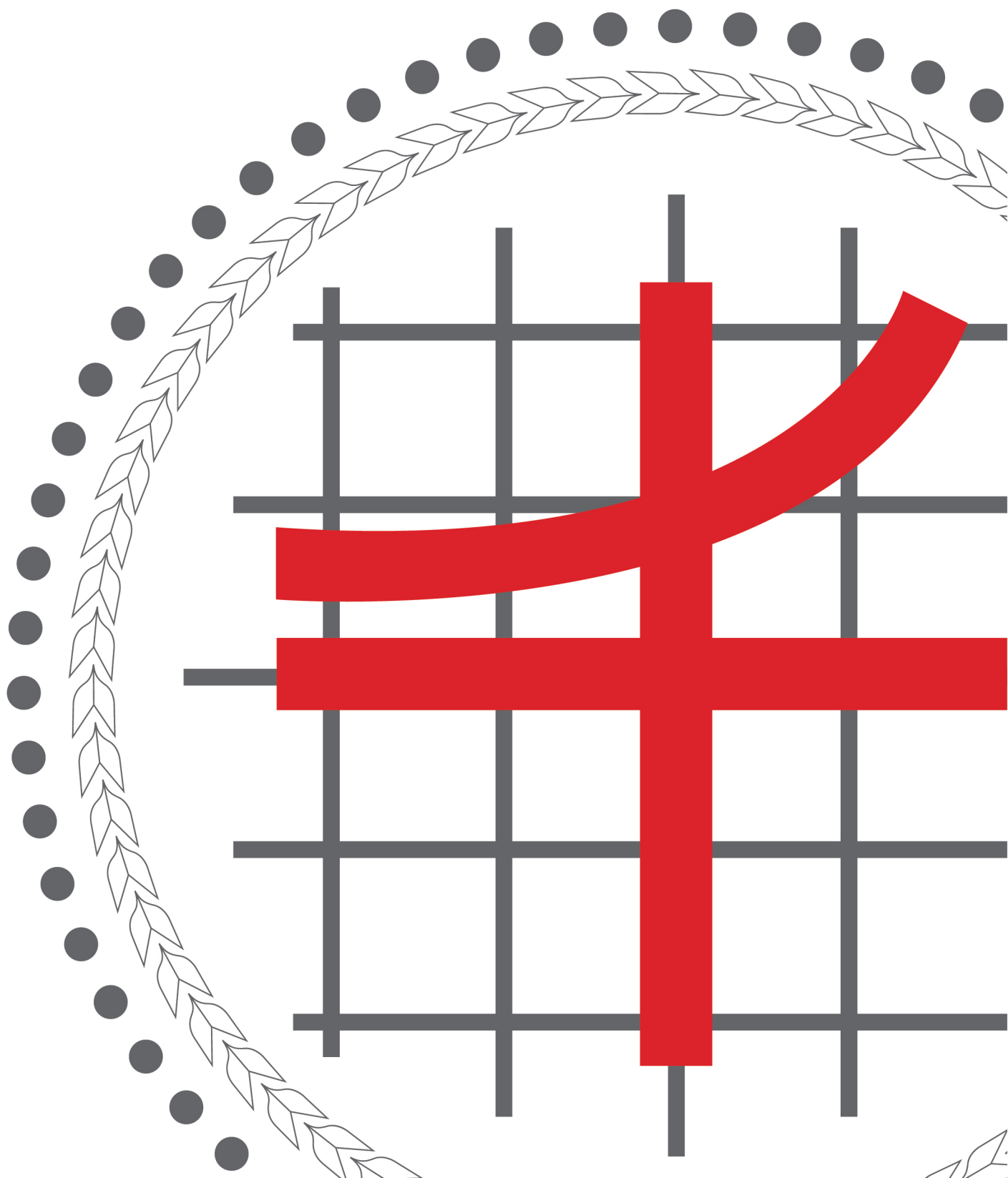


Srinakharinwirot University Engineering Journal

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

Vol. 19 No.2 (April 2024 - September 2024)

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 วารสารตีพิมพ์ 2 ครั้งต่อปี (ทุก 6 เดือน) ในเดือน มีนาคม และ กันยายน ฉบับที่ 1 ช่วงเดือน ตุลาคม – มีนาคม ฉบับที่ 2 ช่วงเดือนเมษายน – กันยายน 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 ตำบลอ้อมเกร็ด อำเภอบางกรวย

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 สถาพรประสาน

คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์
รองคณบดีฝ่ายแผนและพัฒนา

รายนามคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ

ศาสตราจารย์ ดร.ทงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์ อัครเอกผาลิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.พานิช วุฒิพิทักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.เอเดรียน อีแวน ฟลัด	สถาบันสิรินธรวิทยเมธี
ศาสตราจารย์ ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์ จันทน์ไทย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ยอดสุดใจ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ศาสตราจารย์ ดร.วรงค์ ปวรจารย์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.ศราวุธ ริมคูสีต	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย เปรมฤดีปรีชาชาญ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ โสภางค์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.อริคม ฤกษ์บุตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงพรรณ กริชชาญชัย ศฤงคารินทร์	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.ขวลิศ ชาลีรักษ์ตระกูล	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.เตือนใจ สมบูรณ์วิวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร. ธนียา เกาศล	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รองศาสตราจารย์ ดร.ประจวบ กล่อมจิตร	มหาวิทยาลัยศิลปากร
รองศาสตราจารย์ ดร.รุ่งเรือง กาลศิริศิลป์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
พันเอกหญิง รองศาสตราจารย์ ดร.สุวิมล เสนิงค์ ณ อยุธยา	โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

บรรณาธิการอำนวยการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิไลดา หวังพานิช

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.ประชา บุญยวนิชกุล

กองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.สงกรานต์ วิริยะศาสตร์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.จันจิรา จัปศิลป์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.นิลวรรณ ชุ่มฤทธิ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.สุนิติ สุภาพ	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.วุฒิพล ธาราธิ์เศรษฐ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ธนยศ อริสริยวงศ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชาดา ตันติสถิระพงษ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประมวล ชูรัตน์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงษ์ คงประเสริฐ	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
อาจารย์ ดร.สุธิดา ทิพย์ภักษ์พันธุ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
อาจารย์นาวิ รุจิตามพ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ศาสตราจารย์ ดร.ทงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์ อัครเอกผาลิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.พานิช วุฒิพฤกษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.เอเดรียน อีแวน ฟลัด	สถาบันสิริวิทยเมธี
ศาสตราจารย์ดร.ผดุงศักดิ์ รัตนเดโช	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์ จ่านไทย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ยอดสุดใจ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ศาสตราจารย์ ดร.วรงค์ ปวรจารย์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.ศราวุธ ริมดุสิต	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย เปรมฤดีปรีชาชาญ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ โสภานแดง	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.อริคม ฤกษ์บุตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงพรรณ กริชชาญชัย ศฤงคารินทร์	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.ชาลิต ชาลัทธิภัทรกุล	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.เดือนใจ สมบูรณ์วิวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร. ธนียา เกาศล	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รองศาสตราจารย์ ดร.ประจวบ กล่อมจิตร	มหาวิทยาลัยศิลปากร
รองศาสตราจารย์ ดร.รุ่งเรือง กาลศิริศิลป์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
พันเอกหญิง รองศาสตราจารย์ ดร.สุวิมล เสนีวงศ์ ณ อยุธยา	โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

ฝ่ายการเงิน

นางสาวลินดา นิลพัท

ฝ่ายประชาสัมพันธ์

นายณัฐกาญจน์ ไชยสมบูรณ์

นางธิดา ศรีกังพาน

ผู้ช่วยบรรณาธิการ

นางสาวยุพาพร ประไพย์

บทบรรณาธิการ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ได้จัดพิมพ์ขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่ผลงานวิชาการ ผลงานวิจัย และแลกเปลี่ยนแนวคิด ความรู้ ความก้าวหน้าใหม่ ด้านวิศวกรรมศาสตร์อย่างต่อเนื่องมาเป็นระยะเวลากว่า 15 ปี โดยบทความทุกเรื่องได้ผ่านการพิจารณาถ้อยแถลงและประเมินคุณภาพตามกระบวนการจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้องจากหลายสถาบันการศึกษา ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ฉบับนี้ ได้นำเสนอบทความจำนวนทั้งสิ้น 9 บทความ เป็นบทความวิจัยจำนวน 9 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

ศักยภาพการผลิตเอทานอลและก๊าซชีวภาพจากน้ำคั้นทางปาล์มและลำต้นปาล์มน้ำมัน Potential of Ethanol and Biogas Production from Oil Palm Frond Juice and Oil Palm Trunk Juice ทัศน์ ศรีมาชัย, ชัยยุทธ มิ่งาม, สมพงศ์ โอทอง, เกียรติศักดิ์ รัตนดิกล ญ ภูเก็ต	1
การศึกษาผลกระทบของการใช้วัสดุเปลี่ยนเฟสร่วมในตู้แช่เย็น Study on the Effect of Refrigerator with Phase Change Material อาทิตย์ คำต่าย, เลอศักดิ์ นาครินทร์	11
การเปลี่ยนผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติเป็นน้ำมันดิบชีวภาพ โดยขบวนการไฮโดรเทอร์มอลลิควิเดชัน Conversion of Natural Rubber Product to Bio-Crude Oil By Hydrothermal Liquefaction Process วิลักษณ์นาม ผลเจริญ , กุลเชษฐ์ เพียรทอง	19
การเรียนรู้ของเครื่องเพื่อทำนายพฤติกรรมลูกค้าต่อผลิตภัณฑ์ธนาคาร Machine learning for Customer Behavior Prediction on Banking Product ธีรภัทร ฉายศิริโชติ, สุวรรณ อศวกุลชัย	31
กระดาษออกฤทธิ์ชีวภาพเคลือบด้วยอนุภาคซิลเวอร์เหล็กออกไซด์สำหรับบรรจุภัณฑ์อาหาร Bioactive Paper Coated with Green Synthesized Silver/iron Oxide for Food Packaging วิรัช จิตธรรม , พรนภา เกษมศิริ	39
การศึกษาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของหม้อไฟ The Study of Thermal Efficiency of hot-pot อาทิตย์ คำต่าย, กรณ์ภพ รัตนวิจิตร, เลอศักดิ์ นาครินทร์	49
ศักยภาพการผลิตเชื้อเพลิง RDF -5 จากขยะชุมชนผสมยางพารา ในพื้นที่อุทยานธรณีโลกจังหวัดสตูล Production Potential of RDF -5 Fuel from Municipal Solid Waste Mixed with Natural Rubber in Satun Global Geopark ทัศน์ ศรีมาชัย, พลพัฒน์ รวมเจริญ, ชัยยุทธ มิ่งาม, ศุภชัย ชัยณรงค์, เกียรติศักดิ์ รัตนดิกล ญ ภูเก็ต	56
ตัวแบบโปรแกรมเป้าหมายแบบหลายวัตถุประสงค์ที่ผสมผสานกับระบบอนุमानแบบฟัซซี่สำหรับปัญหาการมอบหมายงานของหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงาน An FIS-Integrated Multi-Objective Goal Programming Model for Cobot Assignment Problem มาริษา กิมาพร , วุฒินันท์ นุ่นแก้ว	65

บทความวิจัยต่อ

การพัฒนาระบบแจ้งเตือนและรายงานผลการขนส่งออนไลน์ กรณีศึกษา แผนกขนส่งสินค้าบริษัท ธาราทองเมท 82
ทอล จำกัด

Development of Transportation Notification and On line Report : a case study of Tharathong
Metal Co ., Ltd

พนทิพย์ สายเทพ สิทธิธา เดชปรีชาพล สุภัสสร ภูศรี กิตติชัย อธิกุลรัตน์

ศักยภาพการผลิตเอทานอลและก๊าซชีวภาพจากน้ำคั้นทางปาล์มและลำต้นปาล์มน้ำมัน

Potential of Ethanol and Biogas Production from Oil Palm Frond Juice and Oil Palm Trunk Juice

ทัศนีย์ ศรีมาชัย^{1,2} ชัยยุทธ มีงาม³ สมพงษ์ โอทอง⁴ เกียรติศักดิ์ รัตนดิลก ณ ภูเก็ต^{1,2*}

¹วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการ มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา วิทยาเขตสตูล

อำเภอละงู จังหวัดสตูล 91110

²ศูนย์การเรียนรู้และถ่ายทอดนวัตกรรมชุมชน “ทุ่งใหญ่สารภีโมเดล” มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา วิทยาเขตสตูล

อำเภอละงู จังหวัดสตูล 91110

³คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000

⁴คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง จังหวัดพัทลุง 93210

Tussanee Srimachai^{1,2} Chaiyoot Meengam³ Sompong O-Thong⁴ Kiattisak Rattanadilok Na Phuket^{1,2*}

¹ College of Innovation and Management, Songkhla Rajabhat University, Satun Campus, Satun 91110

² Community Innovation Learning and Transfer Center “Thung Yai Sarapee Model”

Songkhla Rajabhat University, Satun campus, Satun 91100

³ Faculty of Industrial Technology, Songkhla Rajabhat University, Songkhla 90000

⁴ Faculty of Science, Thaksin University, Phatthalung 93210

*Corresponding author Email: panpong1@hotmail.com

(Received: May 22, 2023; Revised: August 12, 2023 ; Accepted: October 1, 2023)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาศักยภาพการผลิตเอทานอลและก๊าซมีเทน (Biochemical Methane Potential, BMP) จากน้ำคั้นทางปาล์ม (Oil palm frond juice, OPFJ) และน้ำคั้นต้นปาล์ม (Oil palm trunk juice, OPTJ) โดยใช้เชื้อ *S. cerevisiae* เพื่อใช้เป็นพลังงานทางเลือก ผลการทดลองพบว่าในช่วง 48 ชั่วโมงแรกของการหมัก ปริมาณกลูโคสถูกใช้ไปอย่างรวดเร็ว เพื่อผลิตเป็นเอทานอล โดยปริมาณกลูโคสใน OPFJ ลดลงจาก 31.26 เหลือ 5.09 g/L และ OPTJ ลดลงจาก 58.65 เหลือ 4.95 g/L ซึ่งปริมาณกลูโคสถูกใช้ไปเพื่อผลิตเอทานอลจนเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady-state) ที่ชั่วโมงที่ 96 ของกระบวนการหมัก สามารถผลิตเอทานอลได้สูงสุดจาก OPTJ และ OPFJ เท่ากับ 31.28 และ 11.50 g/L ตามลำดับ จากการคำนวณ Ethanol yield พบว่า การผลิตเอทานอลจาก OPTJ ให้ yield สูงกว่า OPFJ โดย Ethanol yield ของ OPTJ มีค่าเท่ากับ 0.48 g-ethanol/g-glucose ส่วน OPFJ มีค่าเพียง 0.39 g-ethanol/g-glucose เท่านั้น เนื่องจากประสิทธิภาพการหมัก (Fermentation efficiency) ของ OPTJ สูงถึง 93.42% ในขณะที่ประสิทธิภาพการหมักของ OPFJ มีค่าเพียง 72.14% การผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำกากส่าของ OPFJ และ OPTJ โดยใช้เทคนิค Biochemical methane potential (BMP) ผลการทดลองพบว่าปริมาณมีเทนสะสมสูงสุดของ OPFJ และ OPTJ มีค่าเท่ากับ 997 และ 1,068 ml ที่ 71.53 และ 71.18% มีเทน ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันมาก สอดคล้องกับค่าผลผลิตมีเทน (yield) ก็มีค่าใกล้เคียงกันซึ่งมีค่าเท่ากับ 314 และ 336 ml CH₄/g VS จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าน้ำกากส่าของ OPFJ และ

OPTJ มีศักยภาพในการใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพได้ โดยพบประชากรอาร์เคียกลุ่ม 3 จินัส คือ *Methanobacterium* sp., *Methanofollis* sp., และ *Methanosaeta* sp.

คำสำคัญ: เอทานอล ก๊าซชีวภาพ น้ำคั้นทางปาล์ม น้ำคั้นลำต้นปาล์ม

ABSTRACT

This research aimed to study the potential of ethanol and biogas production from oil palm frond juice (OPFJ) and oil palm trunk juice (OPTJ) performed using *S. cerevisiae* for alternative energy. The amount of glucose consumed quickly to produce ethanol in 48 hrs. The amount of glucose in OPFJ decreased from 31.26 to 5.09 g/L, and OPTJ decreased from 58.65 to 4.95 g/L. The amount of glucose consumed to produce ethanol until steady-state at 96 hours of fermentation processes. The highest ethanol yield from OPTJ and OPFJ was 31.28 and 11.50 g/L, respectively. The calculation of ethanol yield found that the ethanol yield from OPTJ was higher than that of OPFJ. The ethanol yield of OPTJ was 0.48 g-ethanol/g-glucose, while OPFJ was only 0.39 g-ethanol /g-glucose due to fermentation efficiency. The fermentation efficiency of OPTJ was as high as 93.42%, while the fermentation efficiency of OPFJ was only 72.14%. Biogas production from distillery slop of OPFJ and OPTJ used the biochemical methane potential (BMP) technique. The maximum accumulated methane production of OPFJ and OPTJ were 997 and 1,068 ml at 71.53 and 71.18% of methane composition, which were very similar. Corresponding to methane yield (Yield) was equal to 314 and 336 ml CH₄/g VS. The experimental results showed that OPFJ and OPTJ of distillery slop have the potential to be used as raw materials for biogas production. Three Genera of archaea dominant founding were *Methanobacterium* sp., *Methanofollis* sp., and *Methanosaeta* sp.

Keyword: Ethanol, biogas, oil palm trunk juice, oil palm frond juice.

1. บทนำ

ประเทศไทยและนานาชาติต่างกำลังก้าวไปสู่เศรษฐกิจหมุนเวียนและการพัฒนาที่ยั่งยืน การกำจัดของเสียและการใช้ทรัพยากรหมุนเวียนมีความสำคัญต่อการบริโภคในอนาคตและความเป็นอยู่ที่ดีของประชาชน แผนปฏิบัติการเศรษฐกิจ Bio-Circular Green (BCG) เป็นตัวอย่างที่ดีของการเคลื่อนไหวเพื่อสร้างนวัตกรรมและเพื่อขับเคลื่อนเศรษฐกิจสู่สภาวะ “New Normal” ในอนาคต รูปแบบ BCG มีความจำเป็นสำหรับประเทศไทยเนื่องจากแนวคิดของเศรษฐกิจหมุนเวียนสามารถช่วย

ให้การใช้ทรัพยากรธรรมชาติมีประสิทธิภาพสูงสุด [1] แนวคิดของเสียเป็นศูนย์ (Zero-waste) เป็นรูปแบบหนึ่งของ BCG ที่มุ่งเน้นไปที่การผลิตสินค้าที่ไม่มีของเสียรวมถึงวัสดุต้นทางและการจัดการของเสีย ซึ่งก็คือการเปลี่ยนของเสียหรือขยะเป็นวัตถุดิบแทนเพื่อสร้างมูลค่าเพิ่ม เช่น การผลิตเป็นพลังงานทดแทนประเภทเอทานอลหรือก๊าซชีวภาพ ปัญหาที่เกิดขึ้นจากการใช้พลังงานทดแทนในรูปแบบเอทานอลนั้นมีปัญหาหลักๆ ได้แก่ ปัญหาทางด้านวัตถุดิบ ปัจจุบันในการผลิตไบโอเอทานอลมีการใช้วัตถุดิบประเภทอ้อยและมันสำปะหลังเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งเป็นวัตถุดิบ

ประเภทหลักที่เป็นแหล่งอาหารของมนุษย์ [2] หากนำมาผลิตไบโอเอทานอลเพื่อใช้เป็นแหล่งพลังงานเชื้อเพลิงในประเทศก็จะสามารถลดการนำเข้าน้ำมันจากต่างประเทศได้เป็นจำนวนมาก แต่คงเป็นเรื่องยากที่จะนำอ้อยและมันสำปะหลังมาผลิตเอทานอลทั้งหมดได้ เนื่องจากเป็น การเบียดเบียนแหล่งอาหารของคนและส่งผลกระทบต่อความมั่นคงทางด้านอาหารของประเทศได้ จึงควรมีแหล่งวัตถุดิบแหล่งใหม่ที่นำมาทดแทนวัตถุดิบดังกล่าว เพื่อให้ เกิดความมั่นคงทางด้านอาหารและพลังงานไปพร้อมๆ กัน วัตถุดิบอีกอย่างที่น่าสนใจเป็นอย่างมาก คือ วัสดุ ชีวมวลจากปาล์มน้ำมัน ซึ่งมีอยู่เป็นจำนวนมากในภาคใต้ เนื่องจากรัฐบาลได้ให้ความสำคัญในเรื่องการส่งเสริมพื้นที่ปลูกเพิ่มเป็น 10 ล้านไร่ภายในปี พ.ศ. 2572 เพื่อเพิ่ม ปริมาณวัตถุดิบหลายปาล์มที่จะป้อนเข้าสู่โรงงานสกัด น้ำมันปาล์ม เพื่อให้มีน้ำมันดิบสำหรับการแปรรูปเป็น ไบโอดีเซล (Biodiesel) โดยอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันมี วัสดุ เศษเหลือที่เป็น วมวลชีวภาพประเภทวัสดุ ลิกโนเซลลูโลส (Lignocellulose) จำนวนมาก โดยเฉพาะ ลำต้นปาล์มน้ำมันที่ถูกตัดทิ้งหลังจากต้นปาล์มน้ำมันมีอายุ มากกว่า 25 ปี และทางใบปาล์มน้ำมันที่ตัดทิ้งทุกๆ 2 สัปดาห์ หรือพร้อมกับการเก็บเกี่ยวผลปาล์มน้ำมัน ใน แต่ละปีจะมีลำต้นปาล์มน้ำมันถูกโค่นทิ้งประมาณ 20,000-45,000 ไร่ โดยมีชีวมวลลำต้นปาล์มน้ำมัน ประมาณ 400,000- 900,000 ลำต้น และชีวมวลจาก ทางใบปาล์มน้ำมันประมาณ 7,050,000 ตัน [3] ซึ่งใน ปัจจุบันชีวมวลดังกล่าวยังไม่ได้ถูกนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ สูงสุดในเชิงอุตสาหกรรม เมื่อพิจารณาองค์ประกอบของ ชีวมวลจากส่วนต่างๆ ของลำต้นปาล์มน้ำมันและทางใบ ปาล์มน้ำมัน พบว่า มีองค์ประกอบหลักเป็นเซลลูโลส (Cellulose) ร้อยละ 40-50 เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) ร้อยละ 20-35 และลิกนิน (Lignin) ร้อยละ 16-29 [3]. โดยเฉพาะอย่างยิ่งส่วนของลำต้น ปาล์มน้ำมันมีปริมาณเฮมิเซลลูโลสสูงถึงร้อยละ 34 โดยเฮ มิเซลลูโลสเป็นส่วนหนึ่ง ที่น่าสนใจ เนื่องจากมี องค์ประกอบหลักเป็นน้ำตาลเพนโตสและน้ำตาลเฮกโซส

หากมีการนำมาผ่านกระบวนการแปรรูปหรือกระบวนการ ปรับสภาพที่เหมาะสมจะสามารถนำไปใช้เป็นซับสเตรต (Substrate) ในกระบวนการหมักเพื่อผลิตเป็นไบโอเอทานอล (Bioethanol) ได้

นอกจากนี้ น้ำเสียจากกระบวนการกลั่นเอทานอลหรือน้ำกากส่า (Distillery wastewater) สามารถผลิตเป็น ก๊าซชีวภาพ (Biogas) ได้ โดยใช้กระบวนการหมักแบบไร้อากาศ ซึ่งนอกจากจะเป็นการบำบัดน้ำเสียแล้วยังใช้เป็น พลังงานทดแทนด้วย ก๊าซชีวภาพประกอบด้วยก๊าซหลาย ชนิด ส่วนใหญ่เป็นก๊าซมีเทน (Methane; CH₄) ประมาณ ร้อยละ 50-70 และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ประมาณร้อยละ 30-50 ส่วนก๊าซชีวภาพที่มีสัดส่วนของ ก๊าซมีเทนร้อยละ 65 ให้ค่าความร้อน 22,400 กิโลจูล/ ลูกบาศก์เมตร [4] เนื่องจากก๊าซชีวภาพมีส่วนประกอบหลักเป็นก๊าซมีเทน จึงทำให้มีคุณสมบัติจุดติดไฟได้ดีและ สามารถนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทนในรูปแบบต่างๆ ได้

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาศักยภาพการ ผลิตเอทานอลและก๊าซชีวภาพจากน้ำคั้นทางปาล์มและลำ ต้นปาล์มน้ำมัน ซึ่งปัจจุบันยังมีการนำไปใช้ประโยชน์ใน เชิงพาณิชย์ในปริมาณที่น้อย โดยเอทานอลและก๊าซ ชีวภาพจากชีวมวลของปาล์มน้ำมันจะเป็นแหล่งพลังงาน ทดแทนที่สำคัญในการสนับสนุนเศรษฐกิจ BCG ของ ประเทศต่อไป

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การเตรียมวัตถุดิบ (Raw material)

ใช้ลำต้นปาล์มน้ำมันและทางปาล์มน้ำมันสดช่วงอายุ 25-30 ปี จากเกษตรกรในอำเภอควนกาหลง จังหวัดสตูล ทำการปอกเปลือกและตัดเป็นชิ้นประมาณ 50-100 เซนติเมตร เพื่อให้สามารถนำเข้าเครื่องสับได้ (Chipper)

2.2 การผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นต้นปาล์ม (Oil palm trunk juice, OPTJ) และน้ำคั้นทางปาล์ม (Oil palm frond juice, OPFJ)

1. นำตัวอย่างลำต้นปาล์มน้ำมันและทางปาล์มน้ำมัน สดที่ผ่านเครื่องสับ มาหีบเพื่อคั้นน้ำโดยใช้เครื่องหีบแบบ

สกรูอัด (Screw press) ที่ใช้สำหรับบีบน้ำจากลำต้นปาล์มน้ำมันและทางปาล์มโดยเฉพาะ หลังจากนั้นนำน้ำคั้นที่ผ่านการบีบมาผ่านการกรองอีกครั้ง แล้วนำไปเก็บรักษาในห้องเย็นที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เพื่อคงสภาพก่อนนำไปทำการทดลองในกระบวนการหมัก (Fermentation) ต่อไป

2. ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของ OPTJ และ OPFJ เช่น กลูโคส, ฟรุคโตส, ซูโครส, โปรตีน, ไนโตรเจน และค่าพีเอช เป็นต้น

3. ศึกษาศักยภาพการผลิตเอทานอลจากกระบวนการหมักน้ำคั้นจากลำต้นปาล์มน้ำมัน (OPTJ) และทางปาล์มน้ำมัน (OPFJ)

นำตัวอย่างน้ำคั้นจากลำต้นปาล์มน้ำมัน (OPTJ) และทางปาล์มน้ำมัน (OPFJ) ในข้อ 2 เติมน้ำเชื้อยีสต์ *S. cerevisiae* ร้อยละ 10 (v/v) Yeast extract ร้อยละ 1 (v/v) (10.0 กรัมต่อลิตร) ไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ทำการกวนด้วยความเร็ว 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 48 ชั่วโมง ในซีรัม (Serum) ขนาด 500 ml โดยเก็บตัวอย่างนำไปวิเคราะห์ที่เวลา 0, 24, 48, 72 และ 96 ชั่วโมง ทำการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และปริมาณเอทานอล

2.3 การผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำกากส่าของ OPFJ และ OPTJ

น้ำกากส่าของ OPFJ และ OPTJ คือน้ำเสียจากถังหมักขนาด 200 ลิตร ในห้องปฏิบัติการ หลังกระบวนการกลั่น (Distillation) เพื่อให้ได้เอทานอล 95%

1. ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของน้ำกากส่าของ OPFJ และ OPTJ เช่น pH, COD, กรดไขมันระเหยง่าย (VFA), ปริมาณไนโตรเจน (TKN), ปริมาณความเข้มข้นของของแข็งทั้งหมด (TS), ปริมาณของของแข็งระเหยง่าย (VS), โปรตีน (Protein), คาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate), ไขมัน (Lipids) และอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio)

2. ศึกษาศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำกากส่าของ OPFJ และ OPTJ โดยใช้เทคนิค Biochemical methane potential (BMP)

ทำการศึกษาศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพในขวดน้ำแกเลือขนาด 500 ml ในปริมาตรใช้งาน 200 ml เติมน้ำกากส่าของ OPFJ และ OPTJ ปรับค่าพีเอชเริ่มต้นด้วย NaHCO_3 ให้อยู่ในช่วง 7-7.5 และเติมน้ำเกลือเริ่มต้นร้อยละ 80 (มีความเข้มข้นของของแข็งแขวนลอยร้อยละ 15 (Volatile suspended solids: VSS) 15 กรัมต่อลิตร) ของปริมาตรทดลอง โดยใช้อัตราส่วนน้ำกากส่าต่อเกลือร้อยละ 20 : 80 ผสมให้เข้ากันดี จากนั้นเติมแก๊สไนโตรเจนและคาร์บอนไดออกไซด์อัตราส่วนร้อยละ 80 : 20 เป็นเวลา 5 นาที เพื่อให้ภายในขวดน้ำแกเลืออยู่ในสภาวะไร้อากาศ ปิดขวดน้ำแกเลือด้วยจุกยางและฟาลูมิเนียมด้วย Hand Crimper นำไปบ่มที่สภาวะอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 วัน โดยระหว่างกระบวนการหมักจะทำการตรวจวัดผลผลิตมีเทนโดยการวัดปริมาตรการผลิตก๊าซชีวภาพโดยการแทนที่น้ำ [5] และวิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพด้วยเครื่องก๊าซโครมาโตกราฟี [6]

2.4 ศึกษาโครงสร้างประชากรจุลินทรีย์

ศึกษาโครงสร้างประชากรจุลินทรีย์ด้วยเทคนิค Polymerase Chain Reaction-Denaturing Gradient Gel Electrophoresis (PCR-DGGE) [7].

2.5 วิเคราะห์ (Analytical methods)

1. วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของน้ำกากส่าวิเคราะห์โดยใช้วิธีของ Standard method [8]

2. วิเคราะห์น้ำตาล (Total sugars) วิเคราะห์โดยใช้ High Performance Liquid Chromatography (HPLC) ยี่ห้อ Shimadzu รุ่น LC-10Avp ใช้ Refractive Index Detector at 50°C, Column (SH1011, 8.0x300 nm, Shodex), 0.04 N H_2SO_4 และ Deionised water เป็น Mobile phase ที่อัตราการไหล 0.8 ml/min และใช้เวลาในการฉีดตัวอย่าง 15 นาที

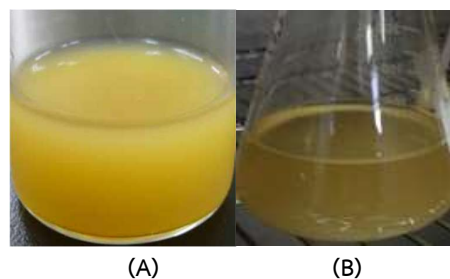
3. วิเคราะห์เอทานอล โดยใช้วิธี Dichromate reagent method

4. วิเคราะห์ก๊าซชีวภาพ วิเคราะห์องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพโดยใช้ Gas chromatography (GC-8A Shimadzu equipped with a thermal conductivity detector) และ 2.0 m packed column (Shin-Carbon ST 100/120 Restex)

3. ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

3.1 องค์ประกอบทางเคมีของ OPFJ และ OPTJ

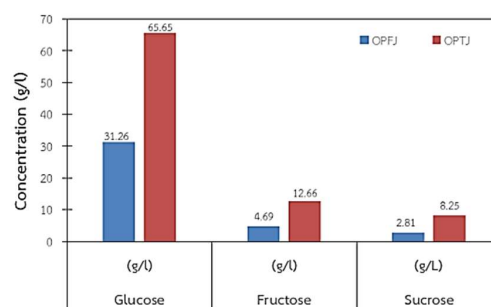
องค์ประกอบทางเคมีของ OPFJ และ OPTJ แสดงดังตารางที่ 1 ปริมาณของน้ำคั้นของ OPFJ และ OPTJ หลังด้วยเครื่องหีบแบบสกรูอัด (Screw press) มีค่าเท่ากับ 550 ml/kg OPF และ 950 ml/kg OPT น้ำตาลกลูโคสที่เป็นองค์ประกอบของ OPFJ และ OPTJ มีความเข้มข้นเท่ากับ 31.26 และ 65.65 mg/l ตามลำดับ จากรูปที่ 2 แสดงให้เห็นว่าปริมาณน้ำตาลกลูโคสใน OPTJ มีค่ามากกว่า OPFJ ประมาณ 2 เท่า แสดงว่า OPTJ มีความหวานมากกว่า OPFJ สังเกตได้จากสีของน้ำคั้น ดังรูปที่ 1. Yasin et al. [9] รายงานว่า ความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสใน OPFJ เท่ากับ 23 g/l ความเข้มข้นน้ำตาลกลูโคสมีความสำคัญในกระบวนการเมแทบอลิซึม (Metabolism) ของ *S. cerevisiae* ในการผลิตเป็นเอทานอล ถ้าปริมาณน้ำตาลกลูโคสสูงก็จะถูกเปลี่ยนเป็นเอทานอลในปริมาณที่สูงเช่นเดียวกัน นอกจากน้ำตาลกลูโคสแล้ว OPFJ และ OPTJ ยังมีองค์ประกอบของน้ำตาลฟรุคโตสและซูโครส ซึ่งใน OPFJ มีค่าเท่ากับ 4.69 และ 2.81 g/l และใน OPTJ มีค่าเท่ากับ 12.66 และ 8.25 g/l ตามลำดับ (ตารางที่ 4.2 และรูปที่ 4.2) OPFJ และ OPTJ มีความเข้มข้นของโปรตีนและไนโตรเจน อยู่ในช่วง 3.75-4.58 และ 0.47-0.65 g/l และมีค่า pH เท่ากับ 4.43 และ 4.48 ซึ่งมีความเหมาะสมกับการผลิตเอทานอลโดยใช้เชื้อ yeast เนื่องจากค่า pH ที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตของ yeast ในการผลิตเอทานอลอยู่ในช่วงประมาณ 4-5[10]



รูปที่ 1 ลักษณะของน้ำคั้นจากชีวมวลปาล์มน้ำมัน (A) OPTJ และ (B) OPFJ

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของ OPFJ และ OPTJ ที่อายุปาล์ม 25-30 ปี

Type of juice	Volume of OPFJ (ml/kg)	Glucose (g/l)	Fructose (g/l)	Sucrose (g/l)	Protein (g/l)	Total nitrogen (mg/l)	pH
OPFJ	550	31.26	4.69	2.81	3.75	0.47	4.43
OPTJ	950	65.65	12.66	8.25	4.58	0.65	4.87



รูปที่ 2 เปรียบเทียบปริมาณน้ำตาลของ OPFJ และ OPTJ ที่อายุปาล์ม 25-30 ปี

3.2 การผลิตเอทานอลจาก OPFJ และ OPTJ

รูปที่ 3 แสดงการผลิตเอทานอลจาก OPFJ และ OPTJ โดยใช้เชื้อ *S. cerevisiae* ผลการทดลองพบว่า ในช่วง 48 ชั่วโมงแรกของการหมัก ปริมาณกลูโคสถูกใช้ไปอย่างรวดเร็ว เพื่อผลิตเป็นเอทานอล โดยปริมาณกลูโคสใน OPFJ ลดลงจาก 31.26 เหลือ 5.09 g/l และ OPTJ ลดลงจาก 65.65 เหลือ 4.95 g/l ซึ่งปริมาณกลูโคสถูกใช้ไปเพื่อผลิตเอทานอลจนเข้าสู่สภาวะคงที่ (Steady-state) ที่ชั่วโมงที่ 96 ของกระบวนการหมัก โดยที่เชื้อ *S. cerevisiae* สามารถผลิตเอทานอลได้สูงสุดจาก

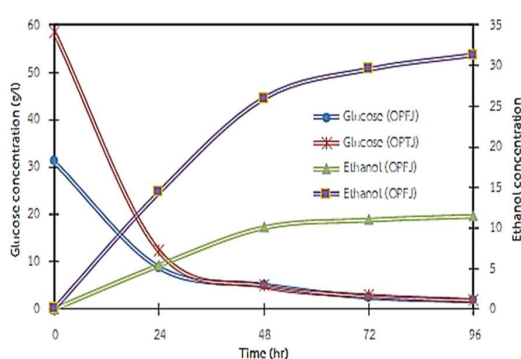
OPTJ ซึ่งผลิตได้ 31.28 g/l แต่ผลิตจาก OPFJ ได้เพียง 11.50 g/l เนื่องจากปริมาณกลูโคสเริ่มต้นใน OPTJ สูงกว่า OPFJ ประมาณ 2 เท่า จึงส่งผลให้เชื้อ *S. cerevisiae* ผลิตเอทานอลจาก OPTJ ได้ปริมาณสูงกว่า จากการคำนวณ Ethanol yield พบว่า การผลิตเอทานอลจาก OPTJ ให้ Yield สูงกว่า OPFJ โดย ethanol yield ของ OPTJ มีค่าเท่ากับ 0.48 g-ethanol/g-glucose ส่วน OPFJ มีค่าเพียง 0.39 g-ethanol/g-glucose เท่านั้น

เนื่องจากประสิทธิภาพการหมัก (fermentation efficiency) ของ OPTJ สูงถึง 93.42% ในขณะที่ประสิทธิภาพการหมักของ OPFJ มีค่าเพียง 72.14% ดังแสดงในตารางที่ 2 Abdullah et al. [11] รายงานว่า Ethanol yield จากการหมัก OPFJ มีค่าเท่ากับ 0.38 g-ethanol/g-glucose ซึ่งใกล้เคียงกับ Ethanol yield ในการทดลองนี้

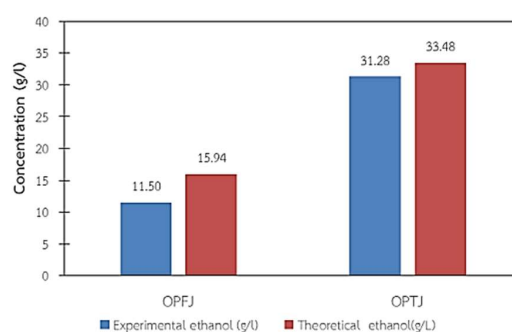
ตารางที่ 2 เปรียบเทียบความแตกต่างของการผลิตเอทานอลระหว่าง OPFJ และ OPTJ โดยใช้เชื้อ *S. cerevisiae*

Media	Sugar Utilization (%)	Max.ethanol Concentration (g/l)	Ethanol Productivity (g/L.hr)	Fermentation time (hr)	Ethanol yield (g-ethanol/g-glucose)	Fermentation Efficiency (%)	Reference
OPFJ	94.23	11.50	0.12	96	0.39	72.14	This Study
OPTJ	96.72	31.28	0.33	96	0.48	93.42	This Study
OPF juice	86.39	18.67	0.25	72	0.38	74.51	[11]
Sugar beet juice	100.00	59.89	0.77	78	0.43	78.80	[12]
Sugarcane juice	98.00	67.00	0.93	72	0.40	78.43	[13]
Sweet sorghum juice	100.00	72.43	1.01	72	0.48	94.60	[14]

*Theoretical yield of ethanol is 0.51 g-ethanol/g-glucose



รูปที่ 3 การใช้น้ำตาลกลูโคสและการผลิตเอทานอลในกระบวนการหมักแบบกะ (Batch) โดยใช้เชื้อ *S. cerevisiae* ของ OPFJ และ OPTJ



รูปที่ 4 เปรียบเทียบการผลิตเอทานอลจากการทดลองกับค่าทางทฤษฎีของ OPFJ และ OPTJ

นอกจากนี้เมื่อทำการเปรียบเทียบปริมาณเอทานอลที่ผลิตได้จากการทดลองกับค่าทางทฤษฎี ผลการทดลองพบว่า การผลิตเอทานอลจาก OPTJ ใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎีมากถึง 93.43% ส่วน OPFJ ใกล้เคียงกับค่าทางทฤษฎีเพียง 72.15% (รูปที่ 4) แสดงว่า เชื้อ *S. cerevisiae* สามารถใช้น้ำตาลใน OPTJ ได้ดีกว่า OPFJ สรุปการผลิตเอทานอลจาก OPFJ และ OPTJ เมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุดิบอื่นที่ใช้ *S. cerevisiae* ชนิดเดียวกันถูกแสดงไว้ในตารางที่ 2 ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า OPFJ และ OPTJ มีศักยภาพในการเป็นวัตถุดิบที่สมบูรณ์สำหรับการหมักเอทานอล และไม่ใช้วัตถุดิบที่ถูกนำมาใช้เป็นอาหารสำหรับมนุษย์ จึงมีความน่าสนใจเนื่องจากเป็นของเสียที่เกิดจากการเกษตรประเภทปาล์มน้ำมันซึ่งเป็นพืชเศรษฐกิจของภาคใต้ จึงมีวัตถุดิบเพื่อผลิตเป็นเอทานอลได้ตลอดทั้งปี

3.3 คุณสมบัติทางเคมีของน้ำกากส่าของ OPFJ และ OPTJ

น้ำกากส่าของเหลวที่เหลือทิ้งจากกระบวนการกลั่นเอทานอล มีลักษณะเป็นสีน้ำตาลเข้ม อุณหภูมิสูง ความเป็นกรดสูง ส่งผลให้ค่าพีเอชต่ำ ค่าซีโอดีสูง เป็นน้ำเสียจึงต้องมีการจัดการอย่างเหมาะสมและถูกต้องเพื่อลดปัญหาล้างแฉะ แต่กากส่ามีความเข้มข้นของซีโอดีสูง มีศักยภาพสูงสามารถหมักภายใต้สภาวะไร้อากาศเพื่อให้ได้ก๊าซชีวภาพมาทดแทนน้ำมันเตาได้ คุณสมบัติทางเคมีของน้ำกากส่าของ OPFJ และ OPTJ แสดงข้อมูลดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของน้ำกากส่าของ OPFJ และ OPTJ ที่ใช้ในการทดลอง

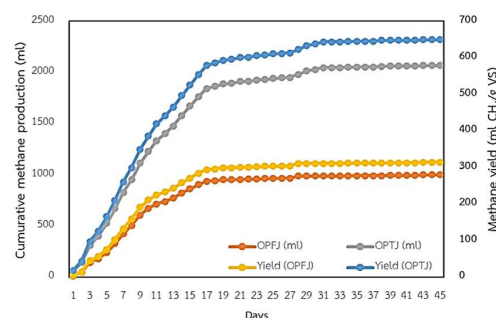
องค์ประกอบ	OPFJ	OPTJ
pH	4.6	5.0
COD (g/L)	130	176
VFA (g/L)	3.85	6.65
TKN (g/L)	11	15.55
TS (g/L)	21	36
VS (g/L)	15	21
Protein (g/L)	9.8	11.28
Carbohydrate (g/L)	75.85	84.58
Lipids (g/L)	3.55	6.76
C/N ratio	12	15

3.4 การผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำกากส่าของ OPFJ และ OPTJ

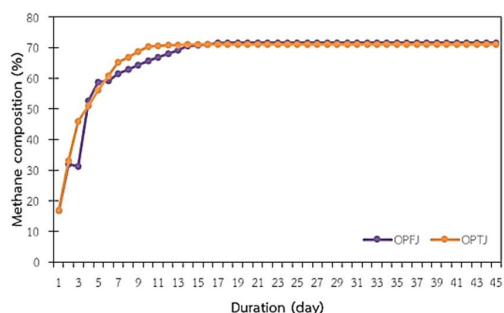
ปริมาณมีเทนสะสม ผลผลิตมีเทน (yield) และร้อยละปริมาณก๊าซมีเทน (%) ที่ได้จากกระบวนการหมักน้ำกากส่าของ OPFJ และ OPTJ แสดงดังรูปที่ 5-6 ผลการทดลองพบว่าปริมาณมีเทนสะสมสูงสุดของ OPFJ และ OPTJ มีค่าเท่ากับ 997 และ 1,068 ml ดังแสดงในรูปที่ 5 (ซ้าย) สอดคล้องกับค่าผลผลิตมีเทน (yield) ที่มีค่าใกล้เคียงกันซึ่งมีค่าเท่ากับ 314 และ 336 ml CH₄/g VS ดังรูปที่ 5 (ขวา) ที่ร้อยละปริมาณก๊าซมีเทน 71.53 และ 71.18% มีเทน ตามลำดับ (รูปที่ 6) ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกันมาก โดยศักยภาพในการผลิตก๊าซมีเทนหาได้จากการวัดปริมาณก๊าซมีเทนที่เกิดขึ้นในแต่ละวันมาเขียนกราฟปริมาณมีเทนสะสมตามระยะเวลาที่ทำการทดลอง (รูปที่ 5) และนำมาคำนวณหาค่าศักยภาพการผลิตก๊าซมีเทน (Specific Methane Yield) ในรูปแบบของสารอินทรีย์ระเหยเข้า ดังสมการที่ 1 [15]

$$\text{Specific Methane Yield} = \frac{\text{ปริมาณของก๊าซมีเทนสะสมทั้งหมด (ml)}}{\text{ปริมาณสารอินทรีย์ระเหยเข้า (mg)}} \quad (1)$$

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าน้ำกากส่าของ OPFJ และ OPTJ มีศักยภาพในการใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพได้ ดังแสดงในตารางที่ 4



รูปที่ 5 ปริมาณก๊าซมีเทนสะสม(ซ้าย) และผลผลิตมีเทน (methane yield)(ขวา) จากกระบวนการหมักน้ำกากส่าของ OPFJ และ OPTJ



รูปที่ 6 ร้อยละปริมาณก๊าซมีเทนจากกระบวนการหมักน้ำกากส่าของ OPFJ และ OPTJ

ตารางที่ 4 ศักยภาพการผลิตก๊าซชีวภาพที่ได้จากจากกระบวนการหมักน้ำกากส่าของ OPFJ และ OPTJ

ตัวอย่าง	Final pH	Total biogas (ml)	CH ₄ (ml)	CH ₄ yield (mlCH ₄ /g VS)	COD Efficiency (%)
OPTJ	7.33	1,465	1,068	336	78
OPFJ	6.96	1,401	997	314	72

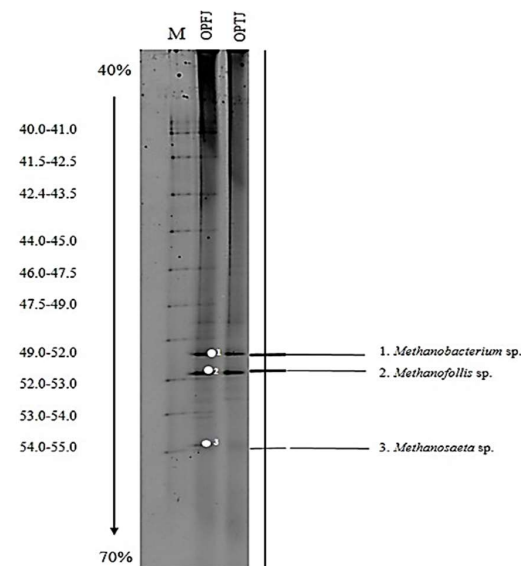
3.5 ผลการศึกษาโครงสร้างอาร์เคียในกระบวนการหมักน้ำกากส่าของ OPFJ และ OPTJ เป็นก๊าซชีวภาพ

ผลการศึกษาโครงสร้างประชากรอาร์เคีย ในกระบวนการหมักน้ำกากส่าของ OPFJ และ OPTJ พบว่าพบประชากรอาร์เคียกลุ่ม 3 จินัส คือ *Methanobacterium* sp., *Methanofollis* sp., และ *Methanosaeata* sp. ประชากรที่โดดเด่นอยู่ 2 จินัส คือ *Methanobacterium* sp. และ *Methanofollis* sp. (รูปที่ 7) ซึ่งสร้างมีเทนจากหมู่เมทิลในโมเลกุลอะซิเตท โดยพบเกิดมีเทนจากกลุ่มนี้มากกว่าร้อยละ 70

4. สรุป

การผลิตเอทานอลจาก OPFJ และ OPTJ โดยใช้เชื้อ *S. cerevisiae* พบว่าปริมาณกลูโคสถูกใช้ไปอย่างรวดเร็วเพื่อผลิตเป็นเอทานอลจนเข้าสู่สภาวะคงที่ (steady-state) ที่ชั่วโมงที่ 96 ของกระบวนการหมัก โดยที่เชื้อ *S.*

cerevisiae สามารถผลิตเอทานอลได้สูงสุดจาก OPFJ และ OPTJ เท่ากับ 11.50 g/L และ 31.28 g/L ให้ผลผลิตเอทานอล (ethanol yield) ของ OPFJ และ OPTJ เท่ากับ 0.39 g-ethanol/g-glucose และ 0.48 g-ethanol/g-glucose เนื่องจากประสิทธิภาพการหมัก (fermentation efficiency) ของ OPTJ สูงถึง 93.42% ในขณะที่ประสิทธิภาพการหมักของ OPFJ มีค่าเพียง 72.14% OPTJ มีศักยภาพในการการผลิตเอทานอลมากกว่า OPFJ เนื่องจากปริมาณกลูโคสเริ่มต้นใน OPTJ สูงกว่า OPFJ ประมาณ 2 เท่า การผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำกากส่าของ OPFJ และ OPTJ มีค่าใกล้เคียงกัน สอดคล้องกับค่าผลผลิตมีเทน (methane yield) ซึ่งมีค่าเท่ากับ 314 และ 336 ml CH₄/g VS แสดงให้เห็นว่าน้ำกากส่าของ OPFJ และ OPTJ มีศักยภาพในการใช้เป็นวัตถุดิบเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพได้ ดังนั้น OPFJ และ OPTJ จึงเป็นวัตถุดิบเหลือทิ้งทางการเกษตรที่น่าสนใจมีศักยภาพในการพัฒนาเป็นอุตสาหกรรมด้านพลังงานทดแทนที่สนับสนุนการขับเคลื่อนเศรษฐกิจ BCG โมเดลของประเทศไทยได้



รูปที่ 7 โครงสร้างประชากรอาร์เคียจากกระบวนการหมักน้ำกากส่าของ OPFJ และ OPTJ

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2560 ที่ให้การสนับสนุนทุนสำหรับงานวิจัยในครั้งนี้ คณะผู้วิจัยขอขอบคุณผู้มีส่วนช่วยให้โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีทุกคน ทั้งด้านข้อเสนอแนะทางวิชาการ แรงงาน หรืออำนวยความสะดวกในด้านเครื่องมือ สถานที่วิจัย สดุดท้ายขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงสำหรับมหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลาและมหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง ที่ได้สนับสนุนสถานที่ทำวิจัยและอำนวยความสะดวกในการทำวิจัยทำให้โครงการวิจัยนี้สามารถดำเนินการแล้วเสร็จ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] R.G.J. Edyveana, W. Apiwatanapiwatb, P. Vaithanomsatb, A. Boondaengb, P. Janchaib and S. Sophonthammaphat, “The Bio-Circular Green Economy model in Thailand – A comparative Review”, *Agriculture and Natural Resources*, vol. 57, pp. 51-64, 2023.
- [2] M. Shafiel, M.M. Kabir, H. Zilouei, I.H. Horvath and K. Karimi, “Techno-economical study of biogas production improved by steam explosion pretreatment”, *Bioresource Technology*, vol. 148, pp. 53–60, 2013.
- [3] M.A.K.M. Zahari, M.R. Zakaria, H.H. Ariffin, M.N. Mokhtar, J. Salihon, Y. Shirai and M.A. Hassan, “Renewable sugars from oil palm frond juice as an alternative novel fermentation feedstock for value-added products”, *Bioresource Technology*, vol. 110, pp. 566–571, 2012.
- [4] M. Wasterholm, M. Hansson and A. Schnurer, “Improved biogas production from whole stillage by co-digestion with cattle manure”, *Bioresource Technology*, vol. 114, pp. 314-319, 2012.
- [5] I. Angelidaki and L. Ellegaard, “Co-digestion of manure and organic wastes in centralized biogas plants, status and future trends”, *Appl Biochem Biotech*, vol.109, pp. 95-105, 2003.
- [6] S. O-Thong, A. Hniman, P. Prasertsan and T. Imai, “Biohydrogen production from cassava starch processing wastewater by thermophilic mixed cultures”, *Int J Hydrogen Energy*, vol. 36, pp. 3409-3416, 2011.
- [7] K. Kongjan, S. O-Thong and I. Angelidaki, “Biohydrogen production from desugared molasses (DM) using thermophilic mixed cultures immobilized on heat treated anaerobic sludge granules”, *Hydrogen energy*, vol. 36, pp. 14261-14269, 2011.
- [8] E.W. Rice, R.B. Baird, A.D. Eaton and L.E. Clesperi, “Standard methods for the examination of water and wastewater (22th ed).” Washington DC.: American Public Health Association, 2012.
- [9] N.H.M. Yasin, M. Furkuzaki, T. Maeda, Miyazaki, T. Miyasaki, C.M.H.C. Maail, H. Ariffin and T.K. Wood, “Biohydrogen production from oil palm frond juice and sewage sludge by a metabolically engineered *Escherichia coli* strain”, *International journal of hydrogen energy*, vol. 38, pp. 10277-10283, 2013.
- [10] G. Reed and T.W. Nagodawithana, *Yeast Technology*. New York: Van Nostrand Reinhold, 1991.

- [11] S.S.S. Abdullah, Y. Shirai, E.K. Bahrin and M.A. Aassan, “Fresh oil palm frond juice as a renewable, non-food, non cellulosicand complete medium for direct bioethanol production”, *Industrial Crops and Products*, vol. 63, pp. 357–361, 2015.
- [12] C.L. Ramos, W.F. Duarte, A.L. Freire, D.R. Dias, E.C.A. Eleutherio and R.F. Schwan, “Evaluation of stress tolerance and fermentative behavior of indigenous *Saccharomyces cerevisiae*”, *Brazilian Journal of Microbiology*, vol. 44, pp. 935-944, 2013.
- [13] X. Wu, S. Staggenborg, J.L. Prophet, W.L. Rooney, J. Yu, D. Wang, “Features of sweet sorghum juice and their performance in ethanol fermentation”, *Industrial Crops and Products*, vol. 31, pp. 164-170, 2010.
- [14] M. Pavlecic, I. Vrana, K. Vibovec, P. Horvat, B. Santek, “Ethanol production from different intermediates of sugar beet processing”, *Food Technology & Biotechnology*, vol. 48, pp. 362-367, 2010.
- [15] Energy Research and Development Institute Nakorping, Chiang Mai University. “Biochemical methane potential (BMP) analysis document”, 2011.

การศึกษาผลกระทบของการใช้วัสดุเปลี่ยนเฟสร่วมในตู้แช่เย็น

Study on the Effect of Refrigerator with Phase Change Material

อาทิตย์ คำต่าย^{1*} เลอศักดิ์ นาครินทร์²

¹ภาควิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี อำเภอเมือง จังหวัดจันทบุรี 22000

²บริษัท พีทีที โกลบอล เคมิคอล จำกัด (มหาชน) อ.เมือง จังหวัดระยอง 21150

Artit Kamtai ^{1*} Lursukd Nakharintr ²

¹Department of Energy Technology, Faculty of Industrial Technology,

Rambhai Barni Rajabhat University, Aumpher Muang, Chanthaburi Province, 22000

²PTT Global Chemical Public Company Limited, Aumpher Muang, Rayong Province, 21150

*Corresponding author Email: artit.k@rbru.ac.th

(Received: October 24, 2023; Revised: January 25, 2024 ; Accepted: April 25, 2024)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาผลกระทบของการใช้วัสดุเปลี่ยนเฟสร่วมในระบบทำความเย็นของตู้แช่เย็นแบบประตูเดียวขนาด 105 L โดยติดตั้งวัสดุเปลี่ยนเฟสร่วมกับท่อทำความเย็นแทนตำแหน่งของอีวาพอเรเตอร์เดิมมีอุณหภูมิในการเปลี่ยนเฟสที่ -15 °C เป็นการทดลองการลดลงของอุณหภูมิ (Pull-down test) แบบมีภาระโหลดกำหนดอุณหภูมิสุดท้ายที่ 6 °C โดยมีอุณหภูมิเริ่มต้นเฉลี่ยที่ 35 °C เปรียบเทียบระหว่างมีและไม่มีวัสดุเปลี่ยนเฟส พิจารณาโดยเฉลี่ยของระยะเวลาการลดลงของอุณหภูมิภาระโหลด อุณหภูมิภายในตู้แช่เย็น ระยะเวลาการทำงานของคอมเพรสเซอร์ และการใช้พลังงาน ผลจากการทดลองพบว่าตู้แช่เย็นแบบมีวัสดุเปลี่ยนเฟสร่วม มีระยะเวลาในการลดลงของอุณหภูมิภาระโหลดมากกว่า 3 นาที คิดเป็น 0.61 % เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยและไม่ส่งผลกระทบต่อระบบการทำความเย็น ในส่วนของอุณหภูมิภายในตู้แช่เย็นใช้ระยะเวลาในการลดลงของอุณหภูมิน้อยกว่า 94 นาที คิดเป็น 33.09 % มีระยะเวลาการทำงานของคอมเพรสเซอร์ลดลง 88 นาที คิดเป็น 25.00 % และลดการใช้พลังงานลงได้เท่ากับ 11.930 W คิดเป็น 17.77 % เมื่อเปรียบเทียบกับแบบไม่มีวัสดุเปลี่ยนเฟส ที่มีระยะเวลาการลดลงของอุณหภูมิภาระโหลดเท่ากับ 485 นาที ในส่วนของอุณหภูมิห้องแช่เย็นใช้ระยะเวลาในการลดลงของอุณหภูมิเท่ากับ 284 นาที และมีระยะเวลาการทำงานของคอมเพรสเซอร์เท่ากับ 352 นาที โดยใช้พลังงานเท่ากับ 67.131 W จากผลของการทดลองแสดงให้เห็นว่าการมีวัสดุเปลี่ยนเฟสร่วมนั้นมีผลดีต่อระบบของการทำความเย็นเป็นอย่างมาก

คำสำคัญ: ตู้แช่เย็น, วัสดุเปลี่ยนเฟส, การใช้พลังงาน, การลดลง

ABSTRACT

This research studies the effects of using phase change material in the cooling system of a 105 L single door refrigerator. Installed the phase change material together with the cooling pipe instead of the original evaporator position, with melting temperature of -15 °C. This was a load pull-down test

with a final temperature of 6 °C and an average initial temperature of 35 °C, the comparison with and without phase change material. Consider the average of the pull-down time of the load temperature, the temperature in cabinet of refrigerator, the compressor run time, and the energy consumption. The results of the experiment found that the refrigerator with phase change material had a time to pull-down the load temperature of more than 3 minutes, accounting for 0.61 %, the increase is only slight and has no effect on the cooling system. The pull-down time of temperature in cabinet reduce up to 94 minutes, is 33.09 %. The compressor operating time decreased by 88 minutes is 25.00 % and reduced energy consumption by 11.930 W is 17.77 %. When comparison without phase change material had a time to pull-down the load temperature of 485 minutes, the pull-down time of temperature in cabinet of 284 minutes, there was a compressor operating time of 352 minutes, and energy consumption by 67.131 W. The results indicate that the use of phase change materials has a positive impact on the cooling system.

Keyword: refrigerator, phase change material, energy consumption, Pull-down.

1. บทนำ

ตู้แช่เย็นเป็นเครื่องใช้ไฟฟ้าที่สามารถพบได้ตามครัวเรือนทั่วไปที่มีบทบาทสำคัญในการเก็บรักษาและถนอมอาหารให้อยู่ในอุณหภูมิต่ำช่วยป้องกันหรือชะลอการเปลี่ยนแปลงชะลอการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพและสมบัติทางเคมีในอาหาร [1] โดยคาดการณ์กันว่าตู้แช่เย็นใช้งานอยู่ประมาณหนึ่งพันล้านเครื่องทั่วโลก [2] ทำให้ตู้แช่เย็นนั้นกลายเป็นเครื่องใช้ไฟฟ้าชนิดหนึ่งที่นิยมใช้กันมากที่สุดในชีวิตประจำวันของเราและตู้แช่เย็นยังคงมีแนวโน้มการผลิตเพิ่มขึ้นในทุกปีเพราะความต้องการที่เพิ่มขึ้นในประเทศกำลังพัฒนา [3] ดังนั้นทำให้ความต้องการใช้พลังงานสำหรับตู้แช่เย็นเพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยเป็นเกือบ 30% ของการใช้พลังงานทั่วโลก [4] และเมื่อเทียบกับบรรดาเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในครัวเรือนอื่น ๆ ทำให้ตู้แช่เย็นเป็นเครื่องใช้ไฟฟ้าที่มีความต้องการใช้พลังงานมากที่สุดในครัวเรือนเนื่องจากการทำงานอย่างต่อเนื่อง [5] และความต้องการใช้พลังงานในระบบทำความเย็นของตู้แช่เย็นนั้น 80 % มาจากการทำงานคอมเพรสเซอร์ [6] เนื่องจากคอมเพรสเซอร์เป็นอุปกรณ์หลักของตู้แช่เย็นมีหน้าที่ดูดและอัดสารทำความเย็นให้หมุนเวียนภายในระบบวิธีลด

การใช้พลังงานของตู้แช่เย็นและการปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นนั้นทั่วไปมีแนวคิดหลายประการที่อาจนำมาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบทำความเย็น โดยสามารถแบ่งออกเป็นสามหัวข้อหลักคือ การเพิ่มประสิทธิภาพของฉนวนกันความร้อนการเพิ่มประสิทธิภาพของคอมเพรสเซอร์ และการพัฒนาเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนให้มีประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนที่ดีขึ้น [7,8] แต่เนื่องจากการเปลี่ยนคอมเพรสเซอร์และการเพิ่มประสิทธิภาพของฉนวนกันความร้อนนั้นมีความยุ่งยากและค่าใช้จ่ายที่สูง [9] ในปัจจุบันมีอีกทางเลือกใหม่เพิ่มขึ้นเป็นการนำเอาวัสดุเปลี่ยนเฟส มาใช้ในการจัดเก็บพลังงานความร้อนภายในตู้แช่เย็น โดยใช้งานร่วมกับเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนนั้นถือว่าเป็นวิธีที่มีศักยภาพในการปรับปรุงประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นและเป็นการลดระยะเวลาการทำงานของคอมเพรสเซอร์ลง [9] ทำให้การใช้พลังงานก็จะลดลงตามไปด้วยส่งผลทำให้อายุการใช้งานของคอมเพรสเซอร์ที่ยาวนานขึ้น และยังสามารถลดความแปรปรวนของอุณหภูมิภายในตู้แช่เย็นได้ [6,10,11] โดยแนวทางเทคนิควิธีนี้สามารถอธิบายได้ดังนี้ เมื่อมีการติดตั้งวัสดุเปลี่ยนเฟส ภายในตู้แช่เย็นนั้นจะช่วยดูดซับ

ความร้อน โดยการเปลี่ยนเฟสจากของแข็งเป็นของเหลว และทำให้อุณหภูมิภายในตู้แช่เย็นจะคงที่จนกว่ากระบวนการหลอมเหลวจะเสร็จสิ้นทำให้ช่วยยืดระยะเวลาการปิดของคอมเพรสเซอร์ [11,12] การใช้วัสดุเปลี่ยนเฟสร่วมกับฮีวฟอเรเตอร์ภายในตู้แช่เย็นนั้นกำลังเป็นที่สนใจมากขึ้นในการปรับปรุงระบบการทำความเย็น ให้ดีขึ้น [13] และจากการทบทวนวรรณกรรมนั้นพบว่าการทดลองเพื่อประเมินผลของระบบการทำความเย็นโดยใช้งานร่วมกับวัสดุเปลี่ยนเฟสนั้นส่วนมากแล้วจะทดลองเก็บผลและนำเสนอในกรณีหลังจากสถานะการทำความเย็นของระบบคงที่ไปแล้ว แต่ในกรณีใช้งานจริงของชีวิตประจำวัน การนำเอาผลิตภัณฑ์ที่มีอุณหภูมิเท่ากับหรือสูงกว่าอุณหภูมิของสภาพแวดล้อมใส่ลงในตู้แช่เย็นนั้นเป็นเรื่องปกติของการใช้งาน แต่ในระบบการทำความเย็นแล้วถือว่าเป็นการเพิ่มภาระโหลด โดยคอมเพรสเซอร์จะต้องทำงานมากขึ้นเพื่อดึงเอาความร้อนออกจากผลิตภัณฑ์ นั้นทำให้ภาระงานการทดลองแบบการลดลง (Pull-down test) ในกรณีมีภาระโหลดตามมาตรฐานการทดลองของตู้แช่เย็น [14,15,16] โดยเปรียบเทียบระหว่างมีและไม่มีวัสดุเปลี่ยนเฟสร่วม พิจารณาระยะเวลาการลดลงของอุณหภูมิภาระโหลด ระยะเวลาดำเนินการของคอมเพรสเซอร์ และการใช้พลังงาน

2. วัสดุและอุปกรณ์การทดลอง

2.1 ลักษณะของตู้แช่เย็นที่ใช้ในการทดลอง

ในการทดลองครั้งนี้ใช้ตู้แช่เย็นสำหรับเครื่องดื่มโดยไม่มีช่องผลิตน้ำแข็งเป็นแบบตู้ประตูเดียว วินเทมพ์ รุ่นเพรสทิจ มีปริมาตรภายในห้องแช่เย็น 105 L การไหลเวียนของอากาศภายในเป็นแบบ Natural Convection มีฮีวฟอเรเตอร์แบบแผ่นขนาด 380 x 480 mm ติดตั้งอยู่ภายในด้านหลังใช้สารทำความเย็น R-134a จำนวน 0.09 kg แรงดันไฟฟ้า 220 V ความถี่ 50 Hz กระแสไฟฟ้า 0.82 A ขนาดมอเตอร์คอมเพรสเซอร์ 90 W น้ำหนักสุทธิ 40 kg สามารถทำความเย็นได้ 6°C - 12°C ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 แสดงลักษณะของตู้แช่เย็น

2.2 วัสดุเปลี่ยนเฟส

ตู้แช่เย็นที่ใช้ในการทดลองนั้นจะทำการติดตั้งวัสดุเปลี่ยนเฟส ภายในตู้แช่เย็นเพื่อชะลอการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิอันเนื่องมาจากการความสามารถในการดูดซับอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นโดยการเปลี่ยนเฟสจากของแข็งเป็นของเหลวโดยในขณะเปลี่ยนเฟสนั้นจะสามารถรักษาอุณหภูมิภายในตู้แช่เย็นในคงที่ และในทางกลับกันก็จะขยายรอบการหยุดทำงานของคอมเพรสเซอร์ [17,18] โดยวัสดุเปลี่ยนเฟส ที่ทางคณะผู้วิจัยได้นำมาใช้ในการทดลองนั้นประกอบด้วยน้ำเป็นส่วนผสมหลักเนื่องจากการทบทวนวรรณกรรมนั้นพบว่ามีใช้กันอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีคุณสมบัติทางความร้อนที่ดีและมีปลอดภัยสูง [19,20] นำมาผสมร่วมกับโพลีเอทิลีนไกลคอล ซึ่งเป็นวัสดุที่ไม่ติดไฟ ไม่เป็นพิษเป็นวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมเนื่องผลิตจากธรรมชาติไม่กัดกร่อน และเป็นสารชีวภาพ [13] ในสัดส่วนน้ำบริสุทธิ์และกับโพลีเอทิลีนไกลคอล 70 % ต่อ 30 % แสดงในรูปที่ 2 มีน้ำหนักโดยรวมเท่ากับ 4.50 kg และอุณหภูมิการเปลี่ยนเฟสที่ -15 °C เท่ากับอุณหภูมิโดยเฉลี่ยของห้องทำความเย็น

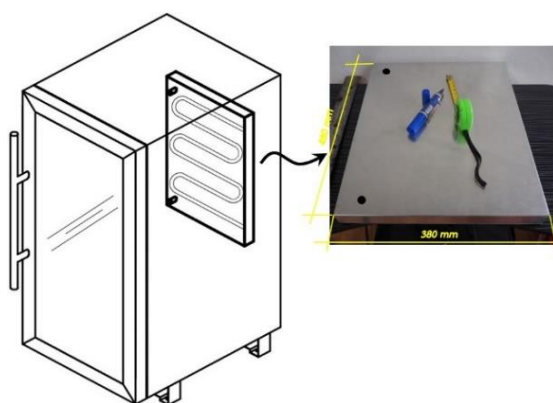
2.3 กล่องบรรจุวัสดุเปลี่ยนเฟส

กล่องบรรจุวัสดุเปลี่ยนเฟสมีความกว้างและความยาวเท่ากับขนาดของฮีวฟอเรเตอร์เดิมวัสดุทำจากอลูมิเนียมพับขึ้นรูปมีขนาด 380 x 480 x 30 mm และมีความหนาแผ่น 0.5 mm นำไปติดตั้งแทนตำแหน่งของฮีวฟอเรเตอร์

แบบเดิม แสดงในรูปที่ 3 โดยให้ท่อทำความเย็นติดกับผนังของกล่องด้านในตู้แช่เย็นปิดทับด้วยเทปอลูมิเนียมและเติมวัสดุเปลี่ยนเฟสในลักษณะแบบแช่ท่อทำความเย็น



รูปที่ 2 แสดงส่วนผสมของวัสดุเปลี่ยนเฟส



รูปที่ 3 แสดงตำแหน่งติดตั้งวัสดุเปลี่ยนเฟส

2.4 อุปกรณ์บันทึกผลการทดลอง

ในการทดลองครั้งนี้ใช้ห้องที่สามารถควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ได้มี Data Logger AI210 บันทึกข้อมูลของอุณหภูมิและการใช้พลังงานต่อรวมกันมีสายเทอร์โมคัปเปิล Type T ความคลาดเคลื่อน ± 0.2 % Watt Transducer 95 ความคลาดเคลื่อน ± 0.5 % และเครื่องวัดความชื้นสัมพัทธ์อากาศ ความคลาดเคลื่อน ± 0.5 % ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 แสดงลักษณะอุปกรณ์บันทึกผลการทดลอง

3. ขั้นตอนและวิธีการทดลอง

3.1 ติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิล

ในการทดลองเลือกใช้สายเทอร์โมคัปเปิล Type T เนื่องจากมีช่วงการวัดอุณหภูมิอยู่ที่ -200 °C ถึง $+350$ °C เป็นที่นิยมใช้งานสำหรับวัดอุณหภูมิด้านต่ำ มีตำแหน่งติดตั้งทั้งหมด 7 ตำแหน่ง ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิภายในตู้แช่เย็น

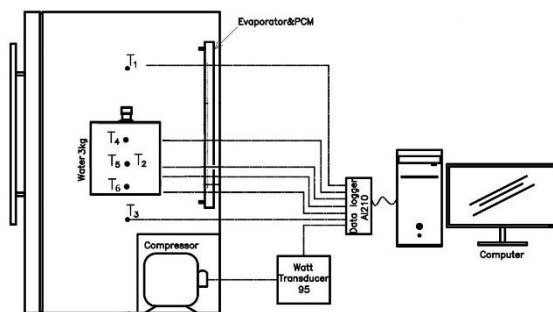
ลำดับ	ตำแหน่งสัญลักษณ์
1	ตำแหน่งที่ T_1 ภายในตู้แช่เย็นด้านบน
2	ตำแหน่งที่ T_2 ภายในตู้แช่เย็นกึ่งกลาง
3	ตำแหน่งที่ T_3 ภายในตู้แช่เย็นด้านล่าง
4	ตำแหน่งที่ T_4 ภาระโหลดด้านบน
5	ตำแหน่งที่ T_5 ภาระโหลดกึ่งกลาง
6	ตำแหน่งที่ T_6 ภาระโหลดด้านล่าง
7	ตำแหน่งที่ T_7 อุณหภูมิห้องทดลอง

3.2 วิธีการทดลอง

ในการทดลองครั้งนี้ใช้วิธีการทดลองแบบการลดลง (Pull-down test) เป็นตามเกณฑ์มาตรฐาน[16] โดยเปรียบเทียบระหว่างมีและไม่มีวัสดุเปลี่ยนเฟสร่วมพิจารณาระยะเวลาการลดลงของอุณหภูมิ ระยะเวลาการทำงานของคอมเพรสเซอร์ และการใช้พลังงาน จะทำการทดลองที่อุณหภูมิ 6 °C เป็นอุณหภูมิสุดท้ายและต่ำสุดที่ตู้แช่เย็นจะทำได้ โดยมีภาระโหลดเป็นน้ำจำนวน 3.0 kg วาง

ปีที่ 19 ฉบับที่ 2 เดือน เมษายน – กันยายน พ.ศ. 2567

ในตู้แช่เย็นตำแหน่งกลาง ทำการทดลองสำหรับตู้แช่เย็นแบบไม่มีวัสดุเปลี่ยนเฟสก่อนทำการปรับตั้งและควบคุมอุณหภูมิภายในห้องทดสอบที่ 25 °C ความชื้นสัมพัทธ์ที่ 60 % ใช้โปรแกรม OD04 เชื่อมต่อการทำงานของ Data Logger AI210 กับคอมพิวเตอร์เพื่อบันทึกข้อมูล เปิดการทำงานของตู้แช่เย็นที่ทำการติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิลครบทุกตำแหน่ง จากนั้นปรับตั้งอุณหภูมิภายในตู้แช่เย็นไปยัง 6 °C จนกระทั่งอุณหภูมิภายในตู้แช่เย็นถึงตามกำหนด และอยู่ในสภาวะการทำงานคงที่แล้ว จากนั้นเติมภาระโหลดลงในภาชนะบรรจุที่ติดตั้งไว้แล้วภายในตู้แช่เย็น ในตำแหน่งเดิมที่ได้ออกแบบโดยไม่มีการเปิดประตูพิจารณาที่อุณหภูมิเริ่มต้นคือ 35 °C โดยเฉลี่ยและทำการบันทึกข้อมูลลงในคอมพิวเตอร์ทำการทดลองทั้งหมด 3 ครั้งโดยเฉลี่ย ไดอะแกรมการทดลองและตำแหน่งการวัดแสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 แสดงไดอะแกรมการทดลองและตำแหน่งการวัด

ผลที่ได้ในการทดลองสำหรับตู้แช่เย็นแบบมีและไม่มีวัสดุเปลี่ยนเฟส นั้นสามารถนำมาคำนวณเปรียบเทียบหาระยะเวลาการลดลงของอุณหภูมิภาระโหลด และอุณหภูมิภายในตู้แช่ได้จากสมการที่ 1

$$RT = \frac{T_{with} - T_{without}}{T_{with}} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ

RT อัตราการลดลงของเวลา (%)
 T_{with} ระยะเวลาการลดลงของอุณหภูมิแบบมีวัสดุเปลี่ยนเฟส (min)

$T_{without}$ ระยะเวลาการลดลงของอุณหภูมิแบบไม่มีวัสดุเปลี่ยนเฟส (min)

โดยสามารถนำมาคำนวณเพื่อเปรียบเทียบระยะเวลาการทำงานของคอมเพรสเซอร์ได้จากสมการที่ 2 และสามารถนำผลมาคำนวณเปรียบเทียบการใช้พลังงานได้จากสมการ 3

$$ROT = \frac{K_{without} - K_{with}}{K_{without}} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ

ROT Reduced ON-time ratio (%)
 $K_{without}$ ON-time ratio for the case without PCM (min)
 K_{with} ON-time ratio for the case with PCM (min)

$$RE = \frac{E_{without} - E_{with}}{E_{without}} \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ

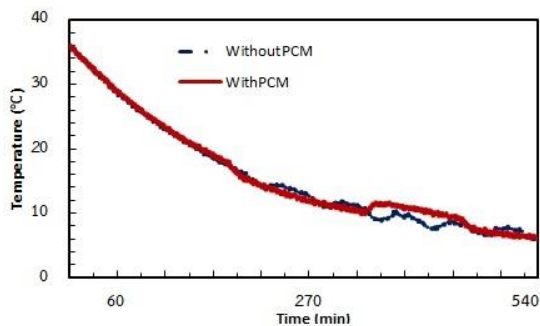
RE อัตราการลดใช้พลังงาน (%)
 $E_{without}$ การใช้พลังงานแบบไม่มีวัสดุเปลี่ยนเฟส (W)
 E_{with} การใช้พลังงานแบบมีวัสดุเปลี่ยนเฟส (W)

4. ผลการทดลอง

4.1 เปรียบเทียบผลการลดลงของอุณหภูมิภาระโหลดภายในตู้แช่เย็น

จากรูปที่ 6 การเปรียบเทียบอุณหภูมิของภาระโหลดภายในตู้แช่เย็นแบบมีและไม่มีวัสดุเปลี่ยนเฟสนั้นมีอุณหภูมิเริ่มต้นการทดลองเท่ากันโดยเฉลี่ยเท่ากับ 35 °C พิจารณาระยะเวลาในการลดลงของอุณหภูมิสุดท้ายตามที่กำหนดคือ 6 °C โดยแบบไม่มีวัสดุเปลี่ยนเฟสใช้ระยะเวลาในการลดลงของอุณหภูมิภาระโหลดโดยเฉลี่ยเท่ากับ 485 นาที และ

แบบมีวัสดุเปลี่ยนเฟสใช้ระยะเวลาในการลดลงของอุณหภูมิภาระโหลดโดยเฉลี่ยเท่ากับ 488 นาที เมื่อเปรียบเทียบกันพบว่าแบบมีวัสดุเปลี่ยนเฟสใช้ระยะเวลาในการลดลงของอุณหภูมิภาระโหลดมากกว่า 3 นาที คิดเป็น 0.61 %



รูปที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบเวลาการลดลงของอุณหภูมิภาระโหลด

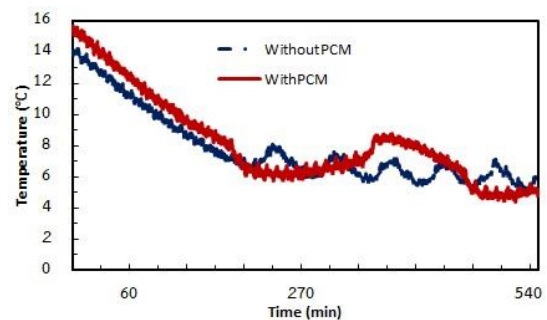
4.2 เปรียบเทียบผลการลดลงของอุณหภูมิภายในตู้แช่เย็น

จากรูปที่ 7 อุณหภูมิภายในตู้แช่เย็นแบบมีและไม่มีวัสดุเปลี่ยนเฟสในขณะที่อุณหภูมิของภาระโหลดโดยเฉลี่ยเท่ากับ 35 °C นั้นมีอุณหภูมิโดยเฉลี่ยเท่ากับ 15.5 °C และ 14 °C พิจารณาระยะเวลาในการลดลงของอุณหภูมิสุดท้ายตามที่กำหนดคือ 6 °C โดยแบบไม่มีวัสดุเปลี่ยนเฟสใช้ระยะเวลาในการลดลงของอุณหภูมิภายในตู้แช่เย็นโดยเฉลี่ยเท่ากับ 284 นาที และแบบมีวัสดุเปลี่ยนเฟสใช้ระยะเวลาในการลดลงของอุณหภูมิภายในตู้แช่เย็นโดยเฉลี่ยเท่ากับ 190 นาที เมื่อเปรียบเทียบกันพบว่าแบบมีวัสดุเปลี่ยนเฟสใช้ระยะเวลาในการลดลงของอุณหภูมิภายในตู้แช่เย็นน้อยกว่า 94 นาที คิดเป็น 33.09 %

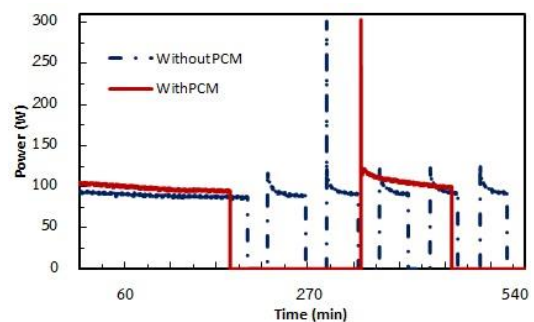
4.3 การเปรียบเทียบผลการใช้พลังงานและระยะเวลาการทำงานของคอมเพรสเซอร์

จากรูปที่ 8 การเปรียบเทียบระยะเวลาการทำงานของคอมเพรสเซอร์และการใช้พลังงานระหว่างตู้แช่เย็นแบบมีและไม่มีวัสดุเปลี่ยนเฟสมีอุณหภูมิของภาระโหลดเริ่มต้นการทดลองเท่ากันโดยเฉลี่ยเท่ากับ 35 °C พิจารณาระยะเวลาในการลดลงของอุณหภูมิสุดท้ายตามที่กำหนด

คือ 6 °C โดยแบบไม่มีวัสดุเปลี่ยนเฟสมีระยะเวลาในการทำงานและการหยุดของคอมเพรสเซอร์เท่ากับ 352 นาที และ 133 นาที ใช้พลังงานโดยเฉลี่ยเท่ากับ 67.131 W และในส่วนของตู้แช่เย็นแบบมีวัสดุเปลี่ยนเฟสมีระยะเวลาในการทำงานและการหยุดของคอมเพรสเซอร์เท่ากับ 264 นาที และ 224 นาที มีการใช้พลังงานโดยเฉลี่ยเท่ากับ 55.201 W เมื่อเปรียบเทียบกันพบว่าตู้แช่เย็นแบบมีวัสดุเปลี่ยนเฟสรวมกันสามารถลดระยะเวลาการทำงานของคอมเพรสเซอร์ลงได้เท่ากับ 88 นาที คิดเป็น 25.00 % และลดการใช้พลังงานลงได้เท่ากับ 11.930 W คิดเป็น 17.77 %



รูปที่ 7 แสดงการเปรียบเทียบเวลาการลดลงของอุณหภูมิภายในตู้แช่เย็น



รูปที่ 8 แสดงการเปรียบเทียบระยะเวลาการทำงานของคอมเพรสเซอร์และการใช้พลังงาน

5. สรุป

ผลการทดลองโดยวิธีการลดลง (Pull-down test) และเปรียบเทียบกันระหว่างตู้แช่เย็นแบบมีและไม่มีวัสดุเปลี่ยนเฟส มีอุณหภูมิของภาระโหลดเริ่มต้นการทดลอง

เท่ากัน โดยเฉลี่ยเท่ากับ 35 °C และพิจารณาระยะเวลาในการลดลงของอุณหภูมิสุดท้ายตามที่กำหนดคือ 6 °C พบว่าตู้แช่เย็นแบบมีวัสดุเปลี่ยนเฟสร่วมใช้ระยะเวลาในการลดลงของอุณหภูมิภาระโหลดมากกว่า 3 นาที คิดเป็น 0.61 % เป็นผลมาจากกระบวนการเปลี่ยนเฟสของวัสดุเปลี่ยนเฟสช่วงสุดท้ายที่มีอุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้นและคอมเพรสเซอร์ยังอยู่ในสถานะหยุดทำงานโดยใช้ระยะเวลาเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อยไม่ส่งผลกระทบต่อระบบการทำความเย็นและเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานการทดลองในส่วนของอุณหภูมิภายในตู้แช่เย็นใช้ระยะเวลาในการลดลงของอุณหภูมิน้อยกว่า 94 นาที คิดเป็น 33.09 % เนื่องมาจากมวลของอากาศน้อยกว่าไหลเวียนภายในตู้แช่เย็นทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการพาความร้อนระหว่างภาระโหลดกับอีวาพอเรเตอร์และมีอุณหภูมิเริ่มต้นที่ต่ำกว่าภาระโหลดที่เป็นน้ำโดยมีระยะเวลาการทำงานของคอมเพรสเซอร์ลดลงที่ 88 นาที คิดเป็น 25.00 % ส่งผลทำให้การใช้พลังงานลดลงตามไปด้วยที่ 11.930 W คิดเป็น 17.77 % เมื่อเปรียบเทียบกับตู้แช่เย็นแบบไม่มีวัสดุเปลี่ยนเฟส จากผลการทดลองและเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าการมีวัสดุเปลี่ยนเฟสร่วม นั้นส่งผลกระทบต่อระบบของการทำความเย็นโดยสอดคล้องกับงานวิจัยจากการทบทวนวรรณกรรมในเบื้องต้น

6 กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนส่งเสริมจากสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

7 เอกสารอ้างอิง

- [1] B. Gin, M.M. Farid and P.K. Bansal, “Effect of door opening and defrost cycle on a freezer with phase change panels,” *Energy Conversion and Management*, vol. 51, pp. 2698–2706, 2010.
- [2] S. B. Amara, O. Laguerre, M. C. Charrier-Mojtabi, B. Lartigue and D. Flick, “PIV

measurement of the flow field in a domestic refrigerator model: comparison with 3D simulations,” *Int. J. Refrig*, vol. 31, pp. 1328–1340, 2008.

- [3] H. Chuang, K. Wu, W. Weng and C. Lee, “Dynamic modulation of voltage excitation angle to optimize energy consumption of refrigerator,” *International journal of refrigeration*, vol. 81, pp. 151–162, 2017.
- [4] J.M. Belman, J. Navarro-Esbrí, D. Ginestar and V. Milian, “Steady state model of a variable speed vapor compression system using R134a as working fluid,” *Int J Energy Res*, vol. 34, no. 11, pp. 933–945, 2010.
- [5] P. S. Raveendran and S. J. Sekhar, “Performance studies on a domestic refrigerators retrofitted with building-integrated water-cooled condenser,” *Energy Build*, vol.134, pp.1-10, 2017.
- [6] A.C. Marques, G.F. Davies, G.G. Maidment, J.A. Evans and I.D. Wood, “Novel design and performance enhancement of domestic refrigerators with thermal storage,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 63, pp. 511-519, 2014.
- [7] M.M. Joybari, F. Haghighat, J. Moffat and P. Sra, “Heat and cold storage using phase change materials in domestic refrigeration systems: the state-of-the-art review,” *Energy Buildings*, vol.106, pp.111–24, 2015.
- [8] G. Sonnenrein, A. Elsner, E. Baumhögger, A. Morbach, K. Fieback and J. Vrabec. “Reducing the power consumption of household

- refrigerators through the integration of latent heat storage elements in wire- and- tube condensers,” *Int J Refrig*, vol. 51, pp. 154–60, 2015.
- [9] Z. Liu, D. Zhao, Q. Wang, Y. Chi and L. Zhang, “Performance study on air-cooled household refrigerator with cold storage phase change materials,” *Int J Refrig*, vol. 79, pp. 130–142, 2017.
- [10] C. Marques, G. Davies, G.G. Maidment, J.A. Evans and I.D. Wood, “Novel design and performance enhancement of domestic refrigerators with thermal storage,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 63, pp. 511-519, 2013.
- [11] R. Elarem, S. Mellouli, E. Abhilash and A. Jemni. “Performance analysis of a household refrigerator integrating a PCM heat Exchanger,” *Applied Thermal Engineering*, vol. 125, pp.1320–1333, 2017.
- [12] L. Abdolmaleki, S.M. Sadrameli and A. Pirvaram. “Application of environmental friendly and eutectic phase change materials for the efficiency enhancement of household freezers,” *Renewable Energy*, vol. 145, pp. 233-241, 2020.
- [13] A. Pirvaram, S.M. Sadrameli and L. Abdolmaleki. “Energy management of a household refrigerator using eutectic environmental friendly PCMs in a cascaded condition,” *Energy*, vol. 181, pp. 321-330, 2019.
- [14] B.O. Bolaji, A.O Akintaro, O. Alamu and T. Olayanju, “Design and Performance Evaluation of a Cooler Refrigerating System Working with Ozone Friendly Refrigerant,” *The Open Thermodynamics Journal*, vol. 6, pp. 25-32, 2012.
- [15] Y. Mona, S. Thiangchanta and C. Chaichana. “Electricity peak load reduction of a refrigerator using phase change material,” *Energy Reports*, vol. 8, pp. 48-53, 2022.
- [16] ISO, International Standard - 8187, Household Refrigerating Applications (Refrigerators/Freezers) Characteristics and Test Methods, 1991.
- [17] M.I.H. Khan, “Conventional refrigeration systems using phase change material: a review,” *Int. J. Air-Cond. Refrig*, vol. 24, no. 03, 1630007, 2016.
- [18] S. B. Riffat and X. Ma., “Improving the coefficient of performance of thermoelectric cooling systems: a review,” *Int. J. Energy Res*, vol. 28, no. 9, pp. 753–768, 2004.
- [19] I. N. Suamir, I. M. Rasta, Sudirman and K. M. Tsamos, “Development of corn-oil ester and water mixture phase change materials for food refrigeration applications”, *Procedia*, vol. 16, pp. 198-206, 2019.
- [20] O. G. Zarabad, R. Ahmadi. “Numerical investigation of different PCM volume on cold thermal energy storage system,” *Journal of Energy Storage*, vol. 17, pp. 515–524, 2018.

การเปลี่ยนผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติเป็นน้ำมันดิบชีวภาพ

โดยขบวนการไฮโดรเทอร์มัลลิกวิดิแฟคชัน

Conversion of Natural Rubber Product to Bio-Crude Oil

By Hydrothermal Liquefaction Process

วิลักษณ์นาม พลเจริญ กุลเชษฐ์ เพียรทอง*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

85 ถนนสถลมารค อ.วารินชำราบ จ.อุบลราชธานี 34190

Viluknam Phoncharoen Kulachet Pianthong*

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University,

85 Satholmark Road, Warin Chamrap District, Ubon Ratchathani 34190, Thailand

*Corresponding author Email: kulachate.p@ubu.ac.th

(Received: April 11, 2024; Revised: April 26, 2024 ; Accepted: May 10, 2024)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการเปลี่ยนผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติ ได้แก่ ยางแผ่นดิบ ยางก้อนถ้วย และน้ำยางพารา ไปเป็นน้ำมันดิบชีวภาพด้วยกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลลิกวิดิแฟคชัน โดยใช้อุณหภูมิของปฏิกิริยาในช่วง 350 °C และ 375 °C ทำละลายด้วยน้ำในอัตราส่วนมวลต่ออย่างพารา 2:1, 3:1 และ 4:1 ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา 60 นาที ผลการทดลองพบว่าได้ผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบชีวภาพสูงสุดเท่ากับ 71.40% จากการใช้อย่างแผ่นดิบเป็นวัตถุดิบ ส่วนผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบชีวภาพจากยางก้อนถ้วย และจากน้ำยางพาราได้ 70.03% และ 22.47% ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโตรสโคปีค่าพีการดูดซับแสงที่ $2,920\text{ cm}^{-1}$ แสดงถึงกลุ่มฟังก์ชันอัลเคน (C-H) มีความเข้มข้นค่อนข้างสูงซึ่งแสดงคุณสมบัติการเป็นเชื้อเพลิง การศึกษานี้แสดงถึงความเป็นไปได้ทางเทคนิคในการผลิตน้ำมันดิบชีวภาพ จากยางธรรมชาติในประเทศไทยด้วยขบวนการไฮโดรเทอร์มัลลิกวิดิแฟคชัน และอาจเป็นพลังงานทางเลือกในอนาคตที่ช่วยลดโลกร้อนและส่งเสริมการใช้ประโยชน์จากยางพาราได้อีกด้วย

คำสำคัญ: ไฮโดรเทอร์มัลลิกวิดิแฟคชัน น้ำมันดิบชีวภาพ ยางธรรมชาติ น้ำยางพารา

ABSTRACT

This research investigates the conversion yield of natural rubber product such as raw rubber sheets, cup lumps, and Para rubber latex to bio-crude oil by hydrothermal liquefaction process. The reaction temperatures are in the ranges of 350 °C and 375 °C. The materials are dissolved in water at H₂O/NR mass ratios of 2:1, 3:1, and 4:1. The reaction time was 60 minutes. Results show that the highest yields of bio-crude oil is 71.40% by using raw rubber sheets as raw material, while the bio-crude oil yield from using cup lumps, and Para rubber latex are 70.03% and 22.47% respectively. The Fourier Transform Infrared Spectrometer (FT-IR) analysis shows peak absorbance at $2,920\text{ cm}^{-1}$, indicating the intensity of the absorbance of the alkane functional group (C-H) which indicates fuel oil property. This

study shows the technical possibility of producing bio-crude oil from natural rubber in Thailand by using the hydrothermal liquefaction process. This might be the alternative energy in the future and support the beneficial of using Para rubber as well.

Keyword: Hydrothermal liquefaction, bio-crude oil, natural rubber, para rubber latex.

1. บทนำ

เชื้อเพลิงชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงชนิดหนึ่งที่มีศักยภาพและมีความสำคัญในการนำมาทดแทนการใช้เชื้อเพลิงที่มาจากปิโตรเลียม ซึ่งมีการใช้งานกันอย่างกว้างขวางทั้งในรูปแบบเชื้อเพลิงแข็ง เชื้อเพลิงเหลว หรือก๊าซ ที่มีการผลิตจากชีวมวล [1] ความสำคัญที่โดดเด่นของเชื้อเพลิงชีวภาพคือมีคุณสมบัติที่ส่งผลดีต่อสิ่งแวดล้อม และเป็นทางเลือกที่ยั่งยืนในการแทนที่เชื้อเพลิงที่มีการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (GHG) สูง [2], [3] ในปัจจุบันนักวิจัยได้มีการศึกษาเทคนิคหลายรูปแบบ นำมาใช้ในการเปลี่ยนแปลงชีวมวลให้เป็นเชื้อเพลิงเหลว ไพโรไลซิสก็เป็นกระบวนการย่อยสลายพันธะเคมี และเป็นเทคนิคหนึ่งที่ยินยมนำมาใช้ในการเปลี่ยนชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงเหลว ในการทำไพโรไลซิสนั้นจะใช้วิธีการให้ความร้อนกับวัตถุดิบชีวมวล ที่จำเป็นต้องทำให้แห้งก่อนเพื่อทำการเปลี่ยนผ่านได้โดยตรงเป็น ชินแก๊ส และเชื้อเพลิงเหลว [4]

เชื้อเพลิงชีวภาพส่วนใหญ่ในปัจจุบันมาจากเมล็ดพืช น้ำมัน เนื้อผลไม้ และมาจากน้ำมันที่สามารถใช้บริโภคได้ แหล่งน้ำมันเหล่านี้มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อความต้องการด้านโภชนาการของมนุษย์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งกับความต้องการอาหารที่เพิ่มขึ้นทั่วโลก [5] ที่ผ่านมามีการรณรงค์เรื่องเชื้อเพลิงชีวภาพจากแหล่งใหม่เพิ่มขึ้น งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการใช้แหล่งที่มาของวัตถุดิบที่ไม่สามารถบริโภคได้ในการผลิตเชื้อเพลิงชีวภาพ เช่น ยางพารา (*Hevea brasiliensis*) ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนแหล่งที่มาของวัตถุดิบได้ [6] ประเทศไทยเป็นหนึ่งในผู้ผลิตยางธรรมชาติ (Natural Rubber: NR) ชั้นนำของโลก โดยมีพื้นที่ปลูกยางพาราประมาณ 20 ล้านไร่ และมีผลิตภัณฑ์จากต้นยางพาราที่

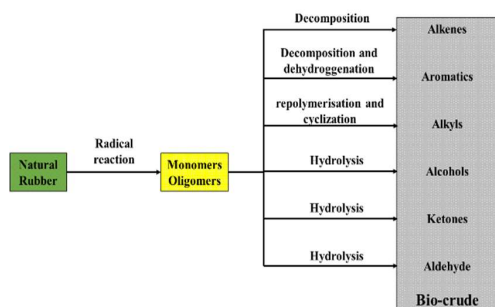
หลากหลาย เช่น น้ำยาง เมล็ดยาง ยางก้อน ยางแผ่น และลำต้นของยางพารา

กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลลิควิเดชัน (Hydrothermal Liquefaction: HTL) ที่สามารถเปลี่ยนชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงเหลว เป็นการศึกษาที่น่าสนใจ เพราะไม่ต้องทำวัตถุดิบให้แห้งก่อน มีการใช้อุณหภูมิทำงานที่ต่ำกว่ากระบวนการไพโรไลซิส เป็นกระบวนการทางเคมีโดยใช้ช่วงความดันสูง และอุณหภูมิในสภาพของน้ำที่สภาวะกึ่งวิกฤต (ใกล้ 374 °C และ 22 MPa) เพื่อทำลายและปรับปรุงโครงสร้างพอลิเมอร์ชีวภาพของชีวมวลเป็นของเหลว หรือที่เรียกต่อไปว่า น้ำมันดิบชีวภาพ (Bio-Crude Oil: BCO) สามารถผสมกับเชื้อเพลิงอื่นเพื่อการเผาไหม้หรือสามารถปรับปรุงเพิ่มเติมเพื่อให้เป็นเชื้อเพลิงของเหลวที่เทียบเท่ากับเชื้อเพลิงปิโตรเลียมได้ [7]

ยางธรรมชาติ (NR) ถือเป็นหนึ่งในวัสดุอินทรีย์ชีวภาพที่สำคัญ ซึ่งประกอบด้วยโพลีไอโซพรีนเป็นหลัก ในระหว่างกระบวนการทางเคมี พอลิเมอร์ และยางธรรมชาติจะถูกย่อยสลายผ่านกระบวนการแตกตัวของโมเลกุล นำไปสู่การสร้างโมเลกุลที่มีความไม่เสถียรซึ่งเมื่อถูกแยกออกจากกันและไปรวมกลุ่มกันใหม่ เกิดเป็นโมเลกุลใหม่ที่มีความเข้ากันได้ พร้อมกับการลดขนาดลง กระบวนการนี้ผ่านการเปลี่ยนแปลงทางเคมีทั้งการไฮโดรจีเนชันและพอลิเมอไรเซชัน จนได้สารประกอบใหม่ที่มีประโยชน์ในการผลิตน้ำมันดิบชีวภาพ [8], [9]

กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลลิควิเดชัน เริ่มต้นในเครื่องปฏิกรณ์จากการที่โมเลกุลในของเหลวละลาย และเริ่มต้นการเชื่อมโยงใหม่ในโพลีเมอร์ โดยโมโนเมอร์ถูกสร้างขึ้นผ่านกระบวนการเคมีที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมโยงในโครงสร้างโมเลกุล สารประกอบเหล่านี้จะผ่าน

กระบวนการอัลคิลเลชันสร้างสารประกอบที่มีในกลุ่มของอัลเคน และอัลคิลที่อุณหภูมิสูง ในขณะที่กระบวนการเตโชโตรเจนเนชันของสารประกอบอัลคีนนำไปสู่การเกิดไฮโดรคาร์บอน และสารประกอบอะโรมาติก นอกจากนี้ยังมีการสร้างกลุ่มฟังก์ชันอื่นๆ เช่น แอลกอฮอล์ คีโตน และอัลเดไฮด์ ผ่านกระบวนการไฮโดรไลซิส [10] ดังที่นำเสนอในรูปที่ 1 แสดงถึงกลไกของการย่อยสลายพันธะเคมียางธรรมชาติในการสร้างกลุ่มฟังก์ชันของน้ำมันดิบชีวภาพ



รูปที่ 1 กระบวนการของยางธรรมชาติเป็นน้ำมันดิบชีวภาพ

งานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการศึกษาเกี่ยวกับผลิตภัณฑ์จากต้นยางพารา เช่น การศึกษาการใช้เปลือกเมล็ดยางเป็นวัตถุดิบในการผลิตถ่าน [11] การสกัดไบโอดีเซลจากน้ำมันเมล็ดยางพาราซึ่งมีการศึกษาเป็นจำนวนมาก [12], [13] ที่ผ่านมานักวิจัยได้ใช้เศษยางรถยนต์ซึ่งส่วนใหญ่ผลิตจากยางธรรมชาติในกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลลิกวิดแฟคชันพบว่าค่าความร้อนของน้ำมันดิบชีวภาพที่ได้มีค่ามากกว่าการใช้วัตถุดิบจากชีวมวล และใกล้เคียงกับน้ำมันดีเซลจากปิโตรเลียม นอกจากนี้ยางธรรมชาติยังเป็นโพลีเมอร์อินทรีย์ที่มีสารประกอบของไอโซพรีน โพลีไอโซพรีน และสารประกอบอื่นๆ รวมถึงใช้น้ำเป็นตัวทำละลายในอัตราส่วนต่อวัตถุดิบยางธรรมชาติ 2:1, 3:1 และ 4:1 จะส่งเสริมให้มี นิวคลีโอไฟล์ (nucleophile) ซึ่งคือโมเลกุลหรือสารที่ขาดอิเล็กตรอน ดังนั้นจะมีแนวโน้มที่จะดึงดูดเพื่อทำพันธะกับโมเลกุลหรือสารที่มีอิเล็กตรอนเกิน (electrophiles) จึงเป็นที่น่าสนใจในการศึกษาการใช้

ผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติจากต้นยางพารา ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์มัลลิกวิดแฟคชัน [10], [14], [15] ในส่วนของน้ำยางพาราซึ่งเป็นของเหลวสีน้ำตาลที่ได้มาจากการกรีดลำต้น จากการศึกษาพบว่าน้ำยางพาราประกอบด้วยอนุภาคไฮโดรคาร์บอนประมาณ 25 ถึง 45% โดยน้ำหนักที่กระจายตัวอยู่ [16], [17] รวมทั้งยังก่อกวนด้วย ยางแผ่นดิบก็คือผลที่เกิดจากการแห้งตัวของน้ำยางสด ซึ่งถือว่ามีส่วนประกอบที่สำคัญในการเปลี่ยนผ่านเป็นเชื้อเพลิงชีวภาพได้ รวมถึงการวิจัยเกี่ยวกับไฮโดรเทอร์มัลลิกวิดแฟคชันของผลิตภัณฑ์จากยางพารายังมีอยู่น้อย ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวทางการศึกษาการใช้วัตถุดิบจากยางธรรมชาติ ซึ่งคือผลผลิตจากต้นยางพาราที่ปลูกได้ในประเทศ นำเข้าสู่การใช้เทคนิคไฮโดรเทอร์มัลลิกวิดแฟคชัน ด้วยสภาวะอุณหภูมิภายในถึงปฏิกรณ์ที่กำหนด เพื่อศึกษาผลลัพธ์ผลิตภัณฑ์ของการเปลี่ยนเป็นน้ำมันดิบชีวภาพโดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลายในอัตราส่วนโดยมวลที่ต่างกัน

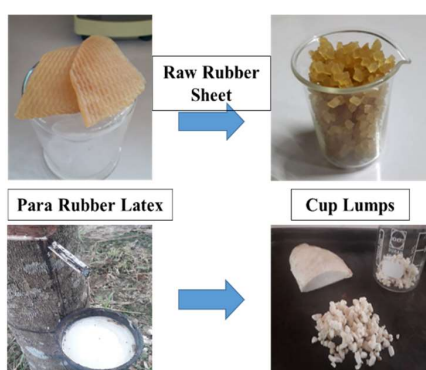
2. วิธีการดำเนินการวิจัย

2.1 วัตถุดิบ

วัตถุดิบในการทดลองมี 3 ชนิดได้แก่ น้ำยางพารา (Para rubber latex) ยางก้อนถ้วย (Cup lumps) และยางแผ่นดิบ (Raw rubber sheet) ที่ใช้ในการศึกษางานวิจัยนี้ นำมาจากตำบลโนนสมบูรณ์, อำเภอดงหลวง, จังหวัดอุบลราชธานี ต้นยางพาราของกลุ่มนี้เป็นสายพันธุ์ยางชนิด PRIM 600 ซึ่งเป็นสายพันธุ์หลังนิยมปลูกในประเทศไทย

น้ำยางพาราได้จากการกรีดยางในช่วงเช้ามืดให้ไหลมารวบรวมในถ้วย และทำการผสมสารแอมโมเนีย (0.30%) เล็กน้อยช่วยป้องกันการแข็งตัว ส่วนยางก้อนถ้วยได้จากน้ำยางพาราไหลลงสู่ถ้วยรองรับ รอให้แข็งตัวประมาณ 12-24 ชั่วโมง จากนั้นเก็บก้อนยางที่แข็งแล้วมาทำความสะอาด ในส่วนของยางแผ่นดิบมีขั้นตอนการเตรียมเริ่มจากกรองน้ำยางพาราให้สะอาดและผสมกับน้ำสะอาด ในอัตราส่วนน้ำยางพาราด่อน้ำสะอาด 3:2 ส่วน

จากนั้นผสมน้ำกรดฟอร์มิคที่เจือจาง (อัตราส่วนน้ำกรดต่อ น้ำ 1:40 ส่วน) เพื่อให้ น้ำยางพาราแข็งตัว กวนจนเนื้อยาง จับตัว และตักฟองอากาศออก เมื่อยางแข็งตัวดีแล้วจะ นำไปรีนน้ำและนวดบนแท่นให้บาง หลังจากนั้นนำเข้า เครื่องรีดเรียบ รีดดอกสุดท้ายล้างน้ำและผึ่งในที่ร่มจนแห้ง ทั้งยางแผ่นดิบ และยางก้อนถ้วยเมื่อแข็งตัวแล้วทำการตัด เป็นชิ้นเล็กขนาดประมาณ 3-5 mm ก่อนทำการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 วัตถุดิบในการทดลอง

2.2 อุปกรณ์การทดลอง

งานวิจัยนี้ได้ดำเนินการการใช้เทคนิคไฮโดรเทอร์มัลลิควิดแฟกชันในเครื่องปฏิกรณ์ที่ทำจาก Ni-alloy ชนิดไม่มีไบกวนวัตถุดิบ ขนาดความจุ 100 mL (รุ่น: CY-100x) ในตัวเครื่องมีขดลวดความร้อนขนาด 3 kW สามารถทำความร้อนในอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 10 °C/min เซ็นเซอร์วัดความดัน ซึ่งใช้สำหรับตรวจสอบความดันเกินที่แรงดันสูงสุด 15 MPa ถึงจะมีการปล่อยแรงดันออกด้วย เซฟตี้วาล์วเพื่อความปลอดภัย รายละเอียดของเครื่องปฏิกรณ์ และอุปกรณ์ประกอบที่เกี่ยวข้องแสดงในรูปที่ 3

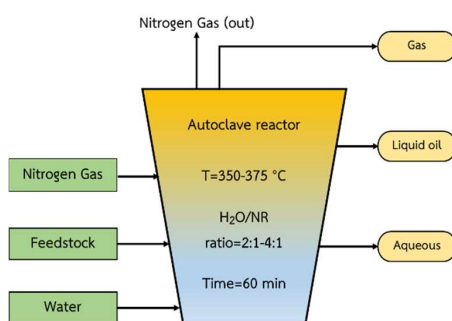
2.3 วิธีการทดลอง

ขั้นตอนการทดลองคือ นำน้ำยางพารา ยางก้อนถ้วย และยางแผ่นดิบจากการจัดเตรียมข้างต้นทำการชั่งน้ำหนัก เริ่มต้น ในการทดลองใช้ตัวทำละลายด้วยน้ำในอัตราส่วน ต่อวัตถุดิบยางพารา 2:1, 3:1 และ 4:1 โดยน้ำหนักดังนี้ น้ำยางพารา ตัวทำละลาย:วัตถุดิบ ที่อัตราส่วน 2:1 (20

g:10 g), 3:1 (30 g:10 g) และ 4:1 (40 g:10 g) ยางก้อน ถ้วย ตัวทำละลาย:วัตถุดิบ ที่อัตราส่วน 2:1 (10 g:5 g), 3:1 (15 g:5 g) และ 4:1 (20 g:5 g) ยางแผ่นดิบ ตัวทำละลาย:วัตถุดิบ ที่อัตราส่วน 2:1 (10 g:5 g), 3:1 (15 g:5 g) และ 4:1 (20 g:5 g) ขั้นตอนในการทดลองแต่ละเงื่อนไขคือ นำวัตถุดิบในการทดลองใส่ลงไปในถังปฏิกรณ์ จากนั้นทำการปิดถังปฏิกรณ์ และปล่อยก๊าซไนโตรเจน (N₂) ที่ความดัน 2 bar เพื่อไล่อากาศที่อยู่ภายในถัง ปฏิกรณ์ออกเป็นระยะเวลา 5 นาที จากนั้นปิดวาล์ว เปิด เครื่องเริ่มให้ความร้อนจนถึงอุณหภูมิภายในถังปฏิกรณ์ถึง อุณหภูมิที่กำหนดไว้ที่ 350 °C และ 375 °C และคง สภาวะการทำปฏิกิริยาตามระยะเวลาที่ 60 min ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 4



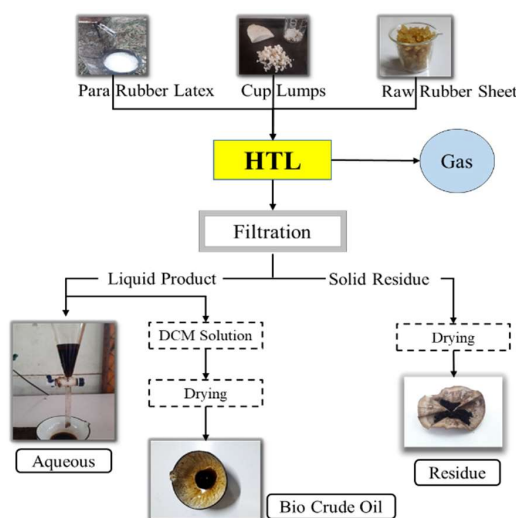
รูปที่ 3 เครื่องปฏิกรณ์ไฮโดรเทอร์มัลลิควิดแฟกชัน



รูปที่ 4 แสดงกระบวนการทดลอง

เมื่อเสร็จสิ้นกระบวนการจะทำการลดอุณหภูมิถึง
ปฏิกรณ์โดยการระบายความร้อนกับอากาศตามธรรมชาติ
ในระดับหนึ่ง และนำมาวางที่อ่างน้ำอุณหภูมิระดับห้อง
ทำการเปิดวาล์ว V2 เพื่อระบายแก๊สในระบบ และเปิดฝา
จากนั้นจึงนำของผสมที่ได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์
มัลลิคิตีฟิเคชันที่อยู่ภายในออกมาจากถังปฏิกรณ์

เพื่อแยกผลิตภัณฑ์ที่เป็นของแข็ง และของเหลว (น้ำ
และสารละลายอินทรีย์ที่สามารถละลายในน้ำได้) ให้
กลายเป็นของเหลวที่มีความหนืดต่ำด้วยการผสมกับได
โคลอมีเทน (Dichloromethane: DCM) ให้แยกจากกัน
ด้วยกระบวนการดังแสดงในรูปที่ 5 สำหรับในส่วนของแข็ง
และของเหลวผลิตภัณฑ์จะนำไปผ่านกระบวนการอบแห้ง
ที่อุณหภูมิ 105 °C เป็นเวลาไม่น้อยกว่า 12 ชั่วโมง และ
ในขั้นตอนสุดท้ายจะนำตัวอย่างทั้งหมดไปชั่งน้ำหนัก
พร้อมทั้งวิเคราะห์ผลต่อไป



รูปที่ 5 แสดงขั้นตอนกระบวนการแยกผลิตภัณฑ์

2.4 การวิเคราะห์ข้อมูล

วัตถุดิบจากยางธรรมชาติได้รับการวิเคราะห์คุณสมบัติ
ต่อไป การวิเคราะห์องค์ประกอบพื้นฐานของวัตถุดิบ ด้วย
เครื่องวิเคราะห์ CHNS/O รุ่น 2400 ได้แก่ วิเคราะห์
องค์ประกอบโดยประมาณ หรือ Proximate analysis

การวิเคราะห์แบบแยกธาตุของวัตถุดิบ หรือ Ultimate
analysis สำหรับการวิเคราะห์เบื้องต้นของวัตถุดิบ ปริมาณ
สารระเหย (Volatile matter) และความชื้น (Moisture
content) โดยใช้มาตรฐาน ASTM D3175 ปริมาณ
คาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) โดยใช้มาตรฐาน ASTM
D3172 ปริมาณเถ้า (Ash) โดยใช้มาตรฐาน ASTM D3174
และค่าความร้อนสูง (Higher Heating Value: HHV) โดยใช้
มาตรฐาน ASTM D240 โดยศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์
มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

ยางธรรมชาติได้รับการวิเคราะห์ Thermogravimetric
analysis (TGA) โดยใช้เครื่อง Rigaku Thermo Plus 2 TG-
DTA TG 8120 ได้ดำเนินการที่อัตราการเพิ่มความร้อน
10 °C/min กับตัวอย่างยางก้อนถ้วยน้ำหนัก 4.90 mg
และตัวอย่างยางแผ่นดิบน้ำหนัก 2.80 mg การวิเคราะห์ที่ได้
ดำเนินการในช่วงอุณหภูมิ 28 °C ถึง 800 °C ในบรรยากาศ
ที่ถูกปกคลุมด้วยไนโตรเจน อัตราการไหลของก๊าซไนโตรเจน
ที่ใช้ในการทดสอบคือ 20 mL/min

ในส่วนของเหลวผลิตภัณฑ์ที่ผ่านกระบวนการไฮโดรเทอร์
มัลลิคิตีฟิเคชันในเครื่องปฏิกรณ์แล้ว และขั้นตอนการ
แยกของแข็งจากตะกอนออกจากของเหลว ผ่านการอบ
ความร้อนแล้ว จะนำไปชั่งน้ำหนักเพื่อวิเคราะห์ผลลัพธ์ของ
น้ำมันดิบชีวภาพ ดังสมการที่ 1

$$\text{Bio - oil yield (\%)} = \frac{W_{\text{Bio - oil}}}{W_{\text{Biomass,db}}} \times 100\% \quad (1)$$

ของเหลวผลิตภัณฑ์ (bio crude oil) ถูกนำมาวิเคราะห์
ด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy
(FT-IR) เป็นเทคนิคที่ใช้ในการศึกษาหมู่ฟังก์ชันของโมเลกุล
วิเคราะห์หาโครงสร้างและองค์ประกอบของโมเลกุล โดย
อาศัยหลักการของการดูดกลืนคลื่นรังสีอินฟราเรด ซึ่ง
ลักษณะสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารแต่ละชนิดจะมี
คุณสมบัติเฉพาะ ทำให้ทราบลักษณะฟังก์ชันกรุปของ
โมเลกุลของตัวอย่างของเหลวผลิตภัณฑ์

3. ผลการทดลอง และการวิเคราะห์ผลการทดลอง

ในงานวิจัยนี้ศึกษาการใช้วัตถุดิบของยางพาราในประเทศไทยมีการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี ผ่านเทคนิคไฮโดรเทอร์มอลลิควิดแฟชันด้วยเครื่องปฏิกรณ์แรงดันสูงด้วยอุณหภูมิที่กำหนดไว้ที่ 350 °C และ 375 °C และคงสถานะการทำปฏิกิริยาตามระยะเวลาที่ 60 min เพื่อศึกษาผลผลิตน้ำมันดิบชีวภาพด้วยการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของน้ำมันดิบชีวภาพ และนำผลิตภัณฑ์ของเหลวไปวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันสารอินทรีย์ด้วยด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared Spectroscopy (FT-IR)

3.1 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติวัตถุดิบ

ในตารางที่ 1 แสดงผลวิเคราะห์องค์ประกอบโดยประมาณ หรือ Proximate analysis พบว่ายางก้อนถ้วย แผ่นยางดิบ มีปริมาณสารระเหย (Volatile matter) สูง 79.87% และ 98.83% ตามลำดับ บ่งบอกถึงค่าพลังงานต่อหน่วยน้ำหนักที่มาก เป็นเชื้อเพลิงมีประสิทธิภาพสูง ปริมาณคาร์บอนคงตัว (Fixed carbon) 0.01% และ 0.06% ตามลำดับ ปริมาณเถ้า (Ash) 0.38% และ 0.18% ตามลำดับ และความชื้น (Moisture content) 19.74% และ 0.93%

ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุของวัตถุดิบ หรือ Ultimate analysis พบว่ายางก้อนถ้วย และแผ่นยางดิบ มีปริมาณคาร์บอน (C) สูง 71.84% และ 85.46% ตามลำดับ ส่งผลให้มีความหนาแน่นพลังงานสูง ปริมาณไฮโดรเจน (H) 11.49% และ 10.92% ปริมาณไนโตรเจน (N) 0.13%, 0.37% ออกซิเจน (O) 16.37%, 3.22% และปริมาณซัลเฟอร์ (S) 0.17%, 0.03%

ในการศึกษานี้ทำการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของวัตถุดิบยางพารา โดยอาศัยคุณสมบัติเชิงอุณหภูมิจากความร้อน Thermogravimetric analysis (TGA) เป็นเทคนิคที่ใช้วิเคราะห์ความเสถียรของวัสดุเมื่อได้รับความร้อน โดยการวัดน้ำหนักของวัสดุที่เปลี่ยนแปลงในแต่ละช่วงอุณหภูมิด้วยเครื่องชั่งที่มีความไวสูงภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน การลดลงของมวลที่เกิดขึ้นใน

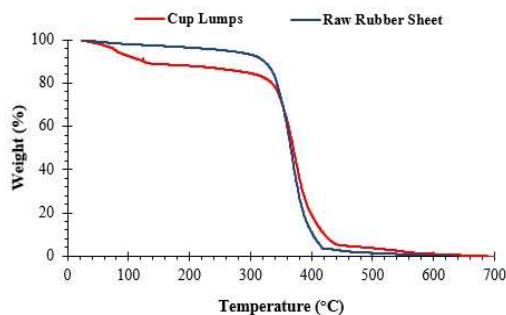
งานวิจัยนี้ เป็นผลมาจากการสลายตัวทางความร้อนและกระบวนการ devolatilization ของตัวอย่างวัตถุดิบ

ตารางที่ 1 ผลวิเคราะห์องค์ประกอบพื้นฐาน

Characteristic	Cup lumps	Raw rubber sheet
Proximate analysis (wt%)		
Volatile matter	79.87	98.83
Fixed carbon	0.01	0.06
Ash	0.38	0.18
Moisture	19.74	0.93
Ultimate analysis (wt%)		
Carbon	71.84	85.46
Hydrogen	11.49	10.92
Nitrogen	0.13	0.37
Oxygen**	16.37	3.22
Sulfur	0.17	0.03
* CHN: Application note No. 203-821-485 According to the LECO method., S: Application note No. 203-821-466 According to the LECO method. **Calculated by difference.		

ยางแผ่นดิบ (Raw rubber sheet) ได้จากการแยกในส่วนของเนื้อยางของน้ำยางพารา และยางก้อนถ้วย (Cup lumps) ที่ได้จากการแข็งตัวของน้ำยางพารา น้ำยางพารา (Para rubber latex) ทางผู้วิจัยถือได้ว่าเป็นวัตถุดิบที่มีความใกล้เคียงกัน (หากทำการแยกในส่วนของเนื้อยาง) และจากผลการศึกษาที่ผ่านมา น้ำยางพารามีส่วนที่เป็นเนื้อยาง 35% ส่วนที่ไม่ใช่ยาง 65% ซึ่งอยู่ในรูปของน้ำหรือที่เรียกว่าซีรัม (serum) ส่วนของลูตอยด์ และสารอื่นหรือที่เรียกว่า อนุภาคเฟรยวีสลิง (frey wysling) จากรูปที่ 6 แสดงเทอร์โมแกรมของตัวอย่าง พบว่าเกิดการเปลี่ยนแปลงของเทอร์โมแกรมมีเพียงขั้นตอนเดียว อยู่ในช่วงอุณหภูมิระหว่าง 350 °C ถึง 400 °C มีค่าเปอร์เซ็นต์น้ำหนักตัวอย่างสูญเสียมากกว่า 50-90% เป็น

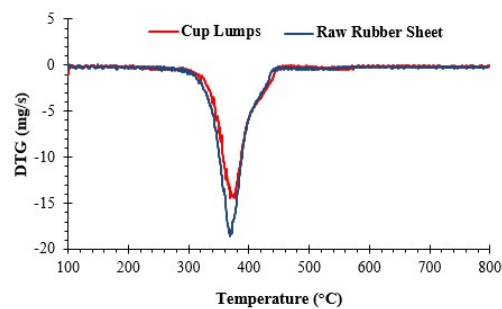
ที่มาของการเลือกช่วงอุณหภูมิที่กำหนดในการทำปฏิกิริยาของชุดปฏิกรณ์



รูปที่ 6 การสูญเสียน้ำหนักเชิงอุณหภูมิความร้อน

อีกผลการทดสอบที่ช่วยเพิ่มความถูกต้องแม่นยำในการตรวจวัด และให้ข้อมูลการวิเคราะห์ในแง่จลนพลศาสตร์ ณ อุณหภูมิต่างๆได้เป็นอย่างดี เทคนิคนี้เรียกว่า “เดริเวทีฟ เทอโมกราวิเมตริก อะนาไลซิส” (Derivative Thermogravimetric Analysis: DTG) ซึ่งคือการพล็อตกราฟอัตราการสูญเสียมวลเทียบกับเวลาเหมาะสำหรับการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงสภาพของวัสดุที่เกี่ยวข้องกับการดูดซับแก๊ส หรือการระเหยของน้ำ การตกผลึก (crystallization) อันเนื่องมาจากการเปลี่ยนแปลง การแตกตัวของวัสดุ (decomposition)

รูปที่ 7 แสดงเทอร์โมแกรมของตัวอย่าง ยางแผ่นดิบ (Raw rubber sheet) และยางก้อนถ้วย (Cup lumps) ที่ได้จากการแข็งตัวของน้ำยางพารา สามารถสังเกตได้ในจุดยอดของจากกราฟ DTG ซึ่งเป็นจุดที่มีอัตราการสูญเสียมวลมากที่สุด หรือเรียกได้ว่าเป็นจุดที่มีพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อน และกระบวนการ devolatilization จุดสูงสุดของแผ่นยางดิบ และยางก้อนถ้วยที่อุณหภูมิ 372.5.9 °C และ 381.7 °C และมีอัตราการลดลงของมวลอยู่ที่ -18.20 mg/s และ -14.5 mg/s ซึ่งในระหว่างกระบวนการปลดปล่อยสารระเหย ส่งผลแสดงเทอร์โมแกรมดังกล่าว

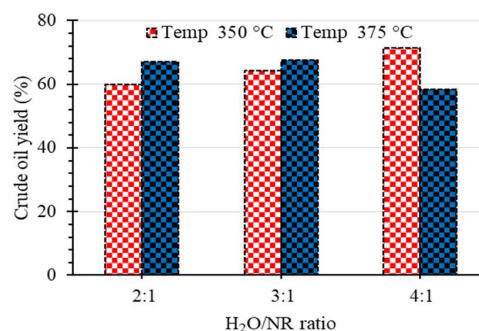


รูปที่ 7 อัตราการการสูญเสียมวล

3.2 ผลลัพธ์น้ำมันดิบชีวภาพ

จากการทำกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลลิควิดแฟคชันยางแผ่นดิบ ส่งผลให้มีความดันที่ในชุดปฏิกรณ์ 7, 8 และ 9 MPa ตามลำดับ อุณหภูมิและเวลาถูกกำหนดไว้ที่ 350 °C, 375 °C และ 60 min

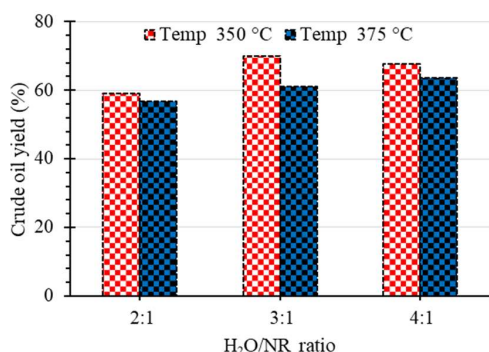
พบว่ามีการเพิ่มปริมาณน้ำมันดิบชีวภาพเป็นส่วนหนึ่งของน้ำที่เพิ่มขึ้นจาก 2:1, 3:1 และ 4:1 ตามลำดับ ในขณะที่ปริมาณผลลัพธ์น้ำมันดิบชีวภาพสูงสุดที่ 71.40% ด้วยอัตราส่วนมวลของ H₂O/NR ที่ 4:1 และ เวลา 60 min ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 ผลลัพธ์น้ำมันดิบชีวภาพจากแผ่นยางดิบ

กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลลิควิดแฟคชันของยางก้อนถ้วยในการศึกษานี้ ผลกระทบจากอัตราส่วนมวลของ H₂O/NR ที่อัตราส่วน 2:1, 3:1, และ 4:1 ด้วยความดันที่เกิดขึ้นในชุดปฏิกรณ์ 7, 8 และ 9 MPa ตามลำดับ อุณหภูมิและเวลาถูกกำหนดไว้ที่ 350 °C, 375 °C และ 60 min ตามลำดับพบว่ามีการเพิ่มปริมาณน้ำมันดิบ

ชีวภาพ เมื่อสัดส่วนของน้ำเพิ่มขึ้น ในขณะที่เดียวกัน ปริมาณผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบชีวภาพสูงสุดที่ได้มีค่าเท่ากับ 70.3% ด้วยอัตราส่วนมวลของ H_2O/NR 3:1 และเวลา 60 min ตามลำดับดังแสดงในรูปที่ 9

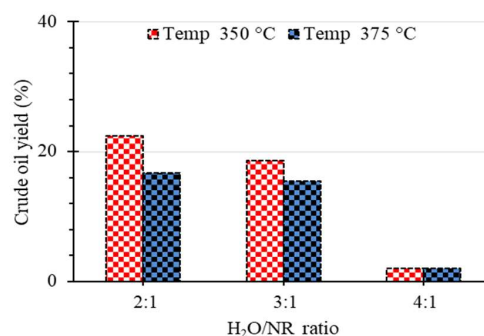


รูปที่ 9 ผลลัพธ์น้ำมันดิบชีวภาพจากยางก้อนถ้วย

การทดลองทั้งหมดอยู่ในช่วงความดัน และอุณหภูมิของน้ำที่สภาวะกึ่งวิกฤต แสดงให้เห็นว่าผลผลิตของผลิตภัณฑ์ที่เป็นของเหลวเพิ่มขึ้น ที่อุณหภูมิสูงกว่า 300 °C ในกระบวนการตีพอลิเมอร์ไฮดรอลิก หรือการสลายพอลิเมอร์เป็นผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยา หรือการสลายพอลิเมอร์สามารถทำปฏิกิริยาแปลงเป็นผลิตภัณฑ์อื่น สอดคล้องกับช่วงการสลายตัวทางความร้อน (TGA) สัดส่วนของน้ำที่มีอยู่ในกระบวนการสามารถมีพฤติกรรมเป็นนิวคลีโอไฟล์ได้ อัตราส่วน H_2O/NR เพิ่มขึ้นนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของความเข้มข้นของนิวคลีโอไฟล์ [18] ซึ่งจะเพิ่มความสามารถในการทำลายโครงสร้างของแกนหลักพอลิเมอร์ ทำให้เกิดการแตกตัวของโมเลกุลพอลิเมอร์และนำไปสู่ผลผลิตผลิตภัณฑ์ของเหลวที่สูงขึ้น

กระบวนการไฮโดรเทอร์มอลลิควิดแฟคชันของน้ำยางพารา ในการศึกษาที่น่าสนใจที่อัตราส่วนมวลของน้ำกับน้ำยางพารา (H_2O/NR) 2:1, 3:1 และ 4:1 ตามลำดับ อุณหภูมิระดับ 350 °C และ 375 °C ระยะเวลา 60 min รูปที่ 10 แสดงให้เห็นปริมาณผลลัพธ์สูงสุด 22.47% โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 350 °C อย่างไรก็ตามเมื่อเพิ่มอัตราส่วนมวลของน้ำที่มากขึ้นรวมกับน้ำยางพารา ส่งผล

กระทบที่สำคัญต่อความดันอยู่ในถังปฏิกรณ์ เนื่องจากอุณหภูมิและความดันสูงถึงขีดจำกัดสูงสุด (15 MPa) เซฟตี้วาล์วมีการปล่อยแรงดันออกด้วยเพื่อความปลอดภัย



รูปที่ 10 ผลลัพธ์น้ำมันดิบชีวภาพจากน้ำยาง

ดังนั้นการทดลองไม่สามารถดำเนินการในช่วงความดันสูงกว่านี้ได้จึงมีผลลัพธ์ที่หลงเหลือบางส่วน เมื่อนำไปแยกผลิตภัณฑ์ได้ปริมาณผลลัพธ์น้ำมันดิบชีวภาพ 2.2% ในส่วนการทดลองนี้ถือว่าไม่สมบูรณ์ เนื่องจากตัวอย่างการทดลองมีการรั่วไหลออกไปดังที่กล่าว

3.3 ผลวิเคราะห์คุณสมบัติน้ำมันดิบชีวภาพ

ผลการวิเคราะห์ธาตุของน้ำมันดิบชีวภาพที่ได้จากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลลิควิดแฟคชันวัตถุดิบของยางพาราดังแสดงในตารางที่ 2 ผลวิเคราะห์น้ำมันดิบชีวภาพมีปริมาณคาร์บอน และไฮโดรเจนสูง ตามลำดับคือ 85.10% และ 11.08% สำหรับยางแผ่นดิบ 84.51% และ 11.06% สำหรับยางก้อนถ้วย และ 82.72% และ 11.58% สำหรับน้ำยางพารา ปริมาณคาร์บอน และไฮโดรเจนที่สูงส่งผลต่อค่าพลังงานที่สูง ในขณะที่เดียวกันปริมาณออกซิเจนที่สูงมีผลต่อการลดค่าพลังงาน จากรายงานที่ผ่านมาผลปริมาณซิลเฟอร์ที่ต่ำทำให้คุณสมบัติของยางพาราเหมาะสม และน่าเชื่อถือสำหรับการอัพเกรดการผลิตน้ำมันดิบชีวภาพเป็นเชื้อเพลิงชนิดเหลวได้อย่างมีประสิทธิภาพ หากมีการได้รับการเข้าสู่กระบวนการทางปิโตรเลียมต่อไป [19] ค่า HHV ของผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบชีวภาพทั้ง 3 วัตถุดิบ อยู่ในช่วง 42.41–43.78 MJ/kg ค่า

ความร้อนสูงของผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบชีวภาพจากกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลลิควิดแฟคชันของวัตถุดิบจากยางพารา มีค่าใกล้เคียงกับน้ำมันดิบจากแหล่งปิโตรเลียม [20]

ตารางที่ 2 คุณสมบัติผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบชีวภาพ

Characteristic	Raw rubber sheet	Cup lumps	Para rubber latex
Elemental Analysis (wt%)			
Carbon	85.10	84.51	82.72
Hydrogen	11.08	11.06	11.58
Nitrogen	0.30	0.33	0.12
Sulfur	0.06	0.05	0.24
Oxygen**	3.46	4.05	5.30
HHV (MJ/kg)	43.78	43.51	42.41
* CHN: Application note No. 203-821-485 According to the LECO method., S: Application note No. 203-821-466 According to the LECO method. **Calculated by difference.			

3.4 ผลวิเคราะห์ FT-IR น้ำมันดิบชีวภาพ

การดูดซับแสง (Absorbance) คือการวัดที่ใช้วิธีการเทียบความทึบแสง (Spectrophotometry) กำหนดปริมาณพลังงานรังสีที่สารดูดซับในความยาวคลื่นแสงที่แตกต่างกันของการทดสอบด้วยเทคนิค FT-IR วิธีการนี้มีประสิทธิภาพสำหรับการกำหนดตัวตนของวัตถุดิบที่ไม่ทราบ เช่นเดียวกับการกำหนดความเข้มข้นของสารในตัวอย่าง โดยอ้างอิงค่าความยาวคลื่นแสงมาตรฐาน การเพิ่มขึ้นของค่าการดูดซับที่แสดงบนกราฟบ่งบอกถึงความเข้มข้นของสารที่ดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้น

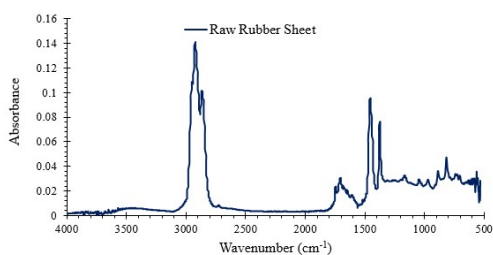
ผลการวิเคราะห์ FT-IR ของน้ำมันดิบชีวภาพแสดงกราฟสเปกตรัมดูดซับที่ส่งผ่านความถี่ของแสงอินฟราเรดผ่านตัวอย่างของน้ำมันดิบชีวภาพจากวัตถุดิบ 3 ชนิด ได้แก่ แผ่นยางดิบ ยางก้อนถ้วย และน้ำยางพารา ดังรูปที่

11-13 แสดงให้เห็นถึงลักษณะทางเคมีของสารตัวอย่างได้อย่างชัดเจน แกน Y ของกราฟแสดงการดูดซับของสาร แกน X แสดงค่าความยาวคลื่นของแสงที่ส่งผ่าน โดยเฉพาะในช่วงความยาวคลื่นที่สำคัญ พบว่ามีการดูดซับของกลุ่มฟังก์ชัน C-H ระหว่าง $2,710\text{ cm}^{-1}$ ถึง $3,040\text{ cm}^{-1}$ คือช่วงพันธะทางเคมีเดี่ยว (Single Bond) และช่วงสเปกตรัมลายนิ้วมือ (fingerprint region) คลื่นแสงต่ำกว่า $1,500\text{ cm}^{-1}$ ของพันธะเคมีอะโรมาติก โดยการวิเคราะห์ค่าการดูดซับ (Absorbance) เพิ่มขึ้นเมื่อความยาวคลื่นเพิ่มขึ้น และลดลงเมื่อความยาวคลื่นลดลง จุดพีคค่าการดูดซับเกิดขึ้นที่ $2,920\text{ cm}^{-1}$ เมื่อนำมาเปรียบเทียบกับตารางลักษณะฟังก์ชันกรุป (Characteristic IR Absorption Peaks) แสดงถึงความเข้มข้นของพันธะเคมีหมู่ฟังก์ชันอัลเคน (C-H) มีความสัมพันธ์กับความเข้มข้นการดูดกลืนแสง มีลักษณะการสั่นที่ยึดตัวแบบไม่สมมาตรระดับการสั่นสะเทือนปานกลางไปถึงระดับมาก (Vibration Asymmetrical Stretch m to s) ดังนั้นค่าการดูดกลืนแสงสูงสุดที่ความยาวคลื่นนี้ แสดงถึงความเข้มข้นค่อนข้างสูงในตัวอย่างน้ำมันดิบชีวภาพ ผลการวิเคราะห์ FT-IR ให้ข้อมูลเชิงลึกเกี่ยวกับองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันดิบชีวภาพที่สอดคล้องกัน แม้มาจากผลิตภัณฑ์ที่แตกต่างกันของยางธรรมชาติ

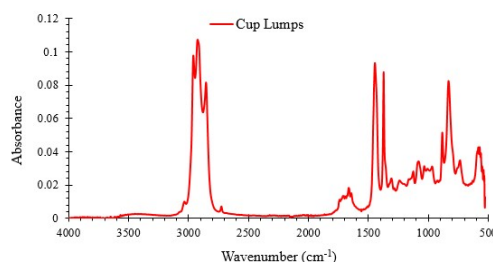
3.5 ต้นทุนการผลิตน้ำมันดิบชีวภาพ

ต้นทุนการผลิตน้ำมันดิบชีวภาพซึ่งในการศึกษานี้จะอยู่ในรูปของ Lab scale ของเครื่องปฏิกรณ์ที่มีขนาดความจุ 100 mL จะแบ่งเป็นค่าใช้จ่ายด้านพลังงาน และสารเคมีที่ใช้ในกระบวนการผลิต โดยเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตกับผลการทดลองที่ได้ปริมาณน้ำมันดิบชีวภาพสูงสุด ดังแสดงในตารางที่ 3 ผลลัพธ์น้ำมันดิบชีวภาพสูงสุดที่ 71.40% จากแผ่นยางดิบ ต้นทุนรวมเท่ากับ 28.99 บาท ผลลัพธ์ 70.03% จากยางก้อนถ้วย ต้นทุนรวมเท่ากับ 28.98 บาท ผลลัพธ์สูงสุด 22.47% จากน้ำยางพาราดิบ ต้นทุนรวมเท่ากับ 29.01 บาท การศึกษานี้เป็นการทดลองในห้องปฏิบัติการเพื่อทดสอบสภาวะที่เหมาะสมในทางเทคนิค ดังนั้นต้นทุนในการผลิตก็จะสูง

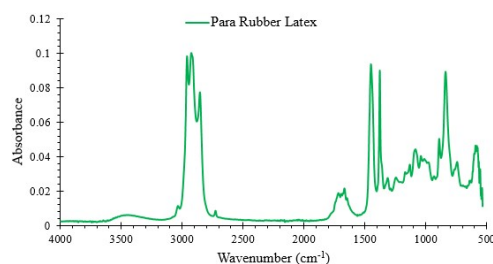
มาก นอกจากนี้ในอนาคตหากกระบวนการผลิตได้รับการพัฒนาเพิ่มเติมให้ผลิตแบบต่อเนื่อง และใช้ต้นทุนการผลิตที่ต่ำลง



รูปที่ 11 ผล FT-IR น้ำมันดิบชีวภาพจากแผ่นยางดิบ



รูปที่ 12 ผล FTIR น้ำมันดิบชีวภาพจากยางก้อนถ้วย



รูปที่ 13 ผล FTIR น้ำมันดิบชีวภาพจากน้ำยางพารา

4. สรุปผล

กระบวนการไฮโดรเทอร์มัลลิกวิดแฟคชันของผลิตภัณฑ์จากยางธรรมชาติทั้ง 3 ชนิด ภายในถังปฏิกรณ์ ถึงอุณหภูมิที่กำหนด และคงสภาวะการทำปฏิกิริยาตามระยะเวลาที่ 60 min สรุปผลการทดลองได้ดังนี้ ตารางที่ 3 ต้นทุนผลิตภัณฑ์น้ำมันดิบชีวภาพ

รายการ	Raw rubber sheet (5 g)	Cup lumps (5 g)	Para rubber latex (10 g)
ราคาพลังงานไฟฟ้า 1.5 kWh* (บาท)	6.27	6.27	6.27
ราคาสารเคมี 100 mL (บาท)	22.50	22.50	22.50
ราคาวัตถุดิบ**	0.22	0.21	0.24
ราคารวม: ผลลัพธ์สูงสุด (บาท)	28.99	28.98	29.01
BCO/g (บาท)	8.12	8.28	12.95
*อัตราค่าพลังงานไฟฟ้า 4.18 บาท/หน่วย			
** ราคาวัตถุดิบยางพารา 2566			

ผลวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงอุณหภูมิความร้อนของ ยางแผ่นดิบ และยางก้อนถ้วย ช่วงอุณหภูมิระหว่าง 350 °C ถึง 375 °C มีการสูญเสียน้ำหนักมากกว่า 50-90% ผลลัพธ์น้ำมันดิบชีวภาพสูงสุดที่ 71.40% ที่อัตราส่วนมวลของ H₂O/NR 4:1 จากยางแผ่นดิบ ผลลัพธ์ 70.03% ที่อัตราส่วนมวลของ H₂O/NR 3:1 จากยางก้อนถ้วย ผลลัพธ์สูงสุด 22.47% จากน้ำยางพารา อัตราส่วนมวลของ H₂O/NR 2:1 อุณหภูมิ 350 °C ระยะเวลา 60 min เมื่อพิจารณาความเหมาะสมในการนำมาผลิตเป็นน้ำมันดิบชีวภาพ ยางก้อนถ้วยถือว่าเหมาะสมมากที่สุด เนื่องจากผลลัพธ์น้ำมันดิบชีวภาพสูงในระดับ 70% และไม่ต้องมีการเตรียมวัตถุดิบให้แห้งก่อนสามารถใช้ได้จากยางก้อนที่แช่ในตัวในถ้วยรองของขั้นตอนการกรีดยาง

ผลการวิเคราะห์แบบแยกธาตุน้ำมันดิบชีวภาพมีปริมาณคาร์บอน และไฮโดรเจนสูง ปริมาณซัลเฟอร์ที่ต่ำ เหมาะสมกับการอัดเชื้อเพลิง ผลการวิเคราะห์ FT-IR พบว่าค่าการดูดซับ (Absorbance) จุดพิกัดเกิดขึ้นที่ 2,920 cm⁻¹ แสดงถึงความเข้มข้นของพันธะเคมี หมู่ฟังก์ชันอัลเคน (C-H) มีลักษณะการสั่นที่ยืดตัวแบบไม่สมมาตร จากการเทียบตารางลักษณะฟังก์ชันกรุป

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] M. F. Demirbas and M. Balat, "Recent advances on the production and utilization trends of bio-fuels: a global perspective," *Energy Conversion and Management*, vol. 47, no. 15–16, pp. 2371–2381, 2006.
- [2] S. Prasad, V. Venkatramanan, S. Kumar and K. R. Sheetal, "Biofuels: a clean technology for environment management," *Sustainable Green Technologies for Environmental Management*, pp. 219–240, 2019.
- [3] B. Şahin, S. Aslan, Z. Ceylan and S. Yolcular Karaoglu, "Sustainability and socioeconomic impacts of bioenergy," *Bioenergy Studies, Black Sea Agricultural Research Institute*, 2021.
- [4] R.A. Vigouroux, "Pyrolysis of biomass: rapid pyrolysis at high temperature: slow pyrolysis for active carbon preparation," 2001.
- [5] M. Ahmad, M.A. Khan, M. Zafar, M. and S. Sultana, "Biodiesel from non edible oil seeds: a renewable source of bioenergy," in *Economic Effects of Biofuel Production*, 2011.
- [6] M. Balat, "Potential alternatives to edible oils for biodiesel production – a review of current work," *Energy Conversion and Management*, vol. 52, no. 2, pp. 1479–1492, 2011.
- [7] A. Krutof and K. Hawboldt, "Blends of pyrolysis oil, petroleum, and other bio-based fuels: a review," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 59, pp. 406–419, 2016.
- [8] H. Li, J. Hu, Z. Zhang, H. Wang, F. Ping, C. Zheng, H. Zhang, Q. He, "Insight into the effect of hydrogenation on efficiency of hydrothermal liquefaction and physico-chemical properties of biocrude oil," *Bioresource Technology*, vol. 163, pp. 143–151, 2014.
- [9] F. Li, S. C. Srivatsa and S. Bhattacharya, "A review on catalytic pyrolysis of microalgae to high-quality bio-oil with low oxygenous and nitrogenous compounds," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 108, pp. 481–497, 2019.
- [10] N. Ahmad, F. Abnisa and W. M. A. Wan Daud, "Liquefaction of natural rubber to liquid fuels via hydrous pyrolysis," *Fuel*, vol. 218, pp. 227–235, 2018.
- [11] S.W. Murni and T.M. Setyoningrum, "The effect of pyrolysis temperature on charcoal briquettes from biomass waste," *LPPM UPN "Veteran" Yogyakarta Conference Series Proceeding on Engineering and Science Series (ESS)*, vol.1, no. 1, pp.453-460, 2020.
- [12] B. Sugebo, Z. Demrew, S. Feleke and M. Biazen, "Evaluation and characterization of rubber seed oil for biodiesel production," *Biomass Conversion and Biorefinery*, 2021.
- [13] H. Veny, M.A.A.A. Rani, F.H.A. Hamid, N. Aziz, R. A. Sazali and S.S. Idris, "Enzymatic transesterification of rubber seed oil using Immobilized pseudomonas cepacia lipase," *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 2266, no. 1, p. 012013, 2022.
- [14] N. Ahmad, S. A. S. Dayana, F. Abnisa and W. A. W. D. Mohd, "Natural rubber, a potential alternative source for the synthesis of renewable fuels via hydrous pyrolysis," *IOP*

Conference Series: Materials Science and Engineering, vol. 334, p. 012004, 2018.

- [15] T. Kan, V. Strezov and T. Evans, “Fuel production from pyrolysis of natural and synthetic rubbers,” *Fuel*, vol. 191, pp. 403–410, Mar. 2017.
- [16] D. Spanò, F. Pintus, C. Mascia, M. A. Scorciapino, M. Casu, G. Floris and R. Medda, “Extraction and characterization of a natural rubber from euphorbia characias latex,” *Biopolymers*, vol. 97, no. 8, pp. 589–594, 2012.
- [17] C. Bottier, “Biochemical composition of hevea brasiliensis latex: a focus on the protein, lipid, carbohydrate and mineral contents,” in *Latex, Laticifers and Their Molecular Components - From Functions to Possible Applications*, R. Nawrot, Ed., Elsevier, 2020, pp. 201–237.
- [18] D. T. Chen, C. A. Perman, M. E. Riechert and J. Hoven, “Depolymerization of tire and natural rubber using supercritical fluids,” *Journal of Hazardous Materials*, vol. 44, no. 1, pp. 53–60, Nov. 1995.
- [19] M. A. Hazrat, M. G. Rasul and M. M. K. Khan, “Lubricity improvement of the ultra-low sulfur diesel fuel with the biodiesel,” *Energy Procedia*, vol. 75, pp. 111–117, Aug. 2015.
- [20] N. Ahmad, F. Abnisa and W. M. A. W. Daud, “Potential use of natural rubber to produce liquid fuels using hydrous pyrolysis – a review,” *RSC Advances*, vol. 6, no. 73, pp. 68906–68921, 2016.

การเรียนรู้ของเครื่องเพื่อทำนายพฤติกรรมลูกค้าต่อผลิตภัณฑ์ธนาคาร Machine learning for Customer Behavior Prediction on Banking Product

ธีรินทร์ ฉายศิริโชติ¹ สุวรรณี อัสวกุลชัย^{2*}

¹ ภาควิชาวิศวกรรมอาหาร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ถนนฉลองกรุง แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพมหานคร 10520

² หลักสูตรวิศวกรรมคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีการเงิน คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย
126/1 ถนนวิภาวดีรังสิต แขวงรัชดาภิเษก เขตดินแดง กรุงเทพมหานคร 10400

Teerin Chysirichote¹ Suwannee Adsavakulchai²

¹ Department of Food Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology
Ladkrabang Chalongkrung Road, Ladkrabang Sub-district, Ladkrabang District, Bangkok 10520

² Computer Engineering and Financial Technology Program, School of Engineering,
University of the Thai Chamber of Commerce

126/1 Vibhavadi Rangsit Road, Ratchadaphisek Sub-district, Din Daeng District, Bangkok 10400

*Corresponding author email: suwannee_ads@utcc.ac.th

(Received: May 14, 2022; Revised: May 16, 2023 ; Accepted: May 13, 2024)

บทคัดย่อ

บทความนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาปัจจัยในการตัดสินใจเลือกผลิตภัณฑ์ธนาคาร จากการนำเสนอผลิตภัณฑ์ผ่านโทรศัพท์ และเพื่อพัฒนาแบบจำลองพฤติกรรมลูกค้าต่อผลิตภัณฑ์ธนาคารด้วยการเรียนรู้ของเครื่อง กรณีศึกษาธนาคารแห่งหนึ่งในประเทศโปรตุเกส ในการศึกษาครั้งนี้ ใช้กระบวนการวิเคราะห์ข้อมูลมาตรฐาน เรียกว่า Cross-Industry Standard Process (CRISP) ประกอบด้วย 6 ขั้นตอน ได้แก่ เข้าใจปัญหาของธุรกิจ เข้าใจข้อมูล เตรียมข้อมูล พัฒนาแบบจำลอง การประเมิน การนำไปใช้จริง ศึกษาจากข้อมูลลูกค้า 41,188 คนและปัจจัย 20 รายการ เตรียมและคัดเลือกข้อมูลให้สมบูรณ์ด้วยกระบวนการ extract-transform-load พัฒนาแบบจำลองด้วยการเรียนรู้ของเครื่อง ใช้โปรแกรม Knime เป็นเครื่องมือ เลือก 3 อัลกอริทึม ได้แก่ Decision tree, Random forest และ Tree ensemble ทดสอบประสิทธิภาพอัลกอริทึม ด้วย accuracy, sensitivity และ specificity เพื่อหาอัลกอริทึมที่ดีที่สุด ผลการศึกษาพบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจเลือกผลิตภัณฑ์ธนาคาร 3 อันดับแรก ได้แก่ ระยะเวลาที่ใช้ในการคุยโทรศัพท์กับลูกค้า จำนวนวันที่ผ่านไปหลังจากที่ลูกค้าได้รับการติดต่อครั้งสุดท้ายจากแคมเปญก่อนหน้านี้ และผลของแคมเปญการตลาดครั้งก่อน สำหรับแบบจำลองพฤติกรรมลูกค้าต่อตัดสินใจเลือกเงินฝากประจำด้วยการเรียนรู้ของเครื่อง พบว่า อัลกอริทึม Tree ensemble ให้ความถูกต้องในการพยากรณ์สูงสุด คิดเป็นร้อยละ 90.94 เมื่อเทียบกับอัลกอริทึม Decision tree และ Random forest ให้ความถูกต้องร้อยละ 87.54 และ 90.29 ตามลำดับ และแสดงผลข้อมูลด้วยภาพ โดยใช้ Power BI โดยสรุป ผลจากการศึกษาครั้งนี้เป็นประโยชน์ในการวางแผนการตลาด เพื่อเพิ่มจำนวนลูกค้าได้อย่างดี การศึกษาครั้งต่อไป การประยุกต์กับข้อมูลลูกค้าธนาคารในประเทศไทย

คำสำคัญ : การเรียนรู้ของเครื่อง ผลิตภัณฑ์ธนาคาร ต้นไม้การตัดสินใจ ป่าสุ่มแบบกลุ่ม กลุ่มต้นไม้การตัดสินใจ

ABSTRACT

This article aims to study the parameters for customer to make decision in bank product via telemarketing and to apply machine learning for customer behavior model of banking product. The technique in this study is the Cross-Industry Standard Process. There are 6 processes that are business understanding, data understanding, data preparation, model development, evaluation, and deployment. The data consisted of 41,188 customers and 20 parameters. To do the data preparation, feature selection i.e., data transfer, data reduction, data cleaning using Knime a tool. There are 3 algorithms for customer behavior model of banking product that are Decision tree, Random Forest and Tree ensemble. Algorithm performance testing by using accuracy, sensitivity, and specificity for the best algorithm. The results can demonstrate that the top three parameters impacting decision making are the length of time spent talking on the phone with customers, the number of days elapsed since the customer was last contacted from a previous campaign, and the results of previous marketing campaigns. The most accuracy algorithm for customer behavior prediction in bank product is Tree ensemble with accuracy 90.94% comparing with Decision tree and Random Forest tree with accuracy 87.54% and 90.29%, respectively. To do the data visualization using Power BI that is very beneficial for planning and leads to higher sales. On-going research, to apply this methodology with bank product marketing in Thailand.

Keywords: Machine learning, bank-marketing, decision tree, random Forest, tree ensemble.

1. บทนำ

ผลิตภัณฑ์ของธนาคาร ได้แก่ เงินฝาก การลงทุน ประกัน สินเชื่อและบัตรเครดิต สำหรับการตลาดทางโทรศัพท์ที่เหมาะสมสำหรับสินค้าที่เป็นที่รู้จัก เช่น บัตรเครดิต ประกันชีวิต สินเชื่อ เป็นต้น เพื่อนำเสนอผลิตภัณฑ์ของธนาคารได้อย่างเหมาะสมตรงกับความต้องการของลูกค้า การคัดกรองลูกค้าเป็นกระบวนการที่ธนาคารได้ดำเนินการในการได้มาผู้ซึ่งจะมาเป็นลูกค้า มักจะใช้วิธีการโทรศัพท์สุ่มไปยังกลุ่มลูกค้าเป้าหมาย เช่น บัตรเครดิตธนาคาร ก็ต้องหาคนที่มียาได้เกิน 15,000 บาท ขึ้นไป ซึ่งในการเลือกกลุ่มเป้าหมายที่จะโทรศัพท์ เพื่อไปนำเสนอผลิตภัณฑ์ สามารถสร้างรายได้เพิ่มตามที่ให้แก่ธนาคาร [1]

ปัจจัยที่มีผลต่อพฤติกรรมการตัดสินใจเลือกใช้บริการธนาคารพาณิชย์ ได้แก่ เพศ อายุ อาชีพ ชื่อเสียง ความน่าเชื่อถือ ความซื่อสัตย์ สภาพแวดล้อม เข้า

บริการสาขาใกล้บ้าน หรือที่ทำงานเป็นส่วนใหญ่ ช่องทางการจัดจำหน่าย กระบวนการให้บริการ และพนักงานของธนาคาร ความสุภาพอ่อนโยน ทั้งนี้ธนาคารต่างก็มุ่งหวังที่จะได้รับบริการที่ดีกับลูกค้า อย่างไรก็ตามการบริการต้องสอดคล้องกับความต้องการของลูกค้า ทำให้ลูกค้าเกิดความพึงพอใจสูงสุด [2,3]

ในยุคของข้อมูลข่าวสารผ่านสื่อออนไลน์ การวิเคราะห์พฤติกรรมและความต้องการของลูกค้า สามารถช่วยเจาะลงไปให้ลึกถึงระดับรสนิยม เพื่อสร้างสามารถเข้าถึงความต้องการของลูกค้า การใช้ข้อมูลจากลูกค้า ทำให้เกิดประโยชน์ในการบริการ สร้างความประทับใจ ไม่เพียงให้ลูกค้าใช้บริการซ้ำ แต่ต้องบอกต่อ รวมถึง สื่อสารให้ตรง กับกลุ่มเป้าหมาย ปัจจุบันเป็นยุคของลูกค้าเฉพาะคน (Customize) ตอบโจทย์เฉพาะบุคคลมากขึ้น [4,5]

Cross-Industry Standard Process for Data Mining (CRISP-DM) เป็นกระบวนการวิเคราะห์ข้อมูล

มาตรฐานสำหรับเหมืองข้อมูล ประกอบด้วย 6 ขั้นตอน ได้แก่ เข้าใจปัญหาของธุรกิจ เข้าใจข้อมูล เตรียมข้อมูล พัฒนาแบบจำลอง การประเมิน การนำไปใช้จริง [6,7]

อัลกอริทึมต้นไม้การตัดสินใจ (Decision Tree) เป็นเทคนิคการเรียนรู้เชิงตัวแบบ (Supervised Learning) ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลและสร้างโมเดลทำนายผลลัพธ์ ใช้จัดการข้อมูลเป็นกลุ่ม เช่น การจัดกลุ่มลูกค้าโดยคุณสมบัติต่างๆ หรือการแยกประเภทสิ่งของต่างๆ โดยมีข้อมูลคุณสมบัติของสิ่งของนั้นๆ เป็นตัวแปร input ในโมเดลต้นไม้การตัดสินใจ [8]

อัลกอริทึม random forest เป็นเทคนิคการเรียนรู้ใช้หลายๆ ต้นไม้การตัดสินใจในการทำนายผลลัพธ์ ใช้เทคนิคที่เรียกว่า "การสุ่มและการแบ่งข้อมูล" (random sampling and feature splitting) เพิ่มความแม่นยำของโมเดล โดยแต่ละต้นไม้ใน Random Forest จะมีความหลากหลายในการสร้างโมเดล และสร้างเสถียรภาพให้กับการทำนายผลลัพธ์ เมื่อผลลัพธ์จากแต่ละต้นไม้ถูกรวบรวมกัน จะทำให้ Random Forest มีความแม่นยำมากกว่า Decision Tree เดียว [9]

อัลกอริทึม Tree Ensemble เป็นเทคนิคการเรียนรู้เชิงตัวแบบ (Ensemble Learning) ที่ใช้หลายๆ โมเดลต้นไม้การตัดสินใจ หรือโมเดลประสาทเทียม เพื่อประมวลผลข้อมูล โดยการใช้หลายๆ โมเดลเพื่อทำนายผลลัพธ์จะช่วยลดความผิดพลาดในการทำนาย และเพิ่มความแม่นยำให้กับโมเดลที่สร้างขึ้น การรวมหลายๆ โมเดลเข้าด้วยกันยังช่วยลดโอกาสการเกิด overfitting ที่อาจเกิดขึ้นในโมเดลเดี่ยวๆ [10]

สำหรับการศึกษาในครั้งนี้ มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาปัจจัยในการตัดสินใจเลือกผลิตภัณฑ์ธนาคาร และเพื่อพัฒนาแบบจำลองพฤติกรรมลูกค้าต่อผลิตภัณฑ์ธนาคารด้วยการเรียนรู้ของเครื่อง

2. วิธีการศึกษา

กระบวนการวิเคราะห์ข้อมูลมาตรฐาน CRISP [8] เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยในการตัดสินใจเลือกผลิตภัณฑ์

ธนาคาร และพฤติกรรมลูกค้าต่อผลิตภัณฑ์ธนาคารด้วยการเรียนรู้ของเครื่อง มี 6 ขั้นตอน ได้แก่

2.1 การทำความเข้าใจปัญหาของธุรกิจ

การทำความเข้าใจถึงปัจจัยในการตัดสินใจเลือกผลิตภัณฑ์ธนาคาร และพฤติกรรมลูกค้าต่อผลิตภัณฑ์ธนาคาร เพื่อนำมาวิเคราะห์ข้อมูลด้วยการเรียนรู้ของเครื่อง และสามารถระบุโอกาสในการจัดรายการส่งเสริมการขายให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสม

2.2 การทำความเข้าใจข้อมูล

ศึกษารายละเอียดข้อมูล จาก <http://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Bank+Marketing> ประกอบด้วยข้อมูลลูกค้า 41,188 คนและปัจจัย 20 รายการ ทำการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล และรายละเอียดเพียงพอต่อการนำไปใช้ในการวิเคราะห์ด้วยการเรียนรู้ของเครื่อง

2.3 การเตรียมข้อมูล

หลังจากรวบรวมข้อมูล ในขั้นตอนนี้จะต้องมีการจัดเตรียมข้อมูลและคัดเลือกข้อมูลให้เป็นไปตามมาตรฐานเดียวกัน และคัดเลือกข้อมูลที่มีความถูกต้องสมบูรณ์มากที่สุด เพื่อให้ได้ผลการทดสอบที่มีประสิทธิภาพสูงสุด ขั้นตอนที่ใช้เวลานานที่สุด ถ้าข้อมูลที่ใช้ยังไม่ถูกต้อง มีผิดพลาด ทำให้ผลลัพธ์คลาดเคลื่อนได้ การเตรียมข้อมูลแบ่งเป็น 3 ขั้นตอนย่อยดังนี้

1) การคัดเลือกข้อมูล (Data Selection) กำหนดเป้าหมายที่ทำการวิเคราะห์พฤติกรรมลูกค้าต่อผลิตภัณฑ์ธนาคาร เลือกใช้เฉพาะข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับสิ่งที่จะวิเคราะห์ การกำหนดคุณลักษณะ และค่าที่เป็นไปได้ของคุณลักษณะ ศึกษาโครงสร้างของฐานข้อมูล และการจัดเตรียมข้อมูล คุณลักษณะที่คาดว่าจะนำมาใช้งาน เพื่อใช้ในการหาความรู้ และได้มีการกำหนดค่าที่เป็นไปได้ของคุณลักษณะ

2) การกลั่นกรองข้อมูล (Data Cleaning) ในการศึกษาครั้งนี้ พบข้อมูลที่ไม่ถูกต้อง เนื่องมาจากปัญหาในระหว่างการจัดเก็บข้อมูล เช่น กรอกข้อมูลไม่ครบ กรอกข้อมูลซ้ำซ้อน การกลั่นกรองข้อมูล การทำความสะอาดข้อมูลก่อน ลดขนาดข้อมูล

3) การแปลงรูปข้อมูล (Data Transformation) ขั้นตอนการเตรียมข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบที่พร้อมนำไปใช้ในการวิเคราะห์ตามอัลกอริทึมของเหมืองข้อมูลที่เลือกใช้

2.4 การพัฒนาแบบจำลอง

แบบจำลองใช้ในการทำนาย ในการศึกษาค้นคว้านี้เลือกใช้ Decision tree, Random forest และ Tree ensemble ทั้งนี้เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด เมื่อทำขั้นตอนนี้แล้ว อาจมีการย้อนกลับไปทำขั้นตอน data preparation เพื่อแปลงข้อมูลบางส่วนให้เหมาะสมกับแต่ละเทคนิคด้วย นอกจากนี้ยังมีการประเมินแบบจำลองวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้ ในรูปแบบความถูกต้องของแบบจำลอง เพื่อเป็นตัวบ่งชี้ความน่าเชื่อถือของแบบจำลองที่ได้

2.5 การประเมินประสิทธิภาพอัลกอริทึม

ขั้นตอนนี้เป็นการประเมินประสิทธิภาพของผลลัพธ์จากแบบจำลอง โดยนำผลลัพธ์ที่ได้มาวิเคราะห์ความถูกต้องจากข้อมูลที่นำมาทดสอบ ต้องอาศัยทักษะในการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อช่วยให้การวิเคราะห์ทำได้สะดวกและรวดเร็วขึ้น

2.6 การถ่ายทอดเพื่อนำไปปฏิบัติ

เป็นแนวทางไปใช้กับการวิเคราะห์พฤติกรรมลูกค้าต่อผลิตภัณฑ์ธนาคาร และจัดรายการส่งเสริมการขาย จึงมีการใช้เครื่องมือทำงานด้านกราฟิก เช่น การแสดงผลการวิเคราะห์ด้วยกราฟ รายงานรูปแบบต่างๆ เป็นต้น

3. ผลการศึกษา

3.1 ผลการทำความเข้าใจปัญหาของธุรกิจ

ข้อมูลนี้เกี่ยวข้องกับแคมเปญการตลาดผ่านโทรศัพท์ของธนาคารแห่งหนึ่งในประเทศโปรตุเกส แคมเปญการตลาดขึ้นอยู่กับการโทรศัพท์บ่อยครั้ง จำเป็นต้องมีการติดต่อกับลูกค้ารายเดียวกันมากกว่าหนึ่งครั้ง เพื่อเข้าถึงผลิตภัณฑ์เงินฝากประจำของธนาคาร

3.2 ผลการทำความเข้าใจข้อมูล

ใช้ข้อมูล open data จาก <http://archive.ics.uci.edu/ml/datasets/Bank+Marketing> มีการจัดหมวดหมู่ลูกค้าสมัครเงินฝากประจำ มี 4 ชุดข้อมูล ได้แก่

1) ไฟล์ bank-additional-full.csv ประกอบด้วยตัวอย่างทั้งหมด 41,188 รายการ และมีปัจจัยจำนวน 20 รายการ เป็นข้อมูลตั้งแต่เดือนพฤษภาคม 2551 ถึงพฤศจิกายน 2553

2) ไฟล์ bank-additional.csv ประกอบด้วยข้อมูลที่สุ่มเลือกจากไฟล์ในข้อ 1) จำนวนร้อยละ 10 ของตัวอย่างทั้งหมดในข้อ 1) มีจำนวน 4,119 รายการ และมีปัจจัยจำนวน 20 รายการ

3) ไฟล์ bank-full.csv ประกอบด้วยตัวอย่างทั้งหมด และมีปัจจัยจำนวน 17 รายการ จัดเรียงตามวันที่ (ชุด) ข้อมูลนี้เป็นข้อมูลชุดเก่าและมีปัจจัยน้อยกว่า(

4) ไฟล์ bank.csv ประกอบด้วยข้อมูลที่สุ่มเลือกจากไฟล์ในข้อ 3) จำนวนร้อยละ 10 ของตัวอย่างทั้งหมดในข้อ 3) มีและมีปัจจัยจำนวน 17 รายการ ชุดข้อมูลนี้เป็นข้อมูลชุดเก่าและมีปัจจัยน้อยกว่า(

ทั้งนี้ในการศึกษาค้นคว้านี้ เลือกใช้ข้อมูลชุดที่ 1 เท่านั้น

3.3 ผลการเตรียมข้อมูล

จากการสกัดข้อมูลจากลูกค้ากับการตัดสินใจเลือกผลิตภัณฑ์ธนาคาร เพื่อเข้าสู่กระบวนการเตรียมข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบที่พร้อมจะวิเคราะห์ต่อไป ศึกษาปัจจัยทั้งหมด 20 รายการ แสดงในตารางที่ 1

การเตรียมข้อมูลด้วยการลบข้อมูลซ้ำซ้อน แก้ไขข้อมูลผิดพลาด เช่น ข้อมูลที่ผิดรูปแบบ ข้อมูลที่หายไป ข้อมูล Outlier ที่แปลกแยกจากคนอื่นผิดปกติค่อนข้างมาก เป็นต้น แสดงในตารางที่ 2

3.4 ผลการพัฒนาแบบจำลอง

นำข้อมูลจาก 3.3 มาทำการพัฒนาแบบจำลองวิเคราะห์หาความสัมพันธ์ และอัลกอริทึมพยากรณ์พฤติกรรมลูกค้าต่อผลิตภัณฑ์ธนาคาร ได้แก่ Decision tree, Random forest และ Tree ensemble โดยใช้ Knime เป็นเครื่องมือ แสดงในรูปที่ 1-3 และเปรียบเทียบความถูกต้องของอัลกอริทึมทั้ง 3 แสดงในตารางที่ 3

3.5 ผลการประเมินประสิทธิภาพอัลกอริทึม

จากตารางที่ 3 อัลกอริทึม Tree ensemble ให้ค่าความถูกต้องในการพยากรณ์สูงสุด จึงนำมาทดสอบประสิทธิภาพอัลกอริทึม ด้วยการแบ่ง partition ข้อมูล

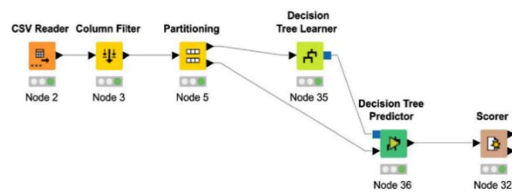
90% สำหรับ model creation และ 10% สำหรับ partitioning 70:30 แสดงในรูปที่ 4 และสรุปผลในตารางที่ 4

ตารางที่ 1 ปัจจัยของลูกค้านำมาใช้ในการตัดสินใจเลือกผลิตภัณฑ์ธนาคาร

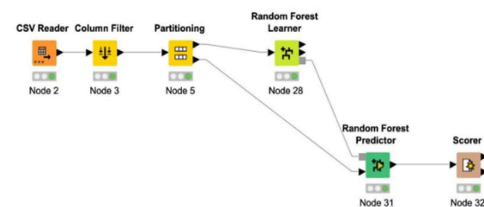
1. age	2. duration
3. job	4. campaign
5. marital	6. pdays
7. education	8. previous
9. default	10. poutcome
11. balance	12. employment variation rate
13. housing	14. consumer price index
15. loan	16. consumer confidence index
17. contact	18. euribor3m
19. day_of_week	20. number of employees

ตารางที่ 2 ผลการกลั่นกรองข้อมูล (Data Cleaning)

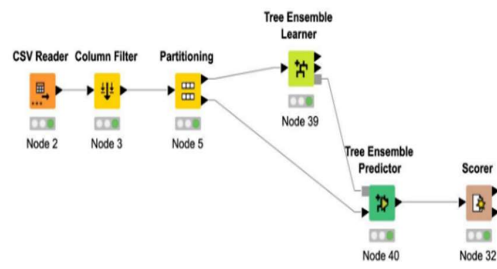
age	job	marital	education	default	housing	loan	contact	month	day_of_week	duration	campaign	pdays	previous	poutcome	emp.var.rate	cons.price.idx	cons.conf.idx	euribor3m	nr.employed	y
41	technician	married	professional.course	no	yes	no	cellular	nov	mon	185	2	999	0	nonexistent	-1.1	94.767	-50.8	1.039	4963.6	no
31	housemaid	single	university.degree	no	no	no	telephone	nov	mon	152	5	999	0	nonexistent	-1.1	94.767	-50.8	1.039	4963.6	no
41	technician	married	professional.course	no	yes	no	cellular	nov	mon	545	2	999	0	nonexistent	-1.1	94.767	-50.8	1.039	4963.6	yes
31	housemaid	single	university.degree	no	no	no	cellular	nov	mon	159	4	999	0	nonexistent	-1.1	94.767	-50.8	1.039	4963.6	no
35	technician	divorced	basic.4y	no	no	no	cellular	nov	tue	363	1	999	0	nonexistent	-1.1	94.767	-50.8	1.035	4963.6	yes
35	technician	divorced	basic.4y	no	yes	no	cellular	nov	tue	514	1	9	4	success	-1.1	94.767	-50.8	1.035	4963.6	yes
33	admin.	married	university.degree	no	no	no	cellular	nov	tue	843	1	999	0	nonexistent	-1.1	94.767	-50.8	1.035	4963.6	yes
33	admin.	married	university.degree	no	yes	no	cellular	nov	tue	510	1	999	1	failure	-1.1	94.767	-50.8	1.035	4963.6	no
60	blue-collar	married	basic.4y	no	yes	no	cellular	nov	tue	347	2	4	1	success	-1.1	94.767	-50.8	1.035	4963.6	no
35	technician	divorced	basic.4y	no	yes	no	cellular	nov	tue	385	3	4	2	success	-1.1	94.767	-50.8	1.035	4963.6	yes
54	admin.	married	professional.course	no	no	no	cellular	nov	tue	1868	2	10	1	success	-1.1	94.767	-50.8	1.025	4963.6	yes
38	housemaid	divorced	university.degree	no	no	no	cellular	nov	wed	403	2	999	0	nonexistent	-1.1	94.767	-50.8	1.03	4963.6	yes
32	admin.	married	university.degree	no	no	no	telephone	nov	wed	651	1	999	1	failure	-1.1	94.767	-50.8	1.03	4963.6	yes
32	admin.	married	university.degree	no	yes	no	cellular	nov	wed	236	3	999	0	nonexistent	-1.1	94.767	-50.8	1.03	4963.6	no
38	entrepreneur	married	university.degree	no	no	no	cellular	nov	wed	144	2	999	0	nonexistent	-1.1	94.767	-50.8	1.03	4963.6	no
62	services	married	high.school	no	yes	no	cellular	nov	wed	154	5	999	0	nonexistent	-1.1	94.767	-50.8	1.03	4963.6	no
40	management	divorced	university.degree	no	yes	no	cellular	nov	wed	293	2	999	4	failure	-1.1	94.767	-50.8	1.03	4963.6	no
33	student	married	professional.course	no	yes	no	telephone	nov	thu	112	1	999	0	nonexistent	-1.1	94.767	-50.8	1.031	4963.6	yes
31	admin.	single	university.degree	no	yes	no	cellular	nov	thu	353	1	999	0	nonexistent	-1.1	94.767	-50.8	1.031	4963.6	yes
62	retired	married	university.degree	no	yes	no	cellular	nov	thu	329	1	999	2	failure	-1.1	94.767	-50.8	1.031	4963.6	yes
62	retired	married	university.degree	no	yes	no	cellular	nov	thu	208	1	1	6	success	-1.1	94.767	-50.8	1.031	4963.6	yes
34	student	single	unknown	no	yes	no	cellular	nov	thu	180	1	999	2	failure	-1.1	94.767	-50.8	1.031	4963.6	no
38	housemaid	divorced	high.school	no	yes	yes	cellular	nov	thu	360	1	999	0	nonexistent	-1.1	94.767	-50.8	1.031	4963.6	no
57	retired	married	professional.course	no	yes	no	cellular	nov	thu	124	6	999	0	nonexistent	-1.1	94.767	-50.8	1.031	4963.6	no
62	retired	married	university.degree	no	no	no	cellular	nov	thu	483	2	6	3	success	-1.1	94.767	-50.8	1.031	4963.6	yes



รูปที่ 1 ผลการใช้อัลกอริทึม Decision tree กับ
พฤติกรรมลูกค้าต่อผลิตภัณฑ์ธนาคาร



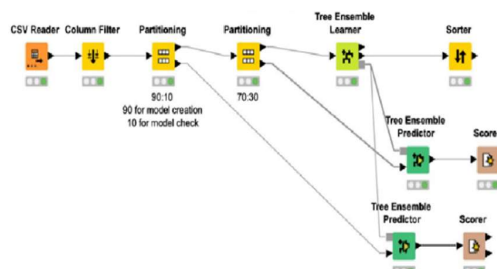
รูปที่ 2 ผลการใช้อัลกอริทึม Random forest กับ
พฤติกรรมลูกค้าต่อผลิตภัณฑ์ธนาคาร



รูปที่ 3 ผลการใช้อัลกอริทึม Tree ensemble กับ
พฤติกรรมลูกค้าต่อผลิตภัณฑ์ธนาคาร

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบความถูกต้องของอัลกอริทึมทั้ง 3

	Decision tree	Random forest	Tree ensemble
Accuracy (%)	87.54	90.29	90.94
Sensitivity (%)	92.71	91.72	92.34
Specificity (%)	46.14	65.23	68.44



รูปที่ 4 ผลการประเมินประสิทธิภาพอัลกอริทึม Tree
ensemble กับพฤติกรรมลูกค้าต่อผลิตภัณฑ์ธนาคาร

ตารางที่ 4 ผลการประเมินประสิทธิภาพอัลกอริทึม

	Tree ensemble	Tree ensemble + 10% data for testing
Accuracy (%)	90.94	91.23
Sensitivity (%)	92.34	92.71
Specificity (%)	68.44	71.42

จากรูปที่ 4 และตารางที่ 4 แสดงให้เห็นผลการ
ประเมินทดสอบประสิทธิภาพอัลกอริทึม Tree
ensemble ที่ให้ค่าความถูกต้องที่ร้อยละ 91.23

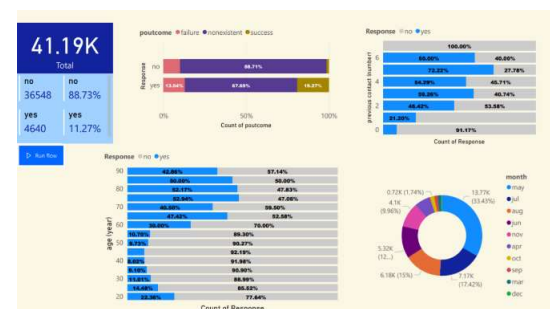
สำหรับปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจเลือกผลิตภัณฑ์
ธนาคาร เมื่อทำการจัดเรียงปัจจัย (sorter) พบว่า ปัจจัย
ที่มีผลต่อการตัดสินใจเลือกผลิตภัณฑ์ธนาคาร 3 อันดับ
แรก ได้แก่ ระยะเวลาที่ใช้ในการคุยโทรศัพท์กับลูกค้า
(duration) จำนวนวันที่ผ่านไปหลังจากที่ลูกค้าได้รับการ
ติดต่อครั้งสุดท้ายจากแคมเปญก่อนหน้านี้ (pdays) และผล
ของแคมเปญการตลาดครั้งก่อน (poutcome) แสดงใน
ตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจเลือกผลิตภัณฑ์
ธนาคาร

Row ID	#splits ...	#splits ...	#splits ...	#candi...	#candi...	#candi...
duration	42	74	131	42	79	148
pdays	30	42	91	37	67	184
poutcome	28	50	65	43	88	176
previous	26	29	49	41	75	161
month	17	56	110	32	87	176
age	15	38	62	33	88	137
contact	13	25	46	40	76	164
job	11	31	54	38	81	153
default	6	8	34	40	73	170
education	4	16	34	51	86	157

3.6 ผลการถ่ายทอดเพื่อนำไปปฏิบัติ

จากอัลกอริทึมในการพยากรณ์พฤติกรรมลูกค้าต่อ
ผลิตภัณฑ์ธนาคาร ไปสู่การถ่ายทอดเพื่อนำไปปฏิบัติ
ด้วยการนำมาแสดงผลข้อมูลด้วยภาพ (data
visualization) โดยใช้ (Power BI) แสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ผลการทำ data visualization ด้วย Power BI

จากภาพที่ 5 การนำเสนอภาพพฤติกรรมลูกค้าต่อ
ผลิตภัณฑ์ธนาคาร ช่วยสนับสนุนการตัดสินใจได้ดีกว่า

ข้อมูลที่อยู่ในรูปของตาราง เนื่องจากภาพสามารถแสดง การรายละเอียด การเปรียบเทียบที่ชัดเจน โดยเฉพาะ กราฟสีต่างๆ แยกให้เห็นชัดเจน

4. สรุปและวิจารณ์ผลการทดสอบ

ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจเลือกผลิตภัณฑ์ธนาคาร 3 อันดับแรก ได้แก่ ระยะเวลาที่ใช้ในการคุยโทรศัพท์กับ ลูกค้า จำนวนวันที่ผ่านไปหลังจากที่ลูกค้าได้รับการติดต่อ ครั้งสุดท้ายจากแคมเปญก่อนหน้านี้ และผลของแคมเปญ การตลาดครั้งก่อน ซึ่งเป็นประโยชน์ในการวางแผน การตลาด เพื่อเพิ่มจำนวนลูกค้าได้เป็นอย่างดี

แบบจำลองด้วยการเรียนรู้ของเครื่อง ในการที่ ลูกค้าตัดสินใจเลือกเงินฝากประจำ จากการนำเสนอ ผลิตภัณฑ์ผ่านโทรศัพท์ กรณีศึกษา ธนาคารแห่งหนึ่งใน ประเทศโปรตุเกส พบว่า อัลกอริทึม Tree ensemble พยากรณ์ได้ถูกต้องสูงสุด คิดเป็นร้อยละ 90.94 เมื่อเทียบกับอัลกอริทึม Decision tree และ Random forest ที่มี ถูกต้องร้อยละ 87.54 และ 90.29 ตามลำดับ สามารถ นำมาแสดงผลข้อมูลด้วยภาพ โดยใช้ Power BI ช่วย สนับสนุนการตัดสินใจและนำไปใช้ในทางปฏิบัติได้เป็น อย่างดี

ข้อจำกัดในการศึกษาครั้งนี้ ได้แก่ การเข้าถึงข้อมูล ลูกค้าของธนาคารในประเทศไทย เนื่องจากข้อมูลลูกค้า เป็นข้อมูลเฉพาะบุคคลและเป็นความลับ การศึกษานี้จึง ไม่สามารถใช้ข้อมูลของประเทศไทย จำเป็นต้องใช้ข้อมูล open data เพื่อเป็นต้นแบบในการประยุกต์ต่อไป

ส่วนใหญ่การศึกษาพฤติกรรมของลูกค้า ยังคงใช้ แบบสอบถามความพึงพอใจมากกว่าที่จะมีการวิเคราะห์ เชิงลึก เพื่อให้ได้พฤติกรรมเชิงลึกจากข้อมูลการใช้บริการ ของลูกค้า ดังนั้น การเรียนรู้ของเครื่องด้วยการใช้ข้อมูล ในอดีต เพื่อพยากรณ์พฤติกรรมเชิงลึกของลูกค้า (customer insight) สามารถนำไปใช้ประกอบการ ตัดสินใจในการนำเสนอผลิตภัณฑ์ธนาคารเพื่อตรงตาม ความต้องการของลูกค้าได้ดีขึ้น

สำหรับการศึกษาต่อไป ธนาคารต่างๆ ในประเทศ ไทยสามารถประยุกต์หลักการนี้ไปใช้กับข้อมูลลูกค้า

ธนาคารของตนเองได้ เพื่อให้สามารถเข้าถึงพฤติกรรม ข้องลูกค้าได้มากยิ่งขึ้น เนื่องจากความต้องการของลูกค้า มีความเฉพาะบุคคลมากขึ้น จำเป็นที่ธนาคารต้องมีการ ปรับตัว เพื่อสามารถรองรับพฤติกรรมของลูกค้าที่ เปลี่ยนแปลง และด้วยเทคโนโลยีที่สามารถเข้าถึงได้อย่าง รวดเร็ว การเปรียบเทียบผลิตภัณฑ์ของแต่ละธนาคารทำ ได้สะดวก รวดเร็ว เพื่อตอบโจทย์ความต้องการมากที่สุด ถ้าธนาคารมีระบบที่สามารถให้ลูกค้าเลือกได้ตามความ ต้องการ ก็จะเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันมากกว่า ธนาคารอื่น รวมถึงมีช่องทางในการติดต่อทุกช่องทาง (omnichannel) ที่เข้าถึงลูกค้าได้ทุกที่ ทุกเวลาที่ เหมาะสมเฉพาะบุคคล เช่น เทคโนโลยีการเรียนรู้เชิงลึก (Deep learning) เป็นต้น

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Kasikorn Research Center. (2016, May 30). Credit Card Flat in 2015 but in 2016 Retain the Growth [Online]. Available :<https://www.kasikornresearch.com/th/K-Econ Analysis>
- [2] P. Anaboontarik, “Factors affecting the choice of using Commercial Banks in Mueang District, Chiang Mai Province,” Independent Study (IS), Master of Economics, Chiang Mai University, 2004.
- [3] K. Jitphuthai, “Factors Influencing Decision-Making Behavior in Choosing Commercial Bank Services in Bang Khae, Phasi Charoen, Nong Khaem, and Krathum Baen Districts” , Independent Study (IS) , Master of Business Administration, Siam University, 2009.
- [4] Matichon News. (2017, September 30). Krung Sri First Choice launched new card “Krung Sri Frist Choice Care” giving free accidental insurance with highest Protection 100,000 baht [Online]. Available :<https://www.matichon.co.th/news/663544>.

- [5] W Piyajinda, “Factors relating to the Decision-Making Behaviors of SMILE CASH Credit among Consumers of Bank of Ayudhaya Public Company Limited (Zone 5),” M.S. Thesis, Faculty of Business Administration. Khon Kean University, 2009.
- [6] P. Suthipongwirat, “Behaviors of Using Cash Card among Thai Consumers in Bangkok Metropolitan”. Independent Study of Master Business Administration, Faculty of Business Administration, Khon Kaen University, 2011.
- [7] C. Shearer, “The CRISP-DM model: The new blueprint for data mining,” *Journal of Data Warehousing*, vol. 5, no. 4, pp. 13–22, 2000.
- [8] N. Wongprachanukul, “A proper method for decision tree pruning in scientific data mining,” M.S. Thesis, Nakornratchasima, Suranaree University of Technology, 2005.
- [9] K.B. Jyothi, K.H. Bindu, and D. Suryanarayana, “A comparative study of random forest & K – nearest neighbors on HAR dataset using caret,” *Int.J. Innov. Res. Technol*, vol. 3, no. 9, pp. 6-9, 2017
- [10] Singh, A. (2019, 13 February). A Comprehensive Guide to Ensemble Learning (with Python codes) {online}. Available : <https://www.Analyticsvidhya.com/blog/2018/06/comprehensive-guide-for-ensemble-models>.

กระดาษออกฤทธิ์ชีวภาพเคลือบด้วยอนุภาคซิลเวอร์เหล็กออกไซด์
สำหรับบรรจุภัณฑ์อาหาร
Bioactive Paper Coated with Green Synthesized Silver/iron Oxide
for Food Packaging

รวิษฎ์ จิตธรรม และ พรนภา เกษมศิริ*

สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

123 หมู่ 16 ถ.มิตรภาพ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002

Rawit Jittham and Pornnapa Kasemsiri*

Division of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University,

123 Village No.16, Mittraphap Rd., Naimuang, Muand District, Khon Kaen, Thailand, 40000

*Corresponding author Email: pornkas@kku.ac.th

(Received: April 17, 2024; Revised: May 28, 2024 ; Accepted: May 30, 2024)

บทคัดย่อ

การใช้บรรจุภัณฑ์ที่มีความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย เป็นแนวทางหนึ่งเพื่อรักษาคุณภาพและยืดอายุของผลิตภัณฑ์อาหาร ในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาและพัฒนากระดาษออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่เคลือบด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ กล่าวคือ อนุภาคซิลเวอร์เหล็กออกไซด์ (Ag/Fe_3O_4) แป้งของเสียที่เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ทางอุตสาหกรรม และกรดแทนนิกถูกนำมาใช้เป็นสารรีดิวซ์ทางธรรมชาติในการสังเคราะห์ Ag/Fe_3O_4 โดยในงานวิจัยนี้จะศึกษาผลของความเข้มข้นของกรดแทนนิกที่ร้อยละ 0-3 โดยมวลต่อปริมาตร จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มความเข้มข้นกรดแทนนิกในการเคลือบกระดาษ ส่งผลให้การต้านทานแรงดึง สมบัติการต้านทานน้ำของกระดาษ และความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ ได้แก่ เชื้อแบคทีเรียชนิด สแตฟิโลค็อกคัส ออเรียส (*Staphylococcus aureus: S.aureus*) และเอชเชอเรีย โคไล (*Escherichia coli: E.coli*) เพิ่มขึ้น การเคลือบกระดาษด้วย Ag/Fe_3O_4 ที่กรดแทนนิกที่ร้อยละ 3 โดยมวลต่อปริมาตร สามารถช่วยเก็บรักษาวิตามินซีในผลไม้เชื้เทศ และชะลอการสุกของผลไม้เชื้เทศได้ ดังนั้นบรรจุภัณฑ์ในงานวิจัยนี้จึงมีศักยภาพในการประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์กระดาษออกฤทธิ์ทางชีวภาพสำหรับรักษาคุณภาพและยืดอายุอาหาร

คำสำคัญ: กระดาษที่เคลือบด้วยสารออกฤทธิ์ชีวภาพ แป้งที่เป็นของเสีย อนุภาคซิลเวอร์เหล็กออกไซด์ กรดแทนนิก

ABSTRACT

Utilization of antibacterial packaging is an approach to maintain and extend shelf-life of foods. This research aims to develop the bioactive composite paper coating with bioactive compound viz, silver-iron oxide particles (Ag/Fe_3O_4). Starch waste from cassava starch industry and tannic acid are used as bio reducing agents for synthesis of Ag/Fe_3O_4 . The effect of tannic acid concentration at 0-3 %w/v is studied. Based on the study, the increase of tannic acid concentration for coating of paper enhances

tensile strength, water resistance and antibacterial activities i.e. *Staphylococcus aureus*: *S.aureus* and *Escherichia coli*: *E.coli*. The coated paper with $\text{Ag}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ at 3% w/v of tannic acid could maintain vitamin C and delay the ripening of tomatoes. Therefore, the obtained packaging had potential to apply as bioactive packaging to maintain food quality and prolong the shelf-life.

Keyword: Bioactive paper coated, Starch waste, Silver/iron oxide, Tannic acid.

1. บทนำ

กระดาษเป็นหนึ่งในวัสดุธรรมชาติที่นำมาประยุกต์ใช้งานในหลากหลายด้านและในหลายอุตสาหกรรมเนื่องจากมีคุณสมบัติที่สามารถย่อยสลายได้ทางธรรมชาติสามารถนำมาใช้ได้อย่างหมุนเวียน และต้นทุนต่ำ [1] หนึ่งในงานอุตสาหกรรมที่นำกระดาษมาประยุกต์ใช้งานคือ อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ทางด้านอาหาร ซึ่งเติบโตขึ้นอย่างต่อเนื่องและมีการพัฒนาวัสดุต่าง ๆ เป็นบรรจุภัณฑ์เพื่อรักษาคุณภาพและยืดอายุของผลิตภัณฑ์อาหาร [1] อย่างไรก็ตามนอกจากคุณสมบัติที่ดีของกระดาษที่กล่าวถึงข้างต้น กระดาษยังมีข้อจำกัดบางประการด้วยโครงสร้างที่มีลักษณะเป็นรูพรุน มีคุณสมบัติทางกลและความสามารถในการต้านทานความชื้นต่ำ [2] ทำให้บรรจุภัณฑ์กระดาษมีความสามารถในการเก็บรักษาสภาพผลิตภัณฑ์อาหารลดลง ดังนั้นเพื่อพัฒนาคุณสมบัติบรรจุภัณฑ์กระดาษ การศึกษาการเคลือบกระดาษด้วยพอลิเมอร์ธรรมชาติจึงเป็นแนวทางการพัฒนาที่ได้รับความสนใจและนิยมมากขึ้น แป้งของเสียว (Cassava starch waste) หรือ ซีเอสดับเบิลยู (CSW) คือ แป้งที่ได้จากกระบวนการล้างและสกัดแป้งมันสำปะหลัง เป็นแป้งผลิตภัณฑ์พลอยได้ทางอุตสาหกรรมเกษตรที่ยังมีองค์ประกอบของแป้งสูงถึงร้อยละ 73 [3] การนำแป้งของเสียวมาประยุกต์ใช้งานเป็นวัตถุดิบตั้งต้นในการขึ้นรูปบรรจุภัณฑ์จึงเป็นการเพิ่มมูลค่าและเพิ่มทางเลือกการใช้งานให้กับผลิตภัณฑ์ภัณฑ์พลอยได้ทางการเกษตร สมบัติที่สำคัญของบรรจุภัณฑ์กระดาษ คือ สมบัติการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย [4] การนำอนุภาคซิลเวอร์นาโน (Silver Nanoparticles) มาประยุกต์ใช้กับงานบรรจุภัณฑ์อาหารเป็นที่นิยมและแพร่หลาย เนื่องจาก

อนุภาคซิลเวอร์นาโนมีคุณสมบัติในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้อย่างโดดเด่น [5] อีกทั้งยังสามารถสังเคราะห์ด้วยวิธีทางธรรมชาติและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ศรีชาวและคณะ (2023) [5] ศึกษาการเคลือบอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่สังเคราะห์ด้วยวิธีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม ลงบนกระดาษสำหรับการใช้งานด้านเชื้อแบคทีเรียและไวรัส โดยศึกษาการเตรียมบรรจุภัณฑ์โดยวิธีการเคลือบด้วยอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่มีความเข้มข้นของซิลเวอร์ไนเตรด (Silver nitrate) แตกต่างกัน ได้แก่ 50, 100, 150 และ 200 มิลลิโมลาร์ ด้วยวิธีทางธรรมชาติที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม โดยใช้สารสกัดจากเปลือกมังคุดเป็นสารรีดิวซ์ (Reducing agent) ทางธรรมชาติ ในการทดสอบสมบัติการต้านเชื้อแบคทีเรียพบว่าตัวอย่างที่ใช้ความเข้มข้นของซิลเวอร์ไนเตรด 150 มิลลิโมลาร์ มีสมบัติในการต้านเชื้อแบคทีเรียสูงสุดทั้งเชื้อเอเชอริเชีย โคไล และสแตฟิโลค็อกคัส ออเรียส นอกจากนี้อนุภาคนาโนของเหล็กออกไซด์ (Fe_3O_4) เป็นอนุภาคนาโนที่ได้รับการศึกษาว่าไม่มีความเป็นพิษและสามารถประยุกต์ใช้ในอาหารและยาได้ จึงเป็นที่น่าสนใจในปัจจุบันเพื่อนำไปเป็นตัวรองรับให้กับอนุภาคซิลเวอร์นาโน เพื่อลดการเกาะกลุ่มของอนุภาค [1] Srichiangsa และคณะ (2022) [1] ศึกษาการเตรียมบรรจุภัณฑ์กระดาษเคลือบด้วยอนุภาคซิลเวอร์นาโนที่ตกแต่งบนอนุภาคแม่เหล็ก ($\text{Ag}@\text{Fe}_3\text{O}_4$) ด้วยวิธีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมโดยใช้สารสกัดจากกากกาแฟ ในการทดสอบสมบัติพบว่าสมบัติโดยรวมของกระดาษเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณของ $\text{Ag}@\text{Fe}_3\text{O}_4$ เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 0.15 โดยมวลต่อปริมาตร รวมถึงสมบัติในการต้านเชื้อแบคทีเรียทั้งเอเชอริเชีย โคไล และสแตฟิโลค็อกคัส ออเรียส การ

สังเคราะห์อนุภาคนาโนที่กล่าวมาข้างต้น พบว่าสามารถสังเคราะห์ด้วยวิธีการที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมโดยการใช้สารประกอบ สเตียรอยด์ (Steroid) ฟลาโวนอยด์ (Flavonoids) สโปนินส์ (Saponins) และอัลคาลอยด์ (Alkaloid) ที่ได้จากพืชเป็นสารรีดิวซ์ (Reducing agent) ซึ่งกระบวนการนี้ช่วยลดความเป็นพิษและลดการใช้สารเคมีเป็นสารรีดิวซ์ [6] กรดแทนนิกเป็นสารประกอบฟีนอลิก (Phenolic) ที่ได้จากพืช นิยมนำมาใช้เป็นสารรีดิวซ์สำหรับการสังเคราะห์อนุภาคโลหะนาโน สารให้เสถียรภาพแก่อนุภาคโลหะนาโน และยังมีฤทธิ์ยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ [7]

ในงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการศึกษาและพัฒนากระบวนการออกฤทธิ์ทางชีวภาพเคลือบด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่ประกอบด้วย อนุภาคซิลเวอร์นาโนออกไซด์ แบงของเสียที่เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ทางอุตสาหกรรม และกรดแทนนิกเป็นสารรีดิวซ์ทางธรรมชาติ โดยศึกษาผลของความเข้มข้นที่แตกต่างกันของกรดแทนนิกที่ร้อยละ 0-3 โดยมวลต่อปริมาตร ศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของกระดาษเคลือบ ได้แก่ ความสามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย ความสามารถต้านทานน้ำ คุณสมบัติเชิงกล นอกจากนี้ยังใช้กระดาษเคลือบเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับผลไม้เพื่อศึกษาคุณภาพของผลไม้แช่เย็นในบรรจุภัณฑ์กระดาษเคลือบระหว่างการเก็บรักษา

2. วิธีการวิจัย

2.1 วัสดุและอุปกรณ์

แป้งมันสำปะหลังที่เป็นของเสียจากบริษัท แก่นเจริญ จำกัด ไอร์รอนซัลเฟต เฮปตะไฮเดรต (Iron (II) sulfate Heptahydrate : $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) จากยี่ห้อ Analytical Reagent KEMAUS ซิลเวอร์ไนเตรต (Silver nitrate ; AgNO_3) จากยี่ห้อ RCI Labscan กรดแทนนิก (Tannic Acid) จากยี่ห้อ Sigma-Aldrich กลีเซอรอล จากยี่ห้อ Analytical Reagent KEMAUS โซเดียมคาร์บอเนต (Sodium Carbonate: Na_2CO_3) ความบริสุทธิ์ 99.8%

จากบริษัท Ajax Fine Chemicals และน้ำปราศจากประจุ (Deionized Water: DI)

2.2 วิธีการทดลอง

2.2.1 การเตรียมอนุภาคนาโนเหล็กออกไซด์ (Fe_3O_4)

การเตรียม Fe_3O_4 เพื่อเป็นตัวรองรับ เริ่มจาก นำ $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ความเข้มข้น 150 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 50 มิลลิลิตร จากนั้นเติมกรดแทนนิกที่ความเข้มข้นแตกต่างกันร้อยละ 0-3 โดยมวลต่อปริมาตร ปริมาตร 3 มิลลิลิตร ปั่นกวนสารผสมให้เข้ากัน 10 นาที จากนั้นปรับ pH ด้วย Na_2CO_3 (1 โมลาร์) ให้ได้ค่า pH เท่ากับ 9 ซึ่งเป็นค่า pH ที่เหมาะสมในการสังเคราะห์ [8] นำสารผสมที่ปรับ pH แล้วให้ความร้อนและปั่นกวนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 20 นาที จากนั้นจะได้ Fe_3O_4

2.2.2 การเตรียม $\text{Ag}/\text{Fe}_3\text{O}_4$

การเตรียม $\text{Ag}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ ด้วยวิธีทางธรรมชาติโดยใช้คลื่นไมโครเวฟ เริ่มจากเติมสารละลาย AgNO_3 ความเข้มข้น 150 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 0.2 มิลลิลิตร ลงใน Fe_3O_4 ที่ได้จากข้อ 2.2.1 ปั่นกวนสารผสมเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นให้ความร้อนด้วยเครื่องไมโครเวฟเป็นเวลา 30 นาที ด้วยกำลังไฟต่ำสุด เมื่อครบเวลาจะได้ $\text{Ag}/\text{Fe}_3\text{O}_4$

2.2.3 การเตรียมสารเคลือบกระดาษและวิธีการเคลือบกระดาษ

แป้งของเสีย 2.25 กรัม ละลายในน้ำ DI 25 มิลลิลิตร ให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที จากนั้นเติมแป้งที่ละลายแล้วลงในสารที่มี $\text{Ag}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ ที่ได้ทั้งหมดจากข้อ 2.2.2 ปั่นกวนเป็นเวลา 15 นาที จากนั้นให้ความร้อนให้ความร้อนด้วยเครื่องไมโครเวฟเป็นเวลา 10 นาที นำออกจากไมโครเวฟเติมกลีเซอรอล 1 มิลลิลิตร ปั่นกวนต่อเป็นเวลา 5 นาที เมื่อครบเวลา ได้สารเคลือบกระดาษที่ออกฤทธิ์ทางชีวภาพ เคลือบบนกระดาษขนาด 7x7 เซนติเมตร โดยใช้ปริมาณสารเคลือบ 50 มิลลิลิตร ทำการเคลือบด้วย Doctor blade ระยะห่างเท่ากับ 200 ไมโครเมตร นำกระดาษเคลือบด้วยสารเคลือบอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส จนกระทั่ง

กระดาษแห้ง จึงได้กระดาษออกฤทธิ์ชีวภาพ กระดาษที่เคลือบด้วย $\text{Ag/Fe}_3\text{O}_4$ ที่สังเคราะห์จากกรดแทนนิกที่มีความเข้มข้นแตกต่างกันจะใช้ตัวย่อ ดังนี้ TA0%w/v, TA1%w/v และ TA3%w/v

2.3 การทดสอบสมบัติของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและกระดาษเคลือบ

2.3.1 การวิเคราะห์สมบัติทางแสงของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ

การวิเคราะห์สมบัติทางแสงของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีความเข้มข้นของกรดแทนนิกแตกต่างกันร้อยละ 0-3 โดยมวลต่อปริมาตร ด้วยเครื่อง UV-Vis spectroscopy ช่วงความยาวคลื่นเท่ากับ 200-500 นาโนเมตร

2.3.2 การวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

กระดาษเคลือบขนาด 2×2 เซนติเมตร วิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ด้วย SmartLab X-ray diffractometer (XRD) ที่มุม $2\theta = 20-80^\circ$

2.3.3 การทดสอบความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของกระดาษเคลือบ

ทดสอบความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของกระดาษเคลือบด้วยวิธี Agar disk diffusion โดยใช้แบคทีเรีย 2 ชนิด ได้แก่ สแตฟิโลค็อกคัส ออเรียส และเอเชอริเชีย โคลิ ทำการเตรียมด้วยอาหารเลี้ยงเชื้อชนิด Brain heart infusion broth ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นเชื้อที่ได้ปริมาตร 0.1 มิลลิลิตร วางบนจานเลี้ยงเชื้อที่มีอาหารเลี้ยงเชื้อชนิด Muller Hinton agar และตรวจนับเชื้อให้ปริมาณ 10^8 CFU/mL กระดาษเคลือบขนาด 1×1 เซนติเมตร วางลงจานเลี้ยงเชื้อที่เตรียมไว้ จากนั้นนำบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้ววัดรัศมีการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย

2.3.4 การทดสอบสมบัติการต้านแรงดึงของกระดาษเคลือบ

กระดาษเคลือบขนาด $25 \times 80 \times 0.3$ มิลลิเมตร ทดสอบสมบัติการต้านแรงดึงโดยใช้ Universal testing

machine, UTM (Instron, Model 5567) ตามมาตรฐาน ASTM 882-10 ระยะจับชิ้นงาน 50 มิลลิเมตร ที่ความเร็ว 25 มิลลิเมตรต่อนาที และทำการทดสอบตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

2.3.5 การทดสอบการวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำของกระดาษเคลือบ

การทดสอบการวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำ เพื่อวัดความไม่ชอบน้ำของกระดาษเคลือบ สามารถวิเคราะห์ได้จากค่ามุมสัมผัสสน้ำ (water contact angle : WCA) โดยใช้เครื่องวัดมุมสัมผัสแบบออปติคัล (OCA 15EC) ด้วยหยดน้ำปราศจากไอออนที่อุณหภูมิห้อง และทำการทดสอบตัวอย่างละ 3 ซ้ำ

2.3.6 การทดสอบการใช้งานบรรจุภัณฑ์กระดาษออกฤทธิ์ชีวภาพในการเก็บรักษามะเขือเทศ

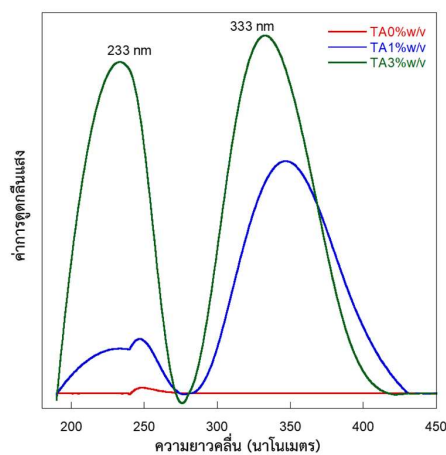
ทดสอบโดยการนำกล่องกระดาษเคลือบด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ 4 ชนิด ชนิดละ 3 กล่อง ได้แก่ กล่องกระดาษเปล่าที่ไม่เคลือบด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ และกล่องกระดาษเคลือบด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีความเข้มข้นของกรดแทนนิกร้อยละ 0, 1 และ 3 โดยมวลต่อปริมาตร บรรจุผลมะเขือเทศที่คัดขนาดและมีน้ำหนักใกล้เคียงกัน ทำการเก็บวิเคราะห์ผลในวันที่ 3 5 และ 7 และวัดค่าการเปลี่ยนแปลงวิตามินซีของมะเขือเทศโดยใช้วิธีการไตเตรทด้วยสารละลายไอโอดีน (Iodine Titration)

3. ผลการวิจัย

3.1 ผลการวิเคราะห์สมบัติทางแสงของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ

ผลการวิเคราะห์สมบัติทางแสงของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีความเข้มข้นของกรดแทนนิกแตกต่างกันร้อยละ 0-3 โดยมวลต่อปริมาตร ด้วยเครื่อง UV-Vis spectroscopy แสดงดังรูปที่ 1 จากผลการทดสอบพบว่าสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีความเข้มข้นของกรดแทนนิก ร้อยละ 1 และ 3 โดยมวลต่อปริมาตร ปรากฏพิคในช่วง 233-245 นาโนเมตร และ 333-345 นาโนเมตร แสดงถึงการเกิดขึ้นของ $\text{Ag/Fe}_3\text{O}_4$ อีกทั้งการที่พิคของ

กราฟสูงชันอย่างเห็นได้ชัดระหว่างสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีความเข้มข้นของกรดแทนนิกร้อยละ 1 และ 3 โดยมวลต่อปริมาตร แสดงให้เห็นถึงการเกิดที่เพิ่มมากขึ้นของอนุภาค Ag/Fe_3O_4 นอกจากนี้การเลื่อนตำแหน่งของพีคยังแสดงถึงขนาดของอนุภาคที่แตกต่างกัน [5,9-11]

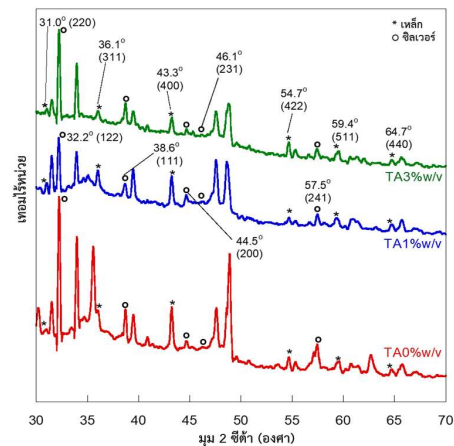


รูปที่ 1 ค่าการดูดกลืนแสงของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ โดยมีความเข้มข้นของกรดแทนนิกที่ต่างกัน

3.2 ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

ผลการวิเคราะห์การเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ของกระดาศออกฤทธิ์ชีวภาพที่เคลือบด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีความเข้มข้นของกรดแทนนิกแตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 2 อนุภาค Fe_3O_4 พบพีคที่ตำแหน่ง 31.0° , 36.1° , 43.3° , 54.7° , 59.4° และ 64.7° แสดงถึงระนาบ (220), (311), (400), (422), (511) และ (440) ตามลำดับ บ่งบอกถึงลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ Face-centered cubic (FCC) [1, 9, 12, 13] เมื่อทำการสังเคราะห์ให้เป็นอนุภาค Ag/Fe_3O_4 พบตำแหน่งพีคของอนุภาคซิลเวอร์นาโนเกิดขึ้นที่ตำแหน่ง 38.6° , 44.5° และ 57.5° แสดงถึงระนาบ (111), (200), และ (241) ตามลำดับซึ่งแสดงถึงลักษณะโครงสร้างผลึกแบบ FCC [12-14] นอกจากนี้ในรูปที่ 2 ไม่พบพีคของเหล็กออกไซด์ชนิดอื่น สามารถยืนยันได้ว่า อนุภาคเหล็กออกไซด์ไม่เกิดการออกซิไดส์ระหว่างการสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนจากผลการศึกษา ลักษณะโครงสร้างผลึก แสดงให้เห็นว่ากรดแทนนิก

สามารถใช้เป็นสารรีดิวซ์ในการสังเคราะห์อนุภาค Ag/Fe_3O_4 ได้ด้วยวิธีธรรมชาติที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม

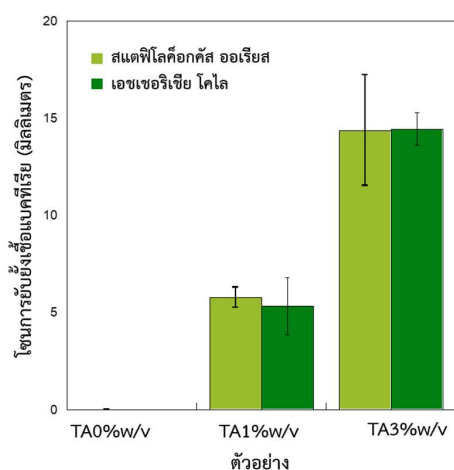


รูปที่ 2 กราฟ XRD กระดาศออกฤทธิ์ชีวภาพที่เคลือบด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีความเข้มข้นของกรดแทนนิกแตกต่างกัน

3.3 ผลการทดสอบความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียของกระดาศเคลือบ

กระดาศออกฤทธิ์ชีวภาพที่เคลือบด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีความเข้มข้นของกรดแทนนิกแตกต่างกัน ทดสอบความสามารถในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย 2 ชนิด คือ สแตฟิโลค็อกคัส ออเรียส และเอชเชอริเชีย โคไล โดยวิธี Agar disk diffusion พบว่ากระดาศออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีกรดแทนนิก มีสมบัติยับยั้งแบคทีเรียชนิด สแตฟิโลค็อกคัส ออเรียส และเอชเชอริเชีย โคไล สามารถวัดรัศมีการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ในช่วง 5.32-14.44 มิลลิเมตร และ 5.78-14.36 มิลลิเมตร ตามลำดับ โดยกระดาศที่เคลือบด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีความเข้มข้นของกรดแทนนิกร้อยละ 3 โดยมวลต่อปริมาตร แสดงรัศมีการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย ชนิดสแตฟิโลค็อกคัส ออเรียส และเอชเชอริเชีย โคไล มากที่สุด แสดงดังรูปที่ 3 การมีกรดแทนนิกเพิ่มขึ้นทำให้มีปริมาณสารออกฤทธิ์ในการยับยั้งแบคทีเรียที่มากขึ้น โดยกรดแทนนิกสามารถผ่านของเยื่อหุ้มเซลล์ ขัดขวางการทำงานของเอนไซม์ และทำให้เซลล์เกิดความเสียหาย นอกจากนี้การเพิ่มปริมาณ

กรดแทนนิกที่ทำหน้าเป็นสารรีดิวซ์ในการสังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์นาโนออกไซด์ ส่งผลให้มีปริมาณอนุภาคโลหะที่เพิ่มมากขึ้นและเกิดการทำงานร่วมกันระหว่างกรดแทนนิก ทำให้การยับยั้งเชื้อแบคทีเรียมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น [11] นอกจากนี้ยังพบว่า มีการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก (สแตฟิโลค็อกคัส) ได้ดีกว่าแบคทีเรียแกรมลบ (เอชเชอริเชีย โคลิ) สำหรับแบคทีเรียแกรมบวก มีโครงสร้างของผนังเซลล์ ชั้นเปปทิโดไกลแคน (peptidoglycan) และมีรูพรุนที่สามารถให้ออกซิเจนของโลหะแพร่ผ่านได้ [15, 16]

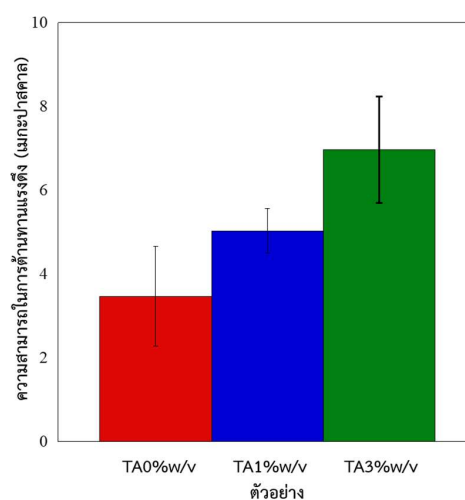


รูปที่ 3 รัศมีการยับยั้งแบคทีเรียของกระดาศออกฤทธิ์ชีวภาพที่เคลือบด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีความเข้มข้นของกรดแทนนิกแตกต่างกัน

3.4 ผลการทดสอบสมบัติการต้านแรงดึงของกระดาศเคลือบ

ในการรักษาความสมบูรณ์ของผลิตภัณฑ์ระหว่างการขนส่งและการเก็บรักษาของบรรจุภัณฑ์กระดาศ ปัจจัยที่สำคัญอีกอย่างหนึ่ง คือ คุณสมบัติการต้านแรงดึง [17] จากการทดสอบค่าการต้านแรงดึงของกระดาศเคลือบด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพสำหรับเคลือบบรรจุภัณฑ์อาหารที่มีความเข้มข้นของกรดแทนนิกร้อยละ 0, 1 และ 3 โดยมวลต่อปริมาตร มีค่าแตกต่างกัน แสดงดังรูปที่ 4 ผลการทดสอบพบว่าค่าการต้านแรงดึงที่เพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรดแทนนิก ค่าความต้านแรงดึงของ

กระดาศที่เคลือบด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพสำหรับเคลือบบรรจุภัณฑ์อาหารที่มีความเข้มข้นของกรดแทนนิกร้อยละ 0, 1 และ 3 โดยมวลต่อปริมาตร มีค่าเท่ากับ 3.47 ± 1.2 , 5.03 ± 0.5 และ 6.97 ± 1.3 เมกะปาสคาล ตามลำดับ จากงานวิจัยของ Srichiangsa และคณะ (2022) [1] พบว่าการเพิ่มปริมาณ อนุภาค $Ag@Fe_3O_4$ ในสัดส่วนที่เหมาะสมในพอลิเมอร์เมตริกซ์ทำให้เกิดแรงกระทำของพันธะไฮโดรเจนกับกระดาศ ทำให้มีแรงยึดระหว่างผิวที่ดี ส่งผลให้กระดาศที่มีการเคลือบมีความต้านทานแรงดึงที่สูงขึ้น

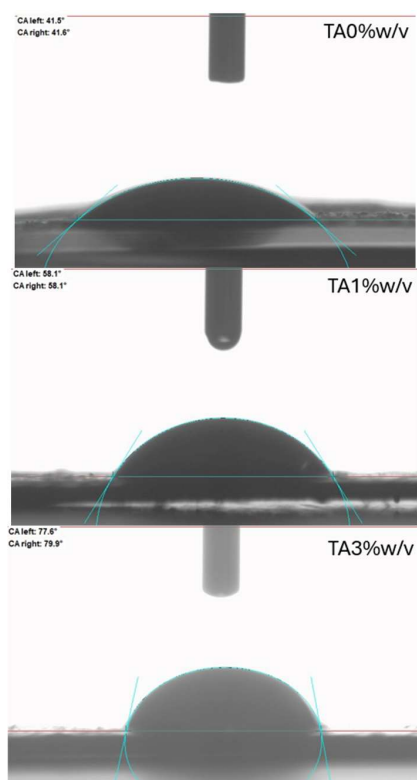


รูปที่ 4 ค่าการต้านทานแรงดึงของกระดาศออกฤทธิ์ชีวภาพที่เคลือบด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีความเข้มข้นของกรดแทนนิกแตกต่างกัน

3.5 ผลการทดสอบการวัดมุมสัมผัสของหยดน้ำของกระดาศเคลือบ

การทดสอบความไม่ชอบน้ำของกระดาศที่เคลือบด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพสามารถวิเคราะห์ได้จากค่ามุมสัมผัสน้ำ (Water contact angle : WCA) ดังแสดงในรูปที่ 5 ผลการทดสอบพบว่า กระดาศที่เคลือบด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีความเข้มข้นของกรดแทนนิกร้อยละ 0, 1 และ 3 โดยมวลต่อปริมาตร มีค่ามุมสัมผัสน้ำเท่ากับ 43.9, 52.8 และ 76.1 ตามลำดับ จากการทดสอบสามารถสรุปได้ว่าเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของกรด

เทคนิคในสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพนี้ ส่งผลให้กระดาษเคลือบมีความไม่ชอบน้ำเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มกรดแทนนิกส่งผลให้มีการเกิดอนุภาคซิลเวอร์เล็กออกไซด์ที่เพิ่มขึ้นดังแสดงในผล UV-vis spectroscopy ซึ่งอนุภาคซิลเวอร์เล็กออกไซด์จะทำให้กระดาษเคลือบมีพื้นผิวขรุขระ ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎีของ Cassie ที่อธิบายไว้ว่า ความขรุขระบนพื้นผิวมีลักษณะเป็นโครงสร้างพีระมิด ทำให้อากาศที่อยู่ระหว่างช่องว่างของโครงสร้างพีระมิดนี้ เป็นตัวขัดขวางการดูดซึมน้ำเข้าไปในพื้นผิวของกระดาษเคลือบ [1, 18]

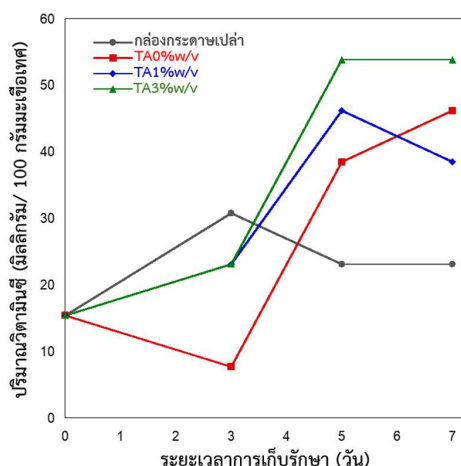


รูปที่ 5 ค่ามุมสัมผัสน้ำของกระดาษออกฤทธิ์ชีวภาพที่เคลือบด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีความเข้มข้นของกรดแทนนิกแตกต่างกัน

3.6 ผลการทดสอบการใช้งานบรรจุภัณฑ์กระดาษออกฤทธิ์ชีวภาพในการเก็บรักษามะเขือเทศ

การทดสอบการเปลี่ยนแปลงวิตามินซีของมะเขือเทศแสดงดังรูปที่ 6 การทดสอบการเปลี่ยนแปลงนี้ใช้เวลาในการทดสอบทั้ง 7 วัน ผลการทดสอบที่ได้พบว่า กระดาษที่ไม่มีการเคลือบสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพมีปริมาณวิตามินซีเพิ่มขึ้นในช่วง 3 วันแรก และปริมาณวิตามินซีลดลงจนถึงวันสุดท้ายของการทดสอบ ในขณะที่กระดาษที่เคลือบด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีความเข้มข้นของกรดแทนนิกร้อยละ 3 โดยมวลต่อปริมาตร มีปริมาณวิตามินซีเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และมีปริมาณวิตามินซีมากที่สุดในวันสุดท้ายของการทดสอบ มะเขือเทศมีการสุกอย่างต่อเนื่องระหว่างการทดสอบส่งผลให้ค่าวิตามินซีเพิ่มสูงขึ้น ปัจจัยที่ส่งผลให้ค่าวิตามินซีลดลงเกิดจากการมีอัตราหายใจของผลมะเขือเทศที่ต่ำลง [19] และการเกิดออกซิเดชันจากสภาพแวดล้อมภายนอก [20] อีกทั้งกระดาษที่เคลือบด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีความเข้มข้นของกรดแทนนิก ร้อยละ 0 และ 1 โดยมวลต่อปริมาตร ซึ่งการที่พบปริมาณวิตามินซีสูงนี้ แสดงถึงความสามารถในการชะลอการสุกของผลมะเขือเทศ ดังจะเห็นได้จากรูปที่ 7 แสดงลักษณะของมะเขือเทศที่เก็บในกล่องกระดาษที่เคลือบด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีความเข้มข้นของกรดแทนนิกที่แตกต่างกัน โดยพบว่ามะเขือเทศที่อยู่ในกล่องกระดาษที่ผ่านการเคลือบจะมีการเปลี่ยนแปลงสีที่น้อยกว่ามะเขือเทศที่อยู่ในกล่องกระดาษเปล่าที่ไม่มีการเคลือบ ดังนั้นการใช้กระดาษที่เคลือบด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพตามที่มีความเข้มข้นของกรดแทนนิกร้อยละ 3 โดยมวลต่อปริมาตร จึงสามารถประยุกต์ใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ในการรักษาคุณภาพและคุณประโยชน์ที่สำคัญของอาหาร อย่างไรก็ตามการใช้กรดแทนนิกร้อยละ 3 โดยมวลต่อปริมาตร ยังคงให้ผลทั้งการยับยั้งแบคทีเรียและความต้านทานแรงดึงที่ดี ซึ่งหากเพิ่มปริมาณกรดแทนนิกเพิ่มขึ้นอาจส่งผลที่ดีต่อสมบัติโดยรวม อย่างไรก็ตาม ในงานวิจัยของ Jarensungnen และคณะ (2023) พบว่าการเพิ่มปริมาณกรดแทนนิกในการ

สังเคราะห์อนุภาคซิลเวอร์ เมื่อเพิ่มปริมาณกรดแทน- นิกถึงร้อยละ 7 โดยมวลต่อปริมาตร ทำให้เกิดการรวมกลุ่มของ อนุภาคซิลเวอร์ส่งผลให้สมบัติทางกลและทางกายภาพของนาโนคอมพอสิต ลดลง [11]



รูปที่ 6 ปริมาณวิตามินซีของมะเขือเทศในกล่องกระดาษเคลือบที่มีความเข้มข้นของกรดแทนนิกที่แตกต่างกัน

ตัวอย่าง	วันเริ่มต้น (DAY 0)	วันสิ้นสุด (DAY 7)
กล่องกระดาษเปล่า		
TA0% w/v		
TA1% w/v		
TA3% w/v		

รูปที่ 7 ลักษณะของมะเขือเทศที่เก็บในกล่องกระดาษเคลือบที่มีความเข้มข้นของกรดแทนนิกที่แตกต่างกัน

4. สรุปผลการวิจัย

ในงานวิจัยนี้ศึกษาและพัฒนากระดาษออกฤทธิ์ทางชีวภาพเคลือบด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่

ประกอบด้วย อนุภาคซิลเวอร์เหล็กออกไซด์ แป้งของเสียวที่เป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ทางอุตสาหกรรม และกรดแทน-นิกเป็นสารรีดิวซ์ทางธรรมชาติ จากการทดสอบแสดงให้เห็นว่ากระดาษเคลือบด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีความเข้มข้นของกรดแทนนิกแตกต่างกัน สามารถเพิ่มคุณสมบัติการต้านทานแรงดึง สมบัติการต้านทานน้ำของกระดาษ และสามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียได้ทั้ง 2 ชนิด ได้แก่ เชื้อแบคทีเรียชนิด สแตฟิโลค็อกคัส ออเรียส (แกรมบวก) และเอเชอริเชีย โคลิ (แกรมลบ) ได้ และเมื่อนำสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพนี้เคลือบลงบนกล่องกระดาษและประยุกต์ใช้ในการเก็บรักษาผลไม้เขือเทศ พบว่ากระดาษที่เคลือบด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีความเข้มข้นของกรดแทนนิกร้อยละ 3 โดยมวลต่อปริมาตรสามารถช่วยเก็บรักษาวิตามินซีในเมื่อเขือเทศ และชะลอการสุกของผลไม้เขือเทศได้ สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพนี้จึงเหมาะสมแก่การนำมาเคลือบลงบนกระดาษหรือกล่องกระดาษ เพื่อประยุกต์เป็นบรรจุภัณฑ์กระดาษออกฤทธิ์ทางชีวภาพสำหรับชะลอการสุกของผลไม้

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับงบประมาณ สนับสนุนจากทุนวิจัยสำหรับคณาจารย์บัณฑิตศึกษา เพื่อให้สามารถรับนักศึกษาที่มีความสามารถและศักยภาพสูงเข้าศึกษาในหลักสูตรและทำวิจัยในสาขาที่อาจารย์มีความเชี่ยวชาญ ประจำปีการศึกษา 2565 รหัสทุน 651T111

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Srichiangsa, A. Ounkaew, P. Kasemsiri, M. Okhawilai, H. Hizirolu, S. Theerakulpisut and P. Chindaprasit, "Facile fabrication of green synthesized silver-decorated magnetic particles for coating of bioactive packaging," *Cellulose*, vol. 29, no. 10, pp. 5853-5868, May. 2022.

- [2] S. Tanpichai, Y. Srimarut, W. Woraprayote, and Y. Malila, "Chitosan coating for the preparation of multilayer coated paper for food-contact packaging: wettability, mechanical properties, and overall migration," *Int. J. Biol. Macromol.*, vol. 213, pp. 534-545, Jul. 2022.
- [3] I. Prasertsung, K. Aroonraj, K. Kamwilaisak, N. Saito and S. Damrongsakkul, "Production of reducing sugar from cassava starch waste (CSW) using solution plasma process (SPP)," *Carbohydr. Polym.*, vol. 205, pp. 472-479, Feb. 2019.
- [4] A. Bahrami, R. Delshadi, E. Assadpour, S. M. Jafari and L. Williams, "Antimicrobial-loaded nanocarriers for food packaging applications," *Adv. Colloid Interface Sci.*, vol. 278, article no. 102140, Apr. 2020.
- [5] N. Srikhao, A. Ounkaew, N. Srichiangsa, S. Phanthanawiboon, T. Boonmars, A. Artchayasawat, S. Theerakulpisut, M. Okhawilai and P. Kasemsiri, "Green-synthesized silver nanoparticle coating on paper for antibacterial and antiviral applications," *Polym. Bull.*, vol. 80, no. 9, pp. 9651-9668, Oct. 2023.
- [6] M. Ehsan, A. Waheed, A. Ullah, A. Kazmi, A. Ali, N. Raja, Z. Mashwani, T. Sultana, N. Mustafa, M. Ikram and H. Li, "Plant-based bimetallic silver-zinc oxide nanoparticles: a comprehensive perspective of synthesis, biomedical applications, and future trends," *BioMed Res. Int.*, vol. 2022, article no. 1215183, Apr. 2022.
- [7] A. Ounkaew, C. Jarensungnen, N. Jaroenthai, T. Boonmars, A. Artchayasawat, R. Narain, P. Chindaprasirt and P. Kasemsiri, "Fabrication of hydrogel-nano silver based on aloe vera/carboxymethyl cellulose/tannic acid for antibacterial and pH-responsive applications," *J. Polym. Environ.*, vol. 31, no. 1, pp. 50-63, Oct. 2023.
- [8] A. Miranda, T. Akpobolokemi, E. Chung, G. Ren and B. T. Raimi-Abraham, "pH alteration in plant-mediated green synthesis and its resultant impact on antimicrobial properties of silver nanoparticles (AgNPs)," *Antibiotics*, vol. 11, no. 11, article no. 1592, Nov. 2022.
- [9] V. A. Niraimathee, V. Subha, R. S. E. Ravindran and S. Renganathan, "Green synthesis of iron oxide nanoparticles from Mimosa pudica root extract," *Int. J. Environ. Sustain. Dev.*, vol. 15, no. 3, pp. 227-240, Jun. 2016.
- [10] R. Sandupatla, A. Dongamanti and R. Koyyati, "Antimicrobial and antioxidant activities of phytosynthesized Ag, Fe and bimetallic Fe-Ag nanoparticles using Passiflora edulis: a comparative study," *Mater. Today: Proc.*, vol. 44, pp. 2665-2673, Feb. 2021.
- [11] C. Jarensungnen, K. Jetsrisuparb, S. Phanthanawiboon, S. Theerakulpisut, S. Hiziroglu, J. Knijnenburg, M. Okhawilai and P. Kasemsiri, "Development of eco-friendly antifungal and antibacterial adhesive derived from modified cassava starch waste/polyvinyl alcohol containing green synthesized nano-silver," *Sci. Rep.*, vol. 13, no. 1, article no. 13355, Aug. 2023.

- [12] Y. Yew, K. Shameli, M. Miyake, N. Kuwano, N. Khairudin, S. Mohamad and K. Lee "Green synthesis of magnetite (Fe_3O_4) nanoparticles using seaweed (*Kappaphycus alvarezii*) extract," *Nanoscale Res. Lett.*, vol. 11, no. 1, p. 276, Jun. 2016.
- [13] M. Chang, W.-S. Lin, W. Xiao and Y.-N. Chen, "Antibacterial effects of magnetically-controlled $\text{Ag}/\text{Fe}_3\text{O}_4$ nanoparticles," *Materials*, vol. 11, no. 5, pp. 659, Apr. 2018.
- [14] Y. Meng, "A sustainable approach to fabricating Ag nanoparticles/PVA hybrid nanofiber and its catalytic activity," *Nanomaterials*, vol. 5, no. 2, pp. 1124-1135, Jun. 2015.
- [15] C. López-de-Dicastillo, J. Gómez-Estaca, R. Catalá, R. Gavara and P. Hernández-Muñoz, "Active antioxidant packaging films: development and effect on lipid stability of brined sardines," *Food Chem.*, vol. 131, no. 4, pp. 1376-1384, Apr. 2012.
- [16] L. Wang, C. Hu and L. Shao, "The antimicrobial activity of nanoparticles: present situation and prospects for the future," *Int. J. Nanomed.*, vol. 12, pp. 1227-1249, Feb. 2017.
- [17] X. Li, Y. Qu, X. Wang, H. Bian, W. Wu and H. Dai, "Flexible graphene/silver nanoparticles/aluminum film paper for high-performance electromagnetic interference shielding," *Materials & Design*, vol. 213, article no. 110296, Jan. 2022.
- [18] D. Kansal, S. S. Hamdani, R. Ping and M. Rabnawaz, "Starch and zein biopolymers as a sustainable replacement for PFAS, silicone oil, and plastic-coated paper," *Ind. amp; Eng. Chem. Res.*, vol. 59, no. 26, pp. 12075-12084, Jun. 2020.
- [19] I. M. Brasil, C. Gomes, A. Puerta-Gomez, M. E. Castell-Perez and R. G. Moreira, "Polysaccharide-based multilayered antimicrobial edible coating enhances quality of fresh-cut papaya," *LWT - Food Sci. Technol.*, vol. 47, no. 1, pp. 39-45, Jun. 2012.
- [20] Y. He, H. Li, X. Fei and L. Peng, "Carboxymethyl cellulose/cellulose nanocrystals immobilized silver nanoparticles as an effective coating to improve barrier and antibacterial properties of paper for food packaging applications," *Carbohydr. Polym.*, vol. 252, article no. 117156, Jan. 2021.

การศึกษาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของหม้อไฟ The Study of Thermal Efficiency of hot-pot

อาทิตย คำต่าย^{1*} กรณัฏภพ รัตนวิจิตร¹ เลอศักดิ์ นาครินทร์²

¹ภาควิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม

มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี อำเภอมะนัง จังหวัดจันทบุรี 22000

²บริษัท พีทีที โกลบอล เคมิคอล จำกัด (มหาชน) อ.เมือง จังหวัดระยอง 21150

Artit Kamtai ^{1*} Kornpaphop Ruttanawijit¹ Lursukd Nakharintr²

¹Department of Energy Technology, Faculty of Industrial Technology,

Rambhai Barni Rajabhat University, Aumpher Muang, Chanthaburi Province, 22000

²PTT Global Chemical Public Company Limited, Aumpher Muang, Rayong Province, 21150

*Corresponding author Email: artit.k@rbru.ac.th

(Received: January 22, 2024; Revised: June 7, 2024 ; Accepted: July 30, 2024)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของหม้อไฟซึ่งเป็นอุปกรณ์ในครัวเรือนสำหรับประกอบอาหารและใช้กันแพร่หลายมาอย่างยาวนาน การศึกษาวิจัยครั้งนี้เลือกใช้หม้อไฟเบอร์ 22 ที่มีลักษณะรูปร่างและขนาดของช่องอากาศแตกต่างกัน 3 แบบที่สามารถพบเห็นได้ทั่วไปทำการทดลองโดยวิธีการต้มน้ำ Water Boiling Test (WBT) ใช้แอลกอฮอล์แข็งเป็นเชื้อเพลิง ผลจากการทดลองพบว่าหม้อไฟแบบที่ 1 ขนาดพื้นที่หน้าตัดช่องอากาศโดยรวม 36.41 cm^2 มีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดโดยเฉลี่ยเท่ากับ 40.22%, หม้อไฟแบบที่ 2 ขนาดพื้นที่หน้าตัดช่องอากาศโดยรวม 27.43 cm^2 มีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดโดยเฉลี่ยเท่ากับ 35.28% และหม้อไฟแบบที่ 3 ขนาดพื้นที่หน้าตัดช่องอากาศโดยรวม 35.61 cm^2 มีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดโดยเฉลี่ยเท่ากับ 30.50% โดยผลจากการทดลองแสดงให้เห็นว่ารูปร่างและขนาดของช่องทางการไหลของอากาศที่ต่างกันนั้นเป็นปัจจัยส่งผลทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนแตกต่างกันอย่างมีนัยยะ

คำสำคัญ: หม้อไฟ, ประสิทธิภาพเชิงความร้อน, วิธีการต้มน้ำ

ABSTRACT

This study is a thermal study of a hot pot, a household equipment for cooking and widely used for a long time. This research study used a size 22 hot pot with 3 different shapes and sizes of air flow that can be commonly seen. Experiments were conducted using the Water Boiling Test (WBT) method, using solid alcohol as fuel. It was found that type 1 hot pot has an overall air flow cross-sectional area of 36.41 cm^2 with maximum average thermal efficiency of 40.22%, type 2 hot pot has an overall air flow cross-sectional area of 27.43 cm^2 with maximum average thermal efficiency of 35.28% and type 3 hot pot has an overall air flow cross-sectional area of 35.61 cm^2 with maximum

average thermal efficiency of 30.50%, respectively. This research study shows that the different shapes and sizes of the air flow cross-sectional area are factors that cause significant differences in thermal efficiency.

Keyword: Hot pot, thermal efficiency, water boiling test.

1. บทนำ

หม้อไฟเป็นอุปกรณ์ในครัวเรือนที่ใช้กันแพร่หลายมาอย่างยาวนานในวิถีชีวิตของคนไทยสามารถพบเห็นได้ทั่วไปตามโรงแรมภัตตาคารหรือในงานเลี้ยงสังสรรค์เป็นวัฒนธรรมที่สืบทอดมาจากประเทศจีน โดยหม้อไฟเป็นเทคนิควิธีการปรุงอาหารแบบของชาวจีนประกอบด้วยการปรุงและต้มน้ำซุสให้เดือดภายในหม้อ ใส่ส่วนผสมและวัตถุดิบอื่นๆ เช่น เนื้อสัตว์ และผักชนิดต่างๆ ลงไปต้มให้สุกในน้ำซุสหรืออาจจะเป็นลักษณะของการลวก แล้วกินไปพร้อมในขณะการปรุงอาหาร[1,2] โดยลักษณะของหม้อไฟนั้นเปรียบเสมือนกับเตาไฟที่เชื่อมติดกับหม้อด้านบนเพื่อต้มและใส่วัตถุดิบโดยเชื้อเพลิงที่ใช้ในยุคเริ่มต้นการใช้งานอาจเป็นจากชีวมวลในการให้ความร้อน

แต่ในยุคปัจจุบันมีการพัฒนาเป็นเชื้อเพลิงแอลกอฮอล์แข็งที่สะดวกและง่ายต่อการใช้งาน และอีกทั้งยังพัฒนาไปจนถึงการใช้พลังงานความร้อนจากไฟฟ้าสามารถพบเห็นได้ทั่วไปตามภัตตาคารโรงแรมหรือร้านชาบู สุกี้ ในขณะที่หม้อไฟที่ใช้พลังงานความร้อนจากชีวมวลหรือแอลกอฮอล์แข็งนั้นที่พบเห็นและใช้กันอยู่ทั่วไปในปัจจุบันมีลักษณะรูปทรงที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับบริษัทผู้ผลิต แต่จะมีขนาดการเรียกของหม้อไฟนั้นแยกตามเบอร์ที่ต้องการใช้และเนื่องจากมีลักษณะการใช้งานคล้ายเตาไฟ แต่มีรูปทรงที่แตกต่างกัน โดยเฉพาะช่องทางของอากาศเข้าออกห้องเผาไหม้ และมีการใช้พลังงานความร้อนจากเชื้อเพลิงเหมือนกัน ดังนั้นประสิทธิภาพเชิงความร้อนของหม้อไฟจึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจในการศึกษาวิจัยในกรณีที่มีรูปทรงและขนาดช่องทางอากาศที่มีลักษณะแตกต่างกัน จากการทบทวนวรรณกรรมที่

เกี่ยวข้อง พบว่าการศึกษาวิจัยในหัวข้อของประสิทธิภาพเชิงความร้อนของหม้อไฟยังไม่มีงานเผยแพร่

คณะวิจัยมีแนวทางในทดลองหาค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนในลักษณะแบบ Water Boiling Test (WBT) [3,4,5,6] เพื่อเป็นทางเลือกที่มีความเหมาะสมในการนำไปใช้งาน อีกทั้งยังเป็นแนวทางในการพัฒนา ปรับปรุงต่อยอดค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน โดยใช้พลังงานที่มีอยู่ให้คุ้มค่าและเกิดประโยชน์สูงสุด [7,8]

2. วัสดุและอุปกรณ์

2.1 หม้อไฟ

ในการศึกษาวิจัยครั้งนี้ใช้หม้อไฟเบอร์ 22 ตามชื่อที่เรียกใช้งานลักษณะมีปล่องตรงกลางและวางขายตามท้องตลาดทั่วไปสามารถพบได้ 3 แบบ แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ลักษณะของหม้อไฟ

จากตารางที่ 1 ลักษณะช่องอากาศของหม้อไฟเบอร์ 22 ตามการเรียกใช้งาน แบบที่ 1 มีช่องอากาศหลัก 1 ช่อง ช่องอากาศช่วย 2 ช่อง มีพื้นที่หน้าตัด 32.69 cm^2 และ 1.88 cm^2 โดยมีพื้นที่หน้าตัดปากปล่อง 16.83 cm^2 และมีขนาดห้องเผาไหม้ 765.13 cm^3 แบบที่ 2 มีช่องอากาศหลัก 1 ช่อง ช่องอากาศช่วย 2 ช่อง มีพื้นที่หน้าตัด 19.69 cm^2 และ 3.87 cm^2 โดยมีพื้นที่หน้าตัดปากปล่อง 16.51 cm^2 และมีขนาดห้องเผาไหม้ 639.75 cm^3 แบบที่ 3 มีช่องอากาศหลัก 1 ช่อง ช่องอากาศช่วย 3 ช่อง มี

พื้นที่หน้าตัด 26.79 cm^2 และ 2.94 cm^2 โดยมีพื้นที่หน้าตัดปากปล่อง 19.55 cm^2 และมีขนาดห้องเผาไหม้ 689.53 cm^3

ตารางที่ 1 ลักษณะของช่องอากาศ

Type	ลักษณะของช่องอากาศ	
	ช่องอากาศหลัก	ช่องอากาศช่วย
1		
2		
3		

2.2 ห้องทดลอง

ห้องทดลองเนื่องจากในกระบวนการทดลองนั้นต้องป้องกันกระแสลมและอุณหภูมิสภาพแวดล้อมมารบกวน โดยทำการสร้างห้องทดลองรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าในติดตั้งด้วยฉนวนกันความร้อนและสามารถควบคุมอุณหภูมิภายในห้องขณะทำการทดลองได้ แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ห้องทดลอง

2.3 แอลกอฮอล์แข็ง

ในการทดลองหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของหม้อไอน้ำจะใช้แอลกอฮอล์แข็งเป็นเชื้อเพลิงในการให้ความร้อนโดยมีลักษณะคล้ายขี้ผึ้งเจลและคุณสมบัติสามารถจุดติดไฟทันที ไม่แสบตา ไม่มีควันและไม่มีการไหม้ขณะเผาไหม้ ปราศจากสิ่งเป็นพิษจึงไม่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ สะดวกต่อการใช้อยู่ และยังเป็นที่ยอมรับใช้งานกันอย่างแพร่หลายเนื่องจากมีราคาไม่แพง โดยมีค่าความร้อน

เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม [10] ไม่น้อยกว่า 4800 kcal/kg ในการให้ความร้อน แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 เชื้อเพลิงแอลกอฮอล์แข็ง

2.4 อุปกรณ์บันทึกผลการทดลอง

ในการทดลองครั้งนี้ใช้ Data Logger AI210 โดยเป็นอุปกรณ์ที่สามารถรับสัญญาณ Analog Input ได้ 8 ช่อง, Digital Input 4 ช่อง และควบคุม Digital Output ได้ 4 ช่อง โดยสามารถโปรแกรม Analog Input ให้ใช้ร่วมกับ Sensor หลายชนิด เช่น Thermocouple, RTD หรือ Voltage ในการบันทึกข้อมูลของอุณหภูมิมีค่าความคลาดเคลื่อน $\pm 0.2\%$ ใช้งานต่อร่วมกับเซนเซอร์วัดอุณหภูมิและคอมพิวเตอร์โดยผ่านโปรแกรม OD04 แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 อุปกรณ์บันทึกผล Data Logger

2.5 เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ

สำหรับวัดการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิน้ำและอุณหภูมิภายในห้องทดลองนั้นเลือกใช้สายเทอร์โมคัปเปิล Type K เป็นเซ็นเซอร์ผลิตจากโลหะ Nickel Alumel และ Nickel Chromium มีความแม่นยำสูง ตอบสนองรวดเร็ว เป็นที่ยอมรับใช้อย่างแพร่หลาย และมีช่วงการวัดอุณหภูมิที่กว้าง เหมาะสำหรับการวัดอุณหภูมิด้านสูง

มีช่วงการวัดอุณหภูมิอยู่ที่ -40°C ถึง $+1000^{\circ}\text{C}$ มีความคลาดเคลื่อน $\pm 1.5\%$ แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 เซนเซอร์วัดอุณหภูมิ

2.5 เครื่องชั่งดิจิทัล

ในการทดลองจะใช้เครื่องชั่งดิจิทัลเพื่อให้สะดวกในการอ่านค่าเป็นเครื่องมือที่ใช้วัดน้ำหนักของน้ำและเชื้อเพลิงแอลกอฮอล์แข็งซึ่งสามารถแสดงหน่วยวัดต่าง ๆ ได้เช่น กรัม (g) ออนซ์ (oz) ปอนด์ (lb) กิโลกรัม (Kg) กะรัต (ct) การใช้เครื่องชั่งจะช่วยให้การวัดปริมาณน้ำหนักได้อย่างละเอียดแม่นยำและรวดเร็ว โดยเครื่องชั่งดิจิทัลที่นำมาใช้งานมีช่วงการวัด 0.1g ถึง 1000g และมีความคลาดเคลื่อน $\pm 0.03\text{g}$ แสดงดังรูปที่ 6

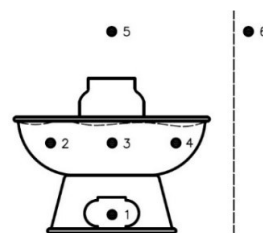


รูปที่ 6 เครื่องชั่งดิจิทัล

3. ขั้นตอนและวิธีการทดลอง

3.1 ติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิล

มีตำแหน่งการติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิล Type K ทั้งหมด 6 ตำแหน่ง แสดงดังตารางที่ 2 เพื่อให้ครอบคลุมระยะเวลาทุกช่วงของการวัดอุณหภูมิในขณะทำการทดลอง ดังแสดงในรูปที่ 7



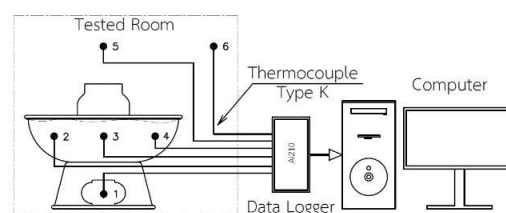
รูปที่ 7 ตำแหน่งติดตั้งสายเทอร์โมคัปเปิล

ตารางที่ 2 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิ

ลำดับ	ตำแหน่งสัญลักษณ์
1	ตำแหน่งที่ 1 ช่องอากาศหลัก
2	ตำแหน่งที่ 2 - 4 อุณหภูมิ น้ำ
3	ตำแหน่งที่ 5 ด้านบนปากปล่อง
4	ตำแหน่งที่ 6 อุณหภูมิห้องทดลอง

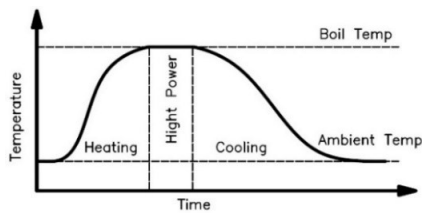
3.2 วิธีการทดลอง

การทดลองหาค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของหม้อไฟทั้ง 3 แบบ ใช้วิธีการ (Water Boiling Test) โดยทำซ้ำ 3 ครั้ง ทำการบันทึกผลข้อมูลการทดลองของหม้อไฟทั้ง 3 แบบลงในระบบคอมพิวเตอร์เพื่อทำการประมวลผลต่อไป แสดงดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 แผนภาพการทดลอง

พิจารณาครอบคลุมตลอดช่วงการทำงานของหม้อไฟผลการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ น้ำ [3,4,5,6] อัตราการใช้เชื้อเพลิงและค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของหม้อไฟ โดยควบคุมอุณหภูมิห้องทดลองที่ 25°C ในตำแหน่งการวัดที่ 6 โดยปราศจากกระแสลมภายนอกบริเวณ



รูปที่ 9 ช่วงของอุณหภูมิน้ำที่พิจารณา

ในการทดลองนั้นเพื่อการศึกษาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของหม้อไฟโดยการทดสอบแบบ Water Boiling Test (WBT) ครอบคลุมตลอดช่วงการทำงานของเตา (Heating, High Power, และ Low power หรือ Cooling) แสดงดังรูปที่ 9 เพื่อให้ทราบค่าประสิทธิภาพทางความร้อนที่แท้จริงของเตาตรงตามลักษณะการใช้งานจริงและสามารถคำนวณหาค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนได้จากสมการ

$$\eta = \left(\frac{M_w C_p (T_2 - T_1) M_e L}{M_f (H_f)} \right) \times 100 \quad (1)$$

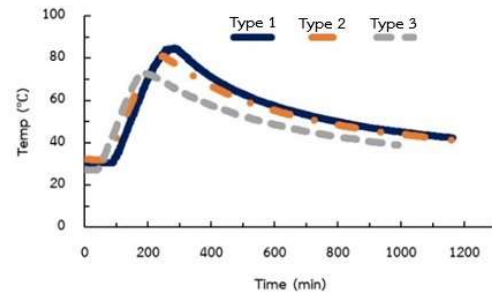
เมื่อ

- η ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน (%)
- M_w มวลของน้ำเริ่มต้น (kg)
- C_p ค่าความจุความร้อนเฉพาะของน้ำ (kJ/kg . °C)
- T_1 อุณหภูมิโดยเฉลี่ยของน้ำเริ่มต้น (°C)
- T_2 อุณหภูมิโดยเฉลี่ยของน้ำเริ่มเดือด (°C)
- M_e มวลน้ำกลายเป็นไอ (kg)
- L ความร้อนแฝงการระเหยน้ำเป็นไอ (kJ/kg)
- M_f มวลของเชื้อเพลิงที่ถูกเผาไหม้ (kg)
- H_f ค่าความร้อนของเชื้อเพลิง (kJ/kg)

4. ผลการทดลอง

ผลการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิน้ำโดยเฉลี่ยของหม้อไฟ ที่ตำแหน่ง 2, 3, และ 4 ทั้ง 3 แบบ ณ เวลาต่างๆ โดยทำซ้ำ 3 ครั้ง จากรูปที่ 10 พบว่าเมื่อเชื้อเพลิงติดไฟแล้วอุณหภูมิของน้ำจะเพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ โดยมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิน้ำพิจารณาค่าในช่วงของ Heating นั้นหม้อไฟใน

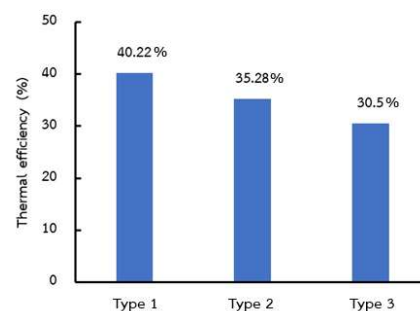
แต่ละแบบจะมีความแตกต่างกัน และอุณหภูมิน้ำที่จุดสูงสุดช่วงของ High Power อยู่ที่คงที่ในระยะเวลาสั้นๆ และเมื่อเชื้อเพลิงหมดอุณหภูมิของน้ำจะค่อยๆ ลดลงช่วงของ Cooling เท่ากับอุณหภูมิของห้องทดลอง



รูปที่ 10 การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิน้ำ

ผลการทดลองนี้จะครอบคลุมไปจนถึงค่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิน้ำเทียบกับเวลา (H_f) โดยใช้เทอร์โมคัปเปิลและอัตราการใช้เชื้อเพลิง (F_R) จากการใช้น้ำหนักเชื้อเพลิงโดยเฉลี่ยเทียบกับเวลา

จากตารางที่ 3 ข้อมูลการทดลองโดยเฉลี่ย 3 ครั้ง และรูปที่ 11 ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน พบว่าหม้อไฟแบบที่ 1 แบบที่ 2 และแบบที่ 3 มีค่าการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิน้ำ (H_f) ใกล้เคียงกันโดยเฉลี่ยเท่ากับ 8.45°C/min, 9.10°C/min และ 10.11°C/min มีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน(η) โดยเฉลี่ยเท่ากับ 40.22%, 35.28% และ 30.50% และในส่วนของการใช้เชื้อเพลิง (F_R) โดยเฉลี่ยเท่ากับ 5.28x10⁻³ kg/min, 5.86x10⁻³ kg/min และ 7.28x10⁻³ kg/min



รูปที่ 11 ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อน

ตารางที่ 3 ข้อมูลการทดลองโดยเฉลี่ย 3 ครั้ง

Data	Type		
	1	2	3
T_1 (°C)	29.62	29.84	26.80
T_2 (°C)	84.17	80.56	75.49
M_w (kg)	0.60	0.60	0.60
M_e (kg)	0.06	0.04	0.03
M_f (kg)	0.03	0.03	0.03
H_f (kcal/kg)	4800	4800	4800
C_p (kJ/kg °C)	4.18	4.18	4.18
L (kJ/kg)	2256	2256	2256
H_t (AV°C/min)	8.45	9.10	10.11
F_R (kg/min)	5.28×10^{-3}	5.86×10^{-3}	7.15×10^{-3}
η (AV. %)	40.22	35.28	30.50

โดยอุณหภูมิของหม้อไฟแบบที่ 1 ตำแหน่งที่ 1 มีค่าอุณหภูมิต่ำสุดโดยเฉลี่ยเท่ากับ 25.8°C และค่าอุณหภูมิสูงสุดโดยเฉลี่ยเท่ากับ 64.8°C ตำแหน่งที่ 5 มีค่าอุณหภูมิต่ำสุดโดยเฉลี่ยเท่ากับ 25.7°C และค่าอุณหภูมิสูงสุดโดยเฉลี่ยเท่ากับ 949.2°C

โดยอุณหภูมิของหม้อไฟแบบที่ 2 ตำแหน่งที่ 1 มีค่าอุณหภูมิต่ำสุดโดยเฉลี่ยเท่ากับ 25.5°C และค่าอุณหภูมิสูงสุดโดยเฉลี่ยเท่ากับ 55.6°C ตำแหน่งที่ 5 มีค่าอุณหภูมิต่ำสุดโดยเฉลี่ยเท่ากับ 25.9°C และค่าอุณหภูมิสูงสุดโดยเฉลี่ยเท่ากับ 923.7°C

โดยอุณหภูมิของหม้อไฟแบบที่ 3 ตำแหน่งที่ 1 มีค่าอุณหภูมิต่ำสุดโดยเฉลี่ยเท่ากับ 25.5°C และค่าอุณหภูมิสูงสุดโดยเฉลี่ยเท่ากับ 50.6°C ตำแหน่งที่ 5 มีค่าอุณหภูมิต่ำสุดโดยเฉลี่ยเท่ากับ 25.8°C และค่าอุณหภูมิสูงสุดโดยเฉลี่ยเท่ากับ 918.8°C

5. สรุป

ผลจากการวิจัยทดลองเพื่อศึกษาค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของหม้อไฟด้วยวิธีการ (Water Boiling Test) [8] พบว่าหม้อไฟแบบที่ 1 มีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดโดยเฉลี่ยเท่ากับ 40.22% มีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิน้ำโดยเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ $8.45^\circ\text{C}/\text{min}$ และอัตรา

การใช้เชื้อเพลิงโดยเฉลี่ย $5.28 \times 10^{-3} \text{ kg}/\text{min}$ รองลงมาคือหม้อไฟแบบที่ 2 และแบบที่ 3 โดยมีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนโดยเฉลี่ยเท่ากับ 35.28% และ 30.50% ตามลำดับ

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่ารูปทรงหม้อไฟและขนาดช่องทางการไหลของอากาศที่ต่างกันจากตารางที่ 1 นั้นมีผลทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนแตกต่างกัน และเนื่องด้วยหม้อไฟที่นำมาใช้ในการทดลองซึ่งมีอยู่แล้วในท้องตลาดโดยขนาดพื้นที่ช่องอากาศเข้าและออกแตกต่างกันจึงไม่สามารถนำมาเปรียบเทียบกันได้ แต่เป็นแนวทางในการเลือกใช้งานอย่างเหมาะสม

จากข้อมูลข้างต้นสามารถนำไปต่อยอดงานวิจัยในการพัฒนาและปรับปรุงหม้อไฟให้มีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงขึ้น

6 กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนส่งเสริมการเผยแพร่จากสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี

7 เอกสารอ้างอิง

- [1] M. Yu, T. Li, S. Wan, H. Song, Y. Zhang, A. Raza, C. Wang, H. Wang and H. Wang, "Study of aroma generation pattern during boiling of hot pot seasoning," *Journal of Food Composition and Analysis*, vol.114, pp.104844, 2022.
- [2] B. Wang, W. Wu, J. Liu, O. P. Soladoye, C. Ho, Y. Zhang, Y. Fu, "Flavor mystery of spicy hot pot base: Chemical understanding of pungent, numbing, umami and fragrant characteristics," *Trends in Food Science & Technology*, vol.139, pp.104137, 2023.
- [3] The Water Boiling Test Version 4.1.2, Cookstove Emissions and Efficiency in a Controlled Laboratory Setting, 2014.

- [4] F. Lombardi, F. Riva and E. Colombo, Guidelines for reporting and analysing laboratory test results for biomass cooking stoves. Version 1.0, 2017.
- [5] Y. Chean, G. Shen, S. Su, W. Du, Y. Huangfu, G. Liu, X. Wang, B. Xing, B. S, K.R. Tao, S. “Efficiencies and pollutant emissions from forced - draft biomass-pellet semi - gasifier stoves: Comparison of International and Chinese water boiling test protocols,” *Energy for Sustainable Development*, vol.32, pp.22-30, 2016.
- [6] Y. Chen, G. Shen, S. Su, W. Du, Y. Huangfu, G. Liu, X. Wang, B. Xing, K. R. Smith and S Tao, “Efficiencies and pollutant emissions from forced-draft biomass-pellet semi-gasifier stoves: Comparison of International and Chinese water boiling test protocols,” *Energy for Sustainable Development*, vol.32, pp.22-30, 2016.
- [7] T. Chaichana, M. Ali and M. Longsaman, “The Study of Thermal Efficiency of Household Cooking Stove,” *Journal of Science and Technology Mahasarakham University*, vol. 32, no.5, pp.626-630, 2013.
- [8] S. Wunsri, N. Podkumnerd and P. Sampim, “Development of Energy-Efficient Biomass Stove for Kanom Cung Num Dung Sticky Rice Processing in Bang Rieng Community, Khuan Niang District, Songkhla Province,” *Journal of Research Unit on Science, Technology and Environment for Learning*, vol. 12, no.1, pp.66-76, 2021.
- [9] S. Kaewluan, D. janthosee, S. Jansri and W. Piyarat, “Performance Testing of the 20 kW Biomass Gas Stove,” *Srinakharinwirot University Engineering Journal*, vol. 8, no. 1, pp. 24-33, 2013.
- [10] J. Rukijkanpanich and J. Sophonarunrat, “Biomass Pellets From Sugarcane Filter Cake And Bagasse For Household Charcoal Stove,” *Engineering Journal of Research and Development*, vol. 33, no. 2, pp.103-119, 2022.
- [11] Thai Industrial Standards Institute (TISI), Solid Alcohol Fuel TISI 950-2003.

ศักยภาพการผลิตเชื้อเพลิง RDF -5 จากขยะชุมชนผสมยางพารา ในพื้นที่อุทยานธรณีโลกจังหวัดสตูล

Production Potential of RDF -5 Fuel from Municipal Solid Waste Mixed with Natural Rubber in Satun Global Geopark

ทัศนีย์ ศรีมาชัย¹ พลพัฒน์ รวมเจริญ² ชัยยุทธ มิ่งงาม³ ศุภชัย ชัยณรงค์³ เกียรติศักดิ์ รัตนดิกล ณ ภูเก็ต^{1*}

¹ วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการ มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา วิทยาเขตสตูล จ.สตูล 91110

² คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา จ.สงขลา 90000

³ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา จ.สงขลา 90000

Tussanee Srimachai¹ Polpat Ruamcharoen² Chaiyoot Meengam³

Suppachai Chainarong³ Kiattisak Rattanadilok Na Phuket^{1*}

¹ College of Innovation and Management, Songkhla Rajabhat University, Satun Campus, Satun 91110

² Faculty of Science and Technology, Songkhla Rajabhat University Songkhla 90000

³ Faculty of Industrial Technology, Songkhla Rajabhat University Songkhla 90000

*Corresponding author Email: panpong1@hotmail.com

(Received: May 3, 2023; Revised: February 2, 2024 ; Accepted: August 13, 2024)

บทคัดย่อ

จังหวัดสตูลเป็นจังหวัดเล็กๆ ที่มีสถานที่ท่องเที่ยวที่มีชื่อเสียงระดับโลก เช่น เกาะหลีเป๊ะ มีปริมาณนักท่องเที่ยวประมาณ 1.04 ล้านคน/ปี และเมื่อวันที่ 17 เมษายน 2561 ได้รับการรับรองให้เป็นอุทยานธรณีโลกแห่งแรกของประเทศไทย ขยะเกือบทั้งหมดในพื้นที่อุทยานธรณีโลกถูกกำจัดที่ศูนย์กำจัดมูลฝอยแบบครบวงจร เทศบาลตำบลกำแพง อำเภอละงู จังหวัดสตูล ปัจจุบันมีขยะตกค้างจากชุมชนในศูนย์รวมกว่า 100,000 ตัน งานวิจัยนี้ทำการศึกษาอัตราส่วนขยะชุมชนต่อยางที่เหมาะสมเพื่อผลิตเชื้อเพลิง RDF-5 โดยศึกษาที่อัตราส่วน 100:0, 0:100, 95:5, 75:25 และ 50:50 ตามลำดับ ในระดับห้องปฏิบัติการ ผลการวิจัยพบว่า ค่าความร้อนเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วน (%) ของยางพารา(น้ำยางข้น)ที่เติม โดยค่าความร้อนของเชื้อเพลิง RDF-5 จะแปรผันตรงกับปริมาณของยางพาราเดิม อัตราส่วนที่มีค่าความร้อนดีที่สุดคือ อัตราส่วน 50:50 รองลงมาคือ 75:25, และ 95:5 มีค่าความร้อนเท่ากับ 41.63 MJ/kg, 41.54 MJ/kg และ 40.75 MJ/kg ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วน 100:0 มีค่าความร้อนเพียง 40.69 MJ/kg เท่านั้น การเพิ่มยางพาราลงในเชื้อเพลิง RDF-5 จะช่วยให้เชื้อเพลิงที่ผลิตได้มีคุณสมบัติติดไฟง่าย ให้ค่าความร้อนที่สูงขึ้นและได้มาตรฐานที่ภาคอุตสาหกรรมต้องการ ซึ่งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานร่วมกันอย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ: อุทยานธรณีโลกจังหวัดสตูล เชื้อเพลิง RDF-5 การจัดขยะมูลฝอยชุมชน ยางพารา

ABSTRACT

Satun Province is a small province with world-famous tourist attractions such as Koh Lipe. The number of tourists is about 1.04 million people/year. On April 17, 2018, it was certified as Thailand's first global geopark. Almost all of the waste in the World Geopark area is disposed of at the Integrated Waste Management Center, Kamphaeng Subdistrict, La-Ngu District, Satun Province. Currently, there are more than 100,000 tons of residual waste from the community in the center. This research investigated the optimal ratio of community waste to rubber for the production of RDF-5 fuel. The ratio of community waste to natural rubber was studied at the ratio of 100:0, 95:5, 90:10, 75:25, and 50:50, respectively. The results showed that the calorific value was increased in the ratio (%) of the added natural rubber (concentrated latex) and the heat value of the fuel is directly in ratio to the amount of natural rubber added. The ratio with the highest calorific value was 50:50, followed by 75:25 and 95:5. The calorific value was 41.63 MJ/kg, 41.54 MJ/kg, and 40.75 MJ/kg, respectively. Compared with 100:0 have a calorific value of 40.69 MJ/kg only. Adding natural rubber to RDF-5 fuels will increase the ignition time of the produced RDF-5 fuels and produce higher calorific values and cover the standards required by the industry, which had a synergism significantly.

Keyword: Satun UNESCO Global Geopark, RDF-5 fuel, Municipal solid waste management, Natural rubber.

1. บทนำ

จังหวัดสตูลเป็นจังหวัดเล็กๆ ที่มีแหล่งท่องเที่ยวที่มีชื่อเสียงระดับโลก เช่น เกาะหลีเป๊ะ และเมื่อ 17 เมษายน 2561 ได้รับการรับรองให้เป็นอุทยานธรณีโลกแห่งแรกของประเทศไทย สตูลจึงกลายเป็นแหล่งท่องเที่ยวใหม่ด้านธรณีวิทยาที่สำคัญระดับโลก พบว่าในปี 2561 มีผู้มาเยือน จำนวน 1.5 ล้านคน เป็นนักท่องเที่ยวจำนวน 1.04 ล้านคน เพิ่มขึ้นร้อยละ 8.43 จากปีก่อน [1] เกิดการใช้ทรัพยากรจำนวนมากและส่งผลให้เกิดปัญหาขยะล้นพบว่าปริมาณขยะที่เกิดขึ้นปี 2561 มีจำนวน 110,476 ตัน อัตราการเกิดขยะมูลฝอยเฉลี่ยระดับเทศบาลเมือง 1.15 กิโลกรัม/คน /วัน เทศบาลตำบล 1.02 กิโลกรัม/คน/วัน และองค์การบริหารส่วนตำบล 0.91 กิโลกรัม/คน/วัน [2] ในขณะที่ปริมาณขยะสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องมีอัตราการเกิดขยะต่อวันสูงกว่าอัตราการกำจัด ทำให้มีขยะเกะตักค้างจำนวนมากแต่การจัดการขยะในพื้นที่มีแค่เพียงวิธีการฝังกลบเพียงอย่างเดียวและมีพื้นที่สำหรับใช้ฝังกลบมีอยู่

อย่างจำกัด ทำให้ผู้รับผิดชอบไม่สามารถแก้ปัญหาขยะกำลังล้นเมืองได้

อำเภอละงู จังหวัดสตูล เป็นส่วนหนึ่งของอุทยานธรณีโลกสตูล ซึ่งเป็นแหล่งเรียนรู้อนุรักษ์และเป็นแหล่งท่องเที่ยวเชิงนิเวศแห่ง ใหม่ทางธรณีวิทยาที่สำคัญ นอกจากนี้ อำเภอละงู จังหวัดสตูล ยังมีแหล่งท่องเที่ยวที่มีชื่อเสียงหลายแห่ง เช่น ปราสาทหินพันยอด น้ำตกวังสายทอง อุทยานแห่งชาติหมู่เกาะเภตรา (เขตห้ามล่าสัตว์ป่า) ท่าเรือปากบารา (ลงเกาะหลีเป๊ะ) อำเภอละงู จังหวัดสตูล ประสบปัญหาขยะล้นโดยมีสาเหตุสำคัญจาก นักท่องเที่ยวเดินทางเข้ามาจำนวนมากโดยเฉพาะที่เกาะหลีเป๊ะ มีการจัดงานประเพณี/เทศกาล/งานประจำปีต่างๆ บ่อย เช่น งานเต่าโลก งานมรดกอันดามัน งานเทศกาลย้อนรอยหลอด เป็นต้น อำเภอละงู จังหวัดสตูล มีศูนย์กำจัดขยะแบบครบวงจรเทศบาลตำบลกำแพง แต่ก็ไม่เพียงพอในการจัดการ เนื่องจากนโยบายยกเลิกการจัดการขยะแบบเทกอง ซึ่งสร้างปัญหาสิ่งแวดล้อมและสุขภาพของคนในชุมชนรอบๆ บ่อขยะในทุกพื้นที่ขององค์กรปกครองส่วน

ท้องถิ่น ส่งผลให้บ่อขยะทุกแห่งต้องปิดลง และต้องนำขยะตกค้างเดิมที่ฝังกลบไม่หมดและขยะใหม่ที่เกิดขึ้นส่งมากำจัดที่ศูนย์กำจัดขยะแบบครบวงจรเทศบาลตำบลกำแพงศูนย์กำจัดฯ ต้องรับขยะจาก 18 หน่วยงาน จาก 5 อำเภอ (อำเภอละงู อำเภอกวนกาหลง อำเภอมะนัง อำเภอทุ่งหว้า และอำเภอเมือง (โซนเกาะหลีเป๊ะ)) ครอบคลุมพื้นที่ส่วนใหญ่ของอุทยานธรณีโลกจังหวัดสตูล ซึ่งต้องเสียค่ากำจัดตันละ 450 บาท นอกจากนี้ศูนย์ดังกล่าวยังต้องรับกำจัดขยะจาก อบต.เกาะสาหร่าย ซึ่งเป็นขยะจากเกาะหลีเป๊ะ ปัจจุบันบ่อฝังกลบขยะของศูนย์ฯ ซึ่งเปิดใช้มาประมาณ 4 ปี มีปริมาณขยะมากจนล้นคันดินไม่สามารถเสริมได้ มีขยะตกค้างและขยะใหม่ประมาณ 100,000 ตัน ซึ่งจากแผนบ่อขยะถูกออกแบบให้ใช้ฝังกลบขยะได้นาน 15 ปี ปัจจุบันมีปริมาณขยะเฉลี่ยเข้าสู่ศูนย์ฯ วันละ 50 ตัน สามารถคัดแยกขยะอินทรีย์ได้เพียง 2 ตัน ขยะรีไซเคิล 8 ตัน และฝังกลบ 40 ตัน นอกจากนี้ยังมีขยะจากเกาะหลีเป๊ะ จำนวน 300 ตัน/เดือน ซึ่งทำการขนมาทิ้งเดือนละ 2 ครั้ง ๆ ละ 150 ตัน ซึ่งลักษณะขยะไม่มีกรัดแยก ทั้งรวมกันในถัง 200 ลิตร ซึ่งทางศูนย์ไม่สามารถคัดแยกได้ ต้องฝังกลบทั้งหมด จากข้อมูลบริบทพื้นที่และรายงานผลการดำเนินการบริหารจัดการศูนย์กำจัดมูลฝอยแบบครบวงจร ทำให้ทราบปัญหาขยะล้นในพื้นที่ อำเภอละงู จังหวัดสตูล และความจำเป็นในการหามาตรการจัดการปัญหาอย่างเร่งด่วน ซึ่งถ้าปล่อยไว้แหล่งท่องเที่ยว และสิ่งแวดล้อมจะเสื่อมโทรมในเวลาอันรวดเร็ว ซึ่งจะส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจ รายได้ และ สุขภาวะของคนในชุมชนอย่างแน่นอน รวมทั้งส่งผลถึงเงื่อนไขการต่ออายุอุทยานธรณีโลกสตูลที่ถือว่าเป็นแหล่งเรียนรู้ทางธรณีที่สำคัญ ทีมวิจัยตระหนักถึงปัญหาดังกล่าว จึงได้กำหนดแนวทางในการจัดการปัญหาขยะล้นด้วยการผลิตเชื้อเพลิงแข็ง RDF-5 จากขยะชุมชนและขยะที่เผาไหม้ได้ จึงเป็นทางเลือกที่มีความเป็นไปได้มากที่สุด และมีค่าความร้อนสูงกว่าเชื้อเพลิงจากชีวมวลถึง 3 เท่า ในงานวิจัยนี้นำแนวคิดการนำน้ำยางธรรมชาติมาใช้เป็นตัวเชื่อมประสานในการผลิตเชื้อเพลิงแข็ง RDF-5 โดยมีสมมุติฐานว่าน้ำยางจะช่วยให้

เชื้อเพลิงแข็งที่ผลิตได้มีคุณสมบัติติดไฟง่ายและได้ค่าความร้อนที่สูงขึ้น และได้มาตรฐานที่ภาคอุตสาหกรรมต้องการ Jidapa Nithikul [3] ศึกษาศักยภาพการผลิตขยะเชื้อเพลิง RDF จากขยะชุมชนในเขตกรุงเทพมหานคร พบว่าขยะเชื้อเพลิงที่ผลิตได้ประกอบด้วยพลาสติกมากกว่าร้อยละ 40 ขยะจากการเกษตรร้อยละ 30 กระดาษไม่เกินร้อยละ 10 และเศษอาหารร้อยละ 10 ทนเกียรติ เกียรติศิริโรจน์ [4] สำรวจปริมาณและองค์ประกอบของขยะมหาวิทยาลัยเชียงใหม่และมหาวิทยาลัยแม่โจ้ เพื่อหาศักยภาพในการผลิตเชื้อเพลิง RDF-5 และพัฒนาเครื่องจักรที่ใช้ในการผลิตรวมทั้งวิเคราะห์ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและต้นทุน ผลการคำนวณต้นทุนการผลิตขยะเชื้อเพลิง RDF-5 พบว่าเท่ากับ 3.58 บาทต่อกิโลกรัม เท่าที่สืบค้นเอกสารรายงานวิจัย ยังไม่พบรายงานวิจัยที่ใช้น้ำยางหรือยางเป็นตัวประสาน (binder) สำหรับการผลิต RDF-5 ดังนั้นจึงไม่สามารถเปรียบเทียบกับ รายงานวิจัยที่ผ่านมาได้อย่างไรก็ตามขณะนี้ มีบทความวิจัยที่คล้ายคลึงกันที่เตรียม RDF-5 จากผงซีลี้อย กระดาษลัง ฤงพลาสติกพอลิเอทิลีน และข้าวสุกตากแห้ง โดยใช้กลีเซอรอลเป็นตัวประสาน [5] และใช้กระบวนการอัดรีด (extrusion) ในการเตรียม พบว่าการที่ใช้กลีเซอรอลเป็นตัวประสานทำให้ overall thermal efficiency เพิ่มขึ้นเหตุผลสำคัญที่โครงการนี้เลือกใช้ยางพาราเป็นตัวประสานเนื่องจากสมบัติของยางพารามีความเหนียวติดกันดี จึงคาดว่าจะสามารถยึดขยะให้เป็นแท่ง RDF-5 ได้อีกทั้งการใช้น้ำยางพาราเป็นตัวเชื่อมประสานใน RDF-5 ยังเป็นการเพิ่มปริมาณการใช้งานยางพาราซึ่งเป็นวัตถุดิบหมุนเวียนตามธรรมชาติที่หาได้ในท้องถิ่นภาคใต้ให้มากขึ้น

เพื่อให้ขยะที่ถูกคัดแยกบางประเภทสามารถนำไปเพิ่มมูลค่าด้วยการเป็นวัตถุดิบเริ่มต้นผลิตเชื้อเพลิงแข็ง (RDF-5) โดยจะไม่นำเอาขยะที่มีมูลค่ามาเกี่ยวข้องกับกระบวนการผลิต ประกอบกับงานวิจัยนี้ได้ถูกนำไปใช้ในกระบวนการประเมินค่าการต่ออายุของอุทยานธรณีโลกเมื่อเดือนมิถุนายน 2565 ที่ผ่านมา ตามเกณฑ์ “ข้อที่ 3

คือ การสื่อความหมายเพื่อให้ความรู้ด้านสิ่งแวดล้อม”
ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการพัฒนาศักยภาพ
การผลิต RDF-5 ในระดับห้องปฏิบัติการโดยศึกษา
อัตราส่วนที่เหมาะสมในการเติมน้ำยางธรรมชาติเพื่อผลิต
เชื้อเพลิง RDF-5 จากขยะชุมชน

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 การเตรียมขยะชุมชน

1. ขยะท้ายรางที่คัด ซึ่งก็เป็นขยะก่อนนำไปฝังกลบใน
หลุมฝังกลบ (รูปที่ 2) โดยทำการแยกขยะรีไซเคิลและขยะ
อินทรีย์ออกแล้ว (รูปที่ 1) ส่วนใหญ่เป็นถุงพลาสติก อายุ
การย่อยสลายประมาณ 450 ปี



รูปที่ 1 กระบวนการจัดการขยะของศูนย์จัดการขยะ
เทศบาลตำบลกำแพง อำเภอลงู จังหวัดสตูล

2. บดชิ้นงานขยะชุมชน (ขยะท้ายราง) ให้มีขนาด
ประมาณ 1-2 cm x 1-2 cm ด้วยเครื่องบดย่อย (รูปที่ 2)



รูปที่ 2 (ซ้าย) ขยะท้ายรางที่ใช้ในการทดลอง (ขวา) ขยะที่
ถูกบด ก่อนนำไปผสมกับยางพาราเพื่อผลิตเป็น RDF-5

2.2 การเตรียม RDF-5 ในระดับห้องปฏิบัติการ แบบกะ (Batch)

1. ผสมขยะชุมชนและน้ำยางข้น ในถังผสมพร้อมปั่น
กวนและให้ความร้อนเพื่อระเหยน้ำออกจากน้ำยาง โดย
แปรอุณหภูมิตั้งแต่ 50-90 °C และจับเวลาที่ใช้ในการ
ระเหยน้ำประมาณ 10 ในขั้นตอนนี้อัตราส่วนจะแทรกอยู่
ระหว่างเกร็ดขยะชุมชนและสามารถประสานให้ขยะชุมชน
ติดกันเป็นแท่งได้

2. จากนั้นกดอัดผลิตภัณฑ์ที่ได้จากข้อที่ 1 โดยใช้
แม่พิมพ์ที่มีขนาด (ศก 15-30 mm ยาว 30- 150 mm)
พร้อมให้ความร้อนโดยแปรอุณหภูมิ และหาอุณหภูมิ ของ
เครื่องกดอัดเพื่อให้ได้แท่งเชื้อเพลิง RDF-5 ต้นแบบที่มี
ความหนาแน่นตามที่มาตรฐานกำหนด (600 kg/m³)

3. เก็บข้อมูลผลการทดลอง เช่น อัตราส่วนของขยะ
ชุมชนต่อน้ำยางที่เหมาะสม ตลอดจนอุณหภูมิและเวลาที่ใช้
เพื่อเป็นข้อมูลพื้นฐานในการออกแบบเพื่อเตรียม RDF-
5 ในระบบต่อเนื่องต่อไป

2.3 การเตรียม RDF-5 ในระดับห้องปฏิบัติการ แบบต่อเนื่อง (continuous) โดยเครื่องต้นแบบ Fix Unit RDF-5 แบบต่อเนื่อง

1. ผสมขยะชุมชนที่บดแล้วจากเครื่องบดย่อยกับน้ำ
ยางข้น (DRC ประมาณ 60%) โดยแปรปริมาณเนื้อยาง
แห้งในช่วง 10-50% ของน้ำหนักขยะชุมชนดังแสดงใน
ตารางที่ 1 ในถังผสมระดับห้องปฏิบัติการ พร้อมปั่นกวน
ผสม ประมาณ 10 นาที เพื่อให้วัตถุดิบเข้ากัน

2. นำวัตถุดิบจากข้อที่ 1 ส่งระบบการอัดรีด
(extrusion) ด้วยเครื่องอัดรีดแบบสกรูเดี่ยว ที่มีการ
ควบคุมอุณหภูมิ 170 °C แล้วตัดตัวตัวอย่างเป็นท่อนตาม
ความยาวที่ต้องการเพื่อผลิตเป็นเชื้อเพลิง RDF-5
ยาวพาราจะเป็นหน้าที่เป็นตัวช่วยเชื่อมประสานอัตราส่วน
ของเชื้อเพลิงและจะเย็นตัวลงเองอย่างรวดเร็วตามอุณหภูมิ
ห้องเมื่อเชื้อเพลิง RDF-5 ออกจากเครื่องอัดรีด
(extrusion) นำเชื้อเพลิง RDF-5 ที่ผลิตได้ไปวิเคราะห์
คุณสมบัติทางกายภาพและเคมี

ขั้นตอนการผลิตเชื้อเพลิง RDF-แบบกะ (batch) และแบบต่อเนื่อง (continuous) แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 กระบวนการผลิต RDF-5 ในระดับห้องปฏิบัติการแบบกะ (Batch) และแบบต่อเนื่อง (continuous)

ตารางที่ 1 ปริมาณอัตราส่วนวัตถุดิบสำหรับเตรียม RDF-5 ที่ใช้ในการศึกษา

(อัตราส่วน) ขยะ ชุมชน:ยาง	ขยะชุมชน (g)	เนื้อยางแห้ง (g)
100:0	50.0	0
0:100	0	50.0
95:5	47.5	2.5
75:25	37.5	12.5
50:50	25.0	25.0

2.3 ศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพและทางเคมีของเชื้อเพลิง RDF-5 จากขยะชุมชนที่ผลิตได้เพื่อให้ได้มาตรฐานตามความต้องการของภาคอุตสาหกรรม

1. นำเชื้อเพลิงขยะ RDF-5 ที่ผลิตได้มาวิเคราะห์หาสมรรถนะของเชื้อเพลิงขยะ RDF-5 และผลภาวะตามวิธีมาตรฐาน ASTM ดังนี้ ค่าความร้อน (heating value) (มาตรฐานอยู่ในช่วง 13 - 18 MJ/kg), ASTM D 5865 ปริมาณสารที่ เผาไหม้ได้ (volatile matter), ASTM D 3172 ปริมาณเถ้า (ash), ASTM D 3174 และปริมาณความชื้น (moisture) ซึ่งการหาค่าความร้อนเป็นการวิเคราะห์โดยตรง โดยการนำตัวอย่างขยะเชื้อเพลิงมาบด

ให้มีขนาดเล็กประมาณ 1 มิลลิเมตร แล้วนำไปวิเคราะห์โดยวิธี Bomb Calorific Method ค่าความร้อนที่ได้เรียกว่า Dry Solid Calorific Value (DSCV) เป็นค่าความร้อนที่ได้จากการเผาไหม้อย่างสมบูรณ์

2. วิเคราะห์หาค่าความหนาแน่น (ASTM D3173), ค่าความชื้นและเวลาจุดติดไฟ (ASTM D792) ของเชื้อเพลิงขยะ RDF-5 ที่ผลิตได้

3. วิเคราะห์ Emission (Flue Gas Analyzer) ที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้ RDF-5 เช่น CO₂, NO₂, SO₂ และฝุ่นละออง เป็นต้น

3. ผลและวิจารณ์ผลการทดลอง

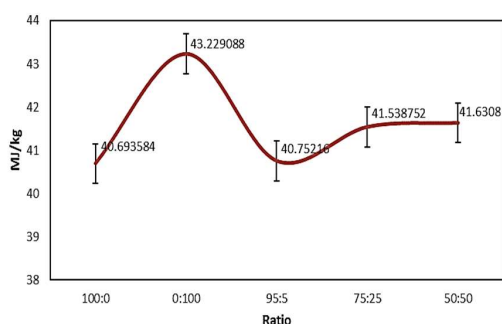
3.1 ผลของค่าความร้อนของเชื้อเพลิง RDF-5 ที่ผลิตได้

จากการวิเคราะห์คุณสมบัติของเชื้อเพลิง RDF-5 ที่จากขยะชุมชนที่มียางพาราเป็นตัวเชื่อมประสาน พบว่าค่าความร้อนจะเพิ่มขึ้นตามสัดส่วน (%) ของยางพาราที่เติมลงไป (ตารางที่ 2) ซึ่งค่าความร้อนของเชื้อเพลิงจะแปรผันตรงกับปริมาณของยางพารา โดยอัตราส่วนที่มีค่าความร้อนสูงสุด คือ อัตราส่วน 50:50 รองลงมาคือ 75:25, และ 95:5 มีค่าความร้อนเท่ากับ 41.63 MJ/kg, 41.54 MJ/kg และ 40.75 MJ/kg ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ผลของค่าความร้อนของเชื้อเพลิง RDF-5

อัตราส่วน ขยะชุมชน:ยาง	ขยะ ชุมชน (g)	เนื้อยาง แห้ง (g)	ผลการทดลอง ค่าความร้อน (MJ/kg)
100:0 (control)	50.0	0	40.69
0:100 (control)	0	50.0	43.23
95:5	47.5	2.5	40.75
75:25	37.5	12.5	41.54
50:50	25.0	25.0	41.63
Rubber (0:100) [7]	-	-	42.40

เมื่อเปรียบเทียบกับขยะชุมชนอย่างเดี่ยว (100:0) มีค่าความร้อนเพียง 40.69 MJ/kg การเติมยางพาราลงไป ในเชื้อเพลิง RDF-5 มีผลส่งเสริมการแบบ Synergism อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากยางพาราเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอนตามธรรมชาติ ซึ่งจะช่วยให้เกิดสันดาปทำให้เกิดติดไฟได้ง่ายเมื่อมีการสัมผัสกับความร้อนและออกซิเจน ส่งเสริมทำให้ค่าความร้อนเพิ่มสูงขึ้นเมื่อวัสดุชนิดนั้นมียางเป็นองค์ประกอบ จะเห็นว่าอัตราส่วนของเชื้อเพลิงในแต่ละอัตราส่วนมีค่าความร้อนสูงกว่ามาตรฐาน ASTM การผลิตเชื้อเพลิงแข็งที่ 15 MJ/kg [6] ดังนั้นสามารถนำเชื้อเพลิงละออัตราส่วนมาผลิตเป็นเชื้อเพลิง RDF-5 ได้ (รูปที่ 4)



รูปที่ 4 ค่าความร้อน RDF-5

3.2 ผลของค่าความหนาแน่น, ค่าความชื้นและเวลาจุดติดไฟ ของเชื้อเพลิงขยะ RDF-5 ที่ผลิตได้

ความชื้น และเวลาจุดติดไฟของเชื้อเพลิง RDF-5 จากขยะชุมชนโดยมียางพาราเป็นตัวเชื่อมประสานแต่ละอัตราส่วนลดลงตามปริมาณของยางพาราที่เติมลงไป เนื่องจากเนื้อยางพาราที่เติมลงไปเข้าแทนที่และระบายความชื้นออกไปทำให้ความชื้นของเชื้อเพลิงลดลงเมื่อมีปริมาณยางพาราเพิ่มมากขึ้น และปริมาณยางพาราที่เพิ่มขึ้นช่วยให้เวลาจุดติดไฟลดลงซึ่งก็คือการเพิ่มประสิทธิภาพการติดไฟทำให้เชื้อเพลิง RDF-5 จุดติดไฟได้ง่ายขึ้น (ตารางที่ 3) ค่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิงแต่ละอัตราส่วนแปรผกผันกับปริมาณยางพาราที่เติมลงไปส่งผลให้ค่าความหนาแน่นมีค่าลดลงเมื่อมีการเติมสัดส่วนของ

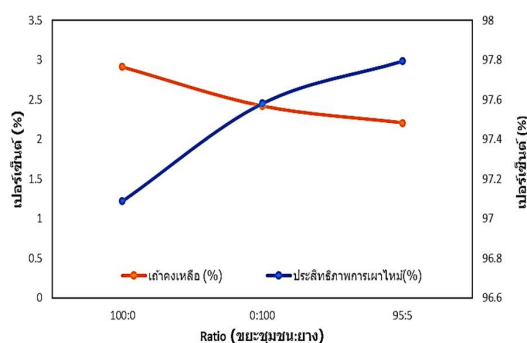
ยางพาราเพิ่มมากขึ้น ซึ่งตรงกันข้ามกับปริมาณค่าความร้อนที่ในรูปที่ 4 อาจเป็นเพราะยางพารามีคุณสมบัติความยืดหยุ่น (Elasticity) ยางธรรมชาติมีความยืดหยุ่นสูง โดยสามารถกลับคืนสู่รูปร่างที่มีขนาดเท่าเดิมหรือขนาดใกล้เคียงได้อย่างรวดเร็ว ภายหลังการเปลี่ยนแปลงรูปร่าง เนื่องจากการที่มีแรงภายนอกมากระทำ [8] จึงส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของ RDF-5 ลดลง เมื่อเติมยางพาราลงไป ในอัตราส่วนที่เพิ่มขึ้นจะช่วยในเรื่องค่าความร้อนที่เพิ่มขึ้น และยังส่งผลให้ปริมาณแกล้งลดลงด้วย เพราะทำให้เกิดการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ขึ้น เนื่องจากการเผาไหม้ที่สมบูรณ์ คือ การที่เชื้อเพลิงถูกใช้ไปเป็นพลังงานความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพ เกิด Emission และแก๊สน้อยกว่าการเผาไหม้แบบไม่สมบูรณ์ แต่การเติมยางพาราจะต้องอยู่ในปริมาณที่เหมาะสมด้วยถึงจะเป็นการส่งเสริมการแบบ Synergism เพราะต้องคำนึงถึงต้นทุนการผลิตที่เพิ่มขึ้นด้วยเมื่อดำเนินการในระดับอุตสาหกรรม จากการทดลองพบว่าทุกอัตราส่วนที่ใช้ในการทดลองมีค่าเกินมาตรฐาน ASTM ที่ 600 kg/m³ [6] สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิง RDF-5 ได้ จากผลการทดลองในตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่าทุกอัตราส่วนสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิง RDF-5 ได้

ตารางที่ 3 สมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของ RDF-5 จากขยะชุมชนที่มียางพาราเป็นตัวเชื่อมประสาน

รายการ	อัตราส่วนขยะชุมชนต่อยาง (โดยน้ำหนัก)			
	100:0	95:5	75:25	50:50
ค่าความร้อน (MJ/kg)	40.69	40.75	41.54	41.63
ปริมาณความชื้น (%)	0.87	0.36	0.17	0.09
ค่าความหนาแน่น (kg/m ³)	850	830	787	749
เวลาจุดติดไฟ (min)	20.41	12.67	11.04	10.19

จากรูปที่ 5 แสดงให้เห็นว่าที่อัตราส่วน 95:5 (ขยะชุมชน 95%+ ยาง 5%) ปริมาณแกล้งลดลง แสดงว่า

จากการทดลองเดิมยางพาราเป็นตัวเชื่อมประสานที่ 5% ทำให้กระบวนการเผาไหม้สมบูรณ์ขึ้นส่งผลให้ปริมาณเถ้าลอยลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับอัตราส่วน 100:0 (ขยะชุมชน 100%) และ 0:100 (ยาง 100%) ซึ่งเป็นประโยชน์ในการนำ RDF-5 ที่ใช้ประโยชน์ในเชิงอุตสาหกรรม เนื่องจากเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากกว่าการใช้เชื้อเพลิงประเภทอื่น ดังแสดงเปรียบเทียบในตารางที่ 4 ซึ่ง %Ash ของอัตราส่วน 95:5 (ขยะชุมชน 95%+ ยาง 5%) มีค่าเพียง 2.21% (รูปที่ 5) ซึ่งน้อยมากเมื่อเปรียบเทียบกับ RDF ประเภทอื่น ดังตารางที่ 4 การทดลองเดิมยางพาราเป็นตัวเชื่อมประสาน ทำให้กระบวนการเผาไหม้สมบูรณ์ขึ้นส่งผลให้เวลาในการจุดติดไฟของเชื้อเพลิงเร็วขึ้นหรือติดไฟได้ง่ายขึ้น เกิดปริมาณเถ้าเถ้าลดลง เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม แต่การเติมการเติมยางพาราลงไปในปริมาณที่สูงเกินไป อาจส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิต RDF-5 ทีมวิจัยจึงเลือกพัฒนา 95:5 (ขยะชุมชน 95%+ ยาง 5%) เป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการขยายเป็นระดับ Pilot-Scale ต่อไป เนื่องจากมีความเป็นไปได้ด้านประสิทธิภาพการเผาไหม้และด้านสิ่งแวดล้อม



รูปที่ 5 ประสิทธิภาพการเผาไหม้และเถ้าคงเหลือ(%)

3.3 ผลของ Emission ที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้เชื้อเพลิง RDF-5

จากการวิเคราะห์ Emission ที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้ RDF-5 (95:5) พบว่ามีค่า SO_2 เท่ากับ 1.05 ppm, CO_2 เท่ากับ 3.25 ppm, NO_x เท่ากับ 90.68 ppm และฝุ่นละออง 112.45 mg/m^3 ซึ่งทุกค่าผ่านมาตรฐาน

ของกรมควบคุมมลพิษ ผ่านมาตรฐานของ Emission ของโรงไฟฟ้าชีวมวลและมีค่าน้อยกว่า Emission ที่เกิดจากการเผาไหม้น้ำมันดีเซล ดังแสดงในตารางที่ 5

กระบวนการเผาไหม้ RDF-5 ปริมาณ Emission ขึ้นอยู่กับสัดส่วนอย่างพาราที่ที่เหมาะสมหรือปริมาณอย่างพาราที่นำมาใช้ผสม โดยเฉพาะคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) ส่วนปริมาณซัลเฟอร์ไดออกไซด์ (Sulfur Dioxide) น่าจะมีน้อยหรือไม่มีเลยเนื่องจากยางที่ใช้ในการทดลองไม่มีการใช้กรดที่มีสารประกอบของสารซัลเฟอร์ในกระบวนการผลิต อีกทั้งการใช้ RDF-5 น่าจะเป็นการลดปัญหา Emission เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณคาร์บอนที่เกิดขึ้นกับเชื้อเพลิงชนิดอื่น

ตารางที่ 4 องค์ประกอบทางเคมีของ RDF

RDF	Percent (%)							
	C	H	O	N	S	CL	H ₂ O	Ash
Paper	34.4	4.72	32.4	0.16	0.21	0.24	21	4.62
Plastic	56.4	7.79	8.05	0.85	0.29	3.00	15	8.59
wood	41.2	5.03	34.5	0.02	0.07	0.09	16	2.82
Textile	37.2	5.02	27.1	3.10	0.28	0.27	25	1.98
Leather, Rubber	43.1	5.37	11.6	1.34	1.17	4.978	10	22.5

ที่มา : [9]

ตารางที่ 5 ผลของ Emission ที่เกิดจากกระบวนการเผาไหม้ RDF-5 (95:5) เปรียบเทียบกับกระบวนการเผาไหม้น้ำมันดีเซลและค่ามาตรฐานของกรมควบคุมมลพิษ

Emission	RDF-5 (95:5)	Diesel [10]	Standard [11]	Standard [12]
SO_2 (ppm)	1.05	-	< 30	ไม่เกิน 60
CO_2 (ppm)	3.25	4.28	-	-
NO_x (ppm)	90.68	104.25	< 250	ไม่เกิน 200
ฝุ่นละออง (mg/m^3)	112.45	-	< 400	ไม่เกิน 120

4. สรุป

จากการศึกษาที่อัตราส่วนขยะชุมชนต่อยาง 100:0, 0:100, 95:5, 75:25 และ 50:50 ตามลำดับ ในระดับห้องปฏิบัติการ ผลการวิจัยพบว่า ค่าความร้อนเพิ่มขึ้นตามอัตราส่วน (%) ของยางพาราที่เติม ซึ่งค่าความร้อนของเชื้อเพลิงจะแปรผันตรงกับปริมาณของยางพาราที่เติม ความชื้นและเวลาจุดติดไฟของเชื้อเพลิง RDF-5 แต่ละอัตราส่วนลดลงตามปริมาณของยางพาราที่เติมลงไป เนื่องจากเนื้อยางพาราที่เติมลงไปเข้าแทนที่และระบายความชื้นออกไปทำให้ความชื้นของเชื้อเพลิงลดลงเมื่อมีปริมาณยางพาราเพิ่มมากขึ้น และปริมาณยางพาราที่เพิ่มขึ้นช่วยให้เวลาจุดติดไฟลดลงซึ่งก็คือการเพิ่มประสิทธิภาพการติดไฟ ทำให้เชื้อเพลิง RDF-5 จุดติดไฟได้ง่ายขึ้น ค่าความหนาแน่นของเชื้อเพลิงแต่ละอัตราส่วนแปรผกผันกับปริมาณยางพาราที่เติมลงไปส่งผลให้ค่าความหนาแน่นมีค่าลดลงเมื่อมีการเติมสัดส่วนของยางพาราเพิ่มมากขึ้น แต่การเติมการเติมยางพาราลงไปในปริมาณที่สูงเกินไป อาจส่งผลกระทบต่อต้นทุนการผลิต RDF-5 ทีมวิจัยจึงเลือกพัฒนาอัตราส่วน 95:5 (ขยะชุมชน 95%+ ยาง 5%) ในการทำการทดลองต่อไปเพื่อขยายขนาดของระบบ (Scale-up) เป็นระบบต้นแบบ (Prototype) กำลังการผลิต 1 ตัน/วัน เนื่องจากมีความเป็นไปได้ด้าน ประสิทธิภาพการเผาไหม้และด้านสิ่งแวดล้อมเนื่องจากค่า Emission ผ่านมาตรฐานของกรมควบคุมมลพิษ (SO_2 , CO_2 , NO_x และฝุ่นละออง) ตามประกาศราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 127 ตอนพิเศษ 7 ง หน้าที่ 18-20 ลงวันที่ 15 มกราคม 2553

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับเงินทุนอุดหนุนจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ ประจำปีงบประมาณ 2563 คณะผู้วิจัยขอขอบคุณผู้มีส่วนช่วยให้โครงการวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดีทุกคน ทั้งด้านข้อเสนอแนะทางวิชาการ แรงงานขอบคุณหลักสูตรเทคโนโลยีการยางและพอลิเมอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

ที่อำนวยความสะดวกในด้านเครื่องมือ สถานที่วิจัย และสุดท้ายขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงสำหรับมหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา ที่ได้สนับสนุนสถานที่ทำวิจัยและอำนวยความสะดวกในการทำวิจัยทำให้โครงการวิจัยนี้สามารถดำเนินการแล้วเสร็จลุล่วงตามวัตถุประสงค์ เพื่อประโยชน์สูงสุดในการพัฒนาประเทศต่อไป

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Satun Provincial Statistical Office, "Satun Provincial Statistical Report 2019", 2019.
- [2] Satun Provincial Natural Resources and Environment Office, "Satun Provincial Development Plan", 2019.
- [3] N. Jidapal, "Potential of refuse-derived production from Bangkok municipal solid waste," M.S. Thesis, Department of Environmental Engineering and Management, Chulalongkorn University, Bangkok, Thailand, 2007.
- [4] K. Thanongkiat, "Demonstration of the conversion of waste in the university to energy in the form of heat. Faculty of Engineering," Chiang Mai University, Chiang Mai, 2011.
- [5] J. Jindaporn and L. Chaloenporn, "Properties of Densified-Refuse Derived Fuel Using Glycerin as a Binder", *Energy procedia*, vol. 100, pp. 505-510, 2015.
- [6] W. Punin, S. Maneewan and C. Punlek, "The feasibility of converting solid waste into refuse-derived fuel 5via mechanical biological treatment process". *J. mater cycles waste manage*, vol.16, no. 4, 2013.
- [7] M. Ioelovich, "Energy Potential of Natural, Synthetic Polymers and Waste Materials - A

- Review”, *Academic Journal of Polymer Science*, vol. 1, no. 1, pp. 9-23, 2018.
- [8] S. Chitlada, “Natural rubber technology: New knowledge about natural rubber from molecular structure to industrial applications = Natural rubber technology,” Bangkok: Technobiz Communications, 2010.
- [9] F. D. Maria and Gregorio, “RDF to energy plant for a central Italian region SUW management system: Energetic and economical analysis”, *Journal of Thermal engineering*, vol. 26, pp. 1291-1300, 2006.
- [10] D. Nattawut, “Research report on the demonstration of waste conversion in universities to heat energy,” Bangkok: National Research Office, 2011.
- [11] Pollution Control Department, “Thailand Pollution Situation Report 2011,” Ministry of Natural Resources and Environment, 2011.
- [12] Pollution Control Department, “Announcement of the Ministry of Natural Resources and Environment on the determination of air pollution control standards from new power plants”, 2010.

ตัวแบบโปรแกรมเป้าหมายแบบหลายวัตถุประสงค์ที่ผสมผสานกับระบบอนุमानแบบ
ฟัซซี่สำหรับปัญหาการมอบหมายงานของหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงาน
An FIS-Integrated Multi-Objective Goal Programming Model for Cobot
Assignment Problem

มาริษา กิมาพร วุฒินันท์ นุ่นแก้ว*

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ปทุมธานี 12120

Marrisa Kimaporn Wuttinan Nunkaew*

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat School of Engineering,
Thammasat University, Pathum Thani, 12120

*Corresponding author Email: nwuttinan@engr.tu.ac.th

(Received: June 16, 2024; Revised: July 26, 2024; Accepted: August 15, 2024)

บทคัดย่อ

จากการที่ปัญหาการมอบหมายงานของหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานนั้นมีหลายปัจจัยที่เกี่ยวข้อง การพิจารณาเพียงปัจจัยเดียวตามวิธีมอบหมายงานแบบดั้งเดิมนี้ไม่สามารถการันตีคำตอบที่เหมาะสมที่สุดได้ งานวิจัยนี้จึงนำเสนอตัวแบบโปรแกรมเป้าหมายแบบหลายวัตถุประสงค์สำหรับการหาคำตอบของปัญหานี้ พร้อมด้วยการพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างพนักงาน หุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานและงาน ระบบอนุमानแบบฟัซซี่ถูกนำมาใช้ร่วมกันแบบผสมผสานในการวิเคราะห์หาค่าสมรรถนะและความพึงพอใจของการมอบหมายงานภายใต้เกณฑ์ 24 เกณฑ์ ผลจากการเปรียบเทียบแสดงให้เห็นว่าวิธีการที่นำเสนอให้ค่าสมรรถนะโดยรวมและค่าความพึงพอใจโดยรวมที่ดีกว่าวิธีการมอบหมายงานแบบดั้งเดิมที่พิจารณาเฉพาะฟังก์ชันของหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงาน

คำสำคัญ: ปัญหาการมอบหมายงานของหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงาน สมรรถนะ ความพึงพอใจ ตัวแบบการพิจารณาตามลำดับความสำคัญ

ABSTRACT

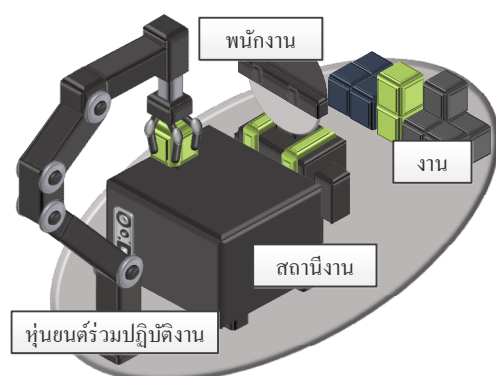
Due to facing multiple factors in the cobot assignment problem, considering only a single one as in the traditional assignment method cannot guarantee the optimal solution. This research then proposed a multi-objective goal programming model for solving this problem with the consideration of relationships between workers, cobots, and tasks. The Fuzzy Inference System (FIS) was integrated to analyze the performance and preference of the assignment based on 24 criteria. The comparison results demonstrated that the proposed method obtained the overall performance and preference values that overcome the conventional assignment method considering only cobot functions.

Keyword: Cobot assignment problem, performance, preference, lexicographic model.

1. บทนำ

ในช่วง 10 ปีที่ผ่านมาวิศวกรรมมีความพยายามที่จะพัฒนารูปแบบการผลิตไปสู่ยุคอุตสาหกรรม 5.0 หรือ “Industry 5.0” ที่เน้นการทำงานร่วมกันระหว่างมนุษย์และเครื่องจักร ซึ่งจะแตกต่างกับยุคอุตสาหกรรม 4.0 ที่ใช้เทคโนโลยีต่าง ๆ เช่น ข้อมูลมหัต (big data) อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things, IoT) ตลอดจนปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence, AI) ให้มีบทบาทหลักตลอดกระบวนการผลิต เพื่อทดแทนแรงงานมนุษย์ เช่นเดียวกับการใช้ “หุ่นยนต์อุตสาหกรรมแบบดั้งเดิม” (traditional industrial robot) แต่ในอุตสาหกรรม 5.0 นั้นจะเป็นการออกแบบกระบวนการผลิตโดยคำนึงถึงมนุษย์เป็นศูนย์กลาง [1] ซึ่งจะก่อให้เกิดความสมดุลระหว่างมนุษย์และเทคโนโลยีในกระบวนการผลิต [2]

แนวคิดความร่วมมือระหว่างมนุษย์กับหุ่นยนต์ (Human-Robot Collaboration, HRC) ถูกนำเสนอเป็นครั้งแรกในปี 1996 ในแนวคิดนี้ความหมายของหุ่นยนต์ถูกตั้งนิยามใหม่ด้วยคำว่า “หุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงาน” (Collaborative robot) หรือ “โคบอท” (Cobot) [3, 4] สิ่งสำคัญในการนำหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานเข้ามาใช้งานร่วมกับมนุษย์คือการใช้ประโยชน์จากลักษณะทางกายภาพของหุ่นยนต์ ความแม่นยำ ความสามารถในการทำซ้ำ และความแข็งแรง ควบคู่ไปกับความสามารถด้านการรับรู้ของมนุษย์ เช่น การแก้ปัญหา การตัดสินใจแบบเร่งด่วน และการรับรู้ด้วยสายตา [5, 6] ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การทำงานร่วมกันของมนุษย์และหุ่นยนต์

อย่างไรก็ตามในการใช้หุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานจำเป็นต้องมีการพิจารณาการทำงานระหว่างมนุษย์กับหุ่นยนต์อย่างรอบคอบ ทั้งในเรื่องความปลอดภัยของพนักงาน คุณภาพของงาน หรือความเสียหายจากการทำงานที่ผิดพลาดของหุ่นยนต์ ดังนั้นนอกเหนือจากการพิจารณาสมรรถนะในการผลิตแล้ว การพิจารณาข้อจำกัดของการทำงานของหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานก็เป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานแต่ละประเภทยามีคุณลักษณะทั้งในส่วนของฟังก์ชันการทำงาน คุณสมบัติของวัสดุ รวมถึงข้อจำกัดในการทำงานที่แตกต่างกันไป

นอกจากนี้การทำงานร่วมกันระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ทำให้เกิดปฏิสัมพันธ์ (interaction) อย่างใกล้ชิดระหว่างหุ่นยนต์กับพนักงาน ดังนั้นพนักงานจำเป็นต้องมีความรู้และทักษะที่เกี่ยวข้องกับหุ่นยนต์ที่ได้รับมอบหมายให้ทำงานร่วมด้วย อีกสิ่งหนึ่งที่มีความสำคัญคือสภาพจิตใจและสภาพร่างกายของพนักงาน [7, 8] ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญที่สุด เนื่องจากพนักงานที่ทำงานร่วมกับหุ่นยนต์นั้นไม่ควรที่จะได้รับบาดเจ็บจากการทำงาน ตกอยู่ในสถานการณ์ที่เป็นอันตรายต่อชีวิต หรือส่งผลกระทบต่อจิตใจ ดังนั้นเพื่อป้องกันข้อผิดพลาดเหล่านี้ การคำนึงถึงความรู้ควบคู่ไปกับความปลอดภัย ตลอดจนความพึงพอใจของพนักงานก็เป็นสิ่งสำคัญที่ไม่ยิ่งหย่อนไปกว่ากัน

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำเสนอวิธีการมอบหมายงานของหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานแบบหลายเกณฑ์ โดยพิจารณาความสัมพันธ์ขององค์ประกอบหลัก 3 ส่วนแบบเป็นคู่ (pairwise) ได้แก่ ความสัมพันธ์ระหว่างพนักงานกับงาน หุ่นยนต์กับงาน และพนักงานกับหุ่นยนต์ โดยใช้ระบบอนุมานแบบฟัซซีสำหรับการวิเคราะห์ผลการประเมินตามเกณฑ์ในแต่ละมุมมอง และทำการมอบหมายงานด้วยตัวแบบโปรแกรมเป้าหมายที่มีหลายวัตถุประสงค์ ซึ่งวิธีการที่นำเสนอสามารถกำหนดการมอบหมายงานที่มีการพิจารณาปัจจัยที่ครอบคลุมการทำงานร่วมกันระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์ได้ดีกว่าการพิจารณาเพียงปัจจัยหรือมุมมองเดียวในการมอบหมายงานแบบทั่วไป

2. การศึกษางานวิจัย

การใช้หุ่นยนต์ทำงานร่วมกับมนุษย์มีหลายปัจจัยที่ต้องพิจารณา ซึ่งมีงานวิจัยหลายงานที่ศึกษาและเสนอมุมมองในการจัดการ สามารถสรุปได้ดังนี้

งานวิจัยของ Malik and Bilberg [9] และ Ranz และคณะ [10] ได้นำเสนอการจัดสรรงาน (allocation of tasks) และการกระจายงาน (distribution of assembly tasks) โดยคำนึงถึงทักษะของมนุษย์และหุ่นยนต์ เพื่อเพิ่มคุณภาพงานและประสิทธิภาพในการทำงานร่วมกัน รวมถึงในงานวิจัยของ Bettoni และคณะ [7] และ Faccio และคณะ [11] ก็มีการเน้นถึงความสำคัญของการจัดสรรงานและการออกแบบพื้นที่ทำงานร่วมกันของมนุษย์และหุ่นยนต์ โดยเสนอวิธีการที่พิจารณาความปลอดภัยของพนักงาน ซึ่งมีวัตถุประสงค์ดังนี้ 1) เพิ่มผลผลิตสูงสุด 2) ทำให้มนุษย์สามารถทำงานร่วมกับหุ่นยนต์ได้อย่างปลอดภัย นอกจากนี้วิธีการวัดเวลา (Methods-Time Measurement) ยังถูกนำเสนอเพื่อคำนวณเวลาในแต่ละกระบวนการร่วมกับการใช้อัลกอริทึมทางพันธุกรรม (Genetic Algorithm, GA) ในการมอบหมายงานของหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงาน [12]

ในงานวิจัยของ Blankemeyer และคณะ [13] Tsarouchi และคณะ [14], Tsarouchi และคณะ [15], Faber และคณะ [16] ได้เสนอแนวคิดว่าการทำงานระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์นั้นช่วยเพิ่มความยืดหยุ่นและแบ่งเบาภาระงานที่ไม่เป็นไปตามหลักสรีรศาสตร์แต่ยังไม่แพร่หลายในบางอุตสาหกรรม เนื่องจากขาดข้อมูลและความรู้เกี่ยวกับการทำงานร่วมกัน งานวิจัยเหล่านี้จึงเสนอวิธีสำหรับการวางแผนการทำงานร่วมกันของมนุษย์และหุ่นยนต์ เช่น การประเมินความเหมาะสมของสถานที่ทำงาน การจัดตารางการทำงาน รวมถึงการมอบหมายงานให้กับมนุษย์และหุ่นยนต์

นอกจากนี้ยังได้มีการนำเสนอแนวคิดการมอบหมายงานของโคบอตร่วมกับปัญหาการจัดตารางการทำงานของการผลิตแบบตามสั่ง (cobot assignment in conjunction with the job shop scheduling problem) [17-19] ด้วยวิธีอัลกอริทึมทางพันธุกรรม

ร่วมกับการเข้ารหัสคีย์สุ่มแบบเอนเคออิง (hybrid genetic algorithm that incorporates biased random-key encoding) และการค้นหาบริเวณใกล้เคียงแบบแปรผัน (variable neighborhood search) ซึ่งมีวัตถุประสงค์หลักคือการหาผลรวมแบบมาตรฐาน (normalized sum) ของต้นทุนการผลิตและปริมาณการผลิตที่เหมาะสม ซึ่งจะช่วยให้งานทำงานร่วมกันระหว่างมนุษย์และหุ่นยนต์มีประสิทธิภาพการผลิต (production efficiency) ที่ดีขึ้น

จากการศึกษาวิจัยส่วนใหญ่มีการพิจารณาเพียงประเด็นเดียวเป็นหลัก เช่น การเลือกประเภทหุ่นยนต์ที่เหมาะสมกับพนักงานหรืองาน ด้วยการพิจารณาประสิทธิภาพการทำงานที่ดีที่สุด แต่มักมองข้ามการพิจารณาด้านความปลอดภัยหรือความพึงพอใจของพนักงาน [20-22] ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการวางแผนการทำงานแบบทั่วไปนั้นไม่เพียงพอที่จะสนับสนุนการทำงานร่วมกันของมนุษย์และหุ่นยนต์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงจำเป็นต้องมีการพิจารณาหลายเกณฑ์และหลายมุมมอง เพื่อให้การทำงานมีประสิทธิภาพ ตรงตามฟังก์ชันการทำงานของหุ่นยนต์ ตลอดจนมีสภาพแวดล้อมที่เอื้ออำนวยต่อการทำงาน สิ่งเหล่านี้จะช่วยสนับสนุนทั้งสมรรถนะโดยรวมในการทำงานและความปลอดภัยของพนักงาน [7, 23]

3. วิธีการที่นำเสนอ

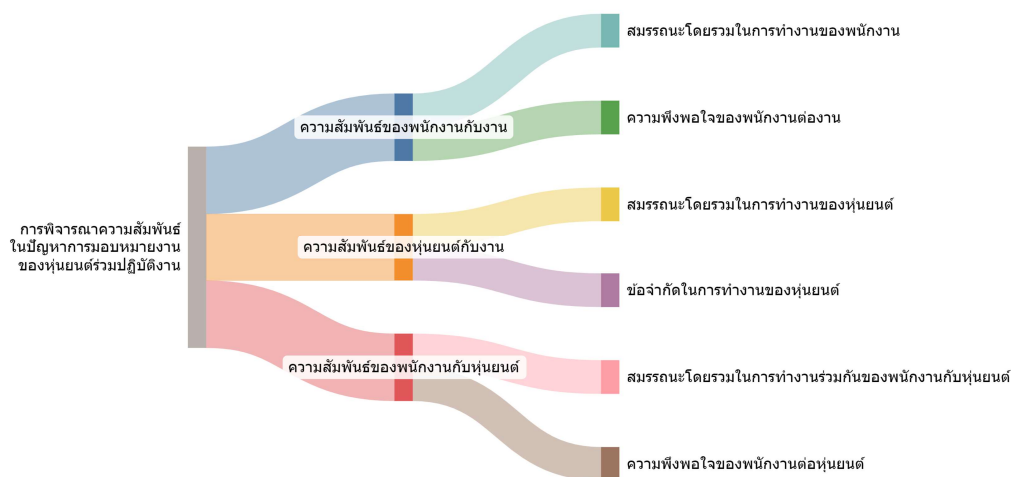
สำหรับรายละเอียดของวิธีการมอบหมายงานของหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานที่นำเสนอ ซึ่งประกอบไปด้วยเกณฑ์ ระบบอนุมานแบบฟัซซี และตัวแบบที่นำเสนอสามารถแสดงได้ดังนี้

3.1 เกณฑ์

การกำหนดเกณฑ์ (criteria) ที่ใช้สำหรับการประเมินเพื่อประกอบการตัดสินใจในการมอบหมายงานของหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานนั้นมีความสำคัญเป็นอย่างมาก เนื่องจากผลการประเมินนี้จะถูกนำไปวิเคราะห์เพื่อหาคำตอบของปัญหาการมอบหมายหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานในขั้นตอนถัดไป ดังนั้นเกณฑ์ที่ใช้จะมีอิทธิพลต่อการมอบหมายงานของหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานโดยตรง งานวิจัยนี้ได้กำหนดเกณฑ์

ภายใต้มุมมองในการพิจารณา (point of view) ตามความสัมพันธ์ในการทำงานร่วมกันขององค์ประกอบหลัก 3 ส่วน (พนักงาน หุ่นยนต์ และงาน) ของปัญหาการมอบหมาย หุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงาน ผู้วิจัยจึงแบ่งการพิจารณา

ความสัมพันธ์ออกเป็น 3 คู่ ได้แก่ ความสัมพันธ์ของพนักงานกับงาน ความสัมพันธ์ของหุ่นยนต์กับงาน และความสัมพันธ์ของพนักงานกับหุ่นยนต์ ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ความสัมพันธ์ภายใต้มุมมองที่นำเสนอ

ความสัมพันธ์ของพนักงานกับงาน (P_1) ประกอบไปด้วยมุมมองด้านสมรรถนะโดยรวมในการทำงานของพนักงาน 4 เกณฑ์ ($C_1 - C_4$) [8, 10, 12, 24-26] และมุมมองความพึงพอใจของพนักงานต่องาน 4 เกณฑ์ ($C_5 - C_8$) [16, 27-29] ซึ่งเกณฑ์ที่ใช้ใน P_1 นี้เกี่ยวข้องกับข้อมูลของทักษะของพนักงานแต่ละคนและความคิดเห็นของพนักงานที่มีต่อการทำงานนั้น ๆ

ความสัมพันธ์ของหุ่นยนต์กับงาน (P_2) ประกอบไปด้วยมุมมองสมรรถนะโดยรวมในการทำงานของหุ่นยนต์ 4 เกณฑ์ ($C_9 - C_{12}$) [6, 7, 10, 15, 30] และข้อจำกัดในการทำงานของหุ่นยนต์ 4 เกณฑ์ ($C_{13} - C_{16}$) [6, 13, 15, 31] ซึ่งเกณฑ์ที่ใช้ในกลุ่มนี้จะเกี่ยวข้องกับหุ่นยนต์และกระบวนการผลิตชิ้นงาน เช่น ฟังก์ชันการทำงานของหุ่นยนต์ คุณลักษณะพื้นที่ทำงานของหุ่นยนต์ (work envelope) เป็นต้น

ความสัมพันธ์ของพนักงานกับหุ่นยนต์ (P_3) ประกอบด้วยมุมมองสมรรถนะโดยรวมในการทำงานร่วมกันของหุ่นยนต์และพนักงาน 4 เกณฑ์ ($C_{17} - C_{20}$) [8, 10, 15, 32-34] และความพึงพอใจของพนักงานต่อหุ่นยนต์ 4 เกณฑ์ ($C_{21} - C_{24}$) [11, 20, 27, 35-37]

โดยในแต่ละมุมมองจะมีเกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณาที่เหมือนกันแต่จะขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์และมุมมองที่กำลังพิจารณา เช่น ความสามารถในการผลิต หากพิจารณาความสัมพันธ์ของพนักงานกับงานจะหมายถึงความสามารถในการผลิตชิ้นงานของพนักงาน ในขณะที่หากพิจารณาความสัมพันธ์ของหุ่นยนต์กับงานนั้นจะหมายถึงความสามารถในการผลิตชิ้นงานของหุ่นยนต์ และหากพิจารณาความสัมพันธ์ของหุ่นยนต์กับพนักงานจะหมายถึงความสามารถในการผลิตชิ้นงานร่วมกันของพนักงานและหุ่นยนต์ ซึ่งเกณฑ์ทั้งหมดที่ใช้ในการประเมินในแต่ละความสัมพันธ์สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เกณฑ์ที่ใช้ในการประเมินการทำงานตามมุมมองของความสัมพันธ์

P ₁ : ความสัมพันธ์ของพนักงานกับงาน	P ₂ : ความสัมพันธ์ของหุ่นยนต์กับงาน	P ₃ : ความสัมพันธ์ของพนักงานกับหุ่นยนต์
P ₁₋₁ : สมรรถนะโดยรวมในการทำงานของพนักงาน	P ₂₋₁ : สมรรถนะโดยรวมในการทำงานของหุ่นยนต์	P ₃₋₁ : สมรรถนะโดยรวมในการทำงานร่วมกันของพนักงานกับหุ่นยนต์
C ₁ : ความสามารถในการผลิต (หน่วย)	C ₉ : ความสามารถในการผลิต (หน่วย)	C ₁₇ : ความสามารถในการผลิตร่วมกัน (หน่วย)
C ₂ : คุณภาพของชิ้นงาน (ร้อยละ)	C ₁₀ : คุณภาพของชิ้นงาน (ร้อยละ)	C ₁₈ : คุณภาพของชิ้นงาน (ร้อยละ)
C ₃ : ความต่อเนื่องในการปฏิบัติงาน (ชั่วโมง)	C ₁₁ : รอบเวลาการผลิตที่เหมาะสม (ชั่วโมง)	C ₁₉ : ความต่อเนื่องในการปฏิบัติงานร่วมกัน (ชั่วโมง)
C ₄ : ทักษะการปฏิบัติงาน (คะแนน)	C ₁₂ : ฟังก์ชันการทำงานของหุ่นยนต์ (คะแนน)	C ₂₀ : ทักษะการควบคุมหุ่นยนต์ (คะแนน)
P ₁₋₂ : ความพึงพอใจของพนักงานต่องาน	P ₂₋₂ : ข้อจำกัดในการทำงานของหุ่นยนต์	P ₃₋₂ : ความพึงพอใจของพนักงานต่อหุ่นยนต์
C ₅ : การเคลื่อนไหวและการยศาสตร์ (คะแนน)	C ₁₃ : แรงและกำลังสูงสุด (คะแนน)	C ₂₁ : การเคลื่อนไหวและการยศาสตร์ (คะแนน)
C ₆ : ความยืดหยุ่นในการปฏิบัติงาน (คะแนน)	C ₁₄ : พื้นที่ทำงานของหุ่นยนต์ (คะแนน)	C ₂₂ : ความยืดหยุ่นในการควบคุมหุ่นยนต์ (คะแนน)
C ₇ : ความเครียดจากการปฏิบัติงาน (คะแนน)	C ₁₅ : ความเหมาะสมของวัสดุ (คะแนน)	C ₂₃ : ความกังวลจากการควบคุมหุ่นยนต์ (คะแนน)
C ₈ : การเปลี่ยนแปลงของงาน (คะแนน)	C ₁₆ : ความซับซ้อนของระบบ (คะแนน)	C ₂₄ : ความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน (คะแนน)

3.2 ระบบอนุมานแบบฟัซซี

ระบบอนุมานแบบฟัซซี (Fuzzy Inference System, FIS) เป็นเครื่องมือสำหรับใช้ในการวิเคราะห์เหตุการณ์ที่มีความคลุมเครือ มีความไม่แน่นอน หรือไม่ได้มีคำตอบแค่จริงหรือเท็จเท่านั้น แต่จะแสดงออกมาในรูปแบบเย่ ปานกลาง สูง หรือเรียกว่าตัวแปรภาษา (linguistic variable) [38] ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงใช้ FIS ในการวิเคราะห์ค่าจากการประเมินตามเกณฑ์ภายใต้การพิจารณาความสัมพันธ์ในการทำงานทั้ง 3 ความสัมพันธ์ (ดังตารางที่ 1) โดยใช้โปรแกรม MATLAB ซึ่งโครงสร้างพื้นฐานในการทำงานของระบบอนุมานแบบฟัซซีประกอบด้วยส่วนสำคัญ 4 ส่วนหลัก ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังนี้ [39-41]

ส่วนที่ 1 “การฟัซซิฟิเคชัน” (Fuzzification) คือการ

สร้างฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (membership function) และกำหนดพารามิเตอร์ในลักษณะของตัวแปรภาษา เพื่อใช้สำหรับการแปลงข้อมูลป้อนเข้าแบบตัวเลข (crisp input) ให้เป็นข้อมูลป้อนเข้าแบบฟัซซี (fuzzify input) โดยการกำหนดฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบสี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal Membership Function, TrapMF) ของตัวแปรป้อนเข้าและตัวแปรผลลัพธ์นั้น ผู้วิจัยได้กำหนดค่าของพารามิเตอร์ทั้ง 3 ระดับ (B , N , H) ด้วยการวิเคราะห์ช่วงของข้อมูลที่ได้มาจากผลของแบบสอบถาม โดยผู้เชี่ยวชาญสำหรับความสัมพันธ์ทั้ง 3 มุมมอง ($P_1 - P_3$) ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าพารามิเตอร์ของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกแบบ TrapMF

P ₁ : ความสัมพันธ์ของพนักงานกับงาน				P ₂ : ความสัมพันธ์ของหุ่นยนต์กับงาน				P ₃ : ความสัมพันธ์ของพนักงานกับหุ่นยนต์			
เกณฑ์	เย่	ปานกลาง	สูง	เกณฑ์	เย่	ปานกลาง	สูง	เกณฑ์	เย่	ปานกลาง	สูง
(Criteria) (Bad: B)	(Normal: N)	(High: H)		(Criteria) (Bad: B)	(Normal: N)	(High: H)		(Criteria) (Bad: B)	(Normal: N)	(High: H)	
C ₁	[40 40 50 60]	[50 60 70 80]	[70 80 100 100]	C ₉	[40 40 50 60]	[50 60 70 80]	[70 80 100 100]	C ₁₇	[40 40 50 60]	[50 60 70 80]	[70 80 100 100]
C ₂	[0 0 20 40]	[20 40 50 70]	[50 70 100 100]	C ₁₀	[0 0 20 40]	[20 40 50 70]	[50 70 100 100]	C ₁₈	[0 0 20 40]	[20 40 50 70]	[50 70 100 100]
C ₃	[1 1 1.33 1.67]	[1.33 1.67 2 2.5]	[2 2.5 3 3]	C ₁₁	[1 1 1.33 1.67]	[1.33 1.67 2 2.5]	[2 2.5 3 3]	C ₁₉	[1 1 1.33 1.67]	[1.33 1.67 2 2.5]	[2 2.5 3 3]
C ₄	[0 0 3 5]	[3 5 6 8]	[6 8 10 10]	C ₁₂	[0 0 3 5]	[3 5 6 8]	[6 8 10 10]	C ₂₀	[0 0 3 5]	[3 5 6 8]	[6 8 10 10]
FIS _{WH}	[0 0 0.25 0.4]	[0.25 0.4 0.6 0.75]	[0.6 0.75 1 1]	FIS _{RH}	[0 0 0.25 0.4]	[0.25 0.4 0.6 0.75]	[0.6 0.75 1 1]	FIS _{WR}	[0 0 0.25 0.4]	[0.25 0.4 0.6 0.75]	[0.6 0.75 1 1]
C ₅	[0 0 3 5]	[3 5 6 8]	[6 8 10 10]	C ₁₃	[0 0 3 5]	[3 5 6 8]	[6 8 10 10]	C ₂₁	[0 0 3 5]	[3 5 6 8]	[6 8 10 10]
C ₆	[0 0 3 5]	[3 5 6 8]	[6 8 10 10]	C ₁₄	[0 0 3 5]	[3 5 6 8]	[6 8 10 10]	C ₂₂	[0 0 3 5]	[3 5 6 8]	[6 8 10 10]
C ₇	[0 0 3 5]	[3 5 6 8]	[6 8 10 10]	C ₁₅	[0 0 3 5]	[3 5 6 8]	[6 8 10 10]	C ₂₃	[6 8 10 10]	[3 5 6 8]	[0 0 3 5]
C ₈	[0 0 3 5]	[3 5 6 8]	[6 8 10 10]	C ₁₆	[0 0 3 5]	[3 5 6 8]	[6 8 10 10]	C ₂₄	[6 8 10 10]	[3 5 6 8]	[0 0 3 5]
FIS _{HW}	[0 0 0.25 0.4]	[0.25 0.4 0.6 0.75]	[0.6 0.75 1 1]	FIS _{HR}	[0 0 0.25 0.4]	[0.25 0.4 0.6 0.75]	[0.6 0.75 1 1]	FIS _{RW}	[0 0 0.25 0.4]	[0.25 0.4 0.6 0.75]	[0.6 0.75 1 1]

ส่วนที่ 2 การกำหนด “กฎแบบฟัซซี่” (Fuzzy rule) ซึ่งจะใช้สำหรับการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรป้อนเข้าและตัวแปรผลลัพธ์ ซึ่งในกรณีนี้ตัวแปรป้อนเข้าจะหมายถึง เกณฑ์ (criteria: C_1 - C_{24}) และตัวแปรผลลัพธ์จะหมายถึงค่าสมรรถนะโดยรวมและค่าความพึงพอใจของแต่ละความสัมพันธ์ ($FIS_{WH, HW}$, $FIS_{RH, HR}$, $FIS_{WR, RW}$) โดยกฎที่ใช้ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างเกณฑ์กับค่าสมรรถนะโดยรวมและค่าความพึงพอใจจะอยู่ในรูปแบบของ “If-Then” [42] ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 กฎแบบฟัซซี่สำหรับการวิเคราะห์ความสัมพันธ์

กฎที่	$C_{1,5,9,13,17,21}$	$C_{2,6,10,14,18,22}$	$C_{3,7,11,15,19,23}$	$C_{4,8,12,16,20,24}$	$FIS_{WH, HW, RH, HR, WR, RW}$
1	High	High	High	High	High
2	High	Normal	High	High	High
3	High	High	Normal	High	High
4	High	High	High	Normal	High
5	Normal	High	High	High	High
6	High	High	Bad	High	Bad
7	High	High	Bad	Normal	Bad
8	Normal	High	Bad	High	Bad
9	Normal	High	Bad	Normal	Bad
10	High	Normal	Normal	High	Normal
11	High	Normal	High	Normal	Normal
12	High	High	Normal	Normal	Normal
13	High	Normal	Normal	Normal	Normal
14	Normal	Normal	High	High	Normal
15	Normal	High	Normal	High	Normal
16	Normal	Normal	Normal	High	Normal
17	Normal	High	High	Normal	Normal
18	Normal	Normal	High	Normal	Normal
19	Normal	High	Normal	Normal	Normal
20	Normal	Normal	Normal	Normal	Normal

ส่วนที่ 3 การกำหนด “กลไกการอนุมานแบบฟัซซี่” (Fuzzy inference engine) เป็นขั้นตอนที่ทำการตรวจสอบข้อมูลป้อนเข้าผ่านกฎที่กำหนดขึ้นจากส่วนที่ 2 เพื่อใช้ในการตีความหาผลลัพธ์ โดยในงานวิจัยฉบับนี้จะใช้การอนุมานแบบแมมดานิชนิดที่ 1 (Mamdani Type I) ซึ่งนำเสนอโดยศาสตราจารย์ Ebrahim Mamdani ในปี ค.ศ. 1975 [43] โดยใช้วิธีการจัดองค์ประกอบค่าสูงสุด-ค่า

ต่ำสุด (max-min inference) ซึ่งวิธีการกำหนดกลไกการอนุมานให้กับระบบอนุมานแบบฟัซซี่แสดงได้ดังรูปที่ 3

รูปที่ 3 การกำหนดรายละเอียดของ FIS แบบ Mamdani Type I ในโปรแกรม MATLAB

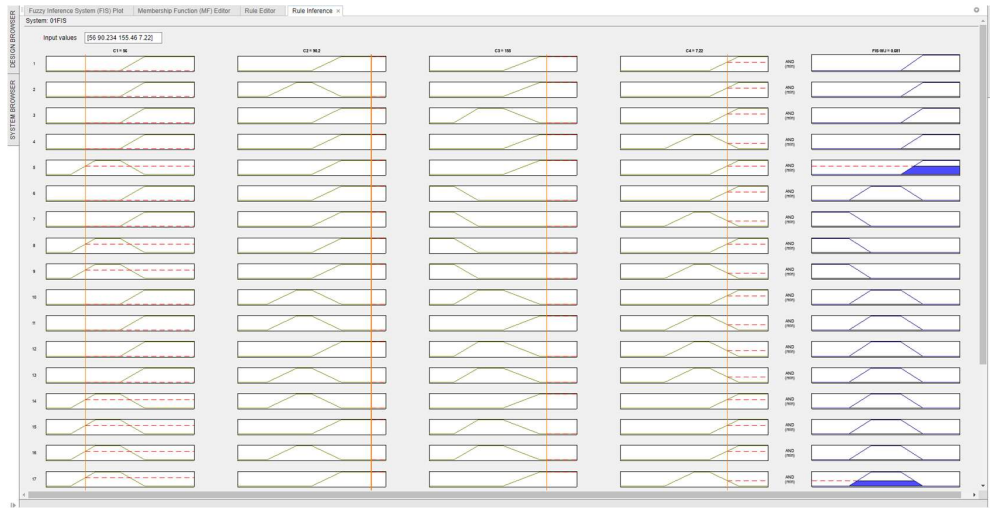
ส่วนที่ 4 “การดีฟัซซิฟิเคชัน” (Defuzzification) เป็นการแปลงข้อมูลที่อยู่ในรูปแบบของฟัซซี่ให้กลับไปเป็นค่าผลลัพธ์แบบตัวเลข (crisp output) เช่นเดียวกับข้อมูลป้อนเข้า รวมถึงเป็นการสรุปผลและสามารถนำค่าที่ได้ไปใช้งานต่อ ซึ่งวิธีการที่เป็นที่นิยมในปัจจุบันและเป็นวิธีการที่ใช้ในงานวิจัยฉบับนี้คือวิธีการหาจุดศูนย์ถ่วง (Center of Gravity, COG) ตัวอย่างการหาค่าสมรรถนะโดยรวมของพนักงานคนที่ 1 ในการทำงานที่ 1 ซึ่งตรงกับกฎข้อที่ 5 และ 17 มีรายละเอียดดังนี้

$$[C_1, C_2, C_3, C_4] = [56, 90.23, 155.46, 7.22]$$

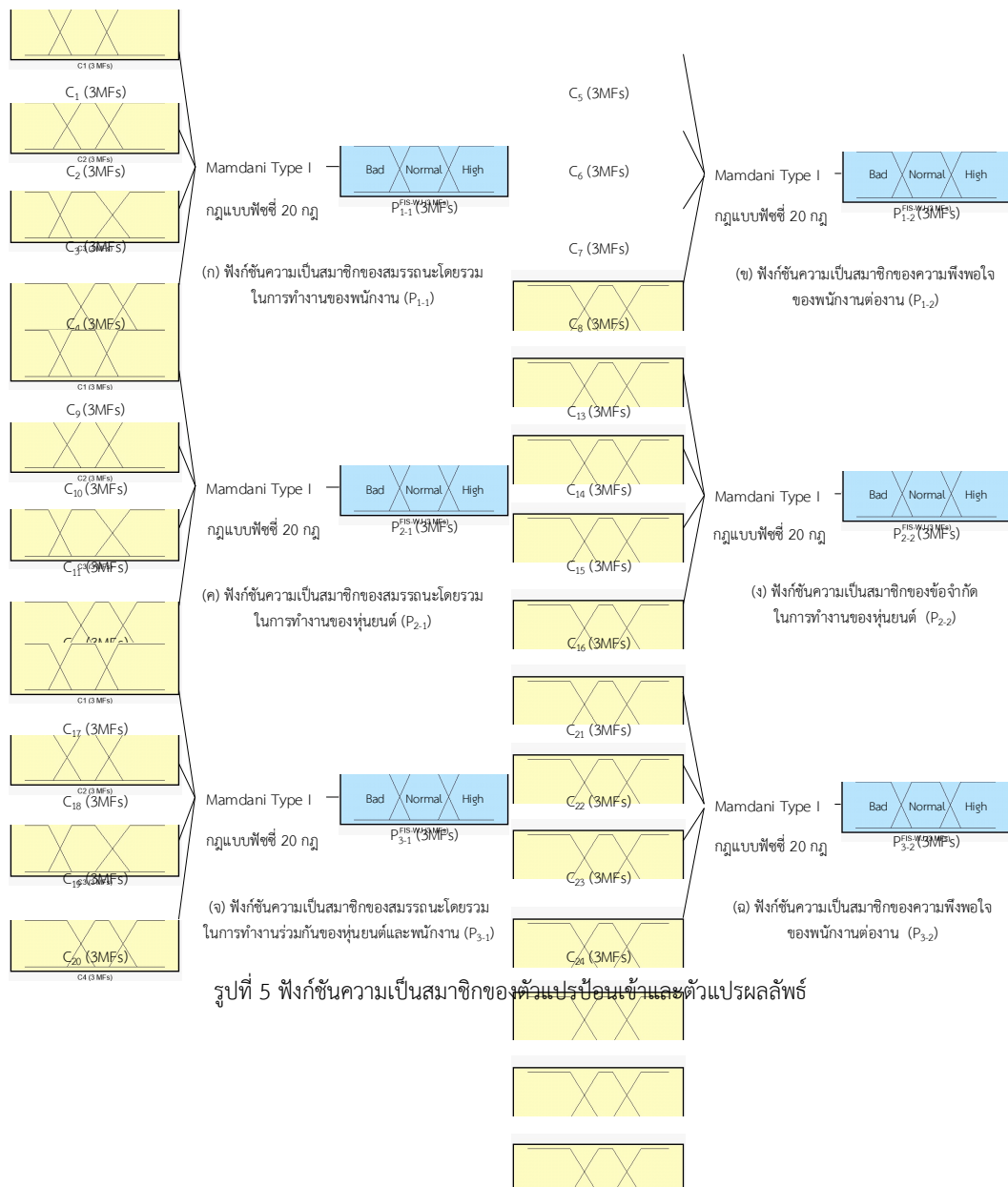
กฎที่ 5: If C_1 is Normal and C_2 is High and C_3 is High and C_4 is High Then FIS_{WJ} is High

กฎที่ 17: If C_1 is Normal and C_2 is High and C_3 is High and C_4 is Normal Then FIS_{WJ} is Normal

รูปที่ 4 เป็นตัวอย่างการหาค่า COG ด้วยโปรแกรม MATLAB โดยแต่ละคอลัมน์จะค่าความเป็นสมาชิกของตัวแปรป้อนเข้าและตัวแปรผลลัพธ์ (คอลัมน์ขวาสุด) ตามกฎทั้ง 20 กฎ (ในแต่ละแถว) และรูปที่ 5 เป็นการแสดงความสัมพันธ์ของฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวแปรป้อนเข้าและตัวแปรผลลัพธ์



รูปที่ 4 การดัดแปลงฟัซซี่เซตด้วยโปรแกรม MATLAB ของพนักงานคนที่ 1 ในการทำงานที่ 1



รูปที่ 5 ฟังก์ชันความเป็นสมาชิกของตัวแปรป้อนเข้าและตัวแปรผลลัพธ์

3.3 ตัวแบบที่นำเสนอสำหรับการมอบหมายงานของ หุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงาน

ในการมอบหมายงานของหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานด้วย
ตัวแบบที่มีการพิจารณาตามลำดับความสำคัญของ
วัตถุประสงค์ (Lexicographic Goal Programming
model, LGP) มีรายละเอียดดังนี้

ดัชนี (Index sets)

w = พนักงานคนที่ $w = 1, 2, 3, \dots, W$

h = งานที่ $h = 1, 2, 3, \dots, H$

r = หุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานตัวที่ $r = 1, 2, 3, \dots, R$

t = วัตถุประสงค์ที่ $t = 1, 2, 3, \dots, T$

ตัวแปรตัดสินใจ (Decision variables)

x_{rwh} = การมอบหมายพนักงานคนที่ w ให้กับงานที่ h
สำหรับหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานตัวที่ r

y_{wr} = การมอบหมายพนักงานคนที่ w ให้หุ่นยนต์ร่วม
ปฏิบัติงานตัวที่ r

η_t = ค่าเบี่ยงเบนเชิงลบของวัตถุประสงค์ลำดับที่ t

พารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง (Related parameters)

fis_{wh} = ค่าสมรรถนะของการพิจารณาพนักงานคนที่ w
ให้กับงานที่ h

fis_{rh} = ค่าสมรรถนะของการพิจารณาหุ่นยนต์ร่วม
ปฏิบัติงานตัวที่ r ให้กับงานที่ h

fis_{wr} = ค่าสมรรถนะของการพิจารณาพนักงานคนที่ w
ให้กับหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานตัวที่ r

fis_{hw} = ค่าความพึงพอใจของการพิจารณางานที่ h
ให้กับพนักงานคนที่ w

fis_{hr} = ข้อจำกัดของการพิจารณางานที่ h ให้กับ
หุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานตัวที่ r

fis_{rw} = ค่าความพึงพอใจของการพิจารณาหุ่นยนต์ร่วม
ปฏิบัติงานตัวที่ r ให้กับพนักงานคนที่ w

$m_w^{\min}$ = จำนวนหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานขั้นต่ำของพนักงาน
คนที่ w

$nr_w^{\max}$ = จำนวนหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานสูงสุดของพนักงาน
คนที่ w

$nh_r^{\min}$ = จำนวนงานขั้นต่ำของหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานตัว
ที่ r

$nh_w^{\min}$ = จำนวนงานขั้นต่ำของพนักงานคนที่ w

$nh_w^{\max}$ = จำนวนงานสูงสุดของพนักงานคนที่ w

τ_t = ค่าเป้าหมายของวัตถุประสงค์ลำดับที่ t

η_t^* = ค่าเบี่ยงเบนเชิงลบของวัตถุประสงค์ลำดับที่ t ที่
ยอมรับได้

สมการวัตถุประสงค์ (Objective functions)

วัตถุประสงค์ลำดับที่ 1 จะเป็นการหาค่าสมรรถนะ
โดยรวมเฉลี่ยที่สูงที่สุดในการพิจารณาความสัมพันธ์ของ
สมรรถนะในการปฏิบัติงานของพนักงาน สมรรถนะในการ
ทำงานของหุ่นยนต์ สมรรถนะในการปฏิบัติงานร่วมกับ
หุ่นยนต์ของพนักงาน โดยสามารถแสดงดังสมการที่ (1)

$$\max Z_1 = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{H} \sum_{r=1}^R \left(\sum_{w=1}^W \sum_{h=1}^H x_{rwh} fis_{wh} \right) + \frac{1}{H} \sum_{w=1}^W \left(\sum_{r=1}^R \sum_{h=1}^H x_{rwh} fis_{rh} \right) + \frac{1}{R} \sum_{r=1}^R \sum_{w=1}^W y_{wr} fis_{wr} \right) \quad (1)$$

วัตถุประสงค์ลำดับที่ 2 จะเป็นการหาค่าความพึง
พอใจโดยรวมเฉลี่ยที่สูงที่สุดในการพิจารณาความสัมพันธ์
ระหว่างความพึงพอใจของพนักงานที่มีต่องาน ข้อจำกัดใน
การทำงานของหุ่นยนต์ ความพึงพอใจของพนักงานต่อ
หุ่นยนต์ โดยสามารถแสดงดังสมการที่ (2)

$$\max Z_2 = \frac{1}{3} \left(\frac{1}{H} \sum_{r=1}^R \left(\sum_{w=1}^W \sum_{h=1}^H x_{rwh} fis_{hw} \right) + \frac{1}{H} \sum_{w=1}^W \left(\sum_{r=1}^R \sum_{h=1}^H x_{rwh} fis_{hr} \right) + \frac{1}{R} \sum_{r=1}^R \sum_{w=1}^W y_{wr} fis_{rw} \right) \quad (2)$$

สมการเป้าหมาย (Goal functions)

สมการเป้าหมายลำดับที่ 1 และ 2 เป็นการกำหนดให้สมการวัตถุประสงค์ของแต่ละลำดับเมื่อพิจารณาพร้อมกับค่าเบี่ยงเบนเชิงลบของแต่ละวัตถุประสงค์แล้ว จะต้องมีความบรรลุตามค่าเป้าหมายของวัตถุประสงค์นั้น ๆ ที่ได้ทำการกำหนดเอาไว้ โดยสมการเป้าหมายของวัตถุประสงค์ลำดับที่ 1 และ 2 แสดงได้ดังสมการที่ (3) และ (4) ตามลำดับ

$$Z_1 + \eta_1 = \tau_1 \quad (3)$$

$$Z_2 + \eta_2 = \tau_2 \quad (4)$$

อย่างไรก็ตามสมการเป้าหมายทั้ง 2 ลำดับไม่ได้มีการพิจารณาค่าเบี่ยงเบนเชิงบวกเนื่องจากค่าเป้าหมายถูกกำหนดเป็นค่าเท่ากับ 1 ซึ่งเป็นค่าสมรรถนะโดยรวมและค่าความพึงพอใจโดยรวมเฉลี่ยที่สูงที่สุดที่เป็นไปได้ ดังนั้นไม่ว่าอย่างไรค่าที่ได้จากสมการวัตถุประสงค์จะไม่มีทางมีค่าเกิน 1 จึงไม่จำเป็นต้องพิจารณาค่าเบี่ยงเบนเชิงบวกในสมการวัตถุประสงค์ทั้ง 2 ลำดับ

โดยตัวแบบที่นำเสนอสำหรับการแก้ปัญหาการมอบหมายงานของหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานแสดงได้ดังนี้

สมการวัตถุประสงค์ (Objective function)

$$\text{lex min} = [\eta_1, \eta_2] \quad (5)$$

เงื่อนไขบังคับ (Constraints)

$$\left(\frac{1}{H} \sum_{r=1}^R \left(\sum_{w=1}^W \sum_{h=1}^H x_{rwh} f_{is_{wh}} \right) \right) + \frac{1}{3} + \frac{1}{H} \sum_{w=1}^W \left(\sum_{r=1}^R \sum_{h=1}^H x_{rwh} f_{is_{rh}} \right) + \frac{1}{R} \sum_{r=1}^R \sum_{w=1}^W y_{wr} f_{is_{wr}} \quad (6)$$

$$\left(\frac{1}{H} \sum_{r=1}^R \left(\sum_{w=1}^W \sum_{h=1}^H x_{rwh} f_{is_{hw}} \right) \right) + \frac{1}{3} + \frac{1}{H} \sum_{w=1}^W \left(\sum_{r=1}^R \sum_{h=1}^H x_{rwh} f_{is_{hr}} \right) + \frac{1}{R} \sum_{r=1}^R \sum_{w=1}^W y_{wr} f_{is_{rw}} \quad (7)$$

$$\sum_{r=1}^R \sum_{w=1}^W x_{rwh} = 1; \quad \forall h \quad (8)$$

$$\sum_{r=1}^R \sum_{h=1}^H x_{rwh} \geq nh_w^{\min}; \quad \forall w \quad (9)$$

$$\sum_{r=1}^R \sum_{h=1}^H x_{rwh} \leq nh_w^{\max}; \quad \forall w \quad (10)$$

$$\sum_{w=1}^W \sum_{h=1}^H x_{rwh} \geq nr_r^{\min}; \quad \forall r \quad (11)$$

$$\sum_{w=1}^W y_{wr} = 1; \quad \forall r \quad (12)$$

$$\sum_{r=1}^R \sum_{h=1}^H x_{rwh} \geq nr_w^{\min}; \quad \forall w \quad (13)$$

$$\sum_{r=1}^R \sum_{h=1}^H x_{rwh} \leq nr_w^{\max}; \quad \forall w \quad (14)$$

$$\sum_{h=1}^H x_{rwh} \leq y_{wr} \times M; \quad \forall w, r \quad (15)$$

$$\eta_i \leq \eta_i^* \quad (16)$$

$$x_{rwh}, y_{wr} \text{ is binary}; \quad \forall w, r, h \quad (17)$$

สมการที่ (5) เป็นสมการวัตถุประสงค์ในหาค่าเบี่ยงเบนเชิงลบที่ต่ำที่สุดตามลำดับความสำคัญของเป้าหมาย สมการที่ (6) และ (7) เป็นสมการเป้าหมาย สมการที่ (8) เป็นเงื่อนไขเพื่อกำหนดให้งานทุกงานจะต้องมีหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานและพนักงานควบคุม สมการที่ (9) และ (10) เป็นเงื่อนไขสำหรับกำหนดจำนวนงานขั้นต่ำและจำนวนงานสูงสุด (ตามลำดับ) ให้กับพนักงาน สมการที่ (11) เป็นเงื่อนไขสำหรับกำหนดจำนวนงานขั้นต่ำให้กับหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงาน สมการที่ (12) เป็นเงื่อนไขสำหรับกำหนดให้หุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานทุกตัวจะต้องมีพนักงานควบคุม 1 คน สมการที่ (13) และ (14) เป็นเงื่อนไขสำหรับกำหนดจำนวนหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานขั้นต่ำและสูงสุด (ตามลำดับ) ให้กับพนักงานแต่ละคน สมการที่ (15) เป็นเงื่อนไขสำหรับกำหนดให้ตัวแปรการตัดสินใจของการมอบหมายงานของหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานและพนักงานมีความสอดคล้องกัน โดยที่ M คือค่ามาก ๆ สมการที่ (16) เป็นเงื่อนไขในการหาคำตอบลำดับที่ 2 โดยกำหนดให้ค่าเบี่ยงเบนเชิงลบของวัตถุประสงค์ลำดับที่ 1 จะต้องไม่เกินค่าที่ยอมรับได้ (η_i^*) สมการที่ (17) เป็นเงื่อนไขสำหรับกำหนดให้ตัวแปรตัดสินใจมีค่าเป็น 0 หรือ 1 เท่านั้น

โดยตัวอย่างการแก้ปัญหาการมอบหมายงานของหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานด้วยตัวแบบที่นำเสนอจะแสดงในหัวข้อถัดไป

4. ปัญหาตัวอย่าง

ในการแสดงประสิทธิภาพของการแก้ปัญหาการมอบหมายงานของหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานด้วยวิธีที่นำเสนอ งานวิจัยนี้ได้กำหนดปัญหาตัวอย่างที่มีทรัพยากรที่ใช้ในกระบวนการผลิตดังนี้ พนักงาน 4 คน หุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงาน 4 ตัว และงาน 10 งาน โดยในการวิเคราะห์การประเมินการทำงานตามเกณฑ์ด้วยระบบอนุमानแบบฟัซซีนั้นจะใช้โปรแกรม MATLAB และทำการหาคำตอบของการมอบหมายงานด้วยตัวแบบที่นำเสนอตามสมการที่ (5)–(17) โดยใช้โปรแกรม Lingo 18.0

ในขั้นตอนแรกจะเริ่มจากการประเมินตามเกณฑ์ของแต่ละความสัมพันธ์ที่ได้กำหนดเอาไว้ในตารางที่ 2 และทำการวิเคราะห์ผลการประเมินด้วยระบบอนุमानแบบฟัซซีตามมุมมองของค่าสมรรถนะและค่าความพึงพอใจในแต่ละความสัมพันธ์ ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างพนักงานกับงาน หุ่นยนต์กับงาน และพนักงานกับหุ่นยนต์แสดงได้ดังตารางที่ 4 5 และ 6 ตามลำดับ

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์การประเมินการทำงานตามเกณฑ์ของความสัมพันธ์ระหว่างพนักงานกับงาน

	W_1	W_2	W_3	W_4
H_1	0.681 ^a /0.570 ^b	0.512/0.357	0.616/0.832	0.605/0.804
H_2	0.586/0.520	0.716/0.729	0.682/0.562	0.593/0.552
H_3	0.651/0.393	0.428/0.675	0.826/0.530	0.837/0.714
H_4	0.539/0.552	0.175/0.533	0.547/0.543	0.401/0.404
H_5	0.344/0.528	0.833/0.381	0.837/0.563	0.43/0.508
H_6	0.648/0.474	0.429/0.515	0.193/0.841	0.195/0.426
H_7	0.164/0.835	0.176/0.617	0.646/0.629	0.273/0.654
H_8	0.550/0.837	0.837/0.503	0.521/0.837	0.431/0.826
H_9	0.837/0.521	0.821/0.719	0.779/0.413	0.179/0.617
H_{10}	0.559/0.441	0.515/0.559	0.595/0.644	0.368/0.837

หมายเหตุ ^a หมายถึง FIS_{WH} และ ^b หมายถึง FIS_{HW}

ตารางที่ 5 ผลการวิเคราะห์การประเมินการทำงานตามเกณฑ์ของความสัมพันธ์ระหว่างหุ่นยนต์กับงาน

	R_1	R_2	R_3	R_4
H_1	0.506 ^c /0.837 ^d	0.653/0.522	0.163/0.617	0.586/0.520
H_2	0.541/0.629	0.361/0.718	0.837/0.546	0.812/0.648
H_3	0.163/0.530	0.185/0.552	0.587/0.679	0.822/0.651
H_4	0.693/0.550	0.593/0.833	0.741/0.507	0.503/0.595
H_5	0.690/0.823	0.315/0.603	0.827/0.545	0.628/0.652
H_6	0.582/0.473	0.634/0.534	0.724/0.595	0.342/0.688
H_7	0.833/0.630	0.163/0.683	0.179/0.52	0.782/0.664
H_8	0.378/0.828	0.615/0.545	0.626/0.474	0.785/0.556
H_9	0.321/0.598	0.837/0.681	0.826/0.805	0.822/0.707
H_{10}	0.554/0.638	0.692/0.447	0.733/0.762	0.714/0.411

หมายเหตุ ^c แทน FIS_{RH} และ ^d แทน FIS_{HR}

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์การประเมินการทำงานตามเกณฑ์ของความสัมพันธ์ระหว่างพนักงานกับหุ่นยนต์

	W_1	W_2	W_3	W_4
R_1	0.656 ^e /0.450 ^f	0.238/0.450	0.318/0.450	0.493/0.450
R_2	0.588/0.577	0.822/0.577	0.837/0.577	0.72/0.577
R_3	0.612/0.826	0.277/0.826	0.814/0.826	0.831/0.826
R_4	0.822/0.555	0.646/0.622	0.837/0.837	0.669/0.581

หมายเหตุ ^e หมายถึง FIS_{WR} และ ^f หมายถึง FIS_{RW}

ในขั้นตอนสุดท้ายค่าที่ได้จากการประเมินข้างต้นจะถูกนำมาใช้ในตัวแบบที่นำเสนอ เพื่อหาคำตอบของการมอบหมายงานของหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานในปัญหาตัวอย่าง ซึ่งจากการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดของวัตถุประสงค์ลำดับที่ 1 นั้น ค่าสมรรถนะโดยรวม (Z_1) และค่าความพึงพอใจโดยรวม (Z_2) มีค่าเท่ากับ 0.724 และ 0.586 ตามลำดับ โดยค่าเบี่ยงเบนเชิงลบของวัตถุประสงค์ลำดับที่ 1 และ 2 มีค่าเท่ากับ 0.276 และ 0.414 ตามลำดับ และเมื่อหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดของวัตถุประสงค์ลำดับที่ 2 โดยกำหนดให้ค่าเบี่ยงเบนเชิงลบของวัตถุประสงค์ลำดับที่ 1 มีค่ายึดหยุ่นได้ไม่เกินร้อยละ 10 จากค่าเดิม (หรือมีค่าเท่ากับ 0.304) ค่าสมรรถนะโดยรวม (Z_1) นั้นมีค่าเท่ากับ 0.699 ในขณะที่ค่าความพึงพอใจโดยรวม (Z_2) มีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 0.643 โดยในการ

หาคำตอบของวัตถุประสงค์ลำดับที่ 2 ค่าความพึงพอใจโดยรวมของความสัมพันธ์ระหว่างพนักงานกับงาน (FIS_{JW}) และหุ่นยนต์กับงาน (FIS_{JR}) มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 5.503 เป็น 6.624 และ 6.003 เป็น 6.572 ตามลำดับ (ดังตารางที่ 7) แสดงให้เห็นว่าการพิจารณาสมรรถนะในการทำงานเพียงมุมมองเดียวไม่สามารถการันตีได้ว่าพนักงานจะมีความพึงพอใจกับงานมากที่สุด รวมถึงหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานจะสามารถปฏิบัติงานได้ตามข้อกำหนดของงานเสมอไป

ตารางที่ 7 ผลการมอบหมายงานด้วยวิธีการที่นำเสนอ

min η_1	วัตถุประสงค์ลำดับที่ 1		วัตถุประสงค์ลำดับที่ 2	
	FIS_{WH}	6.805 ^s	0.681 ^h	FIS_{HW} 5.503 0.550
	FIS_{RH}	7.042	0.704	FIS_{HR} 6.003 0.600
	FIS_{WR}	3.146	0.787	FIS_{RW} 2.433 0.608
	Z_1	0.724	Z_2	0.586
min η_2	η_1	0.276	η_2	0.414
	วัตถุประสงค์ลำดับที่ 1		วัตถุประสงค์ลำดับที่ 2	
	FIS_{WH}	6.614	0.661	FIS_{HW} 6.624 0.662
	FIS_{RH}	6.494	0.649	FIS_{HR} 6.572 0.657
	FIS_{WR}	3.146	0.787	FIS_{RW} 2.433 0.608
	Z_1	0.699	Z_2	0.643
	$\eta_1 \leq \eta_1^* (0.304)$ ร้อยละ 10 จาก $\eta_1 (0.276)$			
	η_1	0.301	η_2	0.357

หมายเหตุ ^s หมายถึง ค่าผลรวมของ FIS ในการมอบหมายงาน และ

^h หมายถึง ค่าเฉลี่ยของ FIS ในการมอบหมายงาน

นอกจากนั้นงานวิจัยนี้ยังได้ทำการเปรียบเทียบวิธีที่นำเสนอกับวิธีการมอบหมายงานตามฟังก์ชันของหุ่นยนต์พบว่าวิธีที่นำเสนอให้ค่าสมรรถนะของทั้ง 3 ความสัมพันธ์ (FIS_{WH} , FIS_{RH} , FIS_{WR}) ที่ดีกว่า เช่นเดียวกับค่าความพึงพอใจในแต่ละความสัมพันธ์ (FIS_{HW} , FIS_{HR}) มีเพียงค่าความพึงพอใจของพนักงานต่อหุ่นยนต์ (FIS_{RW}) ที่วิธีการมอบหมายงานตามฟังก์ชันของหุ่นยนต์มีค่าดีกว่าอยู่ 0.023 อย่างไรก็ตามแม้ว่าวิธีการมอบหมายงานตามฟังก์ชันของหุ่นยนต์จะให้ค่าความพึงพอใจของพนักงานต่อหุ่นยนต์ที่ดีกว่า

อย่างไรก็ตามหากพิจารณาในภาพรวมจะเห็นได้ว่าวิธีการที่นำเสนอยังคงให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าทั้งในส่วนของค่าสมรรถนะโดยรวม (Z_1) ที่มากกว่าถึง 0.199 หรือเท่ากับ 0.699 และค่าความพึงพอใจโดยรวม (Z_2) ที่มากกว่า 0.009 หรือเท่ากับ 0.643 ซึ่งชี้ให้เห็นถึงข้อดีของการพิจารณาความสัมพันธ์แบบหลายเกณฑ์ตามวิธีที่นำเสนอโดยการเปรียบเทียบวิธีที่นำเสนอกับวิธีการมอบหมายงานตามฟังก์ชันของหุ่นยนต์แสดงได้ดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบคำตอบที่ได้จากวิธีการมอบหมายงานตามฟังก์ชันของหุ่นยนต์และวิธีที่นำเสนอ

วิธีการมอบหมายงานตามฟังก์ชันของหุ่นยนต์	สถานีงานของหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานที่ได้					วิธีที่นำเสนอ	สถานีงานของหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานที่ได้				
	หุ่นยนต์	พนักงาน	งานที่ได้รับมอบหมาย				หุ่นยนต์	พนักงาน	งานที่ได้รับมอบหมาย		
	R_1	W_3	H_2	H_8	-		R_1	W_1	H_1	H_4	H_6
	R_2	W_4	H_9	H_{10}	-		R_2	W_2	H_2	H_9	-
	R_3	W_1	H_1	H_5	H_7		R_3	W_4	H_3	H_{10}	-
	R_4	W_2	H_3	H_4	H_6		R_4	W_3	H_5	H_7	H_8
	ค่า FIS โดยรวมของแต่ละความสัมพันธ์						ค่า FIS โดยรวมของแต่ละความสัมพันธ์				
	FIS_{WJ}	0.397	FIS_{JW}	0.651			FIS_{WJ}	0.661*	FIS_{JW}	0.662*	
	FIS_{RJ}	0.528	FIS_{JR}	0.620			FIS_{RJ}	0.649*	FIS_{JR}	0.657*	
	FIS_{WR}	0.574	FIS_{RW}	0.631*			FIS_{WR}	0.787*	FIS_{RW}	0.608	
Z_1	0.500	Z_2	0.634		Z_1	0.699*	Z_2	0.643*			

หมายเหตุ * หมายถึง ค่าที่ดีที่สุด

5. การอภิปรายและสรุปผล

จากการที่มีหลายปัจจัยเกี่ยวข้องกับการทำงานร่วมกันของมนุษย์และหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงาน การมอบหมายงานของหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานโดยไม่คำนึงถึงปัจจัยที่ได้นำเสนอไว้ในงานวิจัยนี้จึงมีผลต่อสมรรถนะและความพึงพอใจในการทำงาน นอกจากนั้นในกรณีที่มีการพิจารณาเพียงมุมมองเดียว แม้จะทำให้มีค่าที่พิจารณาในมุมมองนั้นเป็นค่าสูงสุด แต่ก็เป็นการมองข้ามมุมมองอื่น ๆ ที่มีความสำคัญเช่นกัน

งานวิจัยนี้จึงได้นำเสนอวิธีในการแก้ปัญหาการมอบหมายงานของหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานที่มีการประเมินการทำงานแบบหลายเกณฑ์ เพื่อให้สามารถพิจารณาความสัมพันธ์ขององค์ประกอบหลักทั้ง 3 ส่วนของปัญหานี้ ได้แก่ พนักงาน หุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงาน และงาน ภายใต้การพิจารณาความสัมพันธ์ 3 รูปแบบคือ ความสัมพันธ์ของพนักงานกับงาน (P_1) ความสัมพันธ์ของหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานกับงาน (P_2) และความสัมพันธ์ของพนักงานกับหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงาน (P_3) ได้อย่างครอบคลุมทั้งในส่วนของสมรรถนะในการทำงานและความพึงพอใจในการทำงาน และใช้ระบบอนุमानแบบฟัซซี่ (FIS) ในการวิเคราะห์การประเมินการทำงานตามเกณฑ์ที่กำหนดขึ้นและนำผลที่ได้ไปใช้เป็นข้อมูลป้อนเข้าสำหรับการหาคำตอบของการมอบหมายงานของหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานด้วยตัวแบบที่นำเสนอ

ในส่วนของการมอบหมายงานด้วยตัวแบบโปรแกรมเป้าหมายที่มีหลายวัตถุประสงค์ที่นำเสนอนั้น จะเห็นได้ว่าวิธีที่นำเสนอมีการพิจารณาผลจากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ทั้งในส่วนของพนักงานกับงาน หุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานกับงาน และพนักงานกับหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานเพื่อทำการหาคำตอบของการมอบหมายงานที่ทำให้ทั้งค่าสมรรถนะในการทำงานและค่าความพึงพอใจในการทำงานที่ค่าสูงสุดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

โดยจากการหาคำตอบของปัญหาดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าคำตอบที่ได้จากวิธีที่นำเสนอนั้นมีค่าสมรรถนะโดยรวมที่ดีกว่าวิธีการมอบหมายงานตามฟังก์ชันของ

หุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานถึง 0.199 หรือร้อยละ 19.9 และมีค่าความพึงพอใจโดยรวมที่ดีกว่า 0.009 หรือร้อยละ 0.9

ดังนั้นจึงเป็นการยืนยันว่าวิธีที่นำเสนอในงานวิจัยนี้สามารถให้คำตอบของปัญหาการมอบหมายงานของหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานที่เหมาะสมทั้งในส่วนของค่าสมรรถนะและความพึงพอใจในการทำงาน เนื่องจากมีการพิจารณาปัจจัยที่เกี่ยวข้องได้อย่างครอบคลุมกว่าการพิจารณาเพียงมุมมองเดียว

แม้ว่าวิธีการและตัวแบบที่นำเสนอนั้นจะไม่มีข้อจำกัดของจำนวนพนักงาน หุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงาน และงาน แต่ในส่วนของการวิเคราะห์ผลจากการประเมินด้วยระบบอนุमानแบบฟัซซี่นั้นจะต้องใช้เวลาในการประมวลผลขึ้นอยู่กับขนาดของปัญหา หากปัญหามีขนาดใหญ่ขึ้น โปรแกรม MATLAB จะใช้เวลาในการประมวลผลนานขึ้น รวมถึงในส่วนของการหาคำตอบของการมอบหมายงานด้วยตัวแบบที่นำเสนอนั้น หากผู้ใช้งานทำการหาคำตอบด้วย Solver ในโปรแกรม Excel จะสามารถแก้ปัญหาขนาดเล็กถึงปานกลางที่มีตัวแปรไม่เกิน 200 ตัวแปรได้ แต่สำหรับปัญหามีขนาดใหญ่นั้นจำเป็นต้องใช้โปรแกรมที่มีความสามารถมากขึ้นในการแก้ปัญหา

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนการศึกษาและทุนสนับสนุนการวิจัยจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Nahavandi, "Industry 5.0—A Human-Centric Solution," *Sustainability*, vol. 11, p. 4371, 2019.
- [2] J. Pizon, M. Cioch, L. Kanski and E. Sánchez García, "Cobots Implementation in the Era of Industry 5.0 Using Modern Business and Management Solutions," *Adv. Sci. Technol. Res. J.*, vol. 16, no. 6, pp. 166-178, 2022.

- [3] J. E. Colgate, W. Wannasuphopsit and M. A. Peshkin, "Cobots: robots for collaboration with human operators," in *American Society of Mechanical Engineers, Dynamic Systems and Control Division (Publication) DSC*, vol. 58, pp. 433-439, 1996.
- [4] M. Kimaporn and W. Nunkaew, "A Fuzzy Inference System-Based Hybrid Assignment Method for Cobot Assignment Problem," in *Robotics, Automation, and Artificial Intelligence*, Singapore, December 14 - 16 2023.
- [5] A. Djuric, R. J. Urbanic and J. Rickli, "A Framework for Collaborative Robot (CoBot) Integration in Advanced Manufacturing Systems," *SAE International Journal of Materials and Manufacturing*, vol. 9, 2016.
- [6] A. Zanella, A. Cisi, M. Costantino, M. Di Pardo, G. Pasquettaz and G. Vivo, "Criteria Definition for the Identification of HRC Use Cases in Automotive Manufacturing," *Procedia Manufacturing*, vol. 11, pp. 372-379, 2017.
- [7] A. Bettoni, E. Montini, M. Righi, V. Villani, R. Tsvetanov, S. Borgia, C. Secchi and E. Carpanzano, "Mutualistic and Adaptive Human-Machine Collaboration Based on Machine Learning in an Injection Moulding Manufacturing Line," *Procedia CIRP*, vol. 93, pp. 395-400, 2020.
- [8] P. Tsarouchi, S. Makris and G. Chryssolouris, "Human-robot interaction review and challenges on task planning and programming," *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 29, no. 8, pp. 916-931, 2016.
- [9] A. A. Malik and A. Bilberg, "Complexity-based task allocation in human-robot collaborative assembly," *Industrial Robot*, 2019.
- [10] F. Ranz, V. Hummel, and W. Sihn, "Capability-based task allocation in human-robot collaboration," *Procedia manufacturing*, vol.9, pp.182-189, 2017.
- [11] M. Faccio, I. Granata and R. Minto, "Task allocation model for human-robot collaboration with variable cobot speed," *Journal of Intelligent Manufacturing*, vol.15, pp.793-806, 2024.
- [12] A. Raatz, S. Blankemeyer, T. Recker, D. Pischke and P. Nyhuis, "Task scheduling method for HRC workplaces based on capabilities and execution time assumptions for robots," *CIRP Annals*, vol. 69, no. 1, pp. 13-16, 2020.
- [13] S. Blankemeyer, T. Recker, T. Stuke, J. Brokmann, M. Geese, M. Reiniger, D. Pischke, A. Oubari and A. Raatz, "A Method to Distinguish Potential Workplaces for Human-Robot Collaboration," *Procedia CIRP*, vol. 76, pp. 171-176, 2018.
- [14] P. Tsarouchi, S. Makris and G. Chryssolouris, "Human – robot interaction review and challenges on task planning and programming," *International Journal of Computer Integrated Manufacturing*, vol. 29, pp. 1-16, 2016.
- [15] P. Tsarouchi, J. Spiliotopoulos, G. Michalos, S. Koukas, A. Athanasatos, S. Makris and G. Chryssolouris, "A Decision Making Framework for Human Robot Collaborative Workplace Generation," *Procedia CIRP*, vol. 44, pp. 228-232, 2016.

- [16] M. Faber, A. Mertens and C. Schlick, "Cognition-enhanced assembly sequence planning for ergonomic and productive human-robot collaboration in self-optimizing assembly cells," *Production Engineering*, vol. 11, 2017.
- [17] A. Kinast, K. F. Doerner, and S. Rinderle-Ma, "Biased random-key genetic algorithm for cobot assignment in an assembly/disassembly job shop scheduling problem," *Procedia Computer Science*, vol. 180, pp. 328-337, 2021.
- [18] A. Kinast, K. F. Doerner and S. Rinderle-Ma, "Combining metaheuristics and process mining: Improving cobot placement in a combined cobot assignment and job shop scheduling problem," *Procedia Computer Science*, vol. 200, pp. 1836-1845, 2022.
- [19] A. Kinast, R. Braune, K. F. Doerner, S. Rinderle-Ma and C. Weckenborg, "A hybrid metaheuristic solution approach for the cobot assignment and job shop scheduling problem," *Journal of Industrial Information Integration*, vol. 28, p. 100350, 2022.
- [20] M. C. Gombolay, R. A. Gutierrez, S. G. Clarke, G. F. Sturla and J. A. Shah, "Decision-making authority, team efficiency and human worker satisfaction in mixed human-robot teams," *Autonomous Robots*, vol. 39, no. 3, pp. 293-312, 2015.
- [21] C. Schmidbauer, S. Zafari, B. Hader and S. Schlund, "An Empirical Study on Workers' Preferences in Human-Robot Task Assignment in Industrial Assembly Systems," *IEEE Transactions on Human-Machine Systems*, Article vol. 53, no. 2, pp. 293-302, 2023.
- [22] A. Tausch, A. Kluge, and L. Adolph, "Psychological Effects of the Allocation Process in Human-Robot Interaction - A Model for Research on ad hoc Task Allocation," *Frontiers in Psychology*, vol. 11, 2020.
- [23] D. M. D'Addona, F. Bracco, A. Bettoni, N. Nishino, E. Carpanzano and A. A. Bruzzzone, "Adaptive automation and human factors in manufacturing: An experimental assessment for a cognitive approach," *CIRP Annals*, vol. 67, no. 1, pp. 455-458, 2018.
- [24] T. Koltai, I. Dimény, V. Gallina, A. Gaal and C. Sepe, "An analysis of task assignment and cycle times when robots are added to human-operated assembly lines, using mathematical programming models," *International Journal of Production Economics*, vol. 242, p. 108292, 2021.
- [25] G. Boschetti, M. Faccio, M. Milanese, R. Minto, "C-ALB (Collaborative Assembly Line Balancing): a new approach in cobot solutions," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 116, no. 9, pp. 3027-3042, 2021.
- [26] G. Michalos, J. Spiliotopoulos, S. Makris and G. Chrysosouris, "A method for planning human robot shared tasks," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 22, pp. 76-90, 2018.
- [27] L. Gualtieri, E. Rauch, R. Vidoni, and D. T. Matt, "Safety, Ergonomics and Efficiency in Human-Robot Collaborative Assembly: Design

- Guidelines and Requirements," *Procedia CIRP*, vol. 91, pp. 367-372, 2020.
- [28] Y. Y. Liao and K. Ryu, "Task Allocation in Human-Robot Collaboration (HRC) Based on Task Characteristics and Agent Capability for Mold Assembly," *Procedia Manufacturing*, vol. 51, pp. 179-186, 2020.
- [29] Y. Y. Liao and K. Ryu, "Genetic algorithm-based task allocation in multiple modes of human-robot collaboration systems with two cobots," *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, vol. 119, no. 11, pp. 7291-7309, 2022.
- [30] D. Guo, "Fast scheduling of human-robot teams collaboration on synchronised production-logistics tasks in aircraft assembly," *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, vol. 85, p. 102620, 2024.
- [31] M. IJtsma, L. M. Ma, A. R. Pritchett and K. M. Feigh, "Computational Methodology for the Allocation of Work and Interaction in Human-Robot Teams," *Journal of Cognitive Engineering and Decision Making*, vol. 13, no. 4, pp. 221-241, 2019.
- [32] A. Bilberg and A. A. Malik, "Digital twin driven human-robot collaborative assembly," *CIRP Annals*, vol. 68, no. 1, pp. 499-502, 2019.
- [33] M. Dalle Mura and G. Dini, "Designing assembly lines with humans and collaborative robots: A genetic approach," *CIRP Annals*, vol. 68, no. 1, pp. 1-4, 2019.
- [34] M. Dalle Mura and G. Dini, "Optimizing ergonomics in assembly lines: A multi objective genetic algorithm," *CIRP Journal of Manufacturing Science and Technology*, vol. 27, pp. 31-45, 2019.
- [35] V. V. Unhelkar *et al.*, "Human-Aware Robotic Assistant for Collaborative Assembly: Integrating Human Motion Prediction With Planning in Time," *IEEE Robotics and Automation Letters*, vol. 3, no. 3, pp. 2394-2401, 2018.
- [36] G. Evangelou, N. Dimitropoulos, G. Michalos and S. Makris, "An approach for task and action planning in Human-Robot Collaborative cells using AI," *Procedia CIRP*, vol. 97, pp. 476-481, 2021.
- [37] S. Takata and T. Hirano, "Human and robot allocation method for hybrid assembly systems," *CIRP Annals*, vol. 60, no. 1, pp. 9-12, 2011.
- [38] L. A. Zadeh, "Fuzzy sets," *Information and Control*, vol. 8, no. 3, pp. 338-353, 1965.
- [39] D. S. Hooda, V. Raich, and C. St, *Fuzzy Logic Models and Fuzzy Control. An Introduction*. 2022.
- [40] G. Feng, "Analysis and Synthesis of Fuzzy Control Systems: A Model-Based Approach," 2010.
- [41] Z. Kovacic and S. Bogdan, *Fuzzy Controller Design: Theory and Applications*. 2010.
- [42] İ. Altas, *Fuzzy Logic Control in Energy Systems with design applications in MATLAB®/Simulink®*. 2017.
- [43] M. H. Eghbal Ahmadi, S. J. Royaei, S. Tayyebi, and R. Bozorgmehry Boozarjomehry, "A new insight into implementing Mamdani fuzzy inference system for dynamic process modeling: Application on flash separator fuzzy dynamic modeling," *Engineering*

Applications of Artificial Intelligence, vol. 90, p. 103485, 2020.

8. ภาคผนวก

คำอธิบายเกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณา

P₁: ความสัมพันธ์ของพนักงานกับงาน

P₁₋₁: สมรรถนะโดยรวมในการทำงานของพนักงาน

C₁: ความสามารถในการผลิต หมายถึงจำนวนชิ้นงานหรือผลิตภัณฑ์ที่พนักงานสามารถผลิตได้ในเวลาที่กำหนด โดยเก็บข้อมูลเป็นจำนวนชิ้นงานที่พนักงานผลิต (หน่วย)

C₂: คุณภาพของชิ้นงาน หมายถึงความถูกต้องของชิ้นงานหรือผลิตภัณฑ์ที่พนักงานทำการผลิตได้ตามมาตรฐานและข้อกำหนด โดยเก็บข้อมูลเป็นร้อยละของชิ้นงานดีที่ผ่านการตรวจสอบคุณภาพ (ร้อยละ)

C₃: ความต่อเนื่องในการปฏิบัติงาน หมายถึงความสามารถในการทำงานได้อย่างต่อเนื่องโดยไม่มีการหยุดพัก โดยเก็บข้อมูลเป็นระยะเวลาที่พนักงานสามารถทำงานได้อย่างต่อเนื่อง (ชั่วโมง)

C₄: ทักษะการปฏิบัติงาน หมายถึงความสามารถและความเชี่ยวชาญของพนักงานในการทำงานที่ได้รับมอบหมาย โดยเก็บข้อมูลเป็นคะแนนจากการประเมินโดยหัวหน้างานภายใต้การวัดทักษะและความเชี่ยวชาญของพนักงานในการทำงาน (คะแนน)

P₁₋₂: ความพึงพอใจของพนักงานต่องาน

C₅: การเคลื่อนไหวและการยศาสตร์ หมายถึงความเหมาะสมของการเคลื่อนไหวร่างกายของพนักงานและความเหมาะสมของสถานที่งาน โดยเก็บข้อมูลเป็นคะแนนจากการประเมินการทำงานของพนักงานในแต่ละสถานงาน (คะแนน)

C₆: ความยืดหยุ่นในการปฏิบัติงาน หมายถึงพนักงานมีเวลาพักและเวลาทำงานได้อย่างสมดุล โดยเก็บข้อมูลเป็นการประเมินความยืดหยุ่นในการทำงานโดยพนักงาน (คะแนน)

C₇: ความเครียดจากการปฏิบัติงาน หมายถึงภาวะทางจิตที่เกิดขึ้นจากการทำงานในสถานงานที่ก่อให้เกิดความกังวล ความเครียด หรือภาวะกดดัน โดยเก็บข้อมูลจากการให้

พนักงานประเมินระดับความเครียดที่รู้สึกในระหว่างการทำงาน (คะแนน)

C₈: การเปลี่ยนแปลงของงาน หมายถึงระดับของความหลากหลายและการปรับเปลี่ยนลักษณะการทำงานที่ไม่คงที่ โดยเก็บข้อมูลเป็นการประเมินการเปลี่ยนแปลงลักษณะของงานในการทำงาน (คะแนน)

P₂: ความสัมพันธ์ของหุ่นยนต์กับงาน

P₂₋₁: สมรรถนะโดยรวมในการทำงานของหุ่นยนต์

C₉: ความสามารถในการผลิต หมายถึงจำนวนชิ้นงานหรือผลิตภัณฑ์ที่หุ่นยนต์สามารถผลิตได้ในเวลาที่กำหนด โดยเก็บข้อมูลเป็นจำนวนชิ้นงานที่หุ่นยนต์ผลิต (หน่วย)

C₁₀: คุณภาพของชิ้นงาน หมายถึงความถูกต้องของชิ้นงานหรือผลิตภัณฑ์ที่หุ่นยนต์ทำการผลิตได้ตามมาตรฐานและข้อกำหนด โดยเก็บข้อมูลเป็นร้อยละของชิ้นงานดีที่ผ่านการตรวจสอบคุณภาพ (ร้อยละ)

C₁₁: รอบเวลาการผลิตที่เหมาะสม หมายถึงระยะเวลาที่เหมาะสมในการผลิตชิ้นงาน โดยเก็บข้อมูลเป็นเวลาที่ใช้ในการผลิตตั้งแต่เริ่มกระบวนการจนเสร็จสิ้น (ชั่วโมง)

C₁₂: ฟังก์ชันการทำงานของหุ่นยนต์ หมายถึงรูปแบบในการทำงานที่เข้ากันได้ระหว่างหุ่นยนต์กับงานที่ได้รับมอบหมาย โดยเก็บข้อมูลจากการสังเกตและประเมินการทำงานของหุ่นยนต์จากผู้ควบคุมหรือผู้ดูแลหุ่นยนต์ (คะแนน)

P₂₋₂: ข้อจำกัดในการทำงานของหุ่นยนต์

C₁₃: แรงและกำลังสูงสุด หมายถึงความสามารถของหุ่นยนต์ในการสร้างแรงและกำลังสูงสุดในการทำงาน เช่น การยกของหนัก การกด หรือการบีบ เป็นต้น โดยเก็บข้อมูลเป็นคะแนนตามความสามารถของหุ่นยนต์ในการสร้างแรงและกำลังที่เหมาะสมกับงานที่ได้รับมอบหมาย (คะแนน)

C₁₄: พื้นที่ทำงานของหุ่นยนต์ หมายถึงขอบเขตหรือพื้นที่ที่หุ่นยนต์สามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและปลอดภัย โดยเก็บข้อมูลเป็นคะแนนตามความสามารถของหุ่นยนต์ในการเข้าถึงงานและทำงานได้อย่างเหมาะสม (คะแนน)

C₁₅: ความเหมาะสมของวัสดุ หมายถึงส่วนประกอบของโครงสร้างหุ่นยนต์ที่เหมาะสมกับการทำงาน วัสดุบางประเภทอาจจะไม่เหมาะกับงานที่ใช้ความร้อนสูง โดยเก็บ

ข้อมูลเป็นคะแนนตามความเหมาะสมของวัสดุที่เป็น
ส่วนประกอบของหุ่นยนต์กับงาน (คะแนน)

C₁₆: ความซับซ้อนของระบบ หมายถึงความสามารถของ
เทคโนโลยีของหุ่นยนต์ที่ใช้ในการทำงานที่หลากหลาย โดย
เก็บข้อมูลเป็นคะแนนตามความเข้ากันได้ระหว่างระบบของ
หุ่นยนต์ในการทำงาน (คะแนน)

P₃: ความสัมพันธ์ของพนักงานกับหุ่นยนต์

P₃₋₁: สมรรถนะโดยรวมในการทำงานร่วมกันของ พนักงานกับหุ่นยนต์

C₁₇: ความสามารถในการผลิตร่วมกัน หมายถึงจำนวน
ชิ้นงานหรือผลิตภัณฑ์ที่สามารถผลิตได้จากการทำงาน
ร่วมกันระหว่างหุ่นยนต์และพนักงานในช่วงเวลาที่กำหนด
โดยเก็บข้อมูลเป็นจำนวนชิ้นงานที่ผลิตได้ในช่วงเวลาที่
กำหนด (หน่วย)

C₁₈: คุณภาพของชิ้นงาน หมายถึงความถูกต้องของชิ้นงาน
หรือผลิตภัณฑ์ที่พนักงานทำการผลิตร่วมกับหุ่นยนต์ได้ตาม
มาตรฐานและข้อกำหนด โดยเก็บข้อมูลเป็นร้อยละของ
ชิ้นงานดีที่ผ่านการตรวจสอบคุณภาพ (ร้อยละ)

C₁₉: ความต่อเนื่องในการปฏิบัติงานร่วมกัน หมายถึง
ระยะเวลาที่พนักงานและหุ่นยนต์สามารถทำงานร่วมกันได้
อย่างต่อเนื่องและไม่มีเหตุขัดข้อง โดยเก็บข้อมูลเป็น
ระยะเวลาที่พนักงานและหุ่นยนต์ทำงานร่วมกันอย่าง
ต่อเนื่อง (ชั่วโมง)

C₂₀: ทักษะการควบคุมหุ่นยนต์ หมายถึงความสามารถของ
พนักงานในการควบคุมและจัดการหุ่นยนต์อย่างมี
ประสิทธิภาพ โดยเก็บข้อมูลเป็นคะแนนตามระดับทักษะ
การควบคุมหุ่นยนต์ของพนักงาน (คะแนน)

P₃₋₂: ความพึงพอใจของพนักงานต่อหุ่นยนต์

C₂₁: การเคลื่อนไหวและการยศาสตร์ หมายถึงความ
เหมาะสมของการเคลื่อนไหวของพนักงานในการทำงาน
ร่วมกับหุ่นยนต์และการออกแบบตามหลักกายศาสตร์ โดย
เก็บข้อมูลเป็นคะแนนจากการประเมินความเหมาะสมของ
การเคลื่อนไหวของพนักงาน (คะแนน)

C₂₂: ความยืดหยุ่นในการควบคุมหุ่นยนต์ หมายถึง
ความสามารถของพนักงานในการปรับคำสั่งหรือการควบคุม

ที่เปลี่ยนแปลงได้ โดยเก็บข้อมูลเป็นคะแนนจากการประเมิน
ความยืดหยุ่นในกระบวนการทำงานจากพนักงาน (คะแนน)

C₂₃: ความกังวลจากการควบคุมหุ่นยนต์ หมายถึงภาวะทาง
จิตที่เกิดขึ้นจากการทำงานของพนักงานในการควบคุมและ
ทำงานร่วมกับหุ่นยนต์ โดยเก็บข้อมูลเป็นคะแนนตามระดับ
ความกังวลและความเครียดที่พนักงานรู้สึกระหว่างการ
ควบคุมหุ่นยนต์ (คะแนน)

C₂₄: ความปลอดภัยของผู้ปฏิบัติงาน หมายถึงการทำงาน
ร่วมกับหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงานโดยปราศจากความเสี่ยงที่จะ
เกิดเหตุร้ายแรงหรืออุบัติเหตุระหว่างการทำงาน โดยเก็บ
ข้อมูลเป็นคะแนนตามระดับความปลอดภัยที่พนักงานรู้สึก
จากการทำงานร่วมกับหุ่นยนต์ (คะแนน)

**การพัฒนาระบบแจ้งเตือนและรายงานผลการขนส่งออนไลน์ กรณีศึกษา แผนกขนส่ง
สินค้าบริษัท ธาราทองเมทัล จำกัด**
**Development of Transportation Notification and On line Report :
a case study of Tharathong Metal Co ., Ltd**

พนทิพย์ สายเทพ สิทธิา เดชปรีชาพล สุภัสสร ภูศรี กิตติชัย อธิกุลรัตน์*

ภาควิชาวิศวกรรมขนถ่ายวัสดุและโลจิสติกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ถนน ประชาราษฎร์ 1 แขวงวงศ์สว่าง เขตบางซื่อ กรุงเทพมหานคร 10800

Fonthip Saithep Sittha Detpreechapol Supassorn Poosri Kittichai Athikulrat*

Department of Materials Handling and Logistics Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's
University of Technology North Bangkok, Pracharat 1 Road, Wongsawang, Bangsue, Bangkok 10800

*Corresponding author Email: kittichai.athi@gmail.com

(Received: March 23, 2024; Revised: July 25, 2024 ; Accepted: August 19, 2024)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบแจ้งเตือนและรายงานผลการขนส่งออนไลน์ โดย
ทำการศึกษาและรวบรวมข้อมูลการดำเนินงานปัจจุบันเพื่อเขียนแผนภาพการทำงานปัจจุบัน พร้อมกับวิเคราะห์หาสาเหตุ
ของปัญหา เพื่อทำการปรับปรุงกระบวนการทำงาน ด้วยการวิเคราะห์ทำไม ทำไม พร้อมกับเขียนแผนภาพสวิมเลนส์
ไดอะแกรมก่อนและหลังการปรับปรุง การไหลของสารสนเทศด้านการขนส่งในครั้งนี้ โดยประยุกต์ใช้กฎเกิลเวิร์คสเปซและ
กฎเกิลแอฟสคริปต์ สำหรับบันทึกและเก็บข้อมูลการขนส่งสินค้า แจ้งเตือนสถานะการขนส่งสินค้าตามเวลาจริงด้วย
แอปพลิเคชันไลน์ และสามารถรายงานผลการจัดส่งสินค้าเต็มจำนวนและตรงเวลาตามตัวชี้วัดด้านโลจิสติกส์อุตสาหกรรม
ในรูปแบบแดชบอร์ดออนไลน์ ด้วยลูกเกอร์สตูดิโอ ผลการวิจัยทำให้สามารถลดระยะเวลาการรอคอยการรายงาน
สถานะการขนส่งของพนักงานจากเดิม 5 ชั่วโมง เหลือ 2 วินาที คิดเป็นเวลาลดลง 17,998 วินาที หรือ ลดลงร้อยละ 99.99
 อีกทั้งยังสามารถสรุปและรายงานการจัดส่งสินค้าในภาพรวมและแยกรายบุคคล พร้อมกันนี้ได้ประเมินผลความพึงพอใจ
ของผู้ใช้งานระบบ 2 กลุ่มได้แก่ กลุ่มผู้บันทึกข้อมูล คือ พนักงานขนส่ง และกลุ่มผู้ใช้ข้อมูล คือ ผู้บริหารแผนกขนส่ง ผลการ
ประเมินความพึงพอใจพบว่า กลุ่มผู้บันทึกข้อมูลมีความพึงพอใจในภาพรวมในระดับมากที่สุด ($\text{Mean} \pm \text{S.D.} = 4.43 \pm 0.53$)
 และกลุ่มผู้ใช้ข้อมูลมีความพึงพอใจในภาพรวมในระดับมากที่สุด ($\text{Mean} \pm \text{S.D.} = 4.25 \pm 0.52$)

คำสำคัญ: กฎเกิลเวิร์คสเปซ การวิเคราะห์ทำไม-ทำไม สวิมเลนส์ไดอะแกรม การขนส่ง การจัดส่งสินค้าเต็มจำนวนและตรง
เวลา

ABSTRACT

The objective of this research is to design and develop an online transportation notification and reporting system. This will be achieved by studying and collecting current operational data to

create a current workflow diagram, analyzing the root causes of problems to implement process improvements using the Why Why analysis, and creating swim lane diagrams before and after the improvement to illustrate the flow of transportation information. Google Workspace and Google Apps Script will be utilized to record and store transportation data, real-time transportation status notifications will be provided via the LINE application, and delivery in full on time report will be generated in the form of an online dashboard using Looker Studio. The results of the research made it possible to reduce the waiting time for employees to report the transportation status from the original 5 hours down to 2 seconds, representing a reduction of 17,998 seconds or a reduction of 99.99 percent. It is also possible to summarize and report the delivery of goods in Overall and individual. At the same time, the satisfaction of 2 groups of users of the system was evaluated: the data recording group, which is transportation employees, and the data data group, which is transportation department executives. Satisfaction evaluation results found that The data recorder group had the highest level of overall satisfaction (Mean±S.D. = 4.43±0.53) and the data user group had the highest level of overall satisfaction (Mean±S.D. = 4.25±0.52).

Keyword: Google Workspace, Why Why Analysis, Swim Lane Diagram, Transportation, Delivery In full On Time.

1. บทนำ

ปัจจุบันการขนส่งสินค้ามีบทบาทสำคัญในการกระจายสินค้าสู่ตลาดทั้งในประเทศและต่างประเทศ โดยผู้ให้การขนส่งสินค้าทำหน้าที่เคลื่อนย้ายสินค้าในแต่ละชั้นของห่วงโซ่อุปทาน ตั้งแต่วัตถุดิบ สินค้าขั้นต้น สินค้าขั้นกลาง และสินค้าสำเร็จรูป ภาวะของธุรกิจจึงขึ้นกับปริมาณสินค้าซึ่งผันแปรตามภาวะเศรษฐกิจของประเทศ โดยการขนส่งสินค้าของประเทศไทย ใช้การขนส่งทางถนนเป็นหลักโดยมีสัดส่วนมากถึงร้อยละ 79.7 ของการขนส่งสินค้าโดยรวม ในขณะที่เดียวกับการขนส่งทางถนนนั้นก็มีความต้นทุนในการขนส่งมากกว่าการขนส่งรูปแบบอื่น ๆ เนื่องจากมีสัดส่วนต้นทุนผันแปรที่สูง ได้แก่ ค่าเชื้อเพลิง และน้ำมันหล่อลื่น มีสัดส่วนถึงร้อยละ 49 ของต้นทุนรวม และค่าจ้างพนักงานขับรถ มีสัดส่วนร้อยละ 32 ที่มีการปรับขึ้นเนื่องจากปัญหาการขาดแคลนแรงงาน เนื่องจากต้นทุนที่มากในการขนส่งทางถนนจึงต้องมีการจัดการกับการขนส่งให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด โดยลดต้นทุนในการขนส่งให้มากที่สุด อีกทั้งต้องส่งสินค้าถึงมือลูกค้าได้อย่าง

รวดเร็ว และมีความน่าเชื่อถือ[1] ปัจจุบันจึงมีการนำเทคโนโลยีเข้ามาช่วยเพื่อให้เกิดผลตามที่กล่าวมา ยกตัวอย่างเช่น 1. ทัศนวิสัยในโซ่อุปทาน (Supply Chain Visibility) ซึ่งมีมาอย่างยาวนานแล้วในงานด้านโลจิสติกส์และโซ่อุปทาน เมื่อมีการใช้เทคโนโลยีเข้ามาช่วยในการจัดการข้อมูล ทำให้สามารถจัดการกับข้อมูลของโซ่อุปทาน ได้แบบเรียลไทม์ 2. ระบบการจัดการการขนส่ง (Transportation Management System หรือ TMS) ช่วยให้ผู้มอบหมายงานสามารถวิเคราะห์รายละเอียดการจราจรและความแออัดของการเดินทางได้แบบเรียลไทม์ ทำให้สามารถกำหนดเส้นทางใหม่ได้แม่นยำยิ่งขึ้น เพื่อประหยัดเงินค่าน้ำมันเชื้อเพลิงชั่วโมงแรงงาน และช่วยในด้านอื่น ๆ อีกด้วย 3. ระบบติดตามผ่าน GPS (GPS Tracking) เป็นระบบที่ช่วยในการระบุตำแหน่งที่ถูกพัฒนาขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนสามารถใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

อย่างไรก็ตามในการดำเนินงานต่างๆ จำเป็นต้องมีการวัดและประเมินผลการดำเนินงาน เพื่อให้ทราบว่า

ปัจจุบันองค์กรอยู่ในระดับใดและต้องปรับปรุงสิ่งใด ทำให้องค์กรสามารถประเมิน ควบคุมและปรับปรุงธุรกิจได้ [2] ในส่วนการพัฒนาประสิทธิภาพโลจิสติกส์ด้านการขนส่งขององค์กรจำเป็นต้องมีการวัดผลและการประเมินผลการปฏิบัติงาน เพื่อให้ทราบถึงผลการดำเนินงานปัจจุบันของกิจการและนำผลที่ได้มาปรับปรุงการทำงาน ส่งผลต่อการเพิ่มขีดความสามารถในการแข่งขันขององค์กร

การวัดและประเมินประสิทธิภาพระบบขนส่งด้วยกระบวนการกิจกรรมโลจิสติกส์ เป็นหนึ่งในตัวชี้วัดประสิทธิภาพด้านโลจิสติกส์ โดยกรมส่งเสริมอุตสาหกรรมได้กำหนดคู่มือการประเมินประสิทธิภาพระบบขนส่งด้วยวิธีการทางโลจิสติกส์ขึ้น ซึ่งจะประกอบด้วย 21 ตัวชี้วัดแบ่งออกเป็น 7 ด้าน พิจารณารายได้ 3 มิติ คือ คุณภาพ เวลา และความน่าเชื่อถือ ผู้ประกอบการสามารถนำมาประยุกต์ใช้ในการประเมินมิติต่างๆ ของการจัดการโลจิสติกส์และโซ่อุปทานได้ จึงควรมีการประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศมาเพื่อใช้ในการจัดการข้อมูล ซึ่งระบบสารสนเทศ หมายถึง ระบบ หรือเทคโนโลยีที่มีการนำระบบคอมพิวเตอร์มาประยุกต์ใช้ในการรวบรวมข้อมูล การจัดเก็บข้อมูลประมวลผลของข้อมูล และนำเสนอข้อมูลโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อรายงานผล การตัดสินใจ การวางแผน และอื่น ๆ ที่สามารถลดขั้นตอนและอำนวยความสะดวก ให้ง่ายต่อการใช้งานมากขึ้นกว่าเดิม ซึ่งประกอบไปด้วยกระบวนการ 3 กระบวนการ คือ การนำเข้าข้อมูลสู่ระบบ การประมวลผล และการนำเสนอผลลัพธ์ ระบบสารสนเทศอาจมีการสะท้อนกลับ เพื่อปรับปรุงการนำเข้าข้อมูล [3]

บริษัทธาราทอง เมททอล จำกัด ซึ่งเป็นผลิตและจำหน่ายอะลูมิเนียมให้กับอุตสาหกรรมก่อสร้างและอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้อง พบว่า ยังไม่มีการประยุกต์นำระบบสารสนเทศมาใช้ในการบริหารจัดการการขนส่ง การบันทึกข้อมูลการขนส่งของบริษัทยังบันทึกในรูปแบบเอกสารภายหลังจากการขนส่งสินค้าเสร็จ ทำให้เกิดความล่าช้า ไม่สามารถตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้า รวมถึงยากต่อการตรวจติดตามหรือประเมิน

การขนส่ง ทำให้ไม่สามารถตรวจสอบสถานะของสินค้าได้ตามเวลาจริง การเก็บข้อมูลเป็นเอกสารเกิดการสูญหายหรือเสียหาย ส่งผลให้การนำข้อมูลไปวิเคราะห์เกิดความคลาดเคลื่อน การนำเสนอข้อมูลจึงไม่ตรงกับความเป็นจริง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ประยุกต์ใช้ การบันทึกข้อมูลการจัดเก็บข้อมูล การแจ้งเตือนการขนส่งและการรายงานผลออนไลน์สำหรับดำเนินการจัดการข้อมูลด้านการขนส่ง ทั้งนี้งานวิจัยได้ประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศอิเล็กทรอนิกส์หรือระบบคลาวด์เพื่อบริหารจัดการภายในหน่วยงาน [4]-[7] นอกจากนี้แล้วยังมีงานวิจัยที่ได้จัดทำระบบแจ้งเตือนเพื่อช่วยในการแจ้งเตือนเหตุการณ์ต่างๆ ทั้งการนัดหมาย การเตือนภัย การเฝ้าติดตามกิจกรรมต่างๆ เพื่อความปลอดภัย ควบคุมการดำเนินงานและปฏิบัติงานให้เป็นไปตามเป้าหมายหรือแผนการดำเนินงานที่ได้กำหนดไว้ [8]-[11]

2. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อศึกษาขั้นตอนการดำเนินการจัดส่งสินค้า
2. เพื่อออกแบบและพัฒนาระบบแจ้งเตือนและรายงานผลการขนส่งออนไลน์

3. เครื่องมือและวิธีการดำเนินงาน

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยและพัฒนา เพื่อพัฒนาระบบแจ้งเตือนและรายงานการขนส่งออนไลน์ สำหรับบริษัท ธาราทองเมททอล จำกัด โดยมีขอบเขต วิธีการดำเนินการ และเครื่องมือดังต่อไปนี้

3.1 ขอบเขตของงานวิจัย

1. ศึกษากระบวนการขนส่งสินค้าและสารสนเทศที่เกี่ยวข้อง ตั้งแต่นำสินค้าออกจากคลังเพื่อจัดส่งให้แก่ลูกค้า
2. ประยุกต์ใช้เทคโนโลยีสารสนเทศและระบบคลาวด์ ได้แก่ กูเกิลแอฟสคริปต์ กูเกิลชีต ลูคเกอร์สตูดิโอ โนโนทีพีเคชั่นเอพีไอ ในการบริหารและติดตามการขนส่ง
3. เก็บข้อมูลระยะเวลา 6 เดือน ในช่วงเดือนสิงหาคม 2566 - เดือนกุมภาพันธ์ 2567

3.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

3.2.1 เครื่องมือการรวบรวมข้อมูล และวิเคราะห์ระบบสารสนเทศ

ผู้วิจัยใช้วิธีการสัมภาษณ์ผู้บริหารแผนกขนส่งพร้อม กับใช้สวิตช์และข้อมูล พร้อมใช้เทคนิคทำโม ทำโม ในการ วิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหา

3.2.2 เครื่องมือสำหรับออกแบบ และพัฒนาระบบ แจ้งเตือนและรายงานผลการขนส่งออนไลน์

ผู้วิจัยใช้วิธีการสัมภาษณ์ผู้บริหารแผนกขนส่งในการ ออกแบบแบบฟอร์มการเก็บข้อมูล และใช้กูเกิลเวิร์คสเปซ ในการติดตามระบบขนส่ง และเก็บข้อมูลในระบบโลกจิสติกส์พร้อมแอปพลิเคชันในการแจ้งเตือนการขนส่ง หลังจากที่มีการบันทึกข้อมูลในแต่ละครั้ง รวมถึงใช้ลुकเกอร์สตูดิโอสำหรับรายงานผลการขนส่งออนไลน์

3.2.3 แบบสอบถามสำหรับประเมินความพึงพอใจของระบบ

ผู้วิจัยได้ออกแบบแบบสอบถามเพื่อประเมินความพึงพอใจต่อระบบ ซึ่งตรวจสอบความตรงของเนื้อหา (Validity) โดยให้ผู้เชี่ยวชาญพิจารณาความถูกต้องของเนื้อหา จากนั้นดำเนินการหาค่า IOC (Index of Item-Objective Congruence) หรือค่าดัชนีความสอดคล้อง จากการนำคะแนนการประเมินของผู้เชี่ยวชาญมาหาค่าเฉลี่ย ซึ่งจะต้องมีค่าเฉลี่ยมากกว่า 0.5 ส่วนข้อที่มีค่าน้อยกว่า 0.5 จะนำไปปรับปรุงแก้ไขตามคำแนะนำ

3.3 ขั้นตอนดำเนินการวิจัย

3.3.1 การศึกษาการทำงานปัจจุบันของบริษัท กรณีศึกษา

การศึกษาการทำงานปัจจุบัน ของแผนกขนส่งบริษัท กรณีศึกษา โดยการสัมภาษณ์ผู้บริหารแผนกขนส่งเพื่อ ศึกษาขั้นตอนการทำงาน การไหลของสินค้าและข้อมูล ของบริษัทกรณีศึกษา โดยบันทึกข้อมูลขั้นตอนการทำงาน แต่ละขั้นตอนด้วยสวิตช์และข้อมูล

3.3.2 วิเคราะห์ปัญหาและปรับปรุงกระบวนการ

การวิเคราะห์หาสาเหตุที่แท้จริงด้วยการใช้เทคนิค ทำโม – ทำโม และทำการปรับปรุงกระบวนการ การทำงานการไหลของสินค้าและข้อมูลด้วยสวิตช์และข้อมูล

3.3.3 ออกแบบและพัฒนาระบบแจ้งเตือนและรายงานผลการขนส่งออนไลน์

ทำการออกแบบและพัฒนาระบบแจ้งเตือนการขนส่ง และรายงานผลออนไลน์ พร้อมกับใช้งานระบบโดย ประยุกต์ใช้ กูเกิลเวิร์คสเปซและกูเกิลแอปสคริปต์ สำหรับ บันทึกข้อมูลการขนส่งสินค้า และแจ้งเตือนการขนส่ง สินค้า ด้วยแอปพลิเคชันไลน์ พร้อมกับรายงานผลการขนส่งสินค้าในภาพรวมและรายบุคคล ในรูปแบบของแดชบอร์ดออนไลน์ ด้วยลुकเกอร์สตูดิโอ

3.3.4 การประเมินผลการทำงานของระบบ

การวิจัยนี้ ผู้วิจัยประเมินการทำงานของระบบใน 2 มิติ ได้แก่ 1.การประเมินความสามารถของระบบโดยการ เปรียบเทียบการทำงานรูปแบบเดิม กับรูปแบบใหม่ และ 2.การประเมินความพึงพอใจในการใช้งานระบบ ซึ่ง แบ่งเป็น 2 ส่วนได้แก่ ความพึงพอใจของผู้บันทึกข้อมูล และการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้ข้อมูล โดย สอบถามความพึงพอใจของผู้บันทึกข้อมูล ได้แก่ พนักงานขนส่งสินค้า และผู้ใช้ข้อมูล ได้แก่ ผู้บริหารแผนกขนส่ง การประเมินความพึงพอใจของผู้บันทึกข้อมูล และผู้ใช้ ข้อมูล ซึ่งวิเคราะห์ทาง ได้แก่ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ค่าเฉลี่ยเลขคณิต ค่าร้อยละ โดยแบบสอบถามมีการ กำหนดค่าคะแนน ดังนี้

พึงพอใจมากที่สุด	5	คะแนน
พึงพอใจมาก	4	คะแนน
พึงพอใจปานกลาง	3	คะแนน
พึงพอใจน้อย	2	คะแนน
พึงพอใจน้อยที่สุด	1	คะแนน

จากนั้นหาค่าเฉลี่ยจากแบบสอบถาม โดยแปล ความหมายของค่าเฉลี่ย พร้อมกำหนดช่วงระดับความพึง พอตามหลักของการแบ่งอันตรภาคชั้น (Class interval) [12] กำหนดเกณฑ์การแปลความหมายใจดังนี้

ช่วงคะแนน 4.21 – 5.00 = ความพึงพอใจมากที่สุด
 ช่วงคะแนน 3.41 – 4.20 = ความพึงพอใจมาก
 ช่วงคะแนน 2.61 – 3.40 = ความพึงพอใจปานกลาง
 ช่วงคะแนน 1.81 – 2.60 = ความพึงพอใจน้อย
 ช่วงคะแนน 1.00 – 1.80 = ความพึงพอใจน้อยที่สุด

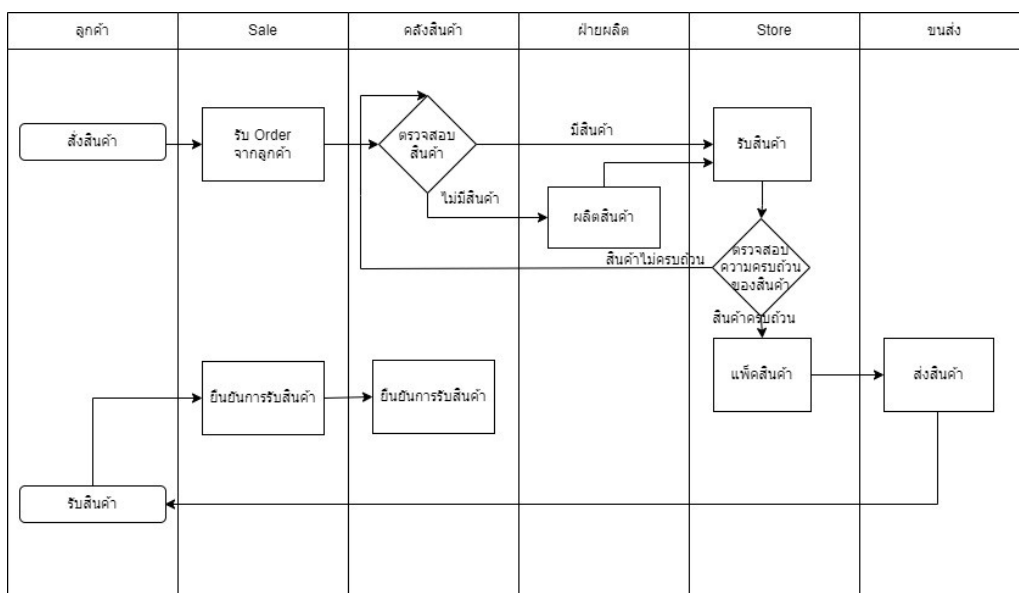
4. ผลการดำเนินงาน

4.1 ศึกษาการทำงานปัจจุบันของบริษัทกรณีศึกษา

ผู้วิจัยได้ทำการสัมภาษณ์ผู้บริหารแผนกขนส่งเพื่อศึกษาขั้นตอนการทำงาน การไหลของสินค้าและข้อมูลของบริษัทกรณีศึกษา โดยบันทึกข้อมูลขั้นตอนการทำงานแต่ละขั้นตอนด้วยสวิตช์ไคอะแกรม แสดงดังรูปที่ 1

จากรูปที่ 1 เริ่มตั้งแต่การรับคำสั่งซื้อสินค้าจากลูกค้า ตรวจสอบเช็คสินค้าภายในคลังสินค้า ผลิตสินค้า รับและตรวจสอบเช็คความครบถ้วนของสินค้า จากนั้นทำการแพ็ค

สินค้าเพื่อรอการจัดส่งให้กับลูกค้า หลังจากทีสินค้าครบตามจำนวนที่กำหนดแล้ว จากข้อมูลขั้นตอนการดำเนินงานในปัจจุบันของบริษัทกรณีศึกษา มีการบันทึกข้อมูลการส่งสินค้าด้วยเอกสารทำให้การตรวจสอบข้อมูลการส่งสินค้าต้องรอคอยพนักงานขนส่งสินค้ากลับมารายงานสถานะของสินค้า ซึ่งจะใช้เวลาเฉลี่ยประมาณ 5 ชั่วโมงหรือ 18,000 วินาที จากการรวบรวมข้อมูลระยะเวลาการนำกลับเอกสารของพนักงานขนส่งย้อนหลัง 6 เดือน เดือนละ 26 วัน จำนวนพนักงาน 4 คน คิดเป็น 624 ข้อมูล (6 เดือน x 26 วัน x 4 คน = 624 ข้อมูล) จากนั้นจึงนำมาสรุปและรายงานผลในภายหลัง นอกจากนี้แล้วหน่วยงานยังไม่มีมีการวัดและประเมินผลประสิทธิภาพการขนส่งของฝ่ายขนส่งและประสิทธิภาพพนักงานรายบุคคล ทำให้หน่วยงานไม่ทราบความสามารถของหน่วยงานรวมถึงความสามารถของพนักงาน



รูปที่ 1 แสดงการไหลของข้อมูลและสินค้า (สวิตช์ไคอะแกรม : As Is)

4.2 วิเคราะห์ปัญหาและปรับปรุงกระบวนการ

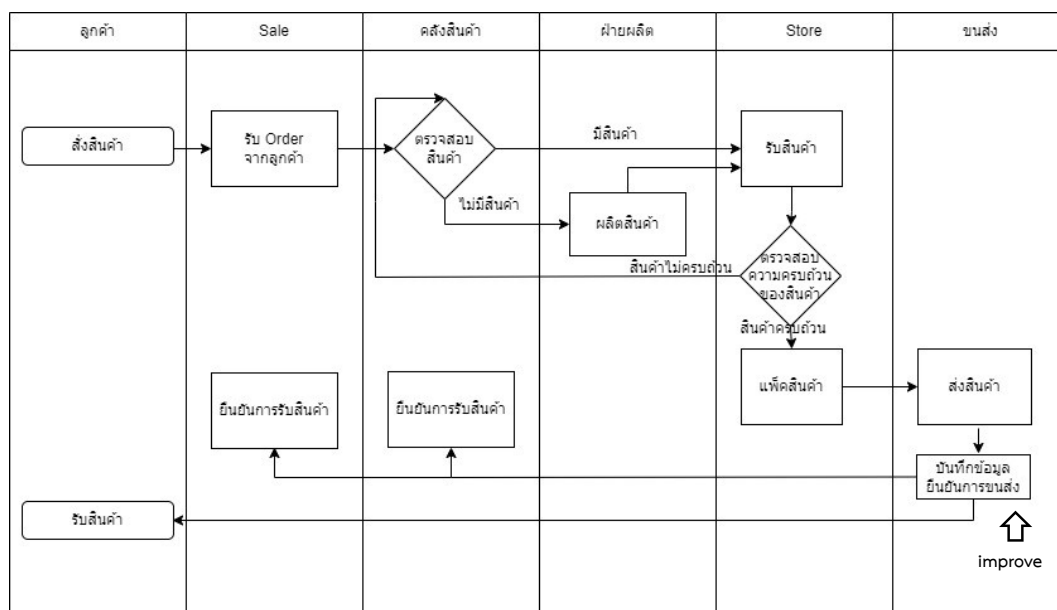
หลังจากบันทึกขั้นตอนการทำงานด้วยสวิตช์ไคอะแกรม ที่ได้จากการสัมภาษณ์ผู้บริหารแผนกขนส่ง ทำให้ทราบปัญหา ได้แก่ 1. ไม่สามารถประเมิน

ความสามารถการขนส่งได้ 2. ข้อมูลสถานะในการขนส่งสินค้าล่าช้า จากปัญหาดังกล่าว ได้ประยุกต์ใช้การวิเคราะห์ ทำไม – ทำไม เพื่อหาสาเหตุที่แท้จริงของปัญหา แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การวิเคราะห์ ทำไม ทำไม

ปัญหา	ทำไม	ทำไม	ทำไม
ไม่สามารถประเมินความสามารถการขนส่ง	ข้อมูลที่ไม่นำมาใช้ไม่ครบถ้วน	การบันทึกข้อมูลผิดพลาด	ปรับปรุงระบบการบันทึกข้อมูล
	ข้อมูลที่ไม่นำมาใช้ไม่ถูกต้อง	การบันทึกข้อมูลผิดพลาด	ปรับปรุงระบบการบันทึกข้อมูล
ข้อมูลสถานะการขนส่งล่าช้า	รอคอยเอกสารจากพนักงานขนส่ง	การยืนยันข้อมูลการขนส่งจากเอกสาร	ปรับปรุงระบบการยืนยันการขนส่ง

จากตารางที่ 1 ปัญหาจากการศึกษา คือ 1. ไม่สามารถประเมินความสามารถการขนส่ง และ 2. ข้อมูลสถานะการขนส่งล่าช้า จากทั้ง 2 ปัญหา จากการวิเคราะห์ ทำไม ทำไม พบว่ามีสาเหตุเกิดจาก การขาดระบบบันทึกข้อมูลที่มีประสิทธิภาพ และระบบแจ้งเตือนการขนส่ง สารสนเทศ เพื่อให้มีการรายงานผลการขนส่งสินค้าแบบออนไลน์ และแจ้งเตือนการขนส่งเมื่อส่งสินค้าสำเร็จ เพื่อให้ผู้บริหารและหน่วยงานที่เกี่ยวข้องทราบ ดังนั้นจึงได้ทำการปรับปรุงกระบวนการการทำงาน และพัฒนาระบบฐานข้อมูลและการแจ้งเตือนเพื่อให้สามารถทราบสถานะการขนส่งสินค้าและสามารถรายงานผลการขนส่งสินค้าในรูปแบบออนไลน์ ได้ พร้อมกับพัฒนาสวิตช์ไต่อะแกรมหลังการปรับปรุง ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงการไหลของข้อมูลและสินค้า (สวิตช์ไต่อะแกรม : To-Be)

จากรูปที่ 2 เพิ่มขึ้นขั้นตอนในการบันทึกข้อมูลการขนส่งสินค้า สำหรับบันทึกข้อมูลการส่งสินค้าโดยพนักงานขนส่ง ข้อมูลที่ได้จากการบันทึกจะถูกส่งไปยังแผนกคลังสินค้า และแผนกขาย แจ้งเตือนในรูปแบบออนไลน์ เพื่อยืนยันการส่ง

สินค้า ทำให้สามารถทราบสถานะการจัดส่งสินค้าของลูกค้าแต่ละราย ซึ่งมีรายละเอียด ดังนี้ 1.จำนวนที่พนักงานขนส่งสามารถส่งสินค้าได้ตรงเวลา 2.สถานที่ส่งสินค้า 3.ระยะทางในการส่งสินค้า 4.ระยะเวลาที่ใช้ในการ



รูปที่ 4 หน้าเมนูหลัก

รูปที่ 4 ในส่วนที่ 1 แบบฟอร์มเมนูหลักเพื่อให้สามารถเข้าถึงแบบฟอร์มย่อย 3 แบบฟอร์ม และเมื่อเข้าเมนูกำหนดส่งสินค้า จะนำเข้าสู่แบบฟอร์ม ดังรูปที่ 5

รูปที่ 5 แบบฟอร์มกำหนดส่งสินค้า

รูปที่ 5 คือ แบบฟอร์มกำหนดส่งสินค้า คือ แบบฟอร์มการบันทึกข้อมูลกำหนดส่งสินค้า ประกอบไปด้วย 4 รายการ ได้แก่ 1. PO คือ เลขที่เอกสารที่ทำการสั่งซื้อ 2.

ร้านค้า คือ ชื่อร้านค้าหรือชื่อสถานที่ที่ต้องทำการจัดส่งสินค้าตามเอกสารสั่งซื้อ 3.วันกำหนดส่งสินค้า คือ วันที่ต้องจัดส่งสินค้าตามที่ระบุไว้ในเอกสารสั่งซื้อ 4. เวลา คือ เวลาของวันที่ต้องจัดส่งสินค้าตามที่ระบุไว้ในเอกสารสั่งซื้อ เมื่อผู้บันทึกข้อมูลกรอกข้อมูลครบแล้ว ผู้บันทึกข้อมูลกดปุ่มบันทึกข้อมูล หลังจากนั้นข้อมูลดังกล่าวจะถูกบันทึกไปยัง ฐานข้อมูล

รูปที่ 6 แบบฟอร์มติดตามระบบขนส่งบริษัท

จากรูปที่ 4 เมื่อเข้าเมนูติดตามระบบขนส่งบริษัท จะนำเข้าสู่แบบฟอร์มติดตามระบบขนส่ง บริษัท รูปที่ 6 คือ แบบฟอร์มการบันทึกข้อมูลในการจัดส่งสินค้า ประกอบไปด้วย 5 รายการ ได้แก่ 1.PO คือ เลขที่เอกสารที่ทำการสั่งซื้อ 2.วันที่ คือ วันที่ที่ทำการบันทึกข้อมูล 3.ช่วงเวลาที่จะออก คือ ช่วงเวลาที่เริ่มออกจากบริษัท 4.คนขับ คือ พนักงานขนส่งที่ทำการส่งสินค้าของรายการนั้น 5. ทะเบียนรถ คือ ทะเบียนรถที่ใช้ในการขนส่งสินค้า

ในรายการนั้น เมื่อผู้บันทึกข้อมูลกรอกข้อมูลครบแล้วทำการกดบันทึกข้อมูล

จากรูปที่ 4 เมื่อเข้าเมนูติดตามระบบขนส่ง ร้านค้า ส่วนที่ 3 ติดตามระบบขนส่ง ร้านค้า จะนำเข้าสู่แบบฟอร์มติดตามระบบขนส่ง ร้านค้าดังรูปที่ 7

ติดตามระบบขนส่ง ร้านค้า

PO NO.
เลือก PO

วันที่
[Date Input]

ช่วงเวลาถึง
[Time Input]

☒ ความถูกต้องของจำนวนสินค้า
ครบ/ไม่ครบ

*หมายเหตุ(กรณีสินค้าไม่ครบ)
[Text Area]

☒ เช็ควิน ร้านค้า (ถ่ายรูปร้าน + รถขนส่ง)
เลือกไฟล์ ไม่ได้เลือกไฟล์

*** กรณีส่งของเกินกำหนด โปรดระบุสาเหตุ ***
[Text Area]

บันทึกข้อมูล

รูปที่ 7 แบบฟอร์มติดตามระบบขนส่ง ร้านค้า

รูปที่ 7 คือ แบบฟอร์มติดตามระบบขนส่ง ร้านค้า ซึ่งประกอบไปด้วย 7 รายการ ดังรูปที่ 14 ได้แก่ 1. PO คือ เลขที่เอกสารที่ทำการสั่งซื้อ 2.วันที่ คือ วันที่ทำการบันทึกข้อมูล 3.ช่วงเวลาถึง คือ ช่วงเวลาที่ถึงสถานที่ส่งสินค้า 4.ความถูกต้องของจำนวนสินค้า คือ การเช็คความถูกต้องของจำนวนสินค้าตามเอกสารการสั่งซื้อ 5.*หมายเหตุ(กรณีสินค้าไม่ครบ) คือ คำอธิบายหากจำนวนสินค้าไม่ถูกต้องตามเอกสารการสั่งซื้อ 6.เช็ควิน ร้านค้า (ถ่ายรูปร้าน + รถขนส่ง) คือ การส่งภาพถ่ายที่ถ่ายสถานที่พร้อมกับรถที่ใช้ในการขนส่งของรายการนั้น ซึ่งสามารถเลือกรูปรูปที่อยู่ในสมาร์ทโฟน ได้โดยเลือกคลังรูปภาพ หรือเลือกไฟล์ และสามารถถ่ายใหม่ได้โดยเลือกถ่ายภาพ 7.**กรณีส่งของเกินกำหนด โปรดระบุสาเหตุ *** คือ คำอธิบายหากส่งสินค้าเกินเวลาที่กำหนด

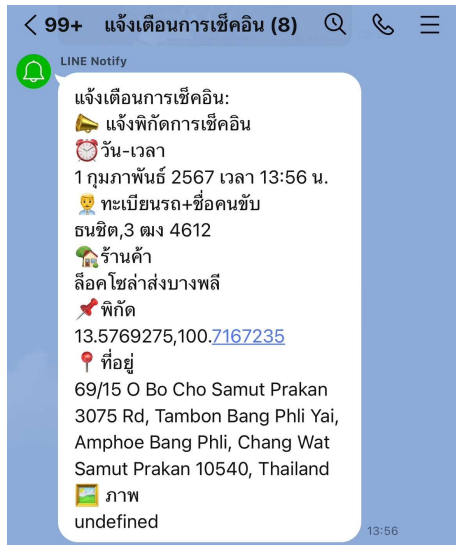
4.3.2 ฐานข้อมูล และการประเมินผล

หลังจากทำการบันทึกข้อมูลตามข้อ 3.3.1 สำเร็จแล้ว ข้อมูลจะถูกส่งไปยังกูเกิลชีต ดังรูปที่ 8 แสดงรายละเอียดข้อมูลที่ทำการบันทึก และเก็บเป็นฐานข้อมูล เพื่อให้หัวหน้าฝ่ายขนส่งซึ่งเป็นผู้ใช้ข้อมูลสำหรับติดตามตรวจสอบสถานะของสินค้าและรถขนส่งสินค้า วิเคราะห์วัดผลและประเมินผลประสิทธิภาพการทำงานของพนักงานขับรถขนส่งสินค้า

นอกจากนี้ข้อมูลในแบบฟอร์มการเช็ควินจะถูกส่งเข้ากลุ่มไลน์ด้วยไลน์โนติฟิเคชัน เอฟไอ ทันทีหลังจากมีการบันทึกข้อมูลในแต่ละครั้ง ช่วยเพิ่มความสะดวกและรวดเร็วในการติดตามสถานะการขนส่ง ดังรูปที่ 9 มีระยะเวลาการแสดงผล 2 วินาที จากการรวบรวมข้อมูล 200 รายการแจ้งเตือน ในระยะเวลา 3 เดือน

PO	ร้านค้า	วันเวลาที่ขนส่ง	วันเวลาที่ออกจาบริษัท	วันเวลาที่ถึงร้านค้า	คนขับ	ทะเบียนรถ	สถานะ	จำนวนสินค้า	ระยะทาง	*หมายเหตุ กรณีสินค้าไม่ครบ
PO-202308020	เจเอ็มอี	23/08/29 17:00	23/08/29 09:02	23/08/29 14:33	เน็ค	1 มง 9081	ปกติ	ครบ	75.20	
PO-202308021	ลำน้ำ	23/08/31 17:00	23/08/31 09:25	23/08/31 14:25	เน็ค	1 มง 9081	ปกติ	ครบ	64.30	
PO-202309001	รถส่งของหลวงขนส่ง	23/09/01 12:15	23/09/01 09:35	23/09/01 11:17	เน็ค	1 มง 9081	ปกติ	ครบ	35.60	
PO-202309002	กมลสิทธิ์	23/09/04 12:15	23/09/04 09:18	23/09/04 11:28	เน็ค	3 มง 4612	ปกติ	ครบ	95.10	
PO-202309003	สิริโสม	23/09/04 17:00	23/09/04 12:00	23/09/04 12:00	พุทธิชัย	3 มง 4609	ปกติ	ครบ	89.90	
PO-202309004	มั่นคง	23/09/06 12:15	23/09/06 09:26	23/09/06 11:39	เน็ค	1 มง 9081	ปกติ	ครบ	56.10	
PO-202309005	เจเอ็มอี	23/09/06 17:00	23/09/06 09:26	23/09/06 14:01	เน็ค	1 มง 9081	ปกติ	ครบ	75.20	
PO-202309006	โกมลวง	23/09/07 17:00	23/09/07 09:30	23/09/07 12:19	ธนชัย	3 มง 4612	ปกติ	ครบ	50.50	
PO-202309007	ชีวิล (กิลด์บาบอง)	23/09/08 17:00	23/09/08 09:19	23/09/08 11:21	เน็ค	1 มง 9081	ปกติ	ครบ	53.10	
PO-202309008	สุขรินทร์สูง ส่งพัสดุไปรษณีย์	23/09/08 17:00	23/09/08 09:19	23/09/08 11:16	พุทธิชัย	3 มง 4609	ปกติ	ครบ	45.00	
PO-202309009	ชูบงโคก	23/09/08 17:00	23/09/08 09:30	23/09/08 11:15	ธนชัย	3 มง 4612	ปกติ	ครบ	45.30	
PO-202309010	เกรท	23/09/09 17:00	23/09/09 09:38	23/09/09 11:18	เน็ค	1 มง 9081	ปกติ	ครบ	55.50	
PO-202309011	ชีวิล	23/09/11 12:15	23/09/11 09:14	23/09/11 10:46	ธนชัย	3 มง 4612	ปกติ	ครบ	53.00	

รูปที่ 8 กูเกิลชีต แสดงข้อมูลโดยรวมสำหรับติดตามตรวจสอบสถานะของสินค้าและรถขนส่งสินค้า

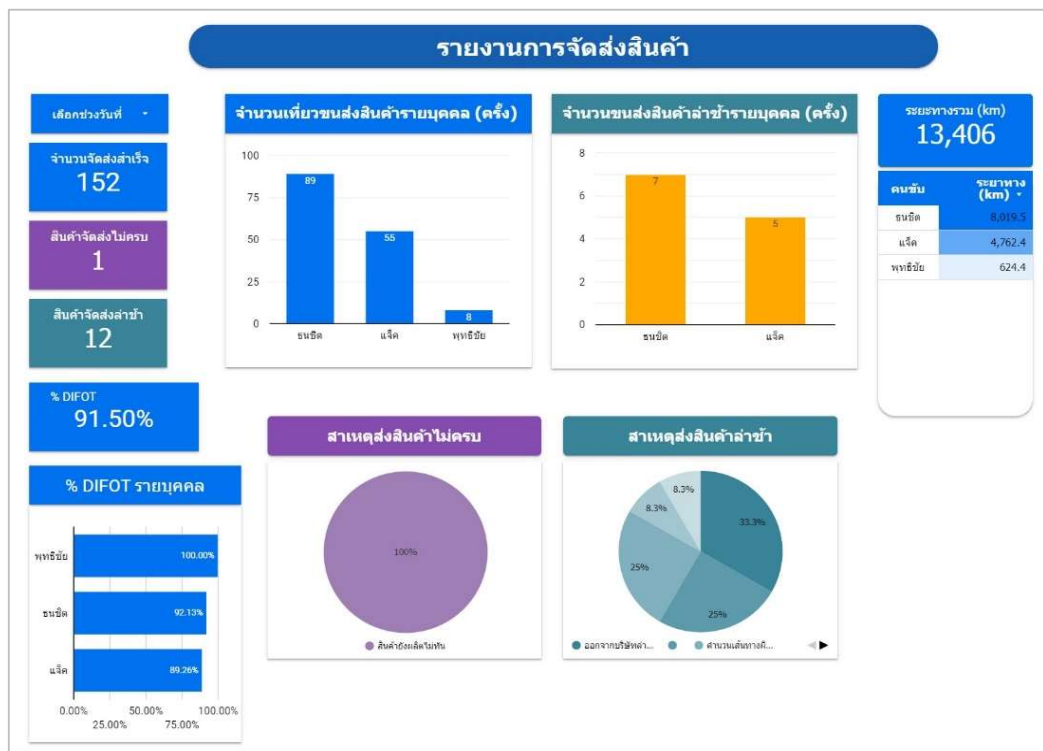


รูปที่ 9 โลโก้แจ้งเตือนการขนส่ง

4.3.3 การแสดงผลข้อมูล

หลังจากที่ข้อมูลถูกบันทึกเข้าสู่กูเกิลชีต ข้อมูลจะถูกวิเคราะห์ และแสดงในรูปแบบแดชบอร์ด ด้วยลูกเกอร์สตูดิโอ ที่ช่วยเปลี่ยนข้อมูลจากตารางใน กูเกิลชีต แปลงมาเป็นแผนภาพให้เข้าใจได้ง่าย ดังรูปที่ 10 ซึ่งมีรายละเอียด ได้แก่

1. ช่วงวันที่การแสดงผล เป็นส่วนที่สามารถเลือกช่วงเวลาที่ต้องการ ใช้เพื่อให้แสดงผลเฉพาะช่วงเวลาที่ต้องการเลือก
2. จำนวนการจัดส่งสินค้าสำเร็จ เป็นการแสดงจำนวนรวมทั้งหมดของพนักงานทุกคนที่จัดส่งแล้วเสร็จ ใช้เพื่อรวบรวมจำนวนที่ทำการจัดส่งสำเร็จ และนำไปคิดคำนวณ %DIFOT



รูปที่ 10 แดชบอร์ด รายงานการขนส่งสินค้าออนไลน์ด้วยลูกเกอร์สตูดิโอ

3. จำนวนการสินค้าจัดส่งไม่ครบ แสดงจำนวนครั้งที่ทำการจัดส่งแล้วสินค้าไม่ครบตามจำนวนที่ลูกค้าต้องการ ใช้เพื่อเก็บข้อมูลสินค้าที่จัดส่งไม่ครบและนำไปปรับปรุงต่อไป

4. จำนวนการสินค้าจัดส่งล่าช้า แสดงจำนวนครั้งที่ทำการจัดส่งแล้วสินค้าจัดส่งถึงเวลาล่าช้ากว่ากำหนด ใช้เพื่อรวบรวมจำนวนครั้งที่จัดส่งล่าช้า และนำไปคิดคำนวณ %DIFOT

5. จำนวนเที่ยวขนส่งสินค้ารายบุคคล (ครั้ง) เป็นการแสดงผลจำนวนครั้งที่พนักงานขนส่งสินค้า ทำการจัดส่งสินค้าสำเร็จแยกตามรายบุคคล ใช้เพื่อแสดงให้เห็นจำนวนงานของพนักงานขนส่งสินค้า เพื่อนำไปเปรียบเทียบและประเมินประสิทธิภาพในการทำงาน

6. จำนวนขนส่งสินค้าล่าช้ารายบุคคล (ครั้ง) เป็นการแสดงผลจำนวนครั้งที่พนักงานขนส่งสินค้า ทำการจัดส่งสินค้าล่าช้ากว่าที่กำหนดแยกตามรายบุคคล ใช้เพื่อระบุว่าพนักงานขนส่งสินค้าแต่ละรายมีจำนวนการขนส่งสินค้าล่าช้ากี่ครั้ง เพื่อเปรียบเทียบและประเมินประสิทธิภาพในการทำงาน

7. ระยะทางรวม (km) เป็นการแสดงจำนวนระยะทางรวมทั้งหมดที่พนักงานทุกคนใช้ในการขนส่ง แสดงในหน่วยกิโลเมตร เพื่อแสดงระยะทางที่ทำการขนส่งทั้งหมดนำไปวิเคราะห์ต่อยอด และปรับปรุงประสิทธิภาพในการทำงาน

8. ระยะทางแยกตามรายบุคคล เป็นการแสดงจำนวนระยะทางที่พนักงานแต่ละคนใช้ในการขนส่ง เรียงลำดับจากพนักงานที่มีระยะทางการขนส่งมากที่สุดไปพนักงานที่มีระยะทางการขนส่งน้อยที่สุด ใช้เปรียบเทียบกับจำนวนการขนส่งสินค้าว่าสอดคล้องกันหรือไม่ และเปรียบเทียบระหว่างบุคคล เพื่อนำไปกระจายงานให้มีความใกล้เคียงกันมากที่สุด

4.3.4 การประเมินผลการทำงานของระบบ

ภายหลังการใช้งานระบบได้ทำการประเมินความสามารถของระบบใน 2 มิติ ดังนั้น 1.การเปรียบเทียบการทำงานรูปแบบเดิมกับรูปแบบใหม่ที่มีการ

ใช้งานระบบ และ 2.การประเมินความพึงพอใจในการใช้งานระบบ

การเปรียบเทียบการทำงานรูปแบบเดิมกับรูปแบบใหม่ที่มีการใช้งานโดยพิจารณากิจกรรมการดำเนินงานแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบจำนวนขั้นตอนการไหลของข้อมูลและสินค้าก่อนและหลังการปรับปรุงตั้งแต่แผนก Sales จนถึงแผนกขนส่ง

แผนก	จำนวนกิจกรรม		ผลลัพธ์
	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง	
ขาย	2	2	ไม่เปลี่ยนแปลง
คลังสินค้า	2	2	ไม่เปลี่ยนแปลง
ฝ่ายผลิต	1	1	ไม่เปลี่ยนแปลง
Store	3	3	ไม่เปลี่ยนแปลง
ฝ่ายขนส่ง	1	2	เพิ่มขึ้น 1 กิจกรรม

จากตารางที่ 2 พบว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงจำนวนกิจกรรมในทุกหน่วยงานยกเว้นฝ่ายขนส่ง ที่มีจำนวนกิจกรรมที่เพิ่มขึ้น เนื่องจากฝ่ายขนส่งจำเป็นต้องมีการบันทึกข้อมูลในระบบใหม่เพิ่ม แต่หากพิจารณาในเชิงเวลาในการตอบสนองต่อข้อมูลการขนส่งพบว่า ฝ่ายขนส่งสามารถลดเวลาการตอบสนองข้อมูลการขนส่งได้ดีขึ้น ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบระยะเวลาตอบสนองข้อมูล (เฉลี่ย) ก่อนและหลังการปรับปรุง

	ก่อน (วินาที)	หลัง (วินาที)	เปลี่ยนแปลง (ร้อยละ)
ระยะเวลารอคอยข้อมูล (เฉลี่ย)	18,000 (5 ชั่วโมง)	2	99.99

จากตารางที่ 3 ภายหลังจากการนำระบบแจ้งเตือนและรายงานผลเข้ามาประยุกต์ใช้ในการปฏิบัติงานขนส่ง ทำให้ฝ่ายขนส่งสามารถตอบสนองข้อมูลการขนส่งหรือระยะเวลาการคอยข้อมูลให้แผนกที่เกี่ยวข้องผ่านการแจ้งเตือนด้วยไลน์ไลน์โนทีฟิเคชัน เอพีไอ ทำให้ระบบสารสนเทศของการขนส่งสามารถย้อนกลับมายังหน่วยงานได้รวดเร็วขึ้น ลดเวลาการตอบสนองได้ร้อยละ 99.99 นอกจากนี้แล้วการประเมินผลในมิติที่ 2 คือการประเมินความพึงพอใจการใช้งานระบบ โดยใช้แบบประเมินความพึงพอใจ ซึ่งมีการตรวจสอบแบบประเมินจากการวัดค่าความเที่ยงตรงพร้อมกับปรับปรุงร่างแบบประเมินความพึงพอใจ จึงได้ทำการประเมินผลความพึงพอใจของผู้ใช้งาน ทั้ง 2 กลุ่มได้แก่ กลุ่มผู้บันทึกข้อมูล และผู้ใช้ข้อมูล ดังตารางที่ 3 และ 4 โดยตารางที่ 3 เป็นการประเมินผล

ความพึงพอใจในการใช้งานการบันทึกข้อมูลการขนส่งด้วยกูเกิลแอสคริปต์ มีคะแนนความพึงพอใจอยู่ที่ 4.43 ± 0.53 คือ มีความพึงพอใจในระดับมากที่สุด โดยแบ่งเป็น 3 ด้าน ได้แก่ 1.ประสิทธิภาพในการทำงานของระบบ 2. ความสะดวกในการใช้งาน 3. ประโยชน์ในการใช้งาน ในส่วนของตารางที่ 4 เป็นการประเมินผลความพึงพอใจในการใช้ข้อมูลซึ่งเป็นการใช้ข้อมูลโดยผู้จัดการแผนกคลังสินค้าและการขนส่ง ที่รับข้อมูลที่ทำการวิเคราะห์และประเมินผล แสดงด้วย ลูกเกอร์สตูดิโอ นำไปใช้เพื่อประโยชน์ในด้านต่าง ๆ มีคะแนนความพึงพอใจอยู่ที่ 4.25 ± 0.52 คือ มีความพึงพอใจในระดับมากที่สุด โดยได้แบ่งการประเมินออกเป็น 3 ด้าน ได้แก่ 1. ความสะดวกในการใช้งาน 2. ความถูกต้องของข้อมูล 3. การนำไปใช้ประโยชน์

ตารางที่ 3 การประเมินผลความพึงพอใจของผู้บันทึกข้อมูล

ด้าน	$\bar{X}$	S.D.	การแปลผล
ประสิทธิภาพในการทำงานของระบบ	4.22	0.38	มากที่สุด
ความง่ายในการใช้งาน	4.33	0.58	มากที่สุด
ความรวดเร็วในการใช้งาน	4.00	0.00	มาก
มีรูปแบบที่เหมาะสมต่อการใช้งาน	4.33	0.58	มากที่สุด
ความสะดวกในการใช้งาน	4.33	0.58	มากที่สุด
รูปแบบง่ายต่อการใช้งานระบบ	4.33	0.58	มากที่สุด
ภาษาที่เข้าใจง่าย	4.67	0.58	มากที่สุด
ความสะดวกในการเข้าถึงระบบ	3.67	0.58	มาก
สามารถบันทึกข้อมูลได้ง่าย	4.67	0.58	มากที่สุด
ด้านประโยชน์ในการใช้งาน	4.67	0.58	มากที่สุด
ป้องกันเอกสารเสียหาย/สูญหาย	4.67	0.58	มากที่สุด
สามารถยืนยันตำแหน่งการส่งสินค้าได้	4.67	0.58	มากที่สุด
ลดขั้นตอนในการรายงานการส่งสินค้า	4.67	0.58	มากที่สุด
ลดเวลาในการบันทึกข้อมูล	4.67	0.58	มากที่สุด
รวม	4.43	0.53	มากที่สุด

ตารางที่ 3 ผู้บันทึกข้อมูลมีความพึงพอใจทั้ง 3 ด้านดังต่อไปนี้ 1. ด้านประสิทธิภาพในการทำงานของระบบมีคะแนนความพึงพอใจอยู่ที่ 4.22 ± 0.38 คือ มีความพึงพอใจในระดับมากที่สุด 2. ด้านความสะดวกในการใช้งานมีคะแนนความพึงพอใจอยู่ที่ 4.33 ± 0.58 คือ มีความพึงพอใจอยู่ในระดับมากที่สุด และ 3. ด้านประโยชน์ในการใช้งานมีคะแนนความพึงพอใจอยู่ที่ 4.67 ± 0.58 คือ มีความพึงพอใจอยู่ในระดับมากที่สุด

ตารางที่ 4 ผู้ใช้ข้อมูลมีความพึงพอใจทั้ง 3 ด้านดังต่อไปนี้ 1. ด้านความสะดวกในการใช้งานมีคะแนนความพึงพอใจอยู่ที่ 4.17 ± 0.24 คือ มีความพึงพอใจในระดับมาก 2. ด้านความถูกต้องของข้อมูลมีคะแนนความพึงพอใจอยู่ที่ 4.25 ± 0.71 คือ มีความพึงพอใจอยู่ในระดับมากที่สุด และ 3. ด้านการนำไปใช้ประโยชน์มีคะแนนความพึงพอใจอยู่ที่ 4.33 ± 0.47 คือ มีความพึงพอใจอยู่ในระดับมากที่สุด

ตารางที่ 4 การประเมินผลความพึงพอใจของผู้ใช้ข้อมูล

ด้าน	$\bar{X}$	S.D.	การแปลผล
ความสะดวกในการใช้งาน	4.17	0.24	มาก
รูปแบบง่ายต่อการใช้งานระบบ	4.00	0.00	มาก
ความรวดเร็วในการใช้งาน	4.50	0.71	มากที่สุด
ภาษาที่เข้าใจง่าย	4.00	0.00	มาก
ความถูกต้องของข้อมูล	4.25	0.71	มากที่สุด
ตรงตามวัตถุประสงค์ที่ต้องการ	4.50	0.71	มากที่สุด
ความครบถ้วนของข้อมูล	4.50	0.71	มากที่สุด
ความถูกต้องของข้อมูล	4.50	0.71	มากที่สุด
ข้อมูลมีความปลอดภัย	3.50	0.71	มาก
การนำไปใช้ประโยชน์	4.33	0.47	มากที่สุด
ใช้ผลการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อช่วยในการตัดสินใจ	4.50	0.71	มากที่สุด
ตรวจสอบสถานะของสินค้าได้ตามเวลาจริง	4.50	0.71	มากที่สุด
การนำไปข้อมูลไปวิเคราะห์ด้านอื่น ๆ	4.00	0.00	มาก
รวม	4.25	0.52	มากที่สุด

5. สรุปผลการดำเนินงาน

จากการศึกษาและปรับปรุงขั้นตอนของกระบวนการทำงานโดยออกแบบและพัฒนาระบบแจ้งเตือนและรายงานผลการขนส่งออนไลน์ ด้วยการประยุกต์ใช้ ฐานข้อมูลและแอปพลิเคชันสำหรับบันทึกข้อมูลการขนส่งสินค้า และแจ้งเตือนการขนส่งสินค้า ด้วย

แอปพลิเคชันไลน์พร้อมกับแสดงรายงานผลการขนส่งสินค้าด้วยลูกเกอร์สตูดิโอ ทำให้สามารถจัดเก็บและรวบรวมข้อมูลการขนส่งสินค้าด้วยยูทิลิตี้ สำหรับเป็นเครื่องมือสำหรับประมวลผลการขนส่ง เพื่อใช้ประกอบการวิเคราะห์และตัดสินใจ (Decision Making) ในด้านต่างๆ ได้แก่ ความสามารถในการขนส่งสินค้าของ

พนักงานรายบุคคล ความสามารถในการจัดส่งสินค้าของฝ่ายขนส่งในภาพรวม การบริหารจัดการงานขนส่งในการกระจายงานให้เหมาะสมให้แก่พนักงานขนส่ง เพื่อลดอัตราการเข้าออกของพนักงานจากความไม่เท่าเทียมกันของภาระงาน อีกทั้งยังสามารถตรวจสอบข้อมูลการส่งสินค้าได้แบบตามเวลาจริง นอกจากนี้แล้วยังสามารถรายงานผลการขนส่งในรูปแบบออนไลน์ ด้วยลูกเกอร์สตูดิโอ ทำให้ผู้บริหารสามารถเข้าถึงรายงานการขนส่งสินค้าได้ตลอดเวลา

ในส่วนข้อจำกัดของระบบ เนื่องจากระบบแจ้งเตือนและรายงานผลการขนส่งออนไลน์ จำเป็นต้องใช้อินเทอร์เน็ตเพื่อสนับสนุนการดำเนินงาน ดังนั้นหากอินเทอร์เน็ตหรือโทรศัพท์มือถือของผู้ใช้งานไม่รองรับหรืออยู่ในพื้นที่อับสัญญาณ ส่งผลทำให้ไม่สามารถดำเนินการได้ตามระบบที่ออกแบบไว้ได้ รวมถึงการรายงานผลออนไลน์ไม่สามารถแสดงผลได้เรียลไทม์ ผู้ใช้งานจำเป็นต้องรีเฟรชระบบให้ได้ข้อมูลที่ทันสมัย ทั้งนี้ในส่วนการบำรุงรักษาระบบสามารถดำเนินการโดยตรวจสอบฐานข้อมูลของระบบในกูเกิลชีท เพื่อมิให้เกินกว่าข้อจำกัดในการรองรับของฐานข้อมูลและมีการจัดทำข้อมูลสำรองเพื่อป้องกันข้อมูลสูญหาย

ข้อเสนอแนะงานวิจัยนี้สามารถพัฒนาเป็นโมบายแอปพลิเคชัน เพื่อให้มีความสะดวกในการเข้าถึงและสะดวกต่อการใช้งานและเข้าถึงระบบได้สะดวกยิ่งขึ้น

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] P. Sathapongpakdee (2022, August 25). Industry Outlook 2022-2024: Road Freight Transportation Service (1st ed.) [Online]. Available : <https://www.krungsri.com>
- [2] S. Beatham, C. Anumba, T. Thorpe and I Hedges, "KPIs: a critical appraisal of their use construction," *Benchmarking: An International Journal*, Vol. 11 No. 1, pp. 93-117, 2004.
- [3] B. Srisawaat, "Information Technology and Logistics," in *The 4th KamphaengPhet Rajabhat University National Conference*, Thailand, 2017, pp. 1337- 1348.
- [4] K. Athikulrat and S. Jangruxsakul, "Design and Implementation of Industrial Logistics Communication System with Google Workspace: A Case Study Hitech Pattana Industry Co., Ltd," *Journal of Professional Routine to Research*, vol. 10, pp. 55-66, 2023.
- [5] S. Rueangthanu "Improving electronic documents with Google Educational Applications in conjunction with Notification via LINE, case study: Narathiwat Technical College Narathiwat Rajanagarindra University.," M.S. thesis, Dept. Management of Information Tech., Prince of Songkla Univ., Thailand, 2021.
- [6] S. Rueangthanu "Improving electronic documents with Google Educational Applications in conjunction with Notification via LINE, case study: Narathiwat Technical College Narathiwat Rajanagarindra University.," M.S. thesis, Dept. Management of Information Tech., Univ., Prince of Songkla, Thailand, 2021.
- [7] J. Dicharoenchitphong, P. Thiranattaphong and P. Bunphrom, "Development of Application for Transportation System of Four Friends Co., Ltd on the Android Operating System," *APHEIT Journal*, vol. 5, no. 1, pp. 60-68, 2016.
- [8] K. Kanjanawanishkul, K. Bunkon, N. Ladkeaw and N. Khongcharern, "An alarm and monitoring system for the Elderly via a WiFi

- network,” *TNI Journal of Engineering and Technology*, vol.7, no.1, pp. 15-21, 2019.
- [9] W. Kuankhonsan and B. Wattana, “Monitoring and notification system for hot press machine operation with internet of things technology,” *Journal of Engineering, RMUTT (JERMUTT)*, vol.20, no.2, pp. 71-82, 2022.
- [10] S. Surintha, W. Charoenrat and K. Kamolrat, “Development of an automatic activity and appointments notification system via the LINE application: a case study of department of computer,” *Maejo Information Technology and Innovation Journal (MITIJ)*, vol.10, no.1, pp. 138-161, 2024.
- [11] T. Kongjai and A. Thathong, “Development of a notification system for automatic events and appointments through the LINE application.” *Mahidol R2R e-Journal*, vol.9, no. 2, pp. 32-45, 2022.
- [12] S. Srichuchat (1995), *Business Statistics* [Online]. Available: <https://cmudc.library.cmu.ac.th/frontend/Info/item/dc:92402>

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิ (Reader)

ต้นฉบับบทความวิจัยที่ตีพิมพ์วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีที่ 19 ฉบับที่ 2 (เดือนปีที่ 19 ฉบับที่ 2 เดือน เมษายน – กันยายน พ.ศ. 2567) ได้รับการตรวจสอบแก้ไขจากผู้ทรงคุณวุฒิดังรายนามต่อไปนี้

1.	รองศาสตราจารย์ ดร.สงกรานต์ วิริยะศาสตร์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
2.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วาที ร้อยโท ดร.รัฐวุฒิ วงษ์วิทย์	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
3.	รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชัย ฤทธิวิรุฬห์	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
4.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิธิเดช คุณาทองสัมฤทธิ์	ภาควิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง
5.	รองศาสตราจารย์ พ.อ.ดร.หญิงสุวิมล เสนีวงศ์ ณ อยุธยา	กองวิชาวิศวกรรมเครื่องกล ส่วนการศึกษา โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า
6.	รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษฎางค์ ศุภระมุล	สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมเครื่องกล คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ในพระบรมราชูปถัมภ์
7.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุรัชย์ เหมหิรัญ	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
8.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประทาน ศรีชัย	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์
9.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ณรงค์ เมตไตรพันธ์	สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
10.	อาจารย์สุรเชษฐ์ ไทวรภา	ภาควิชาคอมพิวเตอร์และหุ่นยนต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกรุงเทพ
11.	รองศาสตราจารย์ ดร.วันฐณพงษ์ คงแก้ว	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
12.	รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา การินทร์	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
13.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรทิพย์ แก่งอินทร์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
14.	อาจารย์ ดร.ศรีฐา แจ่มสามสี	ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิ (Reader)

ต้นฉบับบทความวิจัยที่ตีพิมพ์วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีที่ 19 ฉบับที่ 2 (เดือนปีที่ 19 ฉบับที่ 2 เดือน เมษายน – กันยายน พ.ศ. 2567) ได้รับการตรวจสอบแก้ไขจากผู้ทรงคุณวุฒิดังรายนามต่อไปนี้

15.	ดร.มนัญญา โอฬารวิไล	สถาบันวิจัยโลหะและวัสดุ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
16.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประชาสันติ ไตรยสุทธิ์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
17.	รองศาสตราจารย์ ดร.สมร หิรัญประดิษฐ์กุล	สาขาวิศวกรรมเคมี ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
18.	อาจารย์ ดร.สมพจน์ คำแก้ว	ห้องปฏิบัติการนวัตกรรมวิศวกรรมอบแห้งทางการเกษตร สำนักงานวิทยาเขตกำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
19.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิเชฐ นิลดวงดี	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบุรี
20.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุไรวรรณ พงสา	สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
21.	รองศาสตราจารย์ ดร.จกฤษณ์ เสนีตันติกุล	สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมกระบวนการเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
22.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ เอ่งฉ้วน	สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
23.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์วรินทร์ เกียรติคุณกุล	ภาควิศวกรรมกระบวนการและอุตสาหการ สถาบันวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร

คำแนะนำสำหรับผู้เขียนบทความลงตีพิมพ์
วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (วศ) เป็นวารสารที่ตีพิมพ์บทความวิจัยและบทความวิชาการ เพื่อเผยแพร่ความก้าวหน้าทางทฤษฎีและทางการทดลองในทุกสาขาวิศวกรรม ดัชนีบทความที่ส่งมายังกองบรรณาธิการ จะได้รับการประเมินโดยมีผู้ทรงคุณวุฒิ 2 คนบทความ (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 หรือดัดทอนผลงานวิจัยของผู้อื่นโดยที่ไม่ได้รับอนุญาตและมีการอ้างอิงที่เหมาะสม
- 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 ควรมีหัวข้อเรียงเรียงตามลำดับดังต่อไปนี้

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 ขอขอบคุณสนับสนุน หรือบุคคล (ถ้ามี)

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

2. วิธีการส่งบทความ

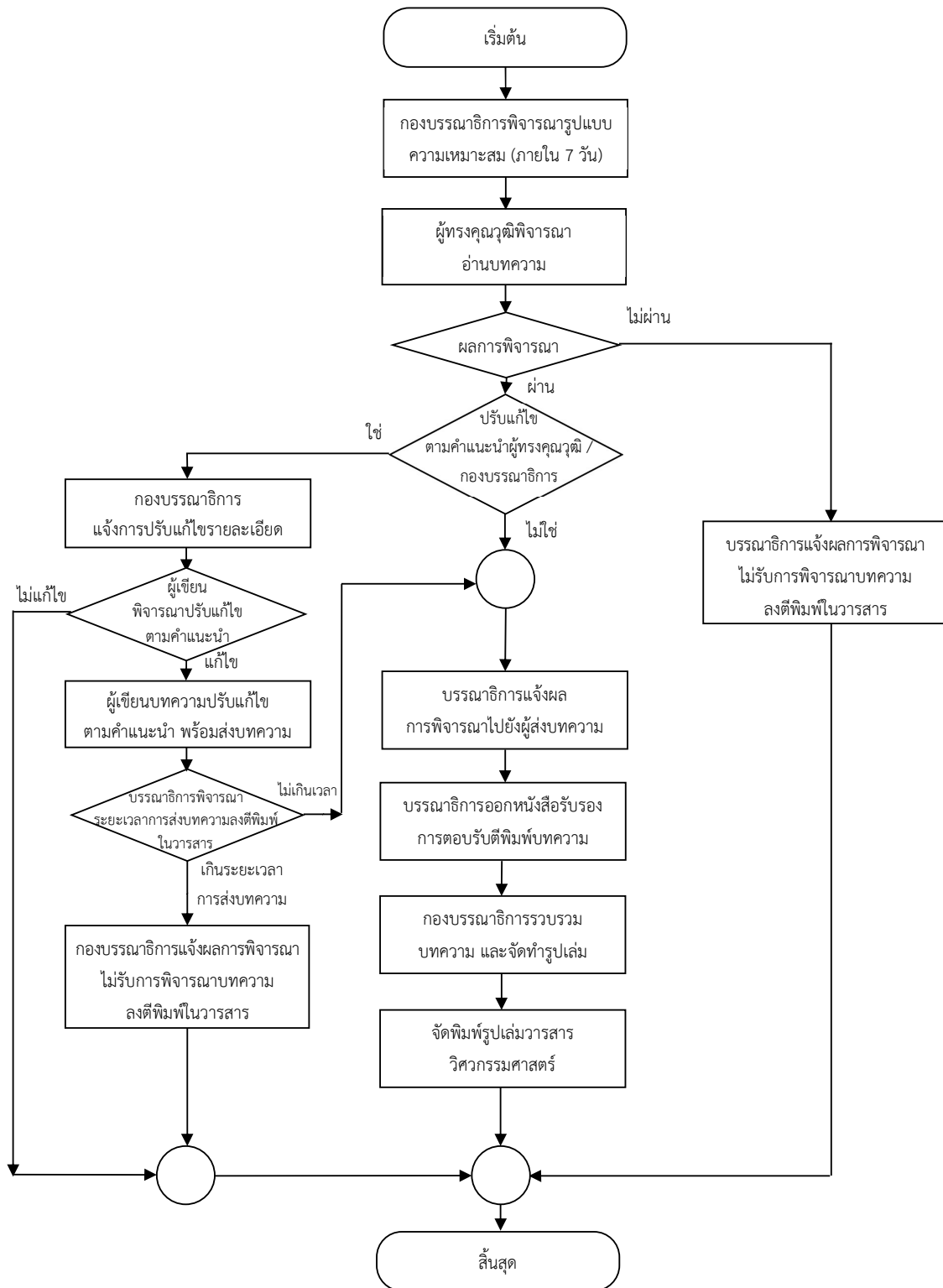
- 1) ส่งต้นฉบับบทความ ไฟล์ Microsoft Word และ pdf พร้อมแนบไฟล์สแกนแบบเสนอผลงานวิชาการเพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
- 2) ส่งไฟล์ต้นฉบับทางออนไลน์ที่
<https://www.tci-thaijo.org/index.php/sej/login>
- 3) ดูข้อมูลวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒเพิ่มเติม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

3. ขั้นตอนการประเมินบทความ

การประเมินบทความวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ มีขั้นตอนดังนี้

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

ขั้นตอนการพิจารณาผลงานเพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารคณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ





คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

Srinakharinwirot University Engineering Journal

Vol. 19 No.2 (April 2024 - September 2024)

ISSN : 2774 - 0269 (Online)

บทความวิจัย

- ศักยภาพการผลิตเอทานอลและก๊าซชีวภาพจากน้ำคั้นทางปาล์มและลำต้นปาล์มน้ำมัน
Potential of Ethanol and Biogas Production from Oil Palm Frond Juice and Oil Palm Trunk Juice
ทัศนีย์ ศรีมาชัย, ชัยยุทธ มิ่งงาม, สมพงษ์ โอทอง, เกียรติศักดิ์ รัตนดิลก ณ ภูเก็ต
- การศึกษาผลกระทบของการใช้วัสดุเปลี่ยนเฟสร่วมในตู้แช่เย็น
Study on the Effect of Refrigerator with Phase Change Material
อาทิตย์ คำต่าย, เลอศักดิ์ นาครินทร์
- การเปลี่ยนผลิตภัณฑ์ยางธรรมชาติเป็นน้ำมันดิบชีวภาพ โดยกระบวนการไฮโดรเทอร์มอลลิควิเดชัน
Conversion of Natural Rubber Product to Bio-Crude Oil By Hydrothermal Liquefaction Process
วิไลกษณนาม ผลเจริญ , กุลเชษฐ์ เพียรทอง
- การเรียนรู้ของเครื่องเพื่อทำนายพฤติกรรมลูกค้าต่อผลิตภัณฑ์ธนาคาร
Machine learning for Customer Behavior Prediction on Banking Product
ธีรินทร์ ฉายศิริโชติ, สุวรรณ อัครกุลชัย
- กระดาษออกฤทธิ์ชีวภาพเคลือบด้วยอนุภาคซิลเวอร์เหล็กออกไซด์สำหรับบรรจุภัณฑ์อาหาร
Bioactive Paper Coated with Green Synthesized Silver/iron Oxide for Food Packaging
วิชญ์ จิตธรรม , พรนภา เกษมศิริ
- การศึกษาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของหม้อไฟ
The Study of Thermal Efficiency of hot-pot
อาทิตย์ คำต่าย, กรณ์ภพ รัตนวิจิตร, เลอศักดิ์ นาครินทร์
- ศักยภาพการผลิตเชื้อเพลิง RDF -5 จากขยะชุมชนผสมยางพารา ในพื้นที่อุทยานธรณีโลกจังหวัดสตูล
Production Potential of RDF -5 Fuel from Municipal Solid Waste Mixed with Natural Rubber in Satun Global Geopark
ทัศนีย์ ศรีมาชัย, พลพัฒน์ รวมเจริญ, ชัยยุทธ มิ่งงาม, ศุภชัย ชัยณรงค์, เกียรติศักดิ์ รัตนดิลก ณ ภูเก็ต
- ตัวแบบโปรแกรมเป้าหมายแบบหลายวัตถุประสงค์ที่ผสมผสานกับระบบอนุमानแบบฟัซซี่สำหรับปัญหาการมอบหมายงานของหุ่นยนต์ร่วมปฏิบัติงาน
An FIS-Integrated Multi-Objective Goal Programming Model for Cobot Assignment Problem
มาริษา กิมภาพร , วุฒินันท์ นุ่นแก้ว
- การพัฒนาระบบแจ้งเตือนและรายงานผลการขนส่งออนไลน์ กรณีศึกษา แผนกขนส่งสินค้าบริษัท ธาราทองเมทัล จำกัด 82
Development of Transportation Notification and On line Report : a case study of Tharathong Metal Co ., Ltd
ฝนทิพย์ สายเทพ สิทธา เดชปรีชาพล สุภัสสร ภูศรี กิตติชัย อธิกุลรัตน์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

เลขที่ 63 หมู่ 7 ถนนรังสิต - นครนายก อำเภองครักษ์ จังหวัดนครนายก 26120

โทร 0 2649 5000 ต่อ 27560

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