5 กิโลกรัม ค่าเฉลี่ยน้ำหนักแกลบ 3.575 กิโลกรัม ค่าเฉลี่ยน้ำหนักรำข้าว 1.725 กิโลกรัม และใช้เวลาเฉลี่ยในการสีข้าวทั้งสิ้น 5.955 นาที

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทางบริษัท ซีแอลพี เอ็นจิเนียริง จำกัด ที่นำต้นแบบระบบเครื่องสีข้าวขนาดเล็กมาทดสอบที่ศูนย์เครื่องจักรกลการเกษตรแห่งชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] R. Kalsirisilp, S. Aliusmanan and J. Langkapin, “ Testing and Evaluation of Rice Milling Machine Based on ThaiIndustrial Standard”,

Research Journal Rajamangala University of Technology Thanyaburi, vol. 18, issue 2, pp. 2651-2289, 2019.

- [2] X. Luo, Y. Li, D. Yang, J. Xing, ,M. Yang, R. Wang, L. Wang, Y. Zhang and Z. Chenc, “ Effects of electron beam irradiation on storability of brown and milled rice”, *Journal of Stored Products Research*, vol. 81, pp. 22-30, 2019.
- [3] C. Qiu, P. Li, Z. Li, H. Corke and Z. Sui, “Combined speed and duration of milling affect the physicochemical properties of rice flour”, *Food Hydrocolloids*, vol. 89, pp. 188-195, 2019.
- [4] M. Ishfaq, N. Akbar, U. Zulfiqar, N. Ali, M. Ahmad, S. A. Anjum and M. Farooq, “ Influence of water management techniques on milling recovery, grain quality and mercury uptake in different rice production systems” , *Agricultural Water Management*, vol. 243, pp. 1230-1237, 2021.
- [5] A. P. Bontoa, K. Sammuel I. Camachob and D. H. Camachoa, “ Increased vitamin B5 uptake capacity of ultrasonic treated milled rice: A new method for rice fortification” , *LWT - Food Science and Technology*, vol. 95, pp. 32-39, 2018.
- [6] S. Bangpan and P. Bangpan, “ Small Rice Milling Machine Open Type”, in *13rd TSAE International Conference on AME18*, Chiang mai University, Chiangmai, Thailand, 2012, pp. 128-134.
- [7] R. G. Buttery, L. C. Ling, B. O. Juliano, and J. G. Turnbaugh, “Cooked Rice Aroma and 2-

- Acetyl- 1-pyrroline” *J. Agric. Food Chem*, vol 31, no.4, pp. 823 - 826, 1983.
- [8] E. T. Champagne, K. L. Bett-Garber, B. T. Vinyard, B. D. Webb, A. M. McClung, F. E. Barton, B.G. Lyon, K. Moldenhauer, S. Linscombe and D. Koheway, “Effect of drying conditions, final moisture content and degree of milling on rice flavor” , *Cereal Chem*, vol.74, pp. 566 - 570, 1997.
- [9] S. Mahatheeranont, S. Keawsaard and K. Dumri, “ Quantification of the rice aroma compound, 2 – acetyl – 1 - pyrroline, in uncooked Khao Dawk Mali 105 brown rice” , *J. Agric. Food Chem*, vol 49, pp. 773-779, 2001.
- [10] S. Mahatheeranont, S. Promdang and A. Chiampiriyakul, “Volatile Aroma Compounds of Khao Dawk Mali 105” , *Kasetsart J. (Nat. Sci.)*, vol. 29, pp. 508 - 514, 1995.

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิ (Reader)

ต้นฉบับบทความวิจัยที่ตีพิมพ์วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีที่ 17 ฉบับที่ 1 (เดือนมกราคม - เมษายน พ.ศ. 2565) ได้รับการตรวจสอบแก้ไขจากผู้ทรงคุณวุฒิดังรายนามต่อไปนี้

- | | |
|---|--|
| 1. อาจารย์อิทธิพร ประมวล | ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ |
| 2. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ จันทร์ทอง | ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 3. รองศาสตราจารย์ ดร.กมลวัลย์ ลือประเสริฐ | ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 4. รองศาสตราจารย์ พ.อ.ดร.หญิงสุวิมล เสนีวงศ์ ณ อยุธยา | กองวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ส่วนการศึกษา
โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า |
| 5. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณรงค์ เมตไตรพันธ์ | สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา |
| 6. อาจารย์ ดร.อภิชาติ บัวกล้า | สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยพะเยา |
| 7. อาจารย์ ดร.จิตกร กนกนัยการ | สาขาวิศวกรรมเครื่องกลและยานยนต์
คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |
| 8. ว่าที่ร้อยตรี ดร.ชาญณรงค์ ตระกูลสรณคมน์ | ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์ |
| 9. อาจารย์ ดร.กิตติ วิโรจรัตนากาฬิศา | สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา |
| 10. อาจารย์ ดร.ศิษฐา แจ่มสามสี | ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี |
| 11. อาจารย์ปรัชญา บำรุงกุล | สาขาเทคโนโลยีไฟฟ้า คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน |
| 12. อาจารย์ ดร.วิชา อุปภัย | สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร |
| 13. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธีรพัฒน์ ชมภูคำ | สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม |
| 14. ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปิยนุช เวทยวีรณ | ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ |
| 15. รองศาสตราจารย์ ดร.ศุภชัย ตระกูลทรัพย์ทวี | ภาควิชาวิศวกรรมขนถ่ายวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ |

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิ (Reader)

ต้นฉบับบทความวิจัยที่ตีพิมพ์วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีที่ 17 ฉบับที่ 1 (เดือนมกราคม - เมษายน พ.ศ. 2565) ได้รับการตรวจสอบแก้ไขจากผู้ทรงคุณวุฒิดังรายนามต่อไปนี้

- | | | |
|-----|---|--|
| 16. | รองศาสตราจารย์ รุ่งเรือง กาลศิริศิลป์ | ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี |
| 17. | ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ณัฐวุฒิ เนียมสอน | ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ |

คำแนะนำสำหรับผู้เขียนบทความลงตีพิมพ์
วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (วศ) เป็นวารสารที่ตีพิมพ์บทความวิจัยและบทความวิชาการ เพื่อเผยแพร่ความก้าวหน้าทางทฤษฎีและทางการทดลองในทุกสาขาวิศวกรรม ตันฉบับทุกบทความที่ส่งมายังกองบรรณาธิการ จะได้รับการประเมินโดยมีผู้ทรงคุณวุฒิ 2 คนต่อบทความ (Peer-review) และประเมินบทความในลักษณะเป็นผู้ทรงคุณวุฒิที่ประเมินบทความไม่ทราบชื่อผู้แต่งและผู้แต่งไม่ทราบชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ หรือ Double Blinded review วารสารตีพิมพ์ 3 ฉบับต่อปี ในเดือน เมษายน สิงหาคม และ ธันวาคม เลขมาตรฐานสากลประจำวารสาร 2774-0269 (Online)

1. การเตรียมต้นฉบับ

- 1) เป็นบทความวิจัย หรือบทความวิชาการ ที่มีความยาวไม่ควรน้อยกว่า 7 หน้า และไม่ควรเกิน 10 หน้า กระดาษ A4 พิมพ์ห่างจากขอบกระดาษด้านซ้าย 1.25 นิ้ว ด้านอื่น ๆ 1 นิ้ว
- 2) เป็นบทความที่ไม่ได้อยู่ระหว่างการพิจารณาตีพิมพ์ของสื่อสิ่งพิมพ์อื่น ๆ และไม่เคยได้รับการตีพิมพ์ในวารสารใด ๆ มาก่อน
- 3) ต้องไม่มีการละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่น ไม่มีการลอกเลียน หรือตัดทอนผลงานวิจัยของผู้อื่นโดยที่ไม่ได้รับอนุญาตและมีการอ้างอิงที่เหมาะสม
- 4) ชนิดและขนาดตัวอักษร ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษให้ใช้ตัวอักษร TH Sarabun New ซึ่งขนาดตัวอักษร มีรายละเอียดดังนี้
 - 6.1) ชื่อบทความ ใช้ตัวอักษรขนาด 18 pt. ตัวหนา
 - 6.2) ชื่อ-สกุลผู้เขียนบทความ ใช้ตัวอักษรขนาด 14 pt. ตัวปกติ
 - 6.3) หัวข้อหลัก ใช้ตัวอักษรขนาด 14 pt. ตัวหนา
 - 6.4) หัวข้อรอง ใช้ตัวอักษรขนาด 14 pt. ตัวเอียง
 - 6.5) เนื้อเรื่องในหัวข้อหลักและหัวข้อรอง ใช้ตัวอักษรขนาด 14 pt. ตัวปกติ
 - 6.6) เนื้อเรื่องในตาราง ใช้ตัวอักษรขนาด 14 pt. ตัวปกติ

รูปแบบการเขียนบทความ ควรมีหัวข้อเรียงตามลำดับดังต่อไปนี้

ชื่อเรื่อง ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ โดยมีข้อความที่กระชับ ได้ใจความ และบ่งบอกบทความได้อย่างชัดเจน

ชื่อผู้เขียน ให้ระบุชื่อ นามสกุล ตำแหน่ง หน่วยงานและที่อยู่ของผู้เขียนทุกคน โดยหากบทความเป็นภาษาไทยให้ระบุชื่อผู้เขียนเฉพาะภาษาไทยเท่านั้น

บทคัดย่อ บทคัดย่อต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ

คำสำคัญ (Keyword) คำสืบค้นที่เกี่ยวข้องกับบทความ ต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ

บทนำ กล่าวถึงความสำคัญของปัญหาและภูมิหลังของการวิจัย รวมไปถึงวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ตัวเนื้อหา อธิบายถึงอุปกรณ์ หรือวิธีการที่ใช้ในการวิจัย บรรยายผล และวิจารณ์ผล สามารถแตกออกเป็นหลายหัวข้อได้

สรุป บรรยายถึงบทสรุปของงานวิจัย

กิตติกรรมประกาศ ขอบคุนทุนสนับสนุน หรือบุคคล (ถ้ามี)

เอกสารอ้างอิง ให้เขียนเอกสารอ้างอิงโดยใช้วิธีเรียงตามลำดับก่อนหลังที่พบในบทความ ในรูปแบบตัวเลขในวงเล็บเหลี่ยม สำหรับรูปแบบการพิมพ์รายการเอกสารอ้างอิง ใช้รูปแบบ IEEE ดังรายละเอียดและตัวอย่างในไฟล์แม่แบบ (template) ซึ่งดาวน์โหลดได้ที่ <http://eng.swu.ac.th/re.html>

2. วิธีการส่งบทความ

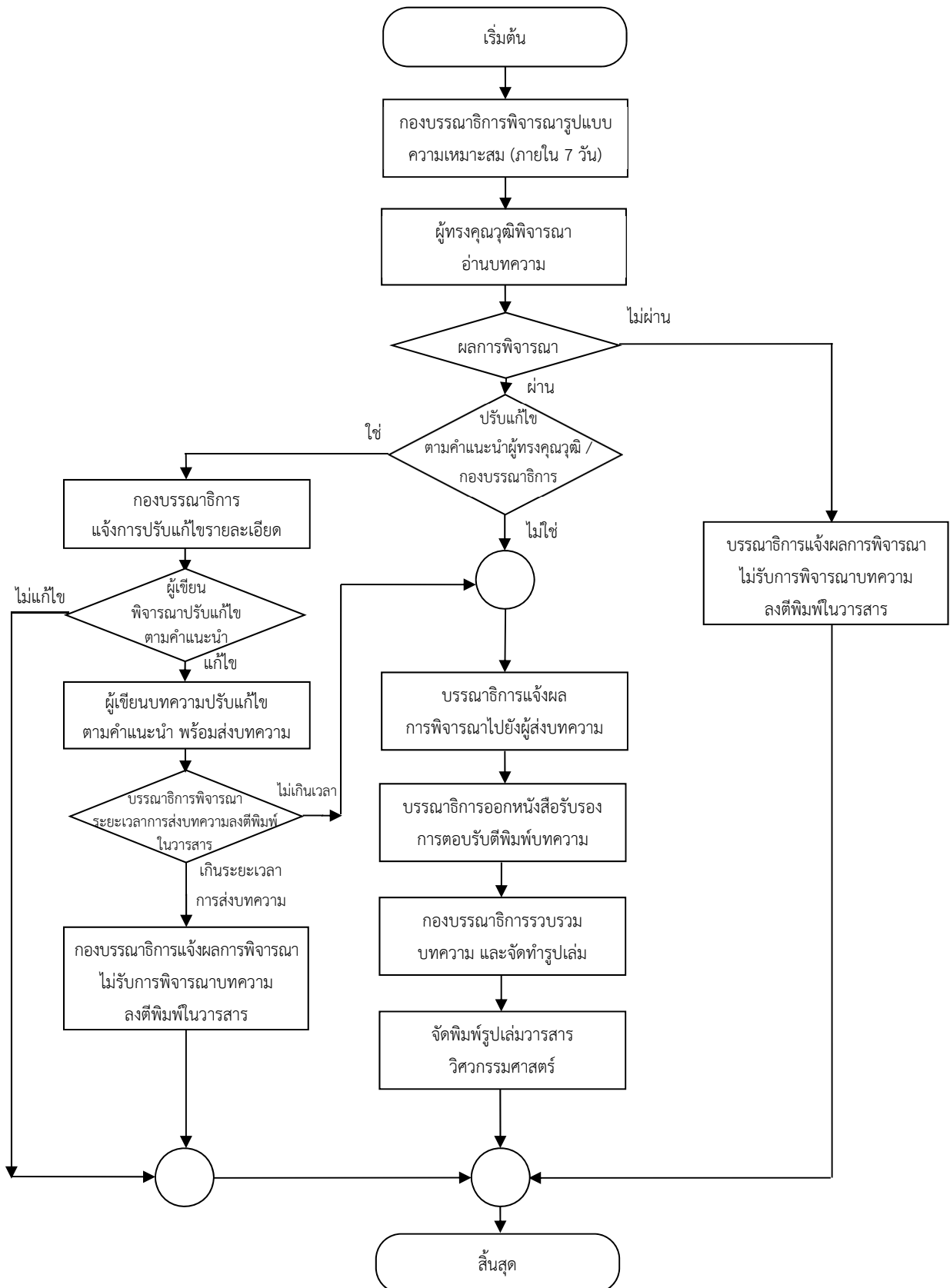
- 1) ส่งต้นฉบับบทความ ไฟล์ Microsoft Word และ pdf พร้อมแนบไฟล์สแกนแบบเสนอผลงานวิชาการเพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
- 2) ส่งไฟล์ต้นฉบับทางออนไลน์ที่
<https://www.tci-thaijo.org/index.php/sej/login>
- 3) ดูข้อมูลวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒเพิ่มเติม และดาวน์โหลดแบบฟอร์มประกอบการส่งบทความ ได้ที่ <http://eng.swu.ac.th/re.html>

3. ขั้นตอนการประเมินบทความ

การประเมินบทความวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ มีขั้นตอนดังนี้

- 1) การทบทวนโดยผู้รู้เสมอ (peer review) โดยผู้ทรงคุณวุฒิอย่างน้อยสองคนในสาขาที่เกี่ยวข้องแบบอำพรางฝ่ายเดียว (double-blind)
- 2) การเขียนตอบข้อซักถามและการแก้ไขปรับปรุงต้นฉบับตามข้อคิดเห็น (comments) ของผู้ทรงคุณวุฒิ โดยผู้เขียน และการพิจารณาอีกครั้งโดยผู้ทรงคุณวุฒิคนเดิม หากผู้ทรงคุณวุฒิได้แจ้งความประสงค์ขอพิจารณาอีกครั้งไว้
- 3) การประชุมกองบรรณาธิการเพื่อพิจารณาผลการทบทวนโดยผู้รู้เสมอจากผู้ทรงคุณวุฒิ และการแก้ไขปรับปรุงต้นฉบับ เพื่อตัดสินใจว่าจะตอบรับหรือไม่ในขั้นสุดท้าย
- 4) สำหรับบทความที่ได้รับการตอบรับ กองบรรณาธิการจะพิจารณาความถูกต้องของรูปแบบเพื่อแจ้งผู้เขียนแก้ไข
- 5) บรรณาธิการออกหนังสือรับรองการเผยแพร่ให้ผู้เขียน โดยมอบไว้กับผู้เขียนหลัก

ขั้นตอนการพิจารณาผลงานเพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารคณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ





คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

Srinakharinwirot University Engineering Journal

Vol. 17 No.1 (January - April 2022)

ISSN : 2774 - 0269 (Online)

บทความวิจัย

- การสร้างแผนภาพการสอบเทียบของถังน้ำมันทรงกระบอกในแนวนอน
Generation of Calibration Chart for Horizontal Cylindrical Fuel Tank
สาธิต รุ่งฤดีสมบัติกิจ
- การวิเคราะห์สมรรถนะของอัลกอริทึมต่อต้านการชนกันภายใต้วิธีการประมาณจำนวนแท็กที่เกิดการชนกันที่แม่นยำสำหรับระบบอาร์เอฟไอดี
Performance Analysis of Tag Anti-Collision Algorithms Under Accurate the Number of Colliding Tag Estimation Method for RFID Systems
นรินทร์ วัฒนมงคล
- การออกแบบและสร้างระบบไอโอทีสำหรับบ้านจำลองแบบอัจฉริยะที่ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์
The Design and Construction of Smart the IoT System for Modeling House Controlled by Microcontroller
ชัยพร อัดโตดดร นิตคม อริยพิมพ์
- จลนศาสตร์และการจำลองการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แขนกลด้วยโปรแกรมแมทแล็บ
Kinematics and Motion Modeling of a Robotic Arm using MATLAB Program
สุรัชย์ เหมหิรัญ ดิฐภัทร ต้นประติฐ
- การศึกษาการอบแห้งข้าวเปลือกในเครื่องอบแห้งแบบเป่าพ่นในท่อพ่นปลา
The Study of Paddy Drying in Zig Zag Pipe Spouted Bed Dryer
ณัฐพงษ์ วงศ์บัพพา ทวีช จิตรสมบูรณ์
- การศึกษาปัจจัยการคัดเลือกผู้รับเหมาปรับปรุงอาคาร โดยใช้วิธีกระบวนการวิเคราะห์เชิงลำดับชั้น
A Study of Factors for Selection of Building Renovation Contractors Using Analysis Hierarchical Process
มงคล อัครดิลกฤทธิ รพีรัศม์ วชิโรทัย
- ผลของความชื้นต่อประสิทธิภาพการสีข้าวขาวของเครื่องสีขนาดเล็ก
Effect of paddy moisture content on milling rice recovery of small milling machine
สมพจน์ คำแก้ว

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

เลขที่ 63 หมู่ 7 ถนนรังสิต - นครนายก อำเภอองครักษ์ จังหวัดนครนายก 26120

โทร 0 2649 5000 ต่อ 27560

<http://eng.swu.ac.th>