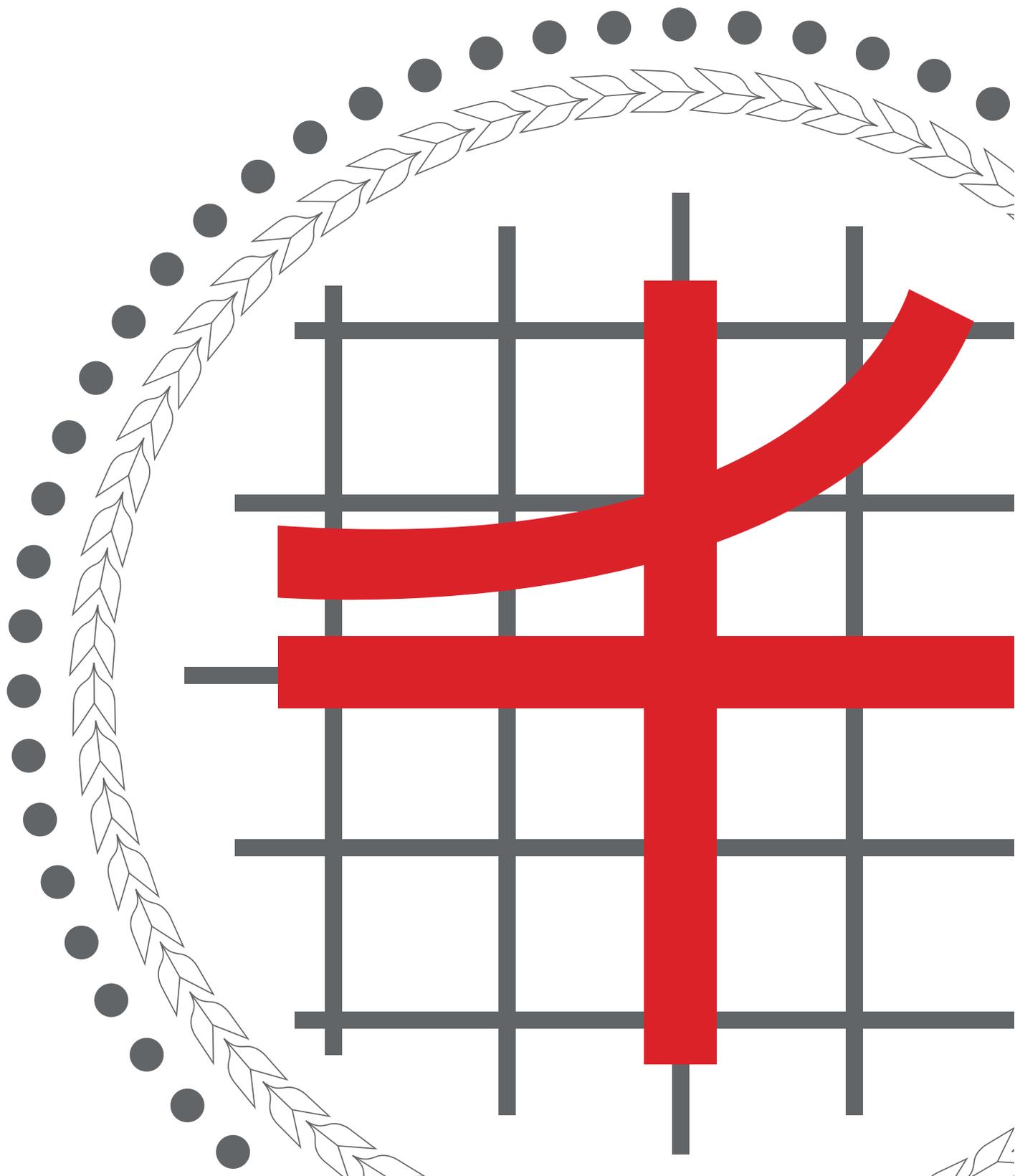


Srinakharinwirot University Engineering Journal

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

Vol. 18 No.2 (April 2023 - September 2023)

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 ช่วงเดือน เมษายน – กันยายน ซึ่งบทความที่ได้รับการตีพิมพ์ทุกบทความจะผ่านการทบทวนโดยผู้ทรงคุณวุฒิอย่างน้อย 2 คนต่อบทความ (Peer-review) และประเมินบทความในลักษณะเป็นผู้ทรงคุณวุฒิที่ประเมินบทความไม่ทราบชื่อผู้แต่งและผู้แต่งไม่ทราบชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ หรือ Double Blinded review และสงวนสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พุทธศักราช 2521 และเผยแพร่แบบออนไลน์ทั่วประเทศ

วัตถุประสงค์

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (วศม) มีวัตถุประสงค์เพื่อคัดสรรและเผยแพร่บทความวิจัย และบทความวิชาการทางด้านวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีในสาขาวิศวกรรมเคมี วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมชีวการแพทย์ และสาขาใกล้เคียงอื่นๆ ทั้งในเชิงทฤษฎี และเชิงปฏิบัติ

เจ้าของ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

กองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

63 หมู่ 7 ตำบลอ้อมครีษ อำเภอบางบาล

จังหวัดนนทบุรี 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 อัครเอกพาลิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.พานิช วุฒิพิทักษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.เอเดรียน อีแวน พลัด	สถาบันสิริวิทยเมธี
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 ริมคูสิต	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.ขวลิท ชาลีรักษ์ตระกูล	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.เดือนใจ สมบูรณ์วิวัฒน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร. ธนินยา เกาศล	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รองศาสตราจารย์ ดร.ประจวบ กล่อมจิตร์	มหาวิทยาลัยศิลปากร
รองศาสตราจารย์ ดร.รุ่งเรือง กาลศิริศิลป์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
พันเอกหญิง รองศาสตราจารย์ ดร.สุวิมล เสนีวงศ์ ณ อยุธยา	โรงเรียนนายร้อยพระจุลจอมเกล้า

บรรณาธิการอำนวยการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิลดา หวังพานิช

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.ประชา บุญยานิชกุล

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.สุธิตา ทีปรัักษพันธ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
อาจารย์นาวี รุจิตามพ์	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
ศาสตราจารย์ ดร.ทงเกียรติ เกียรติศิริโรจน์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศาสตราจารย์ ดร.ประยุทธ์ อัครเอกภาลิน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.พานิช วุฒิพฤษกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.เอเดรียน อีแวน พลัด	สถาบันสิริวิทยเมธี
ศาสตราจารย์ดร.มดุงศักดิ์ รัตนเดโช	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์ จ่านงไทย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ยอดสุดใจ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ศาสตราจารย์ ดร.วรงค์ ปวรจารย์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.ศราวุธ ริมดิลิต	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.สุทธิชัย เปรมฤดีปรีชาชาญ	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศาสตราจารย์ ดร.พงษ์เจต พรหมวงศ์	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.วิทยา ทิพย์สุวรรณพร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ โสภาแดง	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.อริคม ฤกษ์บุตร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
รองศาสตราจารย์ ดร.ดวงพรรณ กริชชาญชัย ศงคารินทร์	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต ชาลีรักษ์ตระกูล	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 ศรีกงพาน

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

การประยุกต์การออกแบบการทดลองเพื่อลดข้อเสียในกระบวนการบรรจุแผงยาเม็ด Application of Design of Experiments to Reducing Defects in Tablet Packing Process ทิวานันท์ มณีรัตน์ จิรพัฒน์ เงามประเสริฐวงศ์	1
การออกแบบเครื่องบรรจุน้ำซุปแบบอัตโนมัติ Design of Automatic Soup Filling Machine ชนินทร เรืองรักษา พิระยศ แสนโกชน์	17
การลดข้อเสียจากข้อบกพร่องสีแตกและสีบางในกระบวนการพ่นสีฝุ่นบนกรอบกระจกของหลังคารถกระบะ อเนกประสงค์ Defective Reduction from Cracking Paint and Thin Paint in Powder Coated Painting Process of Window Frame of Canopy พิชญา วาดสูงเนิน นภัตสวงค์ โอสถศิลป์	31
การลดสัดส่วนของเสียจากการปนเปื้อนสิ่งแปลกปลอมในกระบวนการผลิตปลั๊กตัวเมีย Defective Rate Reduction from Foreign Matter Contamination in Female Connector Plug Manufacturing Process อรรณพ งามสำโรง นภัตสวงค์ โอสถศิลป์	43
การศึกษาคุณลักษณะการเผาไหม้และประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาชีวมวลทรงกระบอก Investigation on Combustion Characteristics and Thermal Efficiency of Cylindrical Biomass Stove พรพิทักษ์ ถมปัด กุลเชษฐ์ เพียรทอง จริง ดินเชิดชู	58
การพัฒนาโปรแกรมเติมค่าสูญหายข้อมูลฝนรายวันจากวิธีถ่วงน้ำหนักระยะทางผกผันและวิธีถ่วงน้ำหนักสัมพันธ์ Software Development of Missing Daily Rainfall Data from Inverse Distance Weighting and Correlation Coefficient Weighting Method จันทนา ปัญญาวารภรณ์ ศรีสุนี วุฒิมงศ์โยธิน	70
การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปรูปร่างสามเหลี่ยมด้านเท่าโดยใช้วิธีโครงข่ายประสาทเทียม Design of An Equilateral Triangular Microstrip Antenna Using Neural network ณสกลธน สมบัติธีระ เหมือนฝัน อำทอง เกரியงเดช พระธานี ชาญไชย ไทยเจียม	82

สารบัญ (ต่อ)

บทความวิจัย

การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยใช้วิธีเชิงพันธุกรรม Design of a Square Microstrip Antenna Using Genetic Algorithms รัฐนันท์ ลออบุตร ศิริกานต์ พวงมณี สุกันยา แสงจันทร์ ชาญไชย ไทยเจียม	89
การหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมในการเชื่อมจุดของอลูมิเนียมอัลลอย 6061-T6 ในอุตสาหกรรมยานยนต์ The Parameters Optimization for Spot-welding of 6061-T6 Aluminum Alloy in Automotive Industry กวิน สนธิเพิ่มพูน ชลลดา เรือนอินทร์ เดชฤทธิ์ กิติเดช ปริญญา ดวงจิตร	96

การประยุกต์การออกแบบการทดลองเพื่อลดของเสียในกระบวนการบรรจุแผงยาเม็ด Application of Design of Experiments to Reducing Defects in Tablet Packing Process

ทิวานันท์ มณีรัตน์ จีรพัฒน์ เจาประเสริฐวงศ์*

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถ.พญาไท เขตปทุมวัน แขวงวังใหม่ กรุงเทพมหานคร 10330

Tiwanan Maneerat Jeerapat Ngaoprasertwong*

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University

Phayathai Road, Pathumwan, Wang Mai, Bangkok, Thailand 10330

*Corresponding author Email: pharmaconc@gmail.com

(Received: November 12, 2022; Revised: January 26, 2023; Accepted: April 18, 2023)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดสัดส่วนแผงยาเสียของบรรจุภัณฑ์อะลูมิเนียมฟอยล์ในรูปแบบแผงสตรีปที่เป็นแผงเสียจากการปิดผนึกไม่สมบูรณ์ รวมทั้งลดระยะเวลาในการปรับตั้งเครื่องจักร เริ่มจากทำการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาและปัจจัยที่เกี่ยวข้องด้วยแผนภาพแสดงสาเหตุและผล พร้อมทั้งคัดกรองปัจจัยโดยใช้คะแนนความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผล และการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ จากนั้นทำการทดลองแบบที่ละปัจจัย และใช้หลักการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลเพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสม จากการทดลองพบว่าระดับปัจจัยที่เหมาะสม คือ อุณหภูมิของลูกกลิ้งปิดผนึกเท่ากับ 130 °C, ความเร็วในการหมุนลูกกลิ้งปิดผนึกเท่ากับ 14 รอบ/นาที, ความตึงของ ฟอยล์ทั้งสองข้าง คือ ระดับ 7 โดยเมื่อนำระดับปัจจัยที่ได้มาปรับใช้ในกระบวนการบรรจุยาเม็ดในรูปแบบแผงสตรีปพบว่าสัดส่วนแผงยาเสียประเภทแผงปิดผนึกไม่สมบูรณ์เฉลี่ยต่อวัน ลดลงจาก 4.82% เหลือเพียง 1.38% และยังพบว่าสามารถลดระยะเวลาในการปรับตั้งเครื่องจักรจาก 130 นาที/วันเหลือเพียง 78 นาที/วัน

คำสำคัญ: การลดของเสีย การออกแบบการทดลอง การบรรจุยาเม็ด บรรจุภัณฑ์ประเภทแผงสตรีป

ABSTRACT

This research aimed to reduce the proportion of aluminum foil packaging in strip packs due to incomplete sealing. Including reducing the time for adjusting the machine start by analyzing the cause of the problem and related factors with the cause and effect diagram. Furthermore, screening factors using cause and effect matrix scores and Failure Mode and Effect Analysis (FMEA). Then, one factor at a time experiments were performed. Factorial experimental design principles were used to find optimal factor levels. The experiment found that the optimum factor was the temperature of the sealing roller was 130 °C, the sealing roller rotation speed was 14 rpm, and the tension of both sides of the foil was level 7. When taking the factor level obtained adapted to the tablet strip packing process, it was found

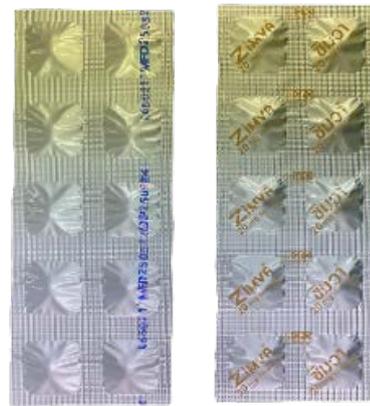
that the proportion of defects in aluminum foil strips packaging that had seal defects decreased from 4.82% to 1.38%. In addition, the machine adjustment time was reduced from 130 minutes/day to 78 minutes/day.

Keyword: Defective reduction, design of experiment, tablet packing process, strip packaging.

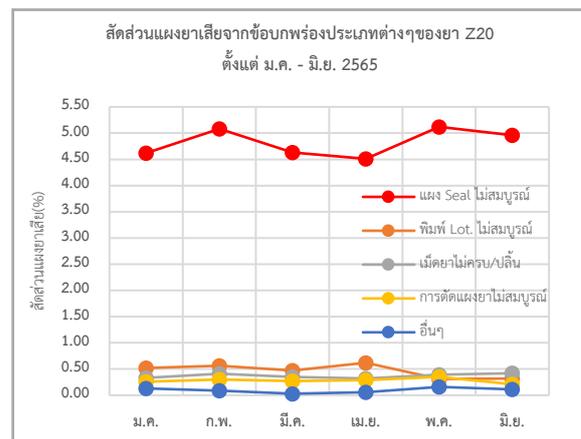
1. ที่มาและความสำคัญของงานวิจัย

การเติบโตของอุตสาหกรรมยาในปี 2565-2566 [1] มีการคาดการณ์ว่ามูลค่าจำหน่ายยาจะขยายตัวเฉลี่ย 3.50% ต่อปี เนื่องจากกระแสการใส่ใจสุขภาพของคนไทยหลังการระบาดของรุนแรงของไวรัส COVID-19 ทั้งนี้อุตสาหกรรมการผลิตยาได้ถูกจัดเป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมอนาคต [2] ในแผนแม่บทภายใต้ยุทธศาสตร์ชาติ พ.ศ. 2561 - 2580 ซึ่งเป็นยุทธศาสตร์การพัฒนาาระบบยาแห่งชาติ มุ่งเน้นการเพิ่มศักยภาพอุตสาหกรรมการผลิตยาในประเทศ และโรงงานผลิตยากรณีศึกษาจัดเป็นหน่วยงานรัฐวิสาหกิจที่ทำรายได้ให้รัฐอย่างสม่ำเสมอ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อผลิตและจัดหาเวชภัณฑ์ เพื่อสนับสนุนระบบสาธารณสุขด้านยาของประเทศ โรงงานกรณีศึกษามีการผลิตยาหลากหลายรูปแบบ ซึ่งรูปแบบที่มียอดจำหน่ายสูงสุดคือผลิตภัณฑ์ยาเม็ด และเมื่อพิจารณาโครงสร้างต้นทุนของการผลิตยาเม็ดพบว่ามีส่วนต้นทุนด้านบรรจุภัณฑ์ที่มีมูลค่าค่อนข้างสูง ซึ่งคิดเป็น 30% ของต้นทุนทั้งหมด นอกจากนี้การวิเคราะห์ข้อมูลการสูญเสียบรรจุภัณฑ์ในกระบวนการบรรจุยาเม็ด พบว่าบรรจุภัณฑ์ประเภทอะลูมิเนียมฟอยล์ในรูปแบบแผงสตรีพดังแสดงในรูปที่ 1 ก่อให้เกิดมูลค่าการสูญเสียบรรจุภัณฑ์จากกระบวนการบรรจุสูงที่สุด

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นเฉพาะการปรับปรุงกระบวนการบรรจุยาเม็ดชนิด Z20 ที่มีปริมาณการผลิต และสัดส่วนของแผงยาเสียมากที่สุด โดยเมื่อพิจารณาข้อมูลสัดส่วนแผงยา Z20 ที่เสียเฉลี่ยต่อวันจำแนกตามประเภทของข้อบกพร่อง พบว่าแผงยาเสียที่เกิดจากการปิดผนึกแผงไม่สมบูรณ์ ทำให้เกิดการสูญเสียบรรจุภัณฑ์ประเภทอะลูมิเนียมฟอยล์มากที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 4.82% ซึ่งคิดเป็น 79.89% ของสัดส่วนแผงยาเสียรวมทุกข้อบกพร่องดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 1 ตัวอย่างบรรจุภัณฑ์ประเภทอะลูมิเนียมฟอยล์ในรูปแบบแผงสตรีพในโรงงานกรณีศึกษา



รูปที่ 2 สัดส่วนแผงยา Z20 ที่เสียเฉลี่ยต่อวัน
จำแนกตามประเภทของข้อบกพร่อง

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

ในการดำเนินงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดสัดส่วนแผงยาเสีย และระยะเวลาการปรับตั้งเครื่องจักรในกระบวนการบรรจุยาเม็ด จึงได้

ทำการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง เพื่อนำมาใช้เป็นแนวทางในการดำเนินงานวิจัย โดยมีทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่

2.1 หลักการทำงานของเครื่องบรรจุยาเม็ดในรูปแบบแผงสตรีป

อาศัยการให้ความร้อนกับวัสดุที่ใช้ในการบรรจุเม็ดยา ผ่านลูกกลิ้งปิดผนึกทั้งสองข้าง โดยลูกกลิ้งปิดผนึกจะมีทั้งส่วนที่เป็นช่อง (Pocket) ที่รับเม็ดยาจากรางยาด้านบนลงมาที่ตัวแผงยา จากนั้นส่วนเรียบของลูกกลิ้งปิดผนึกจะทำหน้าที่กดอัดวัสดุทั้งสองด้านให้ยึดติดกันด้วยความร้อน เมื่อประกบวัสดุสองด้านเข้าด้วยกันจะผ่านกระบวนการตัดแบ่งเป็นแผงยาให้ได้ตามขนาดที่ต้องการด้วยชุดใบมีด (Cutter) ทั้งแนวตั้งและแนวนอน สามารถทดสอบความสามารถในการป้องกันและรักษาคุณภาพของเม็ดยาภายในแผงได้โดยการตรวจสอบการรั่วซึมของแผง (Leak test) โดยอาศัยหลักการการทดสอบสุญญากาศในน้ำ [3]

2.2 เครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์ปัญหา

1) แผนภูมิพาเรโต เป็นแผนภูมิแท่งที่มักนำมาใช้แสดงจำนวนนับหรือเปอร์เซ็นต์ของของเสีย โดยจัดเรียงจากมากไปน้อย เพื่อใช้เปรียบเทียบลำดับความสำคัญหรือปริมาณของปัญหาระหว่างข้อมูลประเภทต่างๆ [4] การตัดสินใจในหลักพาเรโต คือ 80-20 ซึ่งหมายความว่าปัญหาหรือความสูญเสียที่มีความสำคัญมากจำนวน 80% มักมีสาเหตุมาจาก ประมาณ 20 % ของสาเหตุทั้งหมด ในขณะที่อีกประมาณ 80 % ของสาเหตุจะมีผลต่อปัญหาที่มีความสำคัญเพียงเล็กน้อยอีกจำนวน 20% ของปัญหาเท่านั้น [5]

2) ผังแสดงเหตุและผล (Cause and Effect Diagram หรือ Fishbone Diagram) เป็นผังที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างคุณลักษณะทางคุณภาพและปัจจัยต่างๆที่เกี่ยวข้อง รายละเอียดของผังแสดงเหตุและผล จะประกอบด้วยหัวก้างปลา ซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่เกิดขึ้น ส่วนก้างแต่ละก้างนั้นคือเหตุที่ทำให้เกิดผลนั้น ส่วนใหญ่มักจะแบ่งเป็น 4M ได้แก่ คน (Man), เครื่องจักร (Machine),

วัสดุ (Material) และ วิธีการ (Method) นอกจากนี้ อาจมีเรื่องของ Money หรือ Environment เข้ามาเกี่ยวข้องด้วยขึ้นอยู่กับลักษณะของปัญหา [6]

3) การวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบ (Failure Mode and Effect Analysis : FMEA) เป็นการประเมินความเพียงพอของการควบคุม ที่มีส่วนสำคัญในการลดความเสี่ยงโดยการเปลี่ยนแปลงแผนควบคุมการผลิตวัตถุประสงค์ของการวิเคราะห์คือการป้องกันความล้มเหลวก่อนส่งมอบผลิตภัณฑ์ถึงมือลูกค้า [7] โดยมีการประเมินตัวเลขแสดงความเสี่ยง (Risk Priority Number หรือ RPN) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้กำหนดความสำคัญของ Failure Mode ดังสมการที่ (1)

$$RPN = S \times O \times D \quad (1)$$

โดยค่า S คือ ค่าความร้ายแรงของข้อบกพร่อง (Severity) ,ค่า O คือค่าของความถี่ในการเกิดข้อบกพร่อง (Occurrence) และค่า D เป็นค่าความสามารถในการตรวจพบข้อบกพร่องก่อนส่งถึงมือลูกค้า (Detection) [8] จากนั้นทำการจัดลำดับผลกระทบตามคะแนน RPN หากลักษณะปัญหาใดมีคะแนนสูงให้ทำการแก้ไขก่อน พร้อมทั้งดำเนินการหาวิธีป้องกันต่อไป

2.3 การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment)

เป็นเครื่องมือทางสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ และปรับปรุงกระบวนการ เพื่อใช้ในการเก็บข้อมูล และตรวจสอบว่าตัวแปรนำเข้า หรือตัวแปรที่สนใจมีผลกระทบต่อกระบวนการหรือตัวแปรตอบสนองหรือไม่ [9] การทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (General Full Factorial Design) เป็นการทดลองศึกษา ในกรณีที่มีปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป และแต่ละปัจจัยก็อาจจะมีหลายระดับ (Level) โดยระดับเหล่านี้ อาจจะทำให้เกิดจากข้อมูลแปรผัน หรืออาจเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพ นอกจากจะเกิดอิทธิพลหลัก (Main Effect) ของปัจจัยที่สนใจแล้ว ยังอาจเกิดอิทธิพลร่วม (Interaction) ระหว่างปัจจัยด้วยการทดลองแฟกทอเรียลจึงเป็นแผนการทดลอง

ที่มีประสิทธิภาพในการตรวจสอบอิทธิพลของปัจจัยหลายตัวพร้อมกัน ทำให้สามารถหลีกเลี่ยงการสรุปผลที่ผิดพลาดได้ในกรณีที่มีอิทธิพลร่วมเกิดขึ้น อีกทั้งยังทำให้สามารถประมาณค่าผลลัพธ์ที่ระดับปัจจัยต่าง ๆ ได้ [5]

2.4 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1) งานวิจัยที่ศึกษากระบวนการติดฉลากของโรงงานผลิตและบรรจุ ซึ่งพบปัญหาเวลาสูญเสียจากการหยุดการทำงานของเครื่องติดฉลาก โดยแบ่งของเสียเป็น 3 ประเภท ได้แก่ ฉลากพับ ฉลากเหลื่อม และโลโก้ฉลากไม่ตรงกัน พบว่าสาเหตุมาจากการปรับพารามิเตอร์เครื่องจักรอย่างไม่เหมาะสม และได้นำการออกแบบการทดลองมาใช้เพื่อหารูปแบบการปรับตั้งเครื่องจักรที่เหมาะสมที่สุด โดยผลตอบสนองเกี่ยวข้องโดยตรงกับลักษณะข้อบกพร่องของผลิตภัณฑ์ทั้ง 3 ประเภทที่เกิดขึ้น ได้แก่ สัดส่วนของขวดที่ฉลากพับต่อจำนวนขวดในขนาดกลุ่มตัวอย่าง, ระยะเฉลี่ยของฉลากเหลื่อมภายในกลุ่มตัวอย่าง และระยะเฉลี่ยระหว่างเส้นศูนย์กลางแนวตั้งของฉลากหน้าและฉลากคอในกลุ่มตัวอย่าง นอกจากนี้ยังมีพารามิเตอร์ที่เป็นปัจจัยนำเข้ามีทั้งหมด 5 พารามิเตอร์ ได้แก่ ระยะห่างจากขวดในทิศทาง labeling station , ระยะห่างจากขวดในทิศทางซ้าย-ขวาจากขวดของ labeling station , ความหนาของกาวบน glue roller, อัตราการป้อนกาวจากเครื่องปั๊ม และความดันลมเป่าฉลาก เมื่อนำทุกปัจจัยนำเข้ามาทำการออกแบบการทดลอง ผลลัพธ์ที่ได้ทำให้ได้ค่าระดับพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด และนำไปเป็นมาตรฐานใหม่ของการปรับตั้งเครื่องติดฉลาก พบว่าสามารถลดค่าเฉลี่ยของข้อบกพร่องของผลิตภัณฑ์ฉลากพับ ฉลากเหลื่อม และโลโก้ไม่ตรงกันลงได้ 89.9% 75.6% และ 75.1% ตามลำดับ และลดเวลาสูญเสียและความถี่ในการหยุดเครื่องจักรลงได้ 40.28% และ 72.72% ตามลำดับ [10]

2) งานวิจัยที่ลดของเสียจากกระบวนการบรรจุขนมขบเคี้ยวที่เกิดจากอาการของรั่ว โดยการศึกษาระดับปัจจัยในการปรับตั้งค่าเครื่องจักรให้เหมาะสม ซึ่งใช้การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล พบว่ามี 4 ปัจจัย

ได้แก่ ความเร็วรอบ อุณหภูมิ แรงกด และเวลาในการซีล โดยทำการทดลองซ้ำแบบละ 3 ครั้ง จำนวนผลการทดลองทั้งสิ้น 48 การทดลอง ผลที่ได้จากการทดลองพบว่าระดับปัจจัยในการปรับตั้งเครื่องจักรที่เหมาะสม คือ ความเร็วรอบ 60 รอบ/นาที อุณหภูมิ 157 °C แรงกด 6 บาร์ และเวลาในการผนึก 0.5 วินาที เมื่อนำผลจากการวิจัยมาใช้ในกระบวนการทำงานจริงพบว่า มูลค่าของเสียที่เกิดจากอาการของรั่วลดลง 30.29 % [11]

3. การดำเนินงานวิจัย

3.1 ศึกษาขั้นตอนการทำงานของเครื่องจักร

เครื่องบรรจุยาเม็ดเข้าแผงสตรีปที่ใช้ในโรงงานกรณีศึกษา เป็นเครื่องบรรจุยาเม็ด UD รุ่น UD.39 – 10Hi มีหลักการทำงาน 4 ขั้นตอนหลัก ได้แก่

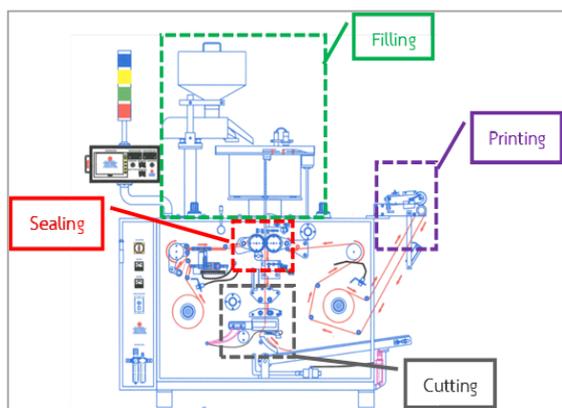
1) การเติมเม็ดยา (Filling) : ขั้นตอนนี้จะมีส่วนประกอบของเครื่องจักรที่เกี่ยวข้อง 2 ส่วน ได้แก่ Hopper และ Vibrator Disc ซึ่งทั้งสองส่วนนี้จะมีการปรับความแรงของการสั่น เพื่อช่วยลำเลียงเม็ดยาให้ลงรางสปริง และรางปล่อยเม็ดยาที่อยู่ด้านล่างต่อไป

2) การพิมพ์ Lot. (Printing) : จะมีชุดพิมพ์ Lot. ซึ่งมีลักษณะเป็น Roller ที่มีอักษรยางที่ถูกตั้ง Lot./วันผลิต/วันหมดอายุของยา Lot. ที่กำลังบรรจุติดตั้งอยู่บน Roller ของ Lot. จะหมุนไปแตะ Roller ของหมึกพิมพ์ จากนั้นอักษรยางจะติดหมึกพิมพ์แล้วหมุนมาประทับลงบนแผงยาตามรอยของอักษรยาง

3) การผนึกแผงยา (Sealing) : เป็นกระบวนการหลักซึ่งเป็นหัวใจสำคัญของเครื่องบรรจุยาเข้าแผงสตรีปการผนึกแผงยาจะใช้ความร้อนจาก Heater ที่อยู่ในลูกกลิ้งปิดผนึกซึ่งมีลักษณะเป็นผิวหนาเล็ก ๆ ทั้งสองด้าน โดยระหว่างการบรรจุจะต้องมีการปรับตั้งค่าอุณหภูมิของลูกกลิ้งปิดผนึกให้สัมพันธ์กับความเร็วในการหมุนของลูกกลิ้งปิดผนึกนอกจากนี้ยังต้องปรับความตึงของม้วน ฟอยล์ ที่หมุนเข้ามาที่ลูกกลิ้งปิดผนึกให้เหมาะสมด้วยเช่นกัน

4.) การตัดแบ่งแผงยา (Cutting) : จะมีชุด Cutter 2 ชุด คือ Transverse Cutter และ Longitudinal Cutter

ซึ่งชุดใบมีดทั้ง 2 ชุด จะทำหน้าที่ตัดแบ่งแผงยาทั้งตามแนว ยาว และตามแนวขวาง โดย Longitudinal Cutter ใบมีด จะกลมมีการหมุนเพื่อกัดแผงยาตามแนวยาว และมีชุดลูก ยางกลม ช่วยประคองให้แผงยาตรงและนิ่งก่อนเข้าไปที่ Transverse Cutter ที่ใช้ระบบนิวเมติกส์ (Pneumatic) ใน การตัดชุด Cutter ทั้งสองด้านเพื่อตัดแผงยาตามแนวขวาง รายละเอียดภาพรวมของเครื่องจักร แสดงในรูปที่ 3

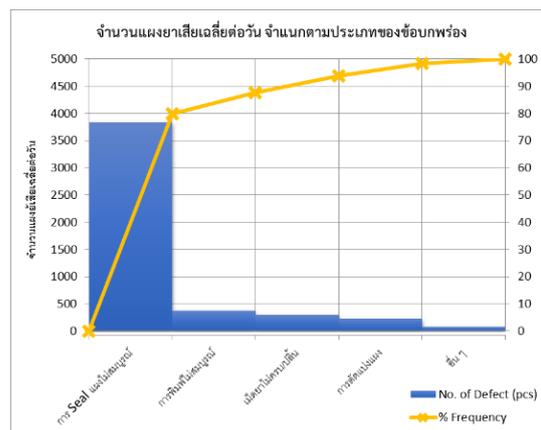


รูปที่ 3 ภาพรวมของเครื่องบรรจุยาเม็ดเข้าแผงสตรีพ

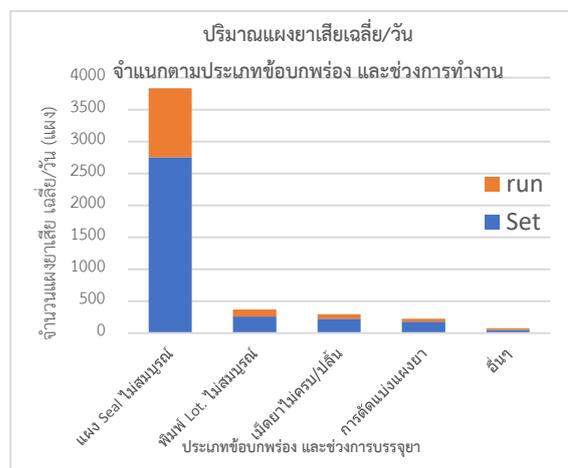
3.2 การวิเคราะห์สภาพปัญหาปัจจุบัน

อะลูมิเนียมฟอยล์ที่ใช้ในโรงงานกรณีศึกษาเป็นชนิด Soft annealed Foil ประกอบด้วยชั้น 4 ชั้น เรียงจาก ชั้นนอกไปชั้นใน ได้แก่ เซลโลเฟน, PE, อะลูมิเนียมฟอยล์, และ PE กำหนดความหนาแต่ละชั้นไม่ต่ำกว่า 20, 15, 15 และ 20 ไมครอนตามลำดับ และความหนารวมทั้ง 4 ชั้น จะต้องไม่ต่ำกว่า 70 ไมครอน โดยประเภทของข้อบกพร่อง ที่ทำให้เกิดแผงยาเสียที่พบในปัจจุบัน แบ่งออกเป็น 5 ประเภท ได้แก่ การปิดผนึกแผงไม่สมบูรณ์ การพิมพ์ไม่ สมบูรณ์ เม็ดยาไม่ครบในแผงการตัดแบ่งแผงยาไม่สมบูรณ์ และข้อบกพร่องประเภทอื่น ๆ แสดงการวิเคราะห์ปริมาณ แผงยาเสียเฉลี่ย ต่อวัน จำแนกตาม ประเภทของ ข้อบกพร่องในรูปที่ 4

นอกจากนี้ยังพบว่าข้อบกพร่องทั้ง 5 ประเภท สามารถ เกิดขึ้นได้ทั้งในช่วงการปรับตั้งเครื่องจักร และช่วงการเดิน เครื่องจักรจริง ผู้วิจัยจึงได้นำข้อมูลทั้ง 2 ช่วงมาเปรียบเทียบ เพื่อวิเคราะห์ปริมาณแผงยาเสีย ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 4 ปริมาณแผงยาเสียเฉลี่ย/วัน จำแนกตามข้อบกพร่อง



รูปที่ 5 ปริมาณแผงยาเสียเฉลี่ยต่อวัน

จำแนกตามประเภทข้อบกพร่อง และช่วงการทำงาน

จากการพิจารณาข้อมูล จึงเลือกที่จะทำการศึกษาวัยัย ข้อบกพร่องประเภทแผงปิดผนึกไม่สมบูรณ์ ในระหว่างการ ปรับตั้งเครื่องจักร เนื่องจากเกิดการสูญเสียแผงยามากกว่า ช่วงที่เดินเครื่องจักรจริง และหากสามารถทำการปรับปรุง แก่ไขข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการปรับตั้ง เครื่องจักร อาจนำแนวทางการแก้ไขปัญหาไปประยุกต์ใช้ใน ระหว่างกระบวนการเดินเครื่องจักรจริงได้

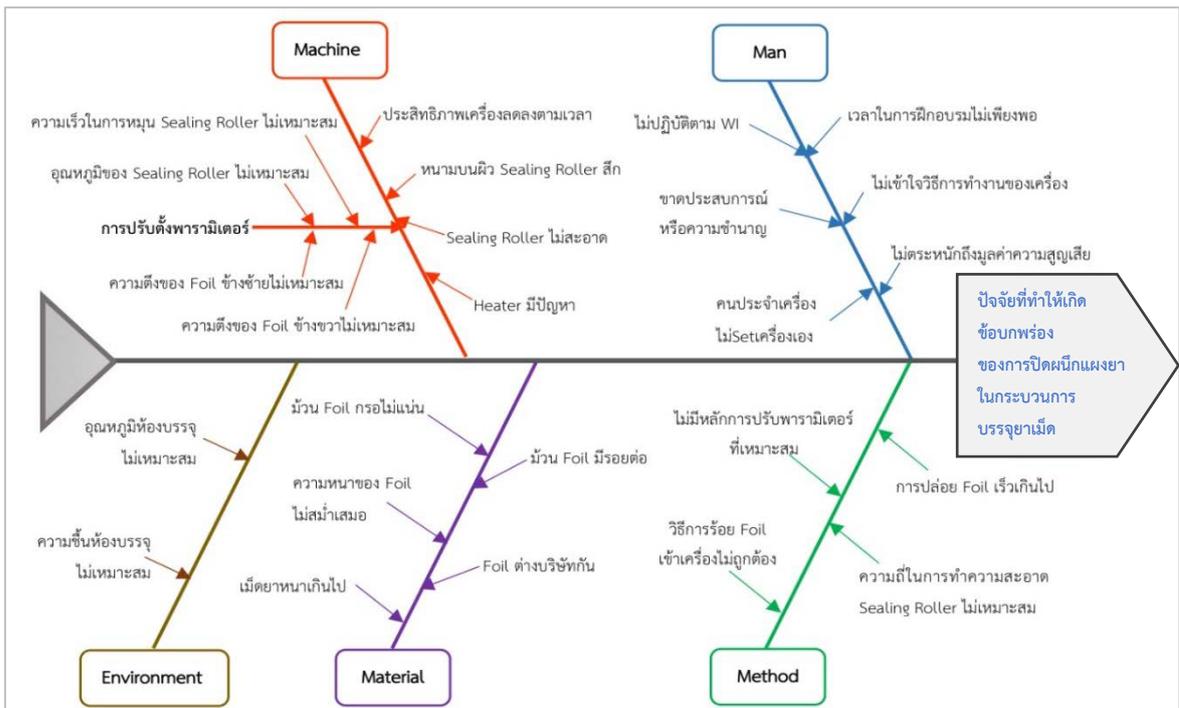
ทั้งนี้ในปัจจุบันทางโรงงานกรณีศึกษาได้ใช้วิธีปรับตั้ง ค่าพารามิเตอร์ต่างๆแบบ (Trial and Error) ซึ่งเป็นกรลอง

ผิดพลาดถูก หรือเดาสุ่ม โดยไม่มีทฤษฎีใดๆมารองรับ จึงส่งผลให้เกิดข้อบกพร่องแผงยาเสียเป็นจำนวนมาก

3.3 การวิเคราะห์ที่ปัจจัยนำเข้า

จากการร่วมระดมความคิดของคณะทำงานซึ่งเป็นที่ผู้เชี่ยวชาญ เพื่อค้นหาสาเหตุของข้อบกพร่องประเภทแผงปิดผนึกไม่สมบูรณ์ ในระหว่างการปรับตั้งเครื่องจักร โดยทำการวิเคราะห์หาสาเหตุของข้อบกพร่องด้วยการใช้แผนผังแสดงเหตุและผล ซึ่งมีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ คน,

เครื่องจักร, วัตถุดิบ ,วิธีการ และสภาพแวดล้อม พบว่ามีปัจจัยที่เกี่ยวข้องทั้งสิ้น 25 ปัจจัย ดังแสดงในรูปที่ 6 จากนั้นจึงได้นำทั้ง 25 ปัจจัยมาคัดกรองและจัดลำดับความสำคัญ โดยนำความคิดเห็นทั้งหมดจากคณะทำงานมาให้คะแนนความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผล (Cause and Effect Matrix) โดยมีเกณฑ์การประเมินคะแนนดังตารางที่ 1



รูปที่ 6 แผนภาพแสดงการวิเคราะห์สาเหตุของข้อบกพร่องประเภทแผงปิดผนึกไม่สมบูรณ์

ตารางที่ 1 เกณฑ์การให้คะแนนการประเมินความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผลกระทบ

คะแนน	ระดับความสำคัญ	ความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผล
0	ต่ำมาก	ปัจจัยที่มีผลน้อยมากและมีความสัมพันธ์ในการก่อให้เกิดแผงยาปิดผนึกไม่สมบูรณ์น้อยมาก
1	ต่ำ	ปัจจัยที่มีผลน้อยและมีความสัมพันธ์ในการก่อให้เกิดแผงยาปิดผนึกไม่สมบูรณ์น้อย
3	ปานกลาง	ปัจจัยที่มีผลปานกลางและมีความสัมพันธ์ในการก่อให้เกิดแผงยาปิดผนึกไม่สมบูรณ์ปานกลาง
9	สูง	ปัจจัยที่มีผลมากและมีความสัมพันธ์ในการก่อให้เกิดแผงยาปิดผนึกไม่สมบูรณ์มาก

การวิเคราะห์ผลจากการประเมินความสัมพันธ์ของสาเหตุและผลกระทบ เพื่อนำมาคัดเลือกปัจจัยตามลำดับคะแนนที่มีค่ามากที่สุดคือ 9 คะแนน โดยพิจารณาจากค่าฐานนิยม (Mode) ของคะแนน สามารถคัดกรองปัจจัยที่เกี่ยวข้องเหลือเพียง 11 ปัจจัยจากทั้งหมด 25 ปัจจัย ได้แก่

- 1) ประสิทธิภาพเครื่องลดลงตามเวลา
- 2) ทนทานบนผิวลูกกลิ้งปิดผนึกสึก
- 3) Heater มีปัญหา
- 4) ลูกกลิ้งปิดผนึกไม่สะอาด
- 5) อุณหภูมิของลูกกลิ้งปิดผนึกไม่เหมาะสม
- 6) ความเร็วในการหมุนลูกกลิ้งปิดผนึกไม่เหมาะสม
- 7) ความตึงของฟอยล์ข้างซ้ายไม่เหมาะสม
- 8) ความตึงของฟอยล์ข้างขวาไม่เหมาะสม
- 9) ม้วนอะลูมิเนียมฟอยล์กรอไม่แน่น
- 10) ความหนาของอะลูมิเนียมฟอยล์ไม่สม่ำเสมอ
- 11) การปรับค่าพารามิเตอร์ขั้นตอนอื่นๆ

ลำดับถัดมาได้นำปัจจัยเหล่านี้มาดำเนินการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบ (FMEA) โดยได้ทำการประเมินค่า 3 ค่า ได้แก่ ค่า S คือ ค่าความรุนแรงของข้อบกพร่อง (Severity) ,ค่า O คือค่าของความถี่หรือโอกาสในการเกิดข้อบกพร่อง (Occurrence) และค่า D เป็นค่าความสามารถในการตรวจพบข้อบกพร่อง (Detection) เพื่อคำนวณตัวเลขแสดงความเสี่ยง (Risk Priority Number) ที่เกิดจากผลคูณของตัวเลขสามค่า ได้แก่ $S \times O \times D$ โดยได้นำการเกณฑ์การประเมินข้อบกพร่องและผลกระทบของการจัดการข้อร้องเรียนของลูกค้า (Customer Complaint Record) ที่ใช้ในโรงงานกรณีศึกษา มาประยุกต์ใช้ในการกำหนดระดับค่า S ,ค่า O และ ค่า D ให้สอดคล้องกับประเด็นที่จะทำการประเมิน ดังแสดงในตารางที่ 2, 3 และ 4 ตามลำดับ

ตารางที่ 2 เกณฑ์การให้คะแนนระดับความรุนแรงของผลกระทบ (Severity : S)

ระดับความรุนแรง : คำอธิบาย	คะแนน
Negligible : ไม่ละเมิดข้อกำหนดทางกฎหมาย GMP ไม่มีส่งผลกระทบต่อผู้ไข้ยา และปฏิบัติงานไม่สามารถสังเกตเห็นสิ่งผิดปกติ	1
Minor : ผู้ปฏิบัติงานสามารถสังเกตเห็นสิ่งผิดปกติได้ และไม่ก่อความเสียหายต่อภาพลักษณ์องค์กร	2
Moderate : เกิดความเสียหายต่อภาพลักษณ์องค์กรทำให้เกิดข้อบกพร่องที่สามารถดำเนินการแก้ไขได้ง่าย	3
Major : เกิดความเสียหายต่อภาพลักษณ์ขององค์กรอย่างมากก่อให้เกิดข้อบกพร่องที่รุนแรง (แผนยารั่ว เม็ดยาในแผงเกิดความเสียหาย) ซึ่งสำนักงานคณะกรรมการอาหารและยาอาจต้องดำเนินการตรวจสอบ ละเมิดข้อกำหนดทางกฎหมาย GMP	4
Critical : เกิดความเสียหายต่อภาพลักษณ์ขององค์กรอย่างรุนแรง จนอาจต้องปิดโรงงาน ละเมิดข้อกำหนดทางกฎหมาย GMP ขั้นร้ายแรง รวมถึงอาจมีการเพิกถอนทะเบียนยา	5

ตารางที่ 3 เกณฑ์การให้คะแนนระดับโอกาสในการเกิดข้อบกพร่อง (Occurrence : O)

โอกาสที่เกิด : คำอธิบาย	คะแนน
Rare : เกิดขึ้น 5 ปีต่อครั้ง	1
Unlikely : เกิดขึ้น 2 - 3 ปีต่อครั้ง	2
Possible : เกิดขึ้น 1 ปีต่อครั้ง	3
Likely : เกิดขึ้น 1 - 6 เดือนต่อครั้ง แต่ไม่เกิน 5 ครั้ง	4
Almost certain : เกิดขึ้น 1 เดือนต่อครั้ง หรือมากกว่า	5

ตารางที่ 4 เกณฑ์การให้คะแนนระดับความสามารถในการตรวจพบข้อบกพร่อง (Detection : D)

ระดับความสามารถในการตรวจพบ : คำอธิบาย	คะแนน
High : มีการตรวจสอบด้วยเครื่องมืออัตโนมัติ โดยตรวจสอบ 100% โดยมีการสอบเทียบ และการบำรุงรักษาเชิงป้องกันเครื่องมือ ตรวจสอบอัตโนมัติอย่างสม่ำเสมอ สามารถสังเกตเห็นสิ่งผิดปกติ โดยผู้ปฏิบัติงานได้ง่าย และชัดเจน	1
Moderate : มีการควบคุมด้วยกระบวนการเชิงสถิติ (Statistic Process Control) ในระหว่างกระบวนการ และมีการตรวจสอบในขั้นตอนสุดท้าย สามารถสังเกตเห็นสิ่งผิดปกติ โดยผู้ปฏิบัติงานได้บางส่วน	3
Low : ไม่มีการตรวจสอบ หรือมีการตรวจสอบเพียงเล็กน้อย ซึ่งไม่เป็นตัวแทนที่ดี ในกระบวนการ สามารถสังเกตเห็นสิ่งผิดปกติ โดยผู้ปฏิบัติงานได้น้อย หรือไม่สามารถสังเกตเห็นสิ่งผิดปกติโดยผู้ปฏิบัติงานได้เลย	5

จากการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบเพื่อทำการคัดกรองและประเมินปัจจัยที่มีผลกระทบมากที่สุด พบว่ามีปัจจัยที่มีค่าระดับความเสี่ยง (Risk Priority Number : RPN) เกิน 75 คะแนนทั้งสิ้น 4 ปัจจัย ได้แก่

- 1) อุณหภูมิของลูกกลิ้งปิดผนึกไม่เหมาะสม
- 2) ความเร็วในการหมุนลูกกลิ้งปิดผนึกไม่เหมาะสม
- 3) ความตึงของฟอยล์ข้างซ้ายไม่เหมาะสม
- 4) ความตึงของฟอยล์ข้างขวาไม่เหมาะสม

ทั้ง 4 ปัจจัยเป็นปัจจัยที่สามารถทำการปรับค่าที่เหมาะสมเพื่อลดปัญหาข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นได้ ซึ่งจะต้องดำเนินการวิจัยโดยการออกแบบการทดลองเพื่อทดสอบหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมต่อไป

3.4 การออกแบบการทดลอง

จากปัจจัยด้านความตึงของฟอยล์ทั้งสองข้างนั้น ทางผู้วิจัยและคณะทำงานได้ตั้งข้อสังเกตว่าการร้อย

ม้วน ฟอยล์ก่อนเข้าสู่ลูกกลิ้งปิดผนึกแต่ละข้างมีเงื่อนไขที่แตกต่างกันจากลักษณะการทำงานของเครื่องบรรจุเอง โดยฟอยล์ข้างซ้ายจะร้อยผ่านแกนจ่ายฟอยล์ใหญ่เพียงจุดเดียว ในขณะที่ฟอยล์ข้างขวาจะถูกร้อยผ่านชุดลูกกลิ้งพิมพ์ลวด จากนั้นจึงผ่านแกนจ่ายฟอยล์ใหญ่ก่อนเข้าสู่ลูกกลิ้งปิดผนึกด้วยเหตุนี้ จึงได้ทำการทดลองเบื้องต้นแบบทีละปัจจัย (One Factor at a Time : OFAT) โดยทำการทดสอบปัจจัยเกี่ยวกับความตึงของฟอยล์ทั้งสองข้างว่าหากทำการปรับความตึงของฟอยล์เท่ากัน หรือต่างกัน ในหลายๆระดับจะส่งผลให้เกิดแผลงยาเสียประเภทการปิดผนึกแผลงไม่สมบูรณ์ในปริมาณที่ต่างกันอย่างไร จากการทดสอบปรับระดับความตึง สามารถสรุปได้ว่าการปรับระดับความตึงของฟอยล์เท่ากันทำให้เกิดแผลงยาเสียน้อยที่สุด และการปรับระดับความตึงของฟอยล์ทั้ง 2 ข้างยิ่งต่างกันมาก ยิ่งทำให้เกิดแผลงยาเสียมากขึ้น จึงได้ทำการตัดปัจจัยนำเข้าจาก 4 ปัจจัย เหลือเพียง 3 ปัจจัย โดยได้เปลี่ยนปัจจัยระดับความตึงของฟอยล์ซ้าย และความตึงของฟอยล์ข้างขวา เป็นระดับความตึงของฟอยล์ทั้งสองข้างรวมกันเหลือเพียงปัจจัยเดียว เนื่องจากใช้ความตึงของฟอยล์ทั้งสองเท่ากัน ดังนั้นจึงได้กำหนดปัจจัยและระดับปัจจัยที่ใช้ในการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล (ตารางที่ 5) ดังนี้

1) อุณหภูมิของลูกกลิ้งปิดผนึก : กำหนดจากการปรับตั้งค่าจริงในปัจจุบันที่สามารถทำได้โดยไม่กระทบต่อผลผลิต อีกทั้งยังอยู่ในช่วงอุณหภูมิที่ทางผู้ผลิตอะลูมิเนียมฟอยล์แนะนำให้ใช้ ประกอบกับในการสอบเทียบอุณหภูมิ Heater ของลูกกลิ้งปิดผนึก ยังใช้อุณหภูมิในช่วง 120 – 130 °C ซึ่งช่วงการสอบเทียบอุณหภูมิของ Heater จะพิจารณาจากช่วงอุณหภูมิที่ใช้งานอยู่จริงในปัจจุบัน

2) ความเร็วในการหมุนลูกกลิ้งปิดผนึก : กำหนดจากความเร็วที่ใช้อยู่ในปัจจุบันทั้ง 3 ค่า ที่เครื่องจักรสามารถบรรจุยาได้โดยไม่กระทบต่อส่วนอื่นๆของเครื่อง และสามารถทำงานสอดคล้องกันได้ เช่น ความเร็วในการ

ปล่อยเม็ดยาตามแนวตั้ง (Filling) และความเร็วในการสบกั้นของชุดตัดแบ่งแผงยา (Cutter) เป็นต้น ซึ่งหากปรับความเร็วสูงเกินไปอาจเกิดข้อบกพร่องประเภทอื่นๆ ตามมาได้

3) ระดับความตึงของฟอยล์ทั้ง 2 ข้าง : กำหนดจากค่าที่ใช้งานจริงอยู่ในปัจจุบัน และใช้ระดับความตึงเท่ากันทั้งสองด้าน ซึ่งมาจากผลการทดลองแบบที่ละปัจจัย นอกจากนี้หากปรับค่าความตึงต่ำกว่าระดับ 6 แผงยาจะมีรอยยับย่นจำนวนมาก และหากปรับค่าความตึงมากกว่าระดับ 7 จะทำให้แผงยาเกิดรูทะลุและรั่วซึม

สำหรับตัวแปรตอบสนองในการทดลองนี้ คือ เปอร์เซ็นต์แผงยาเสียประเภทแผงปิดผนึกไม่สมบูรณ์ (% Defect) โดยทำการทดลองซ้ำ (Replicate) 2 ครั้ง เพื่อลดความผันแปรที่เกิดจากการทดลอง และเป็นจำนวนครั้งที่ยังสามารถทำได้โดยไม่กระทบต่อการดำเนินงาน นอกจากนี้ยังช่วยเพิ่มความแม่นยำในการประมาณค่าปัจจัย และสามารถประมาณค่าความคลาดเคลื่อนของการทดลองได้ดียิ่งขึ้น และเมื่อใช้โปรแกรม Minitab ช่วยในการหาจำนวนครั้งของการทดลอง (Run) ที่เหมาะสม พบว่าจำนวนครั้งของการทดลอง (Run) ที่เหมาะสม คือ $(3 \times 3 \times 2) \times 2 = 36$ ครั้ง ดังแสดงจำนวนครั้งและผลการทดลองในตารางที่ 6

ตารางที่ 5 ตารางการกำหนดตัวแปรนำเข้าหรือปัจจัย (Factors) และระดับปัจจัย (Level)

ลำดับ	Factors	สัญลักษณ์	หน่วย	ระดับปัจจัย		
				1	2	3
1	อุณหภูมิของ ลูกกลิ้งปิดผนึก (Temp. Roller)	A	^o C	20	25	30
2	ความเร็วในการหมุนลูกกลิ้งปิดผนึก (Speed Roller)	B	รอบ/นาที	0	2	4
3	ความตึงของฟอยล์ทั้งสองข้าง (Tension Foil)	C	ระดับ*	6	-	7

หมายเหตุ* : ระดับของความตึงของอะลูมิเนียมฟอยล์ทั้ง 2 ข้าง เป็นค่าระดับความแรงในการหั่นแกนม้วน อะลูมิเนียมฟอยล์ซึ่งถูกกำหนดมาจากผู้ผลิตเครื่องบรรจุ

4. การวิเคราะห์ผลการทดลอง

ทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบการทดลอง และวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้โปรแกรม Minitab

4.1 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบการทดลอง (Model Adequacy checking)

การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง เป็นการตรวจสอบความถูกต้องและความน่าเชื่อถือของข้อมูล ก่อนที่จะนำมาทำการวิเคราะห์ ประกอบไปด้วยการทดสอบเกี่ยวกับความคลาดเคลื่อนของการทดลองภายใต้ 3 สมมุติฐานหลัก ได้แก่

1) ส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ (Normality Test) พบว่าข้อมูลของค่า P-value มีค่าเท่ากับ 0.738 ซึ่งมีค่ามากกว่า 0.05 และมีการเรียงตัวของข้อมูลเป็นเส้นตรง ดังแสดงในรูปที่ 7 สรุปได้ว่าข้อมูลนี้มีการแจกแจงแบบปกติ

2) ส่วนตกค้าง (Residual) มีความเป็นอิสระต่อกัน (Independence) พิจารณาจากแผนภาพการกระจายตัวระหว่างค่าส่วนตกค้าง (Residual) และลำดับของการเก็บข้อมูล (Observation Order) พบว่ามีการกระจายตัวแบบอิสระอย่างสุ่มรอบแนวแกน 0 มีลักษณะหรือรูปร่างที่แน่นอน ดังแสดงในรูปที่ 8 ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าข้อมูลนี้มีความเป็นอิสระต่อกัน

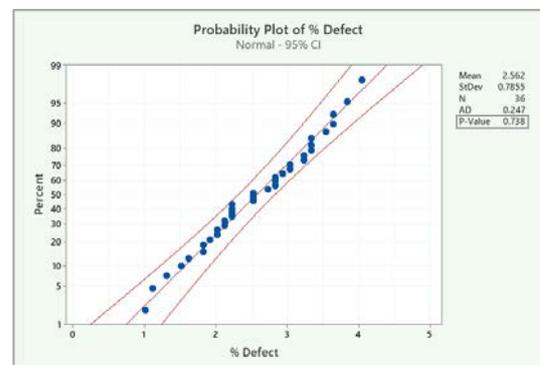
ตารางที่ 6 แสดงผลการทดลอง

Std Order	Run Order	Temp (A)	Speed (B)	Tension (C)	% defect
8	1	125	10	7	2.83%
34	2	130	12	7	1.72%
11	3	125	14	6	2.53%
13	4	130	10	6	2.02%
1	5	120	10	6	4.04%
22	6	120	12	7	3.23%
5	7	120	14	6	3.03%
30	8	125	14	7	2.42%
6	9	120	14	7	2.83%
29	10	125	14	6	2.53%
12	11	125	14	7	2.32%
24	12	120	14	7	2.73%
14	13	130	10	7	2.22%
16	14	130	12	7	1.41%
23	15	120	14	6	3.33%
18	16	130	14	7	1.01%
33	17	130	12	6	1.82%
15	18	130	12	6	2.02%

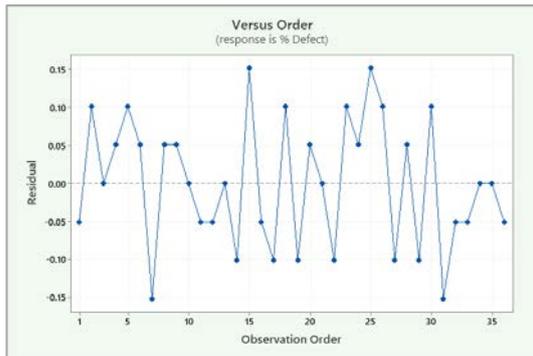
Std Order	Run Order	Temp (A)	Speed (B)	Tension (C)	% defect
25	19	125	10	6	3.03%
26	20	125	10	7	2.93%
32	21	130	10	7	2.22%
21	22	120	12	6	3.33%
3	23	120	12	6	3.54%
10	24	125	12	7	2.22%
27	25	125	12	6	2.83%
17	26	130	14	6	1.52%
35	27	130	14	6	1.31%
36	28	130	14	7	1.11%
19	29	120	10	6	3.84%
7	30	125	10	6	3.23%
9	31	125	12	6	2.53%
31	32	130	10	6	1.92%
4	33	120	12	7	3.03%
20	34	120	10	7	3.64%
2	35	120	10	7	3.64%
28	36	125	12	7	2.12%

3) ส่วนตกค้างมีค่าความแปรปรวนคงที่ (Variant Stability) พบว่าข้อมูลมีการกระจายตัวทั้งเป็นบวกและลบรอบแนวแกน 0 และไม่มีลักษณะการกระจายตัวที่เป็นแนวโน้มหรือรูปแบบที่คล้ายกรวยปากเปิดหรือปากปิด ดังแสดงในรูปที่ 9 จึงสามารถสรุปได้ว่าค่าส่วนตกค้างมีความแปรปรวนคงที่

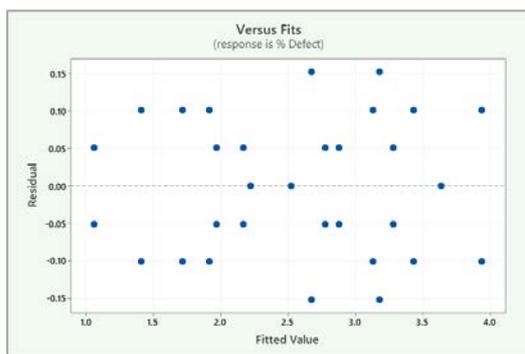
จากการตรวจสอบความถูกต้องของข้อมูล สรุปได้ว่าข้อมูลชุดนี้เป็นข้อมูลที่ถูกต้องและเชื่อถือได้ สามารถนำไปวิเคราะห์ผลการทดลองในขั้นตอนต่อไปได้



รูปที่ 7 การทดสอบ Normality Test ของ %Defect



รูปที่ 8 แผนภาพการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้าง(Residual)



รูปที่ 9 แผนภาพแสดงความแปรปรวนของค่าส่วนตกค้าง

4.2 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

หลังจากที่ทำการตรวจสอบความถูกต้อง ลำดับถัดไปจึงเป็นการวิเคราะห์ผลการทดลอง ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงในรูปที่ 10 เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการทดลอง พบว่าปัจจัยนำเข้าทั้ง 3 ปัจจัยมีอิทธิพลต่อเปอร์เซ็นต์ผองยาเสียประเภทผองยาปิดผนึกไม่สมบูรณ์ (% Defect) ดังนี้

1) ปัจจัยหลัก (Main Effect) ได้แก่ อุณหภูมิของลูกกลิ้งปิดผนึก (Temp. : A), ความเร็วในการหมุนลูกกลิ้งปิดผนึก (Speed : B) และความตึงของฟอยล์ทั้งสองข้าง (Tension : C) พิจารณาจากค่า P-value ที่มีค่าเท่ากับ 0.00 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 จึงสามารถสรุปได้ว่าปัจจัยหลัก (Main Effect) ทั้ง 3 ปัจจัย มีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ

2) อิทธิพลร่วมระหว่าง 2 ปัจจัย (2-way Interaction Effect) ได้แก่ Temp.*Speed (AB) , Temp.*Tension (AC) และ Speed*Tension (BC) พิจารณาจากค่า P-value ที่มีค่า

น้อยกว่า 0.05 สามารถสรุปได้ว่าอิทธิพลร่วมระหว่าง 2 ปัจจัย มีผลต่อตัวแปรตอบสนองอย่างมีนัยสำคัญ

Factor Information					
Factor	Levels	Values			
Temp.	3	120, 125, 130			
Speed	3	10, 12, 14			
Tension	2	6, 7			
Analysis of Variance					
Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	17	0.002134	0.000126	90.40	0.000
Linear	5	0.002070	0.000414	298.14	0.000
Temp.	2	0.001652	0.000826	594.63	0.000
Speed	2	0.000361	0.000181	130.06	0.000
Tension	1	0.000057	0.000057	41.33	0.000
2-Way Interactions	8	0.000049	0.000006	4.42	0.004
Temp.*Speed	4	0.000026	0.000007	4.73	0.009
Temp.*Tension	2	0.000011	0.000006	4.10	0.034
Speed*Tension	2	0.000011	0.000006	4.10	0.034
3-Way Interactions	4	0.000015	0.000004	2.69	0.064
Temp.*Speed*Tension	4	0.000015	0.000004	2.69	0.064
Error	18	0.000025	0.000001		
Total	35	0.002159			
Model Summary					
	S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)	
	0.0011785	98.84%	97.75%	95.37%	

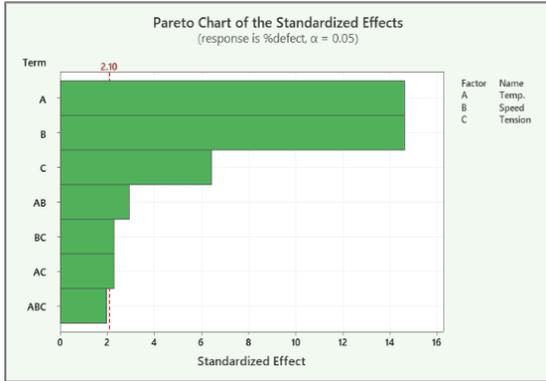
รูปที่ 10 แสดงการวิเคราะห์ผลการทดลอง

3) อิทธิพลร่วมระหว่าง 3 ปัจจัย (3-way Interaction Effect) ได้แก่ Temp.*Speed * Tension (ABC) พิจารณาจากค่า P-value พบว่ามีค่ามากกว่า 0.5 สรุปได้ว่าอิทธิพลร่วมระหว่าง 3 ปัจจัย ไม่มีผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนอง

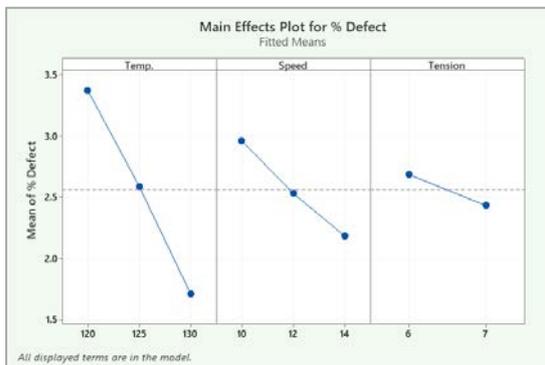
ทั้งนี้จากการพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่มีค่าเท่ากับ 98.84% ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าปัจจัยนำเข้า และตัวแปรตอบสนองมีความสัมพันธ์กันมาก นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจากแผนภาพพาริตโตในรูปที่ 11 จะเห็นได้ว่ากราฟแท่งของทั้ง 3 ปัจจัยหลักและกราฟแท่งของอิทธิพลร่วมระหว่าง 2 ปัจจัยทั้ง 3 คู่อยู่เลยจากเส้นวิกฤต ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าปัจจัยหลัก (Main Effect) ทั้ง 3 ปัจจัย และอิทธิพลร่วมระหว่าง 2 ปัจจัยทั้ง 3 คู่มีผลต่อการเกิดผองยาเสียประเภทผองยาปิดผนึกไม่สมบูรณ์อย่างมีนัยสำคัญ

จากการพิจารณาแผนภาพผลกระทบหลัก (Main Effect Plot) มีเส้นกราฟในลักษณะที่ความชันลดลง ซึ่งหมายความว่า %Defect มีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อปรับอุณหภูมิ (Temp.) และความเร็ว (Speed) ของ

ลูกกลิ้งปิดผนึกเพิ่มขึ้น รวมทั้งปรับระดับความตึงของฟอยล์ (Tension) ทั้งสองข้างเพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 12



รูปที่ 11 แผนภาพพารโตของปัจจัยหลักและอันตรกิริยา



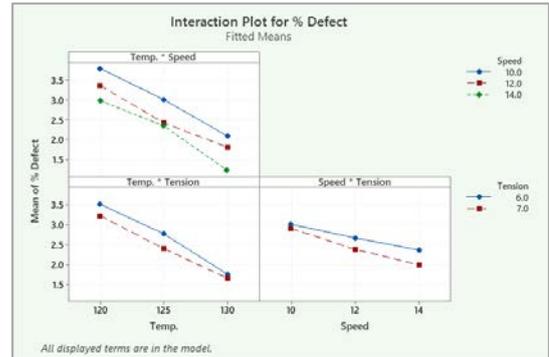
รูปที่ 12 ผลของปัจจัยหลักที่มีผลต่อ % Defect ของแผงยา

จากการพิจารณาแผนภาพผลกระทบร่วมระหว่าง 2 ปัจจัย (Interaction Plot) ดังแสดงในรูปที่ 13 สามารถอธิบายได้ดังนี้

1) Temp.*Speed : มีผลกระทบร่วมกันระหว่างอุณหภูมิ (Temp.) และความเร็วในการหมุนของ ลูกกลิ้งปิดผนึก (Speed) โดยพบว่า %Defect มีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อปรับอุณหภูมิ (Temp.) และความเร็ว (Speed) ของลูกกลิ้งปิดผนึกเพิ่มขึ้น

2) Temp.*Tension : มีผลกระทบร่วมกันระหว่างอุณหภูมิของลูกกลิ้งปิดผนึก (Temp.) และความตึงของฟอยล์ทั้งสองข้าง (Tension) โดยพบว่า %Defect มีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อปรับอุณหภูมิ (Temp.) และความตึงของฟอยล์ทั้งสองข้าง (Tension) เพิ่มขึ้น

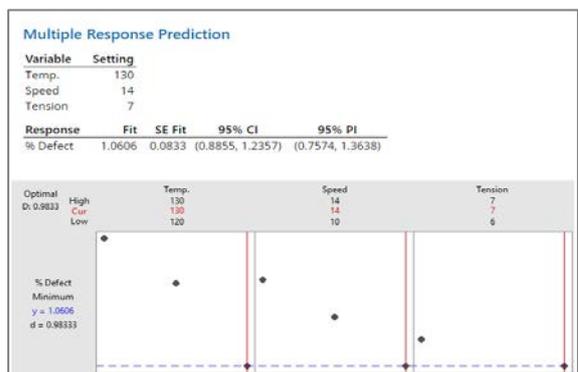
3) Speed*Tension : มีผลกระทบร่วมกันระหว่างความเร็วในการหมุนของลูกกลิ้งปิดผนึก (Speed) และความตึงของฟอยล์ทั้งสองข้าง (Tension) โดยพบว่า %Defect มีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อปรับอุณหภูมิ (Temp.) และความตึงของฟอยล์ ทั้งสองข้าง (Tension) เพิ่มขึ้น



รูปที่ 13 ผลของอันตรกิริยาของปัจจัยที่มีผลต่อ % Defect ของแผงยา

4.3 การหาระดับปัจจัยที่ดีที่สุด (Response Optimizer)

ทำการหาระดับปัจจัยที่ดีที่สุด (Response Optimizer) ในการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ที่ทำให้เปอร์เซ็นต์แผงยาเสียประเภทแผงปิดผนึกไม่สมบูรณ์ (% Defect) น้อยที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 14 พิจารณาค่าความพึงพอใจโดยรวมของระดับปัจจัยที่เหมาะสม (composite desirability : D) เท่ากับ 0.9833 แสดงความสัมพันธ์ของค่าปัจจัยและค่าตอบสนองที่มีความสัมพันธ์กันถึง 98.33% ซึ่งมีค่าใกล้เคียง 1 ถือว่าอยู่ในระดับที่ดี



รูปที่ 14 การวิเคราะห์ระดับปัจจัยที่ดีที่สุด (Response Optimizer)

จากการวิเคราะห์ผลการทดลองตามรูปที่ 14 พบว่าระดับปัจจัยที่ดีที่สุด (Response Optimizer) ในการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ ที่ทำให้เปอร์เซ็นต์แผงยาเสียหายประเภทแผงปิดผนึกไม่สมบูรณ์ (% Defect) น้อยที่สุด ได้แก่

- อุณหภูมิของลูกกลิ้งปิดผนึก (Temp.)
ปรับตั้งค่าที่ 130 °C
- ความเร็วในการหมุนลูกกลิ้งปิดผนึก (Speed)
ปรับตั้งค่าที่ 14 รอบ/นาที
- ความตึงของพอยล์ทั้งสองข้าง (Tension)
ปรับตั้งค่าที่ระดับ 7

โดยค่าผลลัพธ์ที่ได้จากการตั้งค่าตามระดับปัจจัยที่ดีที่สุดคือ เปอร์เซ็นต์แผงยาเสียหายประเภทแผงปิดผนึกไม่สมบูรณ์ (% Defect) เท่ากับ 1.06% และมีความน่าจะเป็นที่ค่าเฉลี่ยของผลลัพธ์จะอยู่ในช่วง 0.89% - 1.24% และความน่าจะเป็นที่ค่าของผลลัพธ์จะอยู่ในช่วง 0.76% - 1.37% ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

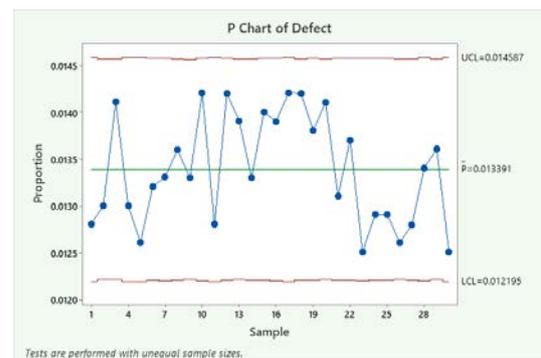
4.4 การทดสอบเพื่อยืนยันผล

เพื่อยืนยันผลที่ได้จากวิธีการออกแบบการทดลองได้นำระดับปัจจัยที่ดีที่สุด (Response Optimizer) ไปทดลองประยุกต์ใช้ในสภาวะการทำงานจริงเพื่อทดสอบว่าค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม เมื่อนำมาประยุกต์ใช้จริงจะสามารถลดเปอร์เซ็นต์แผงยาเสียหายประเภทแผงปิดผนึกไม่สมบูรณ์ (% Defect) ได้หรือไม่ โดยทำการเก็บเฉพาะข้อมูลเปอร์เซ็นต์แผงยาเสียหายประเภทแผงปิดผนึกไม่สมบูรณ์ (% Defect) เป็นระยะเวลา 30 วันจากเครื่องจักรเดิมที่ใช้ในการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสม โดยค่าปัจจัยที่เหมาะสมที่นำมาใช้ คือ

- อุณหภูมิของลูกกลิ้งปิดผนึก ใช้ค่า 130 °C
- ความเร็วในการหมุนลูกกลิ้งปิดผนึก ใช้ค่า 14 รอบ/นาที
- ความตึงของพอยล์ทั้งสองข้าง ใช้ค่าระดับ 7

จากการทดสอบเพื่อยืนยันผลโดยการนำระดับปัจจัยที่ดีที่สุด (Response Optimizer) ไปทดลองประยุกต์ใช้ในสภาวะการทำงานจริง โดยใช้เครื่องที่ใช้ทำการทดลองเป็นระยะเวลา 30 วัน พบว่าเปอร์เซ็นต์แผงยาเสียหายประเภทแผงปิดผนึกไม่สมบูรณ์ (% Defect) มีค่าเฉลี่ยอยู่

ที่ 1.34% ดังแสดงในรูปที่ 15 ซึ่งมีความคลาดเคลื่อนจากค่าที่ได้จากการวิเคราะห์เพื่อหาระดับปัจจัยที่ดีที่สุด (Response Optimizer) ที่มีค่าเท่ากับ 1.06% เล็กน้อย ซึ่งอาจเกิดจากสภาวะอื่นๆที่แตกต่างจากช่วงที่ทำการทดลอง จึงสามารถสรุปได้ว่าการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมนี้ สามารถลดเปอร์เซ็นต์แผงยาเสียหายประเภทแผงปิดผนึกไม่สมบูรณ์ (% Defect) ในระหว่างการทำงานจริงได้



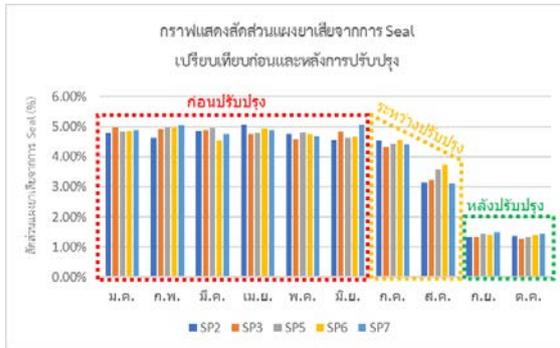
รูปที่ 15 ผลการนำระดับปัจจัยที่ดีที่สุดไปใช้

4.5 การเปรียบเทียบก่อน และหลังปรับปรุงกระบวนการ

จากการนำค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ได้แก่ อุณหภูมิของลูกกลิ้งปิดผนึก 130 °C ,ความเร็วในการหมุนลูกกลิ้งปิดผนึก 14 รอบ/นาทีและความตึงของพอยล์ทั้งสองข้างที่ค่าระดับ 7 มาปรับใช้ในกระบวนการผลิตจริงตั้งแต่เดือนกันยายน – ตุลาคม 2565 โดยได้นำมาปรับใช้กับเครื่องบรรจุยา หมายเลขเครื่อง SP2, SP3, SP5, SP6 และ SP7 (เครื่องที่ทำการทดลอง คือ SP7) ซึ่งเป็นเครื่องจักรที่เป็นยี่ห้อ/รุ่นเดียวกัน อายุการใช้งานเท่ากัน และมีรอบการบำรุงรักษาในช่วงเดียวกันกับเครื่องที่ทำการทดลอง พบว่าสามารถลดส่วนแผงยาเสียหายประเภทแผง ปิดผนึกไม่สมบูรณ์ ทั้ง 5 เครื่องเฉลี่ยต่อวันลดลงจาก 4.82% เหลือเพียง 1.38% (ลดลง 71.37%) ดังแสดงในรูปที่ 16

นอกจากนี้ยังพบว่าการนำค่าปัจจัยที่ดีที่สุดมาใช้ ยังสามารถลดระยะเวลาในการปรับตั้งเครื่องได้ เนื่องจากผู้ปฏิบัติงานทราบค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดในการปรับตั้งแล้ว จึงไม่ต้องทดลองปรับเปลี่ยนค่าต่างๆ ในช่วงก่อนเริ่ม

งานในทุกวัน และในทุกช่วงเวลาก่อนเริ่มงาน รวมทั้งในช่วงของการเปลี่ยนม้วนอะลูมิเนียมฟอยล์ ซึ่งจะต้องทำการเปลี่ยนเฉลี่ยทุกๆ 2 ชั่วโมง ดังนั้นในแต่ละวันจะต้องใช้เวลารวมในการปรับตั้งเครื่อง ดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 7



รูปที่ 16 สัดส่วนแฉกเสียหายจากการปิดผนึกแผงเปรียบเทียบก่อนและหลังปรับปรุ้ง

ตารางที่ 7 ระยะเวลาที่ใช้ในการปรับตั้งเครื่องก่อนและหลังการปรับปรุ้ง

ช่วงเวลา/กิจกรรม	ก่อนปรับปรุ้ง (นาที)	หลังปรับปรุ้ง (นาที)
ก่อนเริ่มงานช่วงเช้า (8.00 น.– 12.00 น.)	25	20
ก่อนเริ่มงานช่วงบ่าย (13.00 น.– 16.30 น.)	15	9
ก่อนเริ่มงานช่วงโอที (16.30 น.– 19.30 น.)	15	9
ขั้นตอนเปลี่ยนม้วนอะลูมิเนียมฟอยล์ (ทุก 2 ชม. และ 5 ครั้ง/วัน)	15 × 5 = 75	8 × 5 = 40
รวมระยะเวลาที่ใช้	130	78
ระยะเวลาที่ใช้ในการปรับตั้งเครื่องลดลง	52 นาที (คิดเป็น 40%)	

จากตารางที่ 7 ระยะเวลาที่ลดลงได้ 40% ช่วยให้พนักงานสามารถนำเวลาไปทำงานอื่นเพิ่มเติมได้ เช่น การทำความสะอาดลูกกลิ้งปิดผนึกให้สะอาด ซึ่งปัจจัยเรื่องความสะอาดของลูกกลิ้งปิดผนึก เป็นปัจจัยหนึ่งที่คณะทำงานได้พิจารณาว่ามีผลกระทบต่อการเกิดปัญหาในการปิดผนึกแผงยา ดังนั้นการเพิ่มเวลาในการทำความสะอาดลูกกลิ้งปิดผนึกอาจช่วยลดปริมาณแฉกเสียหายได้ และอาจเพิ่มความละเอียดในการตรวจสอบแผงยาเพื่อให้อุ่นใจในคุณภาพของการบรรจุมากยิ่งขึ้น

5. สรุปผลการวิจัย และข้อเสนอแนะ

5.1 สรุปผลการวิจัย

วิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดสัดส่วนแฉกเสียหายของบรรจุภัณฑ์อะลูมิเนียมฟอยล์ในรูปแบบแผงสตรีพ ที่เสียหายจากการปิดผนึกไม่สมบูรณ์ ซึ่งเป็นข้อบกพร่องที่พบมากที่สุด รวมทั้งลดระยะเวลาที่ใช้ในการปรับตั้งเครื่องบรรจุยาที่สูงสูญเสียไปในระหว่างกระบวนการบรรจุยาเม็ด โดยเริ่มจากการวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาและปัจจัยที่เกี่ยวข้องด้วยแผนภาพแสดงสาเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) จากนั้นทำการคัดกรองปัจจัยโดยการประเมินคะแนนความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผล (Cause and Effect Matrix) และการวิเคราะห์ลักษณะข้อบกพร่องและผลกระทบ (FMEA : Failure Mode and Effect Analysis) ซึ่งหลังจากการประเมินตัวเลขแสดงความเสี่ยง (RPN : Risk Priority Number) ได้คัดกรองปัจจัยที่ส่งผลให้เกิดแฉกเสียหายประเภทแผงปิดผนึกไม่สมบูรณ์ ได้แก่ อุณหภูมิของลูกกลิ้งปิดผนึก, ความเร็วในการหมุนลูกกลิ้งปิดผนึก, ความตึงของฟอยล์ข้างซ้าย และความตึงของฟอยล์ข้างขวา จากนั้นได้ทำการทดลองแบบทีละปัจจัย (OFAT : One Factor at a Time) เพื่อทดสอบปัจจัยเกี่ยวกับความตึงของฟอยล์ทั้งสองข้าง พบว่าการปรับระดับความตึงของฟอยล์ทั้งสองข้างให้เท่ากันทำให้เกิดแฉกเสียหายน้อยกว่าการปรับความตึงต่างระดับกัน จึงคัดกรองเหลือเพียง 3 ปัจจัย คือ อุณหภูมิของลูกกลิ้งปิดผนึก, ความเร็วในการหมุนลูกกลิ้งปิดผนึก, ความตึงของฟอยล์

ทั้งสองข้าง และได้ทำการประยุกต์ใช้หลักการออกแบบ การทดลองเชิงแพคทอเรียล เพื่อหาระดับปัจจัยที่เหมาะสม จากการทดลองพบว่าระดับปัจจัยที่เหมาะสม ได้แก่ อุณหภูมิของลูกกลิ้งปิดผนึกเท่ากับ 130°C , ความเร็วในการหมุน ลูกกลิ้งปิดผนึกเท่ากับ 14 รอบ/นาาที, ความตึงของฟอยล์ทั้งสองข้าง คือ ระดับ 7 โดยเมื่อนำระดับปัจจัยที่ได้มาปรับใช้ในกระบวนการบรรจุยาเม็ด ในรูปแบบแผง สตรีพ พบว่าสัดส่วนแผงยาเสียประเภท แผงปิดผนึกไม่สมบูรณ์เฉลี่ยต่อวันลดลงจาก 4.82% เหลือเพียง 1.38% (ลดลง 71.37%) และยังพบว่าสามารถลดระยะเวลาในการปรับตั้งเครื่องจักรจาก 130 นาที/วัน เหลือเพียง 78 นาที/วัน (ลดลง 40.00%)

ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า เมื่อทำการปรับระดับ พารามิเตอร์ที่เหมาะสม ตามกระบวนการคัดกรองปัจจัย และการออกแบบการทดลอง จะช่วยให้สามารถลดสัดส่วนแผงยาเสียจากการปิดผนึกไม่สมบูรณ์ และลดระยะเวลาที่ใช้ในการปรับตั้งเครื่องบรรจุยา ซึ่งเป็นไปตามวัตถุประสงค์ ของงานวิจัยนี้

5.2 ข้อเสนอแนะ

1) โรงงานกรณีศึกษาสามารถนำปัจจัยอื่นๆที่ส่งผลกระทบต่อให้เกิดข้อบกพร่องที่ทำให้เกิดแผงยาเสีย มาทำการพิจารณาเพื่อนำไปสู่การศึกษาวิเคราะห์เพิ่มเติม ซึ่งอาจทำให้สามารถลดปริมาณข้อบกพร่องประเภทอื่นๆลงได้

2) หากในอนาคตมีงบประมาณและระยะเวลาที่เพียงพอ รวมทั้งมีเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพมากพอ ควรทำการศึกษาปัจจัยอื่นๆเพิ่มเติมให้ครอบคลุมมากยิ่งขึ้น

3) สามารถนำแนวทางการปรับปรุงจากงานวิจัยนี้ไปขยายผลเพื่อใช้กับการบรรจุยาหรืออาหารในรูปแบบบรรจุภัณฑ์อื่นๆที่มีลักษณะการทำงานของเครื่องจักรที่คล้ายกัน และใช้วัสดุการบรรจุประเภทเดียวกัน เช่น การบรรจุยาเม็ดในรูปแบบแผงบลิสเตอร์ การบรรจุยาหรืออาหารในรูปแบบแผง Sachet เป็นต้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาที่สละเวลาอันมีค่า ในการให้คำชี้แนะเพื่อแก้ไขปัญหาและอุปสรรคต่างๆ

ขอขอบคุณโรงงานกรณีศึกษา และคณะทำงานทุกท่านที่ได้เสียสละเวลาในการถ่ายทอดความรู้ และประสบการณ์ที่เป็นประโยชน์ สุดท้ายนี้ขอขอบพระคุณ บิดา มารดา และครอบครัว รวมถึงทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือที่ข้าพเจ้าไม่ได้กล่าวถึง

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] N. Tunpaiboon, "THAILAND INDUSTRY OUTLOOK 2018 - 2020 : PHARMACEUTICALS," *Krungrsri Research.*, pp. 1 - 10, Aug. 2021.
- [2] Defence Phamaceutical Factory Defence Industry Energy Centre, "Medicine and medical supplies with national security guarantees," *Lakmuangonline The permanent secretary for defence*, vol. 29, no. 354, pp. 63 - 65, Sep. 2020.
- [3] D. A. Dean, E. R. Evans, and I. H. Hall, *PHARMACEUTICAL PACKAGING TECHNOLOGY*. London: Taylor & Francis, 2005.
- [4] V. Suharitdamrong and P. Luangsupasuk, *The Lean Six Sigma Pocket Toolbook*. Bangkok: E.I.Square, 2011.
- [5] C. Theeraviriya, *Analyzing statistical data by Minitab.program*. Nakhon Phanom: kkuprinting, 2021.
- [6] P. Kumnuandee, "Reduction of defect in banknote printing process," M.S. thesis, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 2017.

- [7] FORD MOTOR COMPANY DEARBORN, *FMEA Handbook*. Michigan: Ford Motor Company, 2011.
- [8] K. Ploycharoenpanich, *FMEA (Failure Mode and Effect Analysis)*. Bangkok: Technology Promotion Association (Thailand-Japan), 2014.
- [9] P. Chutima, *Engineering design of experiment*. Bangkok: Chulalongkorn university press (CUPRINT), 2002.
- [10] P. Intharak, "Reducing idle time in a labelling process," M.S. thesis, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Chulalongkorn University, 2014.
- [11] B. Saesiw and N. Sokul, "Reducing Defects in Packaging by Applying Experimental Results: A Case Study of A Snack Company," *Industrial Technology Lampang Rajabhat University Journal*, vol 9, no. 2, pp. 30-44, 2016.

การออกแบบเครื่องบรรจุน้ำซุปแบบอัตโนมัติ Design of Automatic Soup Filling Machine

ชินนทร เรืองรักษา^{1*} พีระยศ แสนโกชณ²

¹หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีการผลิตทางอุตสาหกรรม (ภาคพิเศษ)

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900

²ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร

กรุงเทพมหานคร 10900

Chanintorn Ruangraks^{1*} Peerayot Sanposh²

¹Master of Engineering Program in Industrial Production Technology, Kasetsart University,
Ngamwongwan Rd, Khwaeng Lat Yao, Khet Chatuchak, Bangkok 10900

²Department of Electrical Engineering, Kasetsart University, 50 Ngamwongwan Rd, Khwaeng Lat Yao,
Khet Chatuchak, Bangkok 10900

*Corresponding author Email: chanintorn_toey@hotmail.com

(Received: December 212, 2022; Revised: April 2, 2023; Accepted: April 18, 2023)

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของการศึกษานี้ เพื่อออกแบบเครื่องบรรจุน้ำซุปแบบอัตโนมัติ เนื่องจากบริษัทผู้ผลิตสินค้า น้ำซุปมีนโยบายเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตให้สูงขึ้น และควบคุมการผลิตสินค้าให้เป็นไปตามมาตรฐาน และลดพนักงานในการเติมน้ำซุป เพื่อให้ไลน์การผลิตเป็นอัตโนมัติ โดยการนำเทคโนโลยี และนวัตกรรม ที่มีอยู่ในปัจจุบันมาออกแบบเครื่องจักรที่สามารถทำงานได้อย่างอัตโนมัติ และมีประสิทธิภาพ โดยไม่ส่งผลกระทบต่อสินค้า และกระบวนการผลิต ซึ่งค่ามาตรฐานของน้ำหนักปริมาณน้ำคือ 250 กรัม/ถ้วย จากการวิจัยเครื่องเติมน้ำซุปชาม โดยมีหัวบรรจุทั้งหมด 6 หัว ซึ่งจากการใช้งานเครื่องบรรจุน้ำซุปแล้วพบว่า น้ำหนักอยู่ในค่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ หลังจากการนำเครื่องบรรจุน้ำซุปมาใช้งาน สามารถลดค่าใช้จ่ายพนักงานบรรจุน้ำซุปมูลค่า 316,800 บาท/ปี และเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตจากเดิม 1,200 ถ้วย/ชั่วโมง เพิ่มเป็น 2,150 ถ้วย/ชั่วโมง คิดเป็น 79.16 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้การลงทุน 200,000 บาท

คำสำคัญ: เครื่องเติมน้ำซุป ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน น้ำซุปชาม การควบคุมการเติมน้ำซุป

ABSTRACT

The purpose of this project study was to design an automatic soup-filling machine. Due to the company's policy to increase production of efficiency, and maintain standards in producing products, and reduce the staff to fill the soup to automate the production line. Therefore, machines are designed based on existing and innovative technologies to operate automatically and efficiently without affecting the product and production process. The standard value of water content is 250 g/cup. The Shabu Soup Filling Machine, with six filling nozzles, can be filled automatically and accurately. It was found

that the weight was within the value of the specified standard. After starting to use the soup-filling machine, it was able to reduce the cost of the soup-filling process costs 316,800 baht/year, and increase the efficiency of production from 1,200 cups/hour to 2,150 cups/hour, or 79.16 percent. The cost of this Shabu Soup Filling Machine is 200,000 Baht.

Keyword: Soup-filling machine, standard deviation, shabu soup, soup filling control.

1. บทนำ

ในปัจจุบันมีการแข่งขันด้านการผลิตสินค้าประเภทอาหารพร้อมทานค่อนข้างมาก บริษัทจึงได้มีการผลิตสินค้าใหม่ๆ ออกสู่ตลาดอย่างต่อเนื่อง ในช่วงปลายปี 2564 ได้มีการผลิตสินค้าใหม่ คือน้ำซุปลีถ้วย ซึ่งปัญหาที่พบในกระบวนการผลิตดังกล่าวคือ ปริมาณน้ำที่อยู่ในภาตสินค้า ไม่มีความสม่ำเสมอ และสินค้าที่เติมน้ำซूपแล้วพบว่า น้ำหนักของน้ำที่เติมลงในถ้วยไม่ได้ค่ามาตรฐานตามที่หน่วยงานประกันคุณภาพได้กำหนดค่ามาตรฐานไว้ สินค้าที่น้ำหนักไม่ได้ตามมาตรฐานสินค้า จะถูกคัดออกจากการผลิต และทำการแก้ไขน้ำหนักสินค้าใหม่ มีผลให้เสียเวลาในกระบวนการผลิต และทำให้ประสิทธิภาพการผลิตนั้นต่ำลง และอีกปัจจัยหนึ่งคือ บริษัทต้องการลดต้นทุนการผลิตด้านแรงงาน เพื่อสามารถแข่งขันด้านราคาของสินค้าได้ โดยการลดแรงงานพนักงานในกระบวนการผลิต และบริษัทต้องการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต เพื่อให้ไลน์ผลิตมีความต่อเนื่อง และเป็นอัตโนมัติ

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาเทคโนโลยี อุปกรณ์ และนวัตกรรม เพื่อมาออกแบบเครื่องจักรที่สามารถทำงานได้อย่างอัตโนมัติ และลดปัญหาด้านกระบวนการผลิตโดยการผลิตสินค้าต้องเป็นไปตามมาตรฐานที่ได้กำหนดไว้ และนำเทคโนโลยีด้านเครื่องจักรมาทดแทนแรงงานพนักงาน เพื่อให้การผลิตเป็นการทำงานแบบอัตโนมัติเพิ่มมากขึ้น และสามารถลดต้นทุนการผลิตสินค้า โดยที่ประสิทธิภาพการเติมน้ำซूपมากกว่า 2,000 ถ้วย/ชั่วโมง ค่ามาตรฐานน้ำหนักของน้ำซूपที่เติมลงในถ้วยสินค้า คือ 250 ± 10 กรัม ซึ่งหลังจากที่นำเทคโนโลยีเครื่องจักรมาทดแทนแรงงานพนักงาน จะสามารถลดแรงงานพนักงาน

2 คน/กะ หรือ 4 คน/วัน คิดเป็นมูลค่า 316,800 บาท/ปี โดยใช้งบลงทุน 200,000 บาท มีระยะเวลาคืนทุน 7.5 เดือน

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความเร็วการไหล (Flow Velocity)

ความเร็วการไหล (v) หมายถึง ระยะทางที่วัตถุเคลื่อนที่ไปในระยะเวลาหนึ่งมีหน่วยเป็น m/s ในของไหลจะแตกต่างจากของแข็ง เพราะอนุภาคในของไหลนั้นๆ พบว่า ความเร็วของอนุภาคมีทิศทางการเคลื่อนที่คนละทิศทาง และเปลี่ยนแปลงอย่างต่อเนื่องขึ้นอยู่กับเวลาและสถานที่ [1] เช่น ก๊าซ ที่แต่ละโมเลกุลจะเคลื่อนที่ที่เป็นอิสระต่อกัน สำหรับในของเหลว เช่น การไหลในท่อน้ำเปิด หรือไหลในท่อ เนื่องจากบริเวณท้องน้ำ หรือที่ผิวท่อ จะมีแรงเสียดทานของการไหล ทำให้ความเร็วบริเวณนั้นมีค่าเท่ากับศูนย์สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (1)

$$v = \frac{Q}{A} \quad (1)$$

โดยที่

v แทน ความเร็วเฉลี่ยของการไหล (m/s)

Q แทน อัตราการไหล (m^3/s)

A แทน พื้นที่หน้าตัดของไหล (m^2)

2.2 อัตราการไหล (Flow Rate)

อัตราการไหล หมายถึงปริมาณของไหลที่เคลื่อนที่ต่อหนึ่งหน่วยเวลา ซึ่งสามารถวัดได้ทั้งในเชิงของปริมาตรและเชิงของมวล กรณีเป็นของเหลว อัตราการไหลเชิง

ปริมาตร (Volume flow rate) [1] มีหน่วยเป็น m^3/s ซึ่งหาได้จากสมการที่ (2) ดังนี้

$$Q = \frac{V}{T} \quad (2)$$

โดยที่

Q แทน อัตราการไหล (m^3/s)

V แทน ปริมาตรของการไหล (m^3)

T แทน เวลาในการของไหล (s)

อัตราการไหลเชิงปริมาตรสามารถหาได้จากความเร็วเฉลี่ยในการไหลได้ดังสมการที่ (3) ต่อไปนี้

$$Q = Av \quad (3)$$

โดยที่

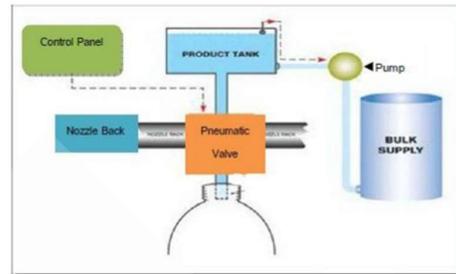
Q แทน อัตราการไหล (m^3/s)

A แทน พื้นที่หน้าตัดของไหล (m^2)

v แทน ความเร็วเฉลี่ยของการไหล (m/s)

2.3 การบรรจุระบบแรงโน้มถ่วง (Time Gravity Filler)

ผลิตภัณฑ์จะถูกปั๊มดูดยังถังบรรจุด้านบนของหัวบรรจุ และจะใช้ระบบนิวเมติกส์ ในการควบคุมการทำงานของวาล์ว ดังแสดงในรูปที่ 1 งานวิจัยนี้ เลือกใช้วาล์ว pneumatic ประเภท pneumatic double control valve เนื่องจากมีการเปิด และปิดที่แม่นยำ [13] ของเหลวจะไหลจากถังบรรจุด้านบน โดยไหลไปตามท่อบรรจุลงในถ้วย การเติมของเหลวด้วยแรงโน้มถ่วงนี้จะไม่เกิดปัญหาเรื่องน้ำหนักรั่วที่ไม่คงที่ เนื่องจากปริมาณน้ำในถังลดลงจึงจำเป็นต้องให้ปริมาณน้ำในถังเต็มตลอด เพื่อให้ปริมาณน้ำที่ไหลลงในภาชนะบรรจุนั้นเท่ากันตลอดเวลา และปริมาณน้ำที่เต็มลงในภาชนะจะมีปริมาณเท่ากัน



รูปที่ 1 การทำงานของการเติมน้ำซูป

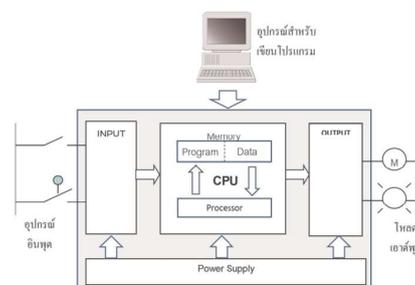
ที่มา: R. Suwan (2014)

2.4 หลักการทำงานพื้นฐานของพีแอลซี

ในการทำงานของพีแอลซีจะมีส่วนประกอบอยู่หลายส่วนที่ทำงานสอดคล้องและประสานกัน [2] สำหรับส่วนประกอบหลักของ พีแอลซีจะประกอบด้วยส่วนต่างๆ ดังต่อไปนี้

1. โมดูลอินพุต (Input Modules)
2. หน่วยประมวลผลกลาง (Central Processing Unit CPU)
3. โมดูลเอาต์พุต (Output Modules)
4. อุปกรณ์ใช้ในการโปรแกรม (Programming Device)

ซึ่งการเชื่อมโยงการทำงานของอุปกรณ์ต่างๆ นอกเหนือจากส่วนประกอบหลักนี้แล้ว พีแอลซียังมีส่วนประกอบที่ทำหน้าที่เชื่อมโยงหรือประสานการทำงานของเครื่องร่วมกับผู้ใช้ (Operator Interface) ร่วมอยู่ด้วย สำหรับรายละเอียดหน้าที่หลัก และส่วนประกอบต่างๆ ของพีแอลซีจะแสดงได้ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 แสดงโครงสร้างภายใน PLC

ที่มา: Beginner Allen-Bradley Micro800 (2019)

2.5 วาล์วควบคุมการไหลของลมแบบ 2 ทิศทาง (Pneumatic Double Control Valve)

ลักษณะการทำงานของ pneumatic คือเมื่อจ่ายลมเข้าครั้งหนึ่งเพื่อเปลี่ยนสถานะ เมื่อสถานะของวาล์วจะค้างไว้เป็นสถานะล่าสุด หากเราต้องการเปลี่ยนสถานะกลับจะต้องจ่ายลมเข้าอีกครึ่งหนึ่ง เพื่อเปลี่ยนสถานะการทำงานเป็นสภาวะปิดดั้งเดิม [14]



รูปที่ 3 Pneumatic Double Control Valve
ที่มา: SIRCA Pneumatic (2022)

2.6 การคำนวณจุดคุ้มทุนในการออกแบบ

ในการใช้เครื่องบรรจุน้ำชุปมาทดแทนแรงงานคน จะสามารถลดการใช้พนักงานในการบรรจุน้ำชุปได้ 2 คน/กะหรือ 4 คน/วัน และทำให้การผลิตสินค้าน้ำชุป มีความต่อเนื่องและเป็นอัตโนมัติมากขึ้น ซึ่งสามารถคำนวณจุดคุ้มทุนได้ดังสมการที่ (4)

$$\text{ระยะเวลาคืนทุน} = \frac{(\text{ค่าแรง} \times \text{จำนวนพนักงาน}) \times 20}{\text{ราคาเครื่องบรรจุน้ำชุป}} \quad (4)$$

โดยที่

พนักงาน แทน 2 คน/กะ หรือ 4คน/วัน

ค่าแรง แทน 330 บาท/วัน

วันทำงาน แทน 20 วัน

เงินลงทุน แทน 200,000 บาท

3. อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

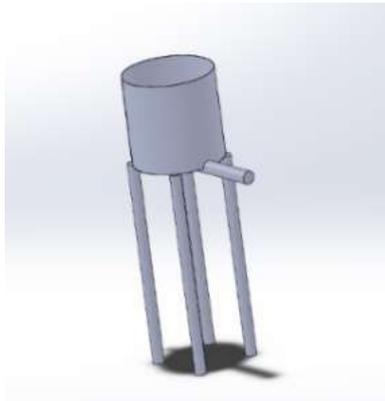
3.1 การออกแบบเครื่องบรรจุน้ำชุป

การออกแบบเครื่องเติมน้ำชุปแบบอัตโนมัติ โดยใช้โปรแกรมเขียนแบบด้วย SolidWorks เครื่องบรรจุน้ำชุปแบบอัตโนมัติ วัสดุที่ใช้ประกอบเครื่องจักรทำมาจากสแตนเลส sus 304 ซึ่งมีคุณสมบัติพิเศษที่ไม่ก่อให้เกิดสนิมตามมาตรฐานที่ใช้กับอุตสาหกรรมอาหาร โดยการออกแบบผู้วิจัยคำนึงถึงการใช้งานสะดวกเป็นอัตโนมัติ และเคลื่อนย้ายได้ง่าย เนื่องจากไลน์ผลิตสินค้าต้องมีการทำความสะอาดทุกๆ 4 ชั่วโมง เพื่อไม่ให้เกิดเชื้อโรคสะสมในไลน์ผลิต โดยการออกแบบนั้นได้ออกแบบหัวบรรจุน้ำชุปทั้งหมด 6 หัว ตามขนาดหน้ากว้างสายพานเดิมของไลน์ผลิตซึ่งมีขนาด 120 เซนติเมตร แต่ละหัวบรรจุมีระยะห่าง 20 เซนติเมตรและขนาดถ้วยมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 14.5 เซนติเมตร และความสูง 6 เซนติเมตร โดยรายละเอียดการออกแบบมีดังนี้

3.1.1 การออกแบบถังบรรจุน้ำชุป ถังเก็บน้ำชุปจะถูกออกแบบไว้ด้านบนของ Control Valve เพื่อให้สามารถไหลลงตามแรงโน้มถ่วงของโลกได้ ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยให้ปริมาณการไหลนั้นคงที่ และสม่ำเสมอ [13] จึงจำเป็นต้องให้น้ำชุปในถังบรรจุที่เสมอกับผู้ออกแบบ จึงได้มีการออกแบบที่ติดตั้งแท่งอิเล็กทรอนิกส์ไว้ เมื่อปริมาณน้ำในถังบรรจุต่ำลง ป้อนน้ำจะทำงานสูบน้ำจากถังด้านล่างเพื่อไปเก็บไว้ด้านบนทำให้ถังบรรจุน้ำชุปนั้นเต็มตลอดเวลาเมื่อผลให้ปริมาณน้ำชุปที่ไหลลงถ้วยสินค้ามีน้ำหนักที่คงที่เสมอ และปริมาณการใช้น้ำชุปการบรรจุลงสินค้ามีปริมาณอยู่ที่ 45 ลิตร/นาที ผู้ออกแบบจึงได้ออกแบบขนาดความจุถังน้ำชุปมากกว่าการใช้งาน 50 เปอร์เซ็นต์ โดยเลือกออกแบบขนาดถังเก็บน้ำชุปที่ 100 ลิตร เพื่อให้ปริมาณน้ำชุปเพียงพอในการบรรจุลงในถ้วยสินค้าสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\begin{aligned} 1) \text{ ปริมาณการเติมน้ำชุปต่อรอบ} &= \text{ปริมาณน้ำบรรจุ} \\ \text{ลงถาดสินค้า} \times \text{จำนวนถ้วยสินค้า} &= 250 \text{ กรัม} \times 6 \text{ ถ้วย} \\ &= 1,500 \text{ กรัม} \end{aligned}$$

2) ปริมาณการเติมน้ำซุ้ปต่อนาที = จำนวนน้ำซุ้ปต่อรอบ × จำนวนรอบ/นาที = 1,500 กรัม × 30 รอบ/นาที = 45,000 กรัม/นาที = 45 ลิตร/นาที



รูปที่ 4 การออกแบบถังเก็บน้ำซุ้ป

3.1.2 การออกแบบต่อเติมน้ำซุ้ป เพื่อให้ปริมาณน้ำซุ้ปภายในท่อเพียงพอต่อการบรรจุลงในถ้วยสินค้า โดยผู้ออกแบบได้เลือกใช้ท่อสแตนเลสขนาด 4 นิ้ว ดังแสดงในรูปที่ 5 จากความกว้างสายพาน 12,000 มิลลิเมตร จึงออกแบบหัวเติมน้ำซุ้ปให้มีระยะห่าง 200 มิลลิเมตร ซึ่งสามารถวางถ้วยสินค้าได้ 6 ถ้วย ตามแนวหน้ากระดานซึ่งจะสามารถผลิตสินค้าได้เต็มสายพาน ทำให้มีประสิทธิภาพการผลิตมากที่สุด และสามารถคำนวณปริมาณน้ำซุ้ปภายในท่อได้ดังสมการที่ 5

$$V = \pi r^2 L \quad (5)$$

โดยที่

π แทน 3.14

r แทน รัศมีภายในท่อ

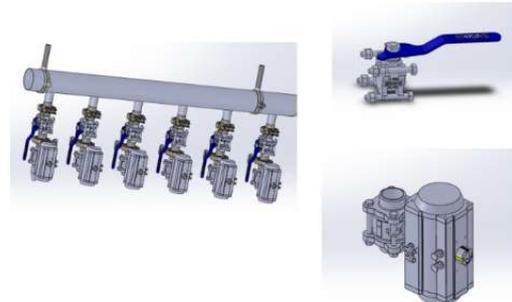
L แทน ความยาวท่อ

ดังนั้น ปริมาณน้ำซุ้ปภายในท่อ = 3.14 ซม. × 15.24² ซม. × 110 ซม. = 8.022 ลิตร



รูปที่ 5 ออกแบบท่อเติมน้ำซุ้ป

3.1.3 การออกแบบชุดเติมน้ำซุ้ปพร้อมวาล์วควบคุมเติมน้ำซุ้ป ลักษณะการออกแบบ จึงออกแบบหัวเติมน้ำซุ้ปให้มีความห่าง 200 มิลลิเมตร ซึ่งสามารถวางถ้วยสินค้าได้ 6 ถ้วย ตามแนวหน้ากระดาน ดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งจะสามารถผลิตสินค้าได้เต็มสายพาน และ ทำให้ประสิทธิภาพการผลิตมากที่สุด โดยการออกแบบชุดเติมน้ำซุ้ป จะใช้โดย Pneumatic Double Control Valve ซึ่งจะไปขับ Ball Valve อีกครั้ง เพื่อให้ น้ำซุ้ปสามารถไหลผ่านได้โดย Pneumatic Double Control Valve จะทำงานตามเวลาที่ผู้ใช้งานได้ตั้งค่าโปรแกรมไว้ [14] ลักษณะการ เปิด-ปิด ของ Pneumatic Double Control Valve จะเป็นการ หน่วงเวลามีหน่วยเป็นวินาที



รูปที่ 6 ออกแบบท่อเติมน้ำซุ้ปพร้อมวาล์วควบคุมเติมน้ำซุ้ป

3.2 การประกอบและการติดตั้งเครื่องบรรจุน้ำซุ้ป
วัสดุที่จะถูกนำมาประกอบ และสร้างเครื่องจักรจะ ใช้สแตนเลส 304 ตามมาตรฐานด้านอุตสาหกรรมอาหาร เนื่องจากจะเป็นวัสดุที่ทนทานและเกิดสนิมได้ยาก และยัง

สามารถต่ออุปกรณ์การกักกรอง ซึ่งการประกอบจะแสดง
ดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 ประกอบเครื่องบรรจุน้ำซูป

3.2.1 การประกอบและติดตั้ง Control valve
จะเลือกใช้ pneumatic double control valve ซึ่งจะ
ประกอบกับ Ball valve แสดงดังรูปที่ 8 และ รูปที่ 9 จะ
ทำหน้าที่ ร่วมกันโดย Control valve จะควบคุมการ
ทำงาน เปิด-ปิด ของ Ball valve



รูปที่ 8 ประกอบ Control valve กับ Ball valve

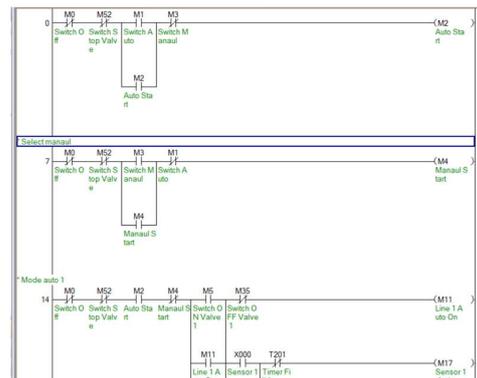


รูปที่ 9 ติดตั้ง Control valve

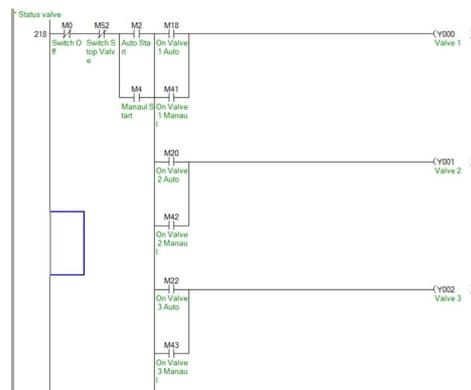
3.2.2 การออกแบบโปรแกรม PLC

การออกแบบโปรแกรมของเครื่องบรรจุน้ำซูปทาง
ผู้วิจัยได้แบ่งการเขียนโปรแกรมเป็น 2 แบบ คือ

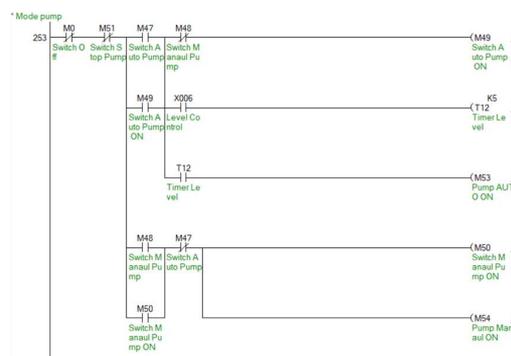
1. การเขียนโปรแกรม Plc Mitsubishi จะเขียนด้วย
โปรแกรม Gx work 2 ดังแสดงในรูปที่ 10 - 12



รูปที่ 10 Ladder diagram โหมต Mannaal

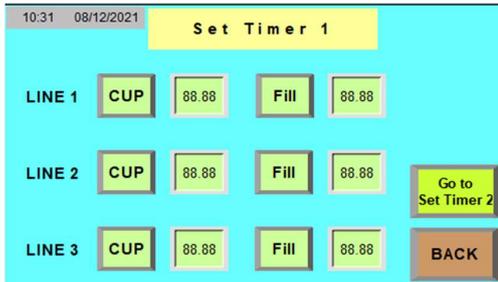


รูปที่ 11 Ladder diagram สถานะการทำงานของวาล์ว

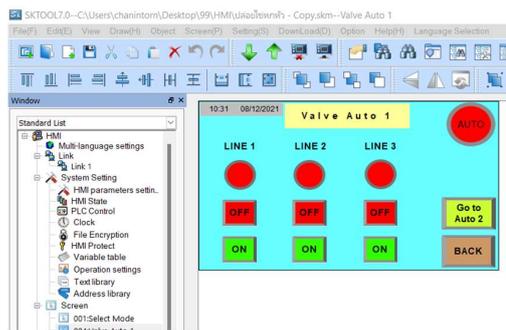


รูปที่ 12 Ladder diagram ส่วนปั้มน้ำ

2. การเขียนโปรแกรมหน้าจอบควบคุม ทางผู้วิจัยได้เลือกใช้น้ำจอตักกรีนในการควบคุมการทำงาน จึงต้องใช้โปรแกรม Sk Tool ในการเขียนโปรแกรมควบคุมหน้าจอดังแสดงในรูปที่ 13- 14



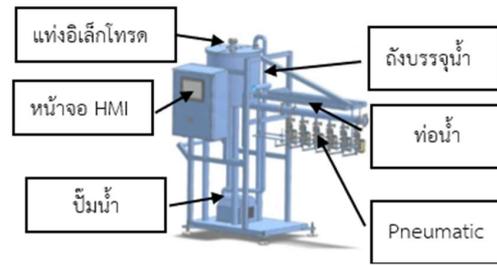
รูปที่ 13 ออกแบบหน้าจอแสดงผลปรับการบรรจุน้ำซุ๊ป



รูปที่ 14 ออกแบบหน้าจอแสดงผลปรับวาล์ว

3.2 ลักษณะการทำงานของระบบเติมน้ำซุ๊ป

การบรรจุจะอาศัยแรงโน้มถ่วง (time gravity filler) โดยน้ำซุ๊ปจะถูกปั้มน้ำ ดูดไปพักบริเวณถังพักด้านบนที่มีความสูง 170 เซนติเมตร และจะใช้ pneumatic double control valve ในการเปิด-ปิด การไหลของน้ำซุ๊ป ซึ่งปริมาณน้ำหนักรของน้ำซุ๊ปจะให้ค่าที่กักตังที่ และปริมาณน้ำซุ๊ปของถังด้านบนจะต้องเท่ากันอยู่เสมอ เพื่อให้ปริมาณน้ำซุ๊ปที่เติมลงในถ้วยมีน้ำหนักรคงที่สม่ำเสมอ โดยส่วนประกอบของเครื่องบรรจุน้ำซุ๊ปจะ แสดงดังรูปที่ 15



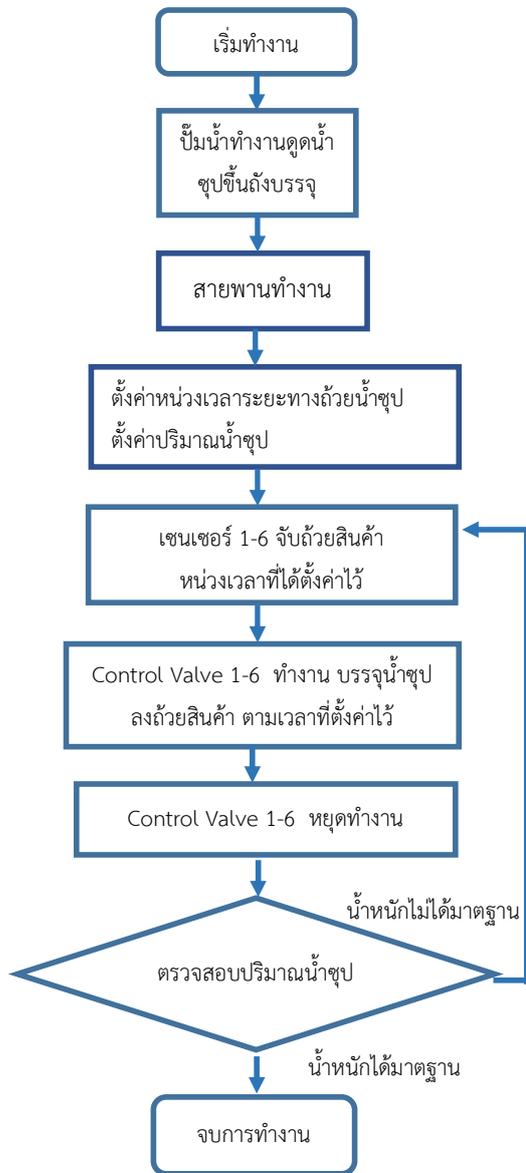
รูปที่ 15 เครื่องบรรจุน้ำซุ๊ป

3.3 การทำงานของเครื่องบรรจุน้ำซุ๊ป

การทำงานของเครื่องบรรจุน้ำซุ๊ป เพื่อให้ได้ประสิทธิภาพการผลิตสูงสุด พนักงานจะวางถ้วยสีนค้ำบนสายพานลำเลียงสีนค้ำ 6 แถว แนวหน้ากระดาน และถ้วยสีนค้ำจะเคลื่อนที่ด้วยความเร็ว 3.14เซนติเมตร/วินาที ดังแสดงรูปที่ 16 เมื่อสีนค้ำเคลื่อนที่ไปแล้วนั้นเซนเซอร์ตรวจพบวัตถุ 3 วินาที pneumatic double control valve ก็ จะเปิดการทำงาน เพื่อให้น้ำซุ๊ปลงในถ้วยสีนค้ำ และเมื่อน้ำซุ๊ปไหลลงถ้วยสีนค้ำครบกำหนดเวลาเรียบร้อยแล้ว pneumatic double control valve จะหยุดการทำงาน ดังแสดงรูปที่ 17 โดยสีนค้ำจะเคลื่อนที่ผ่านไปยังเครื่องพาสเจอร์ไรซ์ต่อไป และเมื่อปริมาณน้ำถังด้านบนเริ่มต่ำกว่าค่าที่กำหนดไว้ ปั้มน้ำด้านล่างจะเริ่มทำงาน เพื่อเติมน้ำซุ๊ปไปยังถังบรรจุน้ำด้านบนให้มีปริมาณคงที่เสมอ ทำให้น้ำหนักรของสีนค้ำทุกถ้วยมีน้ำหนักรคงที่



รูปที่ 16 การทำงานเครื่องจักร



รูปที่ 17 diagram การทำงานเครื่องบรรจุน้ำชู

3.3 การตั้งค่าเครื่องบรรจุน้ำเพื่อทำการทดลอง

การกำหนดการตั้งค่าของเครื่องบรรจุน้ำชู เครื่องจักรสามารถตั้งค่าต่างๆ โดยแบ่งการตั้งค่าการเติมน้ำชู แบ่งออกเป็น 2 ประเภทดังนี้

1. Cup คือ ค่าหน่วยเวลาระหว่างถ้วยสินค้าเคลื่อนที่มายังหัวบรรจุน้ำชู กำหนดเป็นหน่วยวินาที

2. Fill คือ ค่าหน่วยเวลาหน่วงเวลาในการเปิด-ปิด pneumatic ในการเติมน้ำชูซาบู กำหนดหน่วยเป็นวินาที

การหาปริมาตรของน้ำชู ปริมาตรของน้ำชูลงในถ้วยสินค้า คือ 250 cm^3 สามารถหาได้ดังนี้สมการที่ 6

$$V = \frac{m}{\rho} \quad (6)$$

$$m = \frac{250 \text{ g}}{1 \text{ g/cm}^3}$$

$$m = 250 \text{ cm}^3$$

โดยที่

V แทน ปริมาตรของน้ำชู cm^3

m แทน มวลของน้ำชู (g)

ρ แทน ความหนาแน่นของน้ำชู (g / cm^3)

การหาอัตราการไหลเชิงปริมาตรของน้ำชูไหลลงในถ้วยสินค้า 125 กรัม/วินาที ตามตารางที่ 1 สามารถหาได้ดังสมการที่ 7

$$Q = \frac{V}{t} \quad (7)$$

$$= \frac{(250 \text{ cm}^3 \times 10^{-3}) \times 1,000}{2}$$

$$= 125 \text{ กรัม / วินาที}$$

โดยที่

Q แทน อัตราการไหลของปริมาตร (m^3 / min)

V แทน ปริมาตรของน้ำ (cm^3)

t แทน เวลาในการบรรจุ (2 วินาที)

จากการหาปริมาณการเติมน้ำซุปลงในถ้วยสินค้า 125 กรัม/วินาที โดยความต้องการปริมาณน้ำหนักของน้ำซุปลงในถ้วยสินค้าคือ 250 กรัม ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงตั้งค่าหน่วยเวลาการเติมน้ำมาตรฐาน คือ 2 วินาที และได้ทดลองปรับค่าหน่วยเวลาการบรรจุน้ำซุปลงค่าที่ดีที่สุดจึงได้ค่าหน่วยเวลาตามตารางที่ 1



ตารางที่ 1 ตั้งค่าน้ำจ่อ HMI เครื่องจักร (หน่วย:วินาที)

หัวบรรจุ	Cup (วินาที)	Fill (วินาที)
1	1.9	2.2
2	1.8	2.1
3	2.0	2.1
4	1.9	1.8
5	2.2	2.3
6	1.9	2.1

จากการตั้งค่าน้ำจ่อ HMI ตามตารางที่ 1 ค่า Cup แตกต่างกันเนื่องจาก การตั้งเซนเซอร์แต่ละตัวอาจมีตำแหน่งที่แตกต่างกันเล็กน้อยทำให้ตำแหน่งจับวัตถุมีตำแหน่งที่ไม่ตรงกัน มีผลให้เวลาการเคลื่อนที่ของถ้วยน้ำซุปลงเคลื่อนที่มายังหัวบรรจุน้ำซุปลง มีค่าหน่วยเวลาที่แตกต่างกัน และค่า Fill ที่แตกต่างกันมีอยู่ 2 ปัจจัย ปัจจัยแรกคือ Control Valve มีเวลาทำงานที่ไม่เท่ากัน บางตัวทำงานได้เร็ว บางตัวทำงานช้า มีผลให้เวลาการเปิด-ปิดวาล์วนั้นไม่เท่ากัน และปัจจัยที่สอง คือ ลมที่ใช้ในการ Control วาล์วมีแรงดันไม่เท่ากันมีผลให้การทำงานของ Control Valve มีการหน่วยเวลาที่แตกต่างกัน

การทดลองบรรจุน้ำซุปลงได้เตรียมน้ำซุปลงปริมาณ 100 กิโลกรัม สำหรับการบรรจุลงในถ้วยสินค้า ซึ่งจะวางถ้วยแนวหน้ากระดาน 6 แถว โดยทำการทดลองครั้งละ 6 ถ้วย จำนวน $N = 30$ ครั้ง รวมทั้งหมด 180 ถ้วยลักษณะการวางถ้วยสินค้าจะวางดังรูปที่ 18

รูปที่ 18 ทดลองบรรจุน้ำซุปลง

4. ผลการทดลอง

วิเคราะห์หามาตรฐานในการบรรจุน้ำซุปลงในถ้วยสินค้า โดยใช้เครื่องบรรจุน้ำซุปลงแบบอัตโนมัติ โดยใช้สถิติค่าเฉลี่ย สามารถหาได้ ดังสมการที่ 8

$$\bar{X} = \frac{\sum x_i}{N} \quad (8)$$

โดยที่

- \bar{X} แทน ค่าเฉลี่ยของหัวจ่าย
- $\sum x_i$ แทน ผลรวมข้อมูลทั้งหมด
- N แทน จำนวนครั้งที่ทดสอบ

และการหาค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation) [12] สามารถหาได้ ดังสมการที่ 9

$$S. D. = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{X})^2}{(N-1)}} \quad (9)$$

โดยที่

- $S. D.$ แทน ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน
- x_i แทน น้ำซุปลงในถ้วยสินค้า
- \bar{X} แทน ค่าเฉลี่ยของหัวจ่าย
- N แทน จำนวนครั้งที่ทดสอบ

ค่ารากที่สองของค่าความคาดเคลื่อนกำลังสอง (Root Mean Squared Error : RMSE) เป็นวิธีการวัดค่าความคาดเคลื่อนแบบมาตรฐาน ซึ่งนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย

ในการวัดค่าความแม่นยำจากวิธีการนี้ ยิ่งค่า RMSE ที่ได้มีค่าน้อยแสดงว่าโมเดลมีความแม่นยำมาก โดยหาได้สมการดัง สมการที่ 10

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (Y_t - \hat{Y}_t)^2} \quad (10)$$

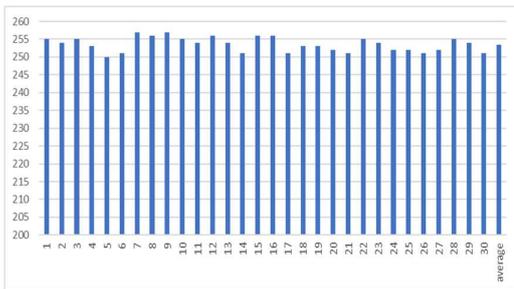
โดยที่

Y_t แทน ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

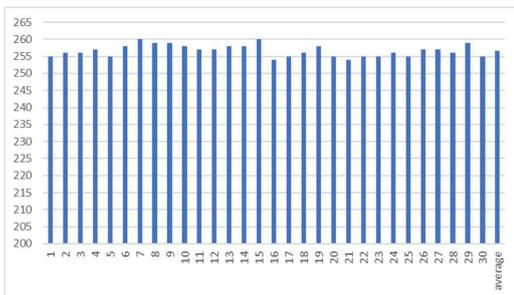
\hat{Y}_t แทน น้ำซูปในถ้วยสินค้า

N แทน จำนวนครั้งที่ทดสอบ

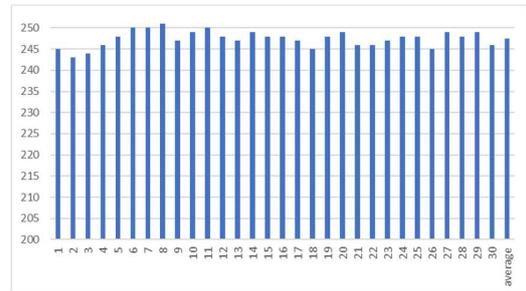
จากการทดลองบรรจุน้ำซูปลงถ้วยสินค้าจำนวน $N = 30$ ครั้ง รวมทั้งหมด 180 ถ้วย สามารถสรุปการทดลองดัง รูปที่ 19- 24 และ ตารางที่ 2-4



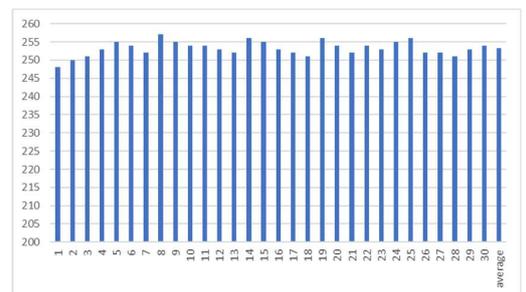
รูปที่ 19 ปริมาณน้ำหนักร้าน้ำซูป หัวที่ 1 เฉลี่ย 254 กรัม



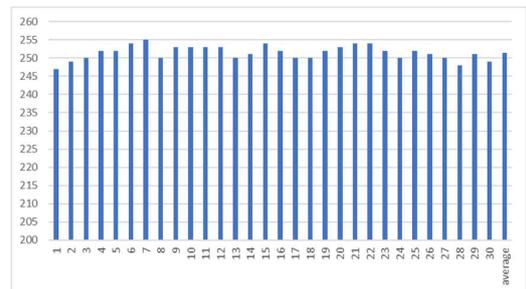
รูปที่ 20 ปริมาณน้ำหนักร้าน้ำซูป หัวที่ 2 เฉลี่ย 257 กรัม



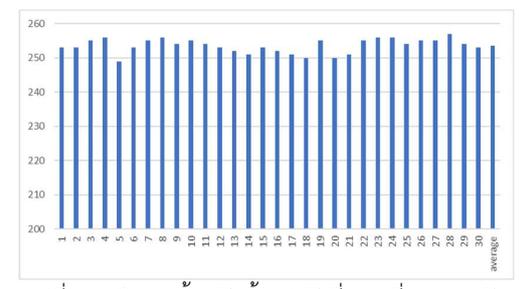
รูปที่ 21 ปริมาณน้ำหนักร้าน้ำซูป หัวที่ 3 เฉลี่ย 247 กรัม



รูปที่ 22 ปริมาณน้ำหนักร้าน้ำซูป หัวที่ 4 เฉลี่ย 253 กรัม



รูปที่ 23 ปริมาณน้ำหนักร้าน้ำซูป หัวที่ 5 เฉลี่ย 251 กรัม



รูปที่ 24 ปริมาณน้ำหนักร้าน้ำซูป หัวที่ 6 เฉลี่ย 254 กรัม

ตารางที่ 2 ปริมาณน้ำซูปในถ้วยสินค้า (หน่วย:กรัม)

ครั้งที่	1	2	3	4	5	6
1	255	255	245	248	247	253
2	254	256	243	250	249	253
3	255	256	244	251	250	255
4	253	257	246	253	252	256
5	250	255	248	255	252	249
6	251	258	250	254	254	253
7	257	260	250	252	255	255
8	256	259	251	257	250	256
9	257	259	247	255	253	254
10	255	258	249	254	253	255
11	254	257	250	254	253	254
12	256	257	248	253	253	253
13	254	258	247	252	250	252
14	251	258	249	256	251	251
15	256	260	248	255	254	253
16	256	254	248	253	252	252
17	251	255	247	252	250	251
18	253	256	245	251	250	250
19	253	258	248	256	256	255
20	252	255	249	254	253	250
21	251	254	246	252	254	251
22	255	255	246	254	254	255
23	254	255	247	253	252	256
24	252	256	248	255	250	256
25	252	255	248	256	252	254
26	251	257	245	252	251	255
27	252	257	249	252	250	255
28	255	256	248	251	248	257
29	254	259	249	253	251	254
30	251	255	249	254	249	253
ค่าเฉลี่ย	254	257	247	253	251	254

ตารางที่ 3 ผลการทดลองน้ำซูปในถ้วยสินค้า (หน่วย:กรัม)

รายการ	1	2	3	4	5	6
น้ำหนักมาตรฐาน	250	250	250	250	250	250
\bar{X}	254	257	247	253	251	254
S.D	0.74	1.29	0.55	0.55	0.18	0.74
ค่าคาดเคลื่อน	4	7	3	3	1	4

จากการวิจัยเรื่องการออกแบบเครื่องเติมน้ำซูปแบบอัตโนมัติ ผู้ทำการวิจัยได้ทดลองการบรรจุน้ำซูปลงในถ้วยสินค้าพบว่า เครื่องเติมน้ำซูปแบบอัตโนมัติสามารถบรรจุน้ำซูปได้อย่างต่อเนื่อง โดยมีการแยกการบรรจุออกเป็น 6 หัว โดยมีค่าเฉลี่ยดังนี้ หัวที่ 1 น้ำหนักเฉลี่ย 254 กรัม ค่าเบี่ยงเบน 0.74 ค่าคลาดเคลื่อน 4 กรัมหรือคิดเป็น 1.60 เปอร์เซ็นต์ หัวที่ 2 น้ำหนักเฉลี่ย 257 กรัม ค่าเบี่ยงเบน 1.29 ค่าคลาดเคลื่อน 7 กรัมหรือคิดเป็น 2.80 เปอร์เซ็นต์ หัวที่ 3 น้ำหนักเฉลี่ย 247 กรัม ค่าเบี่ยงเบน 0.55 ค่าคลาดเคลื่อน 3 กรัมหรือคิดเป็น 1.20 เปอร์เซ็นต์ หัวที่ 4 น้ำหนักเฉลี่ย 253 กรัม ค่าเบี่ยงเบน 0.55 ค่าคลาดเคลื่อน 3 กรัมหรือคิดเป็น 1.20 เปอร์เซ็นต์ หัวที่ 5 น้ำหนักเฉลี่ย 251 กรัม ค่าเบี่ยงเบน 0.18 ค่าคลาดเคลื่อน 1 กรัมหรือคิดเป็น 0.4 เปอร์เซ็นต์ หัวที่ 6 น้ำหนักเฉลี่ย 254 กรัม ค่าเบี่ยงเบน 0.74 ค่าคลาดเคลื่อน 4 กรัมหรือคิดเป็น 1.60 เปอร์เซ็นต์

จากค่าการทดลองบรรจุน้ำซูปลงในถ้วยสินค้า และหาค่า Root Mean Square Error สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 Mean Squared Error

หัวที่	1	2	3	4	5	6	SUM
RMSE	4.06	6.88	3.15	3.78	2.42	4.07	4.09

ในส่วนของการเสนอข้อมูลเชิงปริมาณในรูปแบบกราฟ เพื่อแสดงลักษณะการแจกแจงตำแหน่งและการกระจายของข้อมูล โดยใช้รูปกล่องแสดงตำแหน่งข้อมูลขอบ ขอบซ้ายและขอบขวาของรูปกล่องเป็นค่าคลอไทล์ที่

1 และคลอไธล์ที่ 3 เส้นตั้งฉากตรงกลางเป็นคลอไธล์ที่ 2 ค่ามัธยฐาน) โดยแบ่งเป็นกรณีได้ดังนี้

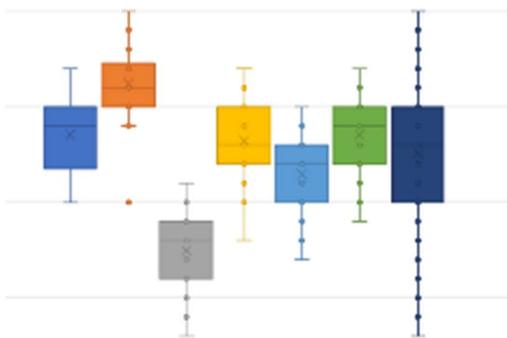
1. ถ้าค่ามัธยฐานเข้าใกล้คลอไธล์ที่ 1 มากกว่า คลอไธล์ที่ 3 แสดงว่าข้อมูลมีการแจกแจงเบ้ขวา

2. ถ้าค่ามัธยฐานอยู่กึ่งกลางระหว่างคลอไธล์ที่ 1 และ คลอไธล์ที่ 3 แสดงว่ากราฟสมมาตร

3. ถ้าค่ามัธยฐานเข้าใกล้ คลอไธล์ที่ 3 มากกว่า คลอไธล์ที่ 1 แสดงว่าข้อมูลมีการแจกแจงเบ้ซ้าย โดยจากการทดลองบรรจุน้ำซูป สามารถสรุปได้ดังตารางที่ 5 และรูปที่ 25

ตารางที่ 5 ค่า Box Plot ของค่าทดลองบรรจุน้ำซูป

ห้วที่	1	2	3	4	5	6	SUM
Q1	251	257	249	255	253	255	255
Q2	254	256	248	253	252	254	253
Q3	251	255	246	252	250	252	250
Max	257	260	251	257	255	257	260
Min	250	250	243	248	247	249	243



รูปที่ 25 Box Plot การบรรจุน้ำซูป

การคำนวณความคุ้มค่าการลงทุนในการใช้งานเครื่องบรรจุน้ำซูป (สมการที่ 4) ระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 7.5 เดือน โดยที่ พนักงาน เท่ากับ 2 คน/กะ หรือ 4คน/วัน ค่าแรงเท่ากับ 330 บาท/วัน วันทำงานเท่ากับ 20 วัน เงินเท่ากับ 200,000 บาท

การคำนวณหาประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องจักร หลังจากการนำเครื่องบรรจุน้ำซูปมาใช้งาน สามารถคำนวณได้ ดังนี้

$$\text{รอบการเติมน้ำซูป} = \frac{60 \text{ วินาที}}{10 \text{ วินาที}} = 6 \text{ รอบ/นาที}$$

$$\begin{aligned} \text{Capacity} &= \text{รอบการบรรจุน้ำซูป} \times \text{จำนวนถ้วย} \\ &= 6 \text{ รอบ/นาที} \times 6 \text{ ถ้วย/รอบ} \\ &= 36 \text{ ถ้วย/นาที} \\ &= 2,150 \text{ ถ้วย/ชั่วโมง} \end{aligned}$$

โดยที่ระยะห่างระหว่างเซนเซอร์ กับ หัวบรรจุน้ำซูป 10 เซนติเมตร เวลาบรรจุน้ำซูปใช้เวลา 2 วินาที เวลาถ้วยน้ำซูปเคลื่อนผ่านหัวเติมน้ำซูป 4 วินาที เวลาถ้วยน้ำซูปเคลื่อนที่จากเซนเซอร์ไปหัวเติมน้ำซูป 4 วินาที และ 1 รอบสามารถบรรจุน้ำซูปได้ 6 ถ้วย

การคำนวณหาประสิทธิภาพการทำงาน ก่อนการนำเครื่องบรรจุน้ำซูปมาใช้งานสามารถคำนวณได้ดังนี้

$$\text{รอบการเติมน้ำซูป} = \frac{60 \text{ วินาที}}{6 \text{ วินาที}} = 10 \text{ รอบ/นาที}$$

$$\begin{aligned} \text{Capacity} &= \text{รอบการบรรจุน้ำซูป} \times \text{จำนวนถ้วย} \\ &= 10 \text{ รอบ/นาที} \times 2 \text{ ถ้วย/รอบ} \\ &= 20 \text{ ถ้วย/นาที} \\ &= 1,200 \text{ ถ้วย/ชั่วโมง} \end{aligned}$$

โดยที่เวลาพนักงานหยิบถ้วยน้ำซูป 2 วินาที เวลาพนักงานตักน้ำซูป 2 วินาที และเวลาพนักงานวางถ้วยสินค้า 2 วินาที

5. สรุปผล

จากผลการทดลองดังกล่าวทั้ง 30 ครั้ง พบว่า แต่ละหัวบรรจุนั้น มีค่าน้ำหนักน้ำซูปอยู่ที่ 243-260 กรัม ซึ่งไม่เกินค่ามาตรฐาน โดยหน่วยงานประกันคุณภาพได้กำหนดน้ำหนักมาตรฐานไว้ที่ 250 ± 10 กรัม และน้ำหนักของน้ำซูปในถ้วยสินค้า แต่ละหัวบรรจุยังไม่มีแตกต่างกัน หลังจากการใช้งานเครื่องบรรจุน้ำซูปประสิทธิภาพการบรรจุจากเดิม 1,200 ถ้วย/ชั่วโมง เพิ่มขึ้นเป็น 2,150 ถ้วย/ชั่วโมง คิดเป็น 79.16% และยังสามารถลดค่าใช้จ่ายในส่วนพนักงานเติมน้ำซูปได้ 316,800 บาท/ปี ซึ่งงบการ

ลงทุนเครื่องเติมน้ำซูปคือ 200,000 บาท เมื่อคิดจุดคุ้มทุน จะอยู่ที่ 7.5 เดือน ซึ่งถือว่าเป็นผลตอบแทนที่รวดเร็วมาก

6. ข้อเสนอแนะ

ข้อควรระวังที่ 1 ปริมาณน้ำหนักของน้ำซูป แต่ละ ถ้วยนั้น จะมีปริมาณที่แตกต่างกัน ถ้าปริมาณน้ำซูปบนถึง บรรจุมีปริมาณที่ต่ำกว่าเกณฑ์ที่กำหนด ดังนั้นจึงจำเป็นต้องให้ปริมาณน้ำซูปถึงด้านบนมีปริมาณที่เท่ากันเสมอ เพื่อไม่ให้ค่าน้ำหนักของน้ำซูปในแต่ละถ้วยสินค้ามีความ แตกต่างกัน

ข้อควรระวังที่ 2 ขณะเติมน้ำซูปลงถ้วยสินค้า แต่ละ ถ้วยนั้นจะมีน้ำซูปกระเด็นมาเกาะบริเวณเซนเซอร์จับถาด ทำให้เซนเซอร์ไม่จับถาดสินค้าในบางครั้ง จึงจำเป็นต้อง ติดตั้งเซนเซอร์ให้สูงกว่าตำแหน่งที่น้ำซูปจะกระเด็นโดน เพื่อป้องกันการการทำงานที่ผิดพลาดของเครื่องจักร

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ บริษัท ซีพีเอฟ ฟู้ด แอนด์เบฟเวอเรจ จำกัด ที่ให้โอกาสในการทำโครงการนี้รวมถึงสนับสนุน พื้นที่บริษัทในการทำโครงการครั้งนี้

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Suttibak, Fluid Mechanics, Udon Thani Rajabhat University, 2015.
- [2] Sonic Automation Co., Ltd, "Principle of PLC," Beginner Allen-Bradley Micro 800, 2019.
- [3] P. Piamkaew, A. Phadungruangkij, K. Ruttanon, M. Oungthong and A. Sripradit, "Design And To Develop Of A Semi-Automatic The Fermented Fish Sauce Filling Machine," *Journal of Thonburi University (Science and Technology)*, vol. 4, no. 3, pp. 25-43, May. 2020.
- [4] E.C. Prima, S.S. Munifaha, R. Salamb, M.H. Azib and A.T. Suryanic, "Automatic Water Tank Filling System Controlled using ArduinoTM based Sensor for Home Application," *Procedia Engineering*, vol. 170, pp. 373-377, 2017.
- [5] S. Eswar, N. Hariprasad, L. Jaiganesh, M. Mohamedimthiyas and A. Gopikrishnan, "Automatic Liquid Mixing and Filling Using PLC," in *2018 IEEE International Conference on Current Trends toward Converging Technologies*, Coimbatore, India, 2018, pp. 1-6.
- [6] T. Glück, D. Büchl, C. Krämer, A. Pfeffer, A. Risle, L. Hägele and A. Kugi, "Modeling and control of a novel pneumatic two-stage piezoelectric-actuated valve," *Mechatronics*, vol. 75, pp. 7-11, 2021.
- [7] D. Zhang and S. Li, "Design and Realization of Liquid Filling Machine Intelligent Control System," in *2015 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation*, Beijing, China, 2015, pp. 1283-1288.
- [8] J. Pannu, R. Kulkarni and M. Ranjana, "On the automated multiple liquid bottle filling system," in *International Conference on Circuit, Power and Computing Technologies (ICCPCT)*, India, 2016.
- [9] G.W. Tjoa, A. Aribowo and A.S. Putra, "Design of Automatic Drinking Water Supply System for Poultry Cage," in *5th International Conference on New Media Studies (CONMEDIA)*, Indonesia, 2019, pp. 115-120.

- [10] A.I. Abashar, M.A. Mohammedeltoum and O.D. Abaker, “Automated and Monitored Liquid Filling System using PLC Technology,” in *International Conference on Communication, Control, Computing, and Electronic Engineering (ICCCCEE)*, Khartoum, Sudan, 2017.
- [11] C. Chatkul Na Ayutthaya, “Design and make washing machine for part,” M.S. thesis, Dept. of Industrial Production Technology, Kasetsart University, Bangkok, Thailand, 2018.
- [12] C. Phethin, “Design and Construction of Automatic Radiator Leak Testing Machine Controlled by PLC,” B.E. Project, Dept. of Electrical Engineering, Siam University, Bangkok, Thailand, 2017.
- [13] R. Suwan, “Productivity Increasing In Production Process: Corn Milk Bottling,” M.S. Thesis, Dept. of Engineering Management, Dhurakij Pundit University, Bangkok, Thailand, 2014.
- [14] Pneuma System Co., Ltd, “*SIRCA Pneumatic Actuator Valve*,” [Online]. Available : <https://www.pneuma.co.th/product/182585>.
- [15] Mitsubishi Electric Factory Automation (Thailand) Co.,Ltd “*Basic PLC*,” [Online]. Available : <https://www.mitsubishielectric.com/fa/assist/e-learning/pdf/tha/1Program>.

**การลดของเสียจากข้อบกพร่องสีแตกและสีบางในกระบวนการพ่นสีฝุ่นบนกรอบกระจก
ของหลังคาถระบะอบเนกประสงค์**
**Defective Reduction from Cracking Paint and Thin Paint in Powder
Coated Painting Process of Window Frame of Canopy**

พิชญา วาดสูงเนิน* นภัสสงศ์ โอสถศิลป์

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

Pichaya Wadsungnoen* Napassavong Osothsilp

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,

Chulalongkorn University, Phayathai Road, Patumwan, Bangkok, Thailand 10330

*Corresponding author Email: 6370198621@student.chula.ac.th,

(Received: December 5, 2022; Revised: April 8, 2023 ; Accepted: May 11, 2023)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดสัดส่วนของเสียที่เกิดจากข้อบกพร่องประเภทสีแตกและสีบางในกระบวนการพ่นสีฝุ่นบนกรอบกระจกของหลังคาถระบะอบเนกประสงค์ งานวิจัยนี้ได้ประยุกต์แนวคิดซิกซ์ ซิกมา (Six-Sigma) ในการปรับปรุงโดยเริ่มจากการศึกษาสภาพปัญหาในปัจจุบัน วิเคราะห์ความแม่นยำและความเที่ยงของระบบการตรวจสอบข้อบกพร่อง จากนั้นได้วิเคราะห์สาเหตุของปัญหาโดยการระดมความคิด จัดทำแผนผังสาเหตุและผล เมทริกซ์สาเหตุและผล เพื่อกำหนดปัจจัยนำเข้าหลัก และนำปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อการเกิดข้อบกพร่องประเภทสีแตกและสีบาง 5 ปัจจัยไปออกแบบการทดลองเพื่อหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของเสียและปัจจัยที่มีนัยสำคัญ จากนั้นใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม เพื่อหาระดับของแต่ละปัจจัยที่เหมาะสมที่จะช่วยลดสัดส่วนของเสียรวม หลังจากนั้นได้จัดทำแผนควบคุมและเอกสารขั้นตอนการปฏิบัติงาน ผลลัพธ์ที่ได้หลังการปรับปรุงกระบวนการ พบว่า สามารถลดสัดส่วนของเสียจาก 8 เปอร์เซ็นต์ เหลือ 1.13 เปอร์เซ็นต์ และสามารถลดค่าใช้จ่ายที่เกิดจากของเสียได้ 6,877,484 บาทต่อปี

คำสำคัญ: กระบวนการพ่นสีฝุ่น การลดสัดส่วนของเสีย ชิ้นส่วนยานยนต์ ซิกซ์-ซิกมา

ABSTRACT

This research aims to reduce the defective rate from cracking paint and thin paint defects in Powder Coated Painting process of window frame of canopy. This research applied the Six Sigma approach for improvement. Firstly, the problem was defined. Secondly, the accuracy and the precision of the inspection system were appraised. After that, the potential causes for cracking and thin paint defects were analyzed by brain storming and using the cause and effect diagram and the cause and effect matrix to identify key process input variables. Then, the five factors were experimented to find the regression equation showing the relationship between the defective rate and the significant factors.

Next, the optimal values of significant factors were found and implemented. The improvement led to the reduction of defective rate from 8 percent to 1.13 percent and the reduction of the rework cost of 6,877,484 baht per year.

Keyword: Powder coated process, Defective rate reduction, Automotive part, Six-sigma

1. บทนำ

ในปัจจุบันกระบวนการพ่นสีสำหรับชุดแต่งกรอบกระจกของหลังคารถยนต์อเนกประสงค์พบข้อบกพร่องหลังจากกระบวนการพ่นสีบางชนิด เช่น สีแตก พ่นสีไม่ติด เม็ดฝุ่น ความหนาสีไม่ได้ตามมาตรฐาน ความเงาไม่ได้ตามมาตรฐาน และสีไหล ฯลฯ ซึ่งข้อบกพร่องเหล่านี้ไม่สามารถพบได้ในกระบวนการตรวจสอบชิ้นงานก่อนพ่นสีหรือการเตรียมผิวชิ้นงาน แต่ตรวจพบในขั้นตอนสุดท้ายในการตรวจสอบคุณภาพ จึงทำให้เกิดปัญหาและความสูญเสียเป็นอย่างมาก เนื่องจากกระบวนการพ่นสีนั้นผ่านขั้นตอนหลายขั้นตอนและใช้เวลานานจึงจะสามารถพบว่าข้อบกพร่องเหล่านี้เกิดขึ้น ซึ่งส่วนใหญ่ข้อบกพร่องเหล่านี้จะเกิดคล้าย ๆ กันภายในล็อตการผลิตเดียวกัน โดยของเสียที่เกิดขึ้นทำให้เกิดความสูญเสียต่าง ๆ เช่น วัตถุดิบในการผลิต ต้นทุนในการผลิตต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็น ต้นทุนแรงงาน และต้นทุนเครื่องจักร อีกทั้งยังเสียค่าใช้จ่ายและเวลาในการแก้ไขข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นกับชิ้นงาน ดังนั้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานและลดต้นทุนในการผลิตที่ไม่จำเป็นจึงต้องมีการปรับปรุงวิธีการทำงานเพื่อลดข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในกระบวนการพ่นสีสำหรับชุดแต่งกรอบกระจกของหลังคารถยนต์อเนกประสงค์ โดยการกำหนดค่าของปัจจัยต่าง ๆ ในกระบวนการพ่นสีที่เหมาะสม

ดังนั้นสำหรับการวิจัยนี้จะทำการศึกษาโดยมุ่งเน้นการปรับปรุงกระบวนการผลิตและลดของเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิต โดยได้นำแนวคิดซิกซ์ ซิกมา (Six Sigma) [1] มาช่วยในการปรับปรุงกระบวนการผลิตและลดจำนวนของเสีย เนื่องจากแนวคิดนี้ได้รับการยอมรับอย่างกว้างขวางว่ามีประสิทธิภาพอย่างมากในการช่วย

ปรับปรุงคุณภาพของผลิตภัณฑ์และช่วยลดต้นทุนในกระบวนการผลิต โดยแนวคิดซิกซ์ ซิกมาได้ทำการแบ่งระยะในการศึกษาออกเป็น 5 ระยะ [2] ได้แก่ การนิยามปัญหา การวัดผลและการเก็บข้อมูลของปัญหา การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา การปรับปรุง และการควบคุมกระบวนการ

2. วิธีการดำเนินงาน

ขั้นตอนดำเนินงานในการลดของเสียในกระบวนการพ่นสี มีดังนี้

2.1 การศึกษา วิเคราะห์ข้อมูลและกำหนดปัญหา

ในขั้นตอนนี้คณะทำงานได้ศึกษากระบวนการพ่นสีสำหรับชุดแต่งกรอบกระจกของหลังคารถยนต์อเนกประสงค์พร้อมทั้งรวบรวมข้อมูลที่เกี่ยวข้องทั้งหมดที่เกิดขึ้นกับกระบวนการพ่นสี เช่น จำนวนในการพ่นสีฝุ่นสำหรับชุดแต่งกรอบกระจกอเนกประสงค์ในแต่ละเดือน และค่าใช้จ่ายในการซ่อมข้อบกพร่องที่เกิดจากกระบวนการพ่นสี รวมทั้งวิเคราะห์ข้อมูลจำนวนของเสียจากข้อบกพร่องประเภทต่าง ๆ โดยใช้แผนภาพพาเรโต (Pareto Diagram) เพื่อเลือกประเภทของข้อบกพร่องที่จะแก้ไข และกำหนดขอบเขตในการปรับปรุง

2.2 การวิเคราะห์ระบบการตรวจสอบข้อบกพร่อง

ในงานวิจัยนี้มีลักษณะเป็นการประเมินผลข้อมูลแบบนับ (Attribute data) คือ ผ่าน (Good: G) หรือไม่ผ่าน (No Good: NG) โดยจะวิเคราะห์ทั้งความแม่นยำ (Accuracy) และความเที่ยง (Precision) ของระบบการตรวจสอบข้อบกพร่องที่เกิดบนกรอบกระจกหลังคารถยนต์อเนกประสงค์ว่า สามารถยอมรับได้หรือไม่ โดยทำ

การทดลอง ให้พนักงาน 3 คนตรวจสอบกรอบกระจกคนละ 12 ชิ้น โดยทำการตรวจสอบซ้ำ 3 ครั้งต่อชิ้นงาน 1 ชิ้น โดยลำดับการตรวจสอบเป็นแบบสุ่ม และสลัลำดับของชิ้นงาน [2], [3]

2.3 การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา

การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหาเป็นการค้นหาปัจจัยที่มีโอกาสเป็นรากที่แท้จริงซึ่งก่อให้เกิดของเสียในกระบวนการโดยศึกษาจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องและระดมความคิด (Brain storming) จัดทำแผนผังสาเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) และเมทริกซ์สาเหตุและผล (Cause and Effect Matrix) เพื่อกำหนดปัจจัยนำเข้าหลัก (Key process Input Variable) เพื่อนำไปศึกษาเพิ่มเติม [4]

2.4 การปรับปรุงกระบวนการ

ในขั้นตอนนี้ผู้วิจัยใช้เทคนิคการออกแบบการทดลอง (Design of experiment: DOE) เพื่อกำหนดแผนการทดลอง และใช้การวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) ในการหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของเสียและปัจจัยที่มีนัยสำคัญ และการใช้เทคนิคการหาค่าที่เหมาะสม (Optimization)[5] เพื่อหาระดับที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยที่จะช่วยลดสัดส่วนของเสียรวมจากข้อบกพร่องประเภทสีแตกและสีบาง จากนั้นสรุปผลการทดลอง [5], [6]

2.5 การควบคุมกระบวนการ

ในขั้นตอนนี้คณะทำงานนำค่าการปรับตั้งที่เหมาะสมที่ได้จากการปรับปรุงกระบวนการมาใช้ในกระบวนการผลิตจริง และจัดทำแผนควบคุม เอกสารขั้นตอนการปฏิบัติงาน เพื่อกำหนดมาตรฐานในการทำงาน เพื่อลดของเสียที่เกิดในกระบวนการผลิตได้อย่างยั่งยืน

3. ผลการทดลอง

3.1 ผลการกำหนดปัญหา

เมื่อพิจารณาข้อมูลของเสียที่เกิดจากกระบวนการพ่นสีฝุ่นสำหรับชุดแต่งกรอบกระจกของหลังคารถยนต์เนกประสงค์ตั้งแต่เดือนมกราคมถึงเดือนธันวาคม พ.ศ.

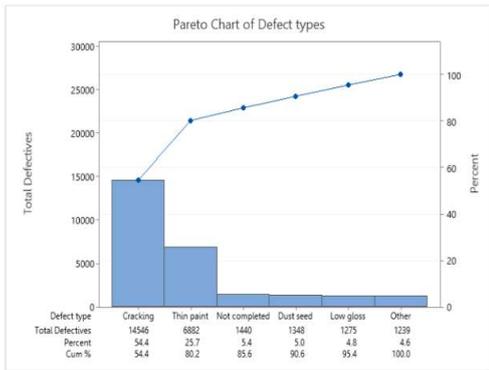
2564 พบว่ามีข้อบกพร่องเกิดขึ้นในชิ้นงาน ได้แก่ สีแตก พ่นสีไม่ติด เม็ดฝุ่น ความหนาสีไม่ได้ตามมาตรฐาน ความเงาไม่ได้ตามมาตรฐาน สีไหล ฯลฯ จากการพิจารณาสัดส่วนของเสียซึ่งแสดงในรูปที่ 1 พบว่าของเสียที่เกิดจากข้อบกพร่องประเภทสีแตก (Cracking) มีจำนวนของเสียมากเป็นอันดับหนึ่ง โดยคิดเป็นสัดส่วนของเสียคือ 54.4 เปอร์เซ็นต์ของจำนวนของเสียทั้งหมด และจำนวนของเสียที่มากเป็นอันดับที่สอง คือของเสียที่เกิดจากข้อบกพร่องประเภทสีบาง (Thin paint) โดยคิดเป็นสัดส่วนคือ 25.7 เปอร์เซ็นต์ของจำนวนของเสียทั้งหมด ข้อบกพร่องทั้งสองประเภททำให้เกิดของเสียคิดเป็นสัดส่วน 80.2 เปอร์เซ็นต์ของจำนวนของเสียทั้งหมดที่เกิดขึ้นในปี 2564 และข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นทุกประเภทมีกระบวนการซ่อมข้อบกพร่องในรูปแบบเดียวกัน ดังนั้นค่าใช้จ่ายในการซ่อมสีต่อหน่วยชิ้นงานจึงเท่ากัน เมื่อพิจารณาข้อมูลค่าใช้จ่ายในการซ่อมข้อบกพร่องจากกระบวนการพ่นสีฝุ่น พบว่าค่าใช้จ่ายในการซ่อมข้อบกพร่องประเภทสีแตกมีค่าใช้จ่ายในการซ่อมเป็นอันดับหนึ่ง คือ 5,436,567 บาท และค่าใช้จ่ายในการซ่อมข้อบกพร่องประเภทสีบางมีค่าใช้จ่ายในการซ่อมเป็นอันดับสอง คือ 2,572,148 บาท โดยทั้งสองข้อบกพร่องนี้มีสาเหตุร่วมกัน หากปัญหาเหล่านี้ได้รับการแก้ไขจะส่งผลให้สามารถลดจำนวนของเสีย ลดค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการซ่อมสี และยังสามารถช่วยปรับปรุงกระบวนการผลิตให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ดังนั้นจึงเลือกข้อบกพร่องประเภทสีแตกและสีบางมาทำการศึกษาวิจัย

ลักษณะข้อบกพร่องประเภทสีแตกที่เกิดขึ้นกับผลิตภัณฑ์ คือสีที่เคลือบชิ้นงานเกิดการแยกตัว เกิดรอยแตกร้าวและสีไม่ยึดเกาะกับชิ้นงาน จนร่อนออกมาเป็นแผ่นได้ แสดงดังรูปที่ 2 และลักษณะข้อบกพร่องประเภทสีบาง คือ สีที่เคลือบผิวของชิ้นงานมีความหนาดำกว่ามาตรฐานที่กำหนดไว้ และสีไม่กลบผิวชิ้นงานได้อย่างทั่วถึงจนมองเห็นเนื้อผิวของชิ้นงาน แสดงดังรูปที่ 3

3.2 ผลการวิเคราะห์ระบบการวัด

จากผลการวิเคราะห์ดัชนีชี้วัดความแม่นยำและความเที่ยงของระบบการวัด ซึ่งแสดงดังตารางที่ 1 พบว่า ค่า

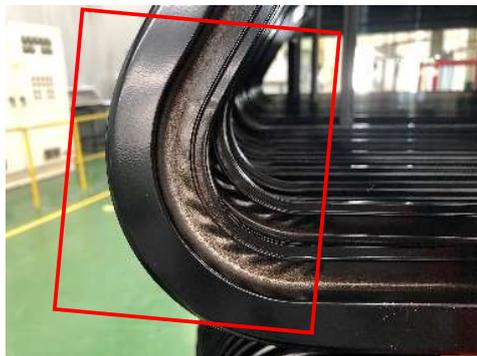
ดัชนีชี้วัดของระบบการวัดของพนักงานตรวจสอบทั้ง 3 คน ผ่านเกณฑ์ในทุกดัชนีการวัด ดังนั้นระบบการวัดมีความน่าเชื่อถือ



รูปที่ 1 แผนผังพาเรโตของสัดส่วนของเสีย



รูปที่ 2 ลักษณะข้อบกพร่องประเภทสีแตก



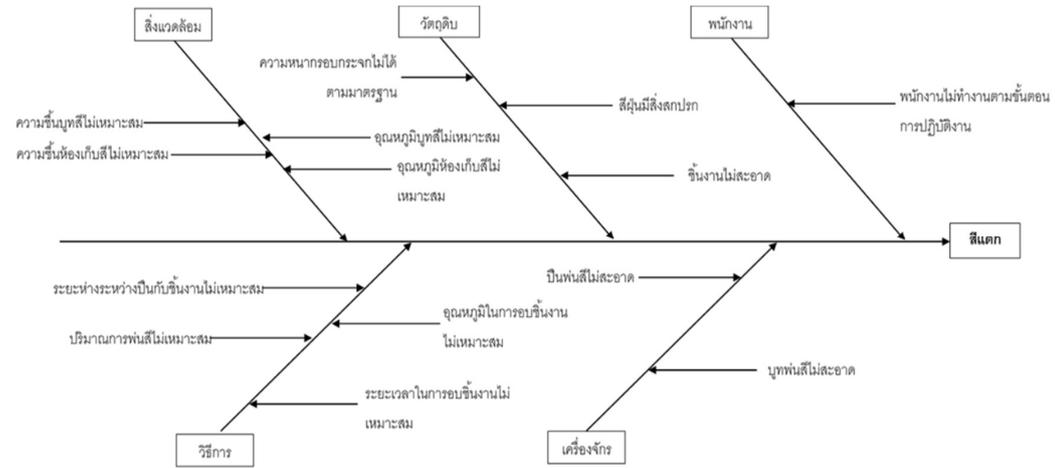
รูปที่ 3 ลักษณะข้อบกพร่องประเภทสีบาง

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์ระบบการวัด

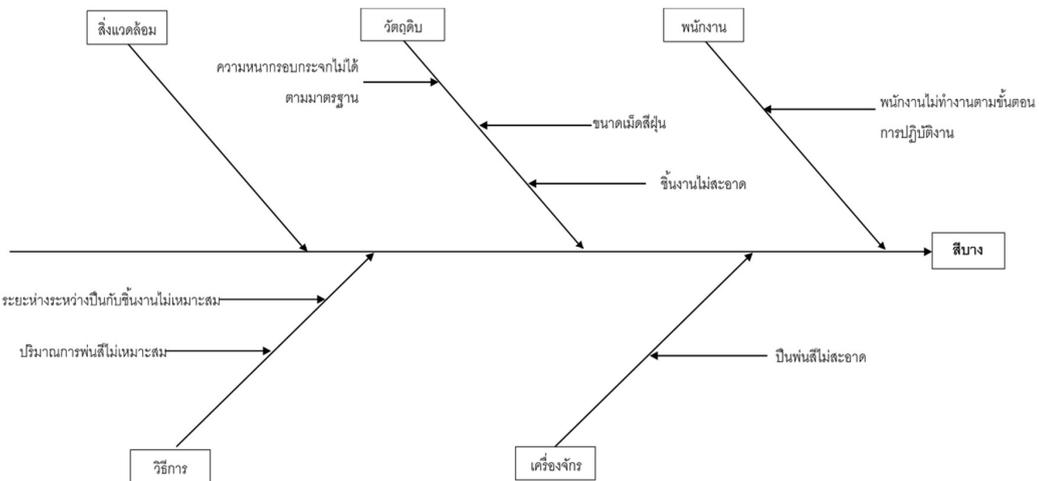
ดัชนีการวัด	พนักงาน คนที่ 1	พนักงาน คนที่ 2	พนักงาน คนที่ 3
ดัชนีความมีประสิทธิภาพ (O _E)	100%	100%	100%
ดัชนีการตรวจสอบที่ปฏิเสธที่ผิดพลาด (I _{FA})	0%	0%	0%
ดัชนีการตรวจสอบที่ยอมรับที่ผิดพลาด (I _{MIS})	0%	0%	0%
ความพ้องกันของค่าวัด	100%		
ความพ้องกันและถูกต้องของค่าวัด	100%		

3.3 ผลการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา

จากงานวิจัยของ K.Srinivasan ได้ทำการวิจัยเพื่อลดปัญหาคุณภาพสีแตกหลุดร่อนของใช้คอป โดยศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดของเสีย ได้แก่ อุณหภูมิในการทำความสะอาด ค่า pH การเคลือบฟอสเฟต และอุณหภูมิในการพ่น [7] ผู้วิจัยได้นำมาบางปัจจัยข้างต้นมาพิจารณา ระดมสมองกับทีมงานและหลังจากนั้นได้ใช้แผนผังสาเหตุและผล ซึ่งเป็นแผนผังที่แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอาการของปัญหาและสาเหตุที่เกี่ยวข้องและมีโอกาส พบสาเหตุที่เป็นไปได้ที่ก่อให้เกิดข้อบกพร่องประเภทสีแตกและสีบาง แสดงดังรูปที่ 5 และ 6 ตามลำดับ จากนั้นได้เรียงลำดับความสำคัญของปัจจัย โดยการให้คะแนนในตารางเมทริกซ์สาเหตุและผล เพื่อช่วยจัดลำดับความสำคัญของสาเหตุ เพื่อช่วยในการตัดปัจจัยที่ส่งผลน้อยในการทำให้เกิดข้อบกพร่องออกไป โดยในการให้คะแนนจะทำการประชุมกับคณะทำงานทุกคน หลังจากนั้นนำคะแนนที่ได้มาเรียงลำดับจากมากไปน้อย โดยปัจจัยที่มีคะแนนสูงแสดงดังตารางที่ 2 และได้ทำการคัดเลือกปัจจัยที่มีคะแนนและผลกระทบสูงไปศึกษาต่อ โดยพบว่าทั้งหมด 5 ปัจจัยที่เลือกมาศึกษาต่อ ได้แก่ ความหนาของกรอบกระจก ปริมาณการพ่นสี ระยะห่างปืน อุณหภูมิในการอบ และระยะเวลาในการอบ โดยมีสมมติฐานว่าแต่ละปัจจัยมีผลกระทบต่อเกิดการเกิดข้อบกพร่องประเภทสีแตกและสีบาง ดังนี้



รูปที่ 5 แผนผังสาเหตุและผลประเภทสีแตก



รูปที่ 6 แผนผังสาเหตุและผลประเภทสีบาง

1. ความหนาของกรอบกระจก (Thickness) : ความหนาของกรอบกระจกมีค่ามาตรฐานควบคุมอยู่ที่ 25.4 ± 0.5 มิลลิเมตร ซึ่งหากความหนาของกรอบกระจกมีค่ามากจะส่งผลเกี่ยวข้องกับระยะห่างของปืนกับชิ้นงานที่มีค่าลดลง จึงส่งผลให้ความหนาของสีหลังพ่นมากเกินไป 120

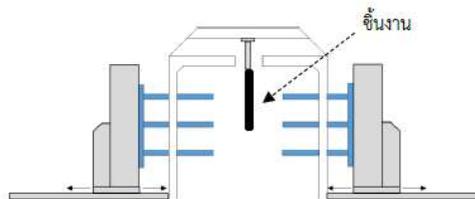
ไมครอน ซึ่งทำให้เกิดสีหนาและส่งผลให้เกิดปัญหาสีแตกได้ แต่หากความหนาของกรอบกระจกมีค่าน้อยจะส่งผลให้ระยะห่างของปืนกับผิวชิ้นงานมีค่ามากขึ้น จึงทำให้เกิดปัญหาความหนาสีต่ำกว่า 80 ไมครอนจึงเกิดข้อบกพร่องประเภทสีบางได้

ตารางที่ 2 คะแนนรวมของแต่ละปัจจัยนำเข้า

ที่	คะแนนความสำคัญ	ปัจจัยนำเข้า	10	5	รวม
			สีแตก	สีบาง	
1	ความหนากรอบกระจก		9	9	135
2	ปริมาณการพ่นสี		9	9	135
3	ระยะห่างระหว่างปืนกับชิ้นงาน		9	9	135
4	อุณหภูมิในการอบชิ้นงาน		9	0	90
5	ระยะเวลาในการอบชิ้นงาน		9	0	90
6	พนักงานไม่ทำงานตามขั้นตอน		3	3	45
7	ความสะอาดชิ้นงาน		1	1	15
8	ขนาดเม็ดสีฝุ่น		1	1	15
9	ปืนพ่นสี		1	1	15
10	ความชื้นบูท		1	0	10
11	ความชื้นห้องเก็บสี		1	0	10
12	อุณหภูมิในบูท		1	0	10
13	อุณหภูมิห้องเก็บสี		1	0	10
14	สีฝุ่นมีสิ่งสกปรก		1	0	10
15	บูทพ่นสี		1	0	10

2. ปริมาณการพ่นสี (Feed) : ปริมาณการพ่นสีคือปริมาณในการพ่นสีออกจากปืนพ่นสี โดยมีหน่วยวัดเป็นกรัมต่อนาที ซึ่งถูกตั้งค่าและควบคุมด้วยตัวควบคุมเครื่องพ่นสีเพื่อให้ได้ปริมาณการพ่นสีตามที่ถูกกำหนดไว้ โดยมีช่วงควบคุมปริมาณการพ่นสีอยู่ที่ 0.5 – 0.8 กรัมต่อนาที โดยหากตั้งค่าปริมาณการพ่นสีสูง จะส่งผลให้เกิดปัญหาความหนาสีเกิน 120 ไมครอน เมื่อนำไปอบตามอุณหภูมิและเวลาที่กำหนด จะส่งผลให้เกิดปัญหาสีแตกได้ แต่หากตั้งค่าปริมาณการพ่นสีต่ำ จะส่งผลให้เกิดปัญหาความหนาสีต่ำกว่า 80 ไมครอน จึงเกิดข้อบกพร่องประเภทสีบางได้

3. ระยะห่างปืน : ระยะห่างปืนคือ ระยะห่างระหว่างปืนกับจุดแขวนชิ้นงาน มีหน่วยวัดเป็นเซนติเมตร โดยมีช่วงควบคุมระยะห่างปืนอยู่ระหว่าง 24 - 25 เซนติเมตร เป็นต้น จุดปรับตั้งระยะห่างปืนจะมีล้อเลื่อนสามารถเลื่อนเข้าหรือเลื่อนออกได้ หากต้องการลดระยะห่างปืนจะต้องเลื่อนปืนเข้าไปใกล้จุดแขวนชิ้นงานให้มากขึ้น หากต้องการเพิ่มระยะห่างปืนจะต้องเลื่อนปืนออกจากจุดแขวนชิ้นงาน โดยตัวอย่างการปรับระยะห่างปืนแสดงดังรูปที่ 6 ซึ่งในการตั้งค่าระยะห่างปืนให้ใกล้กับชิ้นงาน จะส่งผลให้ความหนาสีมากกว่า 120 ไมครอนและเกิดปัญหาสีแตกได้ แต่หากตั้งค่าระยะห่างของปืนไกลจากชิ้นงาน จะส่งผลให้ความหนาสีต่ำกว่า 80 ไมครอน เนื่องจากความพุ่งของสีฝุ่นไม่สามารถยึดเกาะชิ้นงานได้ดี จึงทำให้เกิดปัญหาสีบางได้



รูปที่ 6 ตัวอย่างการปรับระยะห่างปืน

4. อุณหภูมิในการอบ (Temp): อุณหภูมิในการอบคืออุณหภูมิที่ใช้ในการอบสีฝุ่นให้ละลายติดชิ้นงาน โดยมีหน่วยวัดเป็นองศาเซลเซียส (°C) โดยอุณหภูมินี้จะถูกควบคุมด้วยตัวควบคุม การปรับตั้งอุณหภูมิที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับประเภทของสีและประเภทชิ้นงานที่ใช้ในการอบ โดยมีช่วงควบคุมที่ทางผู้ผลิตสีแนะนำอยู่ในช่วงอุณหภูมิ 180 - 200 °C หากตั้งค่าอุณหภูมิในการอบสูงเกินไป จะส่งผลให้เกิดปัญหาสีกรอบจนทำให้สีที่ยึดเกาะผิวชิ้นงานแตกและหลุดออกจากผิวชิ้นงานได้ แต่หากตั้งค่าอุณหภูมิต่ำเกินไปจะส่งผลให้เกิดปัญหาสีไม่ละลายและไม่สามารถยึดเกาะกับชิ้นงานได้ดี

5. เวลาในการอบ (Time) : เวลาในการอบคือ เวลาที่ใช้ในการอบสีฝุ่นให้ละลายติดชิ้นงาน โดยมีหน่วยวัดเวลา

เป็นนาที (min) ระยะเวลาในการอบจะถูกควบคุมด้วยเครื่องจับเวลาที่ผู้ควบคุม โดยมีช่วงควบคุมที่ทางผู้ผลิตแนะนำให้แนะนำอยู่ในช่วงระยะเวลาในการอบประมาณ 50 - 60 นาที การปรับตั้งระยะเวลาในการอบที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับประเภทของสีและประเภทชิ้นงานที่ใช้ในการอบ หากตั้งค่าระยะเวลาในการอบสูงเกินไปจะส่งผลให้เกิดปัญหาสีกรอบจนทำให้สีที่ยึดเกาะผิวชิ้นงานแตกและหลุดออกจากผิวชิ้นงานได้หลังจากการอบเป็นเวลานาน แต่หากตั้งค่าระยะเวลาในการอบต่ำเกินไปจะส่งผลให้เกิดปัญหาสีไม่ละลายและไม่สามารถยึดเกาะชิ้นงานได้ดี

3.4 ผลการปรับปรุงกระบวนการ

จากการศึกษาเบื้องต้นพบว่า ความหนาของกรอบกระจกระหว่างลวดมีค่าแตกต่างกันแต่จะมีค่าใกล้เคียงกันในลวดเดียวกัน ดังนั้นผู้วิจัยจึงกำหนดแนวทางการปรับปรุง โดยการทำการทดลองเพื่อหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของเสียรวมประเภทสีแตกและสีบางและปัจจัยทั้งห้า เมื่อทราบสมการความสัมพันธ์แล้วจะใช้สมการนั้นในการหาค่าของปัจจัยทั้งสี่ ได้แก่ ปริมาณการพ่นสี ระยะห่างปืน อุณหภูมิในการอบ และระยะเวลาในการอบ ที่เหมาะสมกับความหนากรอบกระจกของลวดที่กำลังจะเริ่มทำการผลิต

3.4.1 การออกแบบการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาปัจจัยนำเข้า 5 ปัจจัย ได้แก่ ความหนาของกรอบกระจก ปริมาณการพ่นสี ระยะห่างปืน อุณหภูมิในการอบ ระยะเวลาในการอบ ผู้วิจัยจึงได้เลือกแบบการทดลองพื้นผิวผลตอบแบบส่วนประสมกลางชนิด CCF (Face-Centered Central Composite Design: CCF) เนื่องจากการใช้จำนวนการทดลองที่น้อยกว่าแบบการทดลองพื้นผิวตอบชนิดอื่น โดยใช้ Central Composite Half ที่มีจำนวนการทดลองเพียง 32 การทดลอง ซึ่งน้อยกว่าแบบการทดลองพื้นผิวผลตอบชนิดบ็อกซ์ - เบห์นเคน ที่มีจำนวนการทดลอง 46 การทดลอง เมื่อมีจำนวน 5 ปัจจัย และใช้ชนิด CCF เนื่องจากต้องการทดลองปัจจัยใด ๆ เพียง 3 ระดับ ทำให้สามารถเป็นไปได้ในการจัดเตรียมกรอบกระจกที่ความหนา 3 ระดับให้มีขนาดตัวอย่าง

เพียงพอในแต่ละระดับความหนา ปัจจัยใด ๆ จะถูกทำการทดลองอยู่ที่ 3 ระดับในหน่วยแบบคาร์ทัส ได้แก่ $-\alpha$, 0, α , โดย α มีค่าเท่ากับ 1.000 ซึ่งแสดงหน่วยที่เป็นค่าจริงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ปัจจัยและระดับของปัจจัย

สัญลักษณ์ของปัจจัย	ระดับปัจจัย			หน่วย
	-1	0	+1	
Thickness	25	25.35	25.7	Mm
Feed	0.5	0.65	0.8	g/min
Distance	24	24.5	25	Cm
Temp	180	190	200	°C
Time	50	55	60	Min

3.4.2 การกำหนดขนาดตัวอย่างในการทดลอง

การคำนวณขนาดตัวอย่างจะคำนวณจากค่าสัดส่วนโดยประมาณของเสียที่ระดับต่ำและระดับสูงของแต่ละปัจจัย โดยใช้จากข้อมูลเดิมที่มี และกำหนดกำลังของการทดสอบ (Power of Test) เท่ากับ 0.9 และระดับความเชื่อมั่น 95% โดยผลจากการคำนวณขนาดตัวอย่างของแต่ละปัจจัยใน Program Minitab ได้เลือกใช้ขนาดตัวอย่างที่มากที่สุดในการทำการทดลอง โดยในการทดลองต้องใช้ชิ้นงานอย่างน้อย 6,289 ชิ้นงาน โดยในการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง จะมีการทดลองที่ปัจจัยระดับต่ำ 8 การทดลอง และที่ปัจจัยระดับสูง 8 การทดลอง พบว่าในแต่ละการทดลองต้องใช้ชิ้นงานอย่างน้อย 787 ชิ้นงาน เพราะฉะนั้นผู้ทดลองจึงใช้ชิ้นงานจำนวน 1,000 ชิ้นงานในแต่ละการทดลอง เพื่อให้ได้ตามปริมาณขั้นต่ำของแผนการผลิตปัจจุบันและรอบการพ่นสีฝุ่นของกรอบกระจกโดยไม่กระทบกับเวลาและต้นทุนในการผลิตเพิ่มขึ้นเนื่องจากเป็นแผนการในรอบปกติ

3.4.3 การวิเคราะห์ผลการทดลอง

หลังจากนั้นได้นำเทคนิคการวิเคราะห์การถดถอยแบบลดตัวแปร (Backward Elimination) ในการหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างสัดส่วนของเสียและเทอมที่มี

นัยสำคัญ ซึ่งจากผลการวิเคราะห์โดยใช้การวิเคราะห์การถดถอยดังแสดงในรูปที่ 9 จะเห็นได้ว่ามีเทอมที่มีนัยสำคัญทั้งหมด 11 เทอม ได้แก่ ผลกระทบหลักของความหนา กรอบกระจก ปริมาณการพ่นสี ระยะห่างปืน อุณหภูมิในการอบ เวลาในการอบ และ เทอมกำลังสองของปริมาณการพ่นสี ระยะห่างปืน และอุณหภูมิในการอบ และผลกระทบร่วมระหว่างปริมาณในการพ่นสีและระยะห่างปืน ผลกระทบร่วมระหว่างปริมาณการพ่นสีกับเวลาในการอบ ผลกระทบร่วมระหว่างระยะห่างปืนกับอุณหภูมิในการอบ โดยผลกระทบหลักของปริมาณการพ่นสีและอุณหภูมิค่า P-Value มากกว่า 0.05 เนื่องจากผลกระทบของ 2 ปัจจัยนี้มีน้อยแต่เมื่อมีผลกระทบร่วมกับปัจจัยอื่น ๆ จะส่งผลกระทบต่อการศึกษาการเกิดของเสีย จึงต้องนำมาคำนวณในสมการการถดถอยแบบลดตัวแปร เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์ R-Sqr(adj) มีค่า 88.30 เพอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่ามากกว่า 80 เพอร์เซ็นต์ ดังนั้น สมการถดถอยนี้มีความน่าเชื่อถือที่จะนำไปใช้ในการพยากรณ์ จากนั้นผู้วิจัยได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง โดยใช้สมมติฐานทั้ง 3 ข้อ ได้แก่ ส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ ส่วนตกค้างที่มีความเป็นอิสระ และ ส่วนตกค้างมีความแปรปรวนคงที่ ซึ่งแสดงดังรูปที่ 7 โดยอธิบายได้ว่าในกราฟความน่าจะเป็นแบบการแจกแจงปกติ (Normal Probability Plot) มีการจัดเรียงค่าส่วนตกค้างในรูปแบบเส้นตรง จึงสรุปได้ว่ามีการแจกแจงปกติ ในส่วนของกราฟส่วนตกค้างและลำดับการทดลอง (Versus order) มีความเป็นอิสระต่อกัน มีการกระจายตัวอย่างสุ่ม และไม่ใช่นิพจน์รูปแบบ และสำหรับกราฟส่วนตกค้างและค่าฟิต (Versus Fits) ไม่มีลักษณะการกระจายตัวที่เป็นแนวโน้ม สรุปได้ว่ามีการแปรปรวนคงที่ ดังนั้นแบบจำลองนี้เป็นไปตามสมมติฐานทั้ง 3 ข้อ จึงสรุปได้ว่าแบบจำลองสมการถดถอยนำไปใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างเทอมที่มีนัยสำคัญของปัจจัยที่ทดสอบและตัวแปรตอบสนองได้

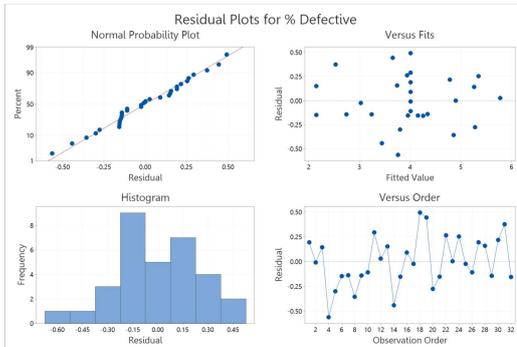
จากการพิจารณากราฟพื้นผิวตอบ (Surface plot) ซึ่งแสดงผลกระทบร่วมระหว่างปริมาณการพ่นสีและระยะห่างปืนแสดงดังรูปที่ 8 จากกราฟจะพบว่า เมื่อ

ระยะห่างปืนมาก ซึ่งอยู่ที่ตำแหน่ง 25 เซนติเมตร เมื่อปริมาณการพ่นสีเพิ่มขึ้นจาก 0.5 กรัมต่อนาที ไปยัง 0.8 กรัมต่อนาที เพอร์เซ็นต์ของเสียไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก และสัดส่วนของเสียอยู่ในระดับต่ำ ในขณะที่เมื่อระยะห่างปืนอยู่ตำแหน่ง 24 เซนติเมตร เมื่อปริมาณการพ่นสีเพิ่มขึ้นจาก 0.5 กรัมต่อนาที ไปยัง 0.8 กรัมต่อนาที เพอร์เซ็นต์ของเสียเพิ่มขึ้นมากและอยู่ในระดับสูง จึงสามารถอธิบายเหตุผลของผลการทดลองนี้ได้ว่า เมื่อระยะห่างปืนใกล้กับชิ้นงานมากส่งผลให้ปริมาณสีฝุ่นที่ระดับการพ่นใด ๆ ไปเกาะชิ้นงานมาก ส่งผลให้ความหนา สีของชิ้นงานมากกว่ามาตรฐานและเกิดของเสียประเภทสีแตกมากขึ้น และเมื่อเพิ่มปริมาณการพ่นสีก็จะเกิดจำนวนเพอร์เซ็นต์ของเสียประเภทสีแตกมากขึ้น ในขณะที่เมื่อระยะห่างปืนห่างกับชิ้นงานจะส่งผลให้เกิดของเสียประเภทสีบางแต่จะมีจำนวนไม่มาก

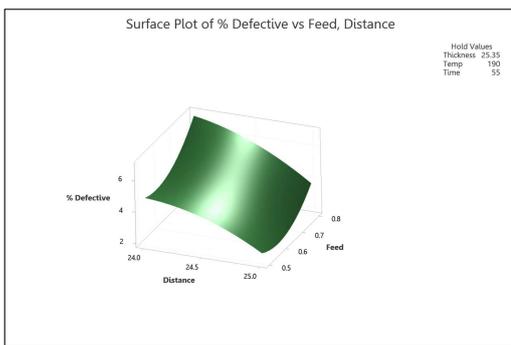
ผลกระทบร่วมระหว่างระยะห่างปืนและอุณหภูมิแสดงดังรูปที่ 10 จากกราฟจะพบว่า ที่อุณหภูมิในการอบต่ำไม่ว่าจะใช้ระยะห่างปืนเท่าใด ในช่วง 24 – 25 เซนติเมตร เพอร์เซ็นต์ของเสียจะต่ำและไม่แตกต่างกันมากนัก แต่เมื่อที่อุณหภูมิในการอบสูงเมื่อระยะห่างปืนใกล้ชิ้น เพอร์เซ็นต์ของเสียซึ่งเกิดจากข้อบกพร่องประเภทสีแตกจะเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากเมื่อปรับระยะห่างปืนใกล้กับชิ้นงานส่งผลให้ความหนาสีมาก และเมื่อทำการอบที่อุณหภูมิสูง ยิ่งจะส่งผลร่วมให้เกิดของเสียประเภทสีแตกมากขึ้น

ผลกระทบร่วมระหว่างเวลาในการอบและปริมาณการพ่นสีแสดงดังรูปที่ 11 จากกราฟพบว่า ที่ปริมาณการพ่นสีสูงไม่ว่าจะใช้เวลาในการอบเท่าใด เพอร์เซ็นต์ของเสียจะสูงแต่ไม่แตกต่างกันมากนัก ในขณะที่ปริมาณการพ่นสีต่ำเมื่อใช้เวลาในการอบน้อย จะเกิดเพอร์เซ็นต์ของเสียน้อย แต่เมื่อใช้เวลาในการอบเพิ่มขึ้น เพอร์เซ็นต์ของเสียจะเพิ่มขึ้นมาก เนื่องจากที่ปริมาณการพ่นสีต่ำและเวลาที่ต่ำจะมีเกิดของเสียประเภทสีบางเล็กน้อย แต่เมื่อใช้เวลานานในการอบจะส่งผลให้สีฝุ่นที่ยึดเกาะชิ้นงานแตกหลุดร่อนออกมาได้ ดังนั้นเมื่อที่เวลาในการอบสูงจะมีของเสียประเภทสีแตกเพิ่มขึ้นมาก ส่วนที่ปริมาณการพ่นสีสูง ทำ

ให้ความหนาสม่ำเสมอ ดังนั้นไม่ใช้เวลาในการอบเท่าใด
เปอร์เซ็นต์ของเสียจากสีแตกก็จะมาก



รูปที่ 7 การวิเคราะห์ค่าส่วนตกค้าง



รูปที่ 8 ผลกระทบร่วมระหว่างปริมาณการพ่นสีและ
ระยะห่าง

3.4.4 การหาระดับที่เหมาะสมของปัจจัย

หลังจากได้ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้ากับ
เปอร์เซ็นต์สัดส่วนของเสีย ซึ่งแสดงด้วยสมการถดถอย
จากนั้นได้นำมาหาค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยด้วย
Response Optimization โดยผู้วิจัยได้ทดลองยืนยันผล
โดยการทดสอบกับกรอบกระจกที่มีความหนาต่าง ๆ กัน 5
ลวดความหนาดังนี้ 25, 25.2, 25.3, 25.5 และ 25.7
มิลลิเมตร ในแต่ละลวด ผู้วิจัยได้ใช้โปรแกรม Response
Optimization ในการหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยทั้งสิ้นที่
รองรับกับความหนากรอบกระจกที่ค่าต่างๆ พบว่าที่ความ

หนากรอบกระจกค่าใด ๆ จะเกิดสัดส่วนของเสียน้อยสุด
เมื่อตั้งค่าปริมาณการพ่นสี 0.58 กรัมต่อนาที ระยะห่าง
ปืน 25 เซนติเมตร อุณหภูมิในการอบ 188 องศาเซลเซียส
และเวลาในการอบ 50 นาที ดังแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสม

Thickness (mm)	Feed (g/min)	Distance (cm)	Temp (°C)	Time (min)
25	0.58	25	188	50
25.2	0.58	25	188	50
25.3	0.58	25	188	50
25.5	0.58	25	188	50
25.7	0.58	25	188	50

3.5 ผลการควบคุมกระบวนการ

ผู้วิจัยได้ปรับตั้งค่าปัจจัยตามค่าที่เหมาะสมที่ได้จากกระบวนการ
การปรับปรุงกระบวนการ และเก็บข้อมูลการผลิต 5 ลวด
ที่มีความหนาที่แตกต่างกันดังนี้ 25, 25.2, 25.3, 25.5 และ
25.7 มิลลิเมตรเพื่อให้ครอบคลุมช่วงความหนาของกระจก
ที่ได้รับจากผู้ส่งมอบในแต่ละลวด ซึ่งมีปริมาณการผลิต
รวม 6,550 ชิ้น โดยใช้ขนาดตัวอย่างลวดละ 1,310 ชิ้น
ตามการคำนวณขนาดตัวอย่างทางสถิติ เพื่อยืนยันผลการ
ปรับปรุงที่ได้ พบว่าเปอร์เซ็นต์ของเสียประเภทสีแตกและ
สีบางในแต่ละกลุ่มความหนา ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 เปอร์เซ็นต์ของเสียหลังปรับปรุง

กลุ่ม ตัวอย่าง	ขนาด ตัวอย่าง	เปอร์เซ็นต์ ของเสียสีแตก	เปอร์เซ็นต์ ของเสียสีบาง
1	1,310	0%	1.60%
2	1,310	1.16%	0%
3	1,310	1.30%	0%
4	1,310	0.69%	0%
5	1,310	0.92%	0%

ตารางที่ 7 ผลการทดลอง

StdOrder	RunOrder	Thickness	Feed	Distance	Temp	Time	เปอร์เซ็นต์ ของเสียสีแตก	เปอร์เซ็นต์ ของเสียสีบาง	เปอร์เซ็นต์ ของเสียรวม
1	19	25.00	0.5	24	180	60	0	4.1	4.1
2	9	25.70	0.5	24	180	50	3.1	0	3.1
3	24	25.00	0.8	24	180	50	5.6	0	5.6
4	21	25.70	0.5	24	180	60	4	0	4
5	31	25.00	0.5	25	180	50	0	2.9	2.9
6	12	25.70	0.8	24	180	60	5.8	0	5.8
7	20	25.00	0.8	24	180	60	5	0	5
8	8	25.70	0.8	25	180	50	4.5	0	4.5
9	29	25.00	0.5	24	180	50	0	2.6	2.6
10	22	25.70	0.5	25	180	60	0	4.2	4.2
11	14	25.00	0.5	25	180	60	3	0	3
12	17	25.70	0.5	25	180	50	3	0	3
13	7	25.00	0.5	25	200	60	0	4.2	4.2
14	25	25.70	0.5	25	180	50	3	0	3
15	3	25.00	0.8	25	200	50	5.4	0	5.4
16	30	25.70	0.8	25	180	60	5	0	5
17	4	25.00	0.65	24.5	190	55	0	3.2	3.2
18	32	25.70	0.65	24.5	190	55	4.1	0	4.1
19	10	25.35	0.65	24.5	190	55	0	3.9	3.9
20	16	25.35	0.65	24.5	190	55	4.1	0	4.1
21	23	25.35	0.65	24	190	55	4.9	0	4.9
22	6	25.35	0.65	25	190	55	2	0	2
23	28	25.35	0.65	24.5	180	55	3.9	0	3.9
24	13	25.35	0.65	25	190	55	2.3	0	2.3
25	5	25.35	0.65	24.5	190	50	3.5	0	3.5
26	15	25.35	0.65	24.5	180	60	3.8	0	3.8
27	26	25.35	0.65	24.5	190	55	3.9	0	3.9
28	18	25.35	0.65	24.5	190	55	4.5	0	4.5
29	2	25.35	0.65	24.5	190	55	4	0	4
30	27	25.35	0.65	24.5	190	55	4.2	0	4.2
31	1	25.35	0.65	24.5	190	55	4.2	0	4.2
32	11	25.35	0.65	24.5	190	55	4.3	0	4.3

จากนั้นได้จัดทำแผนควบคุมและเอกสารขั้นตอนปฏิบัติงานใหม่ เพื่อกำหนดมาตรฐานในการทำงานที่ได้จากการทดลองในระยะปรับปรุงกระบวนการ พบว่า จากข้อมูลสัดส่วนของเสียในเดือนพฤษภาคม 2564 - เมษายน 2565 มีสัดส่วนของเสียประเภทสีแตกและสีบางรวม 8 เปอร์เซ็นต์ จากจำนวนของเสีย 14,546 ชิ้น ในปริมาณการ

ผลิต 176,236 ชิ้น ได้มีสัดส่วนของเสียลดเป็น 1.13 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณการผลิตจากจำนวนการทดลอง 6,550 ชิ้น พบว่ามีจำนวนของเสีย 74 ชิ้น ซึ่งจะสามารถลดค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากข้อบกพร่องประเภทสีแตกและสีบางได้ 6,877,484 บาทต่อปริมาณการผลิตที่พยากรณ์ในปี 2566

Response Surface Regression: % Defective versus Thickness, Feed, Distance, Temp, Time

α to remove = 0.05

Coded Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-1727	520	-3.32	0.003	
Thickness	0.710	0.247	2.87	0.009	1.37
Feed	32.4	37.2	0.87	0.395	4912.87
Distance	134.8	40.6	3.32	0.003	78518.53
Temp	0.63	1.14	0.55	0.586	15773.19
Time	0.2557	0.0753	3.39	0.003	25.94
Feed*Feed	42.0	14.4	2.91	0.009	1218.89
Distance*Distance	-1.940	0.857	-2.26	0.035	83972.53
Temp*Temp	0.01258	0.00339	3.71	0.001	19519.38
Feed*Distance	-2.58	1.17	-2.19	0.040	2915.23
Feed*Time	-0.329	0.121	-2.72	0.013	183.54
Distance*Temp	-0.2147	0.0429	-5.00	0.000	19291.84

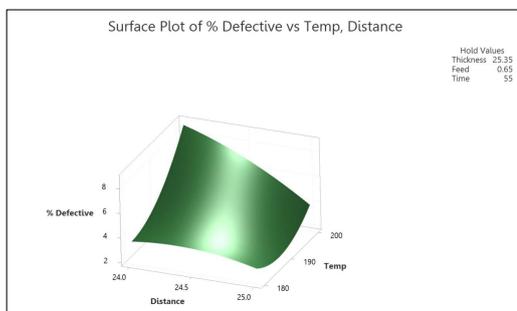
Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.313773	92.45%	88.30%	75.35%

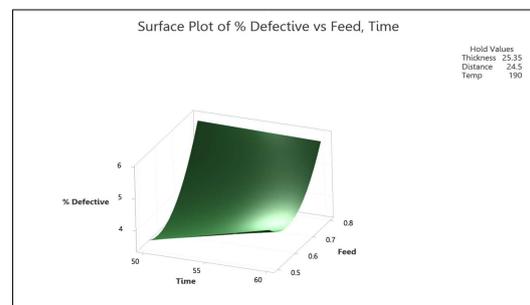
Regression Equation in Uncoded Units

%Defective = - 1727 + 0.710 Thickness + 32.4 Feed + 134.8 Distance + 0.63 Temp + 0.2557 Time + 42.0 Feed*Feed - 1.940 Distance*Distance + 0.01258 Temp*Temp - 2.58 Feed*Distance - 0.329 Feed*Time - 0.2147 Distance*Temp

รูปที่ 9 ผลการวิเคราะห์การถดถอยแบบลดตัวแปร



รูปที่ 10 ผลกระทบร่วมระหว่างระยะห่างปืนและอุณหภูมิ



รูปที่ 11 ผลกระทบร่วมระหว่างเวลาในการอบและปริมาณการพ่นสี

4. สรุปผล

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงกระบวนการพ่นสีฝุ่นบนกรอบกระจกของหลังคารถกระบะเนกประสงค์ เพื่อลดข้อบกพร่องประเภทสีแตกและสีบางที่เกิดขึ้นในกระบวนการพ่นสีฝุ่น โดยผู้วิจัยได้นำแนวคิดซิกซ์ ซิกมาเข้ามาประยุกต์ใช้ เพื่อหาสาเหตุและปัจจัยที่มีผลต่อการเกิดของเสียภายในกระบวนการ จากนั้นได้ทำการออกแบบการทดลองเพื่อหาสมการความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยและสัดส่วนของเสียและหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสม พร้อมทั้งจัดทำแผนควบคุม และเอกสารขั้นตอนการปฏิบัติงานใหม่ เพื่อกำหนดมาตรฐานใหม่ในการทำงาน หลังจากปรับปรุงกระบวนการทำงาน พบว่าสามารถลดสัดส่วนของเสียลงจาก 8 เปอร์เซ็นต์ เป็น 1.13 เปอร์เซ็นต์ของปริมาณการผลิต

5. ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ได้แนะนำวิธีการทางสถิติ ตามแนวทางซิกซ์ ซิกมา เข้ามาประยุกต์ ซึ่งสามารถนำไปใช้ในการปรับปรุงกระบวนการพ่นสีฝุ่นของชิ้นงานเหล็กอื่น ๆ ที่มีความหนาของชิ้นงานในแต่ละล็อตการผลิตที่แตกต่างกัน และต้องตั้งค่าปัจจัย ได้แก่ ปริมาณในการพ่นสี ระยะห่างปืน อุณหภูมิ และเวลาในการพ่นสีที่เหมาะสม โดยจะต้องคำนึงถึงข้อกำหนดเฉพาะที่แตกต่างกันของแต่ละชิ้นงานที่จะทำการปรับปรุงด้วย

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] W. Saleesing, *Process Revolution by Six Sigma techniques of Champion and Black Belt*. Bangkok: Sirivatana Interprint, 2005.
- [2] N. Thawesaengskulthai, *Quality Engineering and management: Guide to Continual Improvement and Innovation Creation*. Bangkok: Chulalongkorn University Press, 2019.

- [3] A. Hongsapan, "Defect Reduction in Painting Process of Car-bodywork By Six Sigma Approach," M.S. thesis, Department of industrial Engineering, Faculty of Engineering, Culalongkorn University, 2010.
- [4] K. Ploypanichcharoen. *Measurement System Analysis (MSA) by Minitab 15 (Revised edition)*. Bangkok: Technology Promotion Association (Thailand-Japan), 2006.
- [5] N. Osothsilp. *Quality Improvement Handbook*. Department of industrial Engineering, Faculty of Engineering, Culalongkorn University, 2020.
- [6] D. C. Montgomery, *Design and analysis of experiments*. 10th ed. New Jersey: John Wiley & Sons, 2019.
- [7] K. Srinivasan, S. Muthu, N. K. Prasad, and G. Satheesh, "Reduction of Paint line Defects in Shock Absorber Through Six Sigma DMAIC Phases," *Procedia Engineering*, vol. 97, pp. 1755-1764, 2014.

การลดสัดส่วนของเสียจากการปนเปื้อนสิ่งแปลกปลอมในกระบวนการผลิตปลั๊กตัวเมีย Defective Rate Reduction from Foreign Matter Contamination in Female Connector Plug Manufacturing Process

อรรถพล งามสำโรง* และ นภัสสวงศ์ โอสถศิลป์

Atthaphon Ngamsamrong * and Napassavong Osothsilp

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ถนนพญาไท เขตปทุมวัน แขวงวังใหม่ กรุงเทพมหานคร 10330

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,

Chulalongkorn University, Phayathai Road, Patumwan, Bangkok, Thailand 10330

*Corresponding author Email: *E-mail: 6370328921@student.chula.ac.th

(Received: November 16, 2022; Revised: May 9, 2023; Accepted: May 18, 2023)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องประเภทการปนเปื้อนสิ่งแปลกปลอมในผลิตภัณฑ์ปลั๊กตัวเมีย โดยประยุกต์ใช้แนวทางของ ชิกซ์ ซิกมา (DMAIC) ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินงานทั้งหมด 5 ระยะ เริ่มตั้งแต่ระยะการนิยามปัญหาซึ่งได้เลือกศึกษากระบวนการฉีดพลาสติกของผลิตภัณฑ์รุ่น 6P ต่อมาในระยะการวัดสภาพปัญหาได้คำนวณขนาดตัวอย่างที่เหมาะสมในการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์ความแปรปรวนและความเที่ยงของระบบตรวจสอบ จากนั้นเป็นระยะการวิเคราะห์หาสาเหตุปัญหา ซึ่งพบว่ามียังปัจจัยที่มีนัยสำคัญต่อสัดส่วนของเสีย 5 ปัจจัย จากนั้นจึงเข้าสู่ระยะการปรับปรุงกระบวนการ ได้ทำการปรับปรุงปัจจัยนำเข้าที่ไม่สามารถปรับตั้งค่าได้ 2 ปัจจัย โดยจัดทำแผ่นรองกันเศษฝุ่นใหม่ให้มิดชิดกว่าเดิมและกำหนดความถี่ในการทำความสะอาดเป็น 1 ครั้งต่อกะ และทำการทดลองด้วยแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง (Central Composite Design) สำหรับ 3 ปัจจัยที่สามารถปรับตั้งค่าได้ที่เหลือและหาค่าระดับที่เหมาะสม ซึ่งผลที่ได้ คือ ความเร็วในการเปิดแม่พิมพ์ 30 มิลลิเมตรต่อวินาที ระยะเวลาหน่วงชิ้นงาน 1 วินาที และแรงดันในการผลักกันเนอร์ 15 บาร์ และในระยะสุดท้ายคือการควบคุมกระบวนการ ได้ทำการแก้ไขเอกสารขั้นตอนการปฏิบัติงานและแผนควบคุม ซึ่งหลังจากการติดตามผลการปรับปรุงกระบวนการ พบว่าสามารถลดสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องประเภทการปนเปื้อนสิ่งแปลกปลอมในผลิตภัณฑ์ปลั๊กตัวเมียรุ่น 6P ลงจาก 2.36% เป็น 0.78% ซึ่งลดลงไปได้ 1.58% และนอกจากนี้สามารถลดต้นทุนของเสียลงจาก 5,499,036 บาท เหลือเพียง 1,826,099 บาท ซึ่งลดลงไปได้ถึง 3,672,937 บาทต่อปี

คำสำคัญ: การลดสัดส่วนของเสีย ชิกซ์ ซิกมา วิธีการพื้นผิวตอบ กระบวนการฉีดพลาสติก การปนเปื้อนสิ่งแปลกปลอม

ABSTRACT

The objective of this research is to reduce defective rate from foreign matter contamination defect of Female Connector by applying the approach of Six Sigma (DMAIC) , which consists of 5 phases; starting from the Define phase, in which the injection molding process of 6P model was studied.

Secondly, in the Measure phase, the required sample size was calculated, and the Attribute Agreement Analysis was performed. Then, in the Analyze Phase, it was found that there were 5 significant factors related to the defective rate. In the Improvement phase, two non-adjustable factors have been improved by creating a new particle cover to be more closely and set the cleaning frequency to 1 time per shift. The central composite design was performed for the remaining 3 adjustable factors and determined the optimum levels. The optimum values are the mold opening speed of 30 millimeters per second, delay time of 1 second and runner pushing pressure of 15 bar. Finally, work instructions and control plan have been revised in the Control phase. Which after tracking process improvement results, it was found that the defective rate from contamination defects of 6P female connector plug was reduced from 2.36% to 0.78%, which was reduced by 1.58%. In additional, the defective cost was reduced from 5,499,036 baht to 1,826,099 baht, which equivalent to a cost a saving of 3,672,937 baht per year.

Keyword: Defective Rate Reduction; Six Sigma (DMAIC); Response Surface Methodology (RSM); Plastic Injection, Foreign Matter Contamination.

1. บทนำ

โรงงานกรณีศึกษาประกอบกิจการการผลิตชิ้นส่วนปลั๊กตัวเมียสำหรับการเชื่อมต่อชิ้นส่วนสำคัญต่างๆ ภายในรถยนต์ โดยมีกระบวนการฉีดพลาสติกเป็นกระบวนการขั้นต้นในการผลิตเพื่อขึ้นรูปชิ้นส่วนก่อนที่จะนำไปประกอบเป็นผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป โดยสิ่งที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ในกระบวนการฉีดพลาสติกนั้นคือ ข้อบกพร่องกับผลิตภัณฑ์ที่เกิดขึ้น ซึ่งสาเหตุในการเกิดข้อบกพร่องนั้นก็มาจากหลายปัจจัย เช่น พารามิเตอร์ของเครื่องจักรที่ใช้ในการฉีดไม่เหมาะสม ขั้นตอนการทำงานที่ไม่เหมาะสม หรือแม้แต่การปฏิบัติงานที่ไม่ถูกต้องตามขั้นตอนปฏิบัติงาน เป็นต้น [1] - [4]

จากการทบทวนงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่ได้ทำการศึกษาและปรับปรุงเพื่อลดของเสียในกระบวนการฉีดพลาสติกพบว่าการนำแนวคิดทาง ชิکش ชิกมา มาประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลาย โดยวรภรณ์ (2551) ได้ประยุกต์แนวทางชิکش ชิกมา เพื่อลดต้นทุนของเสียรวมที่เกิดจากข้อบกพร่องชนิดครีบและข้อบกพร่องชนิดฉีดไม่เต็ม ซึ่งสามารถลดต้นทุนของเสียรวมจากข้อบกพร่อง

ชนิดครีบ และข้อบกพร่องชนิดฉีดไม่เต็มแม่พิมพ์ จากเดิม 0.3194 บาท/ชิ้น เหลือ 0.0293 บาท/ชิ้น [5] Rattanabunditsakun (2554) ได้ปรับปรุงกระบวนการเพื่อลดสัดส่วนของเสียชนิดจุดดำที่เกิดในกระบวนการฉีดพลาสติกพบว่าสามารถลดสัดส่วนของเสียชนิดจุดดำที่เกิดในกระบวนการฉีดพลาสติกขึ้นรูปที่เครื่องฉีดพลาสติกเบอร์ P24 และ P25 ลงมารวมกันจาก 0.65% ลงมาที่ 0.34% หรือ ลดลงถึง 47.69% [6] Maged (2562) ได้ดำเนินการตามแนวทาง ชิکش ชิกมา เพื่อปรับปรุงปัญหาการหดตัวในกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติกของใบพัดลม ซึ่งทำให้ระดับคุณภาพของผลิตภัณฑ์ขั้นสุดท้ายดีขึ้น โดยเพิ่มขึ้นจาก 4.06 เป็น 4.5 [7] Alshammari และคณะ (2561) ได้ใช้ชิกัน และ ชิکش ชิกมา เพื่อลดความผันแปรในกระบวนการฉีดขึ้นรูปพลาสติก โดยหลังปรับปรุงพบว่ามีจำนวนข้อบกพร่องต่อล้านโอกาส (Defects Per Million Opportunities หรือ DPMO) ลดลงจาก 516,500 เป็น 190,000 ซึ่งนำไปสู่การลดลงของต้นทุนการผลิตได้อย่างมีนัยสำคัญ [8] Rattanuengyot (2554) ได้ใช้หลักการของชิکش ชิกมา

เพื่อศึกษาและลดของเสียโดยรวมที่เกิดขึ้นในกระบวนการฉีดท่อพลาสติก โดยสามารถลดของเสียที่จาก 8.8% เหลือ 5.25% ซึ่งได้ลดของเสียไป 3.55% [9] และชนิกันต์ (2563) ได้ประยุกต์ใช้หลักการของซิกซ์ ซิกมา และการออกแบบการทดลองแบบพื้นผิวผลตอบ เพื่อลดสัดส่วนของเสียประเภทสีแตกในกระบวนการพ่นสีขึ้นส่วนรถจักรยานยนต์ โดยสามารถลดสัดส่วนของเสียประเภทสีแตกจาก 3.82% เหลือ 0.98% [10]

งานวิจัยนี้ จึงมีแนวคิดที่จะลดของเสียในกระบวนการผลิตที่มีสาเหตุมาจากกระบวนการฉีดพลาสติก เพื่อช่วยลดต้นทุนให้กับบริษัท อีกทั้งยังช่วยลดโอกาสที่ของเสียจะหลุดไปถึงมือลูกค้าอีกด้วย โดยผู้วิจัยได้นำแนวทางของ ซิกซ์ ซิกมา มาประยุกต์ใช้ เนื่องจากเป็นวิธีที่ถูกนำไปประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายสำหรับการปรับปรุงกระบวนการเพราะมีขั้นตอนการดำเนินงานที่เป็นลำดับขั้นและครอบคลุม โดยจะมีการใช้ข้อเท็จจริงเน้นการทำความเข้าใจกระบวนการที่เป็นอยู่ การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ และรวมถึงการควบคุมกระบวนการหลังการปรับปรุงอีกด้วย ทั้งนี้มีเป้าหมายเพื่อที่จะลดสัดส่วนของเสียที่เกิดขึ้นซึ่งจะส่งผลให้บริษัทมีต้นทุนในการผลิตที่ต่ำลงได้ [10] - [11]

2. วิธีการดำเนินงาน

ขั้นตอนในการดำเนินงานในงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย 5 ขั้นตอน ดังนี้

2.1 การวิเคราะห์ข้อมูลเบื้องต้นและกำหนดหัวข้อการปรับปรุง

ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลปริมาณการผลิตและปริมาณของเสียที่พบในเดือนมกราคม - พฤศจิกายนปี พ.ศ. 2564 ด้วยแผนผังพาเรโต (Pareto chart) เพื่อทำการเลือกข้อบกพร่องมาทำการปรับปรุง โดยใช้กฎพาเรโต 80 : 20 เป็นเกณฑ์ในการเลือก [12]

2.2 การวิเคราะห์ระบบการตรวจสอบข้อบกพร่อง

ผลที่ได้จากการตรวจสอบคุณภาพของโรงงานกรณีศึกษานั้นมี 2 ลักษณะ ได้แก่ ผ่าน (Good : G) และ

ไม่ผ่าน (No Good : NG) ซึ่งเป็นข้อมูลประเภทการนับหรือข้อมูลที่มีการประเมินแบบคุณลักษณะ (Attribute data) จึงทำการวิเคราะห์ระบบการวัดแบบข้อมูลตามลักษณะ [10], [13] - [15] โดยมีขั้นตอนการวิเคราะห์คือ สุ่มเรียกพนักงานตรวจสอบคุณภาพทั้งหมด 3 คน เพื่อตรวจสอบคุณภาพตัวอย่างปลั๊กตัวเมียรุ่น 6P ที่เตรียมไว้จำนวน 30 ชิ้น ซึ่งจากเกณฑ์ของ Fasser and Brettne สำหรับพนักงานตรวจสอบ 3 คนขึ้นไป จะต้องใช้ตัวอย่างในการทดสอบอย่างน้อย 12 ชิ้น [16] ซึ่งในงานวิจัยนี้เลือกใช้ตัวอย่างจำนวน 30 ชิ้น จึงเป็นจำนวนที่เพียงพอเนื่องจากมากกว่าจำนวนขั้นต่ำ ทำการตรวจสอบซ้ำ 3 ครั้ง โดยให้พนักงานทั้ง 3 คนตรวจสอบครั้งที่ 1 ให้ครบทุกคน จากนั้นจึงตรวจสอบเป็นครั้งที่ 2 และครั้งที่ 3 ตามลำดับ และในฤการตรวจสอบแต่ละครั้งให้ลำดับตัวอย่างชิ้นงานในการตรวจสอบแบบสุ่ม ทำการบันทึกผลการตรวจสอบทั้ง 3 ครั้ง และนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ความแม่นยำและความเที่ยงของระบบการวัดด้วยเทคนิค Attribute Agreement Analysis [10]

2.3 การวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา

ในขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนการรวบรวมความคิดจากคณะทำงานทั้งหมด เพื่อหาปัจจัยนำเข้าที่คาดว่าจะส่งผลต่อข้อบกพร่องประเภทการปนเปื้อนของสิ่งแปลกปลอมในผลิตภัณฑ์รุ่น 6P ซึ่งประกอบไปด้วยการระดมความคิดเพื่อหาสาเหตุที่เป็นไปได้ โดยใช้แผนภาพสาเหตุและผล (Cause and effect diagram) และการคัดกรองและจัดลำดับความสำคัญของสาเหตุที่เป็นไปได้ เพื่อทำการเลือกปัจจัยนำเข้าที่มีความเกี่ยวข้องกับข้อบกพร่องมากที่สุดไปศึกษาต่อไป [10]

2.4 การปรับปรุงกระบวนการ

ในขั้นตอนนี้จะทำการทดลองโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลอง (Design of Experiment) และการทดสอบสมมติฐาน เพื่อพิสูจน์ความมีนัยสำคัญและหาค่าระดับที่เหมาะสมของปัจจัยนำเข้าที่ส่งผลให้เกิดสัดส่วนของเสีย น้อยที่สุด ด้วยฟังก์ชัน Response Optimizer จากโปรแกรม Minitab [10]

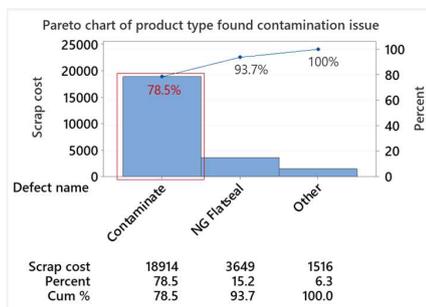
2.5 การควบคุมกระบวนการ

ในขั้นตอนนี้จะทำการทดสอบเพื่อยืนยันผลที่ได้จากระยะการปรับปรุงกระบวนการ โดยทำการปรับตั้งค่าปัจจัยตามค่าระดับที่เหมาะสมที่ได้และทำการเก็บข้อมูลของเสียที่พบ จากนั้นจึงทำการแก้ไขเอกสารขั้นตอนการปฏิบัติงานและแผนควบคุมเพื่อให้มั่นใจว่าผลการปรับปรุงที่ได้ได้รับการปฏิบัติตามอย่างเหมาะสม

3. ผลการทดลอง

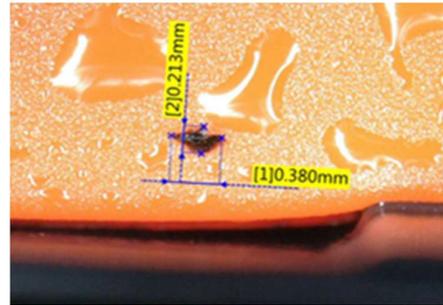
3.1 ผลการกำหนดปัญหา

เมื่อได้ศึกษาประเภทของปัญหาที่พบในผลิตภัณฑ์ปลีกล้วย 6P แสดงดังแผนผังพาเรโต ดังรูปที่ 1 พบว่าของเสียจากข้อบกพร่องประเภทการปนเปื้อนของสิ่งแปลกปลอมนั้นมีจำนวนของเสียสูงที่สุดเป็นอันดับหนึ่ง โดยมีสัดส่วนเท่ากับ 78.5% ของจำนวนของเสียทั้งหมด ซึ่งเป็นสัดส่วนที่ใกล้เคียงกับกฎพาเรโต 80 : 20 นอกจากนี้ยังพบว่าข้อบกพร่องประเภทการปนเปื้อนสิ่งแปลกปลอมเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องในทุกเดือนโดยมีสัดส่วนของเสียเฉลี่ยจากข้อบกพร่องนี้เท่ากับ 2.36% ของปริมาณการผลิตในเดือนมกราคม - พฤศจิกายน 2564 ซึ่งส่งผลทำให้มีต้นทุนจากของเสียดังกล่าวสูงถึง 163,154 บาท จากข้อมูลข้างต้นผู้วิจัยจึงเลือกทำการศึกษาและปรับปรุงของเสียจากข้อบกพร่องประเภทการปนเปื้อนสิ่งแปลกปลอมในผลิตภัณฑ์ปลีกล้วย 6P



รูปที่ 1 แผนผังพาเรโตจำนวนของเสีย

ลักษณะของข้อบกพร่องที่พบคือ จะมีสิ่งแปลกปลอมสีดำติดอยู่ที่ซีสของปลีกล้วยดิบแสดงในรูปที่ 2 ขนาดและตำแหน่งของสิ่งแปลกปลอมที่พบในข้อบกพร่องแต่ละชิ้นจะแตกต่างกันออกไป ซึ่งมีขนาดตั้งแต่ 0.1 มิลลิเมตร ถึง 2 มิลลิเมตร โดยสิ่งแปลกปลอมที่พบจะส่งผลทำให้เกิดการสูญเสียฟังก์ชันการป้องกันการรั่วซึมของปลีกล้วยดิบ



รูปที่ 2 ลักษณะของข้อบกพร่องประเภทการปนเปื้อนสิ่งแปลกปลอมในผลิตภัณฑ์ปลีกล้วย 6P

3.2 ผลการวิเคราะห์ระบบการตรวจสอบข้อบกพร่อง

หลังจากพนักงานทั้ง 3 คน ได้ทำการตรวจสอบครบทั้ง 3 ครั้ง จึงนำข้อมูลที่ได้อาวิเคราะห์ความแม่นยำ (Accuracy) และความเที่ยง (Precision) ของระบบการวัดของพนักงานตรวจสอบคุณภาพ ด้วยการแทนค่าผลที่ได้ในสมการที่ (1) - (4) ซึ่งมีวิธีการคำนวณดังนี้

1. ความสามารถในการวัดซ้ำของพนักงานตรวจสอบแต่ละคน (%Appraiser Score)

$$\%Appraiser\ Score = \frac{\text{จำนวนชิ้นงานที่ตรวจสอบซ้ำแล้วได้ผลเหมือนกัน}}{\text{จำนวนชิ้นงานทั้งหมดที่ตรวจสอบ}} \quad (1)$$

$\%Appraiser\ Score\ Operator\ 1 = 30/30 = 1 = 100\%$

$\%Appraiser\ Score\ Operator\ 2 = 30/30 = 1 = 100\%$

$\%Appraiser\ Score\ Operator\ 3 = 30/30 = 1 = 100\%$

2. ความไม่ไว้อัสของพนักงานตรวจสอบแต่ละคน (% Attribute Score)

$$\% \text{Attribute Score} = \frac{\text{จำนวนชิ้นงานที่ผลการตรวจสอบเหมือนกันและถูกต้อง}}{\text{จำนวนชิ้นงานทั้งหมดที่ตรวจสอบ}} \quad (2)$$

$$\% \text{Attribute Score Operator 1} = 30/30 = 1 = 100\%$$

$$\% \text{Attribute Score Operator 2} = 30/30 = 1 = 100\%$$

$$\% \text{Attribute Score Operator 3} = 30/30 = 1 = 100\%$$

3. การวิเคราะห์ความฟุ้งกันของค่าวัดระหว่างพนักงาน (%Reproducibility)

$$\% \text{Reproducibility} = \frac{\text{จำนวนชิ้นงานที่พนักงานทุกคนตรวจสอบได้ผลเหมือนกัน}}{\text{จำนวนชิ้นงานทั้งหมดที่ตรวจสอบ}} \quad (3)$$

$$\% \text{Reproducibility} = 30/30 = 1 = 100\%$$

4. การวิเคราะห์ความฟุ้งกันและถูกต้องของค่าวัดระหว่างพนักงาน (%Accuracy)

$$\% \text{Accuracy} = \frac{\text{จำนวนชิ้นงานที่พนักงานทุกคนตรวจสอบได้ผลเหมือนกันและถูกต้อง}}{\text{จำนวนชิ้นงานทั้งหมดที่ตรวจสอบ}} \quad (4)$$

$$\% \text{Accuracy} = 30/30 = 1 = 100\%$$

จากผลการวิเคราะห์ระบบการตรวจสอบข้อบกพร่องข้างต้นซึ่งแสดงดังตารางที่ 1 พบว่าพนักงานตรวจสอบทั้ง 3 คน มีความสามารถในการตรวจสอบข้อบกพร่องประเภทการปนเปื้อนของสิ่งแปลกปลอมในผลิตภัณฑ์รุ่น 6P แสดงว่าระบบการวัดมีความน่าเชื่อถือจึงสามารถสรุปได้ว่าปัจจัยที่เกิดจากการวัดไม่มีอิทธิพลต่อสัดส่วนของเสียของข้อบกพร่องประเภทการปนเปื้อนสิ่งแปลกปลอมในผลิตภัณฑ์รุ่น 6P นั่นคือมีความแม่นยำและความเที่ยงในระดับที่ให้ผลการตรวจสอบที่เชื่อถือได้ [10]

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์ระบบการวัด

ดัชนีชี้วัด	พนักงานคนที่ 1	พนักงานคนที่ 2	พนักงานคนที่ 3
%Appraiser Score	100%	100%	100%
%Attribute Score	100%	100%	100%
%Reproducibility	100%		
%Accuracy)	100%		

3.3 ผลการวิเคราะห์สาเหตุของปัญหา

จากการระดมความคิดเพื่อหาสาเหตุที่เป็นไปได้โดยใช้แผนภาพสาเหตุและผล ดังรูปที่ 3 พบว่ามีปัจจัยที่ส่งผลต่อข้อบกพร่องประเภทการปนเปื้อนสิ่งแปลกปลอมในผลิตภัณฑ์รุ่น 6P ทั้งหมด 12 ปัจจัย จากนั้นจึงคัดกรองและจัดลำดับความสำคัญของสาเหตุที่เป็นไปได้โดยคณะทำงานทำการให้คะแนนความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผล เกณฑ์ในการให้คะแนนแสดงดังตารางที่ 2 ซึ่งพบว่าปัจจัยที่ได้รับคะแนนระดับความสัมพันธ์มาก (9 คะแนน) ทั้งหมด 5 ปัจจัย ดังตารางที่ 3 ผู้วิจัยจึงเลือกปัจจัยดังกล่าวเพื่อไปศึกษาต่อเพื่อทดสอบความมีนัยสำคัญของปัจจัยและหาสาเหตุที่เหมาะสมที่ของปัจจัยเหล่านั้นในลำดับต่อไป ซึ่งสามารถอธิบายถึงความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผลจากการทดลองจริงในอดีตของโรงงานกรณีศึกษาได้ดังนี้

1. แรงดันปลั๊กรันเนอร์ไม่เหมาะสม การปลั๊กรันเนอร์ออกจากแม่พิมพ์จะถูกควบคุมโดยแรงดัน หากแรงดันมากพอก็จะทำให้มีแรงส่งไปที่เข็มกระทุ้งมากและสามารถปลั๊กรันเนอร์ออกมาได้เร็ว แต่ถ้าหากแรงดันต่ำเกินไปก็จะทำให้มีแรงส่งไปที่เข็มกระทุ้งน้อยและปลั๊กรันเนอร์ออกจากแม่พิมพ์ได้ช้า รันเนอร์ก็จะร่วงออกจากแม่พิมพ์ช้ากว่าเวลาอันควรคือร่วงในช่วงเวลาใกล้เคียงกับที่ชิ้นงานร่วง จึงส่งผลทำให้รันเนอร์มีโอกาสที่จะตกลงไปที่ถังล้างน้ำพร้อม ๆ กับชิ้นงาน และมีโอกาสที่จะเกิดการปนเปื้อนจากเศษพลาสติกที่หลุดออกมาจากส่วนปลายของรันเนอร์มาที่ชิ้นงานได้

2. ระยะเวลาหน่วงชิ้นงานไม่เหมาะสม ระยะเวลาหน่วงชิ้นงานเป็นพารามิเตอร์ที่กำหนดเวลาในการปลั๊ก

ตารางที่ 2 เกณฑ์การให้คะแนนการประเมินความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผล

ระดับความสำคัญ	ความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผล	คะแนน
มาก	ปัจจัยที่มีผลมากและมีความสัมพันธ์ในการก่อให้เกิดข้อบกพร่องมาก	9
ปานกลาง	ปัจจัยที่มีผลปานกลางและมีความสัมพันธ์ในการก่อให้เกิดข้อบกพร่องปานกลาง	3
น้อย	ปัจจัยที่มีผลน้อยและมีความสัมพันธ์ในการก่อให้เกิดข้อบกพร่องน้อย	1
น้อยมาก	ปัจจัยที่มีผลน้อยมากและมีความสัมพันธ์ในการก่อให้เกิดข้อบกพร่องน้อยมาก	0

ตารางที่ 3 คะแนนของแต่ละปัจจัยที่มีผลต่อข้อบกพร่องประเภทการปนเปื้อนสิ่งแปลกปลอมในผลิตภัณฑ์ปลีกล้วยตัวเมียรุ่น 6P

ลำดับที่	ปัจจัย	คะแนน
1	สายพานลำเลียงไม่สะอาด	9
2	ความเร็วในการเปิดแม่พิมพ์ไม่เหมาะสม	9
3	แผ่นรองกันเศษฝุ่นไม่สามารถป้องกันได้อย่างมิดชิด	9
4	ระยะเวลาทวนวงขึ้นงานไม่เหมาะสม	9
5	แรงความดันผลักรันเนอร์ไม่เหมาะสม	9
6	การทำความสะอาดกล่องไม่เหมาะสม	3
7	พื้นผิวเครื่องจักรไม่สะอาด	3
8	รายละเอียดขั้นตอนการปฏิบัติงานไม่ชัดเจน	3
9	ความชื้นของ Granulate เกินช่วงควบคุม	1
10	พารามิเตอร์ของเครื่องจักรออกนอกช่วงควบคุม	1
11	พนักงานควบคุมเครื่องจักรไม่มีประสิทธิภาพ	1
12	เศษฝุ่นจากสภาพแวดล้อมในกระบวนการผลิต	1

3.4 ผลการปรับปรุงกระบวนการ

จากปัจจัยนำเข้าทั้งหมด 5 ปัจจัยที่ได้รับคะแนนระดับความสัมพันธ์มาก มีปัจจัยที่ไม่สามารถปรับตั้งค่าได้ 2 ปัจจัย ได้แก่ รูปแบบของแผ่นรองกันเศษฝุ่น และความเร็วในการทำความสะอาดสายพานลำเลียง จะทำการทดลองเพื่อทดสอบสมมติฐาน และสำหรับ 3 ปัจจัย

ที่เหลือที่ปรับตั้งค่าได้ ซึ่งได้แก่ ความเร็วในการเปิดแม่พิมพ์ ระยะเวลาทวนวงขึ้นงาน และแรงดันในการผลักรันเนอร์ จะทำการทดลองด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง

3.4.1 ผลการทดลองรูปแบบของแผ่นรองกันเศษฝุ่น

เนื่องจากแผ่นรองกันเศษฝุ่นที่ใช้อยู่ในปัจจุบันนั้นถูกจัดทำขึ้นมาอย่างไม่เป็นมาตรฐานโดยดัดแปลงมาจากกล่องกระดาษลูกฟูกซึ่งไม่สามารถป้องกันเศษฝุ่นได้อย่างมีประสิทธิภาพจึงมีความเสี่ยงที่เศษฝุ่นจากการไถวัตถุดิบอาจร่วงลงไปโดนแผ่นกันขึ้นงานซึ่งนำไปสู่การปนเปื้อนไปยังขึ้นงานได้ และนอกจากนี้ยังมีโอกาสปนเปื้อนเศษฝุ่นที่อาจหลุดมาจากกระดาษลูกฟูกอีกด้วย คณะทำงานจึงได้ทำการออกแบบแผ่นรองกันเศษฝุ่นขึ้นใหม่โดยใช้วัสดุที่มีความคงทนและมีรูปร่างที่เหมาะสมต่อการใช้งานซึ่งสามารถป้องกันเศษฝุ่นได้ทุกทิศทางเคลื่อนที่ที่เป็นไปได้ของวัตถุดิบซึ่งทำให้มีประสิทธิภาพในการป้องกันมากยิ่งขึ้น โดยมีสมมติฐานที่ใช้ในการทดสอบ ดังนี้

H_0 : สัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องประเภทการปนเปื้อนของสิ่งแปลกปลอมจากการใช้แผ่นรองกันเศษฝุ่นเดิมและแผ่นรองกันเศษฝุ่นใหม่ไม่แตกต่างกัน

H_1 : สัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องประเภทการปนเปื้อนของสิ่งแปลกปลอมจากการใช้แผ่นรองกันเศษฝุ่นเดิม มากกว่าการใช้แผ่นรองกันเศษฝุ่นใหม่

จากการเก็บตัวอย่างจำนวน 500,000 ชิ้นงานพบว่าสัดส่วนของเสียที่เกิดจากการใช้แผ่นรองกันเศษฝุ่นเดิมและแผ่นรองกันเศษฝุ่นใหม่เท่ากับ 2.49% และ 2.38% ตามลำดับ จากนั้นได้คำนวณขนาดตัวอย่างที่

เหมาะสมด้วยฟังก์ชัน Power and Sample Size สำหรับการทดสอบสมมติฐานค่าสัดส่วนของประชากร 2 กลุ่ม ในโปรแกรม Minitab [10] พบว่าต้องทำการเก็บข้อมูลจำนวนอย่างน้อยเท่ากับ 412,603 ชิ้นงาน ที่กำลังของการทดสอบ (Power of Test) เท่ากับ 0.9 และระดับความเชื่อมั่น 95% ดังนั้นข้อมูลที่มีอยู่จำนวน 500,000 ข้อมูลจึงเพียงพอและไม่จำเป็นต้องเก็บข้อมูลเพิ่มเติม จึงนำข้อมูลนี้ไปทำการทดสอบสมมติฐาน ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4 พบว่า ค่า P-Value มีค่าน้อยกว่า 0.0005 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงว่าการใช้แผ่นรองกันเศษฝุ่นใหม่มีสัดส่วนของเสียน้อยกว่าการใช้แผ่นรองกันเศษฝุ่นเดิมอย่างมีนัยสำคัญ

3.4.2 ผลการทดลองความถี่ในการทำความสะอาดสายพานลำเลียง

เนื่องจากสายพานลำเลียงมีการสัมผัสโดยตรงกับชิ้นงานรวมถึงรันเนอร์ที่อาจปะปนมากับชิ้นงานจึงทำให้อาจมีสิ่งแปลกปลอมสะสมอยู่ที่สายพานและเพิ่มโอกาสในการปนเปื้อนเข้าไปสู่ชิ้นงานได้ ด้วยความถี่ในการทำความสะอาดปัจจุบันที่ 1 ครั้งต่อสัปดาห์อาจไม่เพียงพอเมื่อเทียบกับปริมาณการผลิตในจำนวนที่มาก คณะทำงานจึงเพิ่มความถี่เป็น 1 ครั้งต่อกะ ซึ่งความถี่นี้สามารถยอมรับได้เนื่องจากสามารถปฏิบัติได้จริงและไม่ได้กระทบกับปริมาณการผลิตมากนัก โดยมีสมมติฐานที่ใช้ในการทดสอบ ดังนี้

H_0 : สัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องประเภทการปนเปื้อนของสิ่งแปลกปลอมจากการทำความสะอาดสายพานด้วยความถี่ 1 ครั้งต่อสัปดาห์และ 1 ครั้งต่อกะไม่แตกต่างกัน

H_1 : สัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องประเภทการปนเปื้อนของสิ่งแปลกปลอมจากการทำความสะอาดสายพานด้วยความถี่ 1 ครั้งต่อสัปดาห์ มากกว่าความถี่ 1 ครั้งต่อกะ

จากการเก็บตัวอย่างจำนวน 500,000 ชิ้นงาน พบว่าสัดส่วนของเสียที่เกิดจากการใช้ความถี่ในการทำความสะอาดสายพาน 1 ครั้งต่อสัปดาห์และ 1 ครั้งต่อกะเท่ากับ 2.49% และ 2.36% ตามลำดับ

จากนั้นได้คำนวณขนาดตัวอย่างที่เหมาะสมด้วยฟังก์ชัน Power and Sample Size สำหรับการทดสอบสมมติฐานค่าสัดส่วนของประชากร 2 กลุ่ม ในโปรแกรม Minitab [10] พบว่าต้องทำการเก็บข้อมูลจำนวนอย่างน้อยเท่ากับ 294,230 ชิ้นงาน ที่กำลังของการทดสอบ (Power of Test) เท่ากับ 0.9 และระดับความเชื่อมั่น 95% ดังนั้นข้อมูลที่มีอยู่จำนวน 500,000 ข้อมูล จึงเพียงพอและไม่จำเป็นต้องเก็บข้อมูลเพิ่มเติม จึงนำข้อมูลนี้ไปทำการทดสอบสมมติฐาน ซึ่งผลการทดสอบแสดงดังตารางที่ 4 พบว่า ค่า P-Value มีค่าน้อยกว่า 0.0005 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงว่าความถี่ในการทำความสะอาดสายพาน 1 ครั้งต่อกะ มีสัดส่วนของเสียน้อยกว่าความถี่ 1 ครั้งต่อสัปดาห์อย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบสมมติฐาน

ปัจจัยในการทดสอบสมมติฐาน	ระดับของปัจจัย	จำนวนชิ้นงานทดสอบ	จำนวนของเสีย	สัดส่วนของเสีย	P-Value
ประเภทของแผ่นรองกันเศษฝุ่น	แผ่นรองกันเศษฝุ่นเดิม	500,000	12,474	2.49%	<0.0005
	แผ่นรองกันเศษฝุ่นใหม่	500,000	11,907	2.38%	
ความถี่ในการทำความสะอาดสายพานลำเลียง	1 ครั้งต่อสัปดาห์	500,000	12,474	2.49%	<0.0005
	1 ครั้งต่อกะ	500,000	11,808	2.36%	

3.4.3 การออกแบบการทดลองแบบส่วนประสม กลาง

สำหรับปัจจัยที่สามารถปรับตั้งค่าได้นั้นได้ทำการทดลองด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบส่วนประสมกลาง โดยมีปัจจัยนำเข้า 3 ปัจจัย ได้แก่ ความเร็วในการเปิดแม่พิมพ์ ระยะเวลาห่วงขึ้นงาน และแรงดันผลึกรีนเนอร์ และตัวแปรตอบสนองในงานวิจัยนี้คือสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องประเภทการปนเปื้อนสิ่งแปลกปลอม ได้จำนวนการทดลองทั้งหมด 20 การทดลอง แต่ละปัจจัยจะถูกทดลองที่ 5 ระดับ ได้แก่ $-\alpha$, -1, 0, +1 และ $+\alpha$ โดย α มีค่าเท่ากับ 1.682 ซึ่งแสดงดังตารางที่ 5 ทั้งนี้เหตุผลที่ผู้วิจัยไม่เลือกใช้แบบการทดลองแบบบล็อกซ์ - เบห์นเคน ที่มีจำนวนการทดลองน้อยกว่าแบบส่วนประสมกลาง 5 การทดลอง เนื่องจากแบบการทดลองแบบประสมส่วนกลางจะให้คุณภาพของการพยากรณ์ที่ดีกว่า เนื่องจากประกอบด้วยส่วนการทดลอง 3 ส่วน ได้แก่ ส่วนแฟคทอเรียล ส่วนจุดแกน (Axial Runs) และส่วนจุดศูนย์กลาง (Center Runs) ซึ่งมีจุดแฟคทอเรียลอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลางเท่ากับระยะที่จุดแกนอยู่ห่างจากจุดศูนย์กลาง ซึ่งจะทำให้คุณภาพการพยากรณ์ดีเท่าเทียมกันที่ทุกช่วงของระดับปัจจัยที่ทำการทดลอง ในขณะที่แบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนจะให้คุณภาพการพยากรณ์ที่ดีในบางช่วงเนื่องจากไม่มีการ

ทำการทดลองที่จุดแฟคทอเรียล [10], [17] - [18] โดยจำนวนการทดลองที่เพิ่มขึ้น 5 การทดลองนั้นสามารถยอมรับได้เนื่องจากไม่ได้กระทบกับต้นทุนและแผนการผลิตมากนัก ซึ่งแบบการทดลองและผลการทดลองที่ได้แสดงดังตารางที่ 6

หลังจากการทดลองเสร็จสิ้นจึงทำการวิเคราะห์ผลการทดลองซึ่งมีขั้นตอน คือ การสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้าและตัวแปรตอบสนองโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์การถดถอย การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง และการอธิบายความสัมพันธ์ของปัจจัยของเทอมที่มีนัยสำคัญ

จากการสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้าและสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องประเภทการปนเปื้อนสิ่งแปลกปลอมโดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์การถดถอย ได้ผลการวิเคราะห์แสดงดังรูปที่ 4 ซึ่งพบว่าจำนวนเทอมที่มีนัยสำคัญ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 มี 5 เทอม ได้แก่ 1) ผลกระทบหลักของความเร็วในการเปิดแม่พิมพ์ 2) ผลกระทบหลักระยะเวลาห่วงขึ้นงาน 3) ผลกระทบหลักแรงดันในการผลึกรีนเนอร์ 4) ผลกระทบร่วมระหว่างความเร็วในการเปิดแม่พิมพ์กับแรงดันในการผลึกรีนเนอร์ 5) ผลกระทบร่วมระหว่างระยะเวลาห่วงขึ้นงานกับแรงดันในการผลึกรีนเนอร์ ส่วนเทอมกำลังสองไม่มีนัยสำคัญ

ตารางที่ 5 ปัจจัยและระดับของปัจจัยนำเข้า

สัญลักษณ์ ของปัจจัย	ปัจจัย/ หน่วย	ระดับของปัจจัย					ความละเอียด ต่ำสุดที่ปรับตั้งได้
		-1.682	-1	0	1	+1.682	
Speed	ความเร็วในการเปิดแม่พิมพ์ (มิลลิเมตรต่อวินาที)	30.00	38.11	50.00	61.89	70.00	0.01
Delay time	ระยะเวลาห่วงขึ้นงาน (วินาที)	0.50	0.60	0.75	0.90	10	0.01
Pressure	แรงดันในการผลึกรีนเนอร์ (บาร์)	8.00	9.50	11.50	13.50	15.00	0.50

ตารางที่ 6 ตารางการออกแบบการทดลองและผลการทดลองการเกิดข้อบกพร่องประเภทการปนเปื้อนสิ่งแปลกปลอม

StdOrder	RunOrder	PtType	Blocks	Speed	Delay time	Pressure	Defective rate
1	12	1	1	38.11	0.6	9.5	0.0500
2	6	1	1	61.89	0.6	9.5	0.0533
3	7	1	1	38.11	0.9	9.5	0.0267
4	19	1	1	61.89	0.9	9.5	0.0333
5	20	1	1	38.11	0.6	13.5	0.0267
6	18	1	1	61.89	0.6	13.5	0.0267
7	8	1	1	38.11	0.9	13.5	0.0400
8	5	1	1	61.89	0.9	13.5	0.0167
9	13	-1	1	30	0.75	11.5	0.0333
10	10	-1	1	70	0.75	11.5	0.0233
11	1	-1	1	50	0.5	11.5	0.0400
12	3	-1	1	50	1	11.5	0.0433
13	11	-1	1	50	0.75	8	0.0267
14	15	-1	1	50	0.75	15	0.0233
15	2	0	1	50	0.75	11.5	0.0333
16	14	0	1	50	0.75	11.5	0.0333
17	16	0	1	50	0.75	11.5	0.0300
18	17	0	1	50	0.75	11.5	0.0333
19	4	0	1	50	0.75	11.5	0.0333
20	9	0	1	50	0.75	11.5	0.0367

ต่อมาทำการทดสอบสมมติฐาน 3 ข้อ ได้แก่ สมมติฐานส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ สมมติฐานส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน และ สมมติฐานส่วนตกค้างมีความแปรปรวนคงที่ เพื่อตรวจสอบว่าแบบจำลองมีความเหมาะสมกับข้อมูลชุดนี้หรือไม่ [10], [19] ซึ่งหากพบว่าไม่เป็นไปตามสมมติฐานข้างต้นจะต้องทำการแปลงค่าตัวแปรตอบสนองก่อน เพราะจะทำให้ข้อมูลที่ได้ไม่เป็นไปตามสมมติฐานความมีเสถียรภาพของค่าความแปรปรวน (Variance Stability) ของตัวแปรตอบสนอง และอาจ

ทำให้การวิเคราะห์มีความคลาดเคลื่อนได้ ซึ่งผลการทดสอบพบว่า เป็นไปตามสมมติฐานทั้ง ๓ ดังนั้นจึงไม่จำเป็นต้องทำการแปลงค่าตัวแปรตอบสนอง โดยสามารถพิจารณาได้จากกราฟความน่าจะเป็นแบบการแจกแจงปกติ (Normal Probability Plot) ของค่าส่วนตกค้าง ซึ่งพบว่า มีลักษณะการจัดเรียงของค่าส่วนตกค้างใกล้เคียงเส้นตรง และมีค่า p-value 0.792 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นจึงสามารถสรุปได้ว่าส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ และจากกราฟของส่วนตกค้างและลำดับของการทดลอง (Versus

Order) พบว่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวอย่างสุ่มรอบแนวแกนศูนย์ จึงสามารถสรุปได้ว่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน และจากกราฟของส่วนตกค้างและค่าพิตที่ได้จากสมการ (Versus Fits) พบว่าส่วนตกค้างกระจายตัวทั้งที่เป็นบวกและลบรอบแนวแกนศูนย์ด้วยความกว้างของการกระจายใกล้เคียงกันตลอดค่าพิตทั้งหมด จึงสามารถสรุปได้ว่าส่วนตกค้างมีความแปรปรวนคงที่

จากกราฟพื้นผิวผลตอบ (Surface Plot) ดังรูปที่ 5 และรูปที่ 6 สามารถอธิบายความสัมพันธ์ได้คือ เมื่อความเร็วในการเปิดแม่พิมพ์สูงขึ้นจะได้สัดส่วนของเสียที่ลดลง เมื่อระยะเวลาหน่วงชิ้นงานเพิ่มขึ้นจะได้สัดส่วนของเสียที่ลดลง และเมื่อแรงดันในการผลักรันเนอร์

เพิ่มขึ้นจะได้สัดส่วนของเสียที่ลดลง โดยเมื่อพิจารณาผลกระทบร่วมระหว่างความเร็วในการเปิดแม่พิมพ์และแรงดันในการผลักรันเนอร์ พบว่าที่แรงดันในการผลักรันเนอร์ 8 บาร์ เมื่อความเร็วในการเปิดแม่พิมพ์เปลี่ยนจาก 70 มิลลิเมตรต่อวินาที ไปที่ 30 มิลลิเมตรต่อวินาที สัดส่วนของเสียจะลดลงน้อยกว่าที่แรงดันในการผลักรันเนอร์ 15 บาร์ โดยในส่วนของผลกระทบร่วมระหว่างระยะเวลาหน่วงชิ้นงานและแรงดันในการผลักรันเนอร์ พบว่าเมื่อแรงดันในการผลักรันเนอร์เท่ากับ 8 บาร์ เมื่อระยะเวลาหน่วงชิ้นงานเปลี่ยนจาก 0.5 วินาที ไปที่ 1 วินาที สัดส่วนของเสียจะลดลงมากกว่าที่แรงดันในการผลักรันเนอร์เท่ากับ 15 บาร์

Response Surface Regression: Defect rate versus Speed, Delay time, Pressure

Stepwise Selection of Terms
α to enter = 0.05, α to remove = 0.05

Coded Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	0.034333	0.000582	58.98	0.000	
Speed	0.004981	0.000704	7.07	0.000	1.00
Delay time	-0.006475	0.000707	-9.16	0.000	1.00
Pressure	-0.006608	0.000693	-9.54	0.000	1.00
Speed*Pressure	0.002500	0.000920	2.72	0.017	1.00
Delay time*Pressure	0.003333	0.000920	3.62	0.003	1.00

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0026035	94.60%	92.67%	88.15%

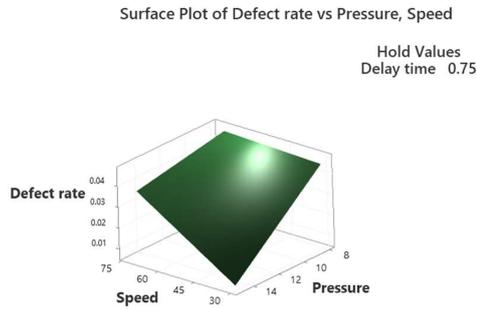
Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	5	0.001663	0.000333	49.07	0.000
Linear	3	0.001524	0.000508	74.95	0.000
Speed	1	0.000339	0.000339	50.00	0.000
Delay time	1	0.000568	0.000568	83.86	0.000
Pressure	1	0.000617	0.000617	90.99	0.000
2-Way Interaction	2	0.000139	0.000069	10.25	0.002
Speed*Pressure	1	0.000050	0.000050	7.38	0.017
Delay time*Pressure	1	0.000089	0.000089	13.11	0.003
Error	14	0.000095	0.000007		
Lack-of-Fit	9	0.000073	0.000008	1.82	0.265
Pure Error	5	0.000022	0.000004		
Total	19	0.001758			

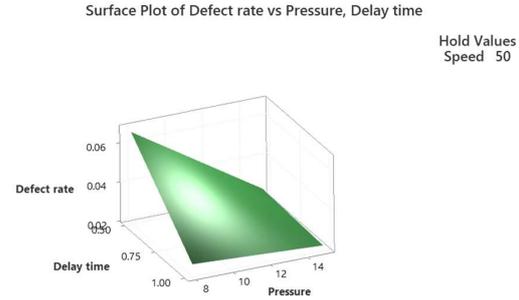
Regression Equation in Uncoded Units

Defect rate = 0.2400 - 0.000790 Speed - 0.1709 Delay time - 0.01689 Pressure + 0.000105 Speed*Pressure + 0.01111 Delay time*Pressure

รูปที่ 4 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนและการวิเคราะห์การถดถอย



รูปที่ 5 กราฟพื้นผิวผลตอบของปัจจัยความเร็วในการเปิดแม่พิมพ์และแรงดันในการผลักรันเนอร์

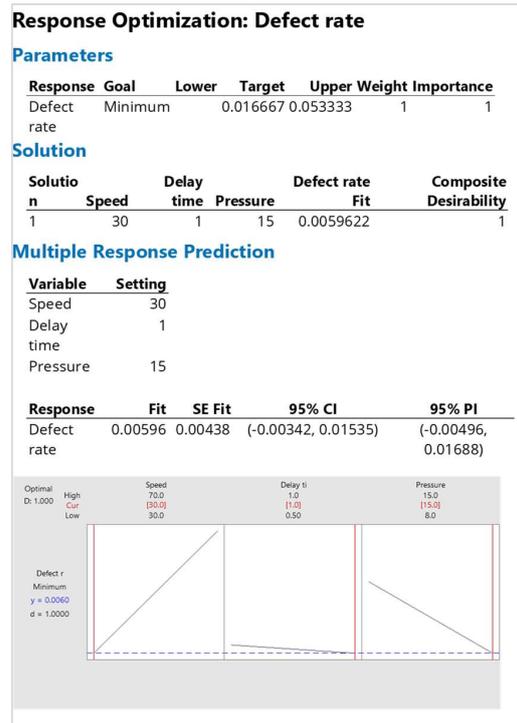


รูปที่ 6 กราฟพื้นผิวผลตอบของปัจจัยแรงดันในการผลักรันเนอร์และระยะเวลาหน่วง

3.4.4 การหาระดับที่เหมาะสมของปัจจัย

หลังจากการสร้างแบบจำลองความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยนำเข้าและสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องประเภทการปนเปื้อนของสิ่งแปลกปลอม ลำดับต่อไปจึงทำการหาค่าที่เหมาะสมของปัจจัยนำเข้าที่ทำให้ตัวแปรตอบสนองมีค่าที่ต้องการด้วยฟังก์ชัน Response Optimizer จากโปรแกรม Minitab โดยระบุตัวแปรตอบสนองคือสัดส่วนของเสีย วัตถุประสงค์คือต้องการค่าต่ำที่สุด (Minimize) ซึ่งแสดงดัง รูปที่ 7 พบว่า จะได้สัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องประเภทการปนเปื้อนสิ่งแปลกปลอมเท่ากับ 0.00596 หากตั้งค่าความเร็วในการเปิดแม่พิมพ์ 30 มิลลิเมตรต่อวินาที ระยะเวลาหน่วงชิ้นงาน 1 วินาที และแรงดันในการผลักรันเนอร์ 15 บาร์ ซึ่งให้ค่า Composite Desirability เท่ากับ 1 หมายความว่าสามารถหาค่าปัจจัยที่ทำให้ได้ค่าตัวแปรตอบสนองตามที่ต้องการได้ ซึ่งจะเห็นได้ว่าค่าปัจจัยที่เหมาะสมข้างต้นที่ได้คือ ความเร็วในการเปิดแม่พิมพ์ต่ำ ระยะเวลาหน่วงชิ้นงานมาก และแรงดันในการผลักรันเนอร์สูง นั้นเป็นเพราะว่าระยะเวลาหน่วงชิ้นงานที่มากและแรงดันในการผลักรันเนอร์สูงจะส่งผลให้มีการปะปนของรันเนอร์เข้าไปสู่ชิ้นงานได้น้อย และที่ความเร็วในการเปิดแม่พิมพ์ต่ำก็จะทำให้เศษพลาสติกที่ปลายของรันเนอร์นั้นหลุดออกมาได้ยากขึ้นเนื่องจากมีความขรุขระน้อย จึงส่งผลให้โอกาสในการปนเปื้อนสิ่งแปลกปลอมเกิดขึ้นได้น้อยลง ดังที่กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ใน

การออกแบบการทดลอง ด้วยเหตุนี้ค่าระดับปัจจัยข้างต้นจึงทำให้มีสัดส่วนของเสียต่ำที่สุดนั่นเอง โดยระดับของปัจจัยนำเข้าของการตั้งค่าปัจจุบันและค่าที่เหมาะสมที่ได้จากฟังก์ชัน Response Optimizer แสดงดังตารางที่ 7



รูปที่ 7 ผลการหาระดับที่เหมาะสมของปัจจัยนำเข้า

ตารางที่ 7 ระดับของปัจจัยนำเข้าของการตั้งค่าปัจจุบันและค่าที่เหมาะสมที่ได้จากฟังก์ชัน Response Optimizer

ปัจจัยนำเข้า	การตั้งค่าปัจจุบัน	ค่าที่เหมาะสมที่ได้จากฟังก์ชัน Response Optimizer
ความเร็วในการเปิดแม่พิมพ์	50.0	30.0
ระยะเวลาหน่วงชิ้นงาน	0.7	1.0
แรงดันในการผลักกันเนอร์	10.0	15.0

3.5 ผลการควบคุมกระบวนการ

ในระหว่างการติดตามควบคุมผล ได้ทำการแก้ไขเอกสารขั้นตอนการปฏิบัติงานและแผนควบคุมเพื่อให้มั่นใจว่าผลการปรับปรุงที่ได้ได้รับการปฏิบัติตามอย่างเหมาะสม จากนั้นได้ทำการทดสอบเพื่อยืนยันผลที่ได้โดยปรับตั้งค่าปัจจัยทั้ง 5 ปัจจัยตามค่าระดับที่เหมาะสม และทำการเก็บข้อมูลของเสียเป็นระยะเวลา 34 วัน ปริมาณการผลิตทั้งหมด 1,000,000 ชิ้น โดยหลังจากการติดตามผลการปรับปรุงกระบวนการ พบว่าสามารถลดสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องประเภทการปนเปื้อนสิ่งแปลกปลอมในผลิตภัณฑ์ปลี๊กตัวเมียรุ่น 6P ลงจาก 2.36% เป็น 0.78% ซึ่งลดลงไปได้ 1.58% และเมื่อพิจารณาจากข้อมูลการพยากรณ์ปริมาณการผลิตในปี 2566 ซึ่งจะมีการผลิตทั้งสิ้น 27,000,000 ชิ้น พบว่าจะสามารถช่วยลดต้นทุนของเสียลงจาก 5,499,036 บาทเหลือเพียง 1,826,099 บาท ซึ่งลดลงไปได้ถึง 3,672,937 บาทต่อไป

4. สรุปผล

งานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุงกระบวนการเพื่อลดสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องประเภทการปนเปื้อนสิ่งแปลกปลอมในผลิตภัณฑ์ปลี๊กตัวเมียรุ่น 6P โดยประยุกต์ใช้แนวทางของ ซิกซ์ ซิกมา ซึ่งประกอบด้วย 5 ระยะ ได้แก่ ระยะการนิยามปัญหา ระยะการวัดสภาพปัญหา ก่อนการปรับปรุง ระยะการวิเคราะห์สาเหตุปัญหา ระยะการปรับปรุงกระบวนการ และระยะการควบคุมกระบวนการ โดยหลังจากการติดตามผลการปรับปรุงกระบวนการ พบว่าสามารถลดสัดส่วนของเสียจากข้อบกพร่องประเภทการปนเปื้อนของสิ่งแปลกปลอม

ในผลิตภัณฑ์ปลี๊กตัวเมียรุ่น 6P ลงจาก 2.36% เป็น 0.78%

5. ข้อเสนอแนะ

1) สามารถนำผลการศึกษาจากงานวิจัยนี้ ไปประยุกต์ใช้กับการลดข้อบกพร่องจากการปนเปื้อนของสิ่งแปลกปลอมในกระบวนการฉีดพลาสติกของผลิตภัณฑ์อื่นได้ ทั้งนี้ต้องพิจารณาปัจจัยอื่น ๆ ร่วมด้วย เนื่องจากรูปแบบและรุ่นของเครื่องฉีดพลาสติก รวมไปถึงรูปแบบของแม่พิมพ์อาจมีความแตกต่างกันออกไป

2) สามารถนำขั้นตอนการดำเนินงานในงานวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้เพื่อลดของเสียในกระบวนการผลิตของ

ผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ได้ เพียงแต่อาจจะต้องมีการปรับบางส่วนให้เข้ากับปัญหาและกระบวนการผลิตนั้น ๆ

3) สำหรับงานวิจัยในอนาคตควรมีการศึกษาวិธีการในการตรวจสอบการปนเปื้อนของสิ่งแปลกปลอมด้วยวิธีอื่นร่วมด้วย ที่สามารถตรวจจับสิ่งแปลกปลอมที่มองไม่เห็นหรือมองเห็นได้ยากด้วยสายตา เพื่อให้ได้ผลการตรวจสอบที่แม่นยำและเที่ยงมากยิ่งขึ้น เช่น การวิเคราะห์ทางเคมี เป็นต้น

4) เพื่อให้โครงการการปรับปรุงกระบวนการนั้นสำเร็จ ลุล่วงตามแผนที่วางไว้ คณะทำงานจำเป็นต้องมีการติดตามตามบทบาทหน้าที่ที่ได้รับตามสัญญาโครงการ และควรมีการประชุมเพื่อติดตามความคืบหน้าเป็นระยะ หากพบอุปสรรคระหว่างการทำเนินโครงการควรมีการวางแผนเพื่อหาทางออก และรายงานไปยังผู้บริหารเพื่อขอคำชี้แนะ

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] W.G Frizelle, *Injection molding technology in Applied Plastics Engineering Handbook*. Elsevier, pp. 205-214, 2011.
- [2] S. Kulkarni, *Robust process development and scientific molding: theory and practice*. Carl Hanser Verlag GmbH Co KG, 2017.
- [3] C.G Gogos and Z. Tadmor, *Principles of polymer processing*. John Wiley & Sons, 2013.
- [4] Petroleum Institute of Thailand. (2014, December) . Plastic Intelligence Monthly [Online]. Available: <http://plastic.oie.go.th>
- [5] W. Khumsamit, "Improvement of parameter setting for plastic injection molding process in case of mul ti-defect types," M.S. thesis, Department of Industrial Engineering, Engineering, Chulalongkorn University, 2008.
- [6] I. Rattanabunditsakun, "Black dot defect reduction in plastic injection moulding process," M.S. thesis, Department of Industrial Engineering, Engineering, Chulalongkorn University, 2014.
- [7] A. Maged, S. Haridy, S. Kaytbay and N. Bhuiyan, "Continuous improvement of injection moulding using Six Sigma: case study," *International Journal of Industrial and Systems Engineering*, 32(2): p. 243-266, 2019.
- [8] A. Alshammari et al., "Quality improvement in plastic injection molding industry: applying lean six sigma to SME in Kuwait," in *Proceedings of the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management*. 2018.
- [9] T. Rattanaruengyot, "Defect reduction in plastic pipe extrusion process," M.S. thesis, Department of Industrial Engineering, Engineering, Chulalongkorn University, 2014.
- [10] C. Rakthongthai, "Defective reduction from crack defects in painting process of motorcycle parts," M.S. thesis, Department of Industrial Engineering, Engineering, Chulalongkorn University, 2020.
- [11] W. Saleesing, *Process Revolution by Six Sigma techniques of Champion and Black Belt*. Bangkok: Sirivatana Interprint, 2005.
- [12] K. Ploypanichcharoen, *Process Capability Analysis*. 4th ed. Bangkok: Technology Promotion Association (Thailand-Japan), 2006.
- [13] Measurement Systems Analysis (MSA), AIAG Standard, 4th ed. pp. 131-150, 2010.
- [14] C. Simion, "Measurement system analysis by attribute, an effective tool to ensure the quality of the visual inspection process within an organization," in *MATEC Web of Conferences EDP Sciences*, 2019. Vol. 290, p. 05004.
- [15] C. Marques et al., "Improving operator evaluation skills for defect classification using training strategy supported by attribute agreement analysis," *Measurement, Elsevier*, Vol. 119, pp. 129-141, 2018.
- [16] Y. Fasser and D. Brettner, *Process Improvement in the Electronics Industry*. New York: John Wiley & Sons Inc., 1992.
- [17] T. Rakić et al., "Comparison of full factorial design, central composite design, and box-behnken design in chromatographic method development for the determination of

- fluconazole and its impurities," *Analytical Letters*, Vol. 47, Issue 8, pp. 1334-1347, 2014.
- [18] D.C Montgomery, *Design and analysis of experiments / Douglas C. Montgomery*. 8th ed. Hoboken, N.J. : Wiley, 2013.
- [19] M. Chotivirat, "A defects reduction in plastic part process," M.S. thesis, Department of Industrial Engineering, Engineering, Chulalongkorn University, 2007.

การศึกษาคุณลักษณะการเผาไหม้และประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาชีวมวล

ทรงกระบอก

Investigation on Combustion Characteristics and Thermal Efficiency of Cylindrical Biomass Stove

พรพิทักษ์ ถมปัด¹ กุลเชษฐ์ เพียรทอง^{1*} จริง ดินเชิดชู²

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี 85 ตำบลเมืองศรีโค วารินชำราบ
อุบลราชธานี 34190

²ห้างหุ้นส่วนจำกัด พลังเทวดา อ. เมือง จ. นครพนม 48000

Pornpitak Tompat¹ Kulachate Pianthong^{1*} Jing Dincherdchu²

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University, 85
Sathonlamark Road, Warin Chamrap, Ubon Ratchathani, 34190

²Dhewada Power Limited Partnership, Muang District, Nakhon Phanom, 48000

*Corresponding author Email: Kulachate.P@ubu.ac.th

(Received: April 24, 2023; Revised: May 11, 2023 ; Accepted: May 23, 2023)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณลักษณะการเผาไหม้ และประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาชีวมวลทรงกระบอกด้วยวิธีการทดสอบโดยการต้มน้ำ (Water boiling test) เพื่อหาเงื่อนไขที่เหมาะสมที่สุดในการนำไปประยุกต์ใช้งาน ตัวแปรในการบรรจุเชื้อเพลิงของเตาชนิดนี้ ได้แก่ แรงดันในการอัด และความชื้นของชีวมวล โดยชีวมวลที่ใช้ในการทดลอง คือ ชีวชี มูลอัดบรรจุในเตาชีวมวลทรงกระบอก ด้วยความดันในการอัดบรรจุ 40 bar 80 bar และ 120 bar และความชื้นของชีวมวล คือ 10% 15% 20% และ 25% จากการทดลองพบว่าพฤติกรรมการเผาไหม้เตาชีวมวลทรงกระบอกที่แรงดันในการอัด 40 bar 80 bar และ 120 bar ให้ระยะในการเผาไหม้ต่อเนื่อง 4 ชั่วโมง 6 ชั่วโมง และ 7 ชั่วโมงตามลำดับ เมื่อใช้ชีวมวล 15% และอัดที่ความดัน 40 bar จะให้อุณหภูมิสูงสุดของเปลวไฟเฉลี่ยตลอดระยะเวลาการเผาไหม้ที่ 703 °C และที่ความชื้นของชีวมวล 15% ของทุกแรงดันในการอัดให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุด คือ 16.24% 14.38% และ 20.26% ตามลำดับ ที่ชั่วโมงที่ 2 ของการทำงานของเตา

คำสำคัญ: เตาชีวมวลทรงกระบอก การทดสอบโดยการต้มน้ำ ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาชีวมวล

ABSTRACT

This research aims to investigate combustion characteristics and thermal efficiency of the cylindrical biomass stove by the water boiling test method. This is to find out the optimum condition for further application. Major parameters, which are the compression pressure and the moisture content of the biomass, are varied on the preparation of the stove. The biomass in the experiment is sawdust and is compressed in a cylindrical stove at pressure of 40 bar, 80 bar, and 120 bar, while the moisture

content of the sawdust are 10%, 15%, 20% and 25%. From the investigation, it is shown that the stove with compression pressures of 40 bar, 80 bar and 120 bar can operate continuously for 4 hours, 6 hours and 7 hours, respectively. The 15% moisture and 40 bar compression gives the highest flame temperature of 703 °C. While the 15% sawdust moisture of all compression pressures gives the highest thermal efficiency at 16.24%, 14.38 and 20.26% at the 2nd hour of the operation of the stove.

Keyword: Biomass stove, Water boiling test, Thermal efficiency of biomass stove.

1. บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม ในชนบทจะมีวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจำนวนมาก เช่น ชานอ้อย ชังข้าวโพด ชี้เลื่อย และเปลือกกล้วย เป็นต้น จากการศึกษาศักยภาพเชิงปริมาณแล้ว สามารถนำวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเหล่านี้มาใช้เป็นพลังงานได้ไม่น้อยกว่า 62 ล้านตัน/ปี [1] จากต้นทุนของเชื้อเพลิงฟอสซิลที่ปรับตัวสูงขึ้นอย่างต่อเนื่องวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรเหล่านี้จึงเป็นที่น่าสนใจและพัฒนานำมาใช้เป็นพลังงานความร้อนในครัวเรือน และในกลุ่มอุตสาหกรรมขนาดกลางและเล็กได้ เนื่องจากมีค่าความร้อนค่อนข้างสูง คือ ประมาณ 12-16 MJ/kg สามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงในการผลิตไฟฟ้าในโรงไฟฟ้าชีวมวล หรือ เชื้อเพลิงสำหรับหม้อไอน้ำชีวมวล (Biomass boiler) หรือ ใช้ในการผลิตก๊าซชีวมวล (Producer gas) ในอุตสาหกรรมขนาดเล็กต่าง ๆ อย่างไรก็ตาม การนำชีวมวลข้างต้นมาใช้เป็นเชื้อเพลิงยังมีข้อด้อยอยู่หลายประการ เช่น ความสม่ำเสมอของคุณภาพของเชื้อเพลิงชีวมวล การจัดการและการขนส่ง และราคาที่ไม่แน่นอน เป็นต้น ดังนั้นจึงจำเป็นต้องพัฒนาเทคโนโลยีการใช้ชีวมวลให้มีประสิทธิภาพสูงและรูปแบบการใช้งานที่เหมาะสมเพื่อเกิดประโยชน์สูงสุด

โดยในปี พ.ศ. 2553 สุพิน จอดนอก [2] ได้ศึกษาขบวนการเผาไหม้และสมรรถนะของเตาชีวมวลทรงกระบอก เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ และทดสอบสมรรถนะเตาชีวมวลทรงกระบอก ที่มีการเผยแพร่ใช้งานในนาม “เตาหวดดา” ชีวมวลที่ใช้ในการทดสอบ 3 ชนิด คือ แกลบ ชี้เลื่อย ชานอ้อย อัตราบรรจุในเตาทรงกระบอก

จากการทดสอบเตาเชื้อเพลิง เพื่อศึกษาพฤติกรรมการเผาไหม้ และหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเชื้อเพลิงแต่ละชนิด และพบว่าเตาชีวมวลนี้ ให้การเผาไหม้แบบเตาชีวมวลโดยตรง ร่วมกับการเผาไหม้ของก๊าซโปรดิวเซอร์ โดยทั่วไป การเผาไหม้ของเตาชีวมวลนี้ให้การเผาไหม้ที่ค่อนข้างสมบูรณ์ และมลพิษต่ำ และผลการวิเคราะห์มลพิษจากการเผาไหม้ อยู่ในเกณฑ์ที่ดีมาก และต่ำกว่าการเผาไหม้ชีวมวลโดยทั่วไป

ธเนศ ไชยชนะ และคณะ (พ.ศ. 2556) [3] ได้ศึกษาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาหุงต้มระดับครัวเรือนที่ใช้ในพื้นที่ชนบทจำนวนเตา 6 ชนิด การศึกษาในครั้งนี้ทดสอบโดยวิธีการต้มน้ำ บรรจุในหม้อต้ม 0.72 กิโลกรัม โดยใช้ถ่านไม้ยางพาราเป็นเชื้อเพลิง จากการทดสอบพบว่าเตาอั้งโล่ประสิทธิภาพสูง มีประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุดเฉลี่ยเท่ากับ 30.54% รองลงมาคือเตาดำขนาดกลาง เตาอั้งโล่ธรรมดา เตापากยื่น เตาดำขนาดเล็ก และเตาอั้งโล่ธรรมดาขนาดเล็ก ซึ่งมีประสิทธิภาพเชิงความร้อนเท่ากับ 24.29% 21.70% 19.80% 18.46% และ 16.66% ตามลำดับ และเตาอั้งโล่ประสิทธิภาพสูงมีค่าอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิน้ำเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 2.86 องศาต่ออนาที ส่วนเตาอั้งโล่ธรรมดาขนาดเล็ก เป็นเตาที่มีอัตราการใช้เชื้อเพลิงสูงที่สุดเฉลี่ยเท่ากับ 1.32 กิโลกรัมต่อชั่วโมง

วิลาวัลย์ คุ้มเหม และคณะ (พ.ศ. 2560) [4] ได้ศึกษาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาชีวมวลชนิดป้อนเชื้อเพลิงแบบต่อเนื่องระดับครัวเรือน ซึ่งเตาเผาชีวมวลที่ออกแบบแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ประกอบไปด้วย ส่วนป้อน

เชื้อเพลิงเข้าสู่ห้องเผาไหม้ ห้องเผาไหม้ และส่วนที่ใช้สำหรับ
กักเก็บเถ้า เตาที่ใช้ในการทดลองมีลักษณะเป็นเตา
ทรงกระบอกขนาดความสูง 80 เซนติเมตร เส้นผ่าศูนย์กลาง
40 เซนติเมตร ชีวมวลที่ใช้ในการทดสอบ คือ ชังข้าวโพด
การป้อนเชื้อเพลิงเป็นการป้อนแบบสม่ำเสมอและต่อเนื่อง
โดยใช้สกรูลำเลียง ใช้พัดลมในการเติมอากาศบริเวณห้อง
เผาไหม้ และมีการควบคุมอัตราการไหลของอากาศโดย
Inverter การเผาไหม้ชีวมวลในเตาชีวมวลเป็นการเผาไหม้
โดยตรง จากการศึกษาพบว่าอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิง
มีผลต่ออัตราการความสิ้นเปลืองพลังงาน เชื้อเพลิง อุณหภูมิน้ำ
ร้อน อุณหภูมิเตา ระยะเวลาให้ความร้อน และประสิทธิภาพ
เชิงความร้อนของเตา ซึ่งอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่
3.95 เตาชีวมวลมีความเหมาะสมในการใช้งานและให้
ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงที่สุด 20%

เตาชีวมวลทรงกระบอก หรือ “เตาเหวดตา” ถูกใช้อย่าง
แพร่หลายในอุตสาหกรรมขนาดกลางและขนาดเล็ก
เนื่องจากการลดต้นทุนในการผลิตและยังสามารถนำ
วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาประยุกต์ใช้ในงาน
อุตสาหกรรมอีก ดังแสดงในรูปที่ 1 และส่วนใหญ่อุตสาหกรรม
ที่ใช้เตาชีวมวลทรงกระบอกจะใช้ ชี้อเลื้อย เป็นเชื้อเพลิง ซึ่ง
งานวิจัยก่อนหน้านี้ไม่ได้อธิบายถึงความเหมาะสมของ
ความชื้นของ ชี้อเลื้อยที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง



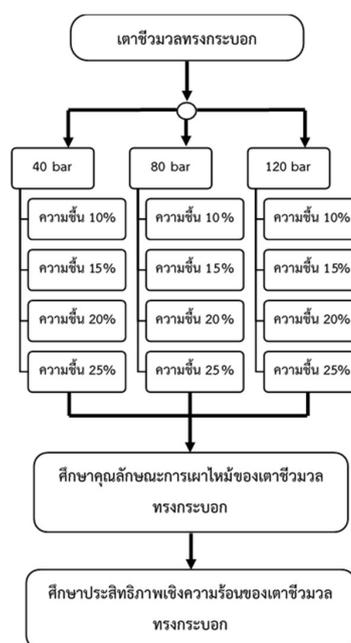
รูปที่ 1 เตาชีวมวลทรงกระบอก

ดังนั้นบทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทำการศึกษา
พฤติกรรมการเผาไหม้เตาชีวมวลทรงกระบอก [5] และ
ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาชีวมวลทรงกระบอกด้วย
วิธีการทดสอบโดยการต้มน้ำ (Water boiling test) [6-10] ชีว

มวลที่ใช้ในการศึกษาคือชี้อเลื้อย ที่มีความชื้น 10% 15% 20%
และ 25% อัตราบรรจุลงเตาชีวมวลทรงกระบอกที่ความดันใน
การบรรจุ 40 bar 80 bar และ 120 bar

2. วิธีการศึกษา

ขั้นตอนในการศึกษาคุณลักษณะการเผาไหม้ และ
ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเตาชีวมวลทรงกระบอก ที่อัตรา
บรรจุชี้อเลื้อยความดันในการอัดบรรจุ 40 bar 80 bar และ
120 bar และความชื้นของชี้อเลื้อย คือ 10% 15% 20%
และ 25% มีขั้นตอนในการทดลองดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 ผังขั้นตอนการทดลอง

2.1 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการศึกษา

เครื่องมือและอุปกรณ์หาประสิทธิภาพของเตาชีวมวล
ทรงกระบอกประกอบด้วย

1) เตาชีวมวลทรงกระบอก มีโครงสร้างทำจากเหล็ก
แผ่นบาง 1 มิลลิเมตร มีวนขึ้นรูปเป็นทรงกระบอก มีขนาด
เส้นผ่านศูนย์กลาง 35 เซนติเมตร สูง 55 เซนติเมตร ทางเข้า
อากาศเส้นผ่าศูนย์กลางขนาด 10 เซนติเมตร ทางออกของ
เปลวไฟขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร และ

ส่วนประกอบต่าง ๆ ที่อยู่ในเตาเป็นอุปกรณ์ที่ช่วยรักษา สภาพของชีวมวลในเตาชีวมวลทรงกระบอกไม่ให้พังทลาย ขณะเผาไหม้และช่วยรักษารูปแบบการเผาไหม้ให้คงที่ ประกอบด้วย แผ่นเกือกม้า ทำหน้าที่ป้องกันความเสียหาย บริเวณด้านล่างของเตา แผ่นคาดเตา ทำหน้าที่กั้นไม่ให้ เชื้อเพลิงที่กำลังเผาไหม้พังลงมา และฝาครอบด้านบนเตา ทำหน้าที่ป้องกันไม่ให้มีการระเหยออกของแก๊สที่เกิดจาก กระบวนการเผาไหม้โดยบังคับให้แก๊สไหลออกตรงกลาง เพียงช่องทางเดียว ดังแสดงในรูปที่ 3

2) อุปกรณ์วัดอุณหภูมิ (Thermocouple) เลือกใช้ Type K ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 6 มิลลิเมตร ความยาว โพรบ 17.5 มิลลิเมตร 6.3 มิลลิเมตร และ 2.5 มิลลิเมตร ย่านการวัดอุณหภูมิสูงสุด 1200 °C ซึ่งจะประกอบด้วย สายขั้วบวกและขั้วลบ โดยจะทำการวัดอุณหภูมิเปลวไฟ อุณหภูมิภายในเตา และอุณหภูมิของน้ำ เพื่อนำข้อมูลไป วิเคราะห์พฤติกรรมกรรมการเผาไหม้ และคำนวณหาค่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อน

3) อุปกรณ์เก็บบันทึกข้อมูล (Data logger) ใช้ใน การเก็บบันทึกค่าอุณหภูมิ ณ เวลาใด ๆ รุ่น Graphtec midi LOGGER GL 800 สามารถต่อโพรบเพื่อวัดอุณหภูมิ ได้ 20 ช่อง

4) อุปกรณ์วัดค่าน้ำหนัก (Load cell) ขนาด 100 kg ใช้สำหรับเก็บค่าน้ำหนักที่ลดลงของเตาชีวมวล ทรงกระบอกขณะทำการทดลอง โดยจะทำการบันทึก น้ำหนักที่ลดลงทุกชั่วโมง เพื่อหาอัตราการใช้ชีวมวล ซึ่งจะ ประกอบอุปกรณ์วัดค่าน้ำหนัก (Load cell) เข้ากับ ฐานรองเตาและเข้ากับ data logger เพื่อเก็บข้อมูล

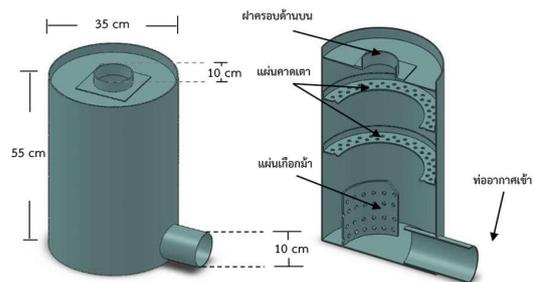
5) เครื่องวัดความชื้น Moisture meter TK 100W ช่วงการวัดความชื้น 0 ถึง 80% ความถูกต้องแม่นยำ ± 0.5% ความละเอียด 0.1 ใช้สำหรับวัดความชื้นของขี้เถ้า

6) หม้ออลูมิเนียม ขนาดหม้ออลูมิเนียมเบอร์ 28 (เส้นผ่าศูนย์กลาง 28 เซนติเมตร)

7) เครื่องชั่งน้ำหนักใช้สำหรับชั่งน้ำหนักของน้ำ ก่อนทำการทดลอง และหลังทำการทดลอง เพื่อคำนวณหา

ปริมาณน้ำที่หายไป โดยเครื่องชั่งน้ำหนักจะเป็นเครื่องชั่ง แบบสปริง ขนาด 15 kg

8) ขี้เถ้าที่ได้จากการทดสอบเป็นขี้เถ้าจากโรงงาน ทำบ้านน็อคดาวนซึ่งส่วนใหญ่เป็นไม้เนื้อแข็ง ขี้เถ้ามี ลักษณะเป็นผง มีรูปร่างไม่แน่นอน



รูปที่ 3 ขนาดเตาชีวมวลทรงกระบอกและโครงสร้างด้าน ในเชื้อเพลิงชีวมวล

เชื้อเพลิงที่ใช้ในการทดสอบเตาชีวมวลทรงกระบอก คือขี้เถ้าที่ได้จากโรงเลื่อยไม้ สำหรับทำบ้านน็อคดาวน มี ลักษณะเป็นผง ค่อนข้างหยาบ ดังแสดงในรูปที่ 4 คุณสมบัติ ของขี้เถ้าที่ได้จากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis) มีค่าความร้อน 17,518 kJ/kg ปริมาณไนโตรเจน 0.31 g/100g ปริมาณคาร์บอน 41.78 g/100g ปริมาณ ไฮโดรเจน 5.69 g/100g และความชื้น 11.40% ดังแสดงใน ตารางที่ 1



รูปที่ 4 ขี้เถ้าที่ใช้ในการทดสอบเตาชีวมวลทรงกระบอก

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของซีลี้อยู่จากการวิเคราะห์แบบแยกธาตุ (Ultimate analysis)

รายการทดสอบ	ผลการทดสอบ	หน่วย	วิธีการทดสอบ
พลังงานความร้อน	17,518	kJ/kg	เครื่องมือทดสอบ Bomb calorimeter
ปริมาณไนโตรเจน	0.31	g/100g	Application note No.203-821-462 according to LECO method. เครื่องมือทดสอบ : CHNS analyzer ยี่ห้อ LECO รุ่น CHNS628
ปริมาณคาร์บอน	41.78	g/100g	
ปริมาณไฮโดรเจน	5.69	g/100g	
ความชื้น	11.40	%	ASTM D 2016-74 (Reapproved 1983) Standard Testing Method for Moisture Content of Wood

2.2 ขั้นตอนการอัดและจุดเตาชีวมวลทรงกระบอก อุปกรณ์ที่ใช้ในการบรรจุเตาประกอบไปด้วย เครื่องอัดไฮดรอลิก ดังรูปที่ 5 ท่อแนวตั้งสำหรับทำแบบปล่องอากาศทางออกแกนกลางเตา ท่อแนวนอนสำหรับทำแบบปล่องอากาศทางเข้าปากเตา เมื่อเตรียมความชื้นของซีลี้อยู่และเตรียมอุปกรณ์เรียบร้อยแล้ว ขั้นตอนต่อไปเป็นการบรรจุซีลี้อยู่ โดยเริ่มจากนำตัวเตาที่วางที่ด้านล่างของแท่นอัดไฮดรอลิก ดังรูปที่ 6 วางเกือบมาที่ตำแหน่งกลางเตา วางท่อแนวนอนเข้าทางปากเตาและท่อแนวตั้งสำหรับทำปล่องอากาศที่ตำแหน่งกึ่งกลางเตา จากบรรจุซีลี้อยู่ลงในเตาแล้วอัดให้ได้ความดันในการอัดตามขอบเขตของงานวิจัย โดยให้ระดับของซีลี้อยู่ที่อัดแล้วอยู่ที่ประมาณ 1/3 ของเตา ในขั้นตอนนี้ควรระวังไม่ให้กระบอกอัดไฮดรอลิกชนกับแผ่นเกือบมาของเตา เมื่ออัดจนซีลี้อยู่ได้ระดับที่ 1/3 ของเตาแล้ว ให้วางแผ่นคาคเตาแผ่นแรกไว้ที่ระดับนี้ จากนั้นอัดซีลี้อยู่จนได้ระดับที่ 2/3 ของเตา แล้ววางแผ่นคาคเตาแผ่นที่สองไว้ที่ระดับนี้ จากนั้นอัดซีลี้อยู่จนเกือบเต็ม ให้ระดับของซีลี้อยู่อยู่ที่ 1 นิ้วก่อนถึงขอบเตาด้านบน วางฝาครอบด้านบนเตา 2 ชั้นลงไป โดยให้วางแผ่นฝาครอบกลมลงไปก่อน จากนั้นวางปล่องไฟตามไป สุดท้ายนำเก้าอี้กลมผสมดินและน้ำหมาด ๆ ใส่ที่ด้านบนให้ถึงระดับขอบเตา และอัดด้วยไฮดรอลิกส์ให้แน่น จะได้เตาชีวมวลทรงกระบอก

การจุดเตาชีวมวลทรงกระบอกทำได้โดยง่าย เพียงแค่นำเชื้อเพลิง เช่น กระดาษ, ไม้ หรือวัสดุติดไฟอื่น วางไว้ที่ปากเตา เพลวไฟจะวิ่งไปตามรูอากาศภายในเตา ชีวมวล

ภายในเตาจะเริ่มติดไฟ โดยไม่ต้องมีการใช้แรงภายนอก เข้าช่วย ข้อควรระวังคือ ควรเช็ยเศษซีลี้อยู่ที่ร่วงลงมา ออกก่อน จะทำให้จุดติดได้ง่ายขึ้น



รูปที่ 5 เครื่องอัดไฮดรอลิก



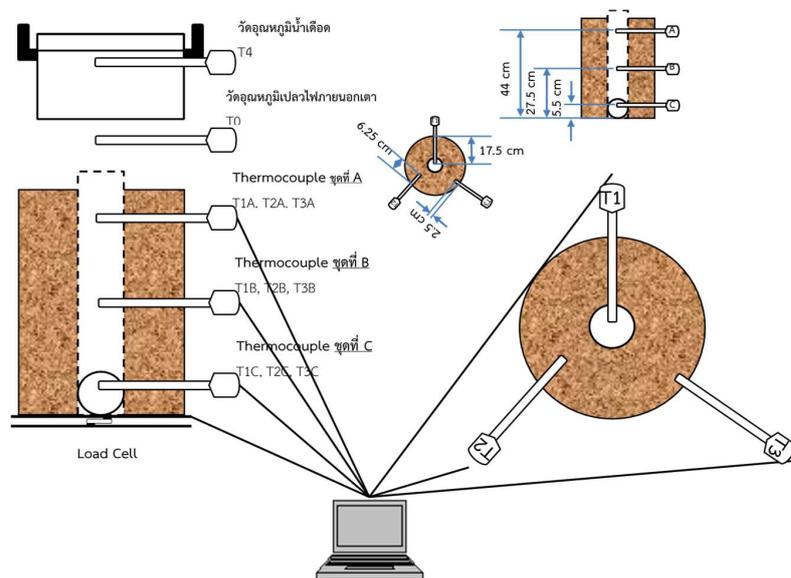
รูปที่ 6 การอัดเตาชีวมวลทรงกระบอก

2.3 ขั้นตอนการศึกษา

เตรียมเตาชีวมวลสำหรับการทดลองโดยจะอัดเตาชีวมวลที่ความชื้นของซีลี้อยู่ 10%, 15%, 20% และ 25%

อัตราบรรจุลงในเตาชีวมวลทรงกระบอกความดัน 40 bar 80 bar และ 120 bar ในแต่ละความดัน การทดลองการหาพฤติกรรมการเผาไหม้ในเตาชีวมวลทรงกระบอก และหาประสิทธิภาพของเตาชีวมวลทรงกระบอก จะมีการติดตั้งอุปกรณ์เครื่องมือวัดเพื่อเก็บข้อมูลดังแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งในรูปแสดงตำแหน่งติดตั้งเครื่องมือวัดอุณหภูมิภายในเตา ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 ชุด ชุดละ 3 ตัว (ชุด A, ชุด B, และ

ชุด C) รวมเครื่องมือวัดอุณหภูมิ ทั้งหมด 9 ตัว โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อวัดอุณหภูมิในแต่ละระดับความสูงภายในเตา โดยมีการวัดอุณหภูมิเปลวไฟภายในเตา (T1A, T1B และ T1C) และเพื่อวัดอุณหภูมิในชั้นของเชื้อเพลิงที่ระยะความลึกต่าง ๆ จากกลางเตาถึงขอบเตาที่เวลาต่าง ๆ (T2A, T2B, T2C, T3A, T3B และ T3C) ซึ่งค่าที่วัดได้จะสามารถนำไปวิเคราะห์หาพฤติกรรมการเผาไหม้ภายในเตา



รูปที่ 7 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิในเตาชีวมวลทรงกระบอก

การหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาหุงต้มที่นิยมใช้และเป็นมาตรฐานคือ วิธีการทดสอบโดยการต้มน้ำ (Water Boiling Test) ซึ่งประยุกต์ใช้ตามมาตรฐานอ้างอิง DIN EN 203-2 ในการทดสอบ โดยการทดลองได้เตรียมน้ำใส่หม้อขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 28 cm บรรจุน้ำ 7.8 kg แล้วบันทึกน้ำหนักและอุณหภูมิน้ำเริ่มต้น นอกจากนั้นยังมีการวัดอุณหภูมิเปลวไฟภายนอกเตา (T0) และอุณหภูมิน้ำเดือด (T₂) จากนั้นเริ่มจุดเตาบันทึกผล อุณหภูมิจุดต่าง ๆ ภายในเตาทุก 30 นาที โดยใช้ Data logger บันทึกผลปริมาณเชื้อเพลิงที่หายไปทุก 1 ชั่วโมง บันทึกอุณหภูมิน้ำเดือด และบันทึกปริมาณน้ำที่หายไปทุก 1 ชั่วโมง เพื่อไปคำนวณหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาชีวมวล ด้วยวิธีการ

ทดสอบมาตรฐานแบบวิธีการต้มเดือดของน้ำ (Water boiling test, WBT) ดังสมการ (1) [5]

$$\eta_{th} = \frac{(MC_p(T_2 - T_1) + (M_1)L) \times 100}{M_f H} \quad (1)$$

เมื่อ η_{th} = ประสิทธิภาพเชิงความร้อน, %

M, M₁ = น้ำหนักของน้ำที่ใช้ทดสอบและน้ำหนักน้ำที่หายไป, kg

C_p = ความร้อนจำเพาะของน้ำ, 4.184 kJ/kg.K

M_f = น้ำหนักของเชื้อเพลิงที่หายไป, kg

T₁ = อุณหภูมิก่อนการทดลอง, °C

T₂ = อุณหภูมิน้ำเดือด, °C

L = ความร้อนแฝงของการกลายเป็นไอของน้ำ,
2676.1 kJ/kg

H = ค่าความร้อนเชื้อเพลิง, kJ/kg

เมื่อเริ่มชั่วโมงที่ 2 ก็นำหม้อใส่ น้ำอุณหภูมิปกติใส่ หม้อใบใหม่ (Cold start) ขนาดหม้อและปริมาณน้ำที่ใส่ เข้าไปในหม้อเท่ากับชั่วโมงเริ่มต้น แล้วบันทึกข้อมูล เพื่อไปคำนวณประสิทธิภาพเชิงความร้อนชั่วโมงที่ 2 การ ทดลองหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนด้วยวิธีการ Water boiling test ดังแสดงในรูปที่ 8



รูปที่ 8 การติดตั้งเครื่องมือทดลองหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนด้วยวิธีการ Water boiling test

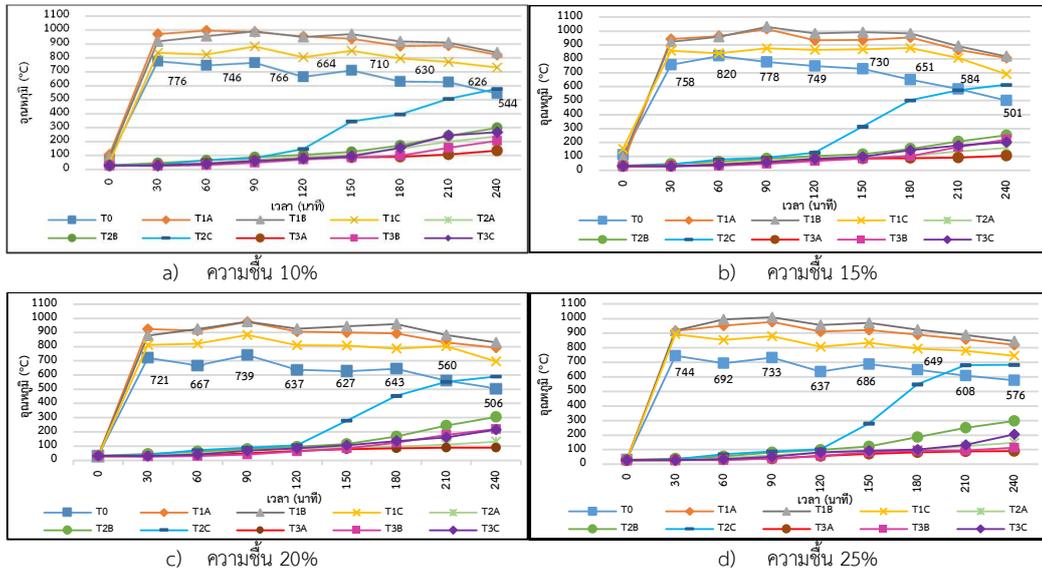
3. ผลการศึกษา

3.1 พฤติกรรมการเผาไหม้ของเตาชีวมวลทรงกระบอก

พฤติกรรมการเผาไหม้ของเตาชีวมวลทรงกระบอก เป็น การศึกษาลักษณะการเผาไหม้ของชีวมวล (ชี้เลื่อย) ในเตา ชิวมวลทรงกระบอก โดยการวัดอุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ของเตา ชิวมวลทรงกระบอก ในขณะที่เริ่มจุดเตา จนกระทั่งดับเตา ซึ่ง อุณหภูมิที่จุดต่าง ๆ ที่บันทึกได้จะบ่งบอกถึงพฤติกรรมการ เผาไหม้ของเตาชีวมวลทรงกระบอก เมื่อนำข้อมูลที่บันทึก ได้มาทำเป็นกราฟ แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิที่จุด ต่าง ๆ กับเวลา จากการทดลองพบว่าพฤติกรรมการเผาไหม้ ของเตาชีวมวลทรงกระบอกที่แรงดันในการอัดเตา 40 bar 80 bar และ 120 bar ทุกความขึ้นจะมีลักษณะของกราฟ

พฤติกรรมการเผาไหม้คล้ายคลึงกันคือ เมื่อเริ่มจุดเตา บริเวณปล่องอากาศเข้าด้านล่างของเตา เปลวไฟจะวิ่งเข้าไป ตามช่องทางเดินอากาศภายในเตา ตามกระแสของอากาศทำให้ชี้เลื่อยในเตาเกิดการติดไฟ การเผาไหม้ในช่วงแรกจะ เกิดขึ้นบริเวณผิวแกนกลางของเชื้อเพลิงซึ่งเป็นลักษณะการ เผาไหม้แบบตรง (Direct combustion) ทำให้บริเวณ อุณหภูมิ T1A T1B และ T1C มีอุณหภูมิสูง ซึ่งอุณหภูมิที่สูง ที่สุดจะเกิดขึ้นบริเวณกึ่งกลางเตา (T1B) มีอุณหภูมิ 1000- 1200°C ส่วนอุณหภูมิของชี้เลื่อยบริเวณกึ่งกลางและขอบ เตา (T2A, T2B, T2C, T1A, T1B และ T1C) เมื่อเริ่มจุดเตา อุณหภูมิบริเวณนี้จะมียังไม่สูงมากประมาณ 25-100°C ใน บริเวณโซนนี้อุณหภูมิไม่สูงแต่ความชื้นในชี้เลื่อยจะลดลง เนื่องจากถูกความร้อนจากโซนการเผาไหม้ทำให้ระเหย ออกมาในรูปของไอน้ำในช่วงแรกของการจุดเตาโซนนี้จะ เป็นโซนการอบแห้ง (Drying Zone) เมื่อเข้าสู่ชั่วโมงที่ 2 ของการทดลองโซนการเผาไหม้ของชี้เลื่อยจะค่อย ๆ ขยับไป บริเวณกึ่งกลางของชี้เลื่อยเป็นแนวรัศมี โดยสังเกตได้จาก อุณหภูมิ T2A, T2B และ T2C จะเพิ่มขึ้นโดยการเผาไหม้ใน โซนนี้ จะเริ่มเผาไหม้บริเวณปล่องทางเข้าของอากาศ (ด้านล่างเตา) ขึ้นไปข้างบนสังเกตจากอุณหภูมิ T2C มากกว่า T2A และ T2B จากรูปที่ 9-11 ที่อุณหภูมิ T2C เพิ่มสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากบริเวณด้านล่างเตาเป็น บริเวณปล่องทางเข้าของอากาศจึงทำให้บริเวณด้านล่างเตา เกิดเป็นโซนการเผาไหม้ทำให้มีอุณหภูมิบริเวณนี้สูง เมื่อเข้า สู่ชั่วโมงที่ 3 ของการทดลองจนกระทั่งเตาดับ โซนการเผา ไหม้จะขยับมาบริเวณขอบเตา (T3A, T3B และ T3C) ซึ่งการ เผาไหม้ของชี้เลื่อยในโซนนี้จะเผาไหม้บริเวณปล่องทางเข้า ของอากาศ (ด้านล่างเตา) ขึ้นไปด้านบนสังเกตจากอุณหภูมิ T3C มากกว่า T3A และ T3B จนกระทั่งบริเวณปล่องไฟ ด้านบนของเตาไม่มีเปลวไฟออกมานั้นคือเตาเริ่มดับ

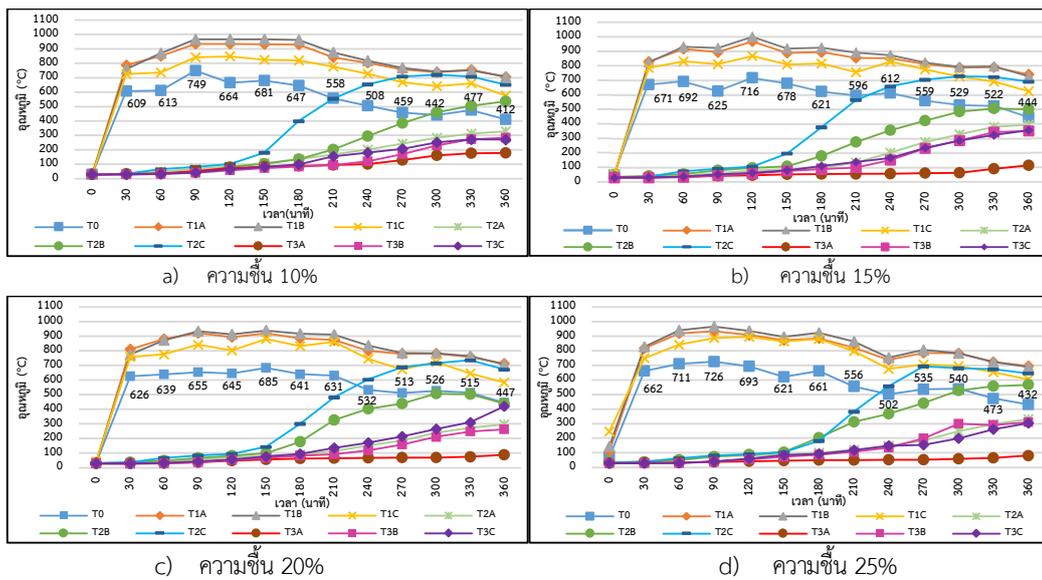
รูปที่ 9 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาใน แต่ละความขึ้นที่แรงดันในการอัดเตา 40 bar จากการทดลอง พบว่ามีระยะเวลาในการเผาไหม้ 4 ชั่วโมง และจากการทดลอง พบว่าอุณหภูมิเปลวไฟเฉลี่ย T0 ที่ความขึ้น 10% 15% 20% และ 25% เท่ากับ 615°C 703°C 661°C และ 662°C



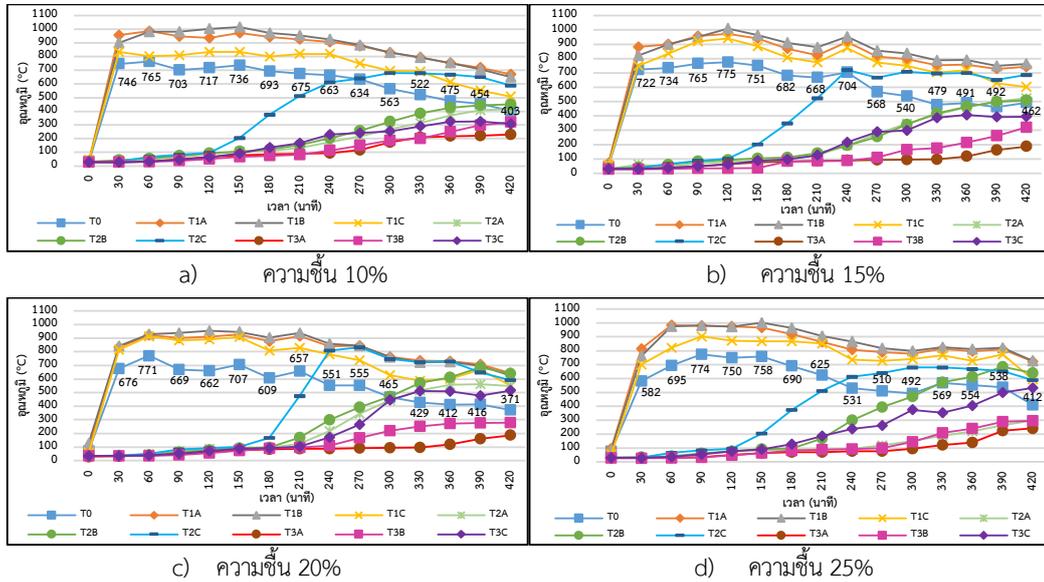
รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่แรงดันการอัด 40 bar

รูปที่ 10 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในแต่ละความชื้นที่แรงดันในการอัดเตา 80 bar จากการทดลองพบว่ามึระยะเวลาในการเผาไหม้ 6 ชั่วโมง และจากการทดลองพบว่าอุณหภูมิเปลวไฟเฉลี่ย T0 ที่ความชื้น 10% 15% 20% และ 25% เท่ากับ 570°C 620°C 585°C และ 596°C

รูปที่ 11 แสดงความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาในแต่ละความชื้นที่แรงดันในการอัดเตา 120 bar จากการทดลองพบว่ามึระยะเวลาในการเผาไหม้ 7 ชั่วโมง และจากการทดลองพบว่าอุณหภูมิเปลวไฟเฉลี่ย T0 ที่ความชื้น 10% 15% 20% และ 25% เท่ากับ 605°C 606°C 588°C และ 597°C



รูปที่ 10 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่แรงดันการอัด 80 bar

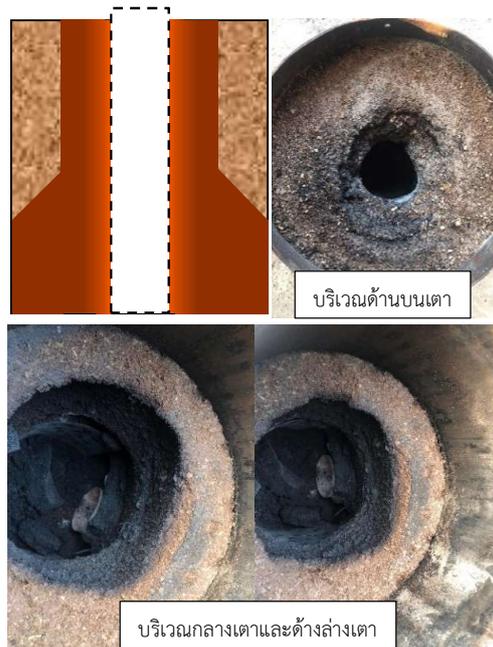


รูปที่ 11 ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิกับเวลาที่แรงดันการอัด 120 bar

เมื่อเตาชีวมวลทรงกระบอกดับ ไม่มีเปลวไฟออก บริเวณปล่องไฟด้านบน จึงได้ปิดทางเข้าของอากาศบริเวณ ด้านล่างเตาและปล่องอากาศบริเวณด้านบนเตาให้สนิท เพื่อให้เตาดับสนิทเพื่อทำการวิเคราะห์การเผาไหม้ของ ชี้อยู่ในเตา พบว่ารูปทรงของชี้อยู่ที่เผาไหม้แล้วภายในเตา จะยังคงสภาพเดิมไม่พังทลาย มีลักษณะเป็นเถ้าดำ และยังมีชี้อยู่บางส่วนที่ยังไม่ได้ถูกทำการเผาไหม้ (Unburn Biomass) ซึ่งเหลือประมาณ 10% ของชี้อยู่ทั้งหมด ดังรูปที่ 12

3.2 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาชีวมวลทรงกระบอก

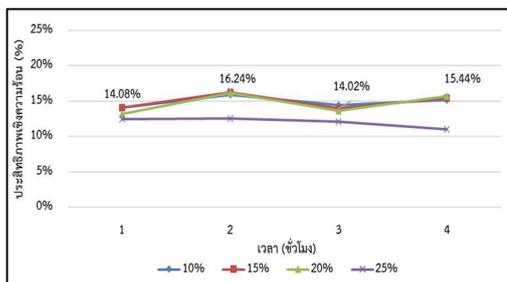
รูปที่ 13 แสดงประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแต่ละ ความชื้นของชี้อยู่เทียบกับในแต่ละชั่วโมง ที่แรงดัน 40 bar พบว่าที่ ความชื้นของชี้อยู่ 15% จะมีค่า ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงที่สุด โดยมีค่าร้อยละ 16.24 ที่ชั่วโมงที่ 2 ของการทดลอง โดยประสิทธิภาพเชิงความร้อนเฉลี่ยที่ความชื้น 15% เท่ากับร้อยละ 14.95 ที่ความชื้นของชี้อยู่ 25% จะมีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่ำที่สุด



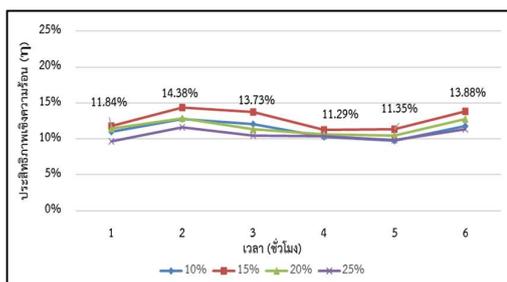
รูปที่ 12 แสดงชี้อยู่ในแต่ละจุดหลังจากเผาไหม้แล้ว

รูปที่ 14 แสดงประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแต่ละ ความชื้นของชี้อยู่เทียบกับในแต่ละชั่วโมง ที่แรงดัน 80 bar พบว่าที่ ความชื้นของชี้อยู่ 15% จะให้ค่า

ประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุด โดยมีค่าร้อยละ 14.38 ที่ชั่วโมงที่ 2 ของการทดลอง โดยประสิทธิภาพเชิงความร้อนเฉลี่ยที่ความชื้น 15% เท่ากับร้อยละ 12.74 ที่ความชื้นของซีลี้อย 25% จะมีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่ำที่สุด



รูปที่ 13 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่แรงดันการอัด
40 bar

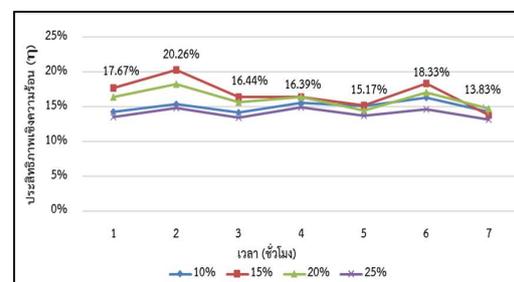


รูปที่ 14 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่แรงดันการอัด
80 bar

รูปที่ 15 แสดงประสิทธิภาพเชิงความร้อนของแต่ละความชื้นของซีลี้อยเทียบกันในแต่ละชั่วโมง ที่แรงดัน 120 bar พบว่าที่ ความชื้นของซีลี้อย 15% จะให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงสุด โดยมีค่าร้อยละ 20.26 ที่ชั่วโมงที่ 2 ของการทดลอง โดยประสิทธิภาพเชิงความร้อนเฉลี่ยที่ความชื้น 15% เท่ากับร้อยละ 16.87 ที่ความชื้นของซีลี้อย 25% จะมีค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่ำที่สุด

จากรูปที่ 13-15 ความชื้นของซีลี้อยส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาชีวมวลทรงกระบอก โดยที่ความชื้นของซีลี้อย 15% มีประสิทธิภาพสูงที่สุด

รองลงมาคือ ความชื้น 20% ความชื้น 10% และความชื้น 25% ตามลำดับ ดังนั้นความชื้นของซีลี้อยที่เหมาะสมกับเตาชีวมวลทรงกระบอกนี้จะอยู่ในช่วง 15%-20% ซึ่งถ้ามีความชื้นมากกว่า 25% คาดว่าการเผาไหม้อาจจะสูญเสียความร้อนให้กับการระเหยน้ำ จึงทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่ำ และถ้าความชื้นของซีลี้อยต่ำกว่า 10% ส่วนใหญ่จะเป็นการเผาตรง (Direct combustion) ซึ่งซีลี้อยที่มีความชื้นต่ำกว่า 10% อาจจะไม่เหมาะสมต่อกระบวนการแก๊สซิฟิเคชัน (Gasification process) ทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่ำ



รูปที่ 15 ประสิทธิภาพเชิงความร้อนที่แรงดันการอัด
120 bar

อนึ่ง การทดสอบหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาชีวมวลทรงกระบอกด้วยวิธีการ Water boiling test ในครั้งนี้ อาจมีความคลาดเคลื่อนและทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนต่ำกว่าที่ควรจะเป็นในทางทฤษฎี ซึ่งในทางทฤษฎี ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาชีวมวลทรงกระบอกที่ทดลองด้วยวิธีการ Water boiling test ในห้องปฏิบัติการที่สามารถควบคุมสภาพแวดล้อมจะมีประสิทธิภาพเชิงความร้อน 35% [2] แต่เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นการทดสอบในสภาวะการใช้งานจริงหรือสภาวะทั่วไปในบรรยากาศเปิด ไม่ได้ควบคุมความร้อนสูญเสีย (Heat loss) ให้คงที่ เนื่องจากสภาพแวดล้อม เช่น ความแรงลม ทิศทางลม อาจจะทำให้เปลี่ยนแปลงตลอดเวลา อย่างไรก็ตาม ในทุกการทดลอง ได้ดำเนินการในสภาวะที่ใกล้เคียง ผลการทดลองจึงเป็นไปได้ในทิศทางเดียวกันทั้งหมด

4. สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาพฤติกรรมผลการเผาไหม้ของเตาชีวมวลทรงกระบอก การหาประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาชีวมวลทรงกระบอก สามารถสรุปได้ดังนี้

1. พฤติกรรมผลการเผาไหม้ของเตาชีวมวลทรงกระบอกทุกแรงดันในการอัดและทุกความชื้นจะมีพฤติกรรมในการเผาไหม้คล้ายคลึงกัน คือ เมื่อเริ่มจุดเตาการเผาไหม้จะเริ่มบริเวณแกนกลางปล่องอากาศอุณหภูมิสูงที่สุดจะเกิดขึ้นบริเวณปล่องอากาศกึ่งกลางเตา อุณหภูมิ 1000 -1200 °C ชั่วโมงที่ 2 การเผาไหม้จะขยับเข้าไปในภายในซีล้อยเป็นแนวรัศมี โดยการสันดาปจะเริ่มจากบริเวณด้านล่างของเตา และชั่วโมงที่ 3 จนกระทั่งเตาดับ โชนกการเผาไหม้จะขยับมาบริเวณขอบเตา ซึ่งการเผาไหม้ของเตานั้นจะเผาไหม้บริเวณปล่องทางเข้าของอากาศ (ด้านล่างเตา) เท่านั้น ลักษณะการเผาไหม้ของเตาชีวมวลทรงกระบอกจะคล้ายรูปประฆังคว่ำ

2. แรงดันในการอัดซีล้อยในเตาชีวมวลทรงกระบอกจะแปรผันตามระยะเวลาในการเผาไหม้ ยังมีแรงดันในการอัดมากยิ่งทำให้ระยะเวลาในการเผาไหม้ต่อเนื่องนาน ที่แรงดันในการอัด 40 bar 80 bar และ 120 bar มีระยะเวลาในการเผาไหม้ต่อเนื่องที่ 4 ชั่วโมง 6 ชั่วโมง และ 7 ชั่วโมง

3. อุณหภูมิเปลวไฟเฉลี่ยสูงที่สุดที่ความชื้นของซีล้อย 15% โดยพบว่าแรงดันในการอัด 40 bar อุณหภูมิเปลวไฟเฉลี่ยเท่ากับ 703°C แรงดันในการอัด 80 bar อุณหภูมิเปลวไฟเฉลี่ยเท่ากับ 620°C และแรงดันในการอัด 120 bar อุณหภูมิเปลวไฟเฉลี่ยเท่ากับ 606°C

4. ประสิทธิภาพเชิงความร้อนเตาชีวมวลทรงกระบอกที่ความชื้นของซีล้อย 15% จะให้ค่าประสิทธิภาพเชิงความร้อนสูงที่สุดที่ชั่วโมงที่ 2 ของการทดลอง โดยที่แรงดัน 40 bar มีค่าร้อยละ 16.24 แรงดัน 80 bar มีค่าร้อยละ 14.38 และแรงดัน 120 bar มีค่าร้อยละ 20.26

5. แรงดันในการอัดแปรผันตรงต่อระยะเวลาการเผาไหม้ของเตาชีวมวลทรงกระบอก ยังมีแรงดันในการอัดมาก ระยะเวลาการเผาไหม้ก็จะเพิ่มขึ้น และความชื้นของซีล้อยมีผลต่ออุณหภูมิของเปลวไฟ เนื่องจากการเผาไหม้

ในเตาชีวมวลทรงกระบอกมีทั้งการเผาไหม้แบบตรง (Direct combustion) และเกิดการเผาไหม้ก๊าซผลิตภัณฑ์ (Gasification process) ซึ่งความชื้นของซีล้อยที่เหมาะสมและทำให้มีอุณหภูมิสูงที่สุดคือ 15%

สรุปว่า เจ็อนไซท์ที่ดีที่สุดในแง่ของประสิทธิภาพเชิงความร้อน ในการใช้เตาชีวมวลทรงกระบอก คือ ควรใช้ซีล้อยที่มีความชื้น 15% อัดที่ 120 bar ทำให้ประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาชีวมวลทรงกระบอกสูงสุดและมีระยะเวลาในการไหม้ต่อเนื่องนาน

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Ministry of Energy. Biomass Potential in Thailand [online] . Available: https://www.dede.go.th/ewt_news.php?nid=486
- [2] S. Jodnok, "Operating Characteristics Validation of a Novel Cylindrical Compression Biomass Stove", in 6TH CONFERENCE ON ENERGY NETWORK OF THAILAND (E-NETT), Bangkok, 2010.
- [3] T. Chaichana, "The Study of Thermal Efficiency of Household Cooking Stove", *Science and Technology Journal Mahasarakham University*, vol. 32, pp. 626-630, 2013.
- [4] W. Khumhem, " The Study of Thermal Efficiency of biomass stove under continuous fuelfeeding" , in 13TH CONFERENCE ON ENERGY NETWORK OF THAILAND (E-NETT), Chiangmai, 2017, pp. 251-256.
- [5] Department of Alternative Energy Development and Efficiency, Ministry of Energy. Development and transfer of production technology and utilization of cylindrical biomass stoves [online] . Available: <http://e-lib.dede.go.th/mm-data/Bib13842-รายงานฉบับสมบูรณ์.pdf>

- [6] T. Jain and P. N. Sheth, “Design of energy utilization test for a biomass cook stove : Formulation of an optimum air flow recipe,” *Energy*, vol. 166, no. 1 pp. 1097-1105, 2019
- [7] A. Hosungnoen and Y. Thanwongsa, “ Rice husk Cooking Stove for Household” , in *The National Graduate Research Conference* , Khon Kaen, 2011, pp. 574-578
- [8] F. Khlaayacchng, T. Chorchong and P. Maneechot, “The performance test of a small biomass gas stove using centrifugal blower for combustion” , in *7th Thailand Renewable Energy for Community Coference*, Nakhon Pathom, 2014, pp. 171-176.
- [9] P. Khaonuan, S. Prasongchan and S. Bordeepong “Performance development of household biomass TLUD cookstove” , *UTK research journal*, vol.14, no.1, pp. 52-62, 2020.
- [10] S. Kaewluan, D. Junthosi , S. Jansri and W. Piyarat “Performance testing of the 20 kW Biomass Gas Stove” , *SWU Engineering Journal*, vol. 18, no. 1, pp. 24-33, 2013

การพัฒนาโปรแกรมเติมค่าสูญหายข้อมูลฝนรายวันจากวิธีถ่วงน้ำหนักระยะทางผกผัน และวิธีถ่วงน้ำหนักสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

Software Development of Missing Daily Rainfall Data from Inverse Distance Weighting and Correlation Coefficient Weighting Method

จันทนา ปัญญาวราภรณ์¹ ศรีสุนี วุฒิวงศ์โยธิน^{2*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ชลบุรี 20131

²ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ชลบุรี 20131

Jantana Panyavaraporn¹ Srisunee Wuthiwongyothin^{2*}

¹Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University, Chonburi, 20131

²Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University, Chonburi, 20131

*Corresponding author Email: srisunee.wu@eng.buu.ac.th

(Received: December 7, 2022; Revised: April 7, 2023; Accepted: May 9, 2023)

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์หลักของการเติมค่าสูญหายข้อมูลฝนรายวันคือต้องการให้ชุดข้อมูลมีความสมบูรณ์ก่อนนำไปศึกษาหรือวิเคราะห์ด้านอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องต่อไป จากเหตุผลข้างต้นงานวิจัยจึงได้นำเสนอการพัฒนาโปรแกรมเติมค่าสูญหายข้อมูลฝนรายวันโดยใช้วิธีถ่วงน้ำหนักระยะทางผกผัน วิธีถ่วงน้ำหนักสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ และวิธีค่าเฉลี่ยคณิตศาสตร์ที่มีการออกแบบส่วนต่อประสานผู้ใช้เพื่อให้ง่ายต่อการใช้งาน จากผลการทดสอบข้อมูลฝนรายวันของสถานีเป้าหมายที่ต้องการเติมค่าสูญหายพบว่าระยะเวลาในการประมวลผลต่อรอบไม่เกิน 22 วินาที ซึ่งระยะเวลาขึ้นอยู่กับปริมาณฝนรายวันและเปอร์เซ็นต์การสูญหาย

คำสำคัญ: วิธีถ่วงน้ำหนักระยะทางผกผัน วิธีถ่วงน้ำหนักสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ การพัฒนาโปรแกรม ส่วนต่อประสานผู้ใช้

ABSTRACT

The main objective to fill missing values of daily rainfall data is to obtain a complete data set before further analysis in other related studies. Therefore, this paper presented a software development to fill the gap of missing daily rainfall data using Inverse Distance Weighting (IDW) method, Correlation Coefficient Weighting (CCW) method and Arithmetic Mean (AM) with user interface (UI) that makes it easy to use. The experimental results showed that the processing time per round was less than 22 seconds based on daily rainfall data and percent of missing rainfall.

Keyword: Inverse Distance Weighting, Correlation Coefficient Weighting, Software Development, User Interface.

1. บทนำ

ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาเป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญเพื่อการวิเคราะห์และประยุกต์ใช้ที่มีประโยชน์ในหลายด้าน เช่น ด้านเกษตรกรรมและชลประทานใช้สำหรับการจัดสรรน้ำเพื่อการเพาะปลูก ด้านสภาพอากาศเพื่อวิเคราะห์ความแปรปรวนและการเปลี่ยนแปลงสภาพอากาศ ด้านสิ่งแวดล้อมเพื่อติดตามคุณภาพน้ำหรือมลภาวะทางอากาศ เช่น ฝุ่น PM 2.5 ตลอดจนการศึกษาเพื่อเตรียมรับมือกับภัยพิบัติ ยกตัวอย่างเช่น น้ำท่วม ดินถล่ม น้ำแล้ง พายุฝน เป็นต้น [1-5] การวิเคราะห์ที่เกี่ยวข้องดังกล่าวจำเป็นต้องใช้ข้อมูลอุตุนิยมวิทยาที่สมบูรณ์ ซึ่งปราศจากการขาดหายของข้อมูลที่เรียกว่า “ค่าสูญหาย”

ปัญหาการเกิดค่าสูญหายของการตรวจวัดข้อมูลอุตุนิยมวิทยาเป็นปัญหาที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ ปัญหาดังกล่าวเกิดจากหลายสาเหตุ ยกตัวอย่างเช่น สาเหตุจากมนุษย์ เช่น ขาดเจ้าหน้าที่จัดบันทึกข้อมูล สาเหตุจากอุปกรณ์ เช่น อุปกรณ์ทำงานขัดข้องหรือเสีย แบตเตอรี่หมด อุปกรณ์เก็บข้อมูลมีความผิดปกติ หรืออาจเกิดจากความผิดปกติจากการสอบเทียบเครื่องมือหรืออุปกรณ์ สาเหตุจากธรรมชาติ เช่น พายุทำให้เกิดการส่งสัญญาณข้อมูลขัดข้องหรือทำให้อุปกรณ์เสียหาย อุปกรณ์เกิดไฟไหม้หรือไฟฟ้าลัดวงจร เป็นต้น [6-8]

แนวทางการแก้ไขค่าสูญหายโดยทั่วไปสามารถทำได้ 2 วิธี ได้แก่ 1) การลบค่าสูญหายหรือค่าปกติทิ้งไป และ 2) การใช้เทคนิคต่าง ๆ เพื่อเติมค่าสูญหาย [9] วิธีการลบค่าสูญหายทิ้งไปเป็นวิธีที่ง่าย สะดวก และรวดเร็ว แต่มีข้อเสียคือวิธีการนี้จะทำให้จำนวนข้อมูลลดลง สูญเสียความต่อเนื่องข้อมูลอนุกรมเวลา (Time series) และส่งผลให้ผลการวิเคราะห์มีความเอนเอียง (Bias results) ส่วนการใช้เทคนิคการเติมค่าสูญหายเป็นวิธีที่มีความยุ่งยากทั้งในแง่การคำนวณและความซับซ้อนของตัวแปรอุตุนิยมวิทยาที่ต้องการเติมค่า เนื่องจากตัวแปรอุตุนิยมวิทยาแต่ละตัวแปรมีลักษณะเฉพาะที่แตกต่างกัน เช่น ข้อมูลอุณหภูมิรายวัน อุณหภูมิเฉลี่ย อุณหภูมิต่ำสุด

อุณหภูมิสูงสุด และความชื้นรายวัน สามารถเติมค่าสูญหายได้ง่ายและค่าที่ได้ค่อนข้างแม่นยำ ทั้งนี้เนื่องจากอุณหภูมิและความชื้นรายวันมีลักษณะการแจกแจงความถี่ข้อมูลแบบปกติ (Normal distribution) [10, 11] ทั้งอุณหภูมิและความชื้นมีรูปแบบหรือช่วงค่าข้อมูลที่ชัดเจนทั้งในระหว่างวันหรือตามฤดูกาล ส่วนการเติมค่าสูญหายข้อมูลฝนรายวันจะมีความยุ่งยากและซับซ้อนมากกว่า เนื่องจากลักษณะข้อมูลฝนรายวันมีค่าไม่คงที่ มีการแจกแจงความถี่แบบไม่ปกติ (Non-normal distribution) ทั้งนี้เนื่องจากฝนรายวันประกอบด้วยความน่าจะเป็นของวันฝนตกและวันฝนไม่ตก ซึ่งมีลักษณะข้อมูลแบบไม่ต่อเนื่อง ส่วนวันที่มีฝนตกปริมาณฝนที่ตก ซึ่งวัดเป็นความลึก (ประเทศไทยวัดเป็นหน่วยมิลลิเมตร) มีปริมาณฝนที่แตกต่างกันไปตามพายุฝน การศึกษาทั่วไปพบว่าปริมาณฝนมีการแจกแจงความถี่แบบแกมมา [7, 12-14]

มีการศึกษาและทดสอบวิธีการเติมค่าสูญหายข้อมูลฝนรายวันมากมายในพื้นที่ต่าง ๆ ทั่วโลกพบว่าวิธีการประมาณค่าในช่วงเชิงพื้นที่เป็นวิธีการที่นิยมใช้มากที่สุดวิธีหนึ่งคือวิธีค่าเฉลี่ยคณิตศาสตร์ (AM) ซึ่งเป็นวิธีการหนึ่งที่คำนวณง่ายและมีประสิทธิภาพ แต่วิธีถ่วงน้ำหนักระยะทางผกผัน (IDW) ก็เป็นอีกวิธีที่ได้รับความนิยมเช่นกัน นอกจากนี้ยังมีวิธีสัดส่วนปกติ (Normal ratio) วิธีถ่วงน้ำหนักค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (CCW) และวิธีถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (MLR) เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพในการเติมค่าสูญหาย

Longman และคณะ [15] ศึกษาเปรียบเทียบวิธีการประมาณค่าเชิงพื้นที่ 5 วิธี ได้แก่ วิธีค่าเฉลี่ยคณิตศาสตร์ (AM) วิธีถ่วงน้ำหนักระยะทางผกผัน (IDW) วิธีสัดส่วนปกติ (NR) วิธีวิธีถ่วงน้ำหนักสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (CCW) และวิธีถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (MLR) พบว่าทุกวิธีดังกล่าวมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกันโดยให้ค่าทางสถิติไม่แตกต่างกันในการเติมค่าสูญหายข้อมูลขนาดใหญ่สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Wuthiwongyothin และคณะ [16] ที่ได้ทดสอบการเติมค่าสูญหายข้อมูลฝนรายวันเพื่อประเมินประสิทธิภาพระหว่างวิธี IDW และ CCW ผลการศึกษา

พบว่าทั้ง 2 วิธีให้ผลทางสถิติไม่แตกต่างกันมาก แม้ว่าวิธี CCW จะให้ความคลาดเคลื่อนน้อยกว่าวิธี IDW ก็ตาม นอกจากนี้การศึกษาดังกล่าวยังได้เปรียบเทียบการเติมค่าสูญหายระหว่างชุดข้อมูลที่มีการสูญหายที่มีเปอร์เซ็นต์การสูญหายแตกต่างกันตั้งแต่ 5%, 10%, 20%, 30%, 40% และ 50% พบว่าเปอร์เซ็นต์การสูญหายของข้อมูลไม่มีผลต่อประสิทธิภาพในการเติมค่าสูญหายด้วยวิธี IDW และ CCW ทั้งนี้เนื่องจากทั้ง 2 วิธีนี้เป็นวิธีการประมาณค่าในช่วงเชิงพื้นที่ที่ใช้ข้อมูลจากสถานีใกล้เคียงเพื่อคำนวณค่าที่สูญหาย

งานวิจัยมุ่งเน้นการพัฒนาโปรแกรมที่มีส่วนต่อประสานผู้ใช้ (UI) สำหรับการเติมค่าสูญหายข้อมูลฝนรายวัน โดยพัฒนาเพิ่มเติมจากงานวิจัยที่ [17] ที่พัฒนาไว้เฉพาะการเติมค่าสูญหายด้วยวิธีถ่วงน้ำหนักระยะทางผกผัน งานวิจัยนี้ได้พัฒนาวิธีถ่วงน้ำหนักสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพิ่มเติม นอกจากนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้กับวิธีค่าเฉลี่ยคณิตศาสตร์ (AM) ได้เพื่อเพิ่มโอกาสให้ผู้ใช้งานหรือผู้สนใจสามารถเลือกวิธีการเติมค่าสูญหายได้ตามต้องการหรือตามข้อจำกัดที่มีอยู่ ประโยชน์ที่ได้จากการพัฒนาโปรแกรมนี้สามารถช่วยลดระยะเวลาในการประมวลผลและสะดวกต่อผู้ใช้งาน ซึ่งสามารถช่วยให้ผู้ใช้งานเติมค่าสูญหายข้อมูลได้อย่างสะดวกและรวดเร็วส่งผลให้มีการนำข้อมูลไปใช้ศึกษาวิเคราะห์ในด้านอื่น ๆ ได้มากขึ้น

2. วิธีการเติมค่าสูญหายข้อมูลฝนรายวัน

งานวิจัยนี้ใช้วิธีการเติมค่าสูญหายข้อมูลฝนรายวัน 3 วิธี ได้แก่ วิธีค่าเฉลี่ยคณิตศาสตร์ (Arithmetic Mean : AM) วิธีถ่วงน้ำหนักระยะทางผกผัน (Inverse Distance Weighting : IDW) และวิธีถ่วงน้ำหนักสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation Coefficient Weighting : CCW)

2.1 วิธีถ่วงน้ำหนักระยะทางผกผัน

วิธีถ่วงน้ำหนักระยะทางผกผันเป็นวิธีการประมาณค่าในช่วงเชิงพื้นที่ที่นิยมมากที่สุดวิธีหนึ่งในเติมค่าสูญหาย

ข้อมูลฝนรายวัน การประมาณค่าจะใช้ข้อมูลจากสถานีข้างเคียง (P_i) ที่อยู่ใกล้ที่สุดจำนวน n สถานีที่มีข้อมูลฝนรายวันนำมาคำนวณตามสมการที่ (1) โดยค่าถ่วงน้ำหนัก (W_i) ของแต่ละสถานีหาจากส่วนกลับของระยะห่างระหว่างสถานีเป้าหมายและสถานีข้างเคียงดังสมการที่ (2)

$$\hat{P} = \sum_{i=1}^n W_i P_i \quad (1)$$

$$W_i = \frac{d_i^{-k}}{\sum_{i=1}^n d_i^{-k}} \quad (2)$$

เมื่อ \hat{P} คือปริมาณน้ำฝนของสถานีที่ไม่ทราบค่า (มม.)

P_i คือปริมาณน้ำฝนจากสถานีที่ทราบค่า (มม.)

n คือจำนวนสถานีอ้างอิง

k คือค่ายกกำลัง

d_i คือระยะระหว่างสถานีเป้าหมายกับสถานีข้างเคียง

สามารถหาได้จากสมการที่ (3)

$$d_i = \sqrt{(x-x_i)^2 + (y-y_i)^2} \quad (3)$$

เมื่อ x คือพิกัดแกน x ของสถานีเป้าหมาย

x_i คือพิกัดแกน x ของสถานีข้างเคียง

y คือพิกัดแกน y ของสถานีเป้าหมาย

y_i คือพิกัดแกน y ของสถานีข้างเคียง

2.2 วิธีถ่วงน้ำหนักสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์

วิธีถ่วงน้ำหนักสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เป็นวิธีที่ใช้สำหรับเติมค่าสูญหายข้อมูลฝนรายวันโดยพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ดังสมการที่ (4)

$$\hat{P} = \frac{\sum_{i=1}^n P_i r_i^k}{\sum_{i=1}^n r_i^k} \quad (4)$$

เมื่อ \hat{P} คือปริมาณน้ำฝนของสถานีที่ไม่ทราบค่า (มม.)

P_i คือปริมาณน้ำฝนจากสถานีที่ทราบค่า (มม.)

n คือจำนวนสถานีอ้างอิง

k คือค่ายกกำลัง

r_i คือค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson Correlation) ระหว่างสถานีเป้าหมายและสถานีอ้างอิงหรือสถานีข้างเคียงที่คำนวณจากสมการที่ (5)

$$r_i = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}} \quad (5)$$

เมื่อ x_i คือค่าของปริมาณฝนของสถานีเป้าหมาย

\bar{x} คือค่าเฉลี่ยของปริมาณฝนของสถานีเป้าหมาย

y_i คือค่าของปริมาณฝนของสถานีข้างเคียง

\bar{y} คือค่าเฉลี่ยของปริมาณฝนของสถานีข้างเคียง

2.3 วิธีค่าเฉลี่ยคณิตศาสตร์

วิธีค่าเฉลี่ยคณิตศาสตร์ (AM) เป็นวิธีประมาณค่าและเติมค่าสูญหายอย่างง่ายโดยใช้การเฉลี่ยข้อมูลฝนของสถานีข้างเคียงที่ทราบค่า นิยมใช้ข้อมูลตั้งแต่ 3 สถานีขึ้นไป เพื่อเฉลี่ยน้ำฝนให้กับสถานีที่มีข้อมูลฝนสูญหายดังสมการที่ (6)

$$\hat{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \quad (6)$$

เมื่อ \hat{P} คือปริมาณน้ำฝนของสถานีที่ไม่ทราบค่า (มม.)

P_i คือปริมาณน้ำฝนจากสถานีที่ทราบค่า (มม.)

n คือจำนวนสถานีอ้างอิง

ทั้งนี้การคำนวณด้วยวิธีค่าเฉลี่ยคณิตศาสตร์สามารถประยุกต์ใช้โปรแกรมในส่วนของวิธี IDW โดยการเลือกค่ายกกำลัง (k) ของวิธี IDW เท่ากับ 1 ฉะนั้นงานวิจัยนี้จึงอธิบายการพัฒนาโปรแกรมและการทดสอบโปรแกรมเฉพาะในส่วนของวิธี IDW และ CCW เท่านั้น

3. การพัฒนาโปรแกรมเติมค่าสูญหายข้อมูลฝน

วิธีดำเนินงานวิจัยประกอบด้วย 2 ส่วนหลักดังนี้

3.1 ขั้นตอนการเตรียมข้อมูล

เริ่มด้วยการจัดเตรียมข้อมูลฝนรายวันในไฟล์ excel ที่ประกอบด้วย 2 ซีทหลักคือ Coordinate และ data ตามงานวิจัยที่ [17] ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 1

ซีท Coordinate ประกอบด้วย 3 คอลัมน์ดังตัวอย่างในรูปที่ 1(ก) ได้แก่ คอลัมน์แรกคือรหัสของสถานีฐานและคอลัมน์ที่ 2-3 เป็นพิกัดสถานีฐานตามแนวแกน x และ y ตามลำดับ

ซีท data (รูปที่ 1(ข)) ประกอบด้วย ลำดับที่ ค.ศ. เดือน วัน และข้อมูลฝนรายวันของแต่ละสถานีโดยต้องเรียงลำดับสถานีตามซีท Coordinate

	A	B	C
1	Station Code	x	y
2	70480	495,017	2,112,268
3	70420	497,908	2,100,463
4	70440	497,677	2,105,663
5	70391	501,446	2,077,638
6	70450	499,718	2,093,492
7	70540	518,154	2,081,210
8	70550	516,550	2,072,269
9	327016	496,159	2,141,311
10	327006	521,160	2,141,291
11	327005	494,176	2,114,116
12	327501	497,085	2,083,226
13	327004	514,247	2,086,462

(ก) พิกัด

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J
1		Year	Month	ชื่อสถานี	70480	70420	70440	70391	70450	70540
2	1	1953	1	1/1/1953	0	0	0	NA	0	NA
3	2	1953	1	1/2/1953	0	0	0	NA	0.1	NA
4	3	1953	1	1/3/1953	0	0	0	NA	0	NA
5	4	1953	1	1/4/1953	0	0	0	NA	0	NA
6	5	1953	1	1/5/1953	0	0	0	NA	0	NA
7	6	1953	1	1/6/1953	0	0	0	NA	0	NA
8	7	1953	1	1/7/1953	0	0	0	NA	0	NA
9	8	1953	1	1/8/1953	0	0	0	NA	0	NA
10	9	1953	1	1/9/1953	0	0	0	NA	0	NA
11	10	1953	1	1/10/1953	0	0	0	NA	0	NA
12	11	1953	1	1/11/1953	0	0	0	NA	0	NA
13	12	1953	1	1/12/1953	0	0	0	NA	0	NA
14	13	1953	1	1/13/1953	0	0	0	NA	0	NA
15	14	1953	1	1/14/1953	0	0	0	NA	0	NA
16	15	1953	1	1/15/1953	0	0	0	NA	0	NA

(ข) ข้อมูลฝนรายวัน

รูปที่ 1 ตัวอย่างการจัดเตรียมข้อมูล

3.2 การออกแบบโปรแกรมส่วนต่อประสานผู้ใช้

การออกแบบส่วนต่อประสานผู้ใช้เพื่อให้ง่ายต่อการใช้งานโปรแกรมเติมค่าสูญหายข้อมูลฝนรายวันแบ่งออกเป็น 4 ส่วน (รูปที่ 2) ดังนี้

1. การเติมค่าสูญหายด้วยวิธีถ่วงน้ำหนักระยะทาง ผกผันสำหรับบางสถานีดังรูปที่ 2(ก)
2. การเติมค่าสูญหายด้วยวิธีถ่วงน้ำหนักระยะทาง ผกผันสำหรับทุกสถานีดังรูปที่ 2(ข)
3. การเติมค่าสูญหายด้วยวิธีถ่วงน้ำหนัก สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สำหรับบางสถานีดังรูปที่ 2(ค)

station code:
 number of stations:
 power:

(ก) วิธี IDW บางสถานี

number of stations:
 power:

(ข) วิธี IDW ทุกสถานี

station code:
 number of stations:
 power:

(ค) วิธี CCW บางสถานี

number of stations:
 power:

(ง) วิธี CCW ทุกสถานี
รูปที่ 2 ส่วนต่อประสานผู้ใช้

4. การเติมค่าสูญหายด้วยวิธีถ่วงน้ำหนัก
สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์สำหรับทุกสถานีดังรูปที่ 2(ง)

องค์ประกอบส่วนต่อประสานผู้ใช้สำหรับการเติมค่าสูญหายข้อมูลฝนรายวันบางสถานีดังตารางที่ 1 และการเติมค่าสูญหายข้อมูลฝนรายวันทุกสถานีจะตัดส่วนที่ให้เลือกสถานีออกไป ซึ่งองค์ประกอบอื่น ๆ จะเหมือนกับ การเติมค่าสูญหายบางสถานี

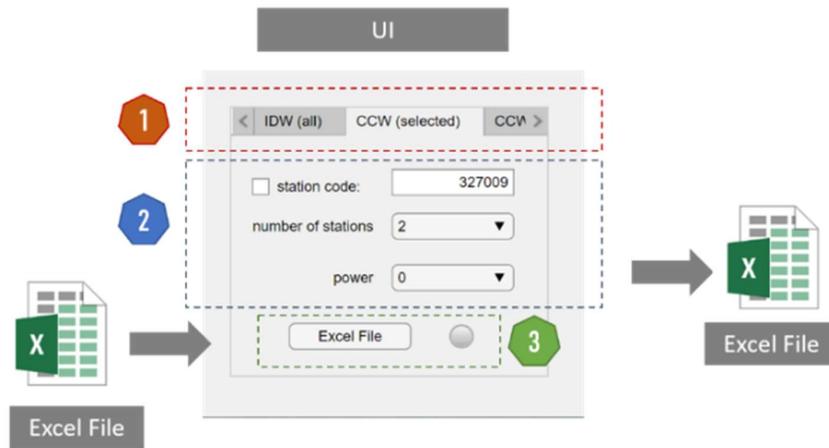
ตารางที่ 2 อธิบายความหมายของสีไฟสถานะ ขณะเริ่มต้นใช้งานไฟสถานะจะเป็นสีเทา หลังจากโหลดข้อมูลฝนรายวันเสร็จไฟสถานะจะเปลี่ยนเป็นสีเขียว เมื่อประมวลผลเสร็จสมบูรณ์ไฟสถานะจะเปลี่ยนเป็นสีเขียว หากเกิดความผิดพลาดขึ้นไฟสถานะจะเปลี่ยนเป็นสีแดง

ตารางที่ 1 องค์ประกอบส่วนต่อประสานผู้ใช้ (บางสถานี)

	องค์ประกอบ
edit field	<input type="checkbox"/> station code: <input type="text" value="327009"/> หน้าที่ ใส่รหัสสถานีที่ต้องการเติมค่าสูญหาย
drop down	number of stations <input type="text" value="2"/> หน้าที่ เลือกจำนวนสถานีอ้างอิง (n)
	power <input type="text" value="0"/> หน้าที่ เลือกค่ายกกำลัง (k)
button	<input type="button" value="Excel File"/> หน้าที่ โหลดไฟล์ excel ที่จัดเตรียมตามหัวข้อ 3.1
lamp	<input type="radio"/> หน้าที่ ไฟแสดง

ตารางที่ 2 ไฟสถานะ

สี	ความหมาย
สีเทา	<input type="radio"/> เริ่มต้นใช้งานโปรแกรม
สีขาว	<input type="radio"/> กำลังประมวลผล
สีเขียว	<input checked="" type="radio"/> ประมวลผลเสร็จสมบูรณ์
สีแดง	<input type="radio"/> มีข้อผิดพลาด (error)



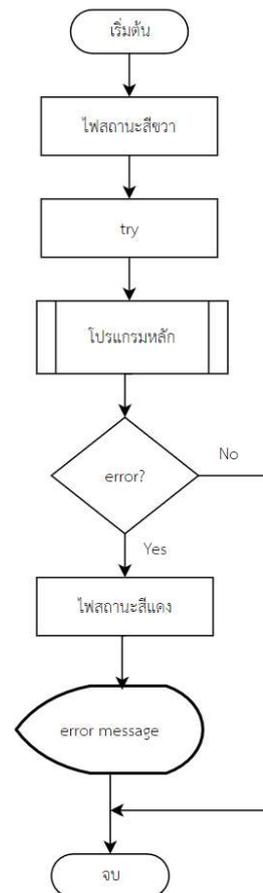
รูปที่ 3 ภาพรวมของโปรแกรม

3.3 การออกแบบและเขียนโปรแกรม

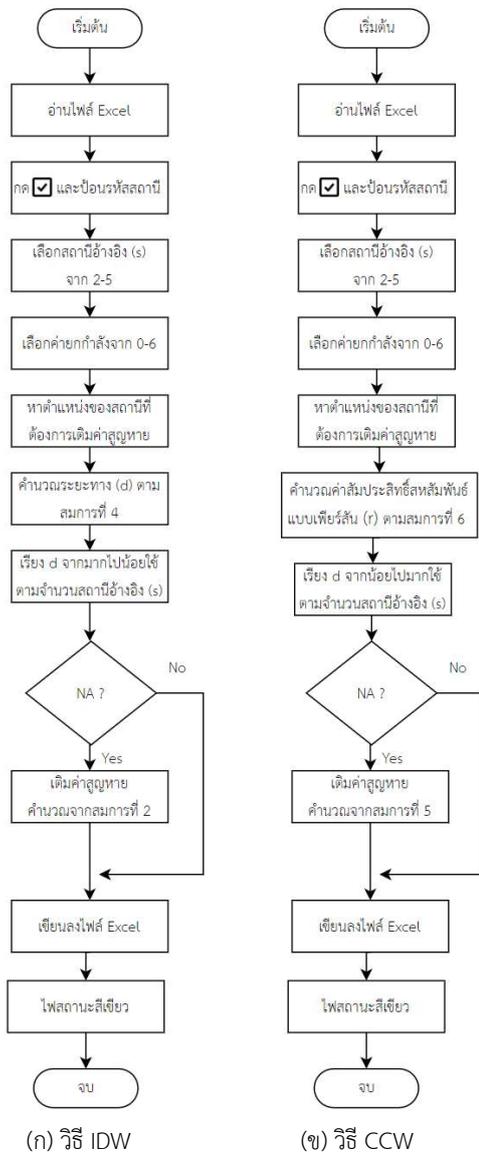
ส่วนต่อประสานผู้ใช้ (UI) ดังรูปที่ 3 และขั้นตอนการทำงาน
 ของโปรแกรมตามผังงานในรูปที่ 4 เริ่มต้นที่การเตรียมไฟล์ข้อมูลตามหัวข้อที่ 3.1 เลือกวิธีที่ต้องการใช้โดย
 กดไปที่แท็บ (tap) ที่อยู่ด้านบน หลังจากนั้นใส่รหัสสถานี
 (เฉพาะเลือกเติมค่าสูญหายบางสถานี) เลือกจำนวนสถานี
 อ้างอิงและค้ายกกำลัง แล้วกดปุ่มโหลดไฟล์ excel เมื่อ
 โหลดไฟล์เสร็จโปรแกรมจะเริ่มทำงานทันที ไฟล์สถานะจะ
 เปลี่ยนจากสีเทาเป็นสีขาว เมื่อประมวลผลเสร็จสมบูรณ์
 ไฟล์สถานะจะเปลี่ยนจากสีขาวเป็นสีเขียว ผลลัพธ์หลังจาก
 เติมค่าสูญหายจะอยู่ในไฟล์เดิม หากพบข้อผิดพลาดใน
 การประมวลผล ไฟล์สถานะจะเปลี่ยนเป็นสีแดงพร้อมแสดง
 ข้อความที่ผิดพลาด

ผังงานโปรแกรมหลักของวิธี IDW และ CCW ตามรูป
 ที่ 5 ใช้สำหรับเติมค่าสูญหายข้อมูลฝนเพียงบางสถานีโดย
 ในไฟล์ excel ข้อมูลที่สูญหายจะเป็น NA ตามตัวอย่างใน
 รูปที่ 1(ข) โปรแกรมจะคำนวณโดยใช้วิธี IDW หรือ CCW
 เฉพาะในส่วนที่เป็น NA เพื่อเติมข้อมูลที่สูญหายให้มีความ
 สมบูรณ์ขึ้น

กรณีที่ต้องการเติมค่าสูญหายทุกสถานีจะตัดส่วนการ
 ป้อนรหัสสถานีออกไป (รูปที่ 2(ข) และรูปที่ 2(ง)) และใช้
 หลักการวนรอบโปรแกรมเข้ามาช่วย ซึ่งโปรแกรมจะเติม
 ค่าสูญหายทีละสถานีและทำไปจนครบทุกสถานี



รูปที่ 4 ผังงานโปรแกรม



รูปที่ 5 ผังงานโปรแกรมหลัก

4. ผลการทดสอบโปรแกรม

จัดเตรียมไฟล์ excel ตามหัวข้อที่ 3.1 แบ่งทดสอบออกเป็น 3 หัวข้อ ได้แก่ ทดสอบเวลาการประมวลผลของวิธี IDW และ CCW ทดสอบความแม่นยำของวิธี IDW และ CCW และทดสอบภาพรวมของโปรแกรม การทดสอบจะใช้คอมพิวเตอร์ที่มีรายละเอียดดังนี้ Processor: Intel(R) Core(TM) i5-6300U CPU @ 2.40 GHz, RAM 8 GB

4.1 ทดสอบเวลาการประมวลผล

ข้อมูลฝนรายวันจากกรมอุตุนิยมวิทยาจำนวน 21 สถานีที่เก็บข้อมูลฝนตั้งแต่ปี 1953-2017 ปรับสถานีอ้างอิงจาก 2 ถึง 5 สถานีและปรับค่ายกกำลัง (k) จาก 2 ถึง 6 ที่ค่าสูญหาย 25% โดยเติมข้อมูลสูญหายทุกสถานีจากวิธี IDW และ CCW

จากตารางที่ 3-4 พบว่าการปรับค่ายกกำลังจะไม่ส่งผลกระทบต่อเวลาการประมวลผล แต่สถานีอ้างอิงที่เพิ่มขึ้นจะทำให้เวลาในการประมวลผลเพิ่มขึ้นเล็กน้อยประมาณ 1-3 วินาที

เวลาเฉลี่ยเมื่อปรับสถานีอ้างอิงเป็น 2, 3, 4, 5 ของวิธี IDW จะเป็น 13.6401, 13.9693, 14.7894, 15.4775 ตามลำดับ เวลาเฉลี่ยเมื่อปรับสถานีอ้างอิงเป็น 2, 3, 4, 5 ของวิธี CCW จะเป็น 17.4718, 18.3243, 19.3465, 19.5639 ตามลำดับ สังเกตเห็นว่าเวลาที่ใช้ประมวลผลวิธี IDW จะเร็วกว่าวิธี CCW ประมาณ 4-5 วินาที เนื่องจากวิธี CCW จะต้องคำนวณค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (r) ใหม่ทุกครั้งและการคำนวณดังกล่าวซับซ้อนกว่าการหารระยะทาง (d) ของวิธี IDW

ตารางที่ 3 เวลาประมวลผลทุกสถานีโดยใช้วิธี IDW

สถานีอ้างอิง	เวลาประมวลผล (วินาที)					
	k=1	k=2	k=3	k=4	k=5	k=6
2	13.908054	13.757009	13.416688	13.568592	13.596811	13.593227
3	14.129896	13.86935	14.312564	13.777607	13.84318	13.883291
4	14.882605	14.893145	14.844019	14.928668	14.591619	14.596453
5	15.642298	15.122172	15.548478	15.235299	15.651526	15.66502

ตารางที่ 4 เวลาประมวลผลทุกสถานีโดยใช้วิธี CCW

สถานีอ้างอิง	เวลาประมวลผล (วินาที)					
	k=1	k=2	k=3	k=4	k=5	k=6
2	17.437499	17.096237	17.324721	17.319122	17.594146	18.059228
3	18.744301	18.866384	17.739688	17.817686	17.836506	18.941033
4	19.467195	19.550776	19.274217	18.96424	19.317065	19.505602
5	19.657187	19.980126	19.089027	19.601391	19.658373	19.397295

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบเวลาประมวลผลบางสถานีโดยใช้วิธี IDW และ CCW

%loss	เวลาประมวลผล (วินาที)							
	สถานีอ้างอิง = 2		สถานีอ้างอิง = 3		สถานีอ้างอิง = 4		สถานีอ้างอิง = 5	
	IDW	CCW	IDW	CCW	IDW	CCW	IDW	CCW
10%	17.035947	20.667081	16.458088	20.761174	17.031428	21.385087	16.763871	21.161998
20%	16.39082	20.619572	16.835956	19.781475	17.324572	19.787727	16.950711	20.45717
30%	16.900214	19.064283	16.770759	19.203781	16.98213	20.55698	17.215333	20.379343
40%	17.381643	19.137946	17.39079	20.217672	17.926935	19.998438	17.043716	19.920725

ทดสอบเวลาประมวลผลบางสถานี เมื่อสถานี 327009 มีค่าสูญหายที่ 10%, 20%, 30% และ 40% ตามลำดับ เนื่องจากค่ายกกำลังไม่ส่งผลต่อเวลาในการประมวลผล การทดลองนี้จึงระบุค่ายกกำลัง (k) ที่ 2 และปรับสถานีอ้างอิง ผลการทดลองดังตารางที่ 5 พบว่าเวลาการประมวลผลวิธี CCW จะสูงกว่าวิธี IDW เล็กน้อย ประมาณ 2-4 วินาที

4.2 ทดสอบความแม่นยำ (accuracy)

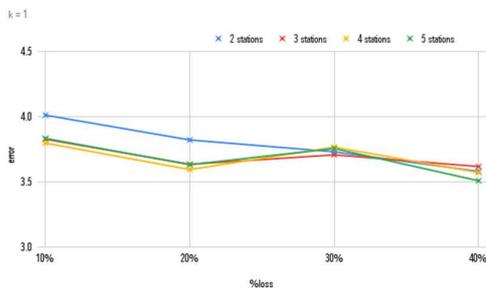
ข้อมูลฝนรายวันจากกรมอุตุนิยมวิทยาจำนวน 21 สถานีที่เก็บข้อมูลฝนตั้งแต่ปี 1953-2017 ปรับสถานีอ้างอิงจาก 2 ถึง 5 สถานี และปรับค่ายกกำลัง (k) จาก 1 ถึง 5 เมื่อสถานี 327009 มีที่ค่าสูญหาย 10%, 20%, 30% และ 40% ตามลำดับ ใช้วิธี CCW สำหรับเติมค่าข้อมูลที่สูญหาย

เมื่อปรับค่ายกกำลัง (k) จาก 1 ถึง 5 แนวโน้มของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดเป็นไปในทิศทางเดียวกันดังตารางที่ 6 และรูปที่ 6 เมื่อจำนวนสถานีอ้างอิงเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้ค่าความผิดพลาดลดลง แต่บางกรณีไม่จำเป็นต้องใช้ที่จำนวนสถานีอ้างอิงสูงสุด จึงสรุปได้ว่าควรเลือกใช้สถานีอ้างอิงมากกว่า 2 สถานีสำหรับเติมค่าสูญหายข้อมูลฝนรายวันวิธี CCW ซึ่งจำนวนสถานีอ้างอิงที่เหมาะสมจะขึ้นอยู่กับสภาพพื้นที่ด้วย

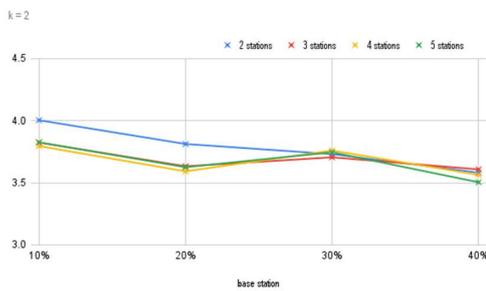
ตารางที่ 6 ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดของวิธี CCW

%loss	k	ค่าเฉลี่ยความผิดพลาด			
		2 สถานี	3 สถานี	4 สถานี	5 สถานี
10%	1	4.0115	3.8268	3.7973	3.8333
	2	4.0034	3.8242	3.7956	3.8254
	3	3.9959	3.8218	3.7941	3.8183
	4	3.9884	3.8194	3.7927	3.812
	5	3.9817	3.8174	3.7915	3.8067
20%	1	3.8214	3.6349	3.5941	3.6317
	2	3.8122	3.6329	3.5921	3.6254
	3	3.8036	3.6315	3.5911	3.6196
	4	3.7953	3.6303	3.5906	3.6139
	5	3.7878	3.6297	3.5903	3.6084
30%	1	3.7305	3.707	3.7665	3.7557
	2	3.7309	3.705	3.7597	3.7454
	3	3.7317	3.7032	3.7532	3.7364
	4	3.7326	3.7019	3.7469	3.7282
	5	3.7334	3.7013	3.7411	3.7205
40%	1	3.5802	3.6172	3.5709	3.5082
	2	3.5816	3.6077	3.5634	3.5042
	3	3.5838	3.5992	3.5565	3.5012
	4	3.5868	3.5919	3.5504	3.4992
	5	3.5906	3.5857	3.5453	3.4982

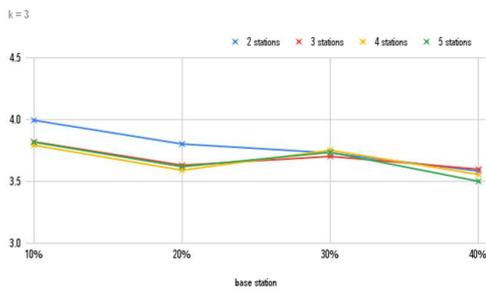
เมื่อ k คือค่ายกกำลัง



(ก) k = 1



(ข) k = 2



(ค) k = 3

รูปที่ 6 ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดของวิธี CCW

ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดวิธี IDW พิจารณาได้จากงานวิจัยที่ [17] หลังจากนั้นทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความผิดพลาดเมื่อปรับสถานีอ้างอิงจาก 2 ถึง 5 สถานี และค่ายกกำลัง (k) เท่ากับ 2 ผลที่ได้ดังตารางที่ 7 พบว่าวิธี IDW ให้ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดน้อยที่สุดเมื่อใช้สถานี

อ้างอิงสูงสุด (5 สถานี) แต่วิธี CCW จะใช้สถานีอ้างอิงมากกว่า 2 สถานี

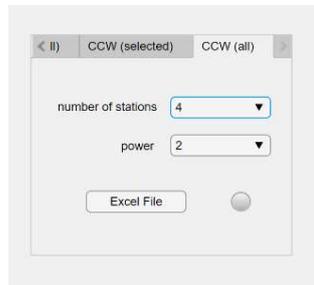
ตารางที่ 7 ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดของวิธี IDW และ CCW

%loss	ค่าเฉลี่ยความผิดพลาด							
	สถานีอ้างอิง = 2		สถานีอ้างอิง = 3		สถานีอ้างอิง = 4		สถานีอ้างอิง = 5	
	IDW	CCW	IDW	CCW	IDW	CCW	IDW	CCW
10%	4.3841	4.0034	4.098	3.8242	3.9541	3.7956	3.8548	3.8254
20%	4.3106	3.8122	3.983	3.6329	3.8085	3.5921	3.7054	3.6254
30%	4.5379	3.7309	4.1592	3.705	3.9744	3.7597	3.8643	3.7454
40%	4.3118	3.5816	3.9619	3.6077	3.8007	3.5634	3.6998	3.5042

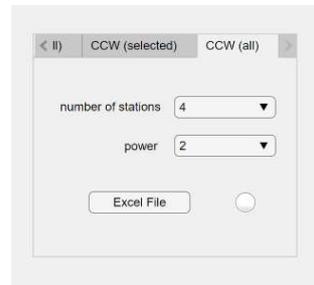
4.3 ทดสอบภาพรวมของโปรแกรม

ทดสอบการใช้งานส่วนต่อประสานผู้ใช้ (User Interface) โดยใช้วิธี CCW เติมค่าสูญหายข้อมูลฝนรายวันทุกสถานี เริ่มต้นจากการเลือกจำนวนสถานีอ้างอิงและค่ายกกำลัง ขั้นตอนนี้ของไฟสถานะจะเป็นสีเขียว (รูปที่ 7(ก)) หลังจากนั้นกดปุ่มเพื่อโหลดไฟล์ excel ที่เตรียมไว้ดังตัวอย่างในรูปที่ 8(ก) ไฟสถานะจะเปลี่ยนเป็นสีขาว ดังรูปที่ 7(ข) แสดงว่าอยู่ในขั้นตอนการประมวลผล หลังจากประมวลผลเสร็จสมบูรณ์ไฟสถานะจะเปลี่ยนเป็นสีเขียว (รูปที่ 7(ค)) และผลลัพธ์หลังจากเติมค่าสูญหายข้อมูลฝนจะอยู่ในไฟล์ excel เติมในชีทชื่อ result ดังตัวอย่างในรูปที่ 8(ข)

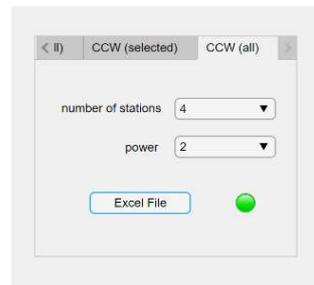
กรณีที่เกิดความผิดพลาดขึ้นไฟสถานะจะมี error dialog แจ้งว่าเกิดความผิดพลาดจากส่วนใด ตัวอย่างในรูปที่ 9 เป็น error dialog เมื่อไม่ได้เตรียมไฟล์ excel ตามหัวข้อที่ 3.1 หลังจากกดปุ่ม OK ใน error dialog ไฟสถานะก็จะเปลี่ยนเป็นสีแดงดังรูปที่ 7(ง)



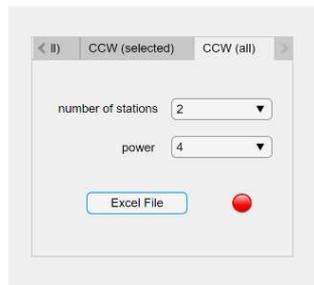
(ก) รอประมวลผล



(ข) กำลังประมวลผล



(ค) เสร็จสมบูรณ์



(ง) เมื่อเกิดข้อผิดพลาด

รูปที่ 7 ทดสอบไฟสถานะ

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
1	Year	Month	วันที่	70480	70420	70440	70391	70450	70540	70550	327016
2	1953	1	1/1/1953	0	0	0	NA	0	NA	NA	0
3	1953	1	1/2/1953	0	0	0	NA	0.1	NA	NA	0
4	1953	1	1/3/1953	0	0	0	NA	0	NA	NA	0
5	1953	1	1/4/1953	0	0	0	NA	0	NA	NA	0
6	1953	1	1/5/1953	0	0	0	NA	0	NA	NA	0
7	1953	1	1/6/1953	0	0	0	NA	0	NA	NA	0
8	1953	1	1/7/1953	0	0	0	NA	0	NA	NA	0
9	1953	1	1/8/1953	0	0	0	NA	0	NA	NA	0
10	1953	1	1/9/1953	0	0	0	NA	0	NA	NA	0
11	1953	1	1/10/1953	0	0	0	NA	0	NA	NA	0
12	1953	1	1/11/1953	0	0	0	NA	0	NA	NA	0
13	1953	1	1/12/1953	0	0	0	NA	0	NA	NA	0
14	1953	1	1/13/1953	0	0	0	NA	0	NA	NA	0
15	1953	1	1/14/1953	0	0	0	NA	0	NA	NA	0
16	1953	1	1/15/1953	0	0	0	NA	0	NA	NA	0
17	1953	1	1/16/1953	0	0	0	NA	0	NA	NA	0
18	1953	1	1/17/1953	0	0	0	NA	0	NA	NA	0
19	1953	1	1/18/1953	0	0	0	NA	0	NA	NA	0
20	1953	1	1/19/1953	0	0	0	NA	0	NA	NA	0
21	1953	1	1/20/1953	0	0	0	NA	0	NA	NA	0
22	1953	1	1/21/1953	0	0	0	NA	0	NA	NA	0
23	1953	1	1/22/1953	0	0	0	NA	0	NA	NA	0
24	1953	1	1/23/1953	0	0	0	NA	0	NA	NA	0
25	1953	1	1/24/1953	0	0	0	NA	0	NA	NA	12.2
26	1953	1	1/25/1953	0	0	0	NA	0	NA	NA	7.3
27	1953	1	1/26/1953	0	0	0	NA	0	NA	NA	0
28	1953	1	1/27/1953	0	0	0	NA	0	NA	NA	0
29	1953	1	1/28/1953	0	0	0	NA	0	NA	NA	0
30	1953	1	1/29/1953	3.9	0	5	NA	4.8	NA	NA	0
31	1953	1	1/30/1953	8	3.1	2	NA	7.3	NA	NA	0

(ก) ข้อมูลฝนรายวัน

(ข) ประมวลผลเสร็จสมบูรณ์

รูปที่ 8 ตัวอย่างไฟล์ excel



รูปที่ 9 ตัวอย่างแจ้งความผิดพลาด

5. สรุปผล

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาโปรแกรมเติมค่าสูญหายข้อมูลฝนรายวันโดยใช้วิธีถ่วงน้ำหนักระยะทางผกผัน (IDW) และวิธีถ่วงน้ำหนักสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (CCW) ที่สามารถปรับสถานีอ้างอิงและค่ายกกำลังได้ จุดเด่นของงานวิจัยนี้คือการออกแบบส่วนต่อประสานผู้ใช้ (User Interface) ให้ใช้งานได้ง่ายขึ้นและมีการแจ้งเตือนหากเกิดข้อผิดพลาดระหว่างการประมวลผล

จากผลการทดลองใช้ข้อมูลฝนรายวันปี.ศ. 1953-2017 พบว่าระยะเวลาการประมวลผลวิธี IDW น้อยกว่าวิธี CCW ไม่เกิน 5 วินาที เนื่องจากวิธี CCW มีการคำนวณที่ซับซ้อนกว่าวิธี IDW ซึ่งระยะเวลาในการประมวลผลต่อรอบของวิธี IDW จะไม่เกิน 18 วินาทีและวิธี CCW จะไม่เกิน 22 วินาที ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับคุณสมบัติของคอมพิวเตอร์ เมื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยความผิดพลาดของทั้ง 2 วิธีพบว่าควรเลือกใช้ 5 สถานีอ้างอิงสำหรับวิธี IDW แต่วิธี CCW เลือกใช้ได้ตั้งแต่ 2-5 สถานี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. Gujube, B. Bedadi, T. Tefera, T. Tana, T. Hordofa, and B. Cholo, "Evaluation of Seven Gap-Filling Techniques for Daily Station-Based Rainfall Datasets in South Ethiopia," *Advances in Meteorology*, vol. 2021, 2021.
- [2] S. Jamaludin, S. Mohd Deni, and J. Abdul Aziz "Revised Spatial Weighting Methods for Estimation of Missing Rainfall Data," *Asia-Pacific Journal of Atmospheric Sciences*, vol. 44, pp. 93-104, 2008.
- [3] X. Yang, X. Xie, D. L. Liu, F. Ji, and L. Wang, "Spatial Interpolation of Daily Rainfall Data for Local Climate Impact Assessment over Greater Sydney Region," *Advances in Meteorology*, vol. 2015, pp. 563629, 2015.
- [4] M.-T. Sattari, A. Reza zadeh-Joudi, and A. Kusiak, "Assessment of different methods for estimation of missing data in precipitation studies," *Hydrology Research*, vol. 48, no. 4, pp. 1032-1044, 2016.
- [5] B. I. Lozada Garcia, G. Sparovek, P. C. Sentelhas, and L. Tapia, "Filling in missing rainfall data in the Andes region of Venezuela, based on a cluster analysis approach," *Revista Brasileira de Agrometeorologia*, vol. 14, no. 2, pp. 225-233, 2006.
- [6] D. Mora, G. Wyseure, and P. Willems, *Gap filling based on a quantile perturbation factor technique*, 2014.
- [7] C. Simolo, M. Brunetti, M. Maugeri, and T. Nanni, "Improving estimation of missing values in daily precipitation series by a probability density function-preserving approach," *International Journal of Climatology*, vol. 30, no. 10, pp. 1564-1576, 2010.
- [8] L. R. Presti, E. Barca, and G. Passarella, "A methodology for treating missing data applied to daily rainfall data in the Candelaro River Basin (Italy)," *Environmental Monitoring and Assessment*, vol. 160, no. 1, pp. 1-22, December 19, 2010.
- [9] S. Srisutthiyakorn, "Missing Data Analysis," *Journal of Education Studies*, vol. 42, no. 1, pp. 217-223, 2014.
- [10] A. Abdou, "Temperature Trend on Makkah, Saudi Arabia," *Atmospheric and Climate Sciences*, vol. 4, pp. 457-481, 07/29, 2014.

- [11] R. Amaro de Sales, W. Ribeiro, M. Gonçalves, E. Oliveira, E. Gelcer, J. Pezzopane, and S. Berilli, "A Comparative Study between Meteorological Data from Conventional and Automatic Weather Stations in Espírito Santo, Brazil," *Journal of Experimental Agriculture International*, vol. 21, pp. 1-12, 2018.
- [12] M. M. Hasan, and B. F. W. Crokea, "Filling gaps in daily rainfall data : a statistical approach," *20th International Congress on Modelling and Simulation*, pp. 380-386, 2013.
- [13] H. Aksoy, "Use of gamma distribution in hydrological analysis," *Turkish Journal of Engineering and Environmental Sciences*, vol. 24, no. 6, pp. 419-428, 2000.
- [14] S. Wuthiwongyothin, "Imputation of Missing Daily Rainfall using Quantile Method," *Journal of KMUTNB*, vol. 31, no. 4, pp. 599-613, 2021.
- [15] R. Longman, A. Newman, T. Giambelluca, and M. Lucas, "Characterizing the Uncertainty and Assessing the Value of Gap-Filled Daily Rainfall Data in Hawaii," *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, vol. 59, pp. 1261-1276, 2020.
- [16] S. Wuthiwongyothin, C. Kalkan, and J. Panyavaraporn, "Evaluating Inverse Distance Weighting and Correlation Coefficient Weighting Infilling Methods on Daily Rainfall Time Series," *SNRU Journal of Science and Technology*, vol. 13, no. 2, pp. 71-79, 2021.
- [17] J. Panyavaraporn, and S. Wuthiwongyothin, "Software Development of Missing Daily Rainfall Data using Inverse Distance Weighting," *Journal of Industrial Technology*, vol. 17, no. 1, pp. 23-30, 2022.

การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปรูปร่างสามเหลี่ยมด้านเท่าโดยใช้วิธีโครงข่ายประสาทเทียม
Design of An Equilateral Triangular Microstrip Antenna Using Neural network

ณสกลธนา สมบัติธีระ* เหมือนฝัน อ่ำทอง เกรียงเดช พระธานี ชาญไชย ไทยเจียม
ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
63 หมู่ 7 ถนนรังสิตนครนายก ต.องครักษ์ อ.องครักษ์ จ.นครนายก 26120

Nasakolthana Sombattheera Muanfun Amthong Kriengdech Prathanee Chanchai Thaijiam
Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University
63 M.7 Rangsit-Nakhonnayok Rd., Ongkharak, Nakhonnayok 26120

*Corresponding author email: nasakolthana.sombattheera@sg.swu.ac.th

(Received: November 16, 2022; Revised: April 11, 2023 ; Accepted: May 26, 2023)

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปรูปร่างสามเหลี่ยมด้านเท่าโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมชนิดเรเดียลเบสฟังก์ชัน (Radial basis function) เพื่อหาค่าความยาวแต่ละด้านของสายอากาศผ่านโปรแกรมแมทแลป (MATLAB) ความยาวที่เหมาะสมของสายอากาศถูกออกแบบ ณ ความถี่ใช้งาน 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ซึ่งถูกคำนวณโดยโครงข่ายประสาทเทียมและประยุกต์ในการจำลองแบบสายอากาศบนโปรแกรมซีเอสที (CST) เพื่อหาค่าความถี่ใช้งานของแบบจำลองสายอากาศ พบว่าค่าความถี่ใช้งานที่ได้จากโครงข่ายประสาทเทียมและจากโปรแกรม ซีเอสที (CST) มีความถี่ใช้งานสอดคล้องกัน

คำสำคัญ: สายอากาศไมโครสตริป สายอากาศไมโครสตริปรูปร่างสามเหลี่ยมด้านเท่า โครงข่ายประสาทเทียม โปรแกรมแมทแลป (MATLAB) และซีเอสที (CST)

ABSTRACT

This paper is to present how to design an equilateral triangular microstrip antenna using the radial basis function neural network to determine the length of each side of the antenna using the MATLAB program. The optimized length of the antenna is designed at the operating frequency of 2.45 GHz, calculated by the neural network method and applied to simulate the antenna model on the CST program to determine the antenna model's operating frequency. As a result, the operating frequency obtained from the Neural Network method and from the CST program are corresponded.

Keyword: Microstrip antenna, equilateral triangular microstrip antenna, neural network, MATLAB and CST programs.

1. บทนำ

ในปัจจุบันการสื่อสารไร้สายนั้นได้กลายมาเป็นส่วนหนึ่งของชีวิตประจำวัน เช่น การสื่อสารผ่านโทรศัพท์ การใช้งานระบบวิทยุ และการใช้งานอินเทอร์เน็ต ซึ่งอุปกรณ์ที่ถูกใช้งานเป็นส่วนหนึ่งของระบบสื่อสารแบบไร้สายนั้นคือสายอากาศ สายอากาศแต่ละชนิดก็จะถูกออกแบบเพื่อนำมาใช้งานในระบบการสื่อสารไร้สายที่มีขนาดแตกต่างกันออกไป หนึ่งในสายอากาศที่นิยมใช้งานนั้นคือสายอากาศไมโครสตริปซึ่งเป็นสายอากาศที่มีความนิยมใช้งานกันอย่างแพร่หลายในหมู่ของนักวิจัยและทางด้านอุตสาหกรรมต่างๆ เนื่องจากสายอากาศชนิดนี้มีน้ำหนักเบา สร้างได้ง่าย และมีต้นทุนต่ำ [1]

สายอากาศไมโครสตริปที่ได้รับความนิยมในการนำมาใช้งาน การทำวิจัย และการศึกษา นั้นจะเป็นสายอากาศไมโครสตริปรูปร่างเรขาคณิตอย่างง่าย เช่น สี่เหลี่ยม สามเหลี่ยม และวงกลม [2] อย่างไรก็ตามสายอากาศไมโครสตริปนั้นมิรูปร่างของโครงสร้างสายอากาศหลากหลายรูปร่าง ซึ่งหนึ่งในรูปร่างของสายอากาศไมโครสตริปที่ได้รับความนิยมคือสายอากาศไมโครสตริปรูปร่างสามเหลี่ยมด้านเท่า โดยสายอากาศไมโครสตริปรูปร่างสามเหลี่ยมด้านเท่า นั้นจะมีข้อได้เปรียบกว่าสายอากาศไมโครสตริปรูปร่างสี่เหลี่ยมคือจะมีขนาดเล็กกว่าเมื่อมีความยาวด้านแต่ละด้านที่เท่ากัน [3] และยังเป็นโครงสร้างพื้นฐานในการออกแบบสายอากาศที่ทำงานได้หลายย่านความถี่ได้เช่นเดียวกับสายอากาศไมโครสตริปรูปร่างสี่เหลี่ยม สายอากาศไมโครสตริปรูปร่างสามเหลี่ยมด้านเท่าถูกใช้เป็นโครงสร้างพื้นฐานของการออกแบบสายอากาศหลายย่านความถี่ เช่น สายอากาศไมโครสตริปแบบแฟร็กทัลเซียร์พินสกีแกสเก็ต (Sierpinski gasket fractal microstrip antenna) [4]

สำหรับโครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปนั้นประกอบด้วย 3 ส่วน คือ แผ่นตัวนำสายอากาศ แผ่นฐานรองวัสดุ และกราวด์ โดยส่วนของแผ่นตัวนำสายอากาศกับกราวด์จะใช้เป็นวัสดุโลหะ เช่น ทองแดง และฐานรองวัสดุจะเป็นส่วนที่อยู่ตรงกลางระหว่างแผ่น

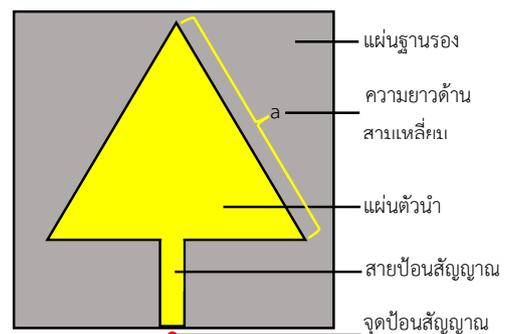
ตัวนำ (แผ่นทองแดง) ของสายอากาศและกราวด์ ในบทความวิจัยนี้ จะทำการออกแบบโครงสร้างที่สำคัญของสายอากาศไมโครสตริปแบบสามเหลี่ยมด้านเท่าด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียมผ่านโปรแกรม MATLAB และทำการจำลองแบบสายอากาศผ่านโปรแกรม CST ค่าที่คำนวณได้จากวิธีโครงข่ายประสาทเทียมจะถูกใช้เพื่อทำการพิสูจน์ว่าการใช้วิธีโครงข่ายประสาทเทียมนั้นสามารถนำไปใช้ในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปรูปร่างสามเหลี่ยมด้านเท่านี้ได้จริง

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 สายอากาศไมโครสตริปรูปร่างสามเหลี่ยมด้านเท่า (Equilateral triangular microstrip antenna)

สายอากาศไมโครสตริปรูปร่างสามเหลี่ยมด้านเท่า นั้นเป็นสายอากาศไมโครสตริปชนิดหนึ่ง ซึ่งมีองค์ประกอบดังนี้ [5] (รูปที่ 1)

1. แผ่นตัวนำ (patch)
2. สายป้อนสัญญาณ (feedline)
3. จุดป้อนสัญญาณ (feeding point)
4. แผ่นฐานรอง (substrate)
5. แผ่นกราวด์ (ground)



ก) มุมมองจากทางด้านบน (top view)



ข) มุมมองจากทางด้านข้าง (side view)

รูปที่ 1 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป รูปร่าง
สามเหลี่ยมด้านเท่า

2.1.1 สมการของสายอากาศไมโครสตริปรูปร่าง สามเหลี่ยมด้านเท่า

การหาความยาวด้านของสายอากาศไมโครสตริป
รูปร่างสามเหลี่ยมด้านเท่า ถูกแสดงดังสมการที่ (1) [6]

$$f_r = \frac{2c}{3a\sqrt{\epsilon_r}} \sqrt{m^2 + n^2 + mn} \quad (1)$$

โดยที่ f_r = ความถี่ใช้งาน (Hz)
 c = ความเร็วแสง (3×10^8 m/s)
 a = ความยาวด้านสามเหลี่ยมของแผ่น
 ตัวนำ (m)
 ϵ_r = ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ของสาร
 ตัวกลาง
 m, n = โหมดของ TM_{mn}

สายอากาศไมโครสตริปนั้นถูกเลือกให้ทำงานในโหมด
 TM_{10} [2,7] ดังนั้นสมการที่ใช้ในการออกแบบถูกแสดงดัง
 สมการที่ (2)

$$f_{1,0} = \frac{2c}{3a\sqrt{\epsilon_r}} \quad (2)$$

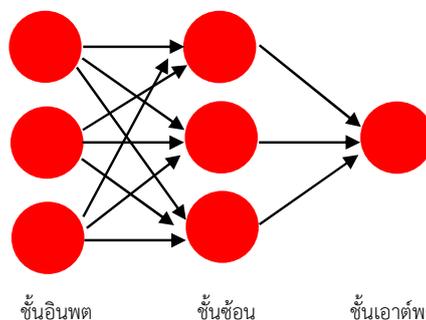
2.2 โครงข่ายประสาทเทียม (Neural network)

โครงข่ายประสาทเทียมคือ แบบจำลองทาง
 คณิตศาสตร์หรือแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์สำหรับ
 ประมวลผลที่มีต้นแบบมาจากการทำงานของสมองมนุษย์
 ผ่านกลไกของการเรียนรู้ โดยการใช้ประโยชน์จากตัวอย่าง
 หลายๆ ตัวอย่างในการฝึกฝนเพื่อให้สามารถแก้ปัญหาที่ไม่
 มีรูปแบบตายตัวหรือมีรูปแบบที่ซับซ้อนมากกว่าที่จะ
 สามารถทำความเข้าใจ [7] โดยโครงข่ายประสาทเทียมนั้น
 จะมีองค์ประกอบหลักทั้งหมด 3 ชั้นคือ

1. ชั้นอินพุต (input layer)
2. ชั้นซ่อน (hidden layer)
3. ชั้นเอาต์พุต (output layer)

2.2.1 โครงข่ายประสาทเทียมชนิดเรเดียลเบสิส ฟังก์ชัน (Radial basis function, RBF)

โครงข่ายประสาทเทียมชนิดเรเดียลเบสิสฟังก์ชัน
 (Radial basis function, RBF) เป็นโครงข่ายประสาท
 เทียมชนิดไปข้างหน้า (feed forward) ที่มีชั้นซ่อน
 (hidden layer) ทั้งหมด 1 ชั้น โดยนิวรอน (neural) ที่อยู่
 ในชั้นซ่อนนี้จะมีคุณสมบัติคือ มีฟังก์ชันการ
 โอนถ่าย (mapping function) ที่จะปรับค่าถ่วงน้ำหนักเพื่อให้
 ฟังก์ชันมีความเหมาะสมมากที่สุดกับการนำไปใช้งาน โดย
 คุณสมบัติของผลตอบสนองของฟังก์ชันหรือผลลัพธ์ที่เกิดจาก
 RBF นั้นจะแปรผันตามระยะห่างของอินพุตที่กำหนดไว้กับ
 จุดศูนย์กลางของฟังก์ชัน โดยที่ถ้าค่าอินพุตอยู่ใกล้จุด
 ศูนย์กลางจะได้ค่าเอาต์พุตที่มาก แต่ถ้าค่าอินพุตอยู่ไกล
 จากจุดศูนย์กลางจะได้ค่าเอาต์พุตที่น้อย ซึ่งมีความ
 เหมาะสมในการประมาณค่า และมีพารามิเตอร์การ
 กระจาย (spread parameter) เป็นตัวควบคุมความกว้าง
 ของระยะห่างใน RBF [8] ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 โครงสร้างของ RBF

3. ขั้นตอนการดำเนินงาน

ในบทความนี้ ต้องการที่จะออกแบบสายอากาศ
 ไมโครสตริปรูปร่างสามเหลี่ยมด้านเท่า โดยอาศัยสมการ
 จากทฤษฎีโครงข่ายประสาทเทียมชนิด RBF ผ่าน
 โปรแกรม MATLAB และผลการคำนวณทางเชิงตัวเลข
 ผ่านโปรแกรม CST ในการออกแบบจำลองของสายอากาศ
 การกำหนดพารามิเตอร์เริ่มต้นในการออกแบบถูกแสดงดัง
 ตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตารางพารามิเตอร์เริ่มต้นในการออกแบบ

พารามิเตอร์ที่ใช้งาน	ค่าพารามิเตอร์
ความถี่ใช้งาน (f_r)	2.45 GHz
ความยาวด้านสามเหลี่ยมของแผ่นตัวนำ (a)	NaN
ความยาวของกราวด์ (L_g)	$2*a$
ความกว้างของกราวด์ (W_g)	$2*a$
ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ (ϵ_r)	4.3-4.7

หมายเหตุ NaN คือค่าที่ยังไม่ทราบค่าเริ่มต้น ซึ่งจะหาค่าได้โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียมต่อไป

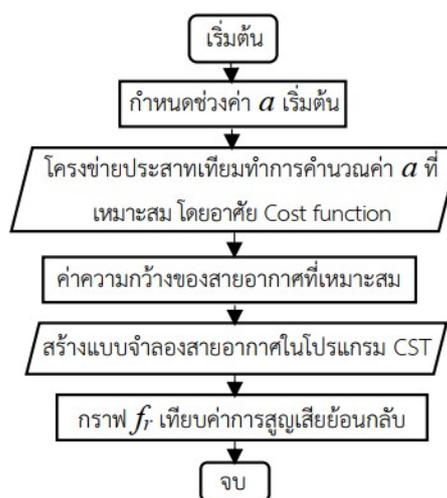
หลังจากที่ได้กำหนดพารามิเตอร์เริ่มต้นในการออกแบบแล้ว ก็จะนำค่าพารามิเตอร์ที่ทราบค่าไปทำการเขียนโปรแกรม MATLAB โดยใช้วิธีการหาค่าด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียมชนิด RBF เพื่อหาค่าความยาวด้านสามเหลี่ยมของแผ่นตัวนำ (a) ที่เหมาะสมกับความถี่ใช้งาน (f_r) เพื่อนำไปทำการจำลองแบบของสายอากาศผ่านโปรแกรม CST ต่อไป

3.1 การหาค่าด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม

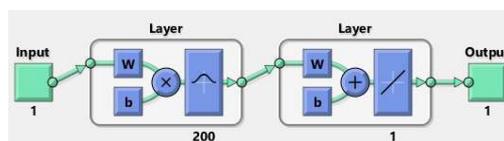
ในการดำเนินการด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียมนั้น จะนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้กำหนดไว้ดังตารางที่ 1 มาทำการประมวลผลด้วยโครงข่ายประสาทเทียมชนิด RBF และอาศัยฟังก์ชันในการกำหนดทิศทางค่าเอาต์พุต (Cost function) ซึ่งในที่นี้เป็นสมการของความถี่ใช้งาน (f_r) ดังสมการที่ (2) โดยมีอินพุตเป็นความยาวด้านสามเหลี่ยมของแผ่นตัวนำ (a) ดังแสดงในรูปที่ 3

ค่าอินพุตเป็นความยาวด้านสามเหลี่ยมของแผ่นตัวนำ ถูกกำหนดให้มีค่าอยู่ระหว่าง 0.001 ถึง 0.1 m และกำหนดให้เพิ่มขึ้นทีละ 0.00001 m ค่าเอาต์พุตเป็นความถี่ใช้งาน (f_r) จะถูกคำนวณได้จากวิธีโครงข่ายประสาทเทียมชนิด RBF ในการประมวลผล ซึ่งกำหนดค่าพารามิเตอร์ของการกระจายเท่ากับ 200 ดังแสดงในรูปที่ 4 และค่าประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมมีค่าเท่ากับ $2.3793e^{+11}$ ซึ่งจะได้ค่าความยาวด้านสามเหลี่ยมของแผ่น

ตัวนำ (a) ของสายอากาศเทียบกับค่าความถี่ใช้งาน (f_r) ดังตัวอย่างจำนวน 9 ชุด ถูกแสดงในตารางที่ 2



รูปที่ 3 ขั้นตอนการทำงานของโครงข่ายประสาทเทียม



รูปที่ 4 ชั้นของโครงข่ายประสาทเทียม

ตารางที่ 2 ตารางแสดงค่าความยาวของแผ่นตัวนำของสายอากาศเทียบกับค่าความถี่ใช้งาน

ความยาวแผ่นตัวนำ (mm)	ความถี่ใช้งาน (GHz)
37.1	2.4869
37.2	2.4799
37.3	2.4729
37.4	2.4660
37.5	2.4593
37.6*	2.4527*
37.7	2.4463
37.8	2.4401
37.9	2.4339

บทความนี้ต้องการออกแบบสายอากาศที่ความถี่ 2.45 GHz จากตารางที่ 2 ได้แสดงค่าความยาวด้านสามเหลี่ยมของแผ่นตัวนำ ณ ความถี่ใช้งานต่างๆ และ ณ ความถี่ใช้งานที่ 2.45 GHz (บันทึกว่า ค่าความถี่ใช้งานที่ได้จากการคำนวณเท่ากับ 2.4527 GHz) ให้ค่าความยาวด้านสามเหลี่ยมของแผ่นตัวนำเท่ากับ 37.6 mm ซึ่งจะนำไปใช้การจำลองแบบในโปรแกรม CST ต่อไป

3.2 การออกแบบสายอากาศด้วยโปรแกรม CST

ในการออกแบบสายอากาศด้วยโปรแกรม CST นั้น จะทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศ เพื่อทำการสร้างแบบจำลองของสายอากาศไมโครสตรักเจอร์สามเหลี่ยมด้านเท่าให้มีความเหมาะสมกับความถี่ใช้งานตามตารางที่ 2 รวมถึงค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11}) โดยมีค่าพารามิเตอร์ต่างๆ ที่ใช้ในการออกแบบบนโปรแกรม CST ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองสายอากาศไมโครสตรักเจอร์สามเหลี่ยมด้านเท่า

พารามิเตอร์ที่ใช้งาน	ค่าพารามิเตอร์
ความกว้างของกราวด์ (W_g)	75.2 mm
ความยาวของกราวด์ (L_g)	75.2 mm
ความยาวด้านสามเหลี่ยมของแผ่นตัวนำ (a)	37.6 mm
ความหนาแผ่นฐานรอง (h)	0.75 mm
ความหนาแผ่นตัวนำ (t)	0.035 mm
ความกว้างสายป้อนสัญญาณ (W_f)	4.5 mm

จากตารางที่ 3 ความหนาแผ่นฐานรอง (h) ความหนาแผ่นตัวนำ (t) และความกว้างสายป้อนสัญญาณ (W_f) ถูกออกแบบขึ้นเพื่อให้สอดคล้องกับการสร้างแบบจำลองของสายอากาศ ค่าพารามิเตอร์จากตารางที่ 3 ถูกนำไปใช้ในการสร้างแบบจำลองของสายอากาศบนโปรแกรม CST เพื่อหาค่าความถี่ใช้งานและค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11})

4. ผลการดำเนินการ

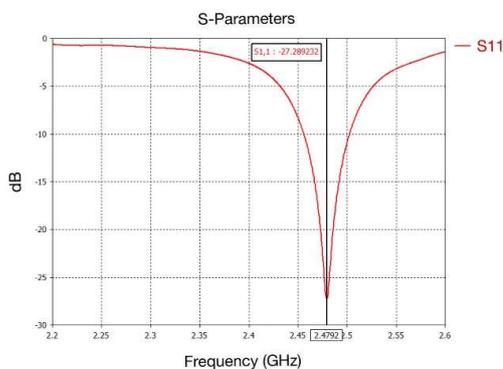
เมื่อนำค่าพารามิเตอร์จากโปรแกรม MATLAB มาทำการจำลองแบบสายอากาศด้วยโปรแกรม CST ได้ผลลัพธ์ของการออกแบบจำลองสายอากาศ ไมโครสตรักเจอร์สามเหลี่ยมด้านเท่า และกราฟแสดงค่าการสูญเสียย้อนกลับ ดังแสดงในรูปที่ 5 ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณ พบว่าแบบจำลองสายอากาศมีความถี่ใช้งานประมาณ 2.48 GHz (มีค่าความผิดพลาดร้อยละ 1.453 เมื่อเทียบกับค่าความถี่ใช้งานที่ 2.45 GHz) โดยมีค่าการสูญเสียย้อนกลับประมาณ -8 dB

ค่าความถี่ที่คำนวณได้จากแบบจำลองสายอากาศ แสดงให้เห็นว่า วิธีโครงข่ายประสาทเทียมสามารถเรียนรู้และออกแบบสายอากาศไมโครสตรักเจอร์สามเหลี่ยมด้านเท่าได้ อย่างไรก็ตาม ค่าความถี่ที่คำนวณได้และค่าความถี่ใช้งานยังมีค่าความผิดพลาดอยู่ รวมทั้งค่าการสูญเสียย้อนกลับยังมีค่าไม่น้อยกว่า -10 dB (ตามมาตรฐานการออกแบบ) เนื่องจากการออกแบบสายอากาศที่นำเสนอในบทความนี้ ยังไม่ได้รวมการออกแบบในส่วนเทคนิคการแมตซ์ซิ่ง (matching techniques) ของสายอากาศกับสายป้อนสัญญาณ ยิ่งไปกว่านั้น พารามิเตอร์ต่างๆ ในการออกแบบสายอากาศบางค่า นั้นเป็นค่าที่เกิดจากการจำลองแบบ เช่น ความหนาแผ่นตัวนำ (t) ที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศถูกออกแบบให้มีค่าเท่ากับ 0.035 mm แต่ค่าประมาณในสมการที่ (1) กำหนดให้มีค่าเป็นศูนย์ ย่อมส่งผลให้เกิดค่าความผิดพลาดได้ (ด้วยโครงสร้างทางกายภาพของสายอากาศแบบจำลองในโปรแกรม CST ความหนาแผ่นตัวนำ (t) จึงไม่ได้กำหนดให้มีค่าเป็นศูนย์)

5. สรุป

จากการออกแบบค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียมชนิดเรเดียลเบสฟังก์ชัน (Radial basis function, RBF) ด้วยโปรแกรม MATLAB และนำค่าที่ได้มาทำการสร้างแบบจำลองสายอากาศผ่านโปรแกรม CST พบว่าได้แบบจำลองสายอากาศที่มี

ค่าความถี่ใช้งานสอดคล้องตรงกัน แต่ในส่วนค่าการสูญเสียย้อนกลับของสายอากาศที่ได้มีค่ามากกว่า - 10 dB ทั้งนี้เนื่องจากการที่ยังไม่ได้ทำการแมตซ์ซึ่งสายอากาศกับสายป้อนสัญญาณ ซึ่งจะเป็นส่วนขยายของงานวิจัยนี้ต่อไปในอนาคต อย่างไรก็ตาม บทความนี้ได้นำเสนอวิธีการใหม่ที่ใช้ในการออกแบบสายอากาศด้วยวิธีปัญญาประดิษฐ์ นั่นคือ วิธีโครงข่ายประสาทเทียม และผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าวิธีโครงข่ายประสาทเทียมสามารถถูกนำมาใช้ในการออกแบบสายอากาศได้



รูปที่ 5 กราฟแสดงค่าการสูญเสียย้อนกลับเทียบกับความถี่ใช้งาน

6. กิตติกรรมประกาศ

ทางคณะผู้จัดทำขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ สำหรับเครื่องมือที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยนี้

7. เอกสารอ้างอิง

[1] D. Ramakrishnan and P. P. V, "Wideband Suspended Strip Feed 30°-60°-90° Triangular Microstrip Patch Antenna," in *2022 3rd International Conference for Emerging Technology (INCET)*, Belgaum, India, 2022, pp. 1-4.

[2] A. Deshmukh, V. Chaudhary, S. Pawar, A. Mhatre and M. Shah, "Enhancement In Bandwidth using Sectoral Patches in

Equilateral Triangular Microstrip Antenna," in *2019 IEEE 5th International Conference for Convergence in Technology (I2CT)*, Bombay, India, 2019, pp. 1-5.

[3] F. Abdelhak, S. Nouredine and G. Ali, "An Electrical Model to Sierpinski Gasket Patch Antenna," in *2009 Fifth Advanced International Conference on Telecommunications*, 2009, pp. 284-288.

[4] B. S. Dhaliwal and S. S. Pattnaik, "Artificial Neural Network Analysis of Sierpinski Gasket Fractal Antenna: A Low-Cost Alternative to Experimentation," *Advances in Artificial Neural Systems*, vol. 2013, no. 3, pp. 1-7, 2013.

[5] M. Mathur, G. Singh, S. K. Bhatnagar, S. Swami and A. Vats, "Transformation of Design Formulae for Feed Line of Triangular Microstrip Antenna," *AIP Conference Proceedings.*, vol. 1715, pp. 20035 (1-5), 2016.

[6] M.M. Olaimat and N. I. Dib, "A Study of 15-75- 90 degree Angles Triangular Patch Antenna." *Progress In Electromagnetic Research Letters*, vol 21, pp. 1 – 9, 2011.

[7] Grienggrai Rajchakit. [2022, Nov 15]. Artificial neural network. Content summary report of utilization of training, seminar or academic conference [online]. Available: <https://rae.mju.ac.th/articleDetail.aspx?qid=585>

[8] S. Arampongsanuwat and P. Meesad, "The development of a model to predict the amount of PM10 in Bangkok using Radial

basis function ,” in *NCIT 2010*, KMITL., 2010, pp. 273-278.

- [9] A. Deshmukh, V. Chaudhary, S. Pawar, A. Mhatre and M. Shah, "Enhancement In Bandwidth using Sectoral Patches in Equilateral Triangular Microstrip Antenna," in *2019 IEEE 5th International Conference for Convergence in Technology (I2CT)*, Bombay, India, 2019, pp. 1-5.

การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยใช้วิธีเชิงพันธุกรรม

Design of a Square Microstrip Antenna Using Genetic Algorithms

รัฐนันท์ ลออบูตร* ศิริกานต์ พวงมณี สุกันยา แสงจันทร์ ชาญไชย ไทยเจียม

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

63 หมู่ 7 ถนนรังสิตนครนายก ต.องครักษ์ อ.องครักษ์ จ.นครนายก 26120

Rattanan Laorboot* Sirikarn Puangmanee Sukanya Sangjan Chanchai Thajiam

Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Srinakharinwirot University

63 M.7 Rangsit-Nakhonnayok Rd., Ongkharak, Nakhonnayok 26120

*Corresponding author email: nasakolthana.sombattheera@swu.ac.th

(Received: November 16, 2022; Revised: May 26, 2023; Accepted: June 2, 2023)

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยใช้วิธีเชิงพันธุกรรมที่ความถี่ใช้งาน 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ด้วยโปรแกรม MATLAB ร่วมกับ CST แผ่นตัวนำรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัสของสายอากาศถูกออกแบบขึ้นเพื่อให้เกิดความสมมาตรทางโครงสร้าง สัมพันธ์กับเทคนิคการลัดวงจรของการบังคับ ลำคลื่น (แทนที่จะเป็นรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าของแผ่นตัวนำตามวิธีของการออกแบบดั้งเดิม) โดยทั่วไป วิธีของการออกแบบดั้งเดิมจะให้ค่ารูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าแทนที่จะเป็นรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัส ผลที่ได้จากแบบจำลองแสดงให้เห็นว่าวิธีการที่ภูมิลำเสนอนี้สามารถหาผลเฉลยได้จริง ซึ่งได้ค่าการสูญเสียย้อนกลับเข้าใกล้ค่าน้อยกว่า -10 เดซิเบล ณ ความถี่ใช้งาน

คำสำคัญ: สายอากาศไมโครสตริปรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัส การหาค่าที่ดีที่สุด และวิธีเชิงพันธุกรรม

ABSTRACT

This research paper is to present how to design a square microstrip antenna using Genetic Algorithms at 2.45 GHz by MATLAB and CST programming. A square antenna patch is designed with a symmetrical structure, corresponding to the short-circuit technique of beamforming (rather than a rectangular patch using a conventional design). Generally, a conventional design will result in a rectangular rather than a square shape. Simulation results show that the methods presented in this paper can be used to really design the antenna with a return loss close to below -10 dB at the operating frequency.

Keyword: Square microstrip patch antenna, optimization, and genetic algorithm

1. บทนำ

สายอากาศเป็นสื่อสำคัญของการสื่อสารไร้สาย ซึ่งมีบทบาทสำคัญในชีวิตประจำวันของมนุษย์เป็นอย่างมาก เพื่อรองรับความถี่ที่ต้องการมากขึ้นไม่ว่าจะเป็น การอำนวยความสะดวกสบายในการดำรงชีวิตและการประกอบอาชีพการทำงาน ซึ่งล้วนต้องใช้อุปกรณ์เชื่อมต่อแบบไร้สาย สายอากาศเป็นส่วนประกอบที่สำคัญของการสื่อสารแบบไร้สาย สายอากาศแบบไมโครสตริปมีความเหมาะสมในการออกแบบและใช้งาน เนื่องจากคุณสมบัติของสายอากาศแบบไมโครสตริปนั้นมีขนาดที่เล็กกะทัดรัด มีน้ำหนักเบา สามารถออกแบบได้ง่าย และราคาถูก ในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปมีโครงสร้างที่สำคัญด้วยกันสามส่วนคือ แผ่นตัวนำสายอากาศ ฐานรองวัสดุ และแผ่นกราวด์ โดยส่วนของแผ่นตัวนำสายอากาศกับแผ่นกราวด์จะใช้วัสดุที่เป็นโลหะ เช่น ทองแดง ส่วนฐานรองวัสดุจะเป็นส่วนที่อยู่ตรงกลางระหว่างแผ่นตัวนำสายอากาศและแผ่นกราวด์ สายอากาศแบบไมโครสตริปอาจมีรูปร่างหลากหลายแบบ เช่น รูปร่างวงแหวน สามเหลี่ยม วงกลม สี่เหลี่ยมผืนผ้า และสี่เหลี่ยมจัตุรัส [1-2] ในบทความนี้ จะออกแบบสายอากาศไมโครสตริป ฝนความถี่ใช้งาน 2.45 กิกะเฮิรตซ์ โดยทำการศึกษาพารามิเตอร์ต่างๆ ของสายอากาศสำหรับการออกแบบสายอากาศ ไมโครสตริปที่สร้างขึ้นว่ามีประสิทธิภาพหรือไม่ โดยใช้ วิธีเชิงพันธุกรรม ในงานวิศวกรรมด้านต่างๆ ได้เคยถูกนำวิธีเชิงพันธุกรรมนี้มาประยุกต์ใช้ [3-5] ตัวอย่างการใช้วิธีเชิงพันธุกรรมเพื่อแก้ปัญหาการเพิ่มประสิทธิภาพกับระบบตรวจจับการบุกรุก และการนำวิธีเชิงพันธุกรรมไปใช้เพื่อค้นหากระบวนการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการทางธุรกิจ

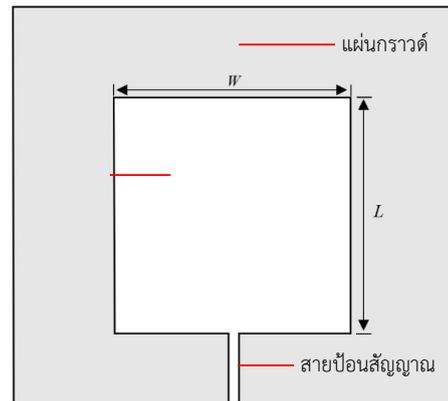
ในบทความนี้ การออกแบบสายอากาศไมโครสตริป โดยใช้วิธีเชิงพันธุกรรม เพื่อหาความกว้าง (W) และความยาว (L) ให้ได้ค่าเท่ากัน (ดูรูปที่ 1) โดยใช้วิธีเชิงพันธุกรรม ฝนความถี่ใช้งาน เพื่อให้ได้สายอากาศไมโครสตริปรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัส เกิดความสมมาตรทางโครงสร้าง (แทนที่จะเป็นรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าของแผ่นตัวนำตามวิธีการ

ออกแบบดั้งเดิม) สัมพันธ์กับเทคนิคการลดวงจรของการบังคับลำคลื่น [6-7] เพื่อให้ได้สายอากาศไมโครสตริปรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัสตามที่ต้องการและมีประสิทธิภาพมากกว่าการหาความกว้างและความยาวจากการคำนวณด้วยสมการทั่วไป [8]

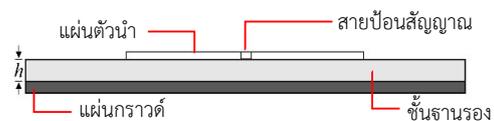
2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 สายอากาศไมโครสตริป (microstrip antenna)

โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริปประกอบด้วยแผ่นตัวนำสายอากาศหรือแพทช์ (patch) จะเป็นตัวแผ่กระจายคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า ชั้นฉนวนหรือชั้นฐานรอง (substrate) แผ่นกราวด์ (ground) และสายป้อนสัญญาณ (feedline) ดังแสดงในรูปที่ 1



ก) มุมมองจากทางด้านบน (top view)



ข) มุมมองจากทางด้านล่าง (side view)

รูปที่ 1 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตริป รูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัส

การหาความกว้างของแผ่นตัวนำได้จากสมการที่ (1)

$$w = \frac{c}{2f_r \sqrt{\frac{\epsilon_r + 1}{2}}} \quad (1)$$

เมื่อ w คือ ความกว้างของแผ่นตัวนำ (มิลลิเมตร)
 c คือ ความเร็วแสง มีค่าเท่ากับ 3×10^8 (เมตรต่อวินาที)
 f_r คือ ความถี่ใช้งาน (เมกะเฮิรตซ์)
 ϵ_r คือ ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ทางไฟฟ้าของสารตัวกลาง

การหาความยาวของแผ่นตัวนำได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$L = L_{eff} - 2\Delta L \quad (2)$$

โดยที่

$$L_{eff} = \frac{c}{2f_r \sqrt{\epsilon_{reff}}} \quad (3)$$

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{reff} + 0.3) \left(\frac{w}{h} + 0.264\right)}{(\epsilon_{reff} + 0.258) \left(\frac{w}{h} + 0.264\right)} \quad (4)$$

$$\epsilon_{reff} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2} \left(1 + 12 \frac{h}{w}\right)^{-1/2} \quad (5)$$

เมื่อ ϵ_{reff} คือ ค่าคงที่ประสิทธิภาพ
 L_{eff} คือ ความยาวประสิทธิภาพ (มิลลิเมตร)
 ΔL คือ ความยาวที่เปลี่ยนแปลงไปจากปรากฏการณ์ฟริงกิง (fringing effect) (มิลลิเมตร)
 h คือ ความหนาของชั้นฐานรอง (มิลลิเมตร)

จากรูปที่ 1 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปที่ต้องการ ค่าความกว้าง (W) และความยาว (L) จะต้องมีความเท่ากัน เพื่อให้ได้แผ่นตัวนำที่มีรูปร่างเป็นสี่เหลี่ยมจัตุรัสในการออกแบบ แผ่นกรวด์ถูกออกแบบให้มีขนาดเป็นสองเท่าของแผ่นตัวนำ และสายป้อนสัญญาณถูกออกแบบเป็นสายส่งแบบไมโครสตริป

2.2 วิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic algorithm)

วิธีเชิงพันธุกรรมเป็นวิธีการค้นหาคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาโดยเลียนแบบวิวัฒนาการทางธรรมชาติที่มีพื้นฐานจากทฤษฎีวิวัฒนาการทางธรรมชาติของ Charle Darwin [9-10] ในบทความนี้ได้นำขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริป รูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัส โดยใช้การกำหนดฟังก์ชันความเหมาะสม (fitness function) และฟังก์ชันความเหมาะสมตามวิธีเชิงพันธุกรรมเป็นสมการในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปพื้นฐานสำหรับหาค่าความกว้างแผ่นตัวนำดังสมการที่ (1) และความยาวของแผ่นตัวนำดังสมการที่ (2)

จากรูปที่ 2 จะเป็นขั้นตอนการหาค่าพารามิเตอร์สายอากาศคือค่าของความกว้างและความยาวโดยใช้วิธีเชิงพันธุกรรม และได้ทำการกำหนดค่าเริ่มต้นของวิธีเชิงพันธุกรรมไว้ จากนั้นวิธีเชิงพันธุกรรมจะทำการสร้างประชากรเริ่มต้น ซึ่งจะเป็นค่าของความกว้างและความยาวคู่แรกเพื่อนำไปคำนวณในฟังก์ชันความเหมาะสมของวิธีเชิงพันธุกรรมเพื่อทำการตรวจสอบว่าได้ความถี่ที่ต้องการหรือไม่ หากยังไม่ได้ความถี่ที่ต้องการแล้วจะดำเนินการต่อด้วยวิธีเชิงพันธุกรรมคือ ทำการไขว้เปลี่ยนโครโมโซม การกลายพันธุ์ การคัดเลือก นำไปหาฟังก์ชันความเหมาะสม และตรวจสอบเงื่อนไขจนกว่าจะได้ประชากรที่ดีที่สุด ซึ่งในที่นี้ ประชากรที่ดีที่สุดคือ ค่าความกว้างและความยาวของสายอากาศ ไมโครสตริปรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัส ณ ความถี่ที่ใช้งาน

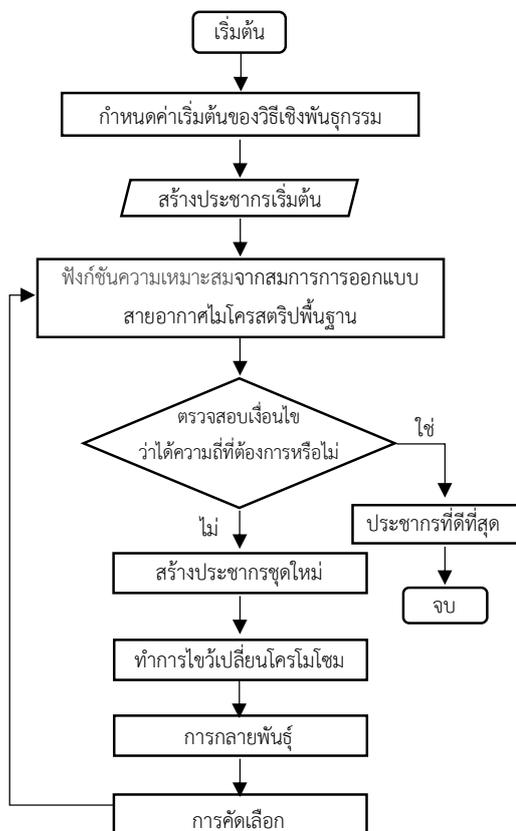
3. วิธีการดำเนินงาน

3.1 การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัสด้วยวิธีเชิงพันธุกรรมผ่านโปรแกรม MATLAB

จากหัวข้อที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัสจากเงื่อนไขดังกล่าวนี้พบว่าหากใช้สมการที่ (1) - (5) สำหรับการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัส

ไม่ได้รูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัส เนื่องจากค่าของความกว้างมีความสัมพันธ์กับความยาวของสายอากาศ ดังนั้นจึงมีค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการออกแบบด้วยกันสองตัวคือ ความกว้าง (W) และความยาว (L) โดยจะให้พารามิเตอร์ทั้งสองเป็นเป้าหมายในการหาค่าตอบของวิธีเชิงพันธุกรรม สำหรับผลลัพธ์ที่ความถี่ใช้งาน 2.45 กิกะเฮิรตซ์ ความกว้าง (W) และความยาว (L) มีขนาดเท่ากัน โดยได้ทำการกำหนดค่าพารามิเตอร์สำหรับใช้ในการออกแบบไว้ดังตารางที่ 1

หลังจากที่ได้กำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นในการออกแบบแล้ว ก็จะนำค่าพารามิเตอร์ที่ทราบค่าที่ทำการเขียนโปรแกรม MATLAB ในการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยใช้ วิธีเชิงพันธุกรรม เพื่อหาค่าที่เหมาะสมกับความถี่ใช้งาน (f_r) เพื่อนำไปทำการจำลองออกแบบของสายอากาศผ่านโปรแกรม CST ต่อไป

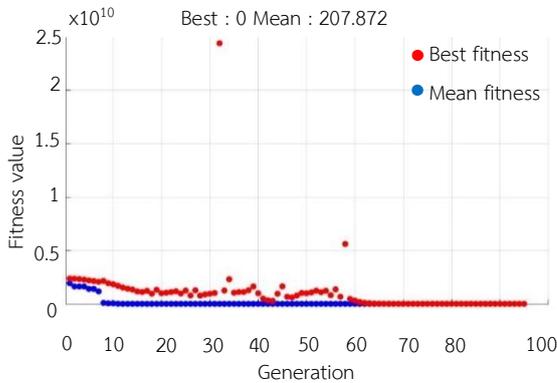


รูปที่ 2 ขั้นตอนการหาค่าพารามิเตอร์โดยวิธีเชิงพันธุกรรม ตารางที่ 1 แสดงค่าพารามิเตอร์เริ่มต้นที่ใช้ในการออกแบบ

พารามิเตอร์ที่ใช้	ค่าพารามิเตอร์
ความยาวแผ่นกราวด์ (L_g)	$2L$
ความกว้างแผ่นกราวด์ (W_g)	$2W$
ความสูงของแผ่นฐานรอง (h)	0.75 mm
ความถี่ใช้งาน (f_r)	2.45 GHz
ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ทางไฟฟ้าของสารตัวกลาง (ϵ_r)	4.3 - 4.7

3.2 การหาค่าที่ดีที่สุดด้วยวิธีเชิงพันธุกรรม

ในการหาค่าที่ดีที่สุดด้วยวิธีเชิงพันธุกรรมในงานวิจัยนี้ จะออกแบบให้ค่าความกว้าง และความยาว มีขนาดที่เท่ากันโดยจะใช้สมการการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปพื้นฐานดังสมการที่ (1) - (5) เพื่อเป็นฟังก์ชันความเหมาะสม (fitness function) โดยค่าที่ดีที่สุดของฟังก์ชันความเหมาะสมจะพิจารณาจากสมการการออกแบบพื้นฐานเทียบกับความถี่ใช้งาน หากค่ามีค่าเข้าใกล้ศูนย์หมายถึงให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดคือได้ค่าความกว้าง (W) ที่มีค่าเท่ากับความยาว (L) ณ ความถี่ใช้งาน และในงานวิจัยนี้ได้ทำการกำหนดพารามิเตอร์ของวิธีเชิงพันธุกรรมเริ่มต้นไว้ดังนี้ จำนวนการวนซ้ำสูงสุดที่ 100 ขนาดของประชากรอยู่ที่ 50 เพื่อพิจารณาแนวโน้มของผลเฉลย จากนั้นทำการเพิ่มจำนวนประชากรขึ้นครั้งละ 50 จนได้ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมทางด้านระยะเวลาในการประมวลผล และความถูกต้องของผลเฉลยคือ จำนวนการวนซ้ำสูงสุดที่ 100 ขนาดของประชากรอยู่ที่ 350 (รูปที่ 3) ผลที่ได้จากการคำนวณซ้ำ จนได้จำนวนวนซ้ำสูงสุด 100 และขนาดของประชากร 350 (บันทึกว่า W และ L ถูกบีบบังคับตามวิธีเชิงพันธุกรรมในการออกแบบให้มีค่าที่เท่ากันในกรณีของการพิจารณาความสมมาตรทางโครงสร้างสายอากาศ สัมพันธ์กับเทคนิคการลดวงจรของการบังคับค่าคลื่น)



รูปที่ 3 กราฟแสดงการหาค่าของฟังก์ชันความเหมาะสม

3.3 การจำลองแบบผลลัพธ์ด้วยโปรแกรม CST

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม CST สำหรับการจำลองแบบการสร้างสายอากาศและวิเคราะห์ผลลัพธ์ค่าสูญเสียย้อนกลับ ณ ความถี่ใช้งาน โดยตารางที่ 2 จะเป็นตารางแสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองสายอากาศไมโครสตริปรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัสและมีพารามิเตอร์ในการสร้างแบบจำลองของค่าความหนาของแผ่นทองแดงที่ใช้เป็นแผ่นตัวนำของสายอากาศและกราวด์ มีค่าเท่ากับ 0.035 มิลลิเมตร

จากตารางที่ 2 ความหนาแผ่นฐานรอง (h) ความหนาแผ่นตัวนำ (t) และความกว้างสายป้อนสัญญาณ (w_f) ถูกออกแบบขึ้นเพื่อให้สอดคล้องกับการสร้างแบบจำลองของสายอากาศ ค่าพารามิเตอร์จากตารางที่ 2 ถูกนำไปใช้ในการสร้างแบบจำลองของสายอากาศบนโปรแกรม CST เพื่อหาค่าความถี่ใช้งานและค่าการสูญเสียย้อนกลับ (S_{11})

4. ผลการดำเนินงาน

ผลการดำเนินงานนี้ได้สายอากาศไมโครสตริปรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัส ณ ความถี่ใช้งาน 2.449 กิกะเฮิร์ตซ์ (ใกล้เคียงกับความถี่ใช้งานที่ต้องการออกแบบ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์) โดยมีค่าขนาดสภาพเจาะจงทิศทางของพลูหลัก

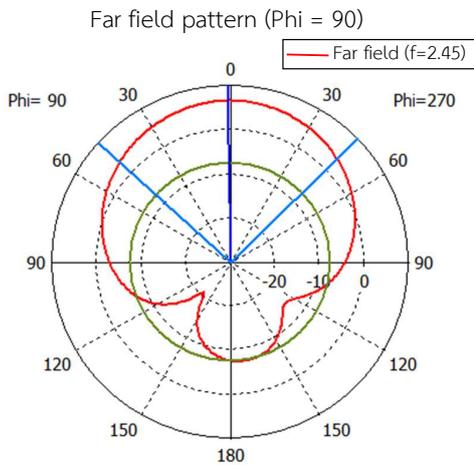
(main lobe magnitude) ทิศทางของพลูหลัก (main lobe direction) ความกว้างมุมของพลู (angular width) และระดับพลูด้านข้าง (side lobe level) โดยระดับพลูด้านหลัง (back lobe level) มีขนาดที่เล็กเมื่อเทียบกับพลูด้านหน้า (front lobe level) ซึ่งจะช่วยลดการแทรกสอดของสัญญาณได้ และภาครับจะสามารถตรวจจับสัญญาณได้ว่าสัญญาณใดเป็นสัญญาณหลักที่ส่ง ดังแสดงในรูปที่ 4 แบบรูปการแผ่กระจายของสนามระยะไกล (far field pattern) ดังแสดงในรูปที่ 4 พลูหลักของสนามระยะไกลอยู่ในมุมอ้างอิง 90 องศา (Φ 90) บันทึกรวดทิศทางของพลูหลักของสายอากาศที่ออกแบบเทียบกับสายอากาศไอโซโทรปิก (isotropic antenna)

ตารางที่ 2 แสดงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการสร้างแบบจำลองสายอากาศไมโครสตริปรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัส

พารามิเตอร์ที่ใช้	ค่าพารามิเตอร์
ความกว้างแผ่นตัวนำ (W)	28.97131 mm
ความยาวแผ่นตัวนำ (L)	28.97131 mm
ความยาวแผ่นกราวด์ (L_g)	57.94262 mm
ความกว้างแผ่นกราวด์ (W_g)	57.94262 mm
ความหนาของแผ่นฐานรอง (h)	0.75 mm
ความหนาของแผ่นตัวนำ (t)	0.035 mm
ค่าสภาพยอมสัมพัทธ์ทางไฟฟ้าของสารตัวกลาง (ϵ_r)	4.3 - 4.7 F/m
ความกว้างสายป้อนสัญญาณ (w_f)	1.25 mm

ค่าการสูญเสียย้อนกลับ (return loss, S11) ถูกแสดงในรูปที่ 5 มีค่าประมาณ -8.36 เดซิเบล ณ ความถี่ใช้งานที่ 2.449 กิกะเฮิร์ตซ์ (ร้อยละความผิดพลาดจริงเท่ากับ 0.04 เมื่อเทียบกับความถี่ใช้งานที่ต้องการออกแบบ ณ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์) ค่าการสูญเสียย้อนกลับที่ได้ ณ ความถี่ที่ออกแบบ 2.45 กิกะเฮิร์ตซ์ มีค่าที่สูงกว่า -10 เดซิเบล สาเหตุมาจากการที่ยังไม่ได้ทำการแมตซ์ซึ่งตัวสายอากาศกับจุดป้อนสัญญาณและค่าของความถี่ที่ใช้งานยังมีความคลาดเคลื่อนอยู่

เล็กน้อย อันเนื่องมาจากสมการการออกแบบสายอากาศไมโครสตริปนั้นไม่มีค่าพารามิเตอร์ในส่วนของความหนาของแผ่นทองแดง แต่ในการสร้างแบบจำลองของสายอากาศ ความหนาของแผ่นทองแดงนี้ถูกกำหนดให้มีค่าเพื่อสอดคล้องกับความเป็นจริงทางกายภาพที่แผ่นทองแดงต้องมีค่าความหนา



Theta / Degree vs. dBi

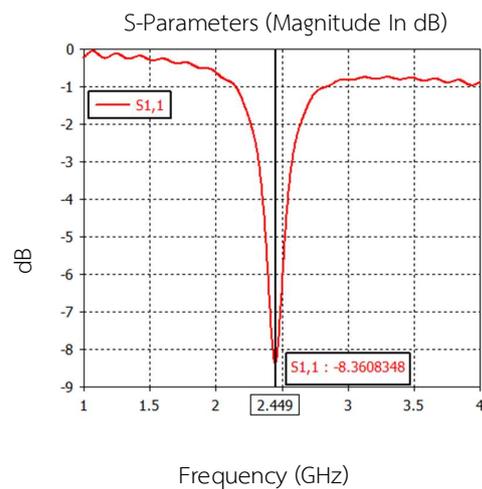
Frequency = 2.45 GHz
Main lobe magnitude = 6.49 dBi
Main lobe direction = 1.0 deg
Angular width (3 dB) = 93.1 deg
Side lobe level = -13.9 dB

รูปที่ 4 แบบรูปการแผ่กระจายของสนามระยะไกล (far field pattern)

5. สรุปผล

การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัสนั้น โดยวิธีการดั้งเดิมในการออกแบบคือ การใช้สมการพื้นฐานจากหัวข้อที่ 2 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง การออกแบบสายอากาศไมโครสตริป จะต้องใช้ในการแทนค่า

ความกว้าง (W) และความยาว (L) ลงในสมการที่ (1) - (5) เพื่อหาค่าความถี่ใช้งาน หากไม่ได้ค่าความถี่ที่ต้องการ จะต้องกำหนดค่าความกว้าง (W) และความยาว (L) ชุดใหม่เพื่อคำนวณ มีการลองถูกลองผิดในการแทนค่าไปเรื่อย ๆ ในกรณีต้องการได้ค่าความกว้าง (W) และความยาว (L) เท่ากัน จะใช้ระยะเวลาในการทำการทดลองอย่างมากจนกว่าจะได้ผลเฉลยที่ต้องการ อีกทั้งไม่สามารถคาดการณ์ได้ว่าจะพบผลเฉลยที่ต้องการหรือไม่ ซึ่งจะแตกต่างจากวิธีเชิงพันธุกรรมโดยวิธีเชิงพันธุกรรมนั้นจะสามารถกำหนดข้อจำกัดได้ว่าต้องการให้หาความกว้าง (W) และความยาว (L) คู่เข้าหาผลเฉลยที่มีเท่ากันเพื่อทำการวิเคราะห์หาค่าที่ดีที่สุดได้ นั่นคือมีค่าที่เหมาะสมกับความถี่ใช้งาน วิธีเชิงพันธุกรรมจึงถูกนำมาใช้เพื่อทำการหาผลเฉลย ในการปรับปรุงค่าที่ดีที่สุดเพื่อส่งผลให้ได้ค่าความกว้างและความยาวของสายอากาศที่เท่ากันนั้น เพื่อให้ได้สายอากาศที่มีความสมมาตรทางโครงสร้าง (แทนที่จะเป็นรูปร่างสี่เหลี่ยมผืนผ้าของแผ่นตัวนำตามวิธีการออกแบบดั้งเดิม) สัมพันธ์กับเทคนิคการลดวงจรของการบังคับลำคลื่น ซึ่งจะเป็นส่วนขยายของงานวิจัยในอนาคตสำหรับผู้สนใจต่อไป



รูปที่ 5 ค่าสูญเสียย้อนกลับ ณ ความถี่ 2.449 กิกะเฮิรตซ์

6. กิตติกรรมประกาศ

ทางผู้ทำการวิจัยในครั้งนีขอขอบคุณ ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ สำหรับการอำนวยความสะดวกในการใช้เครื่องมือทางวิศวกรรม

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] J. Liu, Z. Tang, Z. Wang, H. Li and Y. Yin, "Gain Enhancement of a Broadband Symmetrical Dual-Loop Antenna Using Shorting Pins," in *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 17, no. 8, pp. 1369-1372, Aug. 2018.
- [2] Yin, Q. Wu, C. Yu, H. Wang and W. Hong, "Millimeter-Wave Broadband Planar Cavity-Backed Antenna with Approximately Symmetrical Radiation Patterns," in *2018 IEEE International Symposium on Antennas and Propagation & USNC/URSI National Radio Science Meeting*, 2018, pp. 1943-1944.
- [3] Z. Yan and Y. Zhou, "Application to Optimal Control of Brushless DC Motor with ADRC Based on Genetic Algorithm," in *2020 IEEE International Conference on Advances in Electrical Engineering and Computer Applications(AEECA)*, Dalian, China, 2020, pp. 1032-1035.
- [4] V. Jain and M. Agrawal, "Applying Genetic Algorithm in Intrusion Detection System of IoT Applications," in *2020 4th International Conference on Trends in Electronics and Informatics (ICOEI)(48184)*, Tirunelveli, India, 2020.
- [5] F. Xu, J. Yang, L. Liu and G. Li, "A Method of Process Mining based on Genetic Algorithm," in *2021 3rd International Academic Exchange Conference on Science and Technology Innovation (IAECST)*, Guangzhou, China, 2021, pp. 698-703.
- [6] S.A. Aghdam, J. Bagby, and R.J. Pla, "Design and Development of Linear Array of Rectangular Aperture Coupled Microstrip Antennas with Application in Beamforming," in *17th International Symposium on Antenna Technology and Applied Electromagnetics*, July 10-13, 2016.
- [7] C.Z. Han, G.L. Huang, T. Yuan, and C.Y.D. Sim, "A Dual-Band Millimeter-Wave Antenna for 5G Mobile Applications," in *IEEE International Symposium on Antennas and Propagation and USNC-URSI Radio Science Meeting*, July 7-12, 2019.
- [8] C. A. Balanis, *Antenna theory analysis and design*, John Wiley & Sons, Inc., Second Edition, 1996.
- [9] L. Deng, P. Yang and W. Liu, "An Improved Genetic Algorithm," in *2019 IEEE 5th International Conference on Computer and Communications (ICCC)*, 2019, pp. 47-51.
- [10] J. Zhao, T. Huang, F. Pang and Y. Liu, "Genetic Algorithm Based on Greedy Strategy in the 0-1 Knapsack Problem," in *2009 Third International Conference on Genetic and Evolutionary Computing*, 2009, pp. 105-107.

การหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมในการเชื่อมจุดของอลูมิเนียมอัลลอย 6061-T6
ในอุตสาหกรรมยานยนต์
The Parameters Optimization for Spot-welding of 6061-T6 Aluminum
Alloy in Automotive Industry

กวิน สอนธิเพิ่มพูน* ชลดา เรอานิน เดทริท กิติเดช ปริญา ดวงจิตร์
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ต.ท่าโพธิ์ อ.เมือง จ.พิษณุโลก 65000

Kawin Sonthipermphoon* Chonlada Reanin Detrit Kitidet Prarinya Duanchit
¹Industrial Engineering department, Faculty of Engineering, Naresuan University,
Tha Pho, Mueang Phitsanulok District, Phitsanulok 65000

*Corresponding author Email: sonawin@nu.ac.th

(Received: February 27, 2023; Revised: May 22, 2023; Accepted: June 20, 2023)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการเชื่อมแบบจุด (Spot Welding) ในอุตสาหกรรมยานยนต์ ในปัจจุบันอุตสาหกรรมตัวถังรถยนต์ประสบปัญหาจากการเชื่อมแบบจุดเกี่ยวกับการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ในการเชื่อมแบบจุด เพื่อให้ได้การเชื่อมที่มีคุณภาพและเป็นไปตามมาตรฐานสากลทางด้านอุตสาหกรรมยานยนต์ การผลิตโดยทั่วไปใช้ประสบการณ์และการลองผิดลองถูกของผู้ปฏิบัติการและความชำนาญของผู้ปฏิบัติการในการปรับค่าพารามิเตอร์ แต่ค่าที่ได้ในการเชื่อมไม่ใช่ค่าที่เหมาะสมที่สุดและการปรับค่าพารามิเตอร์ในแต่ละเครื่องยังมีความยุ่งยากและมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมที่มีความซับซ้อน เช่น กระแสไฟฟ้า แรงกดจากหัวอิเล็กโทรด เวลาในการเชื่อม เป็นต้น จากปัญหาดังกล่าวผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษาทฤษฎี เพื่อให้เข้าใจความสัมพันธ์ของการปรับค่าพารามิเตอร์ในกระบวนการเชื่อมแบบจุด เพื่อสร้างชุดปฏิบัติการเชื่อมแบบจุด และทำการทดลองหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุด โดยการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลระดับ 2^k ให้ $k = 3$ ปัจจัย ได้แก่ กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม แรงกดคอดอิเล็กโทรด และเวลาในการเชื่อม

ผลการวิจัยของการเชื่อมแบบจุดแสดงให้เห็นว่า เมื่อนำชิ้นงานไปทดสอบแรงดึงเฉือนและใช้เทียบกับค่ามาตรฐานยานยนต์จากมาตรฐาน JIS Z 3140 กำหนดความต้านทานแรงดึงเฉือนของอะลูมิเนียมอัลลอยความหนา 1.00 มิลลิเมตร ชั้นต่ำ 0.62 กิโลนิวตัน และมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.92 กิโลนิวตัน ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดในการเชื่อมแบบจุด คือ กระแสไฟฟ้าที่ 17.50 กิโลแอมแปร์ เวลา 200 มิลลิวินาที และแรงกดที่หัวอิเล็กโทรด 591.50 เดกานิวตัน ซึ่งได้ค่าแรงดึงเฉือนเฉลี่ยอยู่ที่ 2.76 กิโลนิวตัน เป็นค่าที่ทำให้จุดรอยเชื่อมแข็งแรงที่สุด

คำสำคัญ: ตัวแปรที่เหมาะสม การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล การเชื่อมแบบจุด 6061-T6 อะลูมิเนียมอัลลอย อุตสาหกรรมยานยนต์

ABSTRACT

The research objective is to determine optimum parameters for spot-welding in the automotive industry. At present, the auto body industry is facing the problem of spot-welding, in regard to spot welding parameter setting to achieve welds quality the production generally uses the experience of trial and error of the technician. The skill of technicians in adjusting parameters but the value used for welding is not always the ideal value. Adjusting the parameters for each machine is also difficult. There is also a complex factor involved in welding is current, force and time of welding etc. Therefore, from such problems. The research operator has studied the theory to understand the relationship of parameter adjustment in the spot-welding process. To create a set of spot-welding operations and perform experiments for optimal parameters. We can increase performance by designing a 2^k level factorial experiment $k = 3$ factors: current, time, pressure.

Experimental results of spot-welding, when the specimen is put to the shear tensile test it was compared with the standard of international vehicles from JIS Z 3140 standard. Shear tensile strength of aluminum alloy with a thickness of 1.00 mm, minimum 0.62 kN and the average value was 0.92 kN. The most suitable for spot-welding are the current at 17.50 kA, time 200 ms and the pressure at the electrode head 591.50 deka N, the mean shear tensile strength of 2.76 kN is the strength of the weld.

Keyword: Parameters optimization, Factorial design of experiment, Spot-welding, 6061-T6 Aluminum Alloy, Automotive Industry.

1. บทนำ

การเชื่อมแบบจุดในอุตสาหกรรมตัวถังรถยนต์ ปัจจุบันนั้นยังประสบปัญหาจากการเชื่อมแบบจุดเกี่ยวกับการปรับตั้งค่าพารามิเตอร์ในการเชื่อมแบบจุด เพื่อให้ได้รอยเชื่อมที่มีคุณภาพ ซึ่งการผลิตโดยทั่วไปจะใช้คู่มือประสบการณ์การลองผิดลองถูกของผู้ปฏิบัติงาน และความชำนาญของผู้ปฏิบัติงาน ในการปรับค่าพารามิเตอร์ แต่ค่าที่ใช้ในการเชื่อมก็ไม่ใช่ว่าค่าที่เหมาะสมที่สุดเสมอไป และการปรับค่าพารามิเตอร์แบบรายเครื่องยังมีความยุ่งยาก ถ้ามีการปรับไม่เหมาะสมจะทำให้การเชื่อมจุดไม่ติดกันตามมาตรฐานหรือโลหะทะลุ และยังมีปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมที่มีความซับซ้อน คือ กระแสไฟฟ้า แรงกดจากหัวอิเล็กโทรด เวลาในการเชื่อม เป็นต้นซึ่งเป็นเหตุให้ใช้เวลา พลังงานสูง ใช้ชิ้นงานตัวอย่างในการทดลองและยืนยันผลเป็นจำนวนมาก ทำให้เกิดค่าใช้จ่ายที่

ค่อนข้างสูงมากในการปรับค่าพารามิเตอร์ เพื่อให้ได้รอยเชื่อมที่มีคุณภาพตามมาตรฐานที่เหมาะสมคุณภาพ และยังสามารถช่วยลดค่าใช้จ่ายในการผลิตอีกด้วย [7] เช่น กระแสไฟที่ใช้ในการเชื่อมแบบจุดจะเลือกใช้กระแสไฟที่น้อยที่สุดแต่ชิ้นงานที่ได้สามารถผ่านเกณฑ์มาตรฐานยานยนต์ได้ตั้งเอาไว้เพราะว่าจะช่วยลดค่าใช้จ่ายในส่วนของคุณค่าไฟฟ้าในบริษัทได้ การเลือกเวลาก็จะเลือกเวลาที่น้อยที่สุดในแต่ละวันสามารถผลิตชิ้นส่วนของรถยนต์ได้มากยิ่งขึ้น

ดังนั้นจากปัญหาดังกล่าว จึงได้ทำการศึกษาทฤษฎีเพื่อให้เข้าใจความสัมพันธ์ของการปรับค่าพารามิเตอร์ในกระบวนการเชื่อมแบบจุด และทำการทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สุดเพื่อ การปรับปรุงคุณภาพของรอยเชื่อมให้ได้ตามมาตรฐาน และมีประสิทธิภาพ

ในงานวิจัยกล่าวถึงทฤษฎีที่มีความเกี่ยวข้องในการดำเนินการวิจัย การศึกษาเพื่อเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมแบบจุด ด้วยอะลูมิเนียมอัลลอย 6061-T6 ขนาดความหนา 1.00 มม.

2. หลักการและทฤษฎีเบื้องต้น

ทฤษฎีที่มีความเกี่ยวข้องในการดำเนินการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมแบบจุดด้วยอะลูมิเนียมอัลลอย 6061-T6 ขนาดความหนา 1.00 มิลลิเมตร [8] สามารถแบ่งทฤษฎีออกเป็นเรื่องต่างๆ ดังนี้

2.1. วัสดุอะลูมิเนียม (Aluminum Material)

สัญลักษณ์ของอะลูมิเนียม คือ Al อะลูมิเนียมมีความสามารถต้านทานการกัดกร่อนได้ดีเยี่ยมในบรรยากาศน้ำทะเล ปีโตรเคมี และระบบเคมีอื่น ๆ ผิวของอะลูมิเนียมมีความสะท้อนแสงสูง มีความสะดวกในการผลิต อัตราความแข็งแรงต่อน้ำหนักสูง ใช้ในกระบวนการเชื่อมได้เป็นอย่างดี และค่าความต้านทานของการแตกหักมีอัตราสูง [1] การเลือกเกรดอะลูมิเนียมที่เหมาะสมขึ้นอยู่กับชนิดของงาน และสภาวะการใช้งาน และเป็นโลหะที่มีความสำคัญในการนำมาใช้งานทางวิศวกรรมในปัจจุบัน และสมบัติทางกายภาพที่สำคัญของอะลูมิเนียม แสดงไว้ดังตารางที่ 1

อะลูมิเนียมอัลลอย คือ โลหะผสมชนิดที่มีอะลูมิเนียมเป็นส่วนผสมหลักโดยที่ผสม แร่ธาตุอื่น ๆ ลงไปเพื่อสมบัติในการใช้งานที่หลากหลาย อะลูมิเนียมอัลลอย เกรด 6061 (Aluminum Alloy 6061) เป็นเกรดที่มีความแข็งแรงสูง ทนการกัดกร่อนได้ดี มีสมบัติทางกลที่หลากหลาย ใช้งานได้หลากหลายประเภท และยังสามารถใช้งานกับความร้อนได้ด้วย (Heat Treatable)

2.2. การเชื่อมแบบจุด (Spot-Welding)

การเชื่อมแบบจุดคือการเชื่อมรูปแบบหนึ่งที่นิยมใช้กันเป็นอย่างมากในอุตสาหกรรมยานยนต์ โดยลักษณะการเชื่อมของชิ้นงานจะทำการเชื่อมแผ่นโลหะที่วางซ้อนทับกันในการเชื่อมนั้นจะทำการปล่อยกระแสไฟฟ้าผ่านหัว

อิเล็กโทรดหรือหัวทองแดงแล้วกดหัวอิเล็กโทรดลงบนแผ่นโลหะ ทำให้เกิดความร้อน ณ ช่วงเวลาหนึ่งจนแผ่นโลหะเกิดการหลอมละลายจนชิ้นงานประสานติดกัน ณ ตำแหน่งที่หัวอิเล็กโทรดกดลงบนชิ้นงาน โดยข้อดีของการเชื่อมแบบจุดจะทำให้ชิ้นงานไม่สูญเสียรูปร่าง อันตรายจากควันในการเชื่อมมีน้อย ประหยัดเวลาและพลังงานในการเชื่อม แต่ข้อจำกัดในการเชื่อมแบบจุดนั้น จะไม่สามารถใช้งานได้หลากหลายเหมือนการเชื่อมแบบชนิดอื่น ๆ และอุปกรณ์ของการเชื่อมแบบจุดมีราคาสูง

ตารางที่ 1 สมบัติทางกายภาพของอะลูมิเนียมบริสุทธิ์ [1]

สัญลักษณ์	Al
หมายเลขอะตอม	13
ความถ่วงจำเพาะ	2.7 ก.ก. ต่อลูกบาศก์เซนติเมตร
โครงสร้างผลึก	FCC
จุดหลอมเหลว	660 องศาเซลเซียส
โมดูลัสยืดหยุ่น	69,000 เมกะปาสคาล (MPa)
สินแร่	บอกไซต์ (Bauxite) (สารมลทินผสมระหว่าง Al_2O_3 และ $Al(OH)_3$)
ธาตุผสม	ซิลิกอน (Si), ทองแดง (Cu), แมกนีเซียม (Mg), สังกะสี (Zn), แมงกานีส (Mn)
การใช้งาน	บรรจุภัณฑ์ อะลูมิเนียมแผ่นบาง ครัวไฟฟ้า หม้อ กระจก ชิ้นส่วนโครงสร้าง ยานอวกาศ รถยนต์ หรือชิ้นส่วนที่ต้องการน้ำหนักเบา

การเกิดความร้อนของรอยต่อการเชื่อมด้านทานแบบจุด [1] เกิดจากการนำกฎของโอห์มมาประยุกต์ใช้ เมื่อกระแสไหลผ่านตัวนำความต้านทานไฟฟ้าที่ยับยั้งการไหลผ่านของกระแสจะทำให้เกิดความร้อน (H) ที่สัมพันธ์กับกระแสเชื่อม (I) และความต้านทาน (R) โดยเป็นไปตามสูตรพื้นฐาน แสดงดังสมการ (1)

$$H = I^2 R \quad (1)$$

เมื่อนำเวลาเข้ามาพิจารณาเพื่อให้ได้ความสัมพันธ์ของสมการแล้วที่เกิดความร้อนสมการ (1) จะเกิดการเปลี่ยนแปลงได้สมการการเกิดความร้อน (H) จากการเชื่อมต้านทานแบบจุด ซึ่งสมการทจะมีความสัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้า (I) ความต้านทาน (R) เวลาเชื่อม (t) และการสูญเสียความร้อน (K) แสดงดังสมการ (2)

$$H = I^2RtK \quad (2)$$

สิ่งที่สำคัญในการเชื่อมแบบจุดคือเวลา ถ้าเวลาในการเชื่อมยาวนานเกินไป แล้วอาจทำให้โลหะเชื่อมเกิดการเสียหายเนื่องจากหลอมละลายได้ และชิ้นงานอาจเกิดรูพรุนได้ นอกจากนี้ในจุดที่ไม่มีการเชื่อมแบบจุดอาจเกิดการดึงโลหะและทำให้ชิ้นงานเกิดการเสียหาย เวลาการเชื่อมที่สั้นเกินไปนั้นจะทำให้การถ่ายเทความร้อนเข้าสู่โลหะเป็นไปได้อย่างลำบาก รอบนั้กเกิดมีขนาดเล็กเนื่องจากมีพื้นที่หน้าตัดจากการเชื่อมน้อย

อย่างไรก็ตาม สมการความร้อนที่แสดงดังสมการ (2) ไม่นิยมนำมาใช้มากนัก เนื่องจากค่าสูญเสียความร้อนนั้นมีความสามารถวัดได้ยาก ด้วยเหตุนี้จึงได้มีการประยุกต์ใช้สมการความร้อน (Q) ที่เกิดขึ้นในแนวเชื่อมที่สัมพันธ์กับกระแสไฟฟ้า (I) ความต้านทาน (R) และเวลาเชื่อม (t) แสดงดังสมการ (3)

$$Q = I^2Rt \quad (3)$$

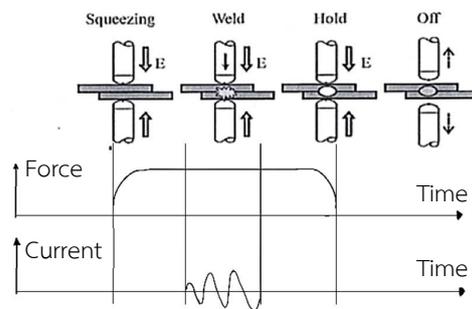
2.3. ปัจจัยที่มีผลต่อการเชื่อมแบบจุด

คุณภาพและขนาดของรอยเชื่อม รวมถึงการเกิดเนื้อเชื่อมบริเวณผิวหน้าประกบกันของชิ้นงาน อาศัยความร้อนจากความต้านทานภายในตัววัสดุ ซึ่งได้รับอิทธิพลจากการเปลี่ยนแปลงของปัจจัยในการเชื่อม[4] ดังนี้

2.3.1 กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม คือ ระดับความเข้มของค่ากระแสไฟฟ้าที่หัวอิเล็กโทรดปล่อยเข้าสู่ชิ้นงาน ซึ่งเป็นปัจจัยที่สำคัญที่ทำให้เกิดการหลอมละลายของชิ้นงานภายใต้หัวคอดอิเล็กโทรด ยิ่งค่าความเข้มของกระแสไฟฟ้า

มาก ความร้อนที่เกิดขึ้นจะแปรผันตามค่าความเข้มของกระแสไฟฟ้า

2.3.2 ช่วงเวลาในการเชื่อม คือ ช่วงระยะเวลาที่หัวอิเล็กโทรดกดลงบนผิวสัมผัสของชิ้นงาน และปล่อยกระแสไฟฟ้าออกมาทำให้เกิดความร้อนจนชิ้นงานหลอมละลายประสานติดกัน ซึ่งสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่ใช้ในการกด เวลา และกระแสไฟฟ้าในวงจรของกระบวนการเชื่อมแบบจุด (Spot Welding Cycle) แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ลำดับกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด [6]

2.3.3 วัสดุชิ้นงานและองค์ประกอบของวัสดุ

วัสดุชิ้นงานและองค์ประกอบของวัสดุจะส่งผลต่อความสามารถในการเชื่อม โดยองค์ประกอบของวัสดุจะประกอบด้วยความต้านทานไฟฟ้า การนำไฟฟ้า การนำความร้อนที่แตกต่างกัน ซึ่งมีส่วนประกอบทางเคมี แสดงดังตารางที่ 2 และสมบัติทางกลแสดงดังตารางที่ 3 [5]

ตารางที่ 2 ส่วนประกอบทางเคมีของอะลูมิเนียมอัลลอย 6061-T6 [7]

	Si	Fe	Cu	Mn	Mg
สูงสุด	0.80	0.70	0.40	0.15	1.20
ต่ำสุด	0.40	-	0.15	-	0.80
	Cr	Zn	Ti	Al	
สูงสุด	0.35	0.25	0.15	Balance	
ต่ำสุด	0.04	-	-	Balance	

ตารางที่ 3 สมบัติทางกลของอะลูมิเนียมอัลลอย 6061-T6 [7]

ทิศทาง	แนวยาว / แนวขวาง
ข้อจำกัด	ค่าต่ำสุด
ความเค้นสูงสุด (MPa)	290.0
ความเค้นคราก (MPa)	255.0
ระยะยืดวัสดุ (%)	12.0
ความถ่วงจำเพาะ (g/cm ³)	2.7

จากตารางที่ 2 และ 3 แสดงให้เห็นว่า อะลูมิเนียมอัลลอย 6061-T6 มีน้ำหนักเบาและมีสมบัติเชิงกลที่ดี อะลูมิเนียมอัลลอย กลุ่ม 6061-T6 ที่ผ่านการอบผิวแข็ง ซึ่งมีแนวโน้มการนำมาใช้อย่างกว้างขวางในอนาคต ทดแทนเหล็กบางส่วนที่เป็นวัสดุหลักในการสร้างรถยนต์จากมาตรฐานญี่ปุ่น ซึ่งในมาตรฐานสากลได้กำหนดไว้ว่า เป็นการเทียบมาจากมาตรฐานสากล (ISO) กำหนดความต้านทานแรงดึงเฉือนของอะลูมิเนียมอัลลอยความหนา 1.00 มิลลิเมตร ชั้นต่ำ 0.62 กิโลนิวตัน และมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.92 กิโลนิวตัน [Japanese Standard Association, 1995]

2.3.4 แรงกดอเล็กโทรด

แรงที่หัวอเล็กโทรด คือ ที่ปลายทั้งสองกดลงบนชิ้นงาน โดยแรงกดอเล็กโทรดที่เหมาะสมจะเป็นสิ่งสำคัญทำให้ชิ้นงานสมบูรณ์ มีความแข็งแรง ถ้าใช้แรงในการกดลงบนชิ้นงานมากเกินไปจะทำให้ชิ้นงานเกิดการหลอมละลายได้ เนื่องจากชิ้นงานได้รับความร้อนที่มาจากกระแสไฟฟ้าที่หัวอเล็กโทรดนำเข้าสู่ชิ้นงาน ในทางกลับกันถ้าแรงกดลงบนชิ้นงานน้อยเกินไปชิ้นงานที่ทำการเชื่อมจะไม่ได้ความแข็งแรงตามที่มาตรฐานกำหนด โดยทั่วไปขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวอเล็กโทรดจะกำหนดตามขนาดของ Nugget ที่ต้องการ และพิจารณาจากความหนาของชิ้นงาน จากสูตร แสดงดังสมการที่ 4

$$\text{ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางหัวอเล็กโทรด} = 0.1 + 2t \quad (4)$$

เมื่อกำหนดให้ t คือ ความหนาของชิ้นงาน (นิ้ว)

2.4. การตรวจสอบคุณภาพของรอยเชื่อมแบบจุด

การตรวจสอบคุณภาพของรอยเชื่อมแบบจุด คือ การทดสอบรอยเชื่อมตัวด้านทานแบบจุดจะใช้วิธีการทดสอบด้วยแรงดึงเฉือน จะเป็นการใช้เครื่องทดสอบแรงดึง (Tensile Tester) เพื่อหาค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมโลหะแผ่นที่ทำการเชื่อมซ้อนทับกัน โดยการทดสอบแรงดึงเฉือนจะใช้ค่าแรงดึงเฉือน จากมาตรฐาน JIS Z 3140 กำหนดความต้านทานแรงดึงเฉือนของอะลูมิเนียมอัลลอยความหนา 1.00 มิลลิเมตร ชั้นต่ำ 0.62 กิโลนิวตัน และมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 0.92 กิโลนิวตัน [Japanese Standard Association, 1995] เพื่อหาค่าปัจจัยที่เกี่ยวข้องในการเชื่อมแบบจุดที่เหมาะสมที่สุด

2.4.1 การทดสอบแบบถูกทำลายสภาพ (Destructive Test : DT) การทดสอบแบบถูกทำลายสภาพของงานเชื่อม ซึ่งในที่นี้จะกล่าวเฉพาะการทดสอบสมบัติทางกล ซึ่งเป็นการทดสอบหาความสามารถของรอยเชื่อมในการรับแรงกระทำในลักษณะต่าง ๆ ซึ่งการทดสอบจะนำงานเชื่อมที่ต้องการทดสอบมาจับยึดในเครื่องทดสอบโดยจับทั้งหัวและท้ายของงานทดสอบแล้วออกแรง กระทำและเพิ่มแรงขึ้นเรื่อย ๆ จนชิ้นงานทดสอบเสียหาย หรือขาดออกจากกันเป็น 2 ชิ้น ขณะเพิ่มแรงดึงทดสอบจะบันทึกขนาดของแรงดึงและการเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นงานทดสอบด้วยการพิมพ์กราฟแสดงความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงขนาดของชิ้นงานทดสอบกับแรงที่ใช้ และหาความสามารถของงานที่เชื่อมที่ทนต่อแรงกระทำ การทดสอบแบบถูกทำลายสภาพของงานเชื่อม จะทดสอบหาความต้านทานแรง ดึงที่กระทำของเนื้อเชื่อม และความต้านทานแรงกระทำของรอยต่องานเชื่อม

2.4.2 การทดสอบที่เหมาะสมสำหรับรอยต่อเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุด การทดสอบที่เหมาะสมสำหรับรอยต่อเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุด การทดสอบแรงดึงเฉือน เป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบความแข็งแรงของรอยต่อจากการเชื่อมด้วยความต้านทานแบบจุด โดยการทดสอบแรงดึงเฉือนจะใช้เครื่องทดสอบแรงดึงมาตรฐานทดสอบหาค่าปัจจัยในการเชื่อม (Welding Parameter)

ที่เหมาะสมที่จะให้ได้อรอยเชื่อมความต้านทานแบบจุดมีความสามารถในการต้านทานแรงดึงเดือนสูงสุด ส่วนการแตกหักสามารถเกิดได้ 2 ลักษณะด้วยกัน คือ

1) การแตกหักที่ผิวหน้าร่วมของรอยเชื่อมจุด (Interfacial Fracture) การแตกหักที่ผิวหน้าร่วมของรอยเชื่อมจุด โดยปกติผลการทดสอบไม่ต้องการการขาดแบบนี้ เพราะแสดงให้เห็นถึงรอยเชื่อมจุดหลอมเหลวไม่สมบูรณ์ เนื่องจากแรงยึดเหนี่ยว (Bond) ระหว่างรอยเชื่อมมีความแข็งแรงน้อยกว่าแผ่นโลหะงาน

2) การดึงรอยเชื่อมจุด (Nugget) การดึงรอยเชื่อมจุดฉีกขาดจากแผ่นโลหะงานในลักษณะฉีกขาดเป็นรู (Pull Out Fracture) แสดงว่ารอยเชื่อมมีคุณภาพเยี่ยม การแตกขาดที่แผ่นโลหะงานฉีกเป็นรูอาจเกิดขึ้นได้

3. การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design Experiment)

ทฤษฎีที่มีความเกี่ยวข้องในการดำเนินการศึกษาเพื่อเปรียบเทียบค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมสำหรับการเชื่อมแบบจุดด้วยอะลูมิเนียมอัลลอย 6061-T6 ขนาดความหนา 1.00 มิลลิเมตร สามารถแบ่งทฤษฎีออกเป็นเรื่องต่าง ๆ ดังนี้

ปารเมศ ชุตินา [2] กล่าวว่า การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล เป็นวิธีการทดลองในทางปฏิบัติจะเกี่ยวข้องกับการศึกษาถึงผลของปัจจัย (Factor) ตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป ซึ่งการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล (Factorial Design) จะเป็นวิธีการทดลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุด การออกแบบเชิงแฟกทอเรียล หมายถึง การทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจาก การรวมกันของระดับ (Level) ของปัจจัยทั้งหมดที่เป็นไปได้ในการทดลองนั้น ตัวอย่างเช่น กรณี 2 ปัจจัย ถ้าปัจจัย A ประกอบด้วย 3 ระดับ และปัจจัย B ประกอบด้วย 5 ระดับ ในการทดลอง 1 เปรกติ (Replicate) จะประกอบด้วย การทดลองทั้งหมด ab การทดลอง และเมื่อปัจจัยที่เกี่ยวข้องถูกนำมาจัดให้อยู่ในรูปแบบของการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล เรา

จะกล่าวว่ปัจจัยเหล่านี้มีการไขว้ (Crossed) ซึ่งกันและกัน

สรุปคือ การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลมีประโยชน์หลายประการ และเป็น การออกแบบที่มี ประสิทธิภาพเหนือกว่าการทดลองแบบที่ละปัจจัย ยิ่งกว่านั้นแล้วการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลยังเป็น สิ่งที่จำเป็นเมื่อมีอันตรกิริยาเกิดขึ้น ซึ่งกรณีเช่นนี้ทำให้สามารถหลีกเลี่ยงข้อสรุปที่เกิดความผิดพลาดได้ นอกจากนั้นแล้วการออกแบบเชิงแฟกทอเรียลทำให้เราสามารถประมาณผลของปัจจัยหนึ่งที่ระดับต่าง ๆ ของปัจจัยอื่นได้ ทำให้เราสามารถหาข้อสรุปที่สมเหตุสมผล (Valid) ตลอดเงื่อนไขของการทดลองได้

3.1. หลักการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2^k แบบเต็มรูปแบบ

หลักการออกแบบเชิงแฟกทอเรียล 2^k จะศึกษาถึงผลรวมที่มีต่อผลตอบซึ่งเกิดขึ้นจากปัจจัยต่าง ๆ ปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยประกอบด้วย 2 ระดับ ใน 2 ระดับ คือ ระดับค่าที่ต่ำที่สุด และสูงที่สุดของค่าตัวแปรที่ใช้ในการทดลอง ซึ่งสำหรับการออกแบบเช่นนี้จะประกอบด้วยข้อมูลทั้งสิ้น $2 \times 2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^k$ ข้อมูล และเราเรียกการออกแบบลักษณะนี้ว่า การออกแบบเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2^k

ในการทดลองที่เกี่ยวข้องการออกแบบ 2^k จะต้องตรวจสอบทั้งขนาดและทิศทางของปัจจัยที่มีผลเพื่อหาว่าตัวแปรใดที่น่าจะเป็นตัวการสำคัญที่ก่อให้เกิดผลขึ้น และใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนมาเป็นตัวยืนยันข้อสรุปนั้น

3.2. การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance)

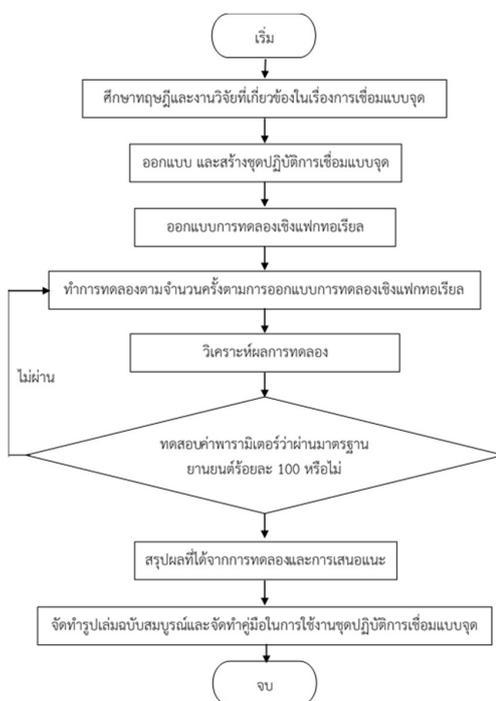
การวิเคราะห์ความแปรปรวน เป็นมาตรการของการวัดการกระจายตัวของข้อมูลที่มีความสัมพันธ์ กับส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ความแปรปรวนจึงเป็นการวัดการกระจายตัวของข้อมูลในรูปแบบของ พื้นที่ สำหรับการวิเคราะห์ความแปรปรวน หรือเรียกอย่างย่อว่า ANOVA เป็นวิธีหนึ่งในการทดสอบ สมมติฐาน เพื่อใช้ในการ

เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยของประชากรมากกว่า 2 กลุ่มขึ้นไปในเวลาพร้อมกัน

การวิเคราะห์ความแปรปรวน อาจจะเป็นการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-Way ANOVA) หรือการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองทาง (Two-Way ANOVA) ซึ่งการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว เป็นวิธีการทดสอบเพื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรเพียงตัวแปรเดียว โดยตัวแปรอาจจะมีลักษณะเป็นตัวแปรเชิงคุณภาพ และการวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทางจะกล่าวถึงการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระและตัวแปรต้น จำนวน 2 ตัวกับตัวแปรตามเพียง 1 ตัว

4. วิธีการดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนการดำเนินโครงการการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการเชื่อมแบบจุด เริ่มตั้งแต่ขั้นตอนการศึกษาเก็บรวบรวมข้อมูล และขั้นตอนการดำเนินงาน แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

5. ผลการวิจัย

ส่วนของผลการวิจัยได้ดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูลจากการทดลองเพื่อทำการวิเคราะห์ผล ซึ่งประกอบไปด้วยผลการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูปสองระดับ และการวิเคราะห์ผลการทดลอง ดังนี้

5.1. ผลจากการออกแบบการทดลองแฟกทอเรียล (Design of Experiment : DOE)

การออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียล เป็นการนำหลักการออกแบบการทดลอง มาใช้เป็นหลักการในการออกแบบ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม โดยมีการใช้การทดลองเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูปสองระดับ (2^k Full Factorial Experiment) จะประกอบด้วยปัจจัยหลักที่ใช้ในการทดลอง 3 ปัจจัย แต่ละปัจจัยมี 2 ระดับ (สูง-ต่ำ) และเพื่อความน่าเชื่อถือของการทดลอง จะทำการทดลองซ้ำทั้งหมด 3 ซ้ำ ดังนั้นจะต้องทำการเก็บข้อมูลจากการทดลองทั้งหมด $2^3 \times 3 = 24$ หน่วยการทดลอง โดยกำหนดกระแสฟ้าในการเชื่อม 17.5 และ 20 กิโลแอมแปร์ แรงกดอิเล็กโทรด 486.2 และ 591.5 เดคานิวตัน เวลาในการเชื่อม 100 และ 200 มิลลิวินาที ความหนาของชิ้นงาน 1.00 มิลลิเมตร หมายถึง ค่าต่าง ๆ ได้มาจากข้อจำกัดของตัวเครื่องจ่ายไฟ ความดันลม และการทดสอบเพื่อให้ได้ค่าตั้งข้างต้น ดังนั้นค่าตอบสนอง (Response) ที่เลือกใช้ในการทดลอง คือ ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนของจุดเชื่อมของชิ้นงานต่อ 1 ลำดับการทดลอง มีหน่วยกิโลนิวตัน การกำหนดปัจจัย 2 ระดับ 3 ปัจจัย เนื่องจากเป็นปัจจัยที่สามารถควบคุมได้ หรือเป็นปัจจัยที่ต้องป้อนค่า (Input) ในชุดโปรแกรมควบคุมการเชื่อม ด้วยโปรแกรม BOS6000 ดังนี้

- กำหนดปัจจัย A กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม ระดับต่ำ (-1) คือ 17.5 กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม ระดับสูง (1) คือ 20
- กำหนดปัจจัย B แรงกดอิเล็กโทรด แรงกดอิเล็กโทรด ระดับต่ำ (-1) คือ 486.2 แรงกดอิเล็กโทรด ระดับสูง (1) คือ 591.5
- กำหนดปัจจัย C เวลาในการเชื่อม

เวลาในการเชื่อม ระดับต่ำ (-1) คือ 100
เวลาในการเชื่อม ระดับสูง (1) คือ 200
การทดลองเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม เป็นการ
ออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2 ระดับ ซึ่ง
การทดลองเป็นการออกแบบการทดลองแบบสุ่ม โดยให้
แต่ละหน่วยการทดลองมีโอกาสที่จะได้รับทรีทเมนต์หนึ่ง
เท่ากัน การทดลองตามจำนวนครั้งตามการออกแบบเชิง
แฟกทอเรียลแบบสองระดับ เพื่อให้ได้ค่าความต้านทาน
แรงดึงเฉือนของจุดเชื่อมของชิ้นงานต่อ 1 ลำดับการ

ทดลอง จากการเชื่อมความต้านทานแบบจุด โดยกำหนด
เป็น 2 ระดับ คือ ระดับสูง และระดับต่ำ ซึ่งการออกแบบ
การทดลองทำให้ได้จำนวนการทดลองทั้งสิ้น 24 การ
ทดลอง ทำการทดลองและทำการบันทึกผลการทดลองค่า
ความต้านทานแรงดึงเฉือน จากเครื่องทดสอบความ
ต้านทานแรงดึงเฉือน รุ่น LLOYD Universal Testing
MODEL LR10K Plus หมายเลขเครื่อง 106463 แสดงดัง
ตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ 2 ระดับ ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

ลำดับ	แผนการทดลอง	กระแสไฟฟ้า (kA)	แรงกดอเล็กโทรด (daN)	เวลา (ms)	ความต้านทานแรงดึงเฉือน (kN)
1	21	20.000	591.500	100.000	0.849
2	11	17.500	591.500	200.000	2.578
3	22	20.000	591.500	200.000	1.073
4	12	17.500	591.500	200.000	2.877
5	15	20.000	486.200	100.000	1.440
6	14	20.000	486.200	100.000	0.847
7	9	17.500	591.500	100.000	1.456
8	13	20.000	486.200	100.000	0.653
9	3	17.500	486.200	100.000	1.357
10	18	20.000	486.200	200.000	0.950
11	19	20.000	591.500	100.000	1.294
12	16	20.000	486.200	200.000	1.972
13	7	17.500	591.500	100.000	1.876
14	17	20.000	486.200	200.000	0.163
15	2	17.500	486.200	100.000	0.946
16	8	17.500	591.500	100.000	1.980
17	5	17.500	486.200	200.000	1.945
18	10	17.500	591.500	200.000	2.812
19	23	20.000	591.500	200.000	1.987
20	1	17.500	486.200	100.000	1.268
21	6	17.500	486.200	200.000	2.324
22	4	17.500	486.200	200.000	2.143
23	24	20.000	591.500	200.000	0.911
24	20	20.000	591.500	100.000	1.165

จากตารางที่ 4 เป็นการออกแบบการทดลองให้มีการสุ่ม (Randomization) โดยให้แต่ละหน่วยการทดลองมีโอกาสที่จะได้รับทริทเมนต์หนึ่งเท่ากัน เพื่อขจัดอคติหรือความเอนเอียงของผู้ทดลอง เพื่อให้แน่ใจว่าทริทเมนต์ต่าง ๆ ได้รับความได้เปรียบและเสียเปรียบในเรื่องเกี่ยวกับการทดลอง และเพื่อให้การวิเคราะห์และการทดสอบทางสถิติมีความคลาดเคลื่อนที่จะเกิดขึ้นโดย

สุ่มเป็นอิสระต่อกัน ดังนั้น การทดลองเบื้องต้นนี้ ผู้ดำเนินโครงการได้ใช้โปรแกรมทางสถิติ Minitab Version 14 ทำการวิเคราะห์ผลการทดลอง

จากตารางที่ 5 เป็นการเปรียบเทียบค่าที่ได้จากการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง แสดงให้เห็นเพื่อพิจารณาค่าที่ทำซ้ำทั้งการทดลอง มีผลการทดลองที่แตกต่างกันมาน้อยเพียงใด

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบผลการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

กระแสไฟฟ้า (kA)	แรงกดอิเล็กทรอนิกส์ (daN)	เวลา (ms)	ความต้านทานแรงดึงเฉือน (kN)			ค่าเฉลี่ย (kN)
			1	2	3	
17.5	486.2	100	1.268	0.946	1.357	1.190
17.5	486.2	200	2.143	1.945	2.324	2.137
17.5	591.5	100	1.876	1.980	1.456	1.771
17.5	591.5	200	2.812	2.578	2.877	2.756
20	486.2	100	0.653	0.847	1.440	0.980
20	486.2	200	1.972	0.163	0.950	1.028
20	591.5	100	1.294	1.165	0.849	1.103
20	591.5	200	1.073	1.987	0.911	1.324

5.2. วิเคราะห์ผลการทดลอง

การวิเคราะห์ผลการทดลอง เป็นการนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้จากการทดลองมาทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน โดยใช้โปรแกรม Minitab Version 14 เพื่อใช้ตรวจสอบอิทธิพลของปัจจัยต่อผลตอบสนองที่กำลังสนใจ อันเกิดจากทั้ง 3 ปัจจัย และเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ดังนี้

5.2.1 การทดสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง (Model Adequacy Checking) เครื่องมือที่ใช้ในการทดสอบ คือ การวิเคราะห์ส่วนตกค้าง (Residual Analysis) แสดงตามรูปที่ 3

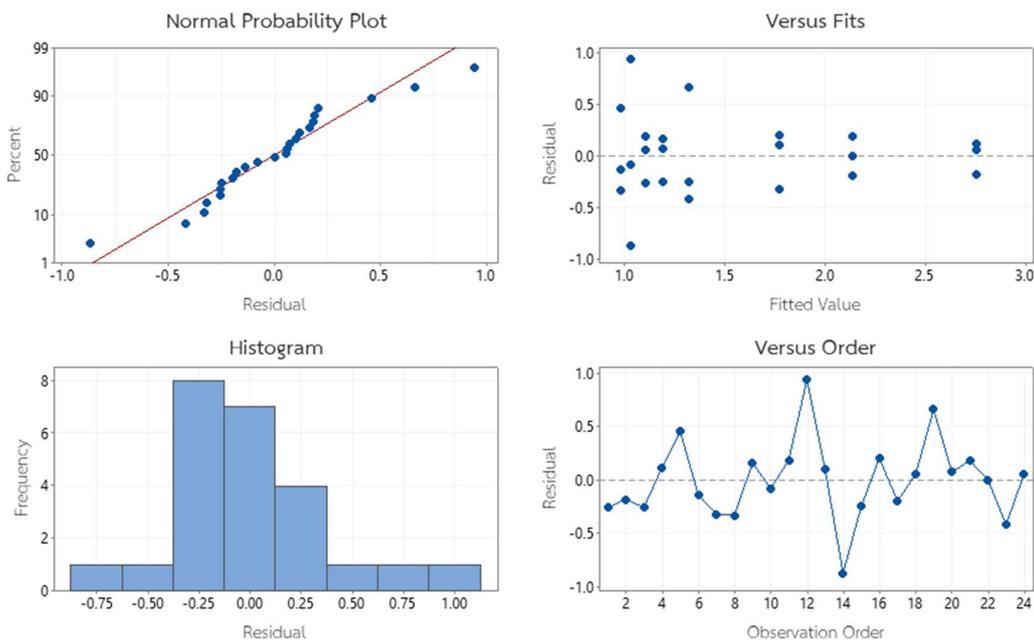
การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ (Normal Distribution) ของค่าส่วนตกค้าง ซึ่งใช้ในการทดสอบการแจกแจงแบบปกติ (Normal Probability Plot) โดยพิจารณาจากรูปที่ 3 พบว่า ค่าส่วนตกค้าง มีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง ทำให้ประมาณได้ว่า ค่า

ส่วนตกค้างมีการแจกแจงแบบปกติ โดยมีรูปที่ 4 อธิบายเพิ่มเติมในเรื่องของการตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ กราฟ Histogram มีลักษณะของระฆังคว่ำ แสดงว่าข้อมูลมีการแจกแจงแบบปกติ ความแปรปรวนของค่าส่วนตกค้างมีค่าค่อนข้างใกล้เคียงกันในแต่ละตำแหน่ง แต่รูปแบบการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างเข้าข่ายกรวยปลายปิด หรือรูปแบบลำโพง แต่ยังอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ และการกระจายตัวของค่าส่วนตกค้างและลำดับที่ของการทดลอง เพื่อตรวจสอบความเป็นอิสระของค่าส่วนตกค้าง ของข้อมูล ซึ่งมีการกระจายตัวไม่มีลักษณะแนวโน้มที่จะเป็นรูปแบบที่แน่นอน จึงถือว่าส่วนตกค้างมีความเป็นอิสระต่อกัน ซึ่งถือว่าข้อมูลมีความถูกต้องเหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์

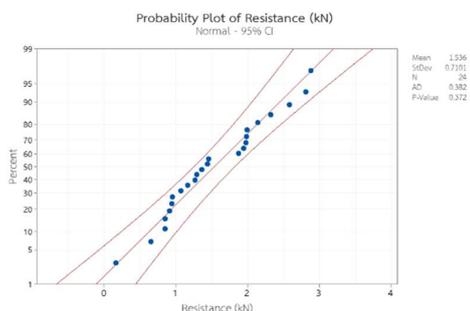
โดย 4 จุด ของ Normal Probability plot ที่จะมีระยะห่างจากกลุ่มข้อมูลนั้น เริ่มจากจุดล่างสุดไปจุด

บนสุด พบว่า เทียบข้อมูลจากตารางที่ 4 คือ ลำดับการเชื่อมที่ 14 ลำดับแผนการทดลองที่ 17 กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 20 กิโลแอมแปร์ แรงกดอเล็กโทรด 486.2 เดคาวัตต์ และเวลาในการเชื่อม 200 มิลลิวินาที ได้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือน เท่ากับ 0.163 กิโลนิวตัน ลำดับการเชื่อมที่ 5 ลำดับแผนการทดลองที่ 1 กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 20 กิโลแอมแปร์ แรงกดอเล็กโทรด 486.2 เดคาวัตต์ และเวลาในการเชื่อม 100 มิลลิวินาที ได้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือน เท่ากับ 1.440 กิโลนิวตัน ลำดับการเชื่อมที่ 19 ลำดับแผนการทดลองที่ 23 กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 20 กิโลแอมแปร์ แรงกดอเล็กโทรด 591.5 เดคาวัตต์ และเวลาในการเชื่อม 200 มิลลิวินาที ได้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือน เท่ากับ 1.987 และลำดับการเชื่อมที่ 12 ลำดับแผนการทดลองที่ 16 กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 20 กิโล

แอมแปร์ แรงกดอเล็กโทรด 486.2 เดคาวัตต์ และเวลาในการเชื่อม 200 มิลลิวินาที ได้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือน เท่ากับ 1.972 กิโลนิวตัน เหตุผลที่ทำให้จุดทั้ง 4 จุดนี้ค่อนข้างออกห่างจากกลุ่มข้อมูลอื่น ๆ เกิดจากระหว่างการเชื่อมนั้นใช้ไฟฟ้าในเชื่อมที่สูงจึงทำให้เครื่องจ่ายไฟเกิดการตัดในระบบ ทำให้เกิดข้อบกพร่องในการเชื่อม ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนมีค่าคลาดเคลื่อน แสดงดังรูปที่ 4 แสดงผลการตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติของค่าส่วนตกค้าง โดยโปรแกรม Minitab Version 14 จะให้ค่า P-Value พบว่า (P-Value = 0.372) > ($\alpha = 0.05$) [3] จึงยอมรับสมมติฐาน สรุปได้ว่า ข้อมูลของค่าส่วนตกค้างมีการกระจายตัวแบบปกติ



รูปที่ 3 การตรวจสอบความถูกต้องของการทดลองแฟกทอเรียลเต็มรูป 2 ระดับ



รูปที่ 4 กราฟแสดงข้อมูลการตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติ

5.2.2 การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) จากผลการตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง พบว่า ไม่มีความผิดปกติของการทดลองเกิดขึ้นและข้อมูลที่ได้มีความน่าเชื่อถือ จากนั้นจึงทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อศึกษาถึงอิทธิพลของปัจจัยทั้งหมด โดยกำหนดระดับความเชื่อมั่นที่ร้อยละ 95 ($\alpha = 0.05$) แสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 แสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการทดลองเชิงแฟกทอเรียลแบบ 2 ระดับ

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Model	7	8.46880	1.20983	6.19000	0.00100
Linear	3	7.18020	2.39340	12.24000	0.00000
Current (kA)	1	4.38270	4.38267	22.42000	0.00000
Force (daN)	1	0.98030	0.98031	5.02000	0.04000
Time (ms)	1	1.81720	1.81724	9.30000	0.00800
2-Way Interactions	3	1.28180	0.42725	2.19000	0.12900
Current (kA)*Force (daN)	1	0.22840	0.22842	1.17000	0.29600
Current (kA)*Time (ms)	1	1.03660	1.03660	5.30000	0.03500
Force (daN)*Time (ms)	1	0.01670	0.01673	0.09000	0.77400
3-Way Interactions	1	0.00690	0.00686	0.04000	0.85400
Current (kA)*Force (daN)*Time (ms)	1	0.00690	0.00686	0.04000	0.85400
Error	16	3.12740	0.19546		
Total	23	11.59620			

S = 0.44211 R-sq = ร้อยละ 73.03000 R-sq (adj) = ร้อยละ 61.23000

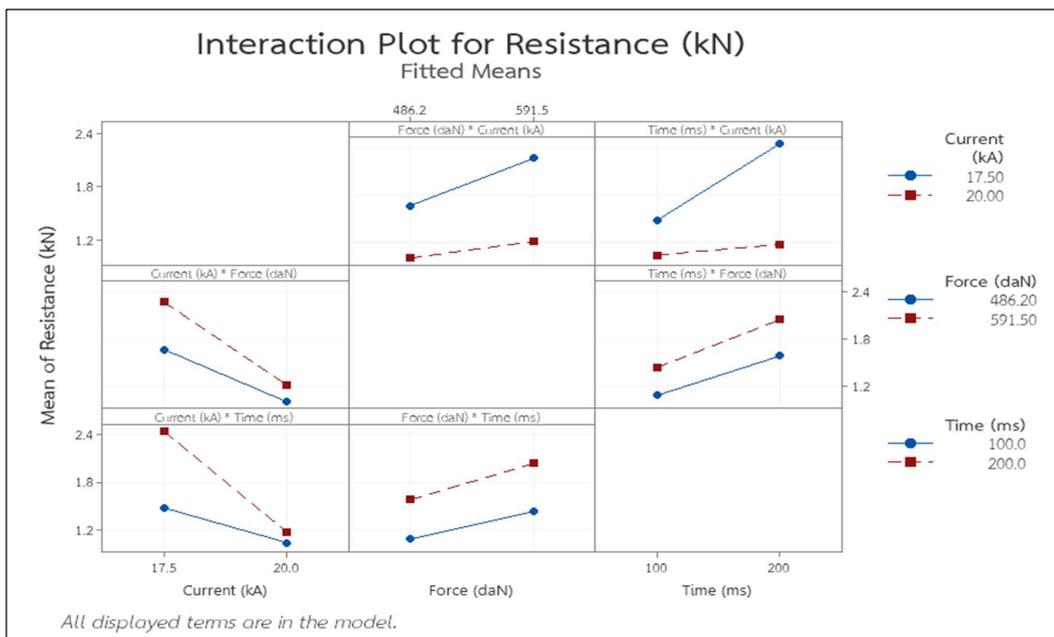
จากตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์ค่าความต้านทานแรงดึงเดือน โดยใช้โปรแกรมทางสถิติ พบว่า อิทธิพลของปัจจัยหลักทั้ง 3 ปัจจัย คือ กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม แรงกดอิเล็กโทรด และเวลาในการเชื่อมมีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงเดือนอย่างมีนัยสำคัญ โดยมีค่า P-Value น้อยกว่านัยสำคัญที่ 0.05 โดยกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมมีค่า P-Value เท่ากับ 0.000 แรงกดอิเล็กโทรดมีค่า P-Value เท่ากับ 0.040 และเวลาในการเชื่อมมีค่า P-Value เท่ากับ 0.008 อิทธิพลของปัจจัยร่วมมีเพียง 1 ปัจจัยร่วมที่มีผลต่อค่าความ

ต้านทานแรงดึงเดือน คือ ปัจจัยระหว่างกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมและเวลาในการเชื่อม มีค่า P-Value เท่ากับ 0.035 ซึ่งน้อยกว่าค่านัยสำคัญที่ 0.05 และอิทธิพลร่วมที่เหลือ คือ ปัจจัยร่วมระหว่างกระแสไฟฟ้ากับแรงกดอิเล็กโทรด แรงกดอิเล็กโทรดกับเวลาในการเชื่อม และปัจจัยระหว่างกระแสไฟฟ้าในการเชื่อม แรงกดอิเล็กโทรด และเวลาในการเชื่อม จากผลการทดลองไม่มีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงเดือน เนื่องจากค่า P-Value มีค่ามากกว่าค่านัยสำคัญที่ 0.05

จากข้อมูลที่วิเคราะห์โดยใช้โปรแกรม Minitab Version 14 พบว่า ให้ค่าความเชื่อมั่นของข้อมูลคือ R-sq = ร้อยละ 73.03 และ R-sq (adj) = ร้อยละ 61.23 ซึ่งค่าที่ได้จึงเป็นค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ดีจากค่า P-Value ของปัจจัยหลัก ทั้งกระแสไฟในการเชื่อม แรงกดอเล็กโตรด และเวลาในการเชื่อม ซึ่งมีค่า P-Value < α (ซึ่งผู้จัดทำได้กำหนด $\alpha = 0.05$) ดังนั้น ค่าที่ได้จึงมีความน่าเชื่อถือ

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของอิทธิพลหลักจาก 3 ปัจจัย ที่มีผลต่อความต้านทานแรงดึงเดือน ดังรูปที่ 5 พบว่า กระแสไฟในการเชื่อมมีผลต่อค่าความต้านทานแรงดึงเดือน คือเมื่อกระแสไฟในการเชื่อมเพิ่มขึ้นความ

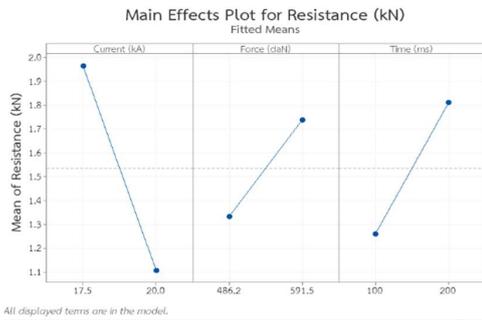
ต้านทานแรงดึงเดือนมีแนวโน้มลดลง เมื่อพิจารณาเพิ่มแรงกดอเล็กโตรดสูงขึ้น พบว่า ค่าความต้านทานแรงดึงเดือนเพิ่มขึ้นจนแรงกดอเล็กโตรด 591.5 เดคานิวตัน หรือ 5,915 นิวตัน (เนื่องจากข้อจำกัดของความดันที่เข้ามาในระบบ เข้ามาเพียง 100 บาร์ แรงกดอเล็กโตรดจึงสูงสุดได้เพียงข้างต้น) และในขณะเดียวกันเมื่อพิจารณาเวลาในการเชื่อม พบว่า เมื่อเวลาในการเชื่อมเพิ่มขึ้นค่าความต้านทานแรงดึงเดือนก็จะเพิ่มขึ้น (ผู้ทำการทดลองได้ทดลองจากหลาย ๆ ค่า และผู้ทำการทดลองได้นำค่าที่ดีที่สุดมาใช้ในการออกแบบการทดลอง)



รูปที่ 5 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอิทธิพลรวมทั้ง 3 ปัจจัย

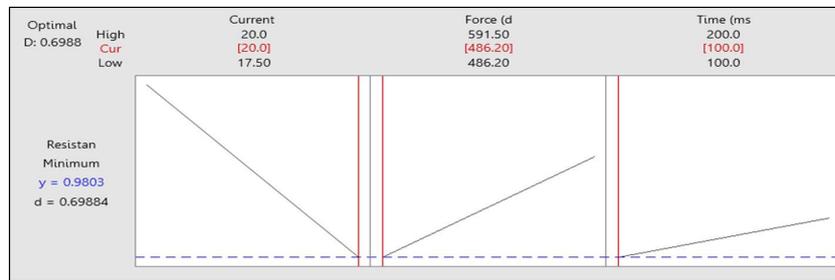
จากรูปที่ 6 แสดงอิทธิพลของปัจจัยร่วมทั้ง 3 ปัจจัย คือ กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม แรงกดอเล็กโตรด และเวลาในการเชื่อม ที่มีผลต่อความต้านทานแรงดึงเดือน พบว่า เมื่อกระแสไฟในการเชื่อมเท่ากับ 17.5 กิโลแอมแปร์ แรงกดอเล็กโตรดเท่ากับ 591.5 เดคานิวตัน หรือมีค่าเท่ากับ 5,915 นิวตัน และเวลาในการ

เชื่อมขึ้นงานเท่ากับ 200 มิลลิวินาที ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงเดือนในกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด มากกว่าการปรับค่ากระแสไฟในการเชื่อม แรงกดอเล็กโตรด และเวลาในการเชื่อมในระดับอื่น

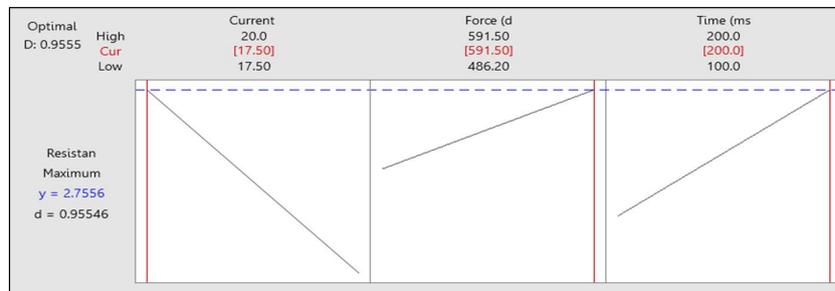


รูปที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ของอิทธิพลหลักทั้ง 3 ปัจจัย

5.2.3 การกำหนดค่าของปัจจัยที่เหมาะสมจากการทดลอง การทดลองหาสภาวะปัจจัยที่เหมาะสมเพื่อเพิ่มค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนของชิ้นงานในกระบวนการเชื่อมความต้านทานแบบจุด โดยใช้โปรแกรม Minitab Version 14 เลือกใช้ฟังก์ชัน Response Optimizer ในการวิเคราะห์ข้อมูล โดยปัจจัยที่ได้นำมาพิจารณาประกอบด้วย ค่ากระแสไฟฟ้าในการเชื่อม แรงกดอเล็กโทรด และเวลาในการเชื่อม แสดงดังรูปที่ 7-8



รูปที่ 7 กราฟแสดงผลการตอบสนองของระดับปัจจัยที่มีผลต่ำสุด



รูปที่ 8 กราฟแสดงผลการตอบสนองของระดับปัจจัยที่มีผลสูงสุด

จากรูปที่ 7 พบว่า เมื่อกระแสไฟในการเชื่อมเท่ากับ 20 กิโลแอมแปร์ แรงกดอเล็กโทรดเท่ากับ 486.2 เดคานิวตัน หรือ 4,861 นิวตัน และเวลาในการเชื่อมเท่ากับ 100 มิลลิวินาที จะได้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนเท่ากับ 0.9803 กิโลนิวตัน ซึ่งเป็นค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนที่ต่ำที่สุด ซึ่งค่าที่ได้อยู่ในเกณฑ์ที่มาตรฐานกำหนด แต่เพื่อหาค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนที่สูงที่สุด ดังนั้นจึงทำการหาสภาวะปัจจัยที่ทำให้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนสูงสุดต่อไป

จากรูปที่ 8 พบว่า เมื่อกระแสไฟในการเชื่อมเท่ากับ 17.5 กิโลแอมแปร์ แรงกดอเล็กโทรดเท่ากับ 591.5 เดคานิวตัน หรือ 5,915 นิวตัน และเวลาในการเชื่อมเท่ากับ 200 มิลลิวินาที จะได้ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนเท่ากับ 2.7556 กิโลนิวตัน ซึ่งเป็นค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนที่สูงที่สุดและมากกว่าค่ามาตรฐาน JIS Z 3140 [[Japanese Standard Association, 1995] กำหนดไว้ และบรรลุตามวัตถุประสงค์ของการดำเนินโครงการวิจัย

6. สรุปและข้อเสนอแนะ

6.1. ตัวแปรที่มีผลต่อความต้านทานแรงดึงเฉือนในการเชื่อมความต้านทานแบบจุด

ตัวแปรที่มีผลต่อความต้านทานแรงดึงเฉือนในการเชื่อมความต้านทานแบบจุด พบว่า ปัจจัยหลักทั้ง 3 ปัจจัย ได้แก่ กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม แรงกดอิเล็กโทรด และเวลาในการเชื่อม ปัจจัยร่วม คือ ปัจจัยร่วมระหว่างกระแสไฟฟ้าและเวลาในการเชื่อม ที่มีอิทธิพลต่อการเชื่อมความต้านทานแบบจุด ในการเชื่อมอะลูมิเนียมอัลลอย 6061-T6 ขนาดความหนา 1.00 มิลลิเมตร อย่างมีนัยสำคัญ โดยพิจารณาค่า P-Value ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

6.2. ความสัมพันธ์ของพารามิเตอร์ในการเชื่อมความต้านทานแบบจุด

จากการพิจารณาความสัมพันธ์พารามิเตอร์ในการเชื่อมที่มีผลต่อความต้านทานแรงดึงเฉือน พบว่า เมื่อกระแสไฟฟ้าในการเชื่อมลดลงจาก 20 ถึง 17.5 กิโลแอมแปร์ ความต้านทานแรงดึงเฉือนจะเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มแรงกดอิเล็กโทรดจาก 486.2 ถึง 591.5 เดคานิวตัน หรือ 4,862 ถึง 5915 นิวตัน ความต้านทานแรงดึงเฉือนจะเพิ่มขึ้น และเมื่อเวลาในการเชื่อมเพิ่มขึ้นจาก 100 ถึง 200 มิลลิวินาที ค่าความต้านทานแรงดึงเฉือนจะเพิ่มขึ้น สรุปได้ว่า ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมของการเชื่อมความต้านทานแบบจุดสำหรับอะลูมิเนียมอัลลอย 6061-T6 ขนาดความหนา 1.00 มิลลิเมตร โดยเครื่องเชื่อมแบบจุด รุ่น NIMAK B1.020.020 ใช้โปรแกรม BOS6000 ในการควบคุมระบบ คือ กระแสไฟฟ้าในการเชื่อม 17.5 กิโลแอมแปร์ แรงกดอิเล็กโทรด 591.5 เดคานิวตัน หรือ 5915 นิวตัน และเวลาในการเชื่อม 200 มิลลิวินาที

6.3. ข้อเสนอแนะ

ผู้ดำเนินโครงการมีข้อเสนอแนะในการพัฒนาฟิสิกซ์เจอร์จับยึดชิ้นงานทดสอบขณะทำการเชื่อม เพื่อป้องกันการหล่นจากตัวเครื่องเชื่อม หรือบีดงอของชิ้นงาน และเพื่อการกำหนดระยะจุดเชื่อมได้ง่ายขึ้น

หากต้องการใช้วัสดุอื่นในการเชื่อมแบบจุด สามารถนำวิธีการทดลองไปปรับใช้เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมกับวัสดุนั้น ๆ

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Chantasri, P. Yampuern and K. Kimapong, "A Study of Resistant Spot Welds Properties between AA1100 Aluminum Alloy and SGACD Zinc Coated Steel", Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, 2555.
- [2] P. Chutima (2545). Design of Experiment (DOE)", Academic Resources, Chulalongkorn University, 2545.
- [3] C. Seekeawsiew (2555). Design of Experiment : DOE [Online]. Available : http://www.geocities.ws/chalong_sri/why_DOE.htm.
- [4] T. Alanchai and K. Sonthipermpon, T. Arunchai, K. Sonthipermpon, P. Apichayakul and K. Tamee, "Resistance Spot Welding Optimization Based on Artificial Neural Network", *International Journal of Manufacturing Engineering*, vol. 2014, Article ID154784.
- [5] P. NA. Ayutthaya and P. Learunpaiboon, *Design and Analysis of Experiment*, Top Publishing, 2551.
- [6] C.Z Syn, M. Mokhtar, C.J. Feng and Y. H.P. Manurung, "Approach to prediction of laser cutting quality by employing fuzzy expert system", *Expert Systems with*

Applications, Vol. 38, Issue 6, pp. 7558-7568, June 2011.

- [7] R.S. Florea, K.N. Solanki, D.J. Bammann, J. C. Baird, J.B. Jordon and M.P. Castanier, “Resistance spot welding of 6061-T6 aluminum: Failure loads and deformation”, *Materials & Design*, vol. 34, pp. 624-630, 2012.
- [8] J. HIRSCH, “Recent developments in aluminum for automotive applications”, *Transaction of Nonferrous Metals Society of China*, vol. 24, Issue 7, pp. 1995-2002, 2014.

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิ (Reader)

ต้นฉบับบทความวิจัยที่ตีพิมพ์วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีที่ 18 ฉบับที่ 2 (เดือนเมษายน – กันยายน พ.ศ. 2566) ได้รับการตรวจสอบแก้ไขจากผู้ทรงคุณวุฒิดังรายนามต่อไปนี้

1.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยวัฒน์ นุ่มทอง	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา
2.	รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชัย ฤทธิวิรุฬห์	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
3.	อาจารย์ ดร.วุฒินันท์ นุ่นแก้ว	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
4.	รองศาสตราจารย์ ดร.ยุทธชัย บรรเทงจิตร	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
5.	ศาสตราจารย์ ดร.พงศ์ชนัน เหลืองไพบูลย์	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
6.	อาจารย์ ดร.วาทัญญู มีศรีสุข	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
7.	รองศาสตราจารย์ ดร.เจริญชัย โขมพัตราภรณ์	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (บางมด)
8.	รองศาสตราจารย์ ดร.ทศพล เกียรติเจริญผล	สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
9.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ เนียมสอน	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
10.	อาจารย์ ดร.สุรัชย์ เหมหิรัญ	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
11.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐวุฒิ จันทร์ทอง	ภาควิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
12.	อาจารย์ ดร.วิชา อูปภัย	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร
13.	อาจารย์ปรัชญา บำรุงกุล	สาขาเทคโนโลยีไฟฟ้า คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์
14.	อาจารย์สุรเชษฐ์ โทวารากา	ภาควิชาคอมพิวเตอร์และหุ่นยนต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกรุงเทพ
15.	รองศาสตราจารย์ ดร.วันฐณพงษ์ คงแก้ว	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
16.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภก.ณัฐวุฒิ เจริญไทย	ภาควิชาเภสัชอุตสาหกรรม คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิ (Reader)

ต้นฉบับบทความวิจัยที่ตีพิมพ์วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีที่ 18 ฉบับที่ 2 (เดือนเมษายน – กันยายน พ.ศ. 2566) ได้รับการตรวจสอบแก้ไขจากผู้ทรงคุณวุฒิดังรายนามต่อไปนี้

17.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐดนัย พรรณเจริณวงษ์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
18.	รองศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา การินทร์	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
19.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรทิพย์ แก่งอินทร์	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
20.	อาจารย์ ดร.ศรีษฐา แจ้งสามสี	ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (บางมด)
21.	รองศาสตราจารย์ ดร. มนต์ทิพย์ภา อุฑารสกุล	สาขาวิชาวิศวกรรมโทรคมนาคม สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
22.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อำนาจ เรืองวารี	ภาควิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
23.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กำพล วรดิษฐ์	ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
24.	รองศาสตราจารย์ ดร.สุรเชษฐ์ กานต์ประชา	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
25.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิภู ศรีสืบสาย	วิทยาลัยเทคโนโลยีและนวัตกรรมวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
26.	ศาสตราจารย์ ดร.ปารเมศ ชูติมา	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์ มหาวิทยาลัย

คำแนะนำสำหรับผู้เขียนบทความลงตีพิมพ์
วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

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

1. การเตรียมต้นฉบับ

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

รูปแบบการเขียนบทความ ควรมีหัวข้อเรื่องเรียงตามลำดับดังต่อไปนี้

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>

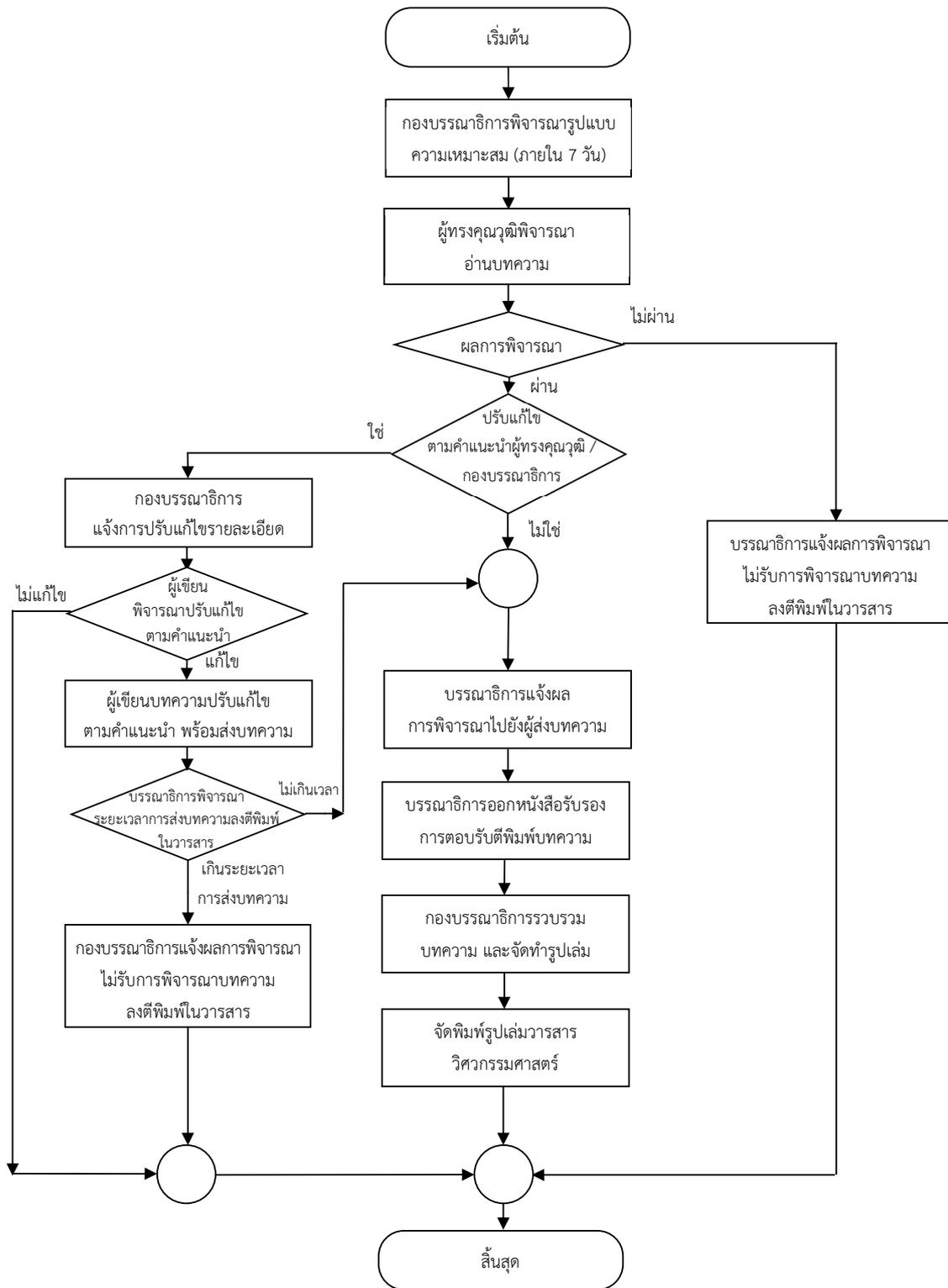
2. วิธีการส่งบทความ

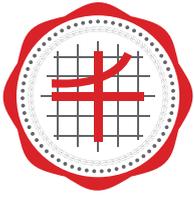
- 1) ส่งต้นฉบับบทความ ไฟล์ Microsoft Word และ pdf พร้อมแนบไฟล์สแกนแบบเสนอผลงานวิชาการเพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
- 2) ส่งไฟล์ต้นฉบับทางออนไลน์ที่ <https://www.tci-thaijo.org/index.php/sej/login>
- 3) ดูข้อมูลวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒเพิ่มเติม 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. 18 No.2 (April 2023 - September 2022)

ISSN : 2774 - 0269 (Online)

บทความวิจัย

- การประยุกต์การออกแบบการทดลองเพื่อลดของเสียในกระบวนการบรรจุแผงยาเม็ด
Application of Design of Experiments to Reducing Defects in Tablet Packing Process
ทิวานันท์ มณีรัตน์ จิรพัฒน์ เภาประเสริฐวงศ์
- การออกแบบเครื่องบรรจุน้ำซุปแบบอัตโนมัติ
Design of Automatic Soup Filling Machine
ชนินทร์ เรืองรักษา พีระยศ แสนโกชณ์
- การลดของเสียจากข้อบกพร่องสีแตกและสีบางในกระบวนการพ่นสีฝุ่นบนกรอบกระจกของหลังคาถาวรระบอบเนกประสงค์
Defective Reduction from Cracking Paint and Thin Paint in Powder Coated Painting Process of Window Frame of Canopy
พิชญา วาดสูงเนิน นภัสสวงศ์ ไอสถศิลป์
- การลดสัดส่วนของเสียจากการปนเปื้อนสิ่งแปลกปลอมในกระบวนการผลิตปลั๊กตัวเมีย
Defective Rate Reduction from Foreign Matter Contamination in Female Connector Plug Manufacturing Process
อรรถพล งามสำโรง นภัสสวงศ์ ไอสถศิลป์
- การศึกษาคุณลักษณะการเผาไหม้และประสิทธิภาพเชิงความร้อนของเตาชีวมวลทรงกระบอก
Investigation on Combustion Characteristics and Thermal Efficiency of Cylindrical Biomass Stove
พรพิทักษ์ ถมปัด กุลเชษฐ์ เพียรทอง จรุง ดินเชิดชู
- การพัฒนาโปรแกรมเติมค่าสูญหายข้อมูลฝนรายวันจากวิธีถ่วงน้ำหนักระยะทางผกผันและวิธีถ่วงน้ำหนักสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์
Software Development of Missing Daily Rainfall Data from Inverse Distance Weighting and Correlation Coefficient Weighting Method
จันทนา ปัญญาวารากรณ์ ศรีสุนี วุฒิวงศ์โยธิน
- การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปรูปร่างสามเหลี่ยมด้านเท่าโดยใช้วิธีโครงข่ายประสาทเทียม
Design of An Equilateral Triangular Microstrip Antenna Using Neural network
ณสกลธน สมบัติธีระ เหมือนฝัน อำทอง เกரியเดช พระธานี ชาญไชย ไทยเจียม
- การออกแบบสายอากาศไมโครสตริปรูปร่างสี่เหลี่ยมจัตุรัสโดยใช้วิธีเชิงพันธุกรรม
Design of a Square Microstrip Antenna Using Genetic Algorithms
รัฐนันท์ ลออบุตร์ ศิริกานต์ พวงมณี สุกันยา แสงจันทร์ ชาญไชย ไทยเจียม
- การหาค่าตัวแปรที่เหมาะสมในการเชื่อมจุดของอลูมิเนียมอัลลอย 6061-T6 ในอุตสาหกรรมยานยนต์
The Parameters Optimization for Spot-welding of 6061-T6 Aluminum Alloy in Automotive Industry
กรวิณ สนธิเพิ่มพูน ชลลดา เรือนอินทร์ เดชฤทธิ์ กิติเดช ปริญญา ดวงจิตร

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

เลขที่ 63 หมู่ 7 ถนนรังสิต - นครนายก อำเภอองครักษ์ จังหวัดนครนายก 26120

โทร 0 2649 5000 ต่อ 27560

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