

NUEJ

NARESUAN

UNIVERSITY ENGINEERING JOURNAL

January - June 2021 Vol.16, No.1
ISSN : 2651-1568



กองบรรณาธิการวิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยนเรศวร

ที่ปรึกษา		
ศาสตราจารย์ ดร.สมชาย	วงศ์วิเศษ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ	แย้มเม่น	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.ศรีนทร์ทิพย์	แทนธานี	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.อุรุยา	วิสกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
บรรณาธิการ		
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุนิตย์	พุทธพนม	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ดร.พิสุทธิ	อภิขยกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองบรรณาธิการ		
รองศาสตราจารย์ ดร.พนัส	นัถฤทธิ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
กองบรรณาธิการ		
ศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์	จำนงไทย	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.จันทร์พร	ผลากรกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.ประดิษฐ์	เทอดทูล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศาสตราจารย์ ดร.พวงรัตน์	ขจิตวิษยานุกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศาสตราจารย์ ดร.วนิดา	จินศาสตร์	คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.วิโรจน์	บุญอำนวยวิทยา	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.วัฒนวงศ์	รัตนวราห	สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ศาสตราจารย์ ดร.สมชาย	วงศ์วิเศษ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.สัมพันธ์	ฤทธิเดช	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ศาสตราจารย์ ดร.สำเร็จ	จักรใจ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.อภินันท์	ธนชยานนท์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ศาสตราจารย์ ดร.อิสระชัย	งามหุ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
Professor Christian	Hicks	Deputy Director, Professor of Operations Management Newcastle University United Kingdom,
ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล	มุณีสว่าง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

กองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.กำชัย	นัยนิติกุล	สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และทรัพยากร มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
รองศาสตราจารย์ ดร.เฉลิมราช	วันทวิน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.ทรงพล	กาญจนชูชัย	คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ ดร.นิพนธ์	ธีรอำพน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.นิลวรรณ	ชุ่มฤทธิ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.นิวิท	เจริญใจ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.ยศชนัน	วงศ์สวัสดิ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.ลัญจกร	วุฒิสถิธิกุลกิจ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ ดร.วัชรินทร์	โพธิ์เงิน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนคร เหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.วัสสนัย	วรรณจรรย์ยา	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.วิระสิทธิ์	อัมภวิล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.สงวน	ปัทมธรรมกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.สถาพร	โกคา	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
รองศาสตราจารย์ เมธี	บุญพิเชษฐวงศ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.ธันยดา	พรรณเชษฐ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.สุวิทย์	กิริเวทยา	คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ ดร.อธิคม	ฤกษ์บุตร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร
Assoc.Prof.Dr. Vo Ngoc	Dieu	Ho Chi Minh City University of Technology Vietnam
รองศาสตราจารย์ ดร.กุลยา	กนกจาร์วิจิตร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.ธวัชชัย	เมธีวีรัญญ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ	แย้มเม่น	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.สมบัติ	ชื่นชูกลิ่น	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.สมร	หิรัญประดิษฐกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.มัทนี	สงวนเสริมศรี	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชัย	ฤตวิรุฬห์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.แก้วกันยา	สุดประเสริฐ	คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอม เกล้าธนบุรี

กองบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กรกฎ	นุสิทธิ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปาจริย์	ทองสนิท	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภูพงษ์	พงษ์เจริญ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภวรรณ	พลพิทักษ์ชัย	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมลักษณ์	วรรณฤมล กิเยลาโรว่า	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สสิกรณณ์	เหลื่องวิซชเจริญ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนันต์ชัย	อยู่แก้ว	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
Dr. Ivan	Lee	School of Information Technology and Mathematical Sciences University of South Australia
Dr. Sasidharan	Sreedharan	University of Hawaii USA
ดร.จิรวดี	ผลประเสริฐ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ดร.ธนิกันต์	ธงชัย	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ดร.นฤมล	สีพลไกร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ดร.ศลิษา	วีรพันธุ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ดร.สุรพล	นาตเนียล เจริญสุข	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

สารบัญ

Research Articles

Heat Treatment Factors Affecting AISI 304 Austenitic Stainless Steels with Wear-resistant in High Temperature and High acid Conditions for using in Agricultural Product Processing Tannachart Wantang, Wittaya Nuchangsing.....	1
Analysis of AHW and EAHW Time-Series Forecasting Methods: A Mathematical and Computational Perspective Thitima Booranawong, Thradon Wattananavin, Ruamporn Nikhom, Jutamanee Auysakul, Apidet Booranawong.....	7
การพัฒนาระบบตรวจจับเม็ดยาสำหรับเครื่องจ่ายยาอัตโนมัติ Development of Pill Detection System for Automatic Medicine Dispenser อัครวิทย์ ครองไชย, สะการะ ตันโสภณ, สุเมธ เหมะวัฒนะชัย Akkarawin Krongchai, Sakara Tunsophon, Sumet Heamawatanachai.....	14
การจำแนกสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อตามเวลาจริงเพื่อควบคุมมือหุ่นยนต์ Real-Time Classification of EMG Signals for Controlling Robot Gripper เมธาวัตน์ คุณาพิพัฒน์, กิตติคุณ ทองพูล, ประมินทร์ เณรานนท์, พรชัย พุกฤษัฏ์ทรานนท์ Methawat Kunapipat, Kittikhun Thongpull, Paramin Neranon, Pornchai Phukpattaranont.....	28
การประยุกต์วิธีคิดเชิงออกแบบบริการร่วมกับวิธีการศึกษาการทำงานเพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตระดับวิสาหกิจชุมชน กรณีศึกษา กระบวนการผลิตขนมธัญพืชอัดแท่ง The Application of Service Design Thinking and Work Study in Process Improvement of Community Enterprise Manufacture: A Case Study of Granola Bar Production Process บัญชา อริยะจรรยา, วรัดดา อุทัยรัตน์ Bancha Ariyajunya, Waratta Authayarat.....	39
ความต้านทานการลื่นไถลของแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีวัสดุผิวทางเดิมเป็นส่วนผสม Skid resistance of Asphalt Hot-mix Recycling ณัฐวิชัย เศรษฐยุทธพงษ์, กรกฎ นุสิตี, พีรพงศ์ จิตเสงี่ยม, วีระชัย วงษ์วีระนิมิตร, นันทวัฒน์ ลือสิงหนาท Nathanyawat Sedthayutthaphong, Korakod Nusit, Peerapong Jitsangiam, Weerachai Wongweeranimit, Nuntawat Lersinghanart	53

การนำฉนวนกันความร้อนเหลือทิ้งประยุกต์เป็นไส้กรองเครื่องฟอกอากาศ Utilization of PU Foam Insulation Waste to Air Purifier Filter กมลชัย ยงประพัฒน์, นิดา ชัยมูล, มณีรัตน์ องค์กรวรรดิ Kamonchai Yongprapat, Nida Chaimoon, Maneerat Ongwandee.....	64
การพัฒนากระเบื้องยางปูพื้นจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิไวนิลคลอไรด์และคลอรีเนตพอลิเอทิลีน Development of Rubber Floor Tile from Polymer Blends between Polyvinyl Chloride and Chlorinated Polyethylene ชาตรี หอมเขียว, สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์, จักรนรินทร์ ฉัตรทอง Chatree Homkhiew, Surasit Rawangwong, Jaknarin Chattonong.....	73
แบบจำลองค่าที่ดีที่สุดสำหรับการกำหนดตำแหน่งที่ตั้งโรงงานในนิคมอุตสาหกรรมโดยพิจารณาต้นทุนด้านความเสี่ยงจากเหตุฉุกเฉิน Optimization Model for Industrial Location in Industrial Estate Problem under Risk Cost from Emergency Case นิรุทธิ์ วัฒนะแสง, กสิณ รังสิกรรพุม Niroot Wattanasang, Kasin Ransikarbun.....	81
การออกแบบผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีการออกแบบเจเนอเรทีฟแบบหลายวัตถุประสงค์ กรณีศึกษาการออกแบบเครื่องประดับเข็มกลัดอาร์ต เดโคแบบกลัดคู่ Product Design with Multi-objective Optimization Generative Design Method: A Case Study of Art Deco Double Clip Brooch Design สุนิชา แสนศรี, สมลักษณ์ วรรณฤมล กิเยลาโรว่า Sunisa Sansri, Somlak Wannarumon Kienlarova	94
ความต้านทานคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตผสมซิลิกาฟูม Chloride Resistance and Compressive Strength of Concrete with Silica Fume ทวีชัย สำราญวานิช, อัญชนา กิจจานนท์ Taweethai Sumranwanich, Aunchana Kijjanon.....	107
การพัฒนาประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตยางแท่ง STR 20 โดยใช้การออกแบบการทดลอง The Efficiency Improvement of STR 20 Block Rubber Production Process by Using Design of Experiments นิภาส สันธธรรม, วีระยุทธ สุดสมบูรณ์, สิทธิชัย แก้วแก้วกุล, ฉัตรชัย แก้วดี, วีรพล ปานสินวล Nipas Leenatham, Weerayute Sudsomboon, Sittichai Kaewkuekool, Chatchai Kaewdee, Weeraphol Pansrinual.....	119

การควบคุมอากาศยานไร้คนขับโดยสถาปัตยกรรมการควบคุมเชิงพฤติกรรม

Unmanned Aerial Vehicle Navigation using a Behaviour based Control Architecture

พนัส นัถฤทธิ์

Panus Nattharith.....140

แอปพลิเคชันทดลองสวมใส่เครื่องประดับบนสมาร์ตโฟนด้วยเทคโนโลยีความจริงเสริม

Virtual Try-on Experience Mobile Application with Augmented Technology for Jewelry Business

สมลักษณ์ วรรณฤมล กิเยลาโรว่า, พนมขวัญ รียะมงคล, รัฐภูมิ วรรณสาสน์, ปิยะรัช ธรรมวัฒนกุล, พงศกร ศิริค้ำน้อย,
สุนิษา แสนศรี

Somlak Wannarumon Kielarova, Panomkhawn Riyamongkol, Rattapoom Waranusast, Piyaarach Tamwattanakul,

Pongsakorn Sirikamnoi , Sunisa Sansri.....155

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อค่าความห่างของสกรูในการยึดสปอยเลอร์ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต

โดยใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ

A Study of Factors Affecting The Screw Spacing of Spoilers in Hard Disk Drives for Productivity Increase

Using Multiple Regression Analysis

กิตติวัฒน์ สิริเกษมสุข, ทศพล เกียรติเจริญผล, ฮานูฟ ไวยรูป, ทัดพล กุลวงศ์, ลักน์สิริ ตรีนานูรัตน์

Kittiwat Sirikasemsuk, Tossapol Kiatcharoenpol, Hanoof Waiyaroop, Tadpon Kullawong, Laksiri Treeranurat.....167

Aims and Objectives

*The primary objective of the Naresuan University Engineering Journal (NUEJ) is to publish high-quality research articles presenting contemporary developments in theory, design, and applications in all areas of Engineering, Science, and Technology, including research in Civil and Environmental engineering, Mechanical engineering, Electrical and Computer engineering, Industrial, Chemical, and Material Engineering. NUEJ covers all **multidisciplinary** research in associated areas, **such as** Mechatronics, Energy, Industrial and Engineering Design, Manufacturing technology, Engineering management, and Medical engineering.*

Journal Policies

Naresuan University Engineering Journal (NUEJ) is a peer reviewed journal, regularly published with 2 issues per year (January – June, and July – December). Submissions must be original, unpublished works, and not currently under review by other journals. NUEJ will consider only submitted works which respect research ethics, including confidentiality, consent, and the special requirements for human and animal research. All research articles dealing with human or animal subjects must attach an approval certificate from the appropriate Ethics Committee. Additionally, the research articles dealing with human subjects must provide evidence of informed consent.

The Editorial Board of NUEJ reserves the right to decide whether or not a submission should be accepted for publication. The decision of the Editorial Board is final and cannot be appealed.

Submissions can be written in Thai or English, and can be submitted in Microsoft Word, PDF file format. Authors are required to register and submit the articles at <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/nuej>

The journal items including NUEJ submission form, NUEJ copyright form, and NUEJ templates are available at <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/nuej>. Please complete all NUEJ forms and send them to nuej@nu.ac.th.

Editorial board of Naresuan University Engineering Journal
Faculty of Engineering, Naresuan University,
Phitsanulok, 65000, Thailand
Tel. +66 (0) 55 964092
Fax +66 (0) 55 964000
Email: nuej@nu.ac.th

วัตถุประสงค์

วิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยนเรศวร เป็นวารสารที่มีวัตถุประสงค์เพื่อคัดสรรผลงานวิจัย บทความวิชาการ และบทความปริทรรศน์ที่มีคุณภาพโดยผ่านการพิจารณาจากคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิ เพื่อลงตีพิมพ์ในวารสาร และทำการเผยแพร่เพื่อนำเสนอแนวคิด นวัตกรรม และผลงานวิจัยใหม่ทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยมีเนื้อหาครอบคลุม เกี่ยวข้องกับงานวิจัยในสาขาวิศวกรรมโยธา สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ สาขาวิศวกรรมเครื่องกล สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ สาขาวิศวกรรมวัสดุ และสาขาวิศวกรรมเคมี อีกทั้งยังรวมถึงงานวิจัยที่มีการบูรณาการศาสตร์ทางด้านวิศวกรรมและเทคโนโลยีในสาขาอื่นๆ เช่น สาขาเมคคาทรอนิกส์ เทคโนโลยีพลังงาน เทคโนโลยีการออกแบบและการผลิต การจัดการด้านอุตสาหกรรม และวิศวกรรมทางการแพทย์ เป็นต้น ทั้งนี้วารสารรับตีพิมพ์ต้นฉบับผลงานทั้งในรูปแบบภาษาอังกฤษและภาษาไทย

นโยบาย

วิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยนเรศวร เป็นวารสารที่มีกระบวนการพิจารณาบทความประเภท Double-blind peer review จากผู้ทรงคุณวุฒิ อย่างน้อย 2 ท่าน เพื่อคัดสรรบทความที่มีคุณภาพลงตีพิมพ์ในวารสาร โดยมีกำหนดการออกเผยแพร่ปีละ 2 ฉบับ คือ ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม - มิถุนายน และฉบับ 2 เดือนกรกฎาคม - ธันวาคม สำหรับเงื่อนไขในการพิจารณาบทความ ทางกองบรรณาธิการของวารสารฯ จะพิจารณาเฉพาะผลงานที่ไม่เคยเสนอหรือกำลังเสนอเพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิชาการใดมาก่อน หากงานวิจัยใดมีความเกี่ยวข้องกับมนุษย์หรือสัตว์ทดลอง วารสารฯ จะรับพิจารณาเฉพาะบทความที่มีหลักฐานยืนยันว่าโครงการวิจัยดังกล่าวได้ผ่านการรับรองเชิงจริยธรรมจากคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์หรือสัตว์ทดลองแล้วเท่านั้น สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับมนุษย์ เจ้าของผลงานนิพนธ์ต้องแสดงให้เห็นว่าผู้เข้าร่วมการทดลองได้รับทราบข้อมูลและตัดสินใจเข้าร่วมการทดลองด้วยความสมัครใจ ทั้งนี้การอนุมัติให้ลงตีพิมพ์ขึ้นอยู่กับผลการพิจารณาจากกองบรรณาธิการวิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยนเรศวร ซึ่งถือเป็นที่สุด

การส่งบทความ ผู้เขียนบทความจะต้องลงทะเบียนในระบบและส่งบทความในรูปแบบ Microsoft Word, PDF มายัง URL: <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/nuej> พร้อมด้วยส่ง NUEJ Form ซึ่งประกอบไปด้วย

1. แบบฟอร์มการจดลิขสิทธิ์ (NUEJ Copyright Form)
2. แบบฟอร์มการส่งบทความ (NUEJ Submission Form)

ที่อยู่กองบรรณาธิการ

กองบรรณาธิการวิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยนเรศวร
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
อำเภอเมืองพิษณุโลก จังหวัดพิษณุโลก 65000
โทร 0-5596-4092 โทรสาร 0-5596-4000
E-mail: nuej@nu.ac.th

Editor's Note

Naresuan University Engineering Journal (NUEJ) provides a forum for major scientific debates in all areas of engineering and technology. The journal accepts research articles, review articles and follows a strict peer review process for each article submitted for consideration to ensure the quality of the publication. The articles are accepted for publication only after receiving consent from at least two independent reviewers followed by Editor's permission. Editor-in-Chief holds the final decision in any case. The editorial board of the NUEJ has recently reaffirmed their commitment to the following goals:

1. Acquiring papers on the most recent and high-quality engineering research to boost the Journal's impact factor and reputation.
2. Reducing the time it takes for papers to be published (i.e., the time it takes from the authors' submission to the final decision).

In this issue, there are total of 15 research articles, two in English and thirteen in Thai. Going forward, only manuscripts written in English will be considered for publication. This adjustment is intended to boost the visibility of our Thai authors' intellectual contributions and make them more accessible to a wider audience.

Dr. Phisut Apichayakul

Editor

Naresuan University Engineering Journal

บทบรรณาธิการ

วิศวกรรมสารมหาวิทยาลัยนเรศวร ได้ดำเนินการเพื่อเป็นแหล่งข้อมูลหลักในนำเสนอหลักฐานทางวิชาการ ในศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี ทางวารสารได้เปิดรับบทความวิจัยและบทความวิชาการ เพื่อการตีพิมพ์ โดยมีขั้นตอนในการตรวจสอบ คัดเลือกบทความ ที่ถูกต้องตามหลักวิชาการ เพื่อให้บทความที่เผยแพร่มีคุณภาพที่ดี การตีพิมพ์บทความต้องผ่านการพิจารณาของผู้ทรงคุณวุฒิในสาขานั้น ๆ อย่างน้อยสองท่าน โดยการตัดสินใจขั้นสุดท้ายอยู่ที่การพิจารณาของบรรณาธิการ โดยพิจารณาจากความเห็นของผู้ทรงคุณวุฒิที่ตรวจสอบบทความเป็นหลัก ในการนี้ทางวารสารได้ทำการตั้งเป้าหมายในการดำเนินงานดังนี้

1. ทำการประชาสัมพันธ์ เชิญชวน ให้ นิสิต นักศึกษา อาจารย์ นักวิจัย นักวิชาการ ที่มีความสามารถ มีผลงานที่มีคุณภาพโดดเด่น นำส่งผลงานเพื่อตีพิมพ์กับทางวารสาร เพื่อเพิ่มจำนวนการอ้างอิงบทความและทำให้วารสารเป็นที่รู้จักแพร่หลาย มีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น
2. ทำการปรับปรุง ระบบการประเมินคุณภาพบทความให้มีความกระชับ รวดเร็ว มากยิ่งขึ้น โดยยังคงคุณภาพเช่นเดิม

ในวารสารเล่มนี้ได้มีการจัดพิมพ์บทความวิจัยทั้งหมด 15 บทความ โดยมีบทความภาษาอังกฤษ 2 บทความและภาษาไทย 13 บทความ ทั้งนี้วิศวกรรมสารมหาวิทยาลัยนเรศวรได้ทำการปรับเปลี่ยนการรับบทความเพื่อการตีพิมพ์ โดยพิจารณารับบทความที่เป็นภาษาอังกฤษเท่านั้น เพื่อให้ผู้แต่งได้มีโอกาเผยแพร่ผลงานสู่กลุ่มเป้าหมายในวงกว้างมากยิ่งขึ้น

ดร.พิสุทธิ อภิขยกุล
บรรณาธิการ
วิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยนเรศวร

Heat Treatment Factors Affecting AISI 304 Austenitic Stainless Steels with Wear-resistant in High Temperature and High acid Conditions for using in Agricultural Product Processing

Tannachart Wantang*, Wittaya Nuchangsing

Department of Production Engineering and Management, Faculty of Agricultural Technology and Industrial Technology,
Phetchabun Rajabhat University, Phetchabun, Thailand.

*Corresponding author e-mail: tannachart.w@pcru.ac.th

(Received: 1 July 2020, Revised: 19 January 2021, Accepted: 27 January 2021)

Abstract

This research was aimed to study factors affecting heat treatment of AISI 304 austenitic stainless steel under high natural acidity and high temperature conditions for using in the agricultural product processing which affect the weight loss after the experiment. This research applied the 2^3 factorial design consisting of 3 independent factors, including temperatures, holding time, and quenching fluids. In each factor, there are two experimental levels: temperature factor levels at 560 °C and 650 °C, the holding time of 20 and 40 minutes and the quenching fluids: cold water and heat-treatment oil. The Pin-on-Disc method was applied to determine the weight loss. The experimental conditions in this study were the temperatures of 70 - 80 °C and natural acidity at pH 3 - 3.5. The study found that all factors statistically significantly affected the weight loss of the stainless steel and the temperature of 650 °C, the holding time of 40 minutes and cooling in water was the most weight loss resistance. Moreover, there was a interaction of the factors, the temperatures and holding time, which affect the weight loss, and they were also significantly statistically. A mathematical model for lost weight estimation from the independent variables was formulated. The results showed that there was a 95% confidence interval, equivalent to ± 0.00623 g. of the weight loss value.

Keywords: AISI 304 Stainless Steel, Heat Treatment, Wear Resistant, Factorial Design, Food machinery.

1. INTRODUCTION

Agricultural products are one of important exports of Thailand and an agricultural industry also contributes to economic development in provinces all over the country. Manufacturers add value of agricultural products by using machinery for processing; therefore, the prices of the agricultural goods become higher and their quality is better. Tools and machinery are made of AISI 304 stainless steel for food processing because they do not rust and endure different conditions. In the food industry, vegetables and fruits such as pickled ginger, sour tamarind, passion fruit, and pineapple are involved in food manufacturing and they are high-acid, causing rapid wear and corrosion in the machines. In addition, food processing requires high temperatures which result in rapid wear and tear. He et al. (2018) and Badischa et al. (2009) indicated the high temperatures cause a decrease in wear resistance. When the wear and tear of machinery occurs, food manufacturers have to cease food processing such as printing rollers and sealing packs and this affects food production and wasting both time and money in maintenance. In fact, manufacturing

vegetables and fruits such as ginger and tamarinds enable parts of the machine blades have wear and tear. Tukur et al. (2014) concluded that the quenched AISI 304 austenitic stainless steels are sensitized when temperatures are between 470-750°C, resulting in carbide precipitations at grain boundaries and the hardness of the stainless steel increases, especially through air cooling, as shown in the researches of MA et al. (2012) and Khana et al. (2020). The microstructures of the steel were quenched at the temperature of 950 °C after holding time of 15 minutes and there was an increase in quenching cooling rates in air, water and heat-treatment oil. It was found that there was a variation in grain size in the cooling rates. Essoussi et al. (2018) presented a tensile tests were also performed in the present study and it was found that the yield stress of the treated samples tended to decrease. Therefore, the objective of this research was to study suitable factors of wear resistance of AISI 304 austenitic stainless steel under high temperature and high-acid conditions for use in the agricultural product processing. The study also aimed to determine the most appropriate experimental factors of wear resistance and practical applications.

2. MATERIALS AND METHODS

The chemical component of AISI 304 element is 0.080 % C, 18-20 % Cr, 8.0-10.5 % Ni, 2.0 % Mn. The ultimate tensile strength of 505 MPa, yield tensile strength at 215 MPa and elongation at 70 %. Montgomery (2013) suggested that the 2^3 factorial design applied in this study has eight different experimental conditions and testing under each of the conditions is repeated four times (4 replicates) to increase the accuracy of observation values and to reduce experimental errors, as shown in the researches of Boonjubut and Wantang (2014). The order of operations in this experiment with the 2^3 factorial design is random to prevent nuisance variables from confounding with every data value and to enable each value of data independent to each other. The factor levels ranging from the highest to the lowest are shown in Table 1. The selection of the factors and levels which Pre-experimental and literature review. The size of stainless steel sample used 32 pieces in the experiment.

After heat treatment under specified conditions, the specimens will be tested for wear by using a Pin-on-Disc testing machine and immediately measuring the lost weight. Parameters testing and wear evaluation are carried in accordance with the requirements of ASTM International (2014) and ASTM G99-17 (2017). The Pin-on-Disc testing in performing with control factors such as temperatures between 70 - 80 °C, acidity of pickled ginger at pH 3 - 3.5, Petpadap et al. (2018), Kennedy and Lu (2015) and Olofsson et al. (2018) designed a rotating disc speed of 900 rpm., and holding time of 60 minutes and weight of 2,500 g., as shown in Figure 1. The testing machine is used to find the average lost weight under each condition in the 2^3 factorial experiment.

Table 1 Factor levels in the 2^3 factorial design experiments

Factors	Factor Levels		Symbols
	Low (-1)	High (1)	
Solution Temperature (°C)	560	650	A
Holding Time (min)	20	40	B
Quenching fluid	Cold water	Heat-treatment oil	C

Table 2 Result summary of the tests

(B) Holding Time (min)	(C) Quenching fluid	(A) Solution Temperature (°C)							
		560	650	560	650	560	650	560	650
20	cold water	0.17 g	0.16 g	0.17 g	0.16 g	0.18 g	0.16 g	0.18 g	0.17 g
	oil	0.18 g	0.17 g	0.18 g	0.16 g	0.18 g	0.17 g	0.19 g	0.17 g
40	cold water	0.17 g	0.14 g	0.17 g	0.14 g	0.17 g	0.15 g	0.16 g	0.16 g
	oil	0.18 g	0.16 g	0.18 g	0.15 g	0.18 g	0.15 g	0.18 g	0.14 g

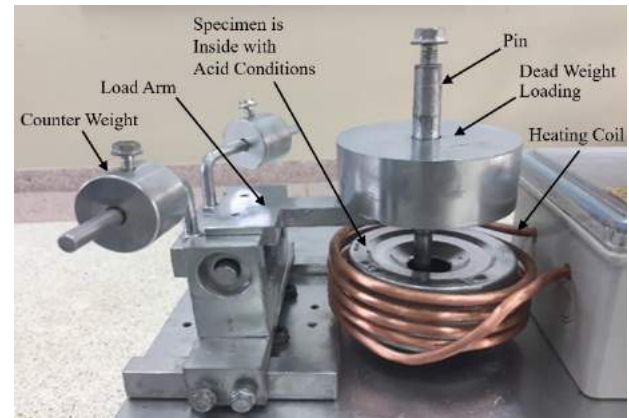


Figure 1 The Pin-on-Disc testing machine

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Result

The specimens were immediately measured for lost weight with a 0.01 g. digital scale, after being tested with the Pin-on-Disc. The results obtained from performing the Pin-on-Disc wear test show the mean weight lost during the test under different conditions. In addition, this experiment is run in random order or randomization. The results show the mean lost weight values of each test piece in this experiment using the 2^3 factorial design as shown in Table 2. The heat-treatment oil is low viscosity at 870 kg/m³ and viscosity 30 mm/s at 40 °C it suitable for quenching of small pieces where drag-out has to be reduced.

Analysis of Variance or ANOVA at a significant level of 5% of hypothesis testing ($\alpha = 0.05$) is applied in the 2^3 factorial experiment design. The results show that both variables have a linear relationship and the factors significant influence the weight loss as shown in the table.

According to the results of variance analysis, it can be concluded that factors A, B, and C have a significant effect on the weight loss. The P-values are 0.000, 0.000 and 0.004, which are less than a 0.05 significance level or 95% confidence level. The two-factor interaction AB significantly and statistically affects the weight (P-Value < 0.015). The P-Value is greater than 0.05. When considering Table 3, the factors including temperatures, holding time and quenching fluids with P-Value greater than 0.05 have no effect on wear resistance, Jozefa et al. (2020) concluded that the Pareto chart of standardized effects of the factors, the influence of the factors and their interactions can be determined based on this chart, the most significant influence have the factors, temperature A, holding time B, cold water C and interaction between factors of AB as well, as shown in Figure 2. Moreover, considering the coefficient of determination, the R-Square is 84.15% and the adjusted R-Square is 79.53%, which are higher than 75%, indicating that the equation for computing correlation has accuracy and provides a good explanation of wear resistance in this experiment.

Table 3 Analysis of Variance in the 2³ factorial experiment

Source	DF	Sum of Squares	Mean Squares	F-Value	P-Value
A	1	0.003003	0.003003	82.37	0.000
B	1	0.000903	0.000903	24.77	0.000
C	1	0.000378	0.000378	10.37	0.004
A*B	1	0.000253	0.000253	6.94	0.015
A*C	1	0.000078	0.000078	2.14	0.156
B*C	1	0.000003	0.000003	0.09	0.772
A*B*C	1	0.000028	0.000028	0.77	0.388
Error	24	0.000875	0.000036		
Total	31	0.005522			

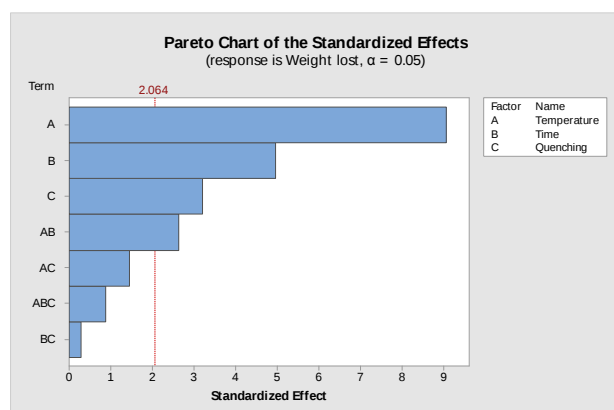


Figure 2 Pareto chart of the standardized effects.

Main Effects Plot in Figure 3 shows the influence of the three main factors. The graph displays between the average lost weight, which also represents wear resistance in different levels of each key factor including temperatures, holding time and quenching fluids. It

shows that all factors affect the weight loss. The graph also illustrates that under the conditions of 650 °C temperature, 40 minutes of holding time, and water as a cooling fluid, the weight is lost less than the average lost weight of the specimens.

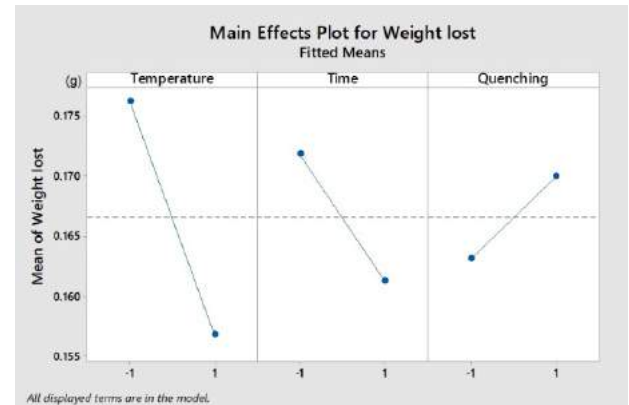


Figure 3 Main effects plot for weight lost

The interaction plot shows the relationship between the average lost weight and factors including temperatures, holding time, and quenching fluids, as shown in Figure 4. The result is that there is linear correlation. According to the plot, there is a linear correlation between the temperatures and holding time which affect the weight loss after heat treatment. In addition, the lost weight after the solution heat treatment is lower at high temperatures and long holding time, compared with higher temperatures and shorter holding time.

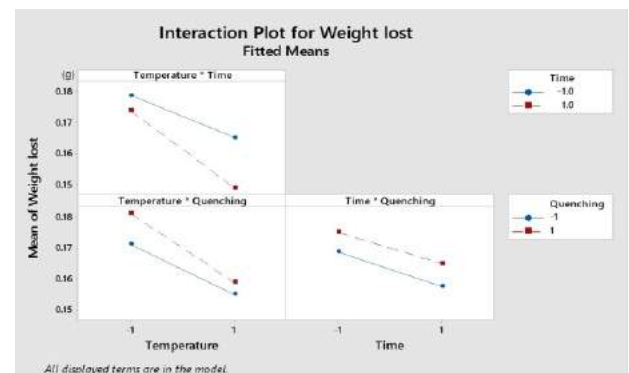


Figure 4 Interaction plot for weight lost

3.2 The Regression Model

In this experiment, a regression equation showing the relationship between the lost weight values and variables in a curve manner by considering only the main factors and cofactors that significantly influence the lost weight values, as follows equation (1).

$$\hat{y} = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 x_1 + \hat{\beta}_2 x_2 + \hat{\beta}_3 x_3 + \hat{\beta}_{12} x_1 x_2 + \hat{\beta}_{13} x_1 x_3 + \hat{\beta}_{23} x_2 x_3 + \hat{\beta}_{123} x_1 x_2 x_3 \quad (1)$$

Where $\hat{y}$ is the fitted values

$\hat{\beta}_0$ is the average weight lost of all data

$\hat{\beta}$ is regression coefficient

x_1 is the temperature (A)

x_2 is the holding time (B)

x_3 is the quenching fluids (C)

From equation (1), a regression equation for estimating the lost weight values of the main factors and cofactors that significantly influence the weight loss and the R^2 is 84.15%, which are high, indicating that the linear regression model provides a good explanation of wear resistance of this experiment, values are as follows:

$$\hat{y} = 0.1993 - 0.000028(A) + 0.00325(B) - 0.0143(C) - 0.000006(AB)$$

3.3 Confidence Intervals

A 95% confidence interval ($\alpha = 0.05$) is computed from the lost weight values obtained from estimating values in the regression by using the following equation (2).

$$Y \pm t_{\alpha/2, N-a} \sqrt{MSE} \quad (2)$$

The confidence level at 95% ($\alpha = 0.05$ and $\alpha/2 = 0.025$) and the Sum of Squares of Error values or MSE are calculated by the division of Sum of Squares of the non-significant factors plus MSE and the degree of freedom. After analyzing the variance of the simulation model, the MSE value is $Y \pm 0.00623$ g. Therefore, the weight loss values estimated from the model have a confidence interval of 95% or equivalent to ± 0.00623 g. of the estimated values.

3.4 Response optimization

A response optimization plot is a diagram creation of the response optimization for minimum weight loss. The multiple response prediction is temperature factor levels at 650 °C, the holding time of 40 minutes and the cold water quenching, it is the probability of this prediction is about 85% to get the lowest value of 0.1475, as shown in Figure 5. The confidence interval was 0.14127, 0.15373 (95% CI) and prediction interval was 0.13357, 0.16143 (95% PI), when the same experiment was repeated and averaged, the chances of getting the mean response were 95% in this range.

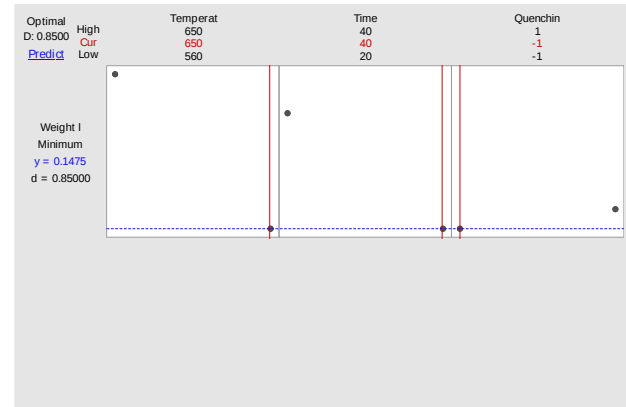


Figure 5 Optimization plot for weight lost

3.5 Contour plot

A contour plot is a diagram creation of the response surface for easy consideration of the relationship between the lost weight value and the level of the two considered factors. The weight loss value is estimated at each level of factors and the diagram shows the trend of lost weight values which are changeable at different levels of factors. In this experiment, there are 3 main factors, but only two factors are correlated to each other. Figure 6 shows the relationship of the weight loss values when the two factors including temperature and holding time change. As shown in the figure, the response surface shows 6 levels of lost weight values.

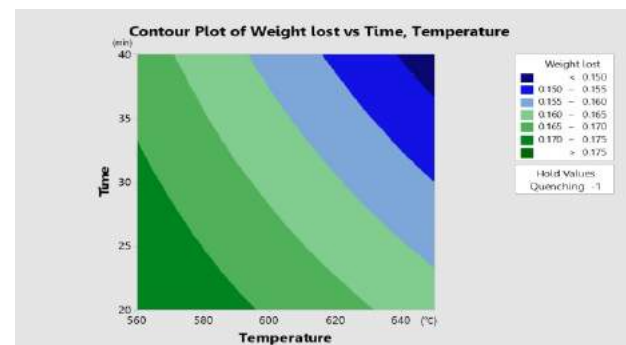


Figure 6 Contour plot of weight lost

3.6 Diagnostic Checking

After the analysis of variance and model is performed, the model adequacy is checked. Moreover, errors or residuals in the experiment are checked whether there is a normal distribution and independence of errors. According to the normal probability plot, as shown in Figure 7(a), it shows a normal distribution of residuals of the results obtained from the experiment conducted with a normal probability method. The data followed the straight line and it is approximated that the remaining values have a normal distribution. Independence of errors and regression mean is checked by examining a scatter diagram of Versus Fits, as shown in Figure 7(b). It is found that there is independence and the remaining expected values are randomly distributed in both positive and negative sides, compared with the lost weight estimates. The histogram plot, as shown in Figure 7(c),

illustrates that the distribution of residuals has a bell-shaped curve, indicating a normal distribution of the data. The Versus Order plot in Figure 7(d) is used to check residual variance of the data and examine the relationship between the errors in the experiment. The errors of the data are randomly distributed and their patterns are unclear, indicating that the weight loss values do not depend on the order of trails.

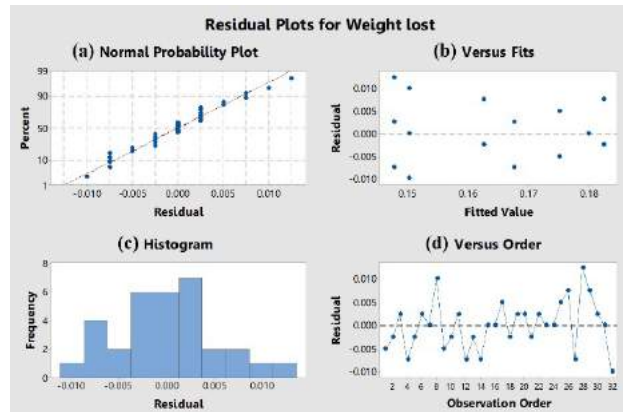


Figure 7 Residual plots for weight lost

3.7 Scratches of the specimens

Each piece of the specimens would be oppressively and then be measured again with a 500x optical microscope for the size of the indentation. After analyzing scratches of the specimens, it was found that the specimens had the highest weight loss at the temperature of 560 °C, with the holding time of 20 minutes, and through heat-treatment oil cooling. In Figure 8(a), the specimens had the low weight loss at the temperature of 650 °C, with the holding time of 40 minutes and through water cooling, as shown in Figure 8(b), consistent with the experimental results.

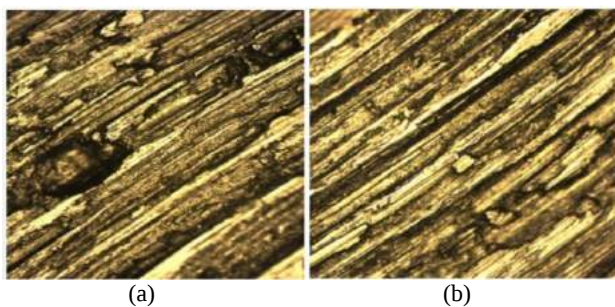


Figure 8 Comparison of scratches of test pieces

4. CONCLUSIONS

The results showed that after precipitation hardening, all the main factors in the experiment have a significant effect on weight loss. Almost all the factors, including temperatures, holding time, and quenching fluids significantly influenced the weight loss. In addition, there was also interactions of the two factors and each of them influenced the weight loss significantly. The relationship between the lost weight values and the

factors is associated with variations as cofactors. The mathematical model derived from this experimental design was used to estimate the lost weight values with an error not over ± 0.00623 g. and with a reliability of 95%. The errors or residuals were found to be normally distributed in accordance with the hypothesis of this experimental design. Moreover, there were random, consistent, and equal distributions at each level of the main factors.

After conducting my research, the results can be summarized as follows.

1. The results indicated that the better factors included the temperature of 650 °C, the holding time of 40 minutes, and cooling in the water. These factors resulted in the lowest weight loss (wear resistance). AISI 304 austenitic stainless steel undergoing the heat treatment process which depends on the appropriate factors can be used to make tools enduring high natural acidity and high temperature conditions.

2. After the physical analysis of the scratches by using an optical microscope, wear conditions were consistent with the experimental results. Different temperatures, holding time, and cooling fluid affected the wear resistance.

3. The result indicated that there was greater wear resistance at high temperature, with long holding time and cooling in water, compared with low temperatures.

The AISI 304 austenitic stainless steel agricultural product processing tools in high natural acidity and high temperature conditions, which causes rapid wear. The optimum factors of heat treatment were able to improve the mechanical properties in the internal structure, increase carbide solubility, increase the durability of stainless steel and reduced weight loss.

Future directions of research will support the processing of agricultural products and food machinery. Because food and agricultural processing machinery are a convenient tool for commercial production, so that the Thai food processing and agricultural sector continues to be recognized as one of the world's leading agricultural suppliers.

5. ACKNOWLEDGMENT

The authors gratefully acknowledge the financial support provided for this research by Research and Development Institute, Phetchabun Rajabhat University.

6. REFERENCES

- ASTM G99-17. (2017). *Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus*. ASTM International.
- ASTM International. (2014). *Standard Test Method for Wear Testing with a Pin-on-Disk Apparatus: ASTM G99-04*. West Conshohocken.
- Badischa, E., Winkelmann, H., & Franek, F. (2009). High-temperature cyclic impact abrasion testing: wear behavior of single and multiphase materials up to 750 °C. *Estonian Journal of Engineering*, 15(4), 359-316.

- Boonjubut, K., & Wantang, T. (2014). Study of factors affecting artificial and aging of 6061 aluminium alloy by factorial design: *Proceedings of a SIBR- RDINRRU in Hong Kong*, 3(2014), 62-70. <https://search.proquest.com/openview/cf1c22c5b4b25b52953e5a7f95c45f2e/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2032316>
- Essoussi, H., Elmouhri, S., Ettaqi, S., & Essadiqi, E. (2018). Heat treatment effect on mechanical properties of AISI 304 austenitic stainless steel. *Procedia Manufacturing*, 32, 883-888.
- He, Q., Li, A., Qu, W., Zhang, Y., Wang, T., & Kong, L. (2018). Investigation on friction and wear properties of high-temperature bearing steel 9Cr18Mo. *Materials Research*, 21(3), 1-8.
- Jozefa, P., Mareka, V., Tomasa, V., Petera, P., & Borisa, P. (2020). Using multi-criteria analysis to evaluate the impact of drag-finishing technological parameters on the carbide tool radius. *Materials Today*, 22, 205-211.
- Kennedy, F. E., & Lu, Y. (2015). Ian Baker Contact temperatures and their influence on wear during pin-on-disk tribotesting. *Tribology International*, 82, 534-542.
- Khana, S. A., Shamaila, S., Anwarb, S., Hussaina, A., Ahmadb, S., & Salehb, M. (2020). Wear performance of surface treated drills in high speed drilling of AISI 304 stainless steel. *Journal of Manufacturing Processes*, 58, 223-235.
- MA, D., Chi, H., Zhou, J., & Yong, Q. (2012). Microstructure and mechanical properties of martensitic stainless steel 6Cr15MoVn. *Journal of Iron and Steel Research International*, 19(3), 56-61.
- Montgomery, D. C. (2013). *Design and Analysis of Experiment* (8th ed.). John Wiley & Son.
- Olofsson, U., Tu, M., Nosko, O., Lyu, Y., & Dizdar, S. (2018). A pin-on-disc study of airborne wear particle emissions from studded tyre on concrete road contacts. *Wear*, 410, 165-172.
- Petpadap, P., Dejang, N., & Maneerung, A. (2018). Arm press design of Pin-on-Disc wear testing machine and wear testing of stainless steel 304. *Burapha Science Journal*, 23(3), 1481-1492. <https://www.semanticscholar.org/paper/Arm-Press-Design-of-Pin-on-Disc-Wear-Testing-and-of-Petpadap-Dejang/fabb8d08dc496f15e654b0c9a1bff317c64aff2e>
- Tukur, S. A., Dambatta, M. S., Ahmed, A., & Mu'az, N. M. (2014). Effect of Heat Treatment Temperature on Mechanical Properties of the AISI 304 Stainless Steel. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology (IJSER)*, 3(2), 1-8.



7. BIOGRAPHIES

Assoc. Prof. Tannachart Wantang, M.Eng., is a lecturer in Department of Production Engineering and Management, Faculty of Agricultural Technology and Industrial Technology at Phetchabun Rajabhat University, Thailand. He works on experimental research in the areas of heat treatment, mechanics of materials, metal forming and machine design.



Wittaya Nuchangsing, M.Eng., is a lecturer in Department of Production Engineering and Management, Faculty of Agricultural Technology and Industrial Technology at Phetchabun Rajabhat University, Thailand. He works on experimental research in the areas of machine design such as Tamarind processing machines, Nile Tilapia fish processing machines.

Analysis of AHW and EAHW Time-Series Forecasting Methods: A Mathematical and Computational Perspective

Thitima Booranawong¹, Thradon Wattananavin², Ruamporn Nikhom³, Jutamanee Auysakul⁴, Apidet Booranawong^{5*}

¹Faculty of Management Sciences, Nakhon Si Thammarat Rajabhat University, Nakhon Si Thammarat 80280, Thailand

²Faculty of Industrial Technology, Nakhon Si Thammarat Rajabhat University, Nakhon Si Thammarat 80280, Thailand

³Faculty of Engineering, Thaksin University, Phatthalung Campus, Phatthalung 93210, Thailand

⁴Department of Mechanical and Mechatronics Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Songkhla 90110, Thailand

⁵Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Songkhla 90110, Thailand

*Corresponding author e-mail: apidet.booo@gmail.com

(Received: 15 July 2020, Revised: 28 January 2021, Accepted: 25 February 2021)

Abstract

Recently, an Extended Additive Holts-Winter method (EAHW) as a modified version of the well-known Additive Holt-Winters method (AHW) has been introduced. Many works in the research literature applied such a method to forecast time-series data, and results indicated that the EAHW provided optimal forecasting accuracy. However, we have found that there is no work in the literature analyzing the AHW and the EAHW in terms of the mathematical operations, which refer to the computation time and complexity of the methods. Since the AHW and EAHW can be implemented on hardware platform for using in many related systems and applications, in this paper, analysis of both methods from a mathematical and computational perspective is presented, where the mathematical operations of the EAHW compared with the AHW is provided. We show that the major difference between the EAHW and the AHW is the calculation of the level of time-series data, while the calculation of the trend and the seasonal factors are the same. With such a difference, the EAHW provided different possible solutions for forecasting. Also, in the worst case scenario, the EAHW has more multiplication operations (i.e., operation $\times$) than the case of the AHW method (but it is not too high); $2N$ for the AHW and $3N$ for the EAHW, where N is the number of data samples. By our finding, the EAHW is one of the appropriate forecasting methods for implementation (i.e., both on computers and embedded hardware platforms), since it provided good accuracy and computational complexity.

Keywords: Time-series, Forecasting, Holt-Winters, AHW, EAHW, Mathematical operation.

1. INTRODUCTION

In time-series forecasting, exponential forecasting methods as the well-known techniques are widely used. The exponential forecasting methods include the simple exponential smoothing, the Holt's linear exponential smoothing (or the double exponential smoothing), and the Holt-Winters (or the triple exponential smoothing). Here, the Holt-Winters are appropriately applied for time-series data that trend and seasonality behaviors are present. Although the mentioned methods are not new as introduced in the research literature, they are often used in practice and several real-word applications as reported in (Booranawong & Booranawong, 2017; Brown, 1956; Gardner, 1985; Gelper et al., 2010; Hunter, 1986; Kalekar, 2004; Montgomery et al., 2008; Suppalakpanya et al., 2019; Tratar & Srmcnik, 2016; Ventura et al., 2019; Winters, 1960). Here, many studies apply such methods due to their accuracy, simplicity, low complexity, and efficiency (Booranawong & Booranawong, 2017; Brown, 1956; Gardner, 1985; Gelper et al., 2010; Hunter, 1986; Kalekar, 2004; Montgomery et al., 2008; Suppalakpanya et al.,

2019; Tratar & Srmcnik, 2016; Ventura et al., 2019; Winters, 1960).

Based on the research literature, recent works based on the Holt-Winters forecasting were introduced here, and they are summarized in Table 1. In (Siregar et al., 2017) an investigation of exponential smoothing methods for prediction of Indonesia agricultural production was introduced. Five-year time-series data were used with the Holt's linear and the AHW methods. The results showed that the AHW gave better forecasting accuracy. The comparison of the AHW and the Box-Jenkins for software failures prediction was presented in (Yakovyna & Bachkai, 2018). They were selected to estimate the angular software failures on a weekly basis. The results showed that the ARIMA performance was almost twice worse than the AHW. For the work in (Ventura et al., 2019) to estimate pollution episodes in rural, industrial, and urban areas, the AHW method and an Artificial Neural Network (ANN) were applied, using PM2.5 concentration time-series. The authors reported that, to predict PM2.5 in the industrial area, the AHW showed the best results as indicated by the forecasting error, while the ANN was the most suitable solution for the urban area and the rural area.

The EAHW method was first proposed in (Tratar et al., 2016). It was the modified version of the AHW method, where an additional parameter as the smoothing parameter in the level equation was introduced. The authors demonstrated that, by the simulation study with business and economic time series data, the forecasting errors decreased substantially. The EAHW method produced more accurate short-term forecasts than the original Holt-Winters. In (Tratar & Srncnik, 2016), the performance comparison of the multiple regression method and the Holt-Winters method was analyzed. The results revealed that multiple regression was appropriate for daily and weekly short-term heat load forecasting, while the EAHW method showed the best results for both long-term and monthly short-term heat load forecasting.

In (Tratar & Strmcnik, 2019), forecasting methods in engineering were presented, where the forecasting performances of the AHW and EAHW were analyzed. The authors showed that the EAHW was the most optimal forecasting solution for quarterly data, in terms of forecasting accuracy. In (Suppalakpanya et al., 2019, p. 44-55), several exponential time-series methods including the Holt's linear, the AHW, and the EAHW methods were used to forecast Thailand oil palm prices, crude palm oil prices, and crude palm oil production. The authors demonstrated that the EAHW provided the lowest error indicated by the Mean Absolute Percentage Error (MAPE). In (Suppalakpanya et al., 2019, p.13-22), to forecast Thailand crude palm oil production and prices, an evaluation of the AHW and the EAHW with different initial trend values were investigated. The results reported that the EAHW achieved good accuracy. The results also revealed that, the forecasting error was significantly different when the different initial trend values were used. Finally, in (Suppalakpanya et al., 2019, p.123-139), a study

of the Holt's linear, the AHW, and the EAHW for forecasting Thailand crude palm oil productions was presented, where the main contribution of such a work was that different input data (i.e., 3-year data to 12-year data) were used and tested. The results indicated that both AHW and EAHW gave the lowest error, when 12-year input data were applied.

Although the AHW and the EAHW provide appropriate forecasting accuracy in practice as introduced in the existing works presented above, an analysis of the AHW and the EAHW in terms of their mathematical operations which refer to the computational complexity of their forecasting algorithms is not investigated. Since the AHW and EAHW methods can be applied and implemented on hardware platforms for using in any related systems, the balance between the forecasting accuracy and the computation complexity is significantly required. Thus, in this paper, analysis of the original AHW and the recently proposed EAHW methods in terms of their mathematical operations is investigated, and the difference between the EAHW and the AHW functions is reported. We also show that, in the worst case scenario, the EAHW has more multiplication operations than the case of the traditional method; $2N$ for the AHW and $3N$ for the EAHW, where N is the number of data samples. By our study, we can conclude that since the EAHW computational complexity is not much high, the EAHW method is one of the appropriate methods for time-series forecasting and implementation on computers and embedded hardware platforms.

The structure of this paper is as follows. Section 2 introduces the details of the AHW and the EAHW forecasting methods. Section 3 provides mathematical analysis and discussion. Finally, we conclude the paper in Section 4.

Table 1 The summary of the related works

Ref.	Time-series forecasting methods	Application	Results (The best accuracy)
(Siregar et al., 2017)	- Holt's linear exponential smoothing - AHW	Agricultural production; palm oil production in Indonesia	AHW
(Yakovyna & Bachkai, 2018)	- AWH - Box-Jenkins method	Software failures prediction	AHW
(Ventura et al., 2019)	- AWH - Artificial Neural Network (ANN)	Air pollution; PM2.5 concentration	- AWH Prediction of PM2.5 in the industrial area - ANN For urban and rural areas
(Tratar et al., 2016)	- AHW - Multiplicative Holt-Winters (MHW) - EAHW	Business and economic time series	EAHW
(Tratar & Srncnik, 2016)	- Multiple regression - Holt-Winters	Heat load forecasting	- Multiple regression Daily and weekly short-term heat load forecasting - EAHW Long-term and monthly short-term heat load forecasting
(Tratar & Strmcnik, 2019)	- AHW - EAHW	Engineering data	EAHW

Table 1 (Cont.)

Ref.	Time-series forecasting methods	Application	Results (The best accuracy)
(Suppalakpanya et al., 2019, p. 44-55)	- Double exponential smoothing - AHW - MHW - EAHW	- Oil palm price - Crude palm oil price - Crude palm oil production in Thailand	EAHW
(Suppalakpanya et al., 2019, p.13-22)	- AHW - MHW - EAHW	- Crude palm oil price - Crude palm oil production in Thailand	EAHW with the optimal initial trend value
(Suppalakpanya et al., 2019, p.123-139)	- Double exponential smoothing - AHW - MHW - EAHW	- Crude palm oil production in Thailand	AHW and EAHW with 12-year input data

2. AHW AND EAHW FORECASTING METHOD

Details of the AHW and the EAHW are introduced here. In time-series data forecasting, the exponential forecasting methods are widely used. The exponential methods include the simple exponential smoothing method, the Holt's linear method, and the Holt-Winters methods. Here, the Holt-Winters are suitably applied for time-series data when trend and seasonality behaviors (Kalekar, 2004; Montgomery et al., 2008; Holt, 2004) are presented.

The Holt-Winters incorporate three equations: the level, the trend, and seasonality, respectively. Generally, there are two methods of Holt-Winters: the Multiplicative Holt-Winters (MHW) and the Additive Holt-Winters (AHW) methods. The MHW is used when the seasonal variations are changing proportionally to the level of the data series. For the AHW, it is preferred in the case the seasonal variations are roughly constant through the data series.

AHW: The AHW method is described by (1) to (4), where L_i is the estimation of the level of the data series (at the sample number i), b_i is the estimation of the trend, S_i is the estimation of the seasonal factor, X_i is the input, n represents the number of periods in a year (or seasonality length), α , β , and γ refers to the weighting factors ($0 \leq \alpha, \beta, \gamma \leq 1$), and Y_{i+m} is the forecasted value with m periods ahead.

$$L_i = \alpha(X_i - S_{i-m}) + (1 - \alpha)(L_{i-1} + b_{i-1}) \quad (1)$$

$$b_i = \beta(L_i - L_{i-1}) + (1 - \beta)b_{i-1} \quad (2)$$

$$S_i = \gamma(X_i - L_i) + (1 - \gamma)S_{i-n} \quad (3)$$

$$Y_{i+m} = L_i + mb_i + S_{i-1+m} \quad (4)$$

EAHW: The EAHW was developed by Tratar in the year 2016 (Tratar & Srmcnik, 2016; Tratar et al., 2016). It is the revised version of the original AHW, where EAHW equations are shown in (5) to (8). Here, the only difference between the EAHW and the original AHW is the equation (5) and (1) (i.e., the equation for the level). The EAHW allows to smooth the seasonal factor (i.e., S_{i-m} in (5)) more or less than the AHW, depending on the δ value (δ is between 0 and 1).

$$L_i = \alpha X_i - \delta S_{i-m} + (1 - \alpha)(L_{i-1} + b_{i-1}) \quad (5)$$

$$b_i = \beta(L_i - L_{i-1}) + (1 - \beta)b_{i-1} \quad (6)$$

$$S_i = \gamma(X_i - L_i) + (1 - \gamma)S_{i-n} \quad (7)$$

$$Y_{i+m} = L_i + mb_i + S_{i-1+m} \quad (8)$$

To initialize b_1 (or the trend value) in (2) and (6) for both AHW and EAHW, the works in (Kalekar, 2004; Montgomery et al., 2008; Tratar & Srmcnik, 2016; Tratar et al., 2016; Holt, 2004) suggested that the equation (9) including four different options can be used. However, by the study and test in (Suppalakpanya et al., 2019, p.13-22; Booranawong & Booranawong, 2019), options 1 and 2 significantly provided good results in terms of the forecasting error.

$$b_1 = \begin{cases} 0, & \text{Option 1} \\ (X_n - X_1)/(n-1), n=12 & \text{Option 2} \\ X_2 - X_1, & \text{Option 3} \\ ((X_2 - X_1) + (X_3 - X_2) + (X_4 - X_3))/3, & \text{Option 4} \end{cases}$$

To initialize L_i and S_i (or the level and the seasonal factor) for both AHW and EAHW, as suggested by the pioneer works in (Kalekar, 2004; Montgomery et al., 2008;

Tratar & Srncnik, 2016; Tratar et al., 2016; Holt, 2004), equations (10) and (11) are used, where $i = 1, 2, 3, \dots, 12$.

$$L_n = (X_1 + X_2 + \dots + X_n) / n \quad (10)$$

$$S_i = X_i - L_n \quad (11)$$

Finally, for α , β , γ , and δ as the weighting factors, their optimal values are automatically determined during the process by minimizing the forecasting error (e.g. MAPE, Mean Square Error (MSE), and Mean Absolute Error (MAE)) (Booranawong & Booranawong, 2017; Tratar & Srncnik, 2016; Suppalakpanya et al., 2019; Suppalakpanya et al., 2019; Suppalakpanya et al., 2019, Booranawong & Booranawong, 2017). We note that summary of the AHW and the EAHW are also provided in Table 2.

3. MATHEMATICAL ANALYSIS AND DISCUSSION

Analysis and discussion of the AHW and the EAHW mathematical operations is presented in this section. As mentioned in Section 2 before, the only difference between the AHW and the EAHW methods is the estimation of the

level in (1) and (5). The EAHW allows to smooth the seasonal factor or S_{i-m} more or less than the traditional AHW, depending on δ , which is between 0 and 1.

From (5), there are four cases of the δ weighting value including, $\delta \neq \alpha$, $\delta = \alpha$, $\delta = 1$, and $\delta = 0$, respectively, as shown in Table 3. If $\delta \neq \alpha$, the EAHW allows to smooth S_{i-m} more or less than (i.e., $\alpha < \delta$, and $\alpha > \delta$) the AHW. If $\delta = \alpha$, the EAHW method then reduces to the traditional AHW method (i.e., equation (1)). If $\delta = 1$, α occurs only at the input X_i and not at the seasonal component S_{i-m} . Therefore, when $\alpha X_i > S_{i-m}$ (the average in its seasonality is lower than the smoothed value) the level increases in comparison with the level in the earlier period. The opposite adjustment occurs when $\alpha X_i < S_{i-m}$. Finally, if $\delta = 0$, the seasonal component S_{i-m} is not considered.

Table 2 Summary of the AHW and the EAHW

Methods	Level, trend, and seasonal components	Initial values	Forecast value
AHW	$L_i = \alpha(X_i - S_{i-m}) + (1-\alpha)(L_{i-1} + b_{i-1})$ $b_i = \beta(L_i - L_{i-1}) + (1-\beta)b_{i-1}$ $S_i = \gamma(X_i - L_i) + (1-\gamma)S_{i-n}$	$b_1 = \begin{cases} 0 \\ (X_n - X_1)/(n-1), n = 12 \\ X_2 - X_1 \\ ((X_2 - X_1) + (X_3 - X_2) + (X_4 - X_3))/3 \end{cases}$	$Y_{i+m} = L_i + mb_i + S_{i-1+m}$
EAHW	$L_i = \alpha X_i - \delta S_{i-m} + (1-\alpha)(L_{i-1} + b_{i-1})$ $b_i = \beta(L_i - L_{i-1}) + (1-\beta)b_{i-1}$ $S_i = \gamma(X_i - L_i) + (1-\gamma)S_{i-n}$	$L_n = (X_1 + X_2 + \dots + X_n) / n$ $S_i = X_i - L_n$	

Table 3 The δ value of the EAHW method

Cases	L_i	Note
$\delta \neq \alpha$	$L_i = \alpha X_i - \delta S_{i-m} + (1-\alpha)(L_{i-1} + b_{i-1})$	EAHW
$\delta = \alpha$	$L_i = \alpha X_i - \delta S_{i-m} + (1-\alpha)(L_{i-1} + b_{i-1})$ $= \alpha(X_i - S_{i-m}) + (1-\alpha)(L_{i-1} + b_{i-1})$	The EAHW reduces to the AHW.
$\delta = 1$	$L_i = \alpha X_i - S_{i-m} + (1-\alpha)(L_{i-1} + b_{i-1})$	$\alpha X_i > S_{i-m}$ and $\alpha X_i < S_{i-m}$ The smoothed value is higher or lower than the average in its seasonality.

Table 3 (Cont.)

Cases	L_i	Note
$\delta = 0$	$L_i = \alpha X_i + (1 - \alpha)(L_{i-1} + b_{i-1})$	The seasonal component S_{i-m} is not considered.

Table 4 The computational cost in terms of the mathematical operation

Methods	Mathematical operation		
	+	–	×
AHW			
$L_i = \alpha(X_i - S_{i-m}) + (1 - \alpha)(L_{i-1} + b_{i-1})$	2	2	2
EAHW			
$\delta \neq \alpha$; $L_i = \alpha X_i - \delta S_{i-m} + (1 - \alpha)(L_{i-1} + b_{i-1})$	2	2	3
$\delta = \alpha$; $L_i = \alpha(X_i - S_{i-m}) + (1 - \alpha)(L_{i-1} + b_{i-1})$	2	2	2
$\delta = 1$; $L_i = \alpha X_i - S_{i-m} + (1 - \alpha)(L_{i-1} + b_{i-1})$	2	2	2
$\delta = 0$; $L_i = \alpha X_i + (1 - \alpha)(L_{i-1} + b_{i-1})$	2	1	2

Table 4 shows the AHW and EAHW computational cost, where the number of mathematical operations; summations (+), subtractions (–), and multiplications (×) required by each forecasting method are listed in the table. The result demonstrates that the AHW and the EAHW use the same computational cost, when $\delta = \alpha$ and $\delta = 1$. In these cases, both methods require each mathematical operation of $2N$, where N is the number of data samples. For the case $\delta \neq \alpha$, the EAHW requires more × operations than the AHW method; $2N$ for the AHW and $3N$ for the EAHW, as illustrated by an example in Figure 1 (where $n=1$ to 10,000). However, for the case $\delta \neq \alpha$ as seen in Figure 1, the cost difference is not much. Finally, for the case $\delta = 0$, the EAHW uses – and × operations lower than the case of the AHW; $2N$ for the AHW and $1N$ for the EAHW.

The results provided in this section can be useful for consideration in terms of the hardware implementation (i.e., for both on computers and embedded hardware platforms). As summarized in Table 4, it indicates that the EAHW is also the appropriate forecasting method for implementation, since it provides good forecasting

accuracy as tested and reported by several works in the research literature, and its computational complexity is not high in the worst case scenario (i.e., $\delta \neq \alpha$).

4. CONCLUSIONS

In this paper, analysis of the original AHW and the EAHW forecasting methods in terms of the mathematical and computational perspective is presented, and the mathematical operations of the EAHW compared with the AHW is provided. We show that the major difference between these methods is the estimation of the level of the time-series data, while the estimation of the trend and seasonal factor is not different. According to this, the EAHW method provided different possible solutions for forecasting. The EAHW requires more multiplication operations than the case of the AHW method in the worst case scenario, but it is not too high. By our investigation, the EAHW method is one of the appropriate methods for the time-series forecasting, since it can satisfy both the forecasting accuracy and the computational complexity.

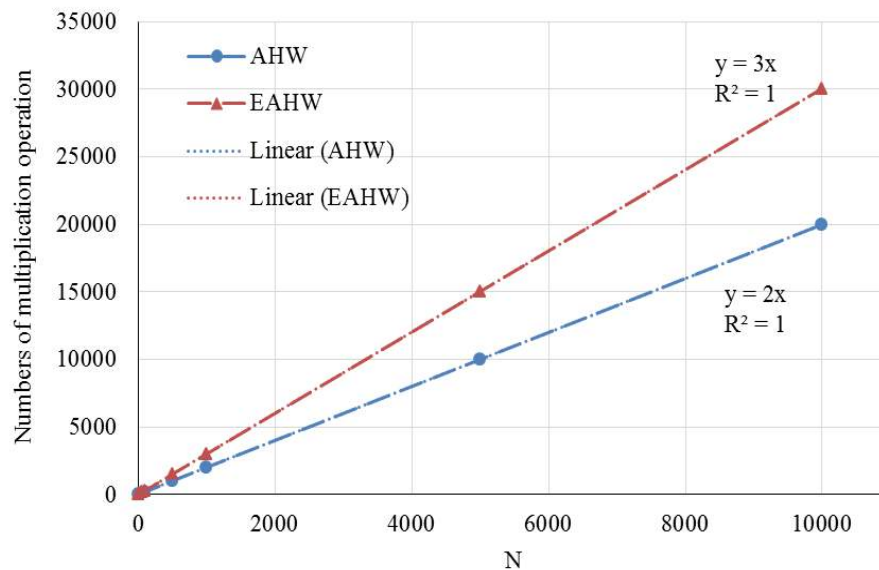


Figure 1 Illustration of the number of multiplication operations required by the AHW and the EAHW when $\delta \neq \alpha$

5. ACKNOWLEDGMENT

We express our thanks to the Faculty of Management Sciences, Nakhon Si Thammarat Rajabhat University, Faculty of Industrial Technology, Nakhon Si Thammarat Rajabhat University, Faculty of Engineering, Thaksin University, Phatthalung Campus, and the Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, for supporting this research.

6. REFERENCES

- Booranawong, T., & Booranawong, A. (2017). Simple and double exponential smoothing methods with designed input data for forecasting a seasonal time series: in an application for lime prices in Thailand. *Suranaree Journal of Science & Technology*, 24(3), 301-310.
- Booranawong, T., & Booranawong, A. (2018). Double exponential smoothing and Holt-Winters methods with optimal initial values and weighting factors for forecasting lime, Thai chili and lemongrass prices in Thailand. *Engineering and Applied Science Research*, 45(1), 32-38.
- Brown, R. G. (1956). *Exponential smoothing for predicting demand*. <https://www.industrydocuments.ucsf.edu/tobacco/docs/#id=jzlc0130>
- Gardner, E. S. (1985). Exponential smoothing: the state of the art. *Journal of Forecasting*, 4(1), 1-28. <https://doi.org/10.1002/for.3980040103>
- Gelper, S., Fried, R., & Croux, C. (2010). Robust forecasting with exponential and Holt-Winters smoothing. *Journal of Forecasting*, 29(3), 285-300. <https://doi.org/10.1002/for.1125>
- Holt, C. C., (2004). Forecasting seasonals and trends by exponentially weighted moving averages. *International Journal of Forecasting*, 20(1), 5-10.
- Hunter, J. H. (1986). The exponentially weighted moving average. *Journal of Quality Technology*, 18(4), 203-210.
- Kalekar, P. S. (2004). *Time Series Forecasting Using Holt-Winters Exponential Smoothing*. Kanwal Rekhi School of Information Technology.
- Montgomery, D. C., Jennings, C. L., & Kulahci, M. (2008). Exponential Smoothing Methods. In D. J. Balding, N. A. C. Cressie, G. M. Fitzmaurice, I. M. Johnstone, G. Molenberghs, D.W. Scott, A. F. M. Smith, R. S. Tsay & S. Weisberg (Eds.), *Introduction to Time Series Analysis and Forecasting* (pp. 171-220). John Wiley and Sons.
- Siregar, B., Butar-Butar, I. A., Rahmat, R. F., Andayani, U. & Fahmi, F. (2017). Comparison of exponential smoothing methods in forecasting palm oil real production. *Journal of Physics Conference Series*, 801(1), 1-9.
- Suppalakpanya, K., Nikhom, R., Booranawong, A., & Booranawong, T. (2019). An evaluation of Holt-winters methods with different initial trend values for forecasting crude palm oil production and prices in Thailand. *Suranaree Journal of Science & Technology*, 26(1), 13-22.
- Suppalakpanya, K., Nikhom, R., Booranawong, T., & Booranawong, A. (2019). Forecasting oil palm and crude palm oil data in Thailand using exponential time-series methods. *Engineering and Applied Science Research*, 46(1), 44-55.
- Suppalakpanya, K., Nikhom, R., Booranawong, T., & Booranawong, A. (2019). Study of Several Exponential Smoothing Methods for Forecasting Crude Palm Oil Productions in Thailand. *Current Applied Science and Technology*, 19(2), 123-139
- Tratar, L. F., Mojskerc, B., & Toman, A. (2016). Demand forecasting with four-parameter exponential smoothing. *International Journal of Production Economics*, 181, 162-173. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2016.08.004>
- Tratar, L. F. & Strmcnik, E. (2016). The comparison of Holt-Winters method and multiple regression methods: a case study. *Energy*, 109, 266-276. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.04.115>
- Tratar, L. F., & Strmcnik, E. (2019, October). Forecasting methods in engineering. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 657(1), 1-8.
- Ventura, L. M. B., de Oliveira Pinto, F., Soares, L. M., Luna, A. S., & Gioda, A. (2019). Forecast of daily PM 2.5 concentrations applying artificial neural networks and Holt-Winters models. *Air Quality, Atmosphere & Health*, 12(3), 317-325.

- Winters, P. (1960). Forecasting sales by exponentially weighted moving averages. *Management Science*, 6(3), 324-342.
- Yakovyna, V., & Bachkai, O. (2018). *The Comparison of Holt-Winters and Box-Jenkins Methods for Software Failures Prediction*. <https://www.semanticscholar.org/paper/The-Comparison-of-Holt-Winters-and-Box-Jenkins-for-Yakovyna-Bachkai/286a0d67bfd8f2b448b964689a84a0822fbbb92e>

การพัฒนาระบบตรวจจับเม็ดยาสำหรับเครื่องจ่ายยาอัตโนมัติ Development of Pill Detection System for Automatic Medicine Dispenser

อัศวินท์ ครองไชย^{1,3}, สะการะ ตันโสภณ², สุเมธ เหมะวัฒน์ชัย^{1,3*}
Akkarawin Krongchai^{1,3}, Sakara Tunsophon², Sumet Heamawatanachai^{1,3*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

²ภาควิชาสรีรวิทยา คณะวิทยาศาสตร์การแพทย์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

³หน่วยวิจัยเทคโนโลยีด้านวิศวกรรมความเที่ยงตรงและการแพทย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Naresuan University

² Department of Physiology, Faculty of Medical Science, Naresuan University

³ Research Unit for Precision and Medical Engineering Technology, Faculty of Engineering, Naresuan University

*Corresponding author e-mail: sumeth@nu.ac.th, sumet_h@yahoo.com

(Received: 9 April 2020, Revised: 25 January 2021, Accepted: 4 February 2021)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาและพัฒนาระบบตรวจจับเม็ดยาที่มีความแม่นยำสูงสำหรับเครื่องจ่ายยาอัตโนมัติ โดยในการศึกษานี้ คณะผู้วิจัยได้มีการทดสอบกับยาเม็ดที่แตกต่างกันทั้งขนาดและรูปร่างจำนวน 8 ชนิด โดยมีการทดสอบปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของเม็ดยากับระบบตรวจจับเม็ดยา การทดสอบผลของความชันที่มีผลต่อการไหลของเม็ดยา การทดสอบสัญญาณของชุดเซ็นเซอร์ตรวจจับด้วยอินฟราเรด การทดสอบหาประสิทธิภาพโดยรวมของระบบการตรวจจับเม็ดยา โดยจากผลการทดลองพบว่า ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างเม็ดยาดังกล่าวกับระบบตรวจจับเม็ดยามีค่าในช่วง 0.47-0.70 โดยความเอียงที่เหมาะสมต่อการไหลของเม็ดยา คือ 35 องศา และการใช้มอเตอร์สั่นสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการจ่ายเม็ดยาได้ดีมากขึ้น ผลการทดสอบการอ่านค่าสัญญาณของชุดเซ็นเซอร์อินฟราเรด พบว่าการตั้งค่าการตรวจจับที่ระดับสัญญาณ 50% ของระดับสัญญาณปกติให้ผลการตรวจจับที่แม่นยำ สำหรับผลการทดสอบประสิทธิภาพโดยรวมของระบบการตรวจจับเม็ดยา พบว่าระบบตรวจจับเม็ดยาที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจจับได้ถูกต้อง 100% สำหรับตัวอย่างเม็ดยาทั้งหมดที่ได้นำมาทดสอบ ดังนั้นจากผลการศึกษาสามารถสรุปได้ว่าระบบตรวจจับเม็ดยาที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพอยู่ในเกณฑ์ที่ดีมาก และสามารถนำไปประยุกต์ใช้สำหรับเครื่องจ่ายยาอัตโนมัติได้

คำสำคัญ: ระบบตรวจจับเม็ดยา, เครื่องจ่ายยาอัตโนมัติ, เซ็นเซอร์อินฟราเรด

Abstract

This research is the study and development of a highly accurate pill detection system for an automatic medicine dispenser. We chose eight different types of pills, which varied in both shape and size for our experiment. The study determined various parameters that affected the systems performance, which included the friction coefficient between the pill and the developed system, the appropriate inclination of the slope for pill dispensing, the test of the infrared sensor signal, and the overall efficiency evaluation of the developed system. The results showed that the friction coefficients between the pill samples and the developed system, were approximately 0.47 to 0.70, and the most suitable inclination angle for dispensing the pills, was 35 degrees. The combination of the slope plate with a vibrating motor exhibited the most efficient way for dispensing the pills. The infrared sensor signal detection level was set at 50% of the normal signal amplitude, to achieve a high accuracy detection system. The overall efficiency evaluation of the pill detection system, demonstrated a 100% accuracy of all the tested samples. In conclusion, our

developed pill detection system demonstrated high accuracy results, which can be further implemented for automated pill dispensers.

Keywords: Pill detection system, Automatic medicine dispenser, Infrared sensor

1.บทนำ

ปัจจุบันประเทศไทยได้เข้าสู่สังคมผู้สูงอายุ โดยจากข้อมูลของมูลนิธิสถาบันวิจัยและพัฒนาผู้สูงอายุระบุว่าในปี พ.ศ. 2561 ประเทศไทยมีประชากรผู้สูงอายุ (บุคคลที่มีอายุมากกว่า 60 ปี) อยู่ประมาณ 12 ล้านคน (คิดเป็นร้อยละ 18 ของประชากรทั้งหมดในประเทศไทย) (Situation of The Thai Elderly 2018) โดยผู้สูงอายุส่วนใหญ่จะมีโรคประจำตัว ทำให้ต้องทานยาเพื่อรักษาอาการอย่างต่อเนื่อง ซึ่งผู้สูงอายุบางรายอาจมีโรคประจำตัวมาก ทำให้ต้องทานยาหลายชนิดหรือจากหลายแหล่งเช่น จากแพทย์หลายคนรักษาต่างโรคกัน จากญาติพี่น้อง และจากการซื้อยามารับประทานด้วยตัวเอง ทั้งยารักษาโรค วิตามิน อาหารเสริม เป็นต้น โดยโรคส่วนใหญ่ที่เกิดในผู้สูงวัยนั้น ยากที่จะรักษาได้อย่างมีประสิทธิภาพหากปราศจากความร่วมมือจากผู้ป่วยในการดูแลตัวเองอย่างเคร่งครัด (Aged without disease, 2012)

ในการรักษาผู้ป่วยให้มีประสิทธิภาพนั้น จำเป็นต้องมีการใช้ยาที่เหมาะสม โดยจากคู่มือการใช้ยาอย่างสมเหตุผลตามบัญชียาหลักแห่งชาติ: 2552 และองค์การอนามัยโลก ที่ได้ให้คำจำกัดความของ “การใช้ยาอย่างสมเหตุผล (Rational Drug Use)” คือ “ผู้ป่วยได้รับยาที่เหมาะสมกับปัญหาสุขภาพ โดยใช้ยาในขนาดที่เหมาะสมกับผู้ป่วยแต่ละราย ด้วยระยะเวลาการรักษาที่เหมาะสม และมีค่าใช้จ่ายต่อชุมชนและผู้ป่วยน้อยที่สุด”

“Patients receive medications appropriate to their clinical needs, in doses that meet their own individual requirements, for an adequate period of time, and at the lowest cost to them and their community” (WHO, 1985)

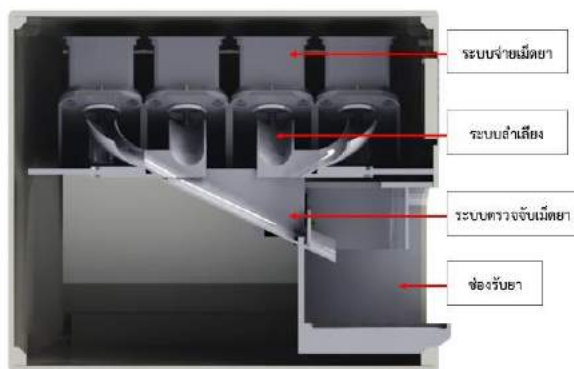
การใช้ยาอย่างไม่สมเหตุผลเป็นปัญหาที่จำเป็นต้องได้รับการแก้ไขอย่างเร่งด่วน และควรได้รับการยกสถานะเป็นวาระแห่งชาติ ซึ่งในเวลาต่อมานโยบายแห่งชาติด้านยา พ.ศ. 2554 ได้มีการบรรจุให้การใช้อย่างสมเหตุผลเป็นยุทธศาสตร์ด้านที่ 2 ของยุทธศาสตร์การพัฒนาระบบยาแห่งชาติ พ.ศ. 2555-2559 โดยได้กำหนดยุทธศาสตร์ย่อยไว้ 7 ประการ ซึ่งหนึ่งในนั้นคือ การพัฒนากลไกและเครื่องมือเพื่อให้เกิดการใช้ยาอย่างสมเหตุผล (Brahma et al., 2012; Muenpa, & Phuripunvanich, 2016) จึงเป็น

ที่มาของการพัฒนานวัตกรรมเครื่องจ่ายยาอัตโนมัติสำหรับผู้ป่วย ซึ่งเครื่องจ่ายยามีประโยชน์อย่างยิ่งในการเข้ามาเป็นส่วนหนึ่งในการแก้ปัญหาการจัดการการจ่ายยาให้กับผู้ป่วยได้อย่างถูกต้องแม่นยำตรงตามเวลา

จากการศึกษาพบว่ามีงานวิจัยหลายผลงานได้พยายามแก้ไขปัญหาคิดค้นนวัตกรรมเกี่ยวกับการจัดการในเรื่องของการจัดจ่ายเม็ดยาหรือจัดเตรียมเม็ดยาให้โรงพยาบาล ร้านขายยา และกับผู้ป่วยด้วยเครื่องจ่ายยาอัตโนมัติแบบต่าง ๆ อาทิเช่น Wannaprapa and Phichetjamroen (2001) ได้คิดค้นระบบจ่ายยาอัตโนมัติ (Automatic Tablet Dispensing System) โดยในงานวิจัยนี้ได้ทำการสร้างเครื่องต้นแบบระบบจ่ายยาอัตโนมัติ ซึ่งทำหน้าที่นับและจ่ายยาที่มีรูปร่างและขนาดต่าง ๆ กัน และทำการทดสอบระบบจ่ายยาอัตโนมัติ เพื่อใช้ในสถานพยาบาลที่มีคนไข้จำนวนมากและมีเม็ดยาลากหลายชนิด ซึ่งระบบดังกล่าวสามารถทำหน้าที่ในการรับส่งข้อมูลผู้ป่วยและข้อมูลยา และจ่ายยาตามคำสั่งที่ป้อนได้อย่างถูกต้องรวดเร็ว ระบบที่ออกแบบไว้นี้ยังสามารถขยายขีดความสามารถให้มีขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อรองรับปริมาณผู้ป่วยที่มีจำนวนเพิ่มขึ้นได้อีกด้วย ต่อมา Boquete et al. (2010) ได้พัฒนาอุปกรณ์จ่ายยาแบบอิเล็กทรอนิกส์ ที่สามารถตั้งโปรแกรมได้ เป็นอุปกรณ์จ่ายยาที่ได้มีการจัดเตรียมเม็ดยาให้ผู้ป่วย ที่จะต้องทานในแต่ละเวลาให้เป็นชุด ๆ ใส่ไว้ในช่องบรรจุก่อนล่วงหน้า เมื่อถึงเวลาที่ต้องทานยา ตัวอุปกรณ์จ่ายยาจะมีการแจ้งเตือนแล้วจัดยาตามที่ตั้งค่าไว้ ส่วนในงานวิจัยของ Ahadani et al. (2012) ได้มีการออกแบบและการสร้างต้นแบบเครื่องจ่ายยา ที่สามารถจ่ายเม็ดยาที่มีคุณลักษณะที่แตกต่างกันได้ เครื่องจ่ายยานี้เหมาะสำหรับการใช้งานของร้านขายยาที่เภสัชกรสามารถเพิ่มหรือลดขนาดได้ เมื่อมีเม็ดยาลากหลายชนิด อีกทั้งยังมีความสามารถในการทำงานได้โดยอัตโนมัติ ในการนับยาและจ่ายยาเข้าไปในภาชนะบรรจุยา

ทางคณะผู้วิจัยได้พัฒนาเครื่องจ่ายยาอัตโนมัติ ที่มีความแม่นยำสูง ใช้งานง่าย ที่สามารถรองรับฟังก์ชันได้ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ โดยเครื่องจ่ายยาอัตโนมัตินี้ มีระบบการทำงานหลักหลาย ๆ ส่วนเช่น ระบบจ่ายเม็ดยา ระบบลำเลียง และระบบตรวจจับเม็ดยา เป็นต้น โดยในบทความนี้ได้อธิบายถึงการพัฒนา

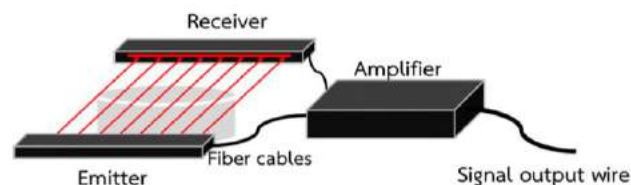
ระบบตรวจจับเม็ดยาเป็นหลัก ซึ่งเป็นระบบที่มีสำคัญต่อความถูกต้องแม่นยำของเครื่องจ่ายยาอัตโนมัติ โดยระบบตรวจจับเม็ดยานี้มีหน้าที่ในการตรวจสอบเม็ดยา ที่ถูกจ่ายมาครั้งละหนึ่งเม็ดจากระบบจ่ายเม็ดยา ก่อนปล่อยเม็ดยานั้นสู่ช่องจ่ายยา ดังที่แสดงส่วนประกอบต่าง ๆ ของเครื่องจ่ายยาอัตโนมัติในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ส่วนประกอบของระบบต่าง ๆ ในเครื่องจ่ายยาอัตโนมัติ

ระบบการตรวจจับเม็ดยา โดยทั่วไปสามารถทำได้หลากหลายวิธี เช่นการตรวจจับโดยใช้การเปลี่ยนแปลงทางน้ำหนัก การตรวจจับวัตถุด้วยการถ่ายภาพ หรือการตรวจจับวัตถุแบบใช้เซ็นเซอร์ มีทั้งแบบสัมผัสและไม่สัมผัส โดยในงานวิจัยนี้ทางผู้วิจัยเลือกใช้เซ็นเซอร์แบบไม่สัมผัส เพื่อไม่ให้เม็ดยาเกิดการสัมผัสกับตัวเซ็นเซอร์โดยตรง เซ็นเซอร์แบบไม่สัมผัสมีให้เลือกใช้ได้อย่างหลากหลาย อาทิเช่นใน ระบบจ่ายยาอัตโนมัติ (Automatic tablet dispensing system) ของ Wannaprapa and Phichetjamroen (2001) ได้เลือกใช้เซ็นเซอร์ชนิดใช้แสง (Photo Sensor) ทั้งหมด 2 ชุด ในการตรวจจับความถูกต้องของเม็ดยา ที่ไหลจากด้านบนลงสู่ด้านล่าง โดยชุดแรกใช้สำหรับนับเม็ดยาครั้งแรกจากจานหมุนเกลี้ยจ่ายยาชุดบน และชุด 2 สำหรับนับเม็ดยาอีกครั้งจากจานหมุนเกลี้ยจ่ายยาชุดล่าง

สำหรับบทความของ Al-Mallahi and Kataoka (2013) ได้อธิบายเกี่ยวกับการประมาณค่าการไหลของมวลของวัตถุ โดยใช้เซ็นเซอร์ใยแก้วนำแสง (Fiber Optic Sensor) มาทำการตรวจจับการไหลของวัตถุ ซึ่งประกอบด้วยเครื่องส่งสัญญาณแสงและตัวรับสัญญาณแสง รวมถึงเครื่องขยายสัญญาณที่เชื่อมต่อกับสายเคเบิลใยแก้วนำแสง ตามที่แสดงในรูปที่ 2



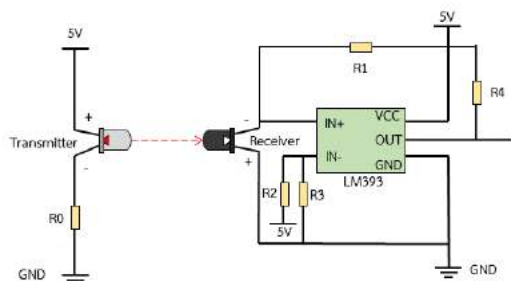
รูปที่ 2 เครื่องส่งสัญญาณแสงและตัวรับสัญญาณรวมถึงเครื่องขยายสัญญาณที่เชื่อมต่อกับสายเคเบิลใยแก้วนำแสง

ในงานวิจัยของ Che et al. (2017) ได้นำเอาเทคโนโลยีการตรวจสอบด้วยการตรวจจับอินฟราเรด ซึ่งเป็นเทคโนโลยีการตรวจสอบแบบโฟโตอิเล็กทริกทั่วไป นำมาออกแบบโดยใช้เซ็นเซอร์อินฟราเรด (Infrared) ชนิดวางไว้ตรงกันข้ามกัน ซึ่งมีตัวส่งสัญญาณที่ใช้ไดโอดเปล่งแสงอินฟราเรด ให้สัญญาณอินฟราเรดไปยังตัวรับสัญญาณ เมื่อตัวรับสัญญาณมีการตอบสนองของแสงโฟโต-ไดโอดของตัวรับสัญญาณ จะส่งค่าของสัญญาณออกมา เพื่อตรวจจับวัตถุที่ไหลผ่าน เมื่อมีวัตถุอยู่ระหว่างตัวส่งและตัวรับสัญญาณ ตัวรับสัญญาณจะตรวจเจอวัตถุทำให้ค่าของสัญญาณลดลงและสามารถตรวจจับวัตถุ เพื่อบันทึกจำนวนวัตถุได้โดยที่มีวัตถุไหลผ่านทีละ 1 ชิ้น

ในงานวิจัยของ Karimi et al. (2017) ได้พยายามหาแนวทางในการออกแบบ เพื่อเปรียบเทียบเทคนิคของการตรวจจับแบบไม่สัมผัสของการตรวจจับอัตราการไหลของวัตถุ โดยตรวจสอบอัตราการไหลที่เกิดขึ้นจริง และได้มีการเสนอเทคนิคของการตรวจจับแบบไม่สัมผัส โดยใช้ตัวต้านทานไวแสง (Light Dependent Resistor) ชุดเซ็นเซอร์อินฟราเรด และเลเซอร์ไดโอด (Laser Diode) ผลการศึกษาพบว่าค่าความสัมพันธ์เชิงเส้นตรง ($r = 0.87$) ระหว่างการเปลี่ยนแปลงของมวลวัตถุจริงกับแรงดันไฟฟ้าสอดคล้องกันเป็นอย่างดีในชุดเซ็นเซอร์อินฟราเรด ซึ่งให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าแบบใช้ตัวต้านทานไวแสงและเลเซอร์ไดโอด จึงได้แนะนำว่าเทคนิคการตรวจจับแบบชุดเซ็นเซอร์อินฟราเรดเป็นเทคนิคการตรวจจับแบบไม่สัมผัสที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการประมาณอัตราการไหลของวัตถุ

ในบทความของ Liu et al. (2019) ได้เลือกชุดตรวจวัดรังสีอินฟราเรดสำเร็จรูป มาใช้ในการทดลองซึ่งประกอบด้วยตัวส่งสัญญาณอินฟราเรดและตัวรับสัญญาณอินฟราเรด ในแรงดันไฟฟ้าของตัวรับสัญญาณอินฟราเรดนั้นจะสอดคล้องกับความเข้มของแสงอินฟราเรดที่ได้รับ สรุปว่าเมื่อมีวัตถุตัดผ่านจะเกิดการบดบังสัญญาณอินฟราเรด ทำให้ศักย์ไฟฟ้าที่วัดได้เปลี่ยนแปลงไป หน่วย

ประมวลผลสัญญาณ (Signal Processing Unit (SPU)) ถูกออกแบบมาเพื่อตรวจวัดแรงดันไฟฟ้าแบบอนาล็อกของตัวสัญญาณอินฟราเรด ทำให้สามารถระบุสถานะการตัดผ่านของวัตถุได้ โดยแผนภาพวงจรของ SPU แสดงในรูปที่ 3 องค์ประกอบหลักของ SPU มี LM393 เป็นเครื่องมือเปรียบเทียบความแตกต่างโดยหากไม่มีการตัดผ่านของวัตถุ สัญญาณแรงดันไฟฟ้าแบบอนาล็อกที่พอร์ต IN+ จะต่ำกว่าแรงดันอ้างอิงที่พอร์ต IN- ดังนั้น LM393 จะส่งค่าเอาต์พุตระดับต่ำ (Low level) ในทางตรงกันข้ามเมื่อวัตถุตัดผ่านรังสีอินฟราเรด แรงดันอินพุตที่พอร์ต IN+ จะสูงกว่าแรงดันอ้างอิง IN- ดังนั้น LM393 จะส่งค่าเอาต์พุตระดับสูง (High level) นั่นคือจะบอกว่าการส่งออกค่าของ SPU สามารถแสดงว่ามีวัตถุตัดผ่านระหว่างชุดตรวจวัดรังสีอินฟราเรดหรือไม่



รูปที่ 3 แผนภาพวงจรสำหรับ SPU

ในงานของ Besharati et al. (2019) พบว่าวัตถุต่าง ๆ มีสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญสำหรับผู้ใช้งานที่จะสามารถวัดอัตราการไหลของวัตถุได้ เพื่อจุดประสงค์นี้ระบบตรวจนับแสงแบบอินฟราเรด จึงได้รับการพัฒนาขึ้นจะประกอบไปด้วยตัวส่งสัญญาณอินฟราเรดและตัวรับสัญญาณอินฟราเรด ที่วางไว้แบบตรงกันข้ามกัน เมื่อมีวัตถุไหลผ่านค่าของตัวรับสัญญาณอินฟราเรดที่รับแสง จะเกิดการเปลี่ยนแปลงทางแรงดันไฟฟ้า เพื่อทำให้เกิดการตอบสนอง โดยวัตถุที่จะนำมาทดสอบมีอยู่ 3 ประเภทคือเมล็ดถั่วเขียว, เมล็ดข้าวสาลี, และเมล็ดหญ้าวอลฟลา วัตถุเหล่านี้มีขนาดใหญ่น้อย กลางและขนาดเล็กตามลำดับ ทำการทดสอบโดยการวัดอัตราการไหลที่ได้จากการประมาณสมบัติทางกายภาพของวัตถุกับแรงดันเซ็นเซอร์ขาออก พบว่าระบบตรวจนับแสงแบบอินฟราเรดสามารถนำไปใช้งานได้

สำหรับในส่วนของการนำเอาระบบการสั่งสะเทือนไปประยุกต์ใช้งาน ในปริญญานิพนธ์ของ Thongkham et al. (2019) ได้เอาระบบการสั่งสะเทือน มาใช้ในการขนถ่ายวัสดุเพื่อนำไปคัดแยก โดยจากผลการทดสอบพบว่า การขนถ่ายวัสดุด้วยระบบการสั่งสะเทือน เพื่อนำไปคัดแยกสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

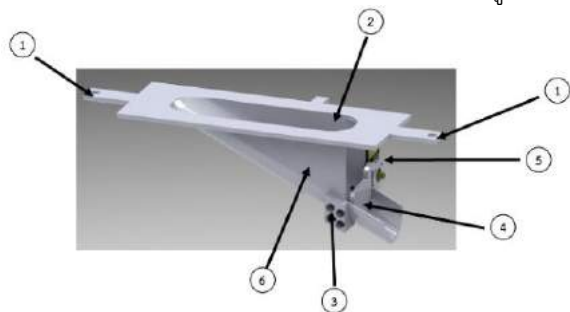
จากการศึกษาเกี่ยวกับเซ็นเซอร์ ที่ใช้ในการตรวจนับพบว่า เซ็นเซอร์อินฟราเรด นั้นมีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับเครื่องจ่ายยาอัตโนมัติ มีต้นทุนต่ำมีความน่าเชื่อถือสูงและแม่นยำ และการตรวจนับแบบชุดเซ็นเซอร์อินฟราเรดเป็นเทคนิคการตรวจนับวัตถุแบบไม่สัมผัสที่เหมาะสม อีกทั้งยังสามารถนำมาใช้กับวัตถุที่มีคุณสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกัน ได้หลายขนาด เนื่องจากเครื่องจ่ายยาอัตโนมัติ เป็นเครื่องจ่ายยาที่ต้องมีความแม่นยำสูง และสามารถจ่ายยาได้หลากหลายรูปแบบที่มีสมบัติทางกายภาพที่แตกต่างกัน ดังนั้นในบทความนี้จึงเลือกใช้เซ็นเซอร์แบบชุดเซ็นเซอร์อินฟราเรดในการพัฒนาระบบตรวจนับเม็ดยา ซึ่งระบบตรวจนับเม็ดยาที่ได้พัฒนาขึ้นมาสำหรับเครื่องจ่ายยาอัตโนมัติ แตกต่างจากเซ็นเซอร์ต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาข้างต้น ซึ่งมีความแม่นยำสูงในการตรวจนับเม็ดยาที่ละ 1 เม็ด เพราะระบบตรวจนับเม็ดยาต้องตรวจนับเม็ดยาได้ทุกครั้งเมื่อเม็ดยาถูกจ่ายออกมา เพื่อไม่ให้เกิดการผิดพลาดในการจ่ายยาให้กับผู้ใช้งาน อีกทั้งในระบบตรวจนับเม็ดยาได้มีการติดแผ่นกันเม็ดยา เพื่อทำให้มั่นใจได้ว่าระบบตรวจนับเม็ดยาสามารถตรวจนับเม็ดยาทุกเม็ดที่จ่ายมา และทำให้ระบบตรวจนับเม็ดยาเกิดการสั่น เพื่อช่วยในการไหลของเม็ดยาได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ระบบตรวจนับเม็ดยาสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจนับวัตถุในลักษณะเดียวกันนี้ได้เช่น นำไปตรวจนับชิ้นงานหลังจากการผลิต นำไปตรวจสอบความถูกต้องของวัตถุก่อนที่จะนำไปบรรจุเพื่อจำหน่าย เป็นต้น จากนั้นจึงได้ทำการศึกษาและทดสอบความถูกต้องของการตรวจนับเม็ดยาของระบบที่พัฒนาขึ้น

2.การออกแบบระบบตรวจนับเม็ดยา

2.1 การออกแบบระบบการตรวจนับเม็ดยาสำหรับเครื่องจ่ายยาอัตโนมัติ

การออกแบบระบบการตรวจนับเม็ดยา ระบบการตรวจนับเม็ดยาถือว่าเป็นระบบที่สำคัญอีกส่วนหนึ่งของเครื่องจ่ายยาอัตโนมัติ เป็นส่วนที่รับเม็ดยาต่อมาจากระบบจ่ายยามาที่ละ 1 เม็ด เพื่อนำเม็ดยาที่ถูกจ่ายมาตรวจสอบความถูกต้องของเม็ดยา โดยใช้ชุดเซ็นเซอร์อินฟราเรดเป็นตัวตรวจนับและนับเม็ดยา ซึ่งในตัวระบบการตรวจนับเม็ดยาถูกออกแบบและสร้างชิ้นงานขึ้นมาเป็นต้นแบบโดยใช้การขึ้นรูปสามมิติจากเครื่องพิมพ์สามมิติ (3D Printer) โดยวัสดุที่นำมาใช้ทดสอบในต้นแบบนั้นขึ้นรูปมาจากพลาสติก PLA (Polylactic Acid) โดยใช้เทคนิคการพิมพ์แบบใช้ Layer Height 0.2 mm, Infill Density 50%, Printing Temperature 210 °C, Print Speed 60 mm/s จากเครื่องพิมพ์สามมิติยี่ห้อ WANHAO

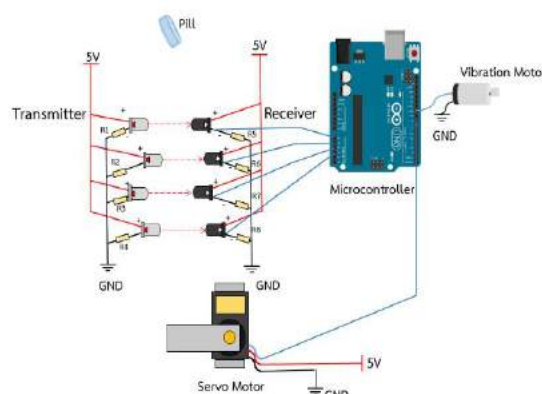
รุ่น Duplicator i3 Plus ซึ่งมีความขรุขระโดยเฉลี่ยของพื้นผิว (Ra) อยู่ที่ 13.16 μm (ทดสอบโดยเครื่อง Mitutoyo Surftest SV-400) สำหรับตัวต้นแบบของระบบตรวจจับเม็ดยา จะมีลักษณะเป็นช่องลาดเอียง เพื่อสำหรับรองรับเม็ดยาที่มาจากระบบจ่ายยา และทำให้เม็ดยาไหลผ่านตามแรงโน้มถ่วงของโลกผ่านช่องลาดเอียงไปยังชุดเซ็นเซอร์อินฟราเรด ในระบบการตรวจจับเม็ดยา มีที่ไว้สำหรับติดตั้งชุดเซอร์โวมอเตอร์ (Servo Motor) ที่ต่อกับแผ่นกั้นเม็ดยา ช่องสำหรับติดตั้งชุดเซ็นเซอร์อินฟราเรด ที่มีตัวส่งสัญญาณกับตัวรับสัญญาณที่วางไว้ตรงกันข้ามกัน และตำแหน่งที่ติดตั้งมอเตอร์สั่น (Vibration Motor) เพื่อช่วยให้เม็ดยาไหลได้ดียิ่งขึ้น โดยส่วนประกอบระบบตรวจจับเม็ดยา แสดงดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 ส่วนประกอบของระบบการตรวจจับเม็ดยาแบบที่พัฒนาขึ้น

การอธิบายหมายเลขที่กำกับไว้สำหรับระบบการตรวจจับเม็ดยาดังนี้ หมายเลข 1 คือ รูที่ไว้สำหรับใส่น้ำยาเข้ากับตัวเครื่อง เพื่อให้สามารถถอดประกอบได้ง่าย หมายเลข 2 คือ ส่วนช่องลาดเอียง ที่สำหรับรองรับเม็ดยา และเป็นส่วนที่นำเม็ดยาไปยังเซ็นเซอร์ตรวจจับเม็ดยา หมายเลข 3 คือ ส่วนที่ติดตั้งชุดเซ็นเซอร์อินฟราเรดเพื่อตรวจจับเม็ดยา ชุดที่ 1-4 หมายเลข 4 คือ แผ่นกั้นเม็ดยา เพื่อให้เซ็นเซอร์ตรวจจับเม็ดยาได้ตรวจจับเม็ดยา หมายเลข 5 คือ เซอร์โวมอเตอร์เพื่อเปิด-ปิดแผ่นกั้นเม็ดยา หมายเลข 6 คือ ตำแหน่งที่ติดตั้งมอเตอร์สั่น

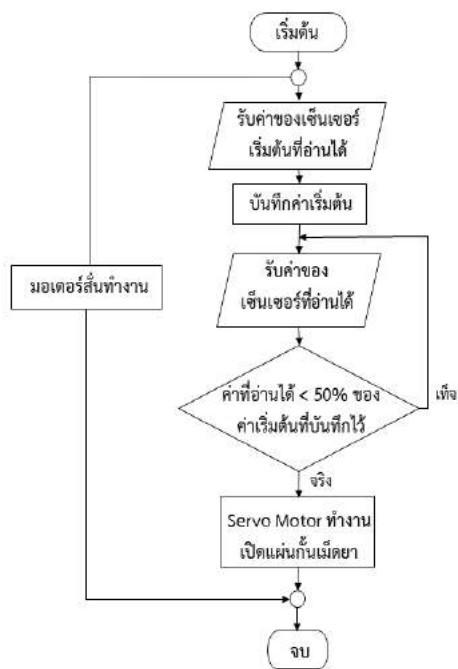
ในส่วนวงจรของระบบตรวจจับเม็ดยา จะมีชุดเซ็นเซอร์อินฟราเรด ที่มีตัวรับ-ตัวส่งวางไว้ตรงกันข้ามกันอยู่ 4 ชุด มีวงจรชุดเซอร์โวมอเตอร์ ที่ต่อกับแผ่นกั้นเม็ดยาและมีวงจรมอเตอร์สั่นสำหรับช่วยกระตุ้นให้เม็ดยาไหลได้ดีแสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 วงจรการทำงานของระบบตรวจจับเม็ดยา

หลักการการทำงานของระบบการตรวจจับเม็ดยา

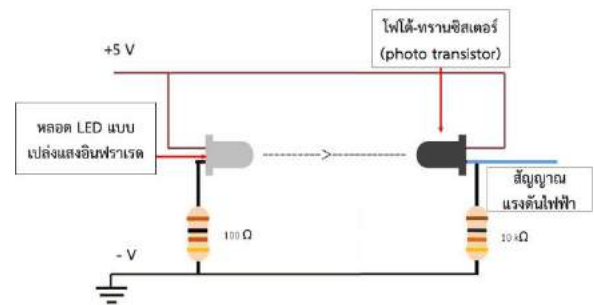
เบื้องต้นเซ็นเซอร์ตรวจจับเม็ดยาจะทำการอ่านค่าสัญญาณเริ่มต้นแล้วทำการบันทึกค่าไว้ หลังจากที่ใช้ในการทดสอบถูกจ่ายมาจากกระบอกจ่ายยา เม็ดยาจะถูกส่งมายังระบบการตรวจจับเม็ดยา โดยไหลผ่านช่องลาดเอียงที่รองรับเม็ดยา เม็ดยาจะไหลมาหยุดที่ตรงแผ่นกั้นเม็ดยา เพื่อให้ชุดเซ็นเซอร์อินฟราเรดรับค่าสัญญาณที่เปลี่ยนไปจากค่าเริ่มต้น จึงสามารถตรวจจับเม็ดยาได้ เมื่อชุดเซ็นเซอร์อินฟราเรด ตรวจจับเม็ดยาได้จะสั่งให้ตัวเซอร์โวมอเตอร์ยกแผ่นกั้นขึ้น เพื่อให้เม็ดยาไหลออกจากกระบอกการตรวจจับเม็ดยา ระหว่างการทำงานทั้งหมดมอเตอร์สั่นจะทำงานตลอดต่อเนื่อง เพื่อช่วยกระตุ้นให้เม็ดยาไหลผ่านได้ดี ตั้งแต่เม็ดยาไหลเข้าระบบการตรวจจับเม็ดยาและไหลออกจากกระบอกการตรวจจับเม็ดยา ดังแสดงในรูป 6 ซึ่งในระบบรวมของเครื่องจ่ายยาอัตโนมัติ ได้มีการตรวจสอบความพร้อมของการทำงานของอุปกรณ์ทั้งหมดในเครื่องจ่ายยา หากมีอุปกรณ์ใดที่มีความผิดปกติ ระบบจะมีการแจ้งเตือนไปยังจอแสดงผลให้ผู้ใช้งานทราบเช่น หากระบบตรวจพบว่ามีเซ็นเซอร์อินฟราเรดตัวใดตัวหนึ่งมีค่าสัญญาณที่เปลี่ยนแปลงไปจากระดับสัญญาณปกติ ระบบจะทำการแจ้งเตือนไปยังจอแสดงผล เพื่อให้ทำการแก้ไขเพื่อป้องกันการผิดพลาดในการจ่ายยาให้กับผู้ใช้งาน หรือในกรณีที่เซ็นเซอร์ตรวจจับเม็ดยาได้แต่แผ่นเปิด-ปิดไม่ทำงาน หรือเมื่อมีคำสั่งให้แผ่นเปิดออกแต่แผ่นไม่เปิดตามคำสั่ง ระบบจะมีการแจ้งเตือนไปยังจอแสดงผลว่าการอุปกรณ์มีการทำงานผิดพลาด เป็นต้น



รูปที่ 6 หลักการทำงานของระบบการตรวจจับเม็ดยา

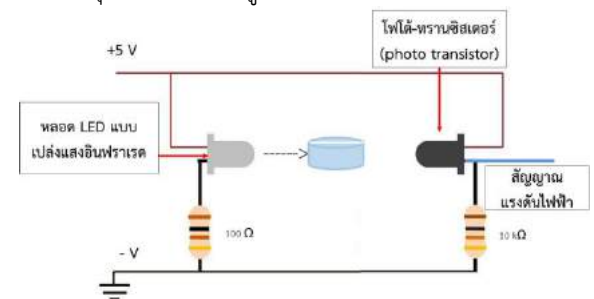
2.2 เซ็นเซอร์อินฟราเรด

ชุดเซ็นเซอร์อินฟราเรดคือเซ็นเซอร์ชนิดนี้อาศัยหลักการ
ทำงานโดยมีตัวส่งแสงและตัวรับแสง ที่มีส่วนประกอบหลัก ๆ มี
อยู่ 2 ส่วนคือ ตัวส่งแสง (Emitter) และตัวรับแสง (Receiver)
ลักษณะของการเกิดการตรวจจับเกิดขึ้นจากการที่แสงที่เกิดจาก
ตัวส่งถูกส่งไปสะท้อนกับวัตถุหรือถูกขวางกั้นด้วยวัตถุ ส่งผลให้
ตัวรับแสงรับรู้ถึงสภาวะที่เกิดขึ้น และเกิดเปลี่ยนแปลงของ
สัญญาณทางด้านเอาต์พุตเพื่อนำไปใช้งาน อุปกรณ์ที่เป็นตัวรับ
แสงนิยมนำมาใช้งานคือโฟโตไดโอด (Photo Diode) หรือเรียกอีก
อย่างว่าโฟโต-ทรานซิสเตอร์ (Photo-Transistor) สำหรับตัวส่ง
แสงนั้นโดยทั่วไปใช้ LED (Light Emitting Diode) LED แบบ
เปล่งแสงอินฟราเรด มีความยาวคลื่นอยู่ในช่วง 910-950 nm
และไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า ระบบการตรวจจับเม็ดยา
สำหรับเครื่องจ่ายยาอัตโนมัติชุดเซ็นเซอร์อินฟราเรดที่มีตัวส่ง
สัญญาณกับตัวรับสัญญาณจะถูกนำมาวางไว้ในด้านที่ตรงกันข้าม
กัน ดังรูปที่ 7



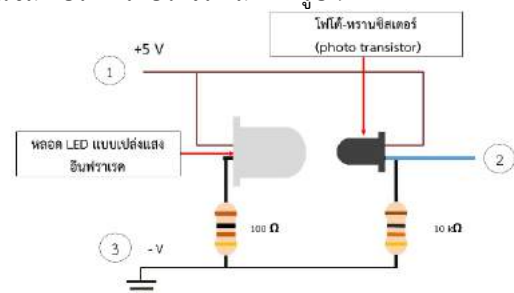
รูปที่ 7 ชุดเซ็นเซอร์อินฟราเรดที่มีตัวส่งสัญญาณกับตัวรับสัญญาณ

เมื่อมีเม็ดยาไหลมาตัดขวาง จะทำให้สัญญาณของตัวรับเกิด
การเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุต และนำค่าสัญญาณ
ไปใช้ในการทำงาน ดังแสดงในรูปที่ 8 ซึ่งในระบบการตรวจจับเม็ดยา
สำหรับเครื่องจ่ายยาอัตโนมัติชุดเซ็นเซอร์อินฟราเรดจะถูกติดตั้ง
ทั้งหมด 4 ชุด เพื่อให้ความถูกต้องแม่นยำในการตรวจจับเม็ดยา



รูปที่ 8 เมื่อเม็ดยาตัดขวางทำให้สัญญาณของตัวรับเกิดการเปลี่ยนแปลง
แรงดันไฟฟ้าด้านเอาต์พุต ทำให้สัญญาณไฟฟาลดลง

วงจรการทำงานของชุดเซ็นเซอร์อินฟราเรดที่ใช้ในระบบการ
ตรวจจับเม็ดยาสำหรับเครื่องจ่ายยาอัตโนมัติหนึ่งชุดประกอบด้วย
ตัวส่งแสง คือหลอด LED แบบเปล่งแสงอินฟราเรดขนาด 5
มิลลิเมตร เพื่อเป็นตัวส่งสัญญาณแสง สำหรับตัวรับแสง คือหลอด
โฟโต-ทรานซิสเตอร์ ขนาด 3 มิลลิเมตร เป็นตัวรับสัญญาณ ตัว
ต้านทานขนาด 100 Ω ต่อเข้ากับหลอด LED แบบเปล่งแสง
อินฟราเรด และตัวต้านทานขนาด 10 kΩ ต่อเข้ากับหลอดโฟโต-
ทรานซิสเตอร์ การต่อวงจร แสดงดังรูป 9



รูปที่ 9 วงจรทำงานของชุดเซ็นเซอร์อินฟราเรด 1 ชุด

การอธิบายหมายเลขสำหรับวงจรการทำงานของชุดเซ็นเซอร์อินฟราเรด หมายเลข 1 คือไฟกระแสตรง 5 โวลต์ จ่ายเข้าในวงจรการทำงานของชุดเซ็นเซอร์อินฟราเรด หมายเลข 2 คือกระแสสัญญาณของตัวรับ ที่เกิดการเปลี่ยนแปลงแรงดันไฟฟ้าทางด้านเอาต์พุต หมายเลข 3 คือขั้วลบของวงจร

2.3 เซอร์โวมอเตอร์

เซอร์โวมอเตอร์ เป็นอุปกรณ์แม่เหล็กไฟฟ้าแบบหนึ่งที่ใช้ในการหมุนตัวขับ (Actuator) ไปยังตำแหน่งต่าง ๆ ด้วยความแม่นยำ โดยใช้สัญญาณพัลส์ เพื่อกำหนดตำแหน่งในการหมุน ในระบบตรวจจับเม็ดยาสำหรับเครื่องจ่ายยาอัตโนมัติ จะใช้เซอร์โวมอเตอร์ แสดงดังรูปที่ 10 ใช้เป็นตัวควบคุมการเปิด-ปิดแผ่นกั้นเม็ดยา เพื่อให้เซ็นเซอร์ตรวจจับเม็ดยาได้ตรวจจับเม็ดยา หลักการทำงานคือเมื่อไม่มีเม็ดยาตัดผ่านเซ็นเซอร์อินฟราเรด แผ่นกั้นเม็ดยาจะปิดลงมา และเมื่อเม็ดยาตัดผ่านเซ็นเซอร์อินฟราเรด แผ่นกั้นเม็ดยาจะเปิดขึ้น เพื่อให้เม็ดยาไหลออกจากระบบตรวจจับเม็ดยา



รูปที่ 10 เซอร์โวมอเตอร์

2.4 มอเตอร์สั่น

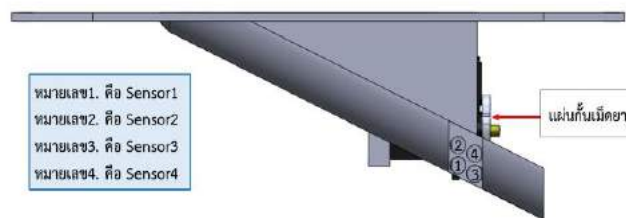
มอเตอร์สั่น เป็นตัวให้กำเนิดแรงเหวี่ยงโดยใช้หลักการแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางแสดงดังรูปที่ 11 มอเตอร์สั่นช่วยให้ช่องสำหรับรองรับเม็ดยา และส่วนที่นำเม็ดยาไปยังเซ็นเซอร์ตรวจจับเม็ดยาเกิดการสั่น เพื่อช่วยให้เม็ดยาเกิดการเคลื่อนที่ได้ดีขึ้น หลักการทำงานของมอเตอร์สั่นในระบบตรวจจับเม็ดยาสำหรับเครื่องจ่ายยาอัตโนมัติ จะทำงานเมื่อระบบจ่ายเม็ดยาไปยังระบบตรวจจับเม็ดยาหลังจากที่เม็ดยาออกจากระบบตรวจจับเม็ดยามอเตอร์สั่นจะหยุดทำงาน



รูปที่ 11 มอเตอร์สั่น

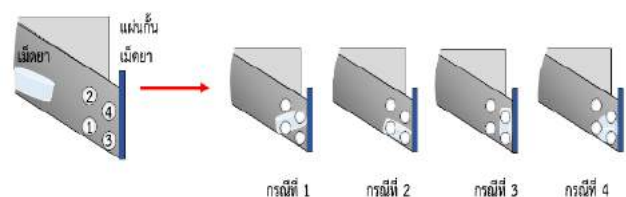
2.5 การติดตั้งชุดเซ็นเซอร์อินฟราเรด

ตำแหน่งการติดตั้งชุดเซ็นเซอร์อินฟราเรด มีความสำคัญเป็นอย่างมากสำหรับระบบตรวจจับเม็ดยา เพราะเซ็นเซอร์อินฟราเรดจะสามารถตรวจจับเม็ดยาได้ต้องมีเม็ดยามาขัดขวางสัญญาณของตัวรับสัญญาณ ดังนั้นการวางตำแหน่งของเซ็นเซอร์อินฟราเรดจะต้องทำการวางแบบ Array ทั้งหมดจำนวน 4 ชุด ดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 ตำแหน่งการวางของเซ็นเซอร์อินฟราเรดจำนวนทั้ง 4 ชุด

การติดตั้งชุดเซ็นเซอร์อินฟราเรด ทั้ง 4 ชุด ในระบบตรวจจับเม็ดยาแบบนี้ เพื่อให้ชุดเซ็นเซอร์อินฟราเรดสามารถตรวจจับเม็ดยาที่ตกลงมาและหยุดในกรณีต่าง ๆ เนื่องจากธรรมชาติของการตกแบบอิสระของเม็ดยา มีความเป็นไปได้ในหลายกรณี ซึ่งการที่เม็ดยามาหยุดที่ชุดเซ็นเซอร์อินฟราเรดมีลักษณะการหยุดที่ไม่แน่นอน เพราะฉะนั้นการติดตั้งเซ็นเซอร์อินฟราเรด แบบ Array ทั้ง 4 ชุด จะเป็นการเพิ่มความน่าจะเป็นที่จะสามารถตรวจจับเม็ดยาได้ทุกครั้ง ที่มีเม็ดยามาตัดเซ็นเซอร์อินฟราเรด จะยกตัวอย่างกรณีเม็ดยาตกมาหยุดที่ชุดเซ็นเซอร์อินฟราเรด ดังรูปที่ 13

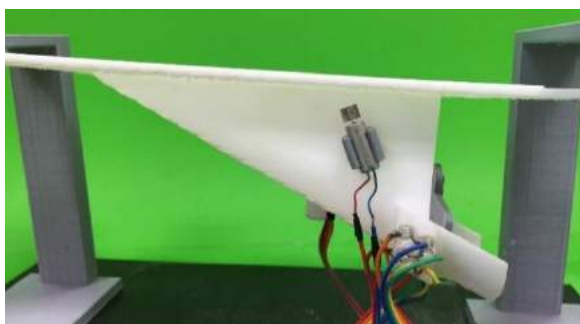


รูปที่ 13 การยกตัวอย่างกรณีเม็ดยาตกมาหยุดที่ชุดเซ็นเซอร์อินฟราเรด

3.วิธีการทดลอง

ในการออกแบบการทดลองจะทำการศึกษาเม็ดยา ที่นำมาใช้เป็นตัวอย่างในการทดลอง และมีการเก็บข้อมูลทางกายภาพของเม็ดยา ก่อนที่จะได้นำเม็ดยาที่ศึกษาไปทำการทดสอบกับระบบตรวจจับเม็ดยา ในการทดสอบคุณสมบัติต่าง ๆ ของระบบตรวจจับเม็ดยา ได้ทำการศึกษาคูณสมบัติเกี่ยวกับแรงเสียดทานระหว่างเม็ดยาแต่ละชนิดกับพื้นผิวของวัสดุ ที่นำมาทำตัวต้นแบบระบบตรวจจับเม็ดยา จากนั้นได้ทำการทดสอบผลของมุมเอียงต่อการไหลของเม็ดยาต่าง ๆ เนื่องจากเม็ดยาจะต้องไหลผ่านได้ดีในระบบตรวจจับเม็ดยา เพื่อป้องกันเม็ดยาเกิดการติดขัดในระบบ

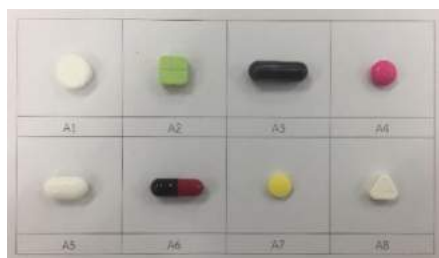
ตรวจจับเม็ดยา และทำการทดสอบเพิ่มเติม เพื่อวิเคราะห์ว่าการติดตั้งมอเตอร์ส่งผลต่อการไหลของเม็ดยาชนิดต่าง ๆ อย่างไร จากนั้นทำการทดสอบการอ่านค่าสัญญาณของเซ็นเซอร์ อินฟราเรดว่าค่าที่อ่านได้เมื่อไม่มีวัตถุ (เม็ดยา) มาขวางระหว่างเซ็นเซอร์ตัวรับ-ตัวส่ง จะส่งผลอย่างไรและเมื่อมีวัตถุ (เม็ดยา) มาขวางระหว่างเซ็นเซอร์ตัวรับ-ตัวส่ง จะส่งผลอย่างไร เพื่อนำผลที่ได้ดังกล่าวเป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจค่าเซ็นเซอร์ตรวจจับเม็ดยา และเมื่อได้เกณฑ์การตัดสินใจให้เซ็นเซอร์ตรวจจับเม็ดยา จะได้มีการทดสอบประสิทธิภาพรวมของระบบตรวจจับเม็ดยา ดังรูปที่ 14 แสดงระบบตรวจจับเม็ดยาที่นำมาใช้ในการทดสอบจริง



รูปที่ 14 ระบบตรวจจับเม็ดยาที่นำมาใช้ในการทดสอบจริง

3.1 เม็ดยา

เม็ดยาที่ใช้ศึกษาในครั้งนี้มีอยู่ 8 รูปแบบที่มีคุณลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกันออกไป เพื่อให้เกิดความหลากหลายในการทดสอบประสิทธิภาพของระบบตรวจจับเม็ดยา ดังรูปที่ 15 เม็ดยาที่มีขนาดความกว้างน้อยที่สุดคือ A6 มีขนาด 6.88 ± 0.00 มิลลิเมตร มีความยาวมากที่สุดคือ A1 มีขนาด 12.16 ± 0.00 มิลลิเมตร เม็ดยาที่มีขนาดความยาวน้อยที่สุดคือ A7 มีขนาด 8.12 ± 0.00 มิลลิเมตร มีความยาวมากที่สุดคือ A3 มีขนาด 21.21 ± 0.09 มิลลิเมตร เม็ดยาที่มีขนาดความสูงน้อยที่สุดคือ A7 มีขนาด 3.18 ± 0.00 มิลลิเมตร มีความสูงมากที่สุดคือ A3 มีขนาด 7.66 ± 0.00 มิลลิเมตร เม็ดยาที่มีน้ำหนักเฉลี่ยน้อยที่สุดคือ A7 มีน้ำหนัก 0.1641 ± 0.00 กรัม มีน้ำหนักเฉลี่ยมากที่สุดคือ A2 มีน้ำหนัก 0.6051 ± 0.00 กรัม ดังแสดงในตารางที่ 1



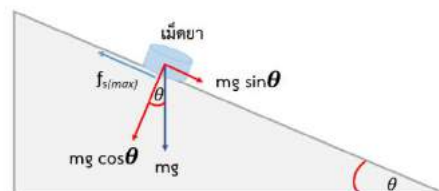
รูปที่ 15 คุณลักษณะทางกายภาพของเม็ดยาที่ใช้ในการศึกษา

ตารางที่ 1 ข้อมูลคุณลักษณะทางกายภาพของเม็ดยาที่ใช้ในการศึกษา

เม็ดยา	กว้าง (mm)	ยาว (mm)	สูง (mm)	น้ำหนักเฉลี่ย (g)
A1	12.16 ± 0.00	12.16 ± 0.00	4.52 ± 0.06	0.5755 ± 0.01
A2	10.30 ± 0.00	10.30 ± 0.00	5.00 ± 0.00	0.6051 ± 0.00
A3	7.66 ± 0.00	21.20 ± 0.09	7.66 ± 0.00	0.3741 ± 0.01
A4	9.20 ± 0.00	9.20 ± 0.00	5.00 ± 0.00	0.3067 ± 0.01
A5	8.14 ± 0.00	14.84 ± 0.00	6.10 ± 0.00	0.5664 ± 0.00
A6	6.88 ± 0.00	19.15 ± 0.02	6.88 ± 0.00	0.4152 ± 0.01
A7	8.12 ± 0.00	8.12 ± 0.00	3.18 ± 0.00	0.1641 ± 0.00
A8	9.20 ± 0.00	10.16 ± 0.00	4.30 ± 0.00	0.4493 ± 0.01

3.2 การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (μ_s)

การทดสอบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างเม็ดยาแต่ละชนิดกับระบบตรวจจับเม็ดยา เนื่องจากระบบตรวจจับเม็ดยาเป็นส่วนที่รองรับเม็ดยามาจากระบบจ่ายยา เม็ดยาที่มาจะต้องไหลตามแนวเอียงของระบบตรวจจับเม็ดยา เมื่อเม็ดยาไหลผิวสัมผัสระหว่างเม็ดยากับระบบตรวจจับเม็ดยา จะเกิดแรงเสียดทานตามแนวเอียง ซึ่งมีแรงโน้มถ่วงของโลกเป็นตัวกระทำกับน้ำหนักของเม็ดยา ดังรูปที่ 16



รูปที่ 16 แผนภาพการตกอิสระของเม็ดยาบนพื้นเอียง

แรงเสียดทานจะเป็นแรงที่ต้านการเคลื่อนที่ของวัตถุ เมื่อวัตถุมีการเคลื่อนที่แบบไหลผ่านกัน แรงเสียดทานจะมีทิศตรงข้ามกับทิศการเคลื่อนที่ของวัตถุเสมอ แรงเสียดทานสถิต (Static friction) เขียนแทนด้วย f_s เป็นแรงเสียดทานที่เกิดขึ้นขณะที่วัตถุอยู่นิ่งหรือวัตถุเริ่มมีการเคลื่อนที่ โดยขณะที่วัตถุเริ่มจะเคลื่อนที่จะเรียกแรงเสียดทานขณะนั้นว่า แรงเสียดทานสถิตที่มากที่สุด (limiting friction) เขียนแทนด้วย $f_{s(max)}$ เมื่อวัตถุอยู่นิ่ง ๆ $f_{s(ขณะใด ๆ)}$ จะมีค่าเท่ากับแรงกด (F) ขณะนั้น แต่เมื่อวัตถุเริ่มมีการเคลื่อนที่จะทำให้ $f_{s(max)}$ มีค่าเท่ากับ $\mu_s N$ ในวัตถุที่เคลื่อนที่บนพื้นเอียง แรงกด (F) ที่มากระทำกับวัตถุมีค่า $F = mg \sin \theta$

เมื่อ $F < f_{s(max)}$
จะสามารถสรุปได้ว่าวัตถุจะไม่เคลื่อนที่ (อยู่นิ่ง ๆ)
เมื่อ $F = f_{s(max)}$

สามารถสรุปได้ว่าวัตถุจะเริ่มเคลื่อนที่

และเมื่อ $F > f_{s(max)}$

จะสามารถสรุปได้ว่าวัตถุจะเคลื่อนที่ไปได้

ในการทดสอบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจะทำการทดสอบโดยการวางวัตถุจากหยุดนิ่งแล้วทำการปรับองศามุมเอียงกับแนวระดับ (θ) ไปเรื่อย ๆ จนกระทั่งวัตถุเริ่มมีการเคลื่อนที่

$$\text{ดังนั้น} \quad F = f_{s(max)} \quad (1)$$

$$\text{ถ้า} \quad F = mg \sin \theta \quad (2)$$

$$\text{ดังนั้น} \quad f_{s(max)} = mg \sin \theta \quad (3)$$

โดยที่

F = แรงจุด (N)

$f_{s(max)}$ = แรงเสียดทานสถิตที่มากที่สุด (N)

m = มวลของเม็ดยา (kg)

g = แรงโน้มถ่วงของโลก ($g = 9.81 \text{ m/sec}^2$)

θ = มุมเอียงกับแนวระดับ ($^\circ$)

ขณะที่แรงปฏิกิริยาที่ผิวสัมผัส N คำนวณได้จากสมการ

$$N = mg \cos \theta \quad (4)$$

โดยที่

N = แรงปฏิกิริยาที่ผิวสัมผัส

จากสมการแรงเสียดทานวัตถุเริ่มจะเคลื่อนที่

$$f_{s(max)} = \mu_s N \quad (5)$$

โดยที่

μ_s = ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานแทนสมการที่ (3) และสมการที่ (4) ลงในสมการที่ (5) จะได้

$$\mu_s = \frac{f_{s(max)}}{N} \quad (6)$$

ดังนั้นจะได้

$$\mu_s = \frac{mg \sin \theta}{mg \cos \theta} \quad (7)$$

หรือว่า

$$\mu_s = \tan \theta \quad (8)$$

3.3 การทดสอบความชันที่มีผลต่อการไหลของเม็ดยา

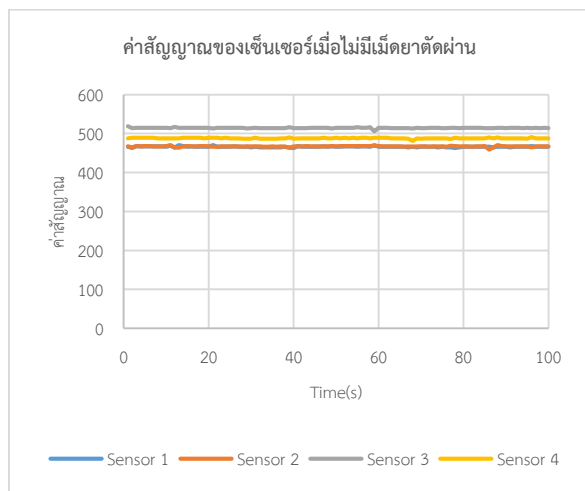
การทดสอบความชันที่มีผลต่อการไหลของเม็ดยาของระบบตรวจจับเม็ดยา จะทำการทดสอบกับเม็ดยาตัวอย่างแต่ละชนิดกับระบบตรวจจับเม็ดยา ที่องศาเอียงกับแนวระดับ ในมุมต่าง ๆ โดยเริ่มการทดสอบมุมเอียงตั้งแต่ 20 องศา และเพิ่มขึ้นทีละ 5 องศา จนถึงมุมเอียง 40 องศา ทดสอบกับเม็ดยาตัวอย่างทั้งหมด 8 ชนิด โดยทำการทดสอบโดยการนำเม็ดยาตัวอย่างแต่ละชนิดที่กำหนดมาทำการสู่วางที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบตรวจจับเม็ดยา

ยาเพื่อสังเกตพฤติกรรมของเม็ดยา ว่าสามารถไหลตามระดับมุมเอียงของแต่ละองศาได้อย่างไร ในขั้นตอนการทดสอบความชันที่มีผลต่อการไหลของเม็ดยา จะปล่อยให้เม็ดยาไหลอย่างอิสระในระบบตรวจจับเม็ดยาโดยที่ไม่ใช้มอเตอร์สั่นเป็นตัวช่วยในการไหล หลังจากทำการทดสอบเสร็จ จึงได้ทำการทดสอบเพิ่มโดยการทดสอบนี้ จะมีการทำการทดสอบเหมือนการทดสอบข้างต้น แต่มีการใช้มอเตอร์สั่นเป็นตัวช่วยกระตุ้นที่จะทำให้เม็ดยาไหลได้ดีขึ้น และนำผลการทดสอบทั้งสองรูปแบบมาเปรียบเทียบกัน

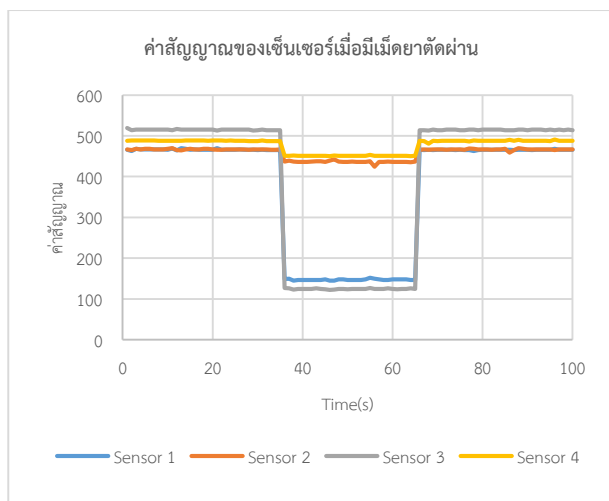
3.4 การทดสอบการอ่านค่าสัญญาณของเซ็นเซอร์อินฟราเรด

ลักษณะของการตรวจจับที่เกิดขึ้นจากแสงของตัวส่ง ส่งผลให้ตัวรับแสงรับรู้ถึงสถานะที่เกิดเปลี่ยนแปลงของสัญญาณทางด้านเอาต์พุตเพื่อนำไปใช้งาน ซึ่งบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ของ Arduino ในส่วนของพอร์ตอนาล็อกอินพุต (Analog Input) แต่ละพอร์ตมีความละเอียดขนาด 10 บิต โดยจะสามารถแบ่งระดับความแตกต่างได้ทั้งหมด 1,024 ค่า เริ่มต้นจากแรงดัน 0 โวลต์ ไปจนถึงระดับ 5 โวลต์ ดังนั้นในการทดสอบนี้จึงได้ทำการบันทึกค่าของเซ็นเซอร์ที่วัดได้เป็นค่าระดับความแตกต่างจาก 0-1,024 ซึ่งมาจากการแปลงค่าแรงดันไฟฟ้าที่วัดได้จากตัวเซ็นเซอร์จาก 0 โวลต์ - 5 โวลต์ ฉะนั้นเมื่อไม่มีวัตถุ (เม็ดยา) มาขวางกั้นระหว่างตัวรับสัญญาณและตัวส่งสัญญาณ จะส่งผลให้ตัวรับแสงสามารถรับค่าได้ค่าหนึ่ง ยกตัวอย่างเซ็นเซอร์ 1 ที่อ่านค่าสัญญาณมากที่สุดได้ที่ 470 หรือประมาณ 2.3 โวลต์ ในรูปที่ 17 จากรูปแสดงให้เห็นว่าเซ็นเซอร์อินฟราเรด แต่ละชุดจะอ่านค่าสัญญาณออกมาได้ในค่าต่าง ๆ คงที่ แต่เมื่อมีวัตถุ (เม็ดยา) มาไหลผ่านมาขวางกั้น จะทำให้ตัวรับแสงรับค่าได้ลดลงดัง แสดงในรูปที่ 18 จะเห็นได้ว่าค่าของสัญญาณเซ็นเซอร์มีค่าลดลงเมื่อมีวัตถุ (เม็ดยา) มาขวางกั้นระหว่างตัวรับสัญญาณและตัวส่งสัญญาณ จากการที่เกิดการเปลี่ยนแปลงสัญญาณทางไฟฟ้า สามารถนำค่าที่เกิดการเปลี่ยนแปลงนี้ นำไปใช้ประโยชน์ในการตรวจจับเม็ดยา จากค่าเริ่มต้นที่เซ็นเซอร์อ่านค่าได้ในช่วงที่ไม่มีวัตถุ (เม็ดยา) ตัดผ่านและนำค่าที่ได้มาเป็นตัวเปรียบเทียบ สำหรับค่าที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อมีเม็ดยาตัดผ่าน โดยคิดเป็นเปอร์เซ็นต์จากค่าที่อ่านได้เริ่มต้น เกณฑ์การตัดสินใจในการตรวจจับเม็ดยาอยู่ที่ 50% ของค่าเริ่มต้น ยกตัวอย่างค่าเริ่มต้นของเซ็นเซอร์ 1 อ่านค่าสัญญาณเริ่มต้นอ่านได้ 467 หรือประมาณ 2.28 โวลต์ ที่ 50% ของค่าสัญญาณเริ่มต้นที่นำมาเป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจในตรวจจับเม็ดยาคือ 233.5 หรือประมาณ 1.14 โวลต์ เป็นต้น สำหรับการทดสอบจะทำโดยการจ่ายเม็ดยา ที่ใช้ในการทดสอบทั้ง 8 ชนิดจำนวน 3 รอบ เพื่อดูพฤติกรรมของเซ็นเซอร์ในการตรวจจับเม็ดยาแต่ละชนิดดังแสดง

ในรูปที่ 18 จากรูปแสดงผลการทดสอบสังเกตได้ว่าเม็ดยา แต่ละชนิดที่เซ็นเซอร์อินฟราเรดทั้ง 4 ชุด ตรวจจับเม็ดยาได้ แต่ละชุดจะตรวจจับเม็ดยาได้ไม่เหมือนกัน ขึ้นอยู่กับลักษณะพฤติกรรมการตกของเม็ดยา การทดสอบนี้จะนำไปเป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจให้เซ็นเซอร์อินฟราเรดเป็นตัวกำหนดในการตรวจจับเม็ดยา



รูปที่ 17 ค่าสัญญาณของเซ็นเซอร์เมื่อไม่มีเม็ดยาตัดผ่าน



รูปที่ 18 ค่าสัญญาณของเซ็นเซอร์เมื่อมีเม็ดยาตัดผ่าน

3.5 การทดสอบหาประสิทธิภาพของระบบตรวจจับเม็ดยา

การทดสอบหาประสิทธิภาพของระบบตรวจจับเม็ดยา หลังจากได้ค่าความเอียงที่เหมาะสมต่อการไหล ของเม็ดยาทุกชนิดรวมถึงการใช้ออเตอร์สั่นเป็นตัวกระตุ้นให้เม็ดยาไหลผ่านได้ดี และจากการตัดสินใจจากเซ็นเซอร์อินฟราเรดเป็นตัวกำหนดในการตรวจจับเม็ดยา ทำการทดลองโดยการปล่อยเม็ดยาที่ละ 1

เม็ดเข้าสู่ระบบตรวจจับเม็ดยา เมื่อเม็ดยาไหลผ่านมาถึงตัวเซ็นเซอร์จะมีแผ่นกั้นเม็ดยาไว้ก่อน หลังจากทีชุดเซ็นเซอร์อินฟราเรดชุดใดชุดหนึ่งสามารถตรวจจับเม็ดยาได้ เซอร์โวมอเตอร์จะเปิดตัวแผ่นกั้นเม็ดยาขึ้น เพื่อให้เม็ดยาออกจากกระบบตรวจจับเม็ดยา ในการทดสอบนั้นจะทดสอบกับเม็ดยาแต่ละชนิดอย่างละ 100 รอบ เพื่อหาประสิทธิภาพของการตรวจจับของระบบตรวจจับเม็ดยา

4.ผลลัพธ์และการอภิปราย

4.1 ผลการทดสอบหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน

จากการทดสอบและได้คำนวณผลจากการทดสอบ ได้ผลดังที่แสดงในตารางที่ 2 การหาค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานหาได้จากองศาเอียงกับแนวระดับ ที่ทำให้เม็ดยาเริ่มเคลื่อนที่จากหยุดนิ่งพบว่าเม็ดยาชนิด A4 ได้มีการเริ่มเคลื่อนที่ไหลผ่านระบบตรวจจับเม็ดยาที่มุม 25 องศา ในส่วนของเม็ดยาชนิด A1 A2 A5 A6 และ A7 ได้มีการเริ่มเคลื่อนที่ไหลผ่านระบบตรวจจับเม็ดยาที่มุม 30 องศา และเม็ดยาชนิด A3 และ A8 ได้มีการเริ่มเคลื่อนที่ไหลผ่านระบบตรวจจับเม็ดยาที่มุม 35 องศา ส่วนค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ทดสอบและคำนวณตามสมการ ได้ค่าที่น้อยสุดคือ 0.47 และค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่มากที่สุดคือ 0.70

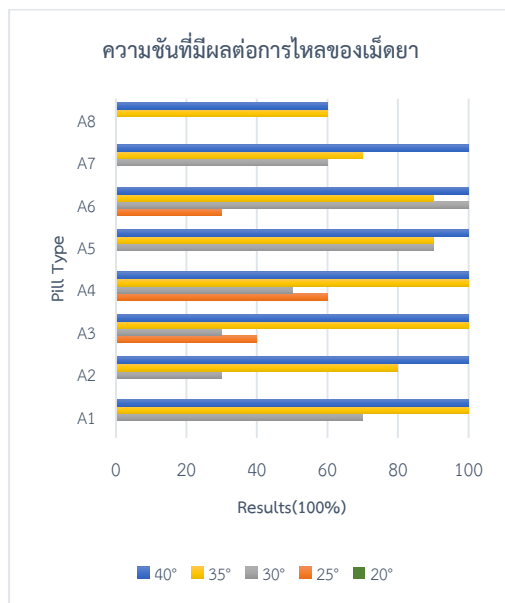
ตารางที่ 2 ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานที่ได้จากมุมที่ทำให้เม็ดยาเริ่มเคลื่อนที่จากหยุดนิ่ง

เม็ดยา	Degree (°)	$\tan (\theta)$	μ_s
A1	30	0.58	0.58
A2	30	0.58	0.58
A3	35	0.70	0.70
A4	25	0.47	0.47
A5	30	0.58	0.58
A6	30	0.58	0.58
A7	30	0.58	0.58
A8	35	0.70	0.70

4.2 ผลของการทดสอบความชันที่มีผลต่อการไหลของเม็ดยา

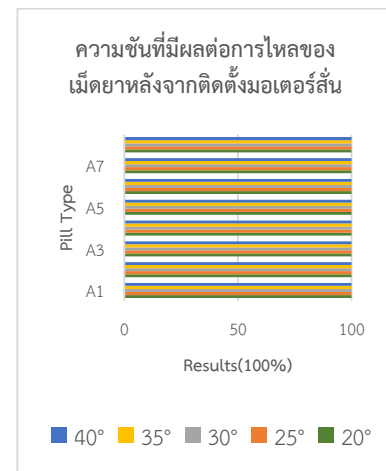
รูปที่ 19 แสดงผลการทดสอบความชันที่มีผลต่อการไหลของเม็ดยา ค่าที่แสดงผล (Results 100%) คือเม็ดยาทุกเม็ดที่ทำการทดสอบสามารถไหลผ่านออกจากระบบตรวจจับเม็ดยาที่ความชันองศา นั้น ๆ ได้ ค่าอื่น ๆ ที่ไม่ถึง 100% จะเป็นค่าของจำนวนเม็ดยา ที่บางส่วนสามารถไหลผ่านออกจากระบบตรวจจับเม็ดยาที่ความชันระดับต่าง ๆ ได้ ซึ่งในการทดสอบจะมีบางเม็ดยาที่ยังติด

อยู่และไม่ไหลออก โดยในการทดสอบนั้นจะทำการสู่วางเม็ดยาในตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบตรวจจับเม็ดยา ซึ่งจะเห็นได้ว่าที่องศามุมเอียงกับแนวระดับ 20 องศาไม่มีเม็ดยาชนิดใดสามารถไหลออกจากระบบตรวจจับเม็ดยาได้เลย ที่องศามุมเอียงกับแนวระดับ 25 องศา มีเพียงเม็ดยา A3, A4 และ A6 ที่สามารถไหลผ่านออกจากระบบตรวจจับเม็ดยาได้บางส่วน ที่องศามุมเอียงกับแนวระดับ 30 องศา เม็ดยาบางส่วนเกือบทุกชนิดสามารถไหลผ่านตามความชันนี้ได้ และเห็นว่าเม็ดยาชนิด A6 สามารถไหลผ่านออกได้ทุกเม็ด แต่เม็ดยาชนิด A8 ไม่สามารถไหลผ่านได้เลย และที่ระดับองศามุมเอียง 35 องศา พบว่าเม็ดยาทุกชนิดสามารถไหลได้บางส่วน โดยมีชนิด A1, A3 และ A4 ที่ไหลออกไปได้ทั้งหมด ที่ระดับองศามุมเอียงกับแนวระดับ 40 องศา พบว่าเม็ดยาเกือบทุกชนิดสามารถไหลผ่านออกจากระบบตรวจจับเม็ดยาได้ทั้งหมด ยกเว้นยาชนิด A8 เท่านั้นที่สามารถไหลออกได้บางส่วน

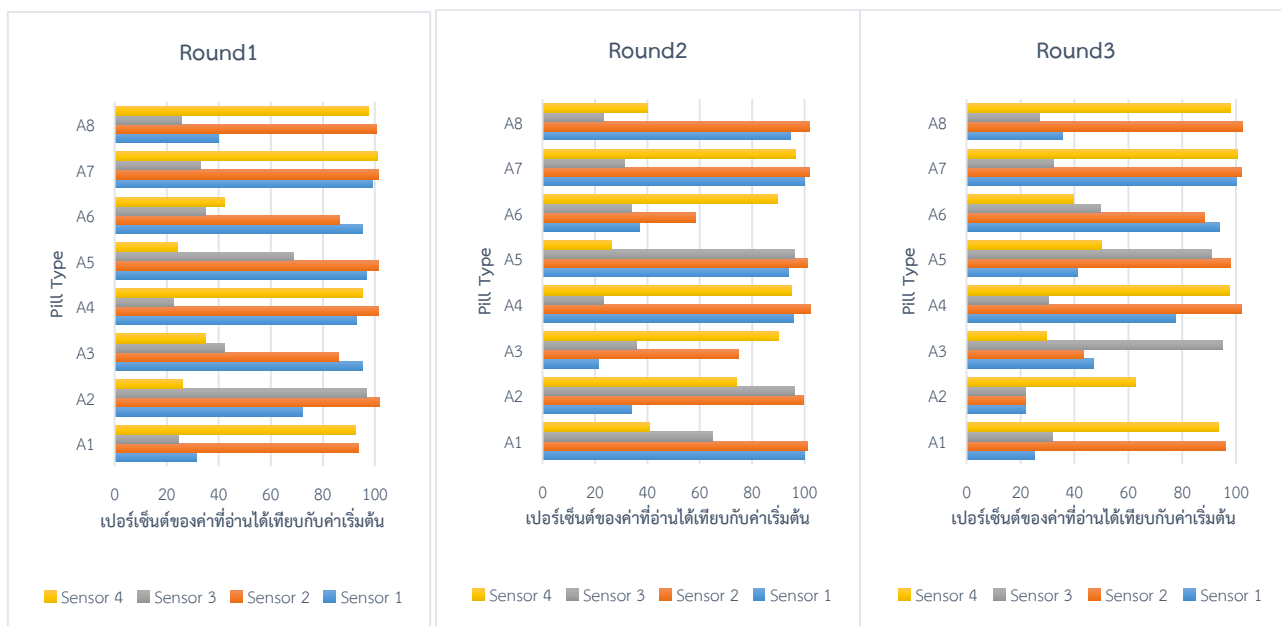


รูปที่ 19 ค่าความชันที่มีผลต่อการไหลของเม็ดยา

เนื่องจากผลการทดสอบที่ผ่านมาในรูปที่ 19 แสดงให้เห็นว่าเม็ดยาแต่ละชนิด ยังไม่สามารถไหลผ่านออกมาจากระบบตรวจจับเม็ดยาได้ทั้งหมด จึงได้มีการติดตั้งมอเตอร์สั่น เพื่อเป็นตัวช่วยกระตุ้นให้เม็ดยาสามารถไหลผ่านได้ดียิ่งขึ้น ในระบบตรวจจับเม็ดยา จากนั้นได้ทดสอบปล่อยเม็ดยาที่จะทำการทดสอบที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของระบบตรวจจับเม็ดยา ผลการทดสอบแสดงในรูปที่ 20 ผลการทดสอบสามารถทำให้เห็นได้ชัดเจน ว่าหลังจากที่มีการติดตั้งมอเตอร์สั่นแล้ว เม็ดยาทุกเม็ดของเม็ดยาทุกชนิดสามารถไหลผ่านได้ดีมาก ในระบบตรวจจับเม็ดยา ตั้งแต่ค่าองศามุมเอียงกับแนวระดับ 20 องศา รวมทั้งค่าความชันระดับอื่น ๆ ที่มากกว่า โดยเม็ดยาทุกเม็ดสามารถไหลผ่านระบบได้



รูปที่ 20 ค่าความชันที่มีผลต่อการไหลของเม็ดยาหลังจากติดตั้งมอเตอร์สั่น



รูปที่ 21 ผลการทดสอบการอ่านค่าสัญญาณของเซ็นเซอร์อินฟราเรด

ผลจากการทดสอบความชื้นที่มีผลต่อการไหลของเม็ดยาทั้งสองรูปแบบ ที่มีการปล่อยเม็ดยาลงสู่ระบบตรวจจับเม็ดยาแบบไม่มีมอเตอร์สั่นช่วย เปรียบเทียบกับการปล่อยเม็ดยาลงสู่ระบบตรวจจับเม็ดยาแบบมีมอเตอร์สั่นช่วย ทำให้สามารถเห็นความแตกต่างอย่างชัดเจน ว่าการที่มีมอเตอร์สั่นช่วยทำให้เม็ดยาไหลผ่านระบบตรวจจับเม็ดยาได้ดี เพราะการเขย่าจะเป็นการช่วยกระตุ้นให้เม็ดยาไหลผ่านในทางลาดชันได้ดียิ่งขึ้น

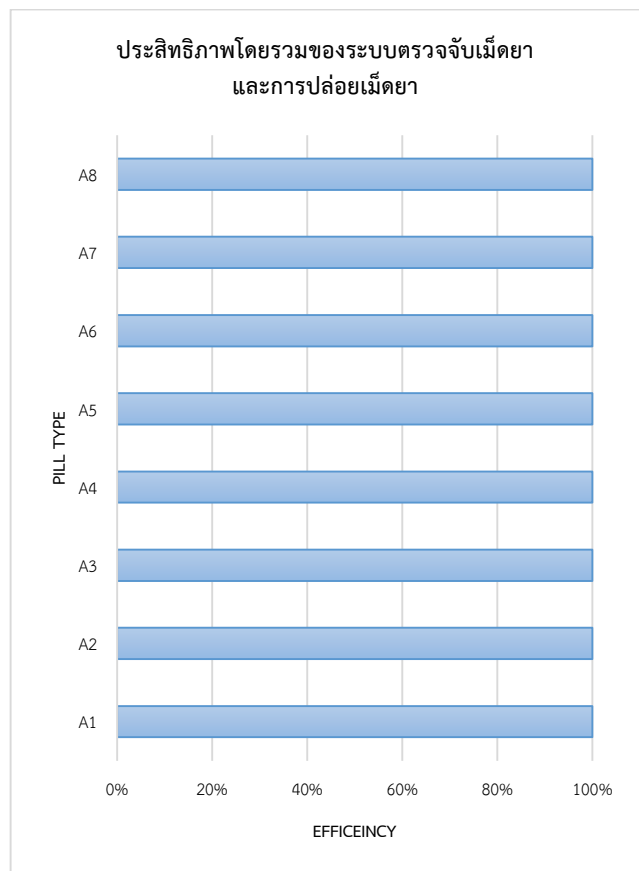
4.3 การทดสอบการอ่านค่าสัญญาณเซ็นเซอร์อินฟราเรด

จากการทดสอบการอ่านค่าสัญญาณของเซ็นเซอร์ ที่ได้ทำการทดสอบกับเม็ดยาแต่ละชนิดจำนวน 3 รอบ พบว่าเม็ดยาที่ได้นำมาทำการทดสอบในแต่ละรอบนั้น ชุดเซ็นเซอร์อินฟราเรดสามารถตรวจจับเม็ดยาได้ดี การวางตำแหน่งของชุดเซ็นเซอร์อินฟราเรดแต่ละชุดเป็นแบบ Array ทำให้เซ็นเซอร์สามารถตรวจจับเม็ดยาได้อย่างน้อยชุดใดชุดหนึ่งและจากรูปที่ 21 แสดงค่าเปอร์เซ็นต์ของค่าที่อ่านได้เทียบกับค่าเริ่มต้น จะสามารถสังเกตได้ว่าเมื่อชุดเซ็นเซอร์ชุดใดชุดหนึ่ง สามารถตรวจจับเม็ดยาได้ ค่าเซ็นเซอร์ที่อ่านค่าได้จะมีค่าน้อยกว่า 50% ของค่าที่อ่านได้ของเซ็นเซอร์เริ่มต้น ดังนั้นจึงได้นำเอาค่าเซ็นเซอร์ที่มีค่าน้อยกว่า 50% ของค่าที่อ่านได้ของเซ็นเซอร์เริ่มต้น มาเป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจในการตรวจจับเม็ดยา

4.4 การทดสอบหาประสิทธิภาพรวมระบบตรวจจับเม็ดยา

จากการทดสอบการหาความเอียงที่เหมาะสม ผู้วิจัยเลือกค่ามุมเอียงกับแนวระดับที่ 35 องศา สำหรับระบบตรวจจับเม็ดยาเนื่องจากจะช่วยประหยัดพื้นที่ในด้านความสูงของเครื่องจ่ายยา ถ้าเลือกมุมที่มากกว่านี้ จะส่งผลให้การออกแบบเครื่องจ่ายยามีขนาดที่สูงขึ้น อีกทั้งช่องรับยาในเครื่องจ่ายยาจะอยู่ลึกมากขึ้น ทำให้ผู้ใช้งานหยิบยาได้ยากยิ่งขึ้นอีกด้วย สำหรับการใช้มอเตอร์สั่นจะช่วยทำให้เม็ดยาไหลผ่านระบบตรวจจับเม็ดยาได้ดี อีกทั้งการใช้แผ่นกันเพื่อให้เม็ดยาหยุด เพื่อให้เซ็นเซอร์ตรวจจับก่อนที่จะปล่อยให้เม็ดยาออกจากระบบจ่ายยา ซึ่งแผ่นกันเม็ดยาเป็นส่วนที่สำคัญที่ขาดไปไม่ได้ เพราะหากไม่มีแผ่นกันอาจจะทำให้ระบบตรวจจับเม็ดยาไม่สามารถจ่ายยาได้อย่างมีประสิทธิภาพตามต้องการ ในส่วนของค่าที่ได้จากการอ่านค่าสัญญาณของระบบเซ็นเซอร์อินฟราเรด จะนำมาเป็นตัวกำหนดในการตรวจจับเม็ดยา โดยใช้ค่าที่น้อยกว่า 50% ของค่าที่อ่านได้ของเซ็นเซอร์เริ่มต้นเป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจ

รูปที่ 22 แสดงผลการทดสอบของระบบตรวจจับเม็ดยาพบว่าระบบตรวจจับเม็ดยาทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ เพราะยาทุกชนิดที่นำมาทำการทดสอบนั้นสามารถตรวจจับได้อย่าง 100% ทุกเม็ดและทุกชนิด



รูปที่ 22 ประสิทธิภาพโดยรวมของระบบตรวจจับเม็ดยา

5.สรุปผลการทดลอง

จากผลการทดลองระบบตรวจจับเม็ดยาสำหรับเครื่องจ่ายยาอัตโนมัติ พบว่าเม็ดยานำมาเป็นตัวอย่างในการทดสอบแต่ละชนิด มีรูปร่างลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกันมากพอสมควร เพื่อให้เกิดความหลากหลายในการทดสอบกับระบบการตรวจจับเม็ดยา และการทดลองต่าง ๆ ระหว่างเม็ดยากับระบบตรวจจับเม็ดยาพบว่าเม็ดยาตัวอย่างแต่ละชนิด ที่นำมาทดสอบค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างพื้นผิวที่เม็ดยาสัมผัสกับระบบตรวจจับเม็ดยามีค่าที่แตกต่างกันอยู่พอสมควร สาเหตุเนื่องจากพื้นผิวของเม็ดยาแต่ละชนิดมีสภาพไม่เหมือนกัน อีกทั้งผิวของระบบตรวจจับเม็ดยาก่อนข้างไม่เรียบเพราะเกิดจากการขึ้นรูปแบบสามมิติ ซึ่งข้อสรุปพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานของเม็ดยานำมาทดสอบอยู่ระหว่าง 0.47-0.70

การทดสอบความชื้นที่มีผลต่อการไหลของเม็ดยาพบว่า เมื่อไม่มีมอเตอร์สั่น เม็ดยามีการเกิดการติดขัดระหว่างระบบตรวจจับเม็ดยา แม้ว่าเมื่อมีความชื้นเพิ่มมากขึ้น เม็ดยาจะสามารถไหลผ่านได้ดีขึ้น แต่ยังไม่สามารถไหลผ่านได้ทั้งหมด โดยเมื่อทำการทดสอบความชื้นที่มีผลต่อการไหลของเม็ดยาและเพิ่มการใช้มอเตอร์สั่น ให้เป็นตัวช่วยกระตุ้นให้เม็ดยาไหลผ่านได้ดี จากการทดสอบเห็นได้ชัดว่าการเพิ่มมอเตอร์สั่น ทำให้เม็ดยาไหลผ่านระบบตรวจจับเม็ดยาที่ใช้ในการทดสอบได้ทั้งหมด ดังนั้นทางผู้วิจัยจึงได้เลือกใช้ความชื้น 35 องศาและมอเตอร์สั่น เป็นเกณฑ์ในการทดสอบประสิทธิภาพรวมของระบบตรวจจับเม็ดยา

จากการทดสอบการอ่านค่าสัญญาณของเซ็นเซอร์อินฟราเรดที่มีการวางตำแหน่งของเซ็นเซอร์อินฟราเรด ที่มีตัวจ่ายสัญญาณและตัวรับสัญญาณโดยการวางแบบ Array ทำให้เซ็นเซอร์อินฟราเรด ช่วยเพิ่มสามารถตรวจจับเม็ดยาได้เป็นอย่างดีและการอ่านค่าสัญญาณของเซ็นเซอร์ทั้ง 4 ชุดทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากการทดสอบในแต่ละรอบ พบว่าเซ็นเซอร์อินฟราเรด สามารถตรวจจับเม็ดยาได้ทุกครั้งไม่ขาดใดก็ชุดหนึ่งใน 4 ชุด ทุกครั้งที่มีเม็ดยามาตัดขวางระหว่างเซ็นเซอร์อินฟราเรด ที่มีตัวจ่ายสัญญาณและตัวรับสัญญาณ จะทำให้ค่าสัญญาณที่อ่านได้มีค่าน้อยกว่า 50% ของค่าเซ็นเซอร์ที่อ่านได้เริ่มต้นเมื่อไม่มีเม็ดยามาตัดขวาง จึงได้นำการทดสอบนี้มาเป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจในการเข้าทำการตรวจจับเม็ดยา จากการทดสอบประสิทธิภาพรวมทั้งหมดของระบบตรวจจับเม็ดยาโดยการปล่อยเม็ดยาทีละ 1 เม็ดสู่ระบบตรวจจับเม็ดยาที่ความชื้น 35 องศา และมีมอเตอร์สั่นเป็นตัวช่วยให้เม็ดยาไหลผ่านได้ดี และใช้ค่าสัญญาณที่อ่านได้ที่มีค่าน้อยกว่า 50% ของค่าเซ็นเซอร์ที่อ่านได้เริ่มต้น เป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจในการตรวจจับเม็ดยาและมีแผ่นกั้นเม็ดยาที่เป็นตัวกั้นเม็ดยาก่อน เพื่อจะทำให้เม็ดยาถูกตรวจจับด้วยชุดเซ็นเซอร์ทั้ง 4 ชุด และเมื่อเซ็นเซอร์อินฟราเรดชุดใดชุดหนึ่งสามารถตรวจจับเม็ดยาได้ แผ่นกั้นเม็ดยาจะปล่อยเม็ดยาออกไปยังช่องจ่ายยา พบว่าจากการทดสอบประสิทธิภาพเป็นไปตามที่คาดการณ์ไว้ ดังนั้นจึงให้ข้อสรุปได้ว่าการพัฒนาการตรวจจับเม็ดยาสำหรับเครื่องจ่ายยาอัตโนมัติ ที่ได้ทำการออกแบบและติดตั้งระบบเซ็นเซอร์แบบ Array และมีการเลือกความชื้นที่เหมาะสมและทำงานร่วมกับมอเตอร์สั่น อีกทั้งยังมีแผ่นกั้นที่จะช่วยกันให้เม็ดยาถูกเซ็นเซอร์อินฟราเรด ตรวจจับได้อย่างแน่นอน ใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพและสามารถนำไปใช้งานร่วมกับเครื่องจ่ายยาอัตโนมัติได้จริง

6. กิตติกรรมประกาศ

ในบทความฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี เนื่องจากได้รับความกรุณาอย่างสูงจากหน่วยวิจัยเทคโนโลยีด้านวิศวกรรมความเที่ยงตรงและการแพทย์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ได้เอื้อเฟื้อสถานที่และอุปกรณ์ที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการทดลองและบุคลากรทุกท่านในหน่วยวิจัยเทคโนโลยีด้านวิศวกรรมความเที่ยงตรงและการแพทย์ที่ให้ความกรุณาช่วยเหลือในทุก ๆ ด้าน

7. เอกสารอ้างอิง

- Ahadani, M. A., De Silva, L. C., Petra, I., Hameed, M. F. A., & Wong, T. S. (2012). Low Cost Robotic Medicine Dispenser. *Procedia Engineering*, 41, 202-209. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.163.07.2012>
- Al-Mallahi, A. A., & Kataoka, T. (2013). Estimation of massflow of seeds using fibre sensor and multiple linear regression modelling. *Computers and Electronics in Agriculture*, 99, 116-122. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.09.005>
- Besharati, B., Navid, H., Karimi, H., Behfar, H., & Eskandari, I. (2019). Development of an infrared seed-sensing system to estimate flow rates based on physical properties of seeds. *Computers and Electronics in Agriculture*, 162, 874-881. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.05.041>
- Boquete, L., Rodriguez-Ascariz, J. M., Artacho, I., Cantos-Frontela, J., & Peixoto, N. (2010). Dynamically programmable electronic pill dispenser system. *Journal of Medical Systems*, 43(3), 357-366. <https://doi.org/10.1007/s10916-008-9248-3>
- Brahma, D., Marak, M., & Wahlang, J. (2012). Rational use of drugs and irrational drug combinations. *The Internet Journal of Pharmacology*, 10(1), 14081.
- Bumrungrad International Hospital. (2012, January 26). *Aged without disease*. <https://www.bumrungrad.com/en/health-blog/january-2012/aging-without-disease>
- Che, Y., Wei, L., Liu, X., Li, Z., & Wang, F. (2017). Design and experiment of seeding quality infrared monitoring system for no-tillage seeder. *Nongye Gongcheng Xuebao/ Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 33, 11-16.
- Foundation of Thai Gerontology Research and Development Institute. (2019, November 7). *Situation of The Thai Elderly 2018*. <https://thaitgri.org/?p=38670>
- Karimi, H., Navid, H., Besharati, B., Behfar, H., & Eskandari, I. (2017). A practical approach to comparative design of non-contact sensing techniques for seed flow rate detection. *Computers and Electronics in Agriculture*, 142, 165-172. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.08.027>
- Liu, W., Hu, J., Zhao, X., Pan, H., Ali Lakhari, I., & Wang, W. (2019). Development and experimental analysis of an intelligent sensor for monitoring seed flow rate based on a seed flow reconstruction technique. *Computers and Electronics in Agriculture*, 164, 104899. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2019.104899>
- Muenpa, R., & Phuripunvanich, N. (2016, December 28). *Rational Drug Use: RDU*. https://ccpe.PharmacyCouncil.org/index.php?option=article_detail&subpage=article_detail&id=209
- Thongkham, T., Deesopa, P., & Phattananan, P. (2019). *The Model of Vibrating Screen [Bachelor's Degree]*, King Mongkut's University of Technology North Bangkok. <http://mhle.eng.kmutnb.ac.th/upload/student-abstract/7125e9af5d5a233f5386d269024114e8.pdf>
- Wannaprapa, M., & Phichetjamroen, V. (2001). Automatic tablet dispensing system. *Proceedings of the 39th Kasetsart University Annual Conference: Engineering* (pp. 200-208). Kasetsart University. https://kukr.lib.ku.ac.th/proceedings/kucon/search_detail/result/7889

การจำแนกสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อตามเวลาจริงเพื่อควบคุมมือหุ่นยนต์ Real-Time Classification of EMG Signals for Controlling Robot Gripper

เมธาวัดน์ คุณาพิพัฒน์¹, กิตติคุณ ทองพูล^{2*}, ปรมินทร์ เณรานนท์¹ พรชัย พุกภักขิทรานนท์²
Methawat Kunapipat¹, Kittikhun Thongpull², Paramin Neranon¹ Pornchai Phukpattaranont²

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ต.คอหงส์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112 ประเทศไทย

²ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ต.คอหงส์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90112 ประเทศไทย

¹Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hatyai, Songkhla 90110, Thailand

²Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hatyai, Songkhla 90110, Thailand

*Corresponding author. e-mail: Kittikhun.t@psu.ac.th

(Received: 30 April 2020, Revised: 21 September 2020, Accepted: 15 October 2020)

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอระบบการบันทึกสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อเพื่อนำข้อมูลไปใช้ในการสร้างต้นแบบของการจดจำรูปแบบสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อเพื่อจำแนกท่าทางมือ โดยใช้ข้อมูลกล้ามเนื้อ 5DT เพื่อตรวจจับข้อมูลท่าทางมือและปลอกแขน MYO เพื่อรับสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อ อุปกรณ์ที่เพิ่มเติมเข้ามาเพื่อช่วยในการอ้างอิงกลุ่มของข้อมูลเพื่อให้ระบบมีความรวดเร็ว แม่นยำ และมีความสะดวกสบายในการใช้งาน ระบบนี้สามารถจำแนกสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อจาก 3 ท่าทางมือประกอบด้วย ท่ากำมือ ท่าแบมือ และท่าพักมือ นอกจากนี้ระบบยังคำนึงถึงผลกระทบของการเคลื่อนที่แขนต่อสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อ โดยใช้ตัวจำแนกสัญญาณคือ Support Vector Machine (SVM), Linear Discriminant Analysis (LDA) และ Artificial Neural Network (ANN) ระบบพัฒนาขึ้นเมื่อทำการเก็บข้อมูลที่ไม่ใช้อุปกรณ์เพิ่มเติมจะให้ประสิทธิภาพในการจำแนกสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้ออยู่ที่ 95.95% ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ $\pm 1.13\%$ ด้วยตัวจำแนกสัญญาณแบบ ANN และในกรณีใช้ข้อมูลกล้ามเนื้อช่วยในการเก็บข้อมูลจะให้ประสิทธิภาพในการจำแนกสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้ออยู่ที่ 97.37% ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานที่ $\pm 2.83\%$ การบันทึกข้อมูลแบบใช้กรณีใช้ข้อมูลกล้ามเนื้อช่วยในการเก็บข้อมูลใช้เวลาการบันทึกประมาณ 5 นาทีต่อหนึ่งอาสาสมัครและการบันทึกข้อมูลแบบไม่ใช้อุปกรณ์จะใช้เวลาประมาณ 12 นาทีต่อหนึ่งอาสาสมัคร ซึ่งเห็นได้ว่าระบบที่นำเสนอช่วยให้การบันทึกสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อมีความรวดเร็วมากขึ้นถึง 2.4 เท่า

คำสำคัญ: การจำแนกสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อ, ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน, การวิเคราะห์การจำแนกประเภทเชิงเส้น, โครงข่ายประสาทเทียม, ปลอกแขนมายโอ, ข้อมูลกล้ามเนื้อไฟฟ้ที่ดี

Abstract

This paper presents the acquisition system that is able to classify hand gestures using electromyography (EMG) signals from a MYO armband and/or the finger positions using a 5DT data glove. Both devices make the EMG recording system easier because the hand gesture is identified automatically by the data captured from the 5DT data glove. The recorded EMG data can be analyzed using classification techniques, including Support Vector Machine (SVM), Linear Discriminant Analysis (LDA), and Artificial neural network (ANN), for creating the hand gesture prediction model. The proposed system can classify three gestures, including rest hand, close hand, and open hand. The recorded data using the MYO armband, the 5DT data glove, and the ANN technique provide maximum accuracy of 95.95% with ± 1.13 SD while the captured data using the MYO solely with ANN deliver maximum accuracy of 97.37% with ± 2.83 SD. Due to overlap variance, both performances are not significantly different. The distance-based method is also used for analyzing the system. The time consumption to record the relevant information using the MYO armband and the 5DT data glove is approximately 5 minutes.

However, the recorded system using the MYO armband solely takes around 12 minutes due to manual data registration process. Subsequently, the time consumptions of these two systems show that the data recording system based on both devices is 2.4 times faster than that of using the MYO armband only.

Keywords: Electromyography Classification, Support Vector Machine (SVM), Linear Discriminant Analysis (LDA), and Artificial neural network (ANN), a MYO armband, a 5DT data glove

1. บทนำ

สัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อ (Electromyography, EMG) ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในปัจจุบันเพื่อใช้ในงานต่าง ๆ เช่น การจำแนกท่าทางมือ (Barrios, 2010; Gauthaam, & Kumar, 2011) และการตรวจวัดความผิดปกติของกล้ามเนื้อเพื่อนำไปวินิจฉัย เป็นต้น สัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อสามารถใช้แสดงผลการออกแรงมัดกล้ามเนื้อทางกายภาพอย่างทันทีทันใด นอกจากนี้สัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อยังเป็นสัญญาณที่มีค่าความต่างศักย์สูงที่สุดในร่างกายเมื่อเทียบกับสัญญาณอื่นๆ เช่น สัญญาณไฟฟ้าจากสมอง สัญญาณไฟฟ้าหัวใจ จึงนิยมนำไปประยุกต์ใช้กับอุปกรณ์ต่าง ๆ เช่น การควบคุมมือหุ่นยนต์ การควบคุมเก้าอี้อัตโนมัติ การใช้ควบคุมกับอุปกรณ์บำบัดทางการแพทย์ เป็นต้น สมอง เส้นประสาทและกล้ามเนื้อเป็นเนื้อเยื่อที่ไวต่อสิ่งเร้า สามารถสร้างสัญญาณไฟฟ้าและส่งสัญญาณไฟฟ้าเมื่อถูกกระตุ้นด้วยสิ่งเร้าออกไปตามเส้นประสาทซึ่งสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อ (Raez et al., 2006) เป็นสัญญาณไฟฟ้าทางชีวการแพทย์ที่มักถูกนำไปวิเคราะห์และวินิจฉัยกิจกรรมที่เกิดขึ้นในเส้นประสาทหรือมัดกล้ามเนื้อซึ่งมีความคล้ายกับการตรวจคลื่นไฟฟ้าหัวใจ แต่มีความแตกต่างกันที่ขนาดของความต่างศักย์ไฟฟ้า และขนาดความถี่ สัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อมีความต่างศักย์ไฟฟ้าเพียงไม่กี่มิลลิโวลต์ และความถี่ตอบสนองอยู่ในช่วงไม่กี่พันเฮิรตซ์

อุปกรณ์ที่ใช้วัดสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อประกอบไปด้วย 2 ชนิด คือ 1) ตัวรับสัญญาณหรืออิเล็กโทรดถูกใช้เป็นอุปกรณ์สำหรับวัดสัญญาณไฟฟ้าจากมัดกล้ามเนื้อที่สามารถวัดได้จากทั้งภายในและนอกผิวหนัง โดยส่วนมากการวัดนอกผิวหนังจะถูกนำมาใช้เนื่องจากไม่เป็นอันตรายผู้ถูกตรวจวัดสัญญาณไฟฟ้าและสามารถใช้ได้ง่าย และ 2) วงจรขยายสัญญาณ เนื่องจากสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อมีความต่างศักย์น้อยมากจึงทำให้ต้องใช้วงจรขยายสัญญาณ จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง ระบบการจำแนกสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อได้ถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในการควบคุมอวัยวะเทียม (Hakonen et al., 2015; Oskoei, & Hu, 2007) แต่การจำแนกสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อก็ยังมีความจำกัด (Castellini et al., 2004) เนื่องจากมีมือเทียมเพียง 25 เปอร์เซนต์ที่ใช้งานได้จริงเท่านั้นจากจำนวนที่

มีการใช้งานเชิงพาณิชย์ทั้งหมด (Jiang et al., 2012; Wright et al., 1995) ด้วยเหตุนี้จึงทำให้มีช่องว่างอย่างมากระหว่างการทดลองตามเงื่อนไขในอุดมคติและการทดลองตามการใช้งานจริง (Castellini et al., 2004; Jiang et al., 2012) และยังมีสาเหตุอื่น ๆ ที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการจำแนกสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อ เช่น การเคลื่อนไหวของแขน (Fougner et al., 2011) ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่งอิเล็กโทรด (Young et al., 2012) และการออกแรงที่ไม่คงที่ระหว่างกิจกรรมต่างๆ (Al-Timemy et al., 2016) ผลกระทบของการเคลื่อนที่แขนก็เป็นหนึ่งสาเหตุที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพของการจำแนกสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อ นักวิจัยได้ใช้เซนเซอร์วัดความเร่ง (Accelerometer) ตรวจจับการเคลื่อนที่ร่วมกันกับการวัดสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อ (Fougner et al., 2011) เพื่อใช้เสริมการจำแนกสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อด้วยการเคลื่อนที่ของแขนหลายตำแหน่ง ส่งผลให้การบันทึกการเคลื่อนที่ของแขนถูกนำมาใช้เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของการจำแนกสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อ (Agamemnon et al., 2019; Jianwei et al., 2014)

ในการลดผลกระทบของการใช้อิเล็กโทรด องค์ประกอบต่างๆ ของอิเล็กโทรด (ขนาด, ความคลาดเคลื่อนของตำแหน่ง, จำนวนช่องทางการรับสัญญาณ, และระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด) ถูกนำมาทดสอบเช่นกัน ในการศึกษาระยะห่างของอิเล็กโทรด 2 – 4 เซนติเมตร และการวางอิเล็กโทรดมีผลต่อความแรงของสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้ออย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้การใช้สัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อที่มีความหนาแน่นสูง (High-density EMG, HD-EMG) ทำงานร่วมกับขั้นตอนวิธีพิเศษ เช่น Spatial correlation (Stango et al., 2015) และ Common spatial patterns (Pan et al., 2015) ได้รับเสนอเพื่อปรับปรุงความหนาแน่นของการเก็บข้อมูลที่มีเงื่อนไขไม่แน่นอน การจำแนกสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อถูกใช้เพื่อประเมินผลกระทบของแรงที่เปลี่ยนแปลงต่อความแม่นยำของการจำแนกสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อ การทดลองลักษณะเด่นแบบทั่วไป ประกอบไปด้วย time domain features, autoregressive coefficients หรือ wavelet transform-based features ถูกนำมาใช้เป็นลักษณะเด่นเพื่อทำให้การ

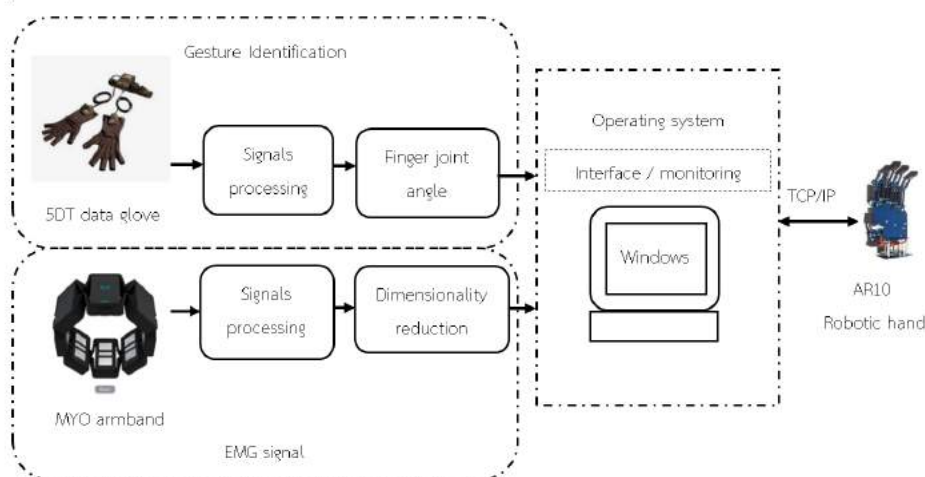
จำแนกสัญญาณไฟฟ้าได้ง่ายขึ้น เนื่องจากสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อมีความซับซ้อนและไม่สามารถนำมาใช้ได้โดยตรง การบันทึกสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อโดยทั่วไปจะเป็นการบันทึกสัญญาณไฟฟ้าเพียงอย่างเดียว อาจเกิดข้อผิดพลาดได้เนื่องจากไม่สามารถระบุท่าทางมือขณะบันทึกได้ ทำให้ต้องทำการทดลองใหม่หากมีการเปลี่ยนแปลงท่าทางระหว่างการบันทึกสัญญาณ ทำให้การบันทึกข้อมูลใช้เวลาเพิ่มขึ้นและเพิ่มภาระในการตรวจสอบข้อมูลและประมวลผล นอกจากนี้ยังต้องทำการบันทึกข้อมูลแต่ละท่าแยกออกจากกันซึ่งจำเป็นต้องอาศัยความชำนาญการของผู้ปฏิบัติงาน เกิดความยุ่งยากมีโอกาสเกิดความผิดพลาดในชุดข้อมูลได้และใช้เวลาในการรวบรวมข้อมูลที่ยาวนาน จากปัญหาทั้งหมดที่กล่าวมาคณะผู้เขียนได้ศึกษาแนวทางในการพัฒนาระบบบันทึกสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อแขนเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวโดยอาศัยการทำงานร่วมกันระหว่างเซ็นเซอร์สองชนิดคือ เซ็นเซอร์วัดสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อและเซ็นเซอร์วัดท่าทางของมือ

ระบบการบันทึกสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อที่ได้รับการพัฒนาในบทความนี้ใช้อุปกรณ์ 2 ชนิด คือ ปลอกแขน MYO (Myo Gesture Control Armband, 2018) เป็นอุปกรณ์สำหรับที่ใช้ในการบันทึกสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อจากแขนและถุงมือข้อมูล 5 DT (Data Gloves 5DT, 2018) เป็นอุปกรณ์ที่ใช้เก็บข้อมูลนิ้วมือ ข้อมูลท่าทางมือจากถุงมือจะช่วยทำให้กระบวนการฝึกฝนข้อมูลง่ายขึ้นและลดระยะเวลาในการทำงานของระบบโดยใช้ปลอกแขน MYO และถุงมือข้อมูลร่วมกัน อีกทั้งยังทำการทดลองบันทึกโดยใช้ข้อมูลจากปลอกแขน MYO เพียงอย่าง

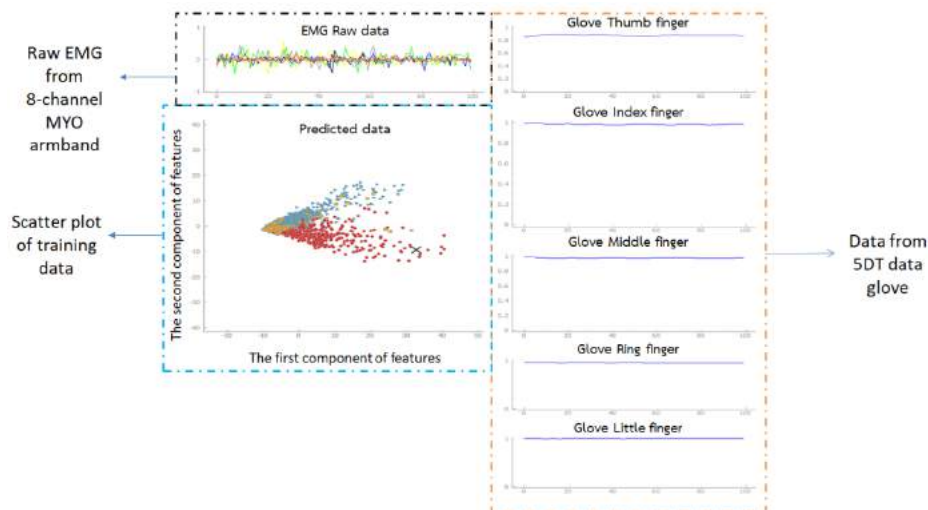
เดียวเช่นกัน เพื่อนำไปเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบการจำแนกสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อและการใช้เวลาในการบันทึกข้อมูลทั้งสองชุดโดยใช้เทคนิคการจำแนกสัญญาณ 3 วิธี ดังนี้ Support Vector Machine (SVM) (Cortes, & Vapnik, 1995), Linear Discriminant Analysis (LDA) (Zhang et al., 2012) และ Artificial Neural Network (ANN) (Capa et al., 2014) ในการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงาน และทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระยะของกลุ่มข้อมูลใน Feature Space และยังทำการเปรียบเทียบเวลาในการบันทึกข้อมูลอีกด้วย

2. การพัฒนาระบบบันทึกสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อร่วมกับถุงมือข้อมูลสำหรับอ้างอิงท่าทางของมือ

การบันทึกสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อแบบทั่วไปใช้เพียงสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อ อาจทำให้เวลาในการบันทึกข้อมูลใช้เวลานานเกินไป และมีความซับซ้อนในการใช้งาน ดังนั้นเพื่อลดปัญหาดังกล่าวงานวิจัยนี้จึงพัฒนาระบบบันทึกสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อโดยใช้อุปกรณ์เพิ่มเติม คือ ถุงมือข้อมูล 5DT ทำให้สามารถระบุท่าทางมือได้อย่างอัตโนมัติ ส่งผลทำให้มีความสะดวกในการจัดการข้อมูลใช้งานง่ายขึ้นและไม่ต้องอาศัยผู้เชี่ยวชาญในการเก็บสัญญาณ ระบบบันทึกสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อที่นำเสนอแสดงในรูปที่ 1 เป็นการนำอุปกรณ์ที่มีราคาถูกและหาซื้อได้ทั่วไปต่อการใช้งานมาประยุกต์ใช้งาน



รูปที่ 1 โครงสร้างระบบการบันทึกสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อ



รูปที่ 2 หน้าต่างผู้ใช้งานของระบบบันทึกสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อ

ระบบจำแนกสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อจะแสดงภาพบน หน้าต่างผู้ใช้งาน ดังแสดงรูปที่ 2 ซึ่งแสดงข้อมูลที่จำเป็น ระหว่างการบันทึกและระหว่างการวิเคราะห์ข้อมูล โดยมีข้อมูล สัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อทั้ง 8 ช่องสัญญาณ ข้อมูลท่าทางนิ้วมือ จากถุงมือ และโมเดลของข้อมูลที่ใช้ในการฝึกสอนระบบการ จำแนกสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อออกเป็นท่าทางที่บันทึกไว้ การ ทำงานของการจำแนกสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อแยกเป็น 3 ขั้นตอน คือ การบันทึกข้อมูล การเตรียมข้อมูล และการจำแนก สัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อ

กล้ามเนื้อ Extensor carpi radialis longus and brevis, Extensor digit minimi, Extensor carpi ulnaris, Brachioradialis, Flexor carpi radialis, Palmaris longus, Flexor carpi ulnaris และ Pronator teres (Wright et al., 1995; Fougner et al., 2011; Agamemnon et al., 2019; Nguyen, 2018) ตามลำดับตามช่องสัญญาณ 1-8 ดังรูปที่ 4

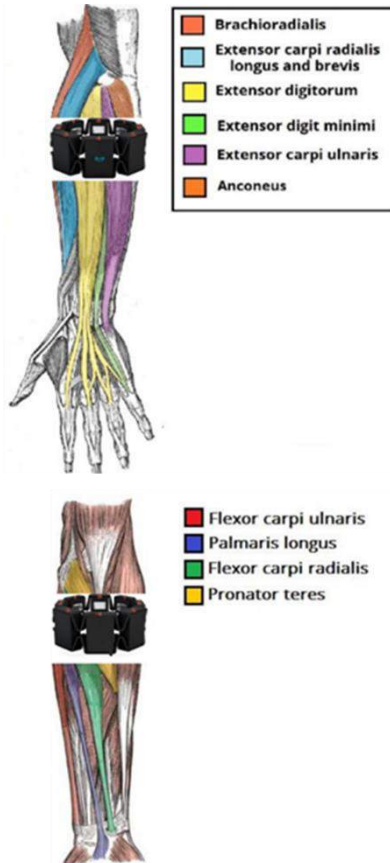
2.1 การบันทึกข้อมูล

2.1.1 สัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อ

ปลอกแขน MYO ดังแสดงในรูปที่ 3 ประกอบไปด้วย 8 ช่องสัญญาณ ด้วยอัตราการซิกตัวอย่าง 200 Hz ปลอกแขน MYO จะถูกวางไว้บนปลายแขนที่ห่างจากข้อศอกประมาณ 3 เซนติเมตร เนื่องจากเป็นจุดที่เหมาะสมในการวัดสัญญาณไฟฟ้า กล้ามเนื้อ ช่องสัญญาณของปลอกแขนจะถูกวางบนมัด



รูปที่ 3 ปลอกแขน MYO (Karen et al., 2018)



รูปที่ 4 มัดกล้ามเนื้อ (Nguyen, 2018)



รูปที่ 5 ถุงมือ 5DT (Data Gloves 5DT, 2018)

2.1.2 ท่าทางของมือ

ข้อมูลจากนิ้วมือที่ตรวจจับได้จากถุงมือ 5DT ดังแสดงในรูปที่ 5 ด้วยอัตราการการชักตัวอย่าง 200 Hz ข้อมูลท่าทางมือถูกจำแนก 3 ท่าทาง คือ กำมือ แบนมือ และพับมือ ดังแสดงในรูปที่ 6 นอกจากนี้ยังศึกษาผลกระทบจากการเคลื่อนไหวของท่อนแขนต่อสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อเพื่อจำลองสภาวะแปรปรวน ที่อาจจะส่งผลให้เกิดความผิดพลาดในการจำแนกสัญญาณไฟฟ้า

กล้ามเนื้อระหว่างการทำงานจริง (Gu et al., 2018) ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 6 ท่าทางมือ ได้แก่ (a) ท่ากำมือ (b) ท่าทำมือแบน และ (c) ท่าพับมือ



รูปที่ 7 มุมของแขนที่ใช้ในการเคลื่อนที่ระหว่างการบันทึกข้อมูล

2.2 การเตรียมข้อมูล

2.2.1 สัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อ

หน้าตาวิเคราะห์ข้อมูลขนาดความยาว 100 ข้อมูลและมีส่วนทับซ้อนกันของข้อมูล 50 เปอร์เซ็นต์ถูกนำมาใช้ในการแบ่งข้อมูลที่วัดจากจากปลอกแขน MYO จำนวน 8 ช่องสัญญาณข้อมูลที่เก็บเข้ามานั้นจะถูกนำมาใช้ในการคำนวณ 5 ลักษณะเด่นทางเวลา (Phinyomark et al., 2012) ประกอบด้วย ค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ (Mean Absolute Value, MAV), ความแปรปรวน (Variance, VAR), รากที่สองของค่าเฉลี่ยกำลังสอง (Root Mean Square, RMS), ความยาวคลื่น (Waveform Length, WL) และความแตกต่างของค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ (Difference of Mean Absolute Value, DMAV) ตามลำดับ ดังสมการที่ (1) – (5) โดย N คือจำนวนข้อมูล และ x_i คือ ค่าของสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อลำดับที่ i และหลังจากคำนวณลักษณะเด่นแล้ว ค่าที่ได้จะถูกนำไปสร้างเป็นเวกเตอร์เพื่อนำไปใช้เป็นข้อมูลขาเข้าของตัวจัดจำแนกแบบของสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อเพื่อทำการฝึกฝนและทำนายท่าทางของมือในรูปแบบที่บันทึกไว้

$$MAV = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_i| \quad (1)$$

$$VAR = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N x_i^2 \quad (2)$$

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i^2} \quad (3)$$

$$WL = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |x_{i+1} - x_i| \quad (4)$$

$$DMAV_i = MAV_i - MAV_{i-1} \quad (5)$$

2.2.2 ท่าทางของมือ

ค่าเฉลี่ยการเคลื่อนที่เป็นตัวกรองที่ใช้ค่าเฉลี่ยของข้อมูลช่วงหนึ่ง (Steven, 2003) ถูกใช้เป็นตัวกรองสัญญาณรบกวนของข้อมูลจากนิ้วมือซึ่งตรวจจับได้จากถุงมือ 5DT หน้าต่างวิเคราะห์ข้อมูลขนาดความยาว 100 ข้อมูลพร้อมกับข้อมูลทับซ้อน 50 เปอร์เซ็นต์โดยที่ ข้อมูล 5 ชุดแรกถูกนำมาเฉลี่ยกันและเมื่อถุงมือทำการบันทึกข้อมูลท่าทางมือเต็มหน้าต่าง ข้อมูลท่าทางในหน้าต่างที่มีจำนวนมากที่สุดจะถูกโหวตให้ค่าของข้อมูลแสดงเป็นทีนั้น ๆ และข้อมูลดังกล่าวถูกใช้ในการบันทึกข้อมูลท่าทางมือ เพื่อนำไปใช้ในการจดจำรูปแบบมือเพื่อใช้เป็นตัวอ้างอิงในการจดจำลักษณะสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อ

2.3 การประเมินคุณภาพของข้อมูล

การประเมินคุณภาพถูกใช้ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของข้อมูล (Keinosuke, 1990) เพื่อยืนยันว่าข้อมูลที่ใช้นำไปใช้ได้จริง การประเมินคุณภาพข้อมูลประกอบไปด้วย 2 วิธีดังนี้

2.3.1 การประเมินความหนาแน่นของข้อมูล

การประเมินความหนาแน่นของข้อมูลวัดได้จากการกระจายตัวของข้อมูล มีการวิเคราะห์ได้หลากหลายแบบ เช่น การลดจำนวนลักษณะเด่นแบบ PCA (Tipping, & Bishop, 1999) เป็นการประเมินข้อมูลของความหนาแน่นโดยการแปลงข้อมูลเรียงตามการกระจายตัวของข้อมูล และการลดจำนวนลักษณะเด่นแบบ Feature Selection เช่น Mutual Information (MI) (Al-Ani, & Deriche, 2002) เป็นการวิเคราะห์ความเกี่ยวข้องระหว่างลักษณะเด่น 2 ชนิด และ ANOVA F-value เป็นการวัดการกระจายข้อมูลของลักษณะเด่น เป็นต้น Feature Selection เป็นเทคนิคการลดลักษณะเด่นให้เหมาะสมหลังจากนั้นข้อมูลที่ได้จะถูกจำแนกต่อไปโดยใช้เทคนิคการจำแนกสัญญาณแบบ SVM แบบ LDA และแบบ ANN

2.3.2. วิธีการประเมินด้วยระยะทาง

ระยะทางระหว่างลักษณะเด่นถูกใช้ในประเมินคุณภาพ ถูกคำนวณผ่านเมตริกด้วยการคำนวณแบบ Euclidean Distance ที่แสดงในสมการที่ (10) วิธีการนี้ไม่จำเป็นต้องใช้เทคนิคการจำแนกสัญญาณในการวิเคราะห์ข้อมูล เนื่องจากไม่ขึ้นกับการจำแนกสัญญาณและไม่จำเป็นต้องตั้งค่าตัวแปรใด ๆ วิธีการนี้ใช้เมตริกซ์ในการคำนวณระยะทางระหว่างลักษณะเด่น ดังสมการที่ (6) โดยที่ $X_j, X_i \in X$ ของ $|X|$ ระยะทางที่คำนวณได้ขึ้นกับเงื่อนไขดังนี้

$$d(X_i, X_j) \geq 0 \quad (6)$$

$$d(X_i, X_j) = 0, \text{ if } X_i = X_j \quad (7)$$

$$d(X_i, X_j) = d(X_j, X_i) \quad (8)$$

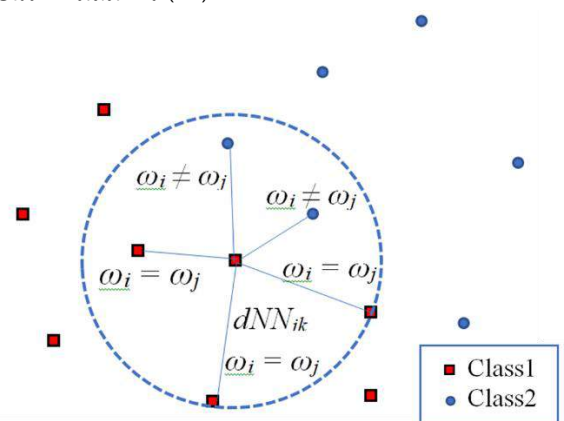
$$d(X_i, X_j) \leq d(X_i, X_j), d(X_j, X_j)w \quad (9)$$

d คือค่าระยะทางระหว่างข้อมูล, X คือเมตริกซ์ชุดข้อมูล, i คือแถวของเมตริกซ์, j คือหลักของเมตริกซ์และ w คือเวกเตอร์ค่าน้ำหนัก การวัดระยะทาง Euclidean Metric เป็นการคำนวณพื้นฐานการคำนวณระยะทางเมื่อเทียบกับการคำนวณแบบอื่น (de Sá, 2012) โดย $\|x_j - x_i\|_e$ คือระยะทาง Euclidean, $x_{i,m}$ คือข้อมูลในแถว i และหลัก m และ $x_{j,m}$ ข้อมูลในแถว j และหลัก m

$$\|x_j - x_i\|_e = \sqrt{\sum_{m=1}^{|X|} (x_{i,m} - x_{j,m})^2} \quad (10)$$

2.3.2.1. การประเมินการทับซ้อนกันของข้อมูล

วิธีการวิเคราะห์ข้อมูลที่อยู่รอบตัวของลักษณะเด่นนั้น ๆ จะถูกนำมาใช้ในการคำนวณพื้นที่ซ้อนทับของข้อมูล (Overlapping Region, Q_{ov}) (Konig et al., 1998) เป็นค่าที่บอกระยะทางเฉลี่ยระหว่างข้อมูลต่างกลุ่ม โดยที่ประสิทธิภาพสูงสุดหมายความว่าไม่มีการทับซ้อนกันของข้อมูลต่างกลุ่มกันตามพื้นฐานของกลุ่มข้อมูล k-Nearest Neighbors (k-NN) (Roberto et al., 2010) ที่มีสมาชิกจำนวน k ตัวเป็นกลุ่มเดียวกันทั้งหมด ($\omega_i = \omega_j$) หรือรอบตัวของลักษณะเด่นนั้นไม่มีข้อมูลในกลุ่มอื่น ($\omega_i \neq \omega_j$) ดังแสดงในรูปที่ 8 ที่คำนวณพื้นที่ทับซ้อนได้ตามสมการ (11)



รูปที่ 8 การประเมินการซ้อนทับกันของข้อมูล

$$Q_{ov} = \frac{1}{L} \sum_{c=1}^L \frac{1}{N_c} \sum_{j=1}^{N_c} \frac{\sum_{i=1}^k qNN_{ji} + \sum_{i=1}^k n_i}{2 \sum_{i=1}^k n_i} \quad (11)$$

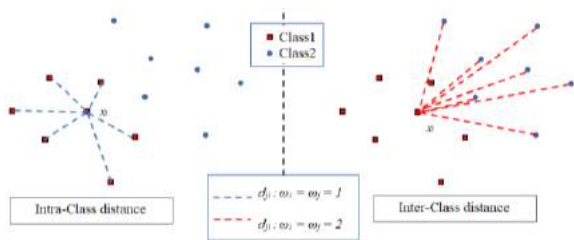
$$n_i = 1 - \frac{qNN_{ji}}{qNN_{jk}} \quad (12)$$

$$qNN_i = \begin{cases} n_i : \omega_i = \omega_j \\ -n_i : \omega_i \neq \omega_j \end{cases} \quad (13)$$

โดย N คือจำนวนสมาชิกในชุดข้อมูล, N_c คือจำนวนสมาชิกในแต่ละกลุ่ม, L คือจำนวนกลุ่มข้อมูล, i คือลำดับของสมาชิกของกลุ่มข้อมูล k -NN มีค่าตั้งแต่ 1 ถึง k , c คือลำดับของกลุ่มมีค่าตั้งแต่ 1 ถึง L , j คือ ลำดับของสมาชิกในแต่ละกลุ่มมีค่าตั้งแต่ 1 ถึง N_c และ ω คือเวกเตอร์จำแนกกลุ่มข้อมูล

2.3.2.2. การประเมินความอัดแน่นของข้อมูล

วัตถุประสงค์การประเมินผลแบบนี้เป็น การประเมินการอัดแน่นของกลุ่มข้อมูล (Nonparametric Compactness Measure, qc) (Konig, 2000) ประกอบด้วย ค่าความอัดแน่นในกลุ่มเดียวกัน และการแยกตัวของข้อมูลต่างกลุ่มดังแสดงในรูปที่ 9 ประสิทธิภาพชุดข้อมูลที่มีค่าความอัดแน่นในกลุ่มเดียวกัน (Intra-Class qc_{intra}) สูงเกิดขึ้นเมื่อข้อมูลเกาะติดกันมากและไม่มีส่วนทับซ้อนกับข้อมูลกลุ่มอื่น ค่าความอัดแน่นคำนวณได้ตามสมการ (14) ส่วนประสิทธิภาพของการแยกตัวของข้อมูลต่างกลุ่ม (Inter-Class qc_{inter}) จะเกิดขึ้นเมื่อกลุ่มข้อมูลแยกตัวกันอย่างชัดเจน โดยค่าการแยกตัวของข้อมูลต่างกลุ่มคำนวณได้ตามสมการ (15) หากประสิทธิภาพทั้งสองมีค่าสูงจะแสดงให้เห็นว่าข้อมูลมีการแยกกลุ่มกันอย่างชัดเจนและมีการอัดแน่นภายในกลุ่มอย่างมาก



รูปที่ 9 การประเมินความอัดแน่นกันของข้อมูล

$$qc_{intra} = \frac{1}{L} \sum_{c=1}^L \frac{2}{N_c(N_c - 1)} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \delta(\omega_i, \omega_j) \delta(\omega_i, \omega_c) d_{i,j} \quad (14)$$

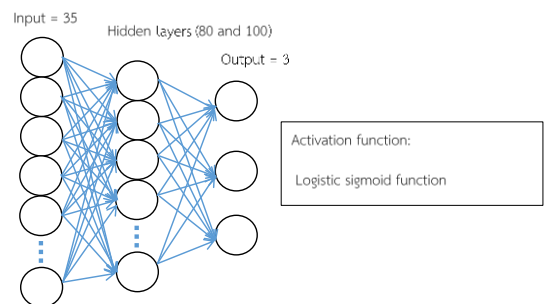
$$qc_{inter} = \frac{1}{N^B} \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N (1 - \delta(\omega_i, \omega_j)) d_{i,j} \quad (15)$$

$$N^B = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N 1 - \delta(\omega_i, \omega_j) d_{i,j} \quad (16)$$

$$\delta(\omega_i, \omega_j) = \begin{cases} 1 : \omega_i = \omega_j \\ 0 : \omega_i \neq \omega_j \end{cases} \quad (17)$$

2.4 การจำแนกสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อ

ลักษณะเด่นตั้งต้นจำนวน 40 ค่า (8 ช่องสัญญาณ $\times$ 5 ลักษณะเด่นต่อช่องสัญญาณ) ถูกคำนวณจากสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อในแต่ละหน้าต่างวิเคราะห์ จากนั้นจะเข้าสู่กระบวนการลดลักษณะเด่น ด้วยเทคนิค Feature Selection (FS) ระเบียบวิธี Mutual Information (MI) ทำการประเมินประสิทธิภาพของการจำแนก ใช้เทคนิคการจำแนกแบบ Support Vector Machine (SVM) (Cortes, & Vapnik, 1995), Radial Basis Function (RBF) Kernel, Penalty Parameter $C = 1$ และ Gamma = 0.025 นอกจากนี้ใช้เทคนิคการจำแนกสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อแบบ Linear Discriminant Analysis (LDA) (Zhang et al., 2012) ด้วยวิธี Singular Value Decomposition และ Artificial Neural Network (ANN) (Capa et al., 2014) แบบ Multi-Layer Perceptron เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการจำแนกสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อ คุณลักษณะของ ANN ที่เลือกใช้ประกอบด้วย ขนาดอินพุตเวกเตอร์เท่ากับ 35 จำนวน Hidden layer เท่ากับ 100 และ 80 ในกรณีชุดข้อมูลแบบบล็อกแขน MYO อย่างเดียว และชุดข้อมูลบล็อกแขน MYO และถุงมือ 5DT ตามลำดับ จำนวนการคำนวณซ้ำ 300 รอบด้วยระเบียบวิธีการเรียนรู้แบบ Quasi-Newton ฟังก์ชันเอาต์พุตแบบ Logistic sigmoid function ขนาดเอาต์พุตเวกเตอร์เท่ากับ สามตามจำนวนท่าทางที่ทำการจำแนก โครงสร้างเครือข่ายประสาทเทียมที่พัฒนาขึ้นแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 โครงสร้างในแต่ละชั้นของการคัดแยกแบบ ANN

2.5 การควบคุมมือหุ่นยนต์

ผลลัพธ์ของการคัดแยกสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อถูกนำมาใช้ควบคุมมือหุ่นยนต์ โดยในงานวิจัยนี้มีการนำผลลัพธ์จากการคัดแยกสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อไปใช้เพื่อควบคุมมือหุ่นยนต์ AR10 ซึ่งสามารถเคลื่อนที่ได้ 10 องศาอิสระ และสามารถออกท่าทางที่ถูกบันทึกไว้เช่นท่ากำมือ หรือท่าแบมือ ได้ด้วยการส่งการผ่านการสื่อสารแบบ TCP/IP ผลลัพธ์จากการจำแนกสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อในแต่ละรอบการประมวลผลจะถูกนำไปใช้ในการสั่ง

การให้มือหุ่นยนต์เคลื่อนไหวตามท่าทางดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 11

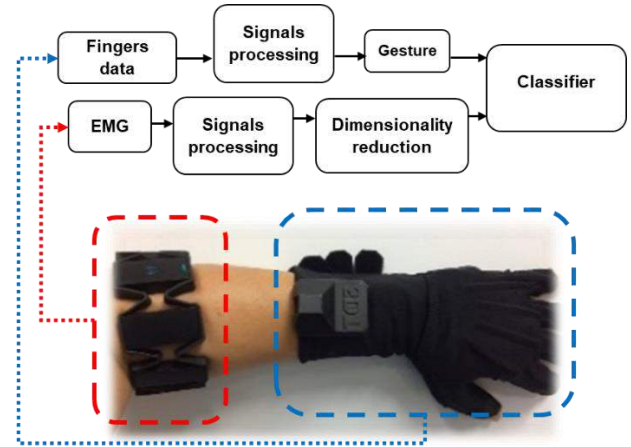


รูปที่ 11 การทำงานของมือหุ่นยนต์ผ่านการควบคุมด้วยสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อ

3. การทดลอง

การทดลองการจดจำรูปแบบสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อต้องการข้อมูลต้นแบบ ซึ่งการเก็บข้อมูลต้นแบบแบ่งเป็น 2 ลักษณะ ประกอบด้วย 1) การเก็บข้อมูลสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อพร้อมกับข้อมูลจากถุงมือข้อมูล 5DT และ 2) การเก็บสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อเพียงอย่างเดียว เพื่อเปรียบเทียบเวลาและประสิทธิภาพในการทำงานของระบบการจำแนกสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อ โดยการทดลองทั้งสอง ใช้อาสาสมัครที่มีสุขภาพแข็งแรง 11 คน (ชาย 7 คนและหญิง 4 คน) อายุระหว่าง 20 – 30 ปี เก็บท่าทางมือ 3 ท่า คือ ท่ากำมือ ท่าแบมือ ท่าพักมือ ดังแสดงในรูปที่ 6 นอกจากนี้ยังมีการเก็บข้อมูลในขณะอาสาสมัครเคลื่อนไหวก่อนแขน ดังแสดงในรูปที่ 7 รายละเอียดการทดลองมีดังนี้

การทดลองที่ 1 ข้อมูลต้นแบบจากสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อและข้อมูลจากถุงมือ 5DT โดยข้อมูลจากถุงมือ ช่วยให้ข้อมูลต้นแบบจุดอ้างอิง (Ground Truth) มีความสะดวกในการใช้งานและระบบการบันทึกสัญญาณมีความรวดเร็วมากขึ้น ขั้นตอนการเก็บข้อมูล เบื้องต้นผู้ฝึกฝนแนะนำให้อาสาสมัครแสดงท่าทางมือในลักษณะต่าง ๆ โดยเก็บข้อมูลที่แต่ละท่าแบบต่อเนื่อง ระหว่างการเก็บแต่ละท่าทางผู้ฝึกสอนจะบอกให้อาสาสมัครเคลื่อนที่แขนไปด้วย เพื่อศึกษาความแปรปรวนของการเคลื่อนไหวก่อนแขนต่อสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อ โดยสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อถูกเก็บจำนวน 100 ชุดข้อมูลต่อท่าทาง ในการฝึกสอนโมเดลต้นแบบการจดจำรูปแบบสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อ จะนำข้อมูลที่เก็บมาได้ถูกแบ่งเป็นสองกลุ่ม ส่วนแรก 2,805 ชุดข้อมูล (ร้อยละ 85) ถูกใช้ในการสอนต้นแบบการจดจำรูปแบบสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อ และส่วนที่สอง จำนวน 495 ชุดข้อมูล (ร้อยละ 15) นำไปทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อ



รูปที่ 12 การเก็บข้อมูลสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อแบบใช้ข้อมูลจากปลอกแขน MYO และข้อมูลจากถุงมือ 5DT

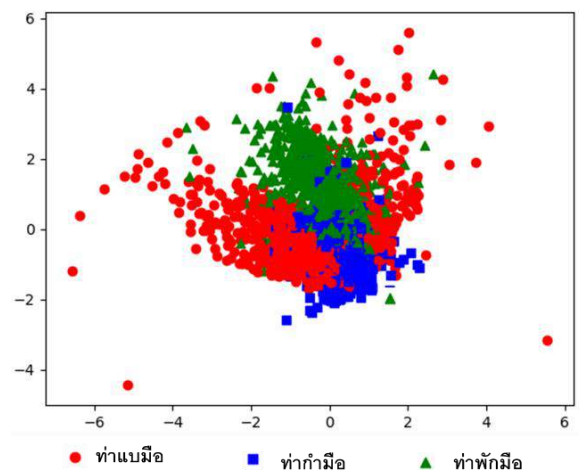
การทดลองที่ 2 การเก็บต้นแบบข้อมูลอาศัย MYO เพียงอย่างเดียว โดย Ground Truth จะใช้เป็นการกำหนดค่าและเก็บข้อมูลแต่ละท่าแยกกัน การเก็บข้อมูลในการทดลองนี้ผู้ทดลองจะถูกเก็บข้อมูลสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อครั้งละท่าทาง โดยในแต่ละการเก็บสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อจะมีการหาจุดเริ่มต้นของสัญญาณด้วยค่าเฉลี่ยสัมบูรณ์ (MAV) เป็นค่าเริ่มต้น (Threshold) ระหว่างการเก็บข้อมูลแต่ละท่าทางผู้ฝึกสอนจะบอกให้อาสาสมัครเคลื่อนที่แขนไปด้วย สัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อถูกเก็บจำนวน 100 ชุดข้อมูลต่อท่าทาง หลังจากนั้นนำข้อมูลทั้งหมดไปใช้ในการสอนตัวจดจำสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อ โดยแบ่งข้อมูลเป็นสองกลุ่ม เช่นเดียวกับการทดลองที่ 1 เพื่อฝึกสอนและทดสอบประสิทธิภาพในการจำแนกสัญญาณ

4. ผลการทดลอง

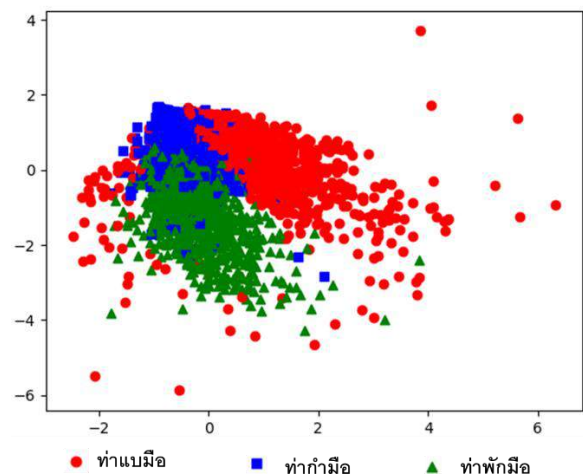
จากการทดลองเก็บสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อเพื่อสร้างโมเดลสำหรับการจำแนกท่าทางมือโดยใช้อุปกรณ์ปลอกแขน MYO และการใช้งานร่วมกันระหว่างอุปกรณ์ปลอกแขน MYO กับถุงมือ 5 DT ด้วยการประเมินสัญญาณผ่านเทคนิคการจำแนกสัญญาณ (ANN, LDA และ SVM) ใช้ 26 ลักษณะเด่นเนื่องจากประสิทธิภาพการประเมินด้วยระยะของกลุ่มข้อมูลใน Feature Space ดีที่สุด ดังแสดงในรูปที่ 13 เมื่อเทียบกับการประเมินด้วยระยะข้อมูลใน Feature Space ของข้อมูลลักษณะเด่นทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 14 โดยการบันทึกสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อกับถุงมือข้อมูล สำหรับเทคนิค ANN ได้รับค่าประสิทธิภาพสูงสุดจากการจำแนกสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้ออยู่ที่ร้อยละ 95.95 และค่าประสิทธิภาพเฉลี่ยร้อยละ 93.53 และการประเมินผลด้วยระยะข้อมูลใน Feature Space มีพื้นที่ซ้อนทับเฉลี่ยอยู่ที่ร้อยละ 16.77 แสดงถึงข้อมูลแต่ละ

กลุ่มทับซ้อนกันเฉลี่ยที่ร้อยละ 16.77 และประสิทธิภาพระยะระหว่างกลุ่มข้อมูลใน Feature Space เฉลี่ยอยู่ที่ 2.38 สำหรับการประเมินระยะข้อมูลต่างกลุ่มในระนาบของ Feature Space อยู่ที่ 2.23

ส่วนการเก็บข้อมูลสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อเพียงอย่างเดียวด้วยเทคนิคการจำแนกสัญญาณแบบ ANN ได้รับค่าประสิทธิภาพการทำงานสูงสุดที่ร้อยละ 97.37 และประสิทธิภาพเฉลี่ยที่ร้อยละ 95.12 นอกจากนี้การประเมินผลด้วยระยะข้อมูลใน Feature Space โดยที่คุณภาพของพื้นที่ซ้อนทับข้อมูลอยู่ที่ร้อยละ 14.38 หมายความว่าข้อมูลแต่ละกลุ่มมีส่วนซ้อนทับกันเฉลี่ยเพียงร้อยละ 14.38 และประสิทธิภาพของระยะภายในกลุ่มข้อมูลเฉลี่ยมีค่า 2.31 และการประเมินระยะของข้อมูลต่างกลุ่มมีค่า 2.21 และการประเมินผลด้วยระยะของข้อมูลใน Feature Space ผลทดลองพบว่า การเก็บข้อมูลสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อพร้อมกับข้อมูลจากถุงมือข้อมูล และการเก็บสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อเพียงอย่างเดียวมีประสิทธิภาพไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังแสดงในตารางที่ 1 และ ตารางที่ 2 หากเปรียบเทียบประสิทธิภาพการจำแนกสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อการเก็บสัญญาณไฟฟ้าแบบใช้ถุงมือและปลดออกแทนให้ประสิทธิภาพไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ยังมีการเทียบความเร็วในการบันทึกข้อมูลแบบที่ใช้ข้อมูลจากถุงมือร่วมกับปลดออกแทนมีระยะเวลาการเก็บข้อมูลเร็วกว่าการเก็บสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อเพียงอย่างเดียวถึง 2.4 เท่า



รูปที่ 13 Scatter Plot ข้อมูลลักษณะเด่นทั้งหมด



รูปที่ 14 Scatter Plot ของข้อมูลลักษณะเด่นที่ผ่านการลดจำนวนแบบ FS

ตารางที่ 1 การประเมินผลด้วยระยะระหว่างข้อมูลใน Feature Space

อุปกรณ์ที่ใช้ในการบันทึกสัญญาณ	การประเมินประสิทธิภาพระยะระหว่างข้อมูลใน Feature Space		
	การซ้อนทับ	ระยะของข้อมูลภายใน	ระยะของข้อมูลต่างกลุ่ม
ปลดออกแทน MYO และถุงมือ 5DT	83.23	2.38	2.23
ปลดออกแทน MYO อย่างเดียว	85.62	2.31	2.21

ตารางที่ 2 ประสิทธิภาพการทำงานของกรจำแนกสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อ

อุปกรณ์ที่ใช้ในการบันทึก	เทคนิคการจำแนก	ประสิทธิภาพสูงสุด	ประสิทธิภาพเฉลี่ย
ปลดออกแทน MYO และถุงมือ 5DT	SVM	94.54	91.63±1.46
	LDA	94.14	91.71±2.89
	ANN	95.95	93.53±1.13
ปลดออกแทน MYO อย่างเดียว	SVM	92.52	90.64±2.07
	LDA	93.53	92.51±1.96
	ANN	97.37	95.12±2.83

5. สรุปผล

การบันทึกข้อมูลจากอุปกรณ์ 2 ชนิด คือ ปลอกแขน MYO และถุงมือข้อมูล 5DT ด้วยการใช้เทคนิคการจำแนกแบบ ANN ให้ประสิทธิภาพสูงสุดที่ร้อยละ 95.95 และมีประสิทธิภาพการทำงานเฉลี่ยที่ร้อยละ 93.53 โดยใช้เวลาในการบันทึกข้อมูลประมาณ 5 นาที และการทดลองบันทึกข้อมูลจากปลอกแขน MYO เพียงอย่างเดียวด้วยเทคนิคการจำแนกสัญญาณ ANN ให้ประสิทธิภาพสูงสุดที่ร้อยละ 97.27 และประสิทธิภาพเฉลี่ยที่ร้อยละ 95.12 โดยใช้เวลาในการบันทึกข้อมูลประมาณ 12 นาที ดังนั้นเมื่อเทียบประสิทธิภาพการจำแนกสัญญาณไฟฟ้ากล้ามเนื้อ โดยที่ข้อมูลต้นแบบจากการบันทึกสัญญาณโดยใช้ปลอกแขน MYO และถุงมือข้อมูล 5DT ให้ประสิทธิภาพที่สูงกว่า แต่หากใช้การประเมินจากระยะห่างระหว่างข้อมูลใน Feature Space ข้อมูลที่ใช้ปลอกแขน MYO เพียงอย่างเดียวจะไม่มีแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้การใช้ถุงมือในการช่วยพัฒนาระบบบันทึกทำให้การบันทึกมีความง่าย ลดความซับซ้อน และลดเวลาการบันทึกสัญญาณได้เร็วขึ้นกว่า 2.4 เท่า

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์และโครงการส่งเสริมการวิจัยในอุดมศึกษาและพัฒนามหาวิทยาลัยวิจัยแห่งชาติของสำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา

7. เอกสารอ้างอิง

- Agamemnon, K., Iris, K., Mustafa, E., Kianoush, N., & Sethu, V. (2019). Improved prosthetic hand control with concurrent use of myoelectric and inertial measurements. *Journal of NeuroEngineering and Rehabilitation*, 14, 71.
- Al-Ani, A., & Deriche, M. (2002). Feature selection using a mutual information based measure. In *Object recognition supported by user interaction for service robots*, 4, 82–85.
- Al-Timemy, A. H., Khushaba, R. N., Bugmann, G., & Escudero, J. (2016). Improving the Performance Against Force Variation of EMG Controlled Multifunctional Upper-Limb Prostheses for Transradial Amputees. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 24(6), 650–661.
- Barrios, L. A. (2010). *Real-time control of a multi-fingered robot hand using EMG signals* [Master's thesis]. San Diego State University. <https://digitallibrary.sdsu.edu/islandora/object/sdsu%3A4720>
- Capa, E., Cotur, Y., Gumus, C., Kaplanoglu, E., & Ozkan, M. (2014). *Comparative EMG classification of index finger* (pp. 1–3). Istanbul, Turkey. <https://doi.org/10.1109/BIYOMUT.2014.7026365>
- Castellini, C., Artemiadis, P., Wininger, M., Ajoudani, A., Alimusaj, M., Bicchi, A., Caputo, B., Craelius, W., Dosen, S., Englehart, K., Farina, D., Gijsberts, A., Godfrey, S. B., Hargrove, L., Ison, M., Kuiken, T., Marković, M., Pilarski, P. M., Rupp, R., & Scheme, E. (2004). Proceedings of the first workshop on Peripheral Machine Interfaces: going beyond traditional surface electromyography. *Frontiers in Neurorobotics*, 8, 22.
- Cortes, C., & Vapnik, V. (1995). Support-vector networks. *Machine Learning*, 20(3), 273–297.
- Data Gloves 5DT. (2018). 5DT. <http://www.5dt.com/data-gloves>
- de Sá, J. P. M. (2012). *Pattern Recognition: Concepts, Methods and Applications*. Springer Science & Business Media.
- Fougner, A., Scheme, E., Chan, A. D. C., Englehart, K., & Staudahl, Ø. (2011). Resolving the Limb Position Effect in Myoelectric Pattern Recognition. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 19(6), 644–651.
- Gautham, M., & Kumar, S. (2011, February). *EMG controlled bionic arm* [Paper presentation]. 2011 National Conference on Innovations in Emerging Technology, Erode, India
- Gu, Y., Yang, D., Huang, Q., Yang W., & Liu, H. (2018). Robust EMG pattern recognition in the presence of confounding factors: Features classifiers and adaptive learning. *Expert Systems with Applications*, 96, 208–217.
- Hakonen, M., Piitulainen, H., & Visala, A. (2015). Current state of digital signal processing in myoelectric interfaces and related applications. *Biomedical Signal Processing & Control*, 18, 334–359.
- Jiang, N., Dosen, S., Muller, K., & Farina, D. (2012). Myoelectric Control of Artificial Limbs amp-Is There a Need to Change Focus?. *IEEE Signal Processing Magazine*, 29(5), 152–150.
- Jianwei, L., Dinghua, Z., Xinjun, S., & Xianyang, Z. (2014). Quantification and solutions of arm movements effect on sEMG pattern recognition. *Biomedical Signal Processing and control. Science Direct*, 13, 189–197.
- Karen, T., Michael, C., Eduardo, R. & Diego, F. (2018). *Stepping-stones to Transhumanism: An EMG-controlled Low-cost Prosthetic Hand for Academia* (pp. 807–812). Funchal, Portugal. <https://doi.org/10.1109/IS.2018.8710489>
- Keinosuke, F. (1990). *Introduction to Statistical Pattern Recognition* (2nd ed.). Academic Press.

- Konig, A. (2000). Dimensionality reduction techniques for multivariate data classification, interactive visualization, and analysis-systematic feature selection vs. extraction. *Fourth International Conference on Knowledge-Based Intelligent Engineering Systems and Allied Technologies. Proceedings*, 1, 44–55.
- Konig, A., Eberhard, M., & Wenzel, R. (1998). A transparent and flexible development environment for rapid design of cognitive systems. *24th EUROMICRO Conference*, 2, 655–662.
- Myo Gesture Control Armband. (2018). *MYO Alpha*. <https://www.myo.com>
- Nguyen, N. T. N. (2018). *Developing A low-cost Myoelectric Prosthetic hand*. Metropolia University of Applied Sciences.
- Oskoei, M. A., & Hu, H. (2007). Myoelectric control systems-A survey. *Biomedical Signal Processing and Control*, 2, 275–294.
- Pan, L., Li, J., Xia, W., Zhang, D., & Dong, L. (2015). An effective method, composed of LAMP and dCAPS, to detect different mutations in fenoxaprop-P-ethyl-resistant American sloughgrass (*Beckmannia syzigachne* Steud.) populations. *Pesticide Biochemistry and Physiology*, 117, 1–8.
- Phinyomark, A., Phukpattaranont, P., & Limsakul, C. (2012). Feature reduction and selection for EMG signal classification. *Expert Systems with Applications*, 39(8), 7420–7431.
- Raez, M. B. I., Hussain, M. S., & F. Mohd-Yasin. (2006). Techniques of EMG signal analysis: detection. *Biological Procedures Online*, 8, 11–35.
- Roberto, A., Jose, M.S., & Rosa, M.V. (2010). Edited Nearest Neighbor Rule for Improving Neural Networks Classifications. *Advance in neural networks*, 6063, 303-310.
- Stango, A., Negro, F., & Farina, D. (2015). Spatial Correlation of High Density EMG Signals Provides Features Robust to Electrode Number and Shift in Pattern Recognition for Myocontrol. *IEEE Transactions on Neural Systems and Rehabilitation Engineering*, 23(2), 189–198.
- Steven, W. S. (2003). *The Scientist and Engineer's Guide to Digital Signal Processing's Table of Content*. California Technical Publishing.
- Tipping, M. E., & Bishop, C. M. (1999). Mixtures of Probabilistic Principal Component Analysers. *Neural computation*, 11(2), 443-482.
- Wright, T. W., Hagen, A. D., & Wood, M. B. (1995). Prosthetic usage in major upper extremity amputations. *Journal of Hand Surgery*, 20(4), 619–622.

- Young, A. J., Hargrove, L. J., & Kuiken, T. A. (2012). Improving Myoelectric Pattern Recognition Robustness to Electrode Shift by Changing Interelectrode Distance and Electrode Configuration. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 59(3), 645–652.
- Zhang, D., Xiong, A., Zhao, X., & Han, J. (2012). *PCA and LDA for EMG-based control of bionic mechanical hand* (pp. 960-965). Shenyang, China. <https://doi.org/10.1109/ICInfA.2012.6246955>

8. ประวัติผู้เขียน



เมธาวัฒน์ คุณาพิพัฒน์ ได้วุฒิทางการศึกษาระดับปริญญาตรี (B.Eng) ในสาขาวิศวกรรมเมคาทรอนิกส์ จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ได้ดำเนินงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ EMG signal measurement and analysis, EMG signal processing, และ Machine Learning.



กิตติคุณ ทองพูล ได้วุฒิทางการศึกษาระดับปริญญาตรี (B.Eng) ในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ในปี พ.ศ. 2551 และปริญญาโท (M. Eng) ในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ในปี พ.ศ. 2553 จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ และสำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาเอก (Dr.-Ing) ในสาขาวิชา Electrical engineering จากมหาวิทยาลัย Technische Universitat Kaiserslautern ประเทศเยอรมนี ดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2553 เป็นต้นมา และมำงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ Bio-medical Instrumentation, Multi-Sensor Fusion และ Machine Learning.



ปรมินทร์ เนรนันท์ ได้วุฒิทางการศึกษาระดับปริญญาตรี (B.Eng) ในสาขาวิศวกรรมเมคาทรอนิกส์ ในปี พ.ศ. 2546 และปริญญาโท (M. Eng) ในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ในปี พ.ศ. 2549 จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ หลังจากนั้นในปี พ.ศ. 2558 ได้สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาเอก (Ph.D.) ในสาขาวิชา Mechanical and systems engineering จากมหาวิทยาลัยนิวคาสเซิล (Newcastle University) ประเทศสหราชอาณาจักร (United Kingdom) ได้เป็นอาจารย์ประจำภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล สาขาวิศวกรรมเมคาทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2549 เป็นต้นมา และมำงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ Human-robot interaction, Robotic position-based force control, Mechatronic system and robotics.



พรชัย พงกัษัทรานต์ ได้วุฒิทางการศึกษาระดับปริญญาตรี (B.Eng) และปริญญาโท (M. Eng) ในสาขาวิศวกรรมไฟฟ้า ในปี พ.ศ. 2536 และ พ.ศ. 2540 ตามลำดับ จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ หลังจากนั้นในปี พ.ศ. 2547 ได้สำเร็จการศึกษาในระดับปริญญาเอก (Ph.D.) ในสาขาวิชา Electrical and Computer Engineering จากมหาวิทยาลัยมินเนโซตา (University of Minnesota) ประเทศสหรัฐอเมริกา (USA) ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ ประจำภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย สงขลานครินทร์ งานวิจัยที่สนใจ ได้แก่ การวิเคราะห์สัญญาณและภาพเพื่อการประยุกต์ใช้ในการแพทย์

การประยุกต์วิธีคิดเชิงออกแบบบริการร่วมกับวิธีการศึกษางานเพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิต
ระดับวิสาหกิจชุมชน กรณีศึกษา กระบวนการผลิตขนมธัญพืชอัดแท่ง
The Application of Service Design Thinking and Work Study in Process
Improvement of Community Enterprise Manufacture: A Case Study of Granola Bar
Production Process

บัญชา อริยะจรรยา, วรตธา อุทยานรัตน์*
Bancha Ariyajunya, Waratta Authayarat*

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา 169 ถ. หนองบางแสน ต.แสนสุข อ. เมือง จ. ชลบุรี 20131 ประเทศไทย
Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University 169 Long-Hard Bangsaen,
Sansook, Muang, Chon Buri, 20131 Thailand

*Corresponding author e-mail: waratta@eng.buu.ac.th

(Received: 10 May 2020, Revised: 23 November 2020, Accepted: 17 December 2020)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการนำเสนอการประยุกต์วิธีคิดเชิงออกแบบบริการร่วมกับวิธีการศึกษางานในการปรับปรุงกระบวนการผลิตขนมธัญพืชอัดแท่งในวิสาหกิจชุมชนแห่งหนึ่ง โดยงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงการประยุกต์หลักการและกระบวนการออกแบบตามแนวคิดของวิธีคิดเชิงออกแบบที่เกิดขึ้นทั้ง 4 ขั้นตอนคือ การค้นคว้าและสำรวจโดยการรวบรวมข้อมูล การทำความเข้าใจกลุ่มเป้าหมายหรือผู้ที่เกี่ยวข้อง (Discover) การกำหนดกรอบของปัญหา (Define) การนำเสนอแนวทางที่สร้างสรรค์ (Develop) และการทดสอบวิธีการต้นแบบหรือผลิตภัณฑ์ต้นแบบ (Deliver) ผลลัพธ์ของงานวิจัยนี้ สามารถลดเวลาการผลิตขนมธัญพืชอัดแท่งจากเดิม 1.83 นาทีต่อชิ้น เหลือ 1.22 นาทีต่อชิ้น คิดเป็นเวลาที่ใช้ในการผลิตลดลง 33.42% ลดของเสียลงได้ประมาณ 4% และผู้ใช้มีทัศนคติต่ออุปกรณ์และวิธีการทำงานใหม่ในด้านความพึงพอใจ ความสะดวก และความปลอดภัยในการทำงานเพิ่มขึ้นจาก 40.47% เป็น 95.24% นอกจากนั้นยังนำเสนอข้อคิดที่สำคัญในการนำวิธีคิดเชิงออกแบบไปประยุกต์ใช้กระบวนการผลิตอีกด้วย

คำสำคัญ: วิธีคิดเชิงออกแบบ, การออกแบบบริการ, การปรับปรุงกระบวนการผลิต, การเพิ่มผลผลิต

Abstract

The research has its aim to illustrate how to effectively improve granola bar production process by implementing of Service Design Thinking and Work Study. The research has been conducted at one of the community enterprises in Thailand. The Service Design Thinking principle and processes have been applied starting from Discover, Define, Develop, and Deliver respectively. The result revealed that the integration of Service Design Thinking and Work Study has reduced granola bar production time from 1.83 minutes per piece to 1.22 minutes per piece, which contributed to 33.42% of production time reduction. Not only the Service Design Thinking and Work Study helped reducing the production time, but it was also decreasing the waste approximately to 4% . In addition to that the study investigated the attitudes of users towards the new work process and tool. It is evident that attitudes in terms of satisfaction, convenience, and safety have been significantly increased from 40.47% to 95.24%. The implications for practice from conducting this research were also thoughtfully provided.

Keywords: Service Design Thinking, Service Design, Production Improvement, Productivity Improvement

1. บทนำ

วิสาหกิจชุมชนกรณีศึกษาเป็นวิสาหกิจชุมชนที่ตั้งอยู่ในเขตตำบลแห่งหนึ่งของจังหวัดระยอง ซึ่งมีพื้นที่นาข้าวผืนสุดท้ายในเขตชุมชนเป็นแหล่งผลิตทรัพยากรข้าวไรซ์เบอร์รี่และมีผลิตภัณฑ์แปรรูปอื่น ๆ ที่เน้นการใช้ข้าวไรซ์เบอร์รี่เป็นวัตถุดิบหลักในการผลิต

ในเบื้องต้น จากการสัมภาษณ์สมาชิกในวิสาหกิจชุมชนกรณีศึกษา จำนวน 4 คน และเก็บข้อมูลเชิงคุณภาพพบว่าวิสาหกิจชุมชนกรณีศึกษาแห่งนี้มีปัญหาและอุปสรรคในการทำงานคือ 1) สมาชิกที่มีทักษะที่จำเป็นต่อกระบวนการผลิตมีจำนวนไม่เพียงพอ ปัจจุบันมีจำนวนเพียง 1 คนเท่านั้นเนื่องจากสถานประกอบการมีลักษณะการดำเนินงานแบบวิสาหกิจชุมชนที่เน้นการเข้าร่วมทำงานของสมาชิกตามเวลาที่สะดวก ทำให้บางครั้งเกิดการรอคอยของหน่วยการผลิตถัดไป (ลูกค้าภายใน) ส่งผลกระทบทำให้ผลผลิตไม่ได้ตามเป้าหมาย 2) วิธีการทำงานในปัจจุบันมีความเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุระหว่างการทำงานในขั้นตอนการหั่นเป็นชิ้นด้วยมีด และ 3) ของเสียที่เกิดจากการหั่นปรับแต่งชิ้นขนมเนื่องจากอุปกรณ์ช่วยในการทำงานเดิมมีลักษณะไม่เหมาะสมและของเสียจากการหั่นที่ไม่ได้ขนาดตามกำหนด รวมประมาณ 4% โดยน้ำหนัก

โดยการทำงานของวิสาหกิจชุมชนแห่งนี้ให้ความสำคัญกับวัฒนธรรมของการทำงานร่วมกัน การเคารพซึ่งกันและกัน และส่งเสริมการทำงานให้มีความสุขอย่างยั่งยืน มีความคล้อยคลึงกับหลักการสำคัญของวิธีคิดเชิงออกแบบ (Service Design Thinking Principles) ที่มุ่งเน้นที่การทำงานร่วมกัน การให้ความสำคัญกับความต้องการของผู้คนเป็นหลัก การให้ความสำคัญกับการลงมือทดลอง และการพิจารณาทุกส่วนที่เกี่ยวข้องแบบองค์รวม ซึ่งการใช้วิธีคิดเชิงออกแบบบริการเริ่มถูกนำมาช่วยในการปรับปรุงการทำงานและพัฒนาองค์กรต่าง ๆ ทั้งในด้านการพัฒนาผลิตภัณฑ์นวัตกรรม (Stickdorn & Schneider, 2011) การพัฒนาระบบบริการ (Enninga et al., 2013) และการวางแผนกลยุทธ์ (Stickdorn et al., 2018) ซึ่งวิธีการนี้เป็นที่นิยมในต่างประเทศในช่วงหนึ่งทศวรรษที่ผ่านมาในประเทศไทยแม้จะปรากฏว่าเริ่มมีการนำวิธีการนี้มาประยุกต์ใช้ในระบบบริการบ้าง (Jiamsanguanwong et al., 2020) สำหรับการประยุกต์ใช้ในระบบการผลิตมีปรากฏใช้เพื่อปรับปรุงความพึงพอใจของลูกค้าภายในซึ่งเป็นการปรับปรุงประสบการณ์ของกลุ่มผู้มีส่วนได้ส่วนเสียที่มีต่อกระบวนการผลิต (Jansong & Authayarat, 2017) แต่ยังไม่พบวรรณกรรมเชิงวิชาการเหล่านี้มากนัก

ดังนั้นในการดำเนินงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์คือ การประยุกต์วิธีคิดเชิงออกแบบบริการร่วมกับวิธีการศึกษาการทำงานในการปรับปรุงกระบวนการผลิต กรณีศึกษากระบวนการผลิตขนมธัญพืชอัดแท่ง ในขั้นตอนการหั่นขนมที่มุ่งเน้นการลดการใช้ทักษะเฉพาะ การลดเวลาในการผลิต การลดของเสีย เพื่อเพิ่มกำลังการผลิตให้สูงขึ้น และช่วยลดโอกาสของการเกิดอุบัติเหตุในระหว่างกระบวนการผลิตในขั้นตอนดังกล่าว

2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

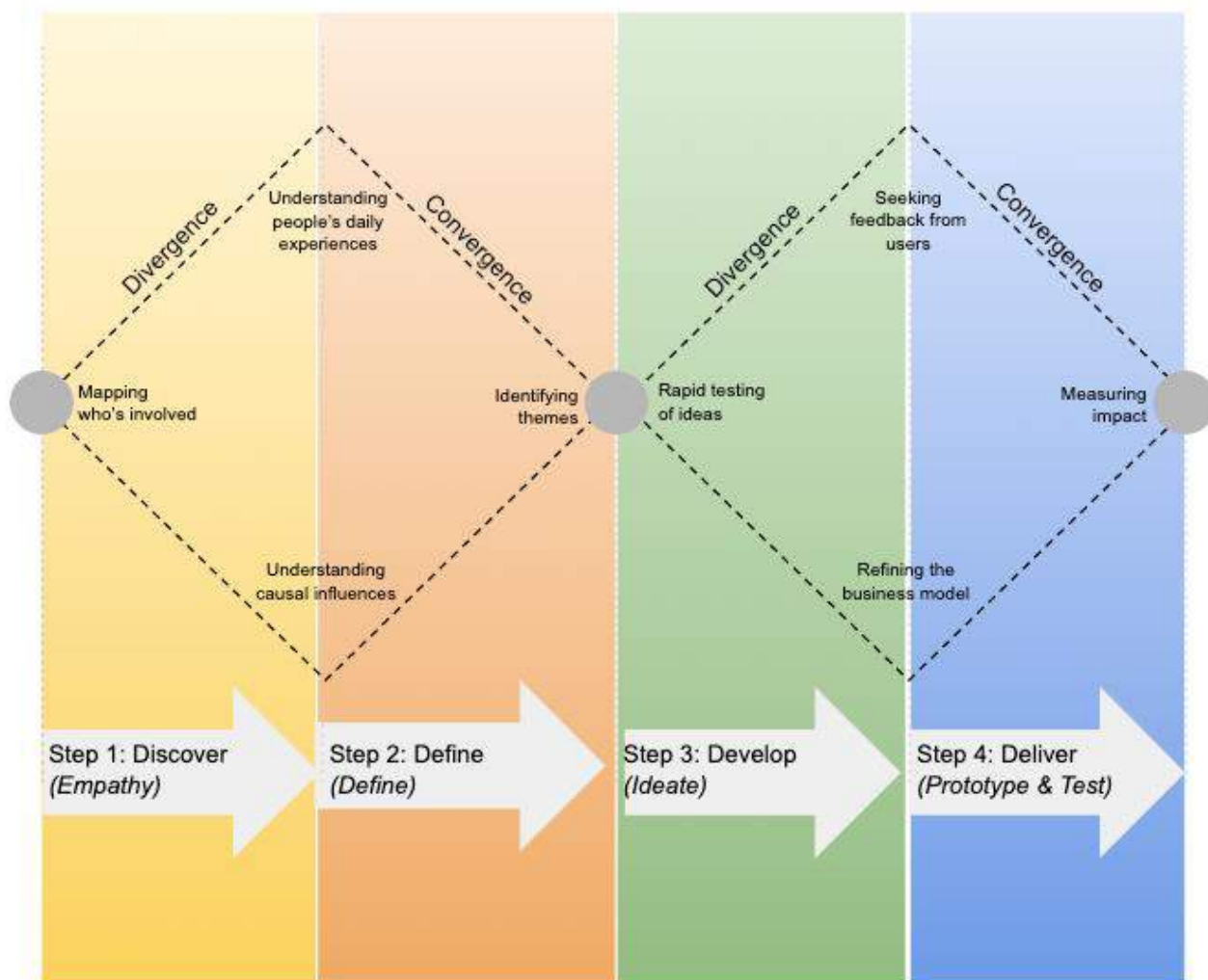
2.1 วิธีคิดการออกแบบบริการ (Service Design Thinking)

แนวคิดการออกแบบบริการได้ถูกกล่าวถึงครั้งแรกในปี 1982 ว่าระบบบริการสามารถถูกออกแบบได้ (Shostack, 1982) โดยคำว่าระบบบริการนั้น ไม่ได้หมายถึงเฉพาะระบบของการบริการเท่านั้น หากแต่ยังรวมถึงการพัฒนาสร้างสรรค์และปรับปรุงนวัตกรรม การออกแบบพัฒนาผลิตภัณฑ์และการออกแบบประสบการณ์ของผู้คนอีกด้วย (Thailand Creative & Design Center, 2014) ผู้ก่อตั้ง Live|work ได้ให้คำนิยามการออกแบบบริการหมายถึงการประยุกต์ใช้กระบวนการออกแบบและทักษะของนักออกแบบในการพัฒนาและปรับปรุงระบบบริการ โดยการพัฒนาและปรับปรุงนี้จะอยู่บนพื้นฐานของการปรับปรุงระบบบริการที่มีอยู่เดิมและสร้างสรรค์นวัตกรรมให้เกิดขึ้นกับระบบบริการใหม่ซึ่งถูกอ้างอิงใน Stickdorn and Schneider (2011) โดยการมีกระบวนการ มีเครื่องมือ มีเทคโนโลยีและมีสภาพแวดล้อมที่สนับสนุน และส่งเสริมให้ระบบบริการนั้น ๆ ทำหน้าที่ได้โดยสมบูรณ์ (Brown, 2009) และคำนึงถึงความต้องการและผลประโยชน์ของกลุ่มผู้มีส่วนได้ส่วนเสียทุกกลุ่ม (Stickdorn & Schneider, 2011) ดังนั้นคำว่าระบบบริการในที่นี้สามารถหมายถึงระบบนิเวศน์ใด ๆ เช่นระบบของงานบริการ ระบบของการผลิต ระบบขององค์กร เป็นต้น

หลักการพื้นฐานที่สำคัญของการออกแบบบริการ (Service Design Thinking Principles) ประกอบด้วย 6 หลักการด้วยกันคือ (1) การให้มนุษย์เป็นศูนย์กลาง (Human-centered): มุ่งเน้นที่ประสบการณ์ทางความรู้สึกของผู้คนที่มีส่วนได้ส่วนเสียกับระบบบริการ (2) การทำงานร่วมกัน (Collaborative): มุ่งเน้นที่การร่วมมือกันระหว่างกลุ่มผู้มีส่วนได้ส่วนเสียต่าง ๆ และระหว่างทีมงานที่มีทักษะหลากหลาย (3) การทบทวนผลลัพธ์ (Iterative): มุ่งเน้นที่การทดลองและการทบทวนปรับเปลี่ยน เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด โดยคำนึงถึงการ

บรรลุปเป้าหมายตามหลักการสำคัญทั้ง 6 หลักการ (4) การลำดับประสาน (Sequential): มุ่งเน้นที่การเชื่อมโยงของกิจกรรมต่าง ๆ ในระบบบริการให้มีความสอดคล้อง สร้างจังหวะ

และท่วงทำนอง ที่จะส่งผลกระทบทางบวกต่อประสบการณ์ของผู้คน (5) ความสมจริง (Real): มุ่งเน้นการค้นหาความต้องการของผู้คน การสร้างไอเดีย การสร้างตัวตนแบบและการสร้าง



รูปที่ 1 กระบวนการของวิธีคิดออกแบบบริการ ดัดแปลงจาก Brown (2009) และ Ball (2019)

หลักฐานของระบบบริการบนพื้นฐานของความสมจริง และ (6) การพิจารณาแบบองค์รวม (Holistic): มุ่งเน้นให้ออกแบบระบบบริการจากมุมมองแบบองค์รวมที่ช่วยให้สามารถระบุความต้องการของทุกกลุ่มผู้มีส่วนได้ส่วนเสียอย่างยั่งยืน (Stickdorn et al., 2018)

กระบวนการออกแบบในแนวคิดของการออกแบบบริการนั้น มีการนำเสนอที่หลากหลายกันไป ล้วนแต่อยู่บนแนวคิดเดียวกันทั้งสิ้นเช่น Exploration - Creation - Reflection - Implementation (Stickdorn & Schneider, 2011), Discover - Define - Develop - Deliver (Stickdorn et al., 2018), Empathy - Define - Ideate - Prototype - Test (Institute of Design at Stanford, 2009) เป็นต้น รูปที่ 1. อธิบายกระบวนการออกแบบบริการตามกระบวนการที่เสนอ

โดย (Stickdorn & Schneider, 2011) เริ่มต้นด้วย ขั้นที่ 1 การค้นคว้าและสำรวจโดยการรวบรวมข้อมูล การทำความเข้าใจกลุ่มเป้าหมายหรือผู้ที่เกี่ยวข้อง (Discover) ซึ่งการทำความเข้าใจกลุ่มเป้าหมายนี้ มักกระทำบนพื้นฐานของความเห็นอกเห็นใจ (Empathy) เมื่อได้ทำการเข้าใจกลุ่มเป้าหมายแล้วจึงเข้าสู่ ขั้นที่ 2 การกำหนดกรอบของปัญหา (Define) ซึ่งการกำหนดกรอบของปัญหานั้นคือ การกำหนดหัวข้อ วัตถุประสงค์หรือเป้าหมาย เพื่อที่จะสามารถเสาะหาข้อมูลเชิงลึก (Insight) ที่จำเป็นต่อไป เมื่อมีการกำหนดกรอบของปัญหาเรียบร้อยแล้ว กระบวนการถัดไปคือ ขั้นที่ 3 การนำเสนอแนวทางที่สร้างสรรค์ (Develop) โดยการลงมืออย่างรวดเร็วโดยไม่กังวลกับความผิดพลาด และการประเมินแนวทางที่สร้างสรรค์เหล่านั้นผ่านขั้นที่ 4 คือ การทดสอบวิธีการต้นแบบหรือผลิตภัณฑ์ต้นแบบ

(Deliver) ที่รวมถึงการรับฟังข้อเสนอแนะจากกลุ่มเป้าหมาย โดยบางครั้งจะพบการเรียกชื่อขั้นตอนนี้ที่หลากหลายกันไป เช่น การใช้คำว่า กระบวนการสร้างต้นแบบ (Prototyping) คู่กับการทดสอบ (Testing) ชื่อของขั้นตอนในกระบวนการที่ปรากฏในวงเล็บในรูปที่ 1. เป็นชื่อที่ใช้ในกระบวนการตามแนวคิดของ D.School (Institute of Design at Stanford, 2009)

วิธีการคิดในการออกแบบบริการนั้น ใช้วิธีการคิดเพื่อแก้ไขปัญหาอย่างสร้างสรรค์ ซึ่งแบ่งเป็นการคิด 2 ประเภท คือการคิดแบบเนกนัยหรือการคิดหลากหลาย (Divergent Thinking) ที่พยายามคิดสร้างสรรค์เพื่อให้มีคำตอบที่หลากหลาย เน้นการคิดที่ให้คำตอบจำนวนมาก โดยไม่มีเงื่อนไขหรือข้อจำกัดใด ๆ และการคิดแบบเอกนัยหรือการคิดเชิงวิเคราะห์ (Convergent Thinking) เป็นวิธีการคิดเพื่อคัดเลือกแนวทางในการตัดสินใจเพื่อแก้ไขปัญหา (Brown, 2009; Kalbach, 2016)

2.2 การศึกษางาน (Work Study)

การศึกษางาน (Work Study) เป็นเครื่องมือในการวิเคราะห์ขั้นตอนของการปฏิบัติงานเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการทำงานและวัดมาตรฐานเวลาการปฏิบัติงาน (Kanjapanyakom, 2009) การศึกษางานมีขั้นตอนอย่างเป็นระบบ ทำให้ไม่มองข้ามองค์ประกอบของงานย่อยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการทำงาน อีกทั้งยังเป็นวิธีการที่ทำให้ได้ข้อมูลพื้นฐานที่เป็นประโยชน์ต่อการบริหารและวางแผนการปฏิบัติการต่าง ๆ การศึกษางานจึงถูกใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการปรับปรุงวิธีการทำงานทั้งในอุตสาหกรรมการผลิตและการบริการ (Pongchairerks, 2013) โดยทั่วไปการศึกษางานจะประกอบด้วย 2 ส่วน ได้แก่ การวัดงานเพื่อกำหนดมาตรฐานเวลา มาตรฐานการผลิต และการศึกษาวิธีการซึ่งจะเกี่ยวกับการวิเคราะห์ขั้นตอนงานเพื่อการปรับปรุงวิธีการทำงาน

การวัดงานด้วยการศึกษาเวลาโดยตรง เป็นเทคนิคที่นิยมใช้ในการวัดมาตรฐานเวลาทำงาน โดยขั้นตอนงานที่ศึกษาจะถูกแบ่งออกเป็นองค์ประกอบงานย่อย จากนั้นจับเวลาด้วยนาฬิกาในแต่ละงานย่อยตามจำนวนครั้งที่เหมาะสม และปรับค่าเวลาที่ได้ด้วยการประเมินอัตราความเร็วและค่าเผื่อเวลาในการทำงาน เพื่อให้ได้เวลามาตรฐานสำหรับขั้นตอนการปฏิบัติงาน

การศึกษาวิธีการ เพื่อปรับปรุงวิธีการทำงานนั้นจะวิเคราะห์รายละเอียดขององค์ประกอบงานเหล่านั้น และทำการค้นหาแนวทางปรับปรุงวิธีการทำงานนั้น ๆ อย่างเป็นระบบ ด้วยหลักการ ECRS คือ การกำจัดองค์ประกอบงานที่ไม่จำเป็น (Eliminate) การรวมหลาย ๆ องค์ประกอบงานให้ทำได้ใน

สถานที่เดียวกันหรือทำไปพร้อม ๆ กัน (Combine) การจัดเรียงลำดับองค์ประกอบงานใหม่ ให้การไหลของงานราบรื่นขึ้น (Rearrange) และการหาแนวทางทำให้องค์ประกอบงานทำได้ง่ายกว่าเดิม (Simplify) ดังนั้นเราสามารถทำองค์ประกอบงานนั้น ๆ ได้อย่างมีประสิทธิภาพ เร็วขึ้น และง่ายขึ้น นอกจากนี้การศึกษางานยังสามารถนำมาใช้ในการออกแบบวิธีการทำงานหรือกระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์ใหม่หรือการให้บริการใหม่ ซึ่งยังไม่เคยมีการผลิตหรือให้บริการจริงมาก่อน (Kanjapanyakom, 2009; Pongchairerks, 2013)

2.3 พิมพ์เขียวบริการ (Service Blueprint)

พิมพ์เขียวบริการ (Service Blueprint) เป็นเครื่องมือสำหรับการออกแบบระบบบริการ (Stickdorn & Schneider, 2011; Kalbach, 2016) หรือเป็นเครื่องมือที่ใช้นำเสนอกระบวนการบริการของแต่ละระบบบริการ (Shostack, 1984) เกิดจากการประยุกต์แนวคิดของการแสดงบนเวทีที่มีกิจกรรมที่แสดงต่อหน้าผู้ชมโดยตรง (Frontstage) และกิจกรรมที่ทำอยู่ในฉากหลังซึ่งผู้ชมไม่สามารถมองเห็นได้ (Backstage) มาแสดงกระบวนการผลิตในระบบบริการ มีการเรียกเส้นที่แบ่งกิจกรรมที่ผู้ชมมองเห็นและที่ผู้ชมมองไม่เห็นว่าเป็นเส้นของการมองเห็นได้ (Line of Visibility) กล่าวคือ การให้บริการในระบบบริการจะมีทั้งส่วนที่ลูกค้าสามารถมองเห็นหรือรับรู้ได้ (การแสดงบนเวที) และในส่วนที่ลูกค้าไม่สามารถรับรู้ได้คือกิจกรรมสนับสนุนการแสดงต่าง ๆ ที่อยู่เบื้องหลังฉาก (Stickdorn et al., 2018) ในส่วนของฉากหลังประกอบไปด้วยส่วนสนับสนุนต่าง ๆ แม้ลูกค้าจะมองไม่เห็นแต่ก็เป็นกลไกสำคัญของการบริการ สำหรับกิจกรรมต่าง ๆ ที่ลูกค้าและตัวแทนของระบบบริการที่ส่วนหน้า (Frontstage) มีปฏิสัมพันธ์กันนั้น มีเส้นบาง ๆ เชื่อมโยงระหว่างกันอยู่ เรียกว่า เส้นของการมีปฏิสัมพันธ์ (Line of Interaction) ดังแสดงในรูปที่ 2 การสร้างพิมพ์เขียวบริการจะช่วยให้ผู้ประกอบการสามารถเข้าใจความสัมพันธ์ของกิจกรรมต่าง ๆ และเข้าใจประสบการณ์ทางความรู้สึกของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียทุกกลุ่มที่เกี่ยวข้องกับระบบบริการของตนเอง ซึ่งความเข้าใจในมุมมองทั้งหมดนี้จะช่วยให้สามารถมองเห็นประเด็นปัญหาหรือประเด็นที่สามารถพัฒนาและปรับปรุงได้ พร้อมทั้งสามารถระบุผู้เกี่ยวข้องได้อย่างชัดเจน (Shostack, 1984)

หากพิจารณาจากระบบการผลิต การสร้างพิมพ์เขียวบริการเปรียบเสมือนการพัฒนาแผนผังของกระบวนการผลิตที่จะช่วยให้ทุกฝ่ายที่เกี่ยวข้องสามารถเข้าใจระบบการให้บริการของตนเอง เข้าใจผลกระทบทั้งทางบวกและลบของกิจกรรมของตนเองที่มีต่อกิจกรรมอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องในแผนผังนี้ และสามารถเข้าใจประสบการณ์ของลูกค้าทั้งลูกค้าภายในและลูกค้า

ภายนอกตั้งแต่ต้นจนจบกระบวนการที่เป็นส่วนสำคัญของการเติบโตและการเป็นที่ได้เปรียบในการดำเนินธุรกิจขององค์กร (Kalbach, 2016) นอกจากนั้นยังสามารถมองเห็นความเชื่อมโยงระหว่างแผนกต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องภายในและภายนอกขององค์กรทั้งหมดด้วย (Stickdorn & Schneider, 2011)

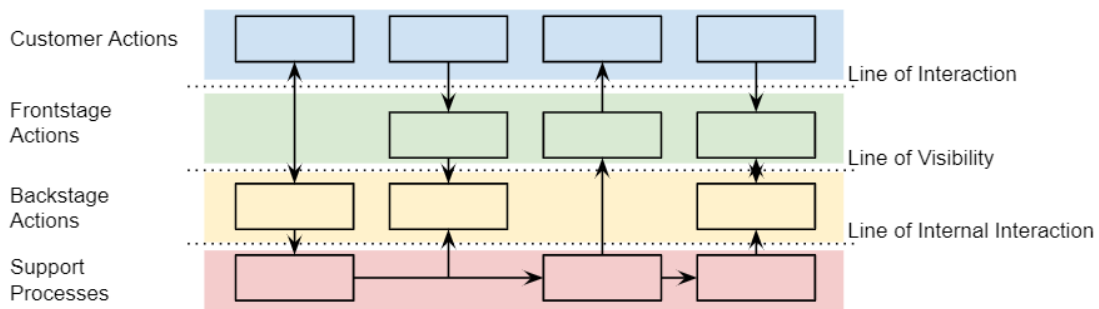
2.4 การสังเคราะห์ข้อมูลและการตีความหมายซ่อนเร้น

การทำความเข้าใจผู้ใช้มีความสำคัญต่อการปรับปรุงกระบวนการให้บริการเป็นอย่างมาก Brown (2009) ได้กล่าวเอาไว้ว่า การตีความหมายซ่อนเร้นของข้อมูลที่สำคัญที่สุดที่จะช่วยแก้ไขปัญหาหรือกำหนดกรอบของปัญหา ซึ่งในทางปฏิบัติก็คือการมุ่งให้ความสำคัญไปที่ความจำเป็นของผู้ใช้ก่อนและเปลี่ยนความจำเป็นนั้นให้เป็นความต้องการ โดยการเรียนรู้จากผู้ใช้ผ่านการดำรงชีวิตประจำวันของพวกเขา ผ่านการสังเกตสิ่งที่ผู้คนลงมือทำ ผ่านการฟังสิ่งที่ลูกค้าพูด หรือผ่านการทดลองเป็นลูกค้าเสียเอง (Brown, 2009) ตัวอย่างเช่นการติดกระดิ่งเอาไว้ที่บานประตูเพื่อให้เจ้าของร้านทราบว่าลูกค้าเข้าออก

ร้านค้าของตน ซึ่งก็เป็นที่มาของการพัฒนาการใช้อุปกรณ์ส่งเสียงอัตโนมัติหรือการพัฒนากล่องวงจรปิด หรือการพัฒนาฟิกเจอร์ในกระบวนการตัดไม้เพื่อตัดให้ได้ตามขนาดทุกครั้ง ก็เป็นส่วนหนึ่งของการทำความเข้าใจผู้ใช้ (ผู้ที่ทำงาน) นั่นเอง ดังนั้นการให้ความสำคัญกับผู้ใช้ผ่านการฝึกสังเกตและฝึกตีความหมายซ่อนเร้นจากคำพูดหรือจากการกระทำเหล่านี้ จะช่วยให้นักออกแบบสามารถกำหนดปัญหาและช่วยแก้ไขปัญหาลงมือได้

3. วิธีในการประยุกต์ใช้

ในการออกแบบวิธีการทดลองของงานวิจัยนี้ เน้นการดำเนินการตามกระบวนการของวิธีคิดการออกแบบบริการที่ประกอบไปด้วย 4 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ ขั้นตอนการค้นคว้าและการสำรวจ (Discover) การกำหนดกรอบของปัญหา (Define) การนำเสนอแนวทางที่สร้างสรรค์ (Develop) และการทดสอบวิธีการต้นแบบ (Deliver) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 2 ตัวอย่างของพิมพ์เขียวบริการที่แสดงถึงส่วนฉากหน้า ฉากหลัง เส้นของการมีปฏิสัมพันธ์ เส้นของการมองเห็นได้ และเส้นของการมีปฏิสัมพันธ์ภายใน

3.1 การค้นคว้าและสำรวจโดยการรวบรวมข้อมูล การทำความเข้าใจกลุ่มเป้าหมายหรือผู้ที่เกี่ยวข้อง (Discover)

ในขั้นตอนนี้ประกอบไปด้วยการสังเกตกระบวนการทำงาน การสัมภาษณ์เชิงลึกกับผู้ที่เกี่ยวข้อง การพัฒนาพิมพ์เขียวบริการเพื่อเข้าใจกลุ่มผู้มีส่วนได้ส่วนเสีย และเข้าใจภาพรวมของระบบบริการทั้งหมด

3.1.1 การสังเกตกระบวนการทำงาน

ขั้นตอนนี้คณะผู้วิจัยได้ประสานกับวิสาหกิจชุมชนกรณีศึกษาล่วงหน้า ขอให้วิสาหกิจชุมชนระบุวันและช่วงเวลาที่เหมาะสม เพื่อเข้าสังเกต และบันทึกข้อมูลต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องเกี่ยวกับรายละเอียดของบุคคล สถานการณ์ กระบวนการ ปัญหา และอุปสรรคของการดำเนินงานทั้งในด้านการผลิตและการให้บริการ

3.1.2 การสัมภาษณ์เชิงลึก

ในขั้นตอนของการสัมภาษณ์เชิงลึกด้วยเครื่องมือ Contextual Interview กับ สมาชิกในวิสาหกิจชุมชนกรณีศึกษา ได้ทำการสัมภาษณ์ประเด็นที่เป็นอุปสรรคของการทำงานและความต้องการของสมาชิก สถานที่ที่ดำเนินการสัมภาษณ์ก็คือห้องผลิตขนม การใช้สถานที่จริงในการสัมภาษณ์ก็เพื่อให้ลักษณะทางกายภาพช่วยให้ผู้ถูกสัมภาษณ์สามารถระลึกเรื่องราวและประสบการณ์ต่าง ๆ ได้โดยง่าย (Stickdorn & Schneider, 2011)

3.1.3 ขั้นตอนการทำความเข้าใจในระบบบริการ

ขั้นตอนนี้ใช้เครื่องมือพิมพ์เขียวบริการ (Service Blueprint) ในการทำความเข้าใจกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับระบบ

บริการทั้งหมด ตั้งแต่กิจกรรมของลูกค้าภายนอก (Customer Action) กิจกรรมของวิสาหกิจชุมชนทั้งฉากหน้า (Frontstage) และฉากหลัง (Backstage) และกิจกรรมจากส่วนสนับสนุน (Support Process)

3.2 การกำหนดกรอบของปัญหา (Define)

ในขั้นตอนของการกำหนดกรอบของปัญหา จะเป็นการศึกษาข้อมูลเชิงลึกของกระบวนการผลิตขนมโดยการวิเคราะห์ขั้นตอนของการทำงานโดยใช้เครื่องมือการศึกษางาน (Work Study) เริ่มจากนำขั้นตอนของกระบวนการผลิตที่ได้สังเกตในเบื้องต้นจาก 3.1.1 และพิจารณาแบ่งขั้นตอนเป็นองค์ประกอบงานย่อย ทำการจับเวลา วัดระยะทาง ประเมินอัตราการการทำงาน เวลาเพื่อ กำหนดเวลามาตรฐานการทำงาน และสร้างแผนภูมิกระบวนการไหลของการผลิตขนมธัญพืชอัดแท่ง เพื่อใช้ในการกำหนดขอบเขตของปัญหาและการกำหนดวัตถุประสงค์ของการศึกษา

3.3 การนำเสนอแนวทางที่สร้างสรรค์ (Develop)

ในขั้นตอนของการนำเสนอแนวทางที่สร้างสรรค์ (Develop) เริ่มต้นที่การนำข้อมูลจากการสัมภาษณ์เชิงลึกมาสังเคราะห์และพยายามตีความหมายซ่อนเร้นให้กลายเป็นความต้องการที่แท้จริง ข้อมูลส่วนนี้จะถูกนำไปแปลงเป็นความต้องการที่แท้จริง และนำข้อมูลเหล่านี้ไปเป็นข้อมูลนำเข้าของการนำเสนอแนวคิดของการออกแบบร่วมกันโดยใช้การระดมสมองระหว่างกลุ่มผู้มีส่วนได้ส่วนเสียที่เกี่ยวข้อง

การระดมสมองในลักษณะนี้เป็นการคิดแบบเนกนัยหรือการคิดหลากหลาย (Divergent Thinking) ที่พยายามคิดสร้างสรรค์เพื่อหาคำตอบที่หลากหลาย โดยไม่มีเงื่อนไขหรือข้อจำกัดใด ๆ ซึ่งผู้เข้าร่วมระดมสมองคือกลุ่มสมาชิกของวิสาหกิจชุมชน และคณะผู้วิจัย โดยสมาชิกของวิสาหกิจชุมชนที่เข้าร่วมกิจกรรมการออกแบบแนวคิดนี้ประกอบด้วยผู้ที่มีประสบการณ์การทำงานมากกว่า 2 ปี จำนวน 2 คน และ ผู้ที่มีประสบการณ์การทำงานน้อยกว่า 1 ปี จำนวน 2 คน และกลุ่มนักวิจัยจำนวน 3 คน รวมทั้งสิ้น 7 คน ซึ่งเป็นไปตามหลักการพื้นฐานสำคัญของการออกแบบบริการที่เรียกว่า การทำงานร่วมกัน (Collaboration) (Stickdorn et al., 2018)

เมื่อได้แนวคิดที่มาจากการระดมสมองแล้ว การดำเนินการในช่วงปลายของขั้นตอนนี้คือ การสร้างต้นแบบอย่างง่าย และการทดสอบเบื้องต้น ซึ่งแนวคิดนี้เป็นไปตามแนวคิดพื้นฐานของการออกแบบบริการที่ว่าควรให้ความผิดพลาดเกิดขึ้นแต่เนิ่น ๆ และเพื่อให้ความผิดพลาดนั้นมีราคาถูก (Fail Fast, Fail Cheap) นั่นเอง (Stickdorn & Schneider, 2011; Stickdorn et al., 2018)

3.4 การทดสอบวิธีการต้นแบบหรือผลิตภัณฑ์ต้นแบบ (Deliver)

ในขั้นตอนของการทดสอบผลิตภัณฑ์ต้นแบบ (Deliver) เน้นที่การออกแบบและการนำไปทดลองและประยุกต์ใช้ร่วมกัน โดยใช้แนวคิดจากขั้นตอนก่อนหน้ามาพัฒนาเป็นตัวต้นแบบ และวัดผลลัพธ์ของการใช้อุปกรณ์ที่ได้ออกแบบใหม่ โดยพิจารณาจากเวลาในการผลิตต่อรอบ จำนวนของเสียต่อรอบผลิต ผลกำไรที่เปลี่ยนไป และทัศนคติของผู้ใช้ที่มีต่ออุปกรณ์และวิธีการทำงาน ที่ประกอบไปด้วย 3 คำถามดังนี้ ความพึงพอใจ ความสะดวก และความปลอดภัยที่มีต่ออุปกรณ์และวิธีการทำงานที่ออกแบบใหม่ ใช้การประเมินแบบ Likert Scale มีคะแนนการประเมินระหว่าง 1 คะแนน (น้อยที่สุด) ถึง 7 คะแนน (มากที่สุด) โดยให้สมาชิกของวิสาหกิจชุมชนเป็นผู้ประเมิน

4. ผลของการประยุกต์ใช้

การรายงานผลการดำเนินงานจะรายงานไปตามขั้นตอนของกระบวนการวิธีคิดในการออกแบบบริการ ตั้งแต่ขั้นตอนการค้นคว้าและสำรวจโดยการรวบรวมข้อมูล การทำความเข้าใจกลุ่มเป้าหมายหรือผู้ที่เกี่ยวข้อง (Discover) การกำหนดกรอบของปัญหา (Define) การนำเสนอแนวทางที่สร้างสรรค์ (Develop) และการทดสอบวิธีการต้นแบบหรือผลิตภัณฑ์ต้นแบบ (Deliver) มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

4.1 ผลจากขั้นตอน Discover

จากการสังเกตกระบวนการทำงาน การสัมภาษณ์เชิงลึก และการทำความเข้าใจกับระบบบริการด้วยพิมพ์เขียวบริการสามารถรายงานผลได้ดังต่อไปนี้

4.1.1 ผลจากการสังเกตกระบวนการทำงาน

ในการสังเกตกระบวนการทำงานพบว่ากระบวนการของระบบบริการนี้ ใช้การสังเกตโดยคณะผู้วิจัยจำนวน 2 คน สังเกตวิธีการทำงานปกติของวิสาหกิจชุมชนแห่งนี้ พบว่ากระบวนการทำงานเริ่มต้นที่ (1) การรับคำสั่งจากลูกค้า (2) การคำนวณปริมาณของวัตถุดิบที่ต้องใช้ ซึ่งประกอบไปด้วยข้าวพองไรซ์เบอร์รี่ทอด เนยถั่ว แอปเปิ้ลคอกเทล สตอเบอร์รี่อบแห้ง เม็ดมะม่วงหิมพานต์อบแห้ง (3) การสั่งซื้อวัตถุดิบ (4) การไปรับวัตถุดิบ เมื่อมีวัตถุดิบครบถ้วนแล้วก็จะถึงขั้นตอนที่ (5) การเตรียมวัตถุดิบตามน้ำหนักที่กำหนด จากนั้นหั่นแอปเปิ้ลคอกเทลอบแห้ง สตอเบอร์รี่อบแห้งและเม็ดมะม่วงหิมพานต์อบแห้ง และการเตรียมข้าวพองไรซ์เบอร์รี่ทอดโดยการนำข้าวไรซ์เบอร์รี่ที่หุงแล้วไปตากแดดจนแห้ง แล้วจึงนำมาทอด เพื่อให้ได้ข้าวไรซ์เบอร์รี่ที่พองกรอบ (6) การปรุงขนม ในขั้นตอนนี้เป็น

การรวนวัตถุดิบทั้งหมดให้เข้ากันในกระทะพร้อมปรุงรส (7) การอัดลงแบบพิมพ์ (8) การแช่แข็ง (9) การหั่นขนมเป็นชิ้น (10) การบรรจุลงหีบห่อแบบซอง (12) การบรรจุลงหีบห่อใหญ่ และ (13) การจัดส่งสินค้า

ในระหว่างการสังเกตการทำงานระหว่างการผลิตขนมจำนวน 4 รอบ พบว่ามีของเสียจากการตัดขนมเป็นชิ้นเล็ก ๆ ในแต่ละรอบการผลิตจะเกิดของเสียเฉลี่ย 30.49 กรัมต่อการผลิตที่ 790 กรัมต่อรอบ คิดเป็นของเสีย 3.86% หรือ ประมาณ 4% โดยน้ำหนัก ซึ่งของเสียมี 2 ประเภท ของเสียส่วนแรกเกิดจากการตัดขอบขนมซึ่งพิมพ์ขนมแบบเดิมมีรูปทรงที่ไม่ได้ฉาก ทำให้ก่อนจะตัดขนมเป็นชิ้นเล็ก ๆ จำเป็นต้องตัดแต่งขอบของแผ่นขนมให้ได้รูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าเสียก่อน และของเสียส่วนที่สองเป็นของเสียที่เกิดจากการหั่นเสีย โดยมีสาเหตุมาจากผู้หั่นขาดความชำนาญทำให้ได้ขนมที่ไม่ได้ขนาดมาตรฐาน หรือ บางครั้งตัดขนมได้จำนวนน้อยกว่าเป้าหมาย ซึ่งหมายถึงการไม่มีวิธีการหั่นที่เป็นมาตรฐานทำให้ได้ขนมที่มีรูปทรงและขนาดไม่เท่ากันนั่นเอง นอกจากนี้ขั้นตอนการหั่นขนมนี้ยังมีความเสี่ยงต่อการเกิดอุบัติเหตุระหว่างการทำงานได้

4.1.2 ผลจากการสัมภาษณ์เชิงลึก

ในขั้นตอนของการสัมภาษณ์เชิงลึกกับสมาชิกในวิสาหกิจชุมชนกรณีศึกษา พบว่าสมาชิกทั้งหมดมีความเห็นสอดคล้องกันเกี่ยวกับอุปสรรคของการทำงานในขั้นตอนการหั่นขนมที่ต้องใช้ความชำนาญเฉพาะบุคคล บางครั้งเกิดของเสีย บางครั้งมีการรอคอยสมาชิกผู้ซึ่งมีความชำนาญด้านการหั่นขนมเป็นพิเศษจึงจะเริ่มกระบวนการผลิต นอกจากนั้นแล้วทางสมาชิกยังได้กล่าวถึงความต้องการอุปกรณ์ช่วยหั่นขนมในระหว่างการออกร้านตามงานแสดงสินค้า ที่สามารถตัดขนมได้ครั้งละหลาย ๆ ชิ้น มีขนาดการตัดที่เท่ากันและควรจะเป็นอุปกรณ์ที่พกพาสะดวก

จากการสัมภาษณ์เชิงลึกสมาชิกวิสาหกิจชุมชนฯ จำนวน 4 ท่าน ทุกคนมีประสบการณ์การทำงานเหมือนกัน มีการตั้งคำถามในประเด็นของความต้องการต่าง ๆ อุปสรรคในการทำงานและความท้าทายของการทำงานเพื่อค้นหาประเด็นของปัญหาที่พบในการทำงาน จากการสัมภาษณ์พบว่าสมาชิกที่ถูกสัมภาษณ์กล่าวถึงประเด็นของอุปสรรคในการทำงานที่สอดคล้องกัน ซึ่งเป็นประเด็นในเรื่องของการตัดขนม โดยสมาชิกคนที่ 1 กล่าวว่า “ต้องการมีดตัดขนมที่ใช้งานง่าย” ในขณะที่สมาชิกคนที่ 2 กล่าวถึงลักษณะหรือวิธีของการตัดขนมที่สามารถตัดขนมได้ครั้งละหลาย ๆ ชิ้น ส่วนสมาชิกคนที่ 4 กล่าวว่า “อยากได้ที่ตัด (ขนม) แล้วได้ขนาดเท่า ๆ กัน” และสมาชิกคนที่ 3 กล่าวว่า “อยากได้ (มีด) ที่พกพาสะดวกสำหรับไปออกร้านได้ เพื่อใช้สำหรับการออกงานแสดงอาหาร” เป็นต้น

ข้อมูลที่ได้จากการสัมภาษณ์ส่วนนี้เรียกว่า “ความต้องการซ่อนเร้น” และสามารถแปลความต้องการซ่อนเร้นในเบื้องต้นได้ว่าสมาชิกมีความต้องการอุปกรณ์ที่ช่วยให้หั่นขนมให้มีรูปร่างและขนาดตามที่ต้องการได้โดยง่าย สะดวก มีน้ำหนักเบา และเคลื่อนย้ายง่ายแสดงดังตารางที่ 1 (ความต้องการซ่อนเร้น)

4.1.3 ผลจากขั้นตอนการทำความเข้าใจในระบบบริการ

ผลจากขั้นตอนการทำความเข้าใจกิจกรรมที่เกี่ยวข้องกับระบบบริการด้วยเครื่องมือพิมพ์เขียวบริการ (Service Blueprint) แสดงในรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่ากิจกรรมของลูกค้าภายนอกมีกิจกรรมการสั่งและรับสินค้าเท่านั้น ส่วนกิจกรรมของวิสาหกิจชุมชนแบ่งเป็นกิจกรรมที่อยู่ในส่วนที่ถูกค้าภายนอกมีปฏิสัมพันธ์ด้วย (Frontstage) และกิจกรรมที่อยู่ในส่วนของกระบวนการผลิตทั้งหมดที่ถูกค้ามองไม่เห็น (Backstage) นอกจากนั้นยังมีส่วนสนับสนุนกระบวนการผลิตที่เรียกว่า Support Process อีกด้วย ซึ่งส่วนจัดหาและจัดส่งวัตถุดิบเป็นส่วนสนับสนุนนั่นเอง จากรูปที่ 3 จะเห็นได้ว่ากิจกรรมส่วนใหญ่ของระบบบริการนี้อยู่ในส่วนของฉากหลัง (Backstage) ซึ่งในขั้นตอนของการผลิตขนมนั้นจะยังมีขั้นตอนการทำงานย่อย ๆ ซ่อนอยู่อีก ดังนั้นการให้ความสำคัญในส่วนของกิจกรรมหลังบ้านจึงเป็นสิ่งสำคัญ

ดังนั้นประเด็นที่เป็นอุปสรรคหรือปัญหาของระบบบริการของวิสาหกิจชุมชนนี้คือ เรื่องของเสียในระหว่างกระบวนการผลิต เรื่องความสอดคล้องของทักษะในการทำงานของสมาชิกกับวิธีการทำงานที่มีอยู่ และเรื่องความเสี่ยงในการเกิดอุบัติเหตุระหว่างการทำงาน และประเด็นที่เป็นความต้องการคือมีความต้องการในเรื่องของอุปกรณ์ช่วยหั่นขนมให้สามารถทำงานได้ง่ายและปลอดภัยเป็นหลัก

4.2 ผลจากขั้นตอน Define

หากพิจารณาข้อมูลในขั้นตอนของการสร้างพิมพ์เขียวบริการในรูปที่ 3 จะพบว่า ในกระบวนการผลิตขนมยังมีกระบวนการย่อยที่ประกอบอยู่ในฉากหลังอีก ซึ่งในขั้นตอนนี้จะใช้การวัดงานและการศึกษาวิธีการ (Kalbach, 2016) เพื่อทำการจับเวลาและศึกษารายละเอียดของกระบวนการผลิตขนม (ที่อยู่ในฉากหลัง) ดังที่ได้กล่าวไว้ในขั้นตอนการสังเกตการผลิตขนมในหัวข้อ 3.1.1

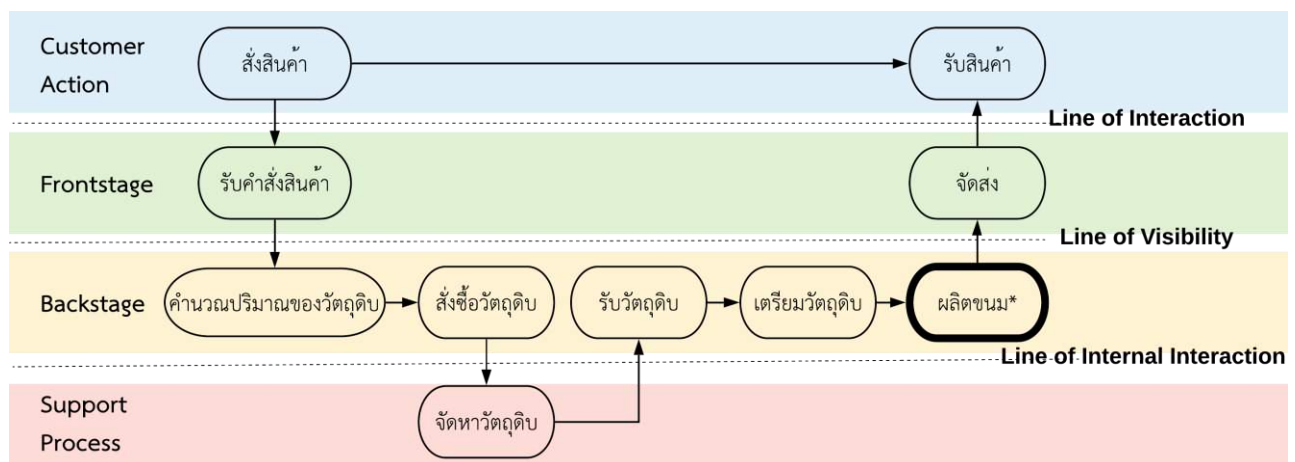
ข้อมูลในรูปที่ 4 แสดงเวลาและขั้นตอนการผลิตขนมตามลำดับ โดยเริ่มต้นที่ขั้นตอนของการปรุงขนมจนถึงขั้นตอนของการบรรจุลงหีบห่อใหญ่ ซึ่งขั้นตอนเหล่านี้เป็นขั้นตอนที่ทำงานต่อเนื่องกัน สามารถแบ่งองค์ประกอบงานย่อยได้ดังนี้ (1) การร่อนน้ำผึ้งและเนยถั่ว เป็นขั้นตอนเริ่มแรกของการปรุงขนม โดยนำน้ำผึ้งและเนยถั่วร่อนให้เข้ากันในกระทะที่ตั้งไฟใน

ระดับที่เหมาะสมไว้ล่วงหน้า (2) การผสมน้ำผึ้งและเนยถั่วที่รวนไว้น้ำ (1) กับส่วนผสมทั้งหมด ได้แก่ ข้าวไรซ์เบอร์รี่ทอดพอง เม็ดมะม่วงหิมพานต์ แอปเปิ้ลคอบแห้ง และสตอร์เบอร์รี่อบแห้งคลุกเคล้าให้เข้ากันในกระทะ (3) การอัดส่วนผสมลงพิมพ์ เป็นการนำส่วนผสมที่ปรุงเรียบร้อยแล้วแบบพิมพ์ซึ่งทำจากจานเซรามิกรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า จำนวน 2 จาน และอัดส่วนผสมให้แน่นในพิมพ์ทั้งสองด้วยตะหลิวและตามด้วยการอัดด้วยลูกกลิ้งขนม จากนั้นห่อขนมและพิมพ์ด้วยฟิล์มพลาสติกยึดสำหรับห่อหุ้มอาหาร (Plastic wrap) เพื่อป้องกันการปนเปื้อนระหว่างการแช่ในตู้เย็น (4) การแช่ขนมในตู้เย็น เป็นขั้นตอนของการนำขนมที่อัดลงพิมพ์ขนมแล้วแช่ในตู้เย็น 25 นาที เพื่อให้ขนมอยู่ตัวไม่แตกหักง่าย

ขั้นตอนที่ (5) การหั่นขนมเป็นชิ้น เป็นการนำขนมที่คงตัวแล้วจากตู้เย็นมาหั่นแบ่งเป็นชิ้นด้วยมีดให้มีขนาดเท่า ๆ กัน

โดยขนม 1 พิมพ์ (จาน) จะต้องหั่นแบ่งให้ได้ 13 ชิ้น ดังนั้นขนม 2 พิมพ์จะหั่นแบ่งได้ 26 ชิ้น (6) การบรรจุของ เป็นขั้นตอนการนำขนมที่หั่นเป็นชิ้นแล้วบรรจุลงของ (7) การซีล เป็นขั้นตอนการลำเลียงขนมที่บรรจุของแล้วเข้าเครื่องซีลเพื่อปิดปากของขนม และ (8) การบรรจุหีบห่อรวม เป็นการนำห่อขนมจาก (7) มาบรรจุหีบห่อรวม โดย 1 ห่อรวมจะมีขนม 13 ชิ้น จะได้ขนม 2 ห่อรวม

นอกจากนั้นในขั้นตอนของการกำหนดกรอบปัญหา (Define) พบว่า จากข้อมูลการศึกษางาน (แสดงดังรูปที่ 4) ที่เป็นข้อมูลเวลามาตรฐานของแต่ละองค์ประกอบย่อยของการผลิตขนม 1 ครั้ง (กระทะ) จะได้ขนม 2 ห่อรวม จำนวนทั้งหมด 26 ชิ้น จะพบว่า ขั้นตอนการแช่เย็นขนม อัดส่วนผสมลงพิมพ์ การบรรจุของ และการหั่นเป็นชิ้น เป็น 4 ขั้นตอนที่ใช้เวลามากที่สุดตามลำดับ



รูปที่ 3 พิมพ์เขียวบริการของระบบให้บริการวิสาหกิจชุมชนกรณีศึกษา

ขั้นตอน	คำอธิบาย	เวลา (นาที)	ระยะทาง (เมตร)	○	⇒	□	D	▽
1	การรวนน้ำผึ้งและเนยถั่ว	0.54		●	⇒	□	D	▽
2	การผสมกับส่วนผสมทั้งหมด	2.38		●	⇒	□	D	▽
3	การอัดส่วนผสมลงพิมพ์	6.13	4	●	⇒	□	D	▽
4	การแช่เย็นขนม	25.00	2	●	⇒	□	D	▽
5	การหั่นเป็นชิ้น	4.05	2	●	⇒	□	D	▽
6	การบรรจุของ	5.46		●	⇒	□	D	▽
7	การซีล	3.45		●	⇒	□	D	▽
8	การบรรจุหีบห่อรวม	0.51		○	⇒	□	D	▽
รวม		47.52	8	7	0	0	0	1

รูปที่ 4 แผนภูมิกระบวนการไหลของการผลิตขนมธัญพืชอัดแท่ง (จากการจับเวลาทั้งหมด 4 ครั้ง เฉพาะขั้นตอนการหั่นเป็นชิ้น จับเวลาทั้งหมด 10 ครั้ง)

โดยคณะผู้จัดทำได้กำหนดขอบเขตของการศึกษาโดยเลือกขั้นตอนการหั่นเป็นชิ้นและขั้นตอนการอัดส่วนผสมลงพิมพ์มาทำการศึกษาและปรับปรุง เนื่องจากในระหว่างการผลิตการทำงานในขั้นตอน Discover พบว่าขั้นตอนทั้ง 2 ขั้นตอน มีวิธีการทำงานที่ยาก ต้องพึ่งพาสมาชิกที่มีทักษะสูง ซึ่งเป็นอุปสรรคของการผลิตสินค้า นอกจากนี้ผลลัพธ์ของการทำงานในขั้นตอนการอัดส่วนผสมลงพิมพ์ ยังมีผลกระทบต่อขั้นตอนการหั่นเป็นชิ้นอีกด้วย ซึ่งเป็นผลกระทบแบบลูกโซ่อันเนื่องมาจากการผลิตสินค้าที่ไม่ได้คุณภาพ ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการทำงานถัดไปและทำให้ผลผลิตของเสีย และขั้นตอนนี้เป็นขั้นตอนที่ใช้เวลาในการทำงานค่อนข้างนาน เนื่องจากมีวิธีการทำงานที่ยากหรืออาจจะไม่เหมาะสมนั่นเอง นอกจากนี้ในขั้นตอนการหั่นนั้นก็ยังมีความเสี่ยงในเรื่องความปลอดภัยอีกด้วย ส่วนเหตุผลที่ไม่พิจารณาปรับปรุงสองขั้นตอนที่เหลือเนื่องจากขั้นตอนการแช่เย็นขนมเป็นเวลาของเครื่องจักร

(รอบการแช่เย็น 25 นาที) โดยที่ระหว่างเครื่องจักรทำงาน สมาชิกสามารถทำงานอื่นได้ และขั้นตอนการบรรจุของเป็น ขั้นตอนที่ไม่ต้องการทักษะสูง สมาชิกคนอื่นสามารถปฏิบัติหน้าที่นี้ได้

จากข้อมูลที่รวบรวมได้ในขั้นตอน Discover และ ข้อมูล การศึกษางาน ทำให้สามารถกำหนดขอบเขตและวัตถุประสงค์ของปัญหา (Define) ได้ว่า เพื่อออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ช่วยในขั้นตอนการหั่นขนมที่สามารถช่วยลดการใช้ทักษะของผู้ปฏิบัติงาน ช่วยลดเวลาในการผลิต ลดของเสีย และช่วยลดโอกาสของการเกิดอุบัติเหตุในระหว่างการทำงาน

4.3 ผลจากขั้นตอน Develop

ในขั้นตอนของการนำเสนอแนวทางที่สร้างสรรค์ (Develop) เริ่มต้นที่การนำข้อมูลจากการสัมภาษณ์เชิงลึกมาสังเคราะห์และพยายามตีความหมายของความต้องการซ่อนเร้นให้เป็นความต้องการที่แท้จริง เพื่อเป็นข้อมูลในการสร้างแนวคิดของการออกแบบ โดยข้อมูลความต้องการซ่อนเร้นนี้ถูกนำมาสังเคราะห์หรือแปลความหมายต่อไป ดังตารางที่ 1 (การสัมภาษณ์เชิงลึก) โดยคณะผู้วิจัยพบว่า ข้อมูลจากสมาชิกคนที่ 1, 2, และ 4 กล่าวเกี่ยวกับการหั่นขนม โดยมีความเกี่ยวข้องกับการหั่นขนมอยู่ 2 ประเด็นคือ ความสะดวกในการหั่นและการหั่นที่ช่วยให้เกิดการแบ่งขนมให้มีขนาดเท่ากันได้โดยง่าย ความต้องการซ่อนเร้นนี้จึงแปลงให้เป็นความต้องการที่แท้จริงเป็นความต้องการอุปกรณ์ที่แบ่งขนมได้ง่ายและสะดวก นอกจากนั้น ข้อมูลจากสมาชิกคนที่ 3 ที่กล่าวเกี่ยวกับความสามารถในการพกพาอุปกรณ์ไปจัดแสดงยังที่ต่าง ๆ ได้อย่างสะดวกแสดงถึงความต้องการที่แท้จริงที่ว่า ต้องการให้อุปกรณ์มีน้ำหนักเบา ที่

สะดวกต่อการพกพา เคลื่อนย้ายได้ง่าย และมีความสวยงามเพียงพอเพื่อใช้ในการนำไปงานแสดงออกร้านได้

ข้อมูลจากการแปลงความต้องการซ่อนเร้นไปเป็นความต้องการที่แท้จริงทั้งหมดนี้นำไปสู่การพัฒนาแนวคิดการออกแบบของผู้ใช้ได้ ดังตารางที่ 1 (การนำเสนอแนวทางที่สร้างสรรค์) ในการระดมสมอง แรกเริ่มกลุ่มสมาชิกวิชาหจก ชุมชน เสนอแนวคิดของการทำเครื่องหั่นขนมที่มีลักษณะคล้ายเครื่องสับกระดาศ มีด้ามที่จับที่ช่วยจะช่วยหั่นขนมได้ง่าย มีฐานรองรับที่จะสามารถวางขนม และกำหนดตำแหน่งในการหั่นได้ง่ายเพื่อให้ได้ขนมที่มีขนาดเท่า ๆ กัน ในขณะที่กลุ่มนักวิจัยเสนอแนวคิดการละทิ้งการทำหั่นขนมออกไป เนื่องจากการใช้ของมีคมในกระบวนการผลิตมีความเสี่ยงที่จะเกิดอันตราย โดยพิจารณาจากความต้องการที่แท้จริงเป็นสำคัญ เนื่องจากเงื่อนไขของการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์นี้ประกอบไปด้วย ความต้องการให้การตัดขนมมีความปลอดภัย สามารถแบ่งขนมได้จำนวนมากในคราวเดียวกัน อุปกรณ์มีน้ำหนักเบา และมีความสวยงาม นอกจากนั้นควรมีขนาดไม่ใหญ่มาก เพื่อที่จะสามารถขนย้ายไปยังสถานที่จัดแสดงสินค้าได้ง่ายและมีมาตรฐานในการผลิตขนม ท้ายที่สุดนำข้อมูลแนวคิดทั้งหมดมาใช้วิธีการคิดแบบเอกนัยหรือการคิดเชิงวิเคราะห์ (Convergent Thinking) ที่ทำให้ได้แนวคิดของการออกแบบพัฒนาพิมพ์ขนมที่สามารถขึ้นรูปขนมเป็นชิ้น ๆ ได้ทันที โดยไม่ต้องใช้มีดตัด ซึ่งทั้งสองฝ่ายคิดว่า น่าจะเป็นอุปกรณ์ที่ตอบสนองความต้องการซ่อนเร้นและความต้องการที่แท้จริงของสมาชิกมากที่สุด ดังแสดงข้อมูลในตารางที่ 1 (การนำเสนอแนวทางที่สร้างสรรค์)

ตารางที่ 1 ข้อมูลจากการสัมภาษณ์เชิงลึกสู่การทำความเข้าใจความต้องการซ่อนเร้นและการนำเสนอแนวทางที่สร้างสรรค์ในการออกแบบ

Discover: การสัมภาษณ์เชิงลึก (ความต้องการที่สัมภาษณ์ได้)			Develop: การนำเสนอแนวทางที่สร้างสรรค์
ความต้องการซ่อนเร้น	ความต้องการที่แท้จริง	→	แนวคิดการออกแบบ
R1: “ต้องการมีดตัดขนมที่ใช้งานง่าย”	ต้องการอุปกรณ์ที่แบ่งขนมได้ง่ายและสะดวก	→	พิมพ์ขนมที่สามารถขึ้นรูปขนมได้เป็นชิ้นอย่างสะดวก โดยคงขนาดให้ใกล้เคียงของเดิมที่สุด
R2: “ต้องการที่ตัดได้ครั้งละหลาย ๆ ชิ้น”			
R4: “อยากได้ที่ตัดแล้วได้ขนาดเท่า ๆ กัน”			
R3: “คิดว่าอยากได้ที่พกพาสะดวก สำหรับนำไปออกร้านได้”	ต้องการอุปกรณ์ที่มีน้ำหนักเบา และเคลื่อนย้ายสะดวก มีความสวยงามสำหรับนำไปแสดงในงานได้	→	เน้นความปลอดภัยในการใช้งาน มีน้ำหนักเบา มีความสวยงาม

ในขั้นตอนการนำเสนอแนวทางที่สร้างสรรค์ (Develop) เริ่มต้นที่การทำต้นแบบอย่างง่ายโดยคณะผู้จัดทำเลือกพิมพ์ทำน้ำแข็งแบบแท่ง มาประยุกต์ใช้ในการอัดขนมเป็นแท่ง ในเบื้องต้นได้ทำการทดลองอัดขนมลงในพิมพ์น้ำแข็ง พบว่ามีแนวโน้มที่สามารถทำได้ตามแนวคิดการออกแบบที่ว่า ต้องการ

พิมพ์อัดขนมที่สามารถขึ้นรูปขนมได้เป็นชิ้นเลยทันที และสามารถอัดขึ้นรูปได้ครั้งละหลาย ๆ ชิ้น ในขนาดที่เท่า ๆ กัน การทดลองนี้เรียกว่าการทดลองแบบง่าย (Fast Testing หรือ Rapid Testing of Ideas) ซึ่งผลตอบรับที่ได้จากสมาชิกวิชาหจกชุมชนเป็นบวก จึงมีความเชื่อมั่นพอที่จะพัฒนาตัว

ต้นแบบนี้ต่อไปในขั้นตอนของการทดสอบวิธีการต้นแบบ (Deliver)

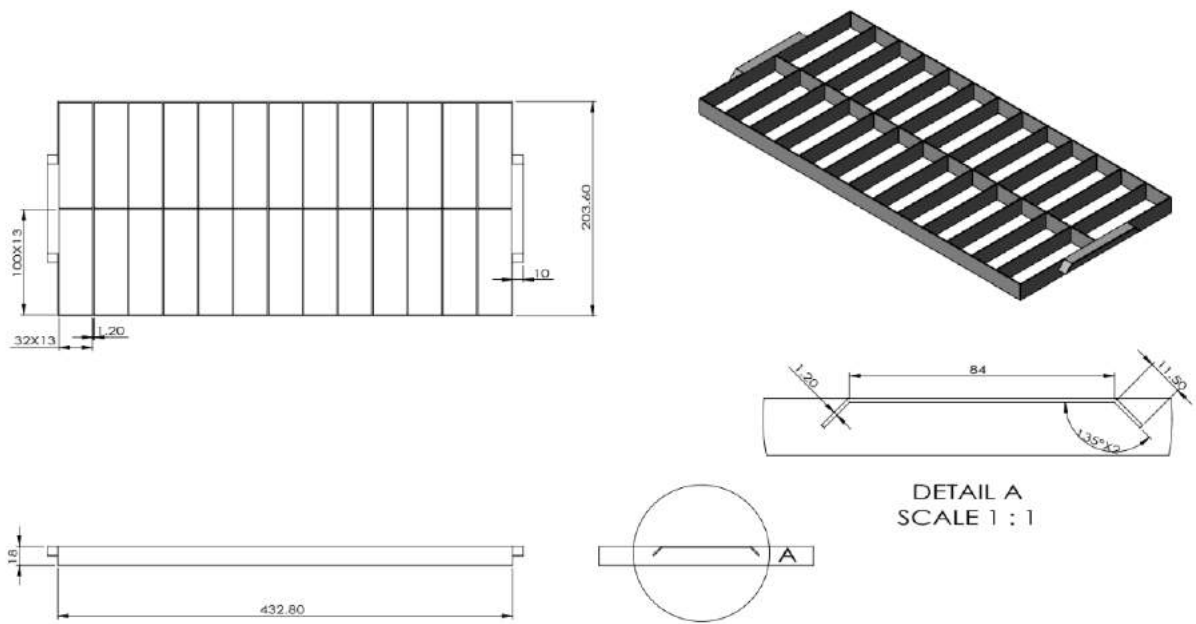
4.4 ผลจากขั้นตอน Deliver

ในการออกแบบต้นแบบของพิมพ์ทำขนม นั้น ได้นำแนวคิดการออกแบบที่ได้จากขั้นตอน Develop มากำหนดเป็นคุณลักษณะ (Specification) ของพิมพ์ขนม ประกอบด้วย ขนาดพิมพ์ขนม ขนาดช่องพิมพ์ขนม จำนวนชิ้นขนมต่อการพิมพ์ มือจับ น้ำหนัก และวัสดุ สำหรับคุณลักษณะของตัวต้นขนม ประกอบด้วย ขนาดแผ่นตัวต้นขนม ขนาดตัวต้นขนม ต่อชิ้น ตัวกำหนดตำแหน่ง น้ำหนัก และวัสดุ แสดงดังตารางที่ 2 ทำให้สามารถออกแบบชุดพิมพ์ขนมที่มีตัวพิมพ์ขนมและตัวต้นขนม ที่ช่วยให้สามารถทำงานได้ง่าย มีการออกแบบให้มีตัวกำหนดตำแหน่ง 3 ตำแหน่ง (ขนาด $\varnothing 6$ มม.) เพื่อให้การต้นขนมสามารถทำได้อย่างสะดวก ตำแหน่งของพิมพ์ทำขนม

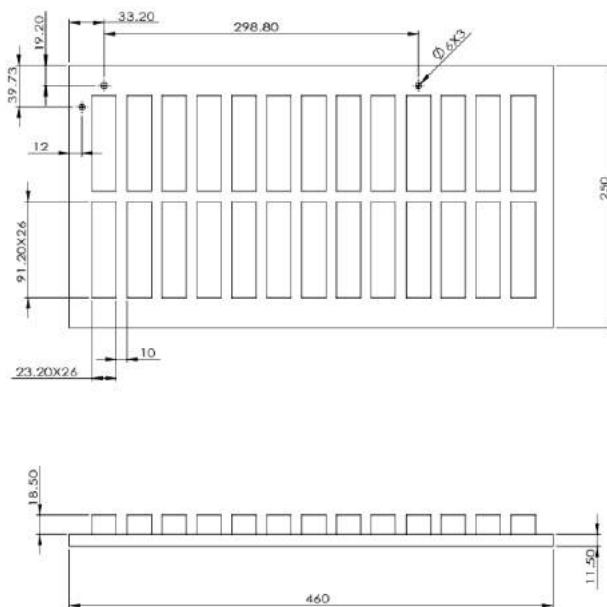
และตัวต้นขนมมีตำแหน่งตรงกัน ทำให้ชิ้นขนมไม่เสียหายระหว่างที่ถูกดันออก และมีมือจับพิมพ์ขนมเพื่อความสะดวกในการต้นขนมออกจากพิมพ์และช่วยให้เคลื่อนย้ายได้โดยง่าย ขนาดของชิ้นขนม (กว้าง 32 มม. x ยาว 100 มม. x สูง 18 มม.) ถูกกำหนดโดยขนาดของบรรจุภัณฑ์และคงจำนวนชิ้นในการผลิตให้คงที่ที่ 26 ชิ้นต่อรอบ ซึ่งเท่ากับปริมาณการผสมวัตถุดิบหนึ่งรอบการทำงานเดิมโดยไม่เปลี่ยนแปลงสูตรการทำขนมใด ๆ พิมพ์ทำขนมทำจากเหล็กสแตนเลส ในขณะที่ตัวต้นขนมทำจากอะคริลิกใส ซึ่งวัสดุทั้งสองนี้สามารถใช้ในการประกอบอาหารได้อย่างปลอดภัย (Canada Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs, 2018; U. S. Department of Health and Human Services, 2019) และการทำงานประสานกันระหว่างพิมพ์ขนมและตัวต้นขนมจะช่วยลดความเสี่ยงในการเกิดอุบัติเหตุระหว่างการหั่นขนมเป็นชิ้น รายละเอียดของชุดพิมพ์ขนมต้นแบบแสดงดังรูปที่ 5

ตารางที่ 2 การพัฒนาด้านแบบจากแนวคิดการออกแบบสู่คุณลักษณะเฉพาะ

แนวคิดการออกแบบ	คุณลักษณะเฉพาะ (Specification)									
	พิมพ์ขนม						ตัวต้นขนม			
	ขนาดพิมพ์ขนม	ขนาดช่องพิมพ์ขนม	จำนวนชิ้นขนมต่อพิมพ์	มือจับ	น้ำหนัก	วัสดุ	ขนาดแผ่นตัวต้นขนม	ขนาดตัวต้นขนมต่อชิ้น	ตัวกำหนดตำแหน่ง	น้ำหนัก
พิมพ์ขนมที่สามารถขึ้นรูปขนมได้เป็นชิ้นอย่างสะดวก	☐	☐	☐	☐			☐	☐	☐	
พิมพ์ขนมที่สามารถขึ้นรูปขนมให้มีขนาดใกล้เคียงของเดิมมากที่สุด										
เน้นความปลอดภัยในการทำงาน				☐		☐			☐	☐
มีน้ำหนักเบา					☐					☐
มีความสวยงาม						☐				☐



(ก)



(ข)

รูปที่ 5 ชุดพิมพ์ขนมต้นแบบพร้อมขนาด (ก) พิมพ์ขนม และ (ข) ตัวต้นขนม

เมื่อลองนำชุดพิมพ์ขนมต้นแบบ (รูปที่ 5.ก) มาทดสอบในกระบวนการผลิตพบว่าเมื่อสมาชิกวิสาหกิจชุมชนได้ทดลองใช้พิมพ์ขนมไปใช้ระยะหนึ่งจนสมาชิกเกิดความคุ้นเคย ก็สามารถใช้อุปกรณ์ได้โดยง่าย โดยการทดสอบการใช้อุปกรณ์และวิธีการทำงานแบบใหม่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงทางด้านเวลาของงานย่อย 3 องค์ประกอบคือ การเปลี่ยนแปลงเวลาของการอัดขึ้นรูปขนม เวลาในการแช่เย็นขนม และเวลาในการดันขนมออก

เมื่อทดลองระบบการผลิตคู่กับตัวต้นขนมที่ได้ออกแบบมาใหม่ (รูปที่ 5.ข) จะช่วยให้การนำขนมออกจากพิมพ์ขนมทำได้โดยง่ายเนื่องจากมีตัวกำหนดตำแหน่ง ส่วนวิธีการทำงานของตัวต้นขนมนั้นสามารถนำพิมพ์ขนมที่มีขนมอัดอยู่เต็มวางและกดลงไปบนตัวต้นขนม จากนั้นออกแรงกดเพื่อให้ขนมถูกดันขึ้นมาอยู่ด้านบน เมื่อนำพิมพ์ขนมและตัวต้นขนมมาใช้จะทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของวิธีการทำงานทางด้าน การ

เปลี่ยนแปลงเวลาของการอัดขึ้นรูปขนม เวลาในการแช่เย็นขนม และเวลาในการดันขนมออก ดังที่ได้กล่าวเอาไว้ข้างต้น ซึ่งทำให้มีข้อมูลเวลาที่เปลี่ยนแปลงไป ข้อมูลการเปรียบเทียบเวลาก่อนและหลังการปรับปรุงแสดงในตารางที่ 3 แสดงข้อมูลการเปรียบเทียบข้อมูลก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุง (แสดงเฉพาะขั้นตอนที่มีการเปลี่ยนแปลง) เวลาในการผลิตขนม

ตารางที่ 3 ข้อมูลการเปรียบเทียบเวลาในการผลิตของขั้นตอน ก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุง

ขั้นตอนการทำงาน	เวลาเฉลี่ยต่อ 26 ชิ้น (นาที)	
	ก่อนการปรับปรุง	หลังการปรับปรุง
การอัดส่วนผสมลงพิมพ์	6.13	3.76
การแช่เย็นขนม	25.00	15.00
การหั่นเป็นชิ้น (การดันขนมออก)	4.05	0.55

ด้วยวิธีการทำงานก่อนการปรับปรุงจะใช้เวลาทั้งสิ้น 47.52 นาทีต่อ 26 ชิ้น หรือคิดเป็น 1.83 นาทีต่อชิ้น ในขณะที่เวลาในการผลิตด้วยวิธีการทำงานหลังการปรับปรุงจะใช้เวลาทั้งสิ้น 31.64 นาทีต่อ 26 ชิ้น หรือคิดเป็น 1.22 นาทีต่อชิ้น สามารถลดเวลาไปได้รอบละประมาณ 15.88 นาที หรือใช้เวลาในการผลิตลดลง 33.42%

นอกจากนั้นคณะผู้วิจัยยังได้ทำการประเมินทัศนคติของผู้ใช้ที่มีต่ออุปกรณ์และวิธีการทำงานแบบเดิมและแบบใหม่ ในด้าน 1) ความพึงพอใจของผู้ใช้ 2) ความสะดวกในการทำงาน และ 3) ความปลอดภัยในการทำงาน แสดงผลในตารางที่ 4 การประเมินนี้ใช้การประเมินแบบ Likert scale ระดับคะแนนจาก 1 ถึง 7 (ระดับต่ำ ไป ระดับสูง) จากจำนวนกลุ่มตัวอย่าง 2 คน

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบข้อมูลความพึงพอใจ ความสะดวกและความปลอดภัยในการใช้งานอุปกรณ์แบบเดิมและแบบใหม่

รายการประเมิน	อุปกรณ์และวิธีการทำงาน		การเปลี่ยนแปลงของทัศนคติต่ออุปกรณ์
	แบบเดิม	แบบใหม่	
ความพึงพอใจที่มีต่ออุปกรณ์และวิธีการทำงาน	3.0	6.5	พอใจมากขึ้น
ความสะดวกในการทำงานด้วยอุปกรณ์และวิธีการทำงาน	3.0	6.5	สะดวกมากขึ้น
ความปลอดภัยในการทำงานด้วยอุปกรณ์และวิธีการทำงาน	2.5	7.0	ปลอดภัยมากขึ้น
ผลรวมคะแนนเฉลี่ย	8.5 (40.47%)	20.0 (95.24%)	คะแนนรวมดีขึ้นมาก

ซึ่งทั้งคูเป็นสมาชิกของวิสาหกิจชุมชนแห่งนี้ที่มีเข้าใจวิธีการทำงานทั้งก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุงโดยสามารถสรุปผลได้ว่าสมาชิกมีความทัศนคติของผู้ใช้ที่มีต่อการใช้อุปกรณ์และวิธีการทำงานแบบใหม่และมีความเห็นว่าจะสามารถช่วยให้ทำงานได้สะดวก ปลอดภัย และพึงพอใจมากยิ่งขึ้นคิดเป็นคะแนนการเปลี่ยนแปลงรวมจากแบบเดิม 40.47% เป็น 95.24% ในแบบใหม่

5. บทวิจารณ์ สรุปแนวทางและข้อคิดที่ได้จากงานวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์วิธีคิดเชิงออกแบบบริการร่วมกับวิธีการศึกษาการทำงานในการปรับปรุงกระบวนการผลิตขนมฉัณูพิซซอตแท่ง ซึ่งสามารถวิจารณ์ผลการปรับปรุงกระบวนการผลิตและสามารถสรุปแนวทางและข้อคิดในการนำเอาวิธีคิดเชิงออกแบบบริการไปประยุกต์ในงานต่าง ๆ ในกระบวนการผลิตในภาคอุตสาหกรรมได้ดังนี้

5.1 บทวิจารณ์ผลการปรับปรุงกระบวนการผลิต

เมื่อพิจารณาในมุมมองของค่าใช้จ่ายทางด้านแรงงานด้วยข้อมูลเวลาการผลิตที่ลดลง (ตารางที่ 3) หากผู้ประกอบการใช้พิมพ์ขนมและตัวดันขนมนี้จะสามารถช่วยลดค่าแรงคนงานในการตัดขนมลง โดยจะสามารถผลิตขนมด้วยการใช้แรงงานจำนวน 1 คนเสมอไป เนื่องจากมีวิธีการทำงานที่ง่ายและไม่จำเป็นต้องใช้สมาชิกที่มีทักษะความชำนาญพิเศษในด้านการหั่นขนมอีกต่อไปแล้ว คิดเป็นค่าแรงที่ประหยัดได้ 330 บาทต่อหนึ่งวันการผลิต ถ้ามีสมาชิกทำงานจำนวน 1 คน การทำงานด้วยวิธีการทำงานแบบเดิมจะทำขนมได้ 8.83 รอบ เทียบเท่ากับการทำขนมได้ 229 ชิ้น (ชิ้นละ 18 บาท) คิดเป็นมูลค่า 4,122 บาท ในขณะที่วิธีการทำงานแบบใหม่ ด้วยสมาชิกทำงานจำนวน 1 คน จะสามารถทำขนมได้ 13.27 รอบ เทียบเท่ากับการทำขนมได้ 345 ชิ้น คิดเป็นมูลค่า 6,210 บาท คิดเป็นส่วนต่างต่อวัน 2,088 บาท หรือ 41,760 บาทต่อเดือน (20 วันทำงาน) และ ต่อปีเป็น 501,120 บาท

ในแง่ของความปลอดภัยจะพบว่า การใช้พิมพ์ขนมและตัวดันขนมนี้จะช่วยลดโอกาสของการเกิดอุบัติเหตุ ที่จะนำมาซึ่งต้นทุนในลักษณะของค่าใช้จ่ายในการดูแลรักษาสมาชิก ซึ่ง ณ จุดนี้ยังไม่ได้พิจารณาเป็นมูลค่าทางการเงิน อีกทั้งยังเป็นการออกแบบอุปกรณ์ช่วยทำงานที่ตรงตามหลักการ ECRS ในส่วนของการจัดองค์ประกอบที่ไม่จำเป็น (Eliminate) โดยอุปกรณ์ที่ออกแบบใหม่นี้ช่วยลดขั้นตอนการหั่นขอบขนมและการหั่นขนมเป็นชิ้น อีกทั้งยังเป็นการหาแนวทางที่ช่วยให้การทำงานง่ายกว่าเดิม (Simplify) โดยจะสามารถได้ขนมเป็นชิ้นที่มีขนาดเท่ากันโดยง่าย และการมีตัวกำหนดตำแหน่งเพื่อช่วยดันขนมออกก็ช่วยให้การทำงานนั้นง่ายขึ้นอีกด้วย

ในส่วนของการลดของเสียจากขั้นตอนการตัดแบ่งขนมที่เดิมมีของเสีย 4% หรือเท่ากับเสียโอกาสในการขายขนมจำนวน 1-2 ชิ้นต่อการผลิตขนมจำนวน 26 ชิ้น หรือคิดเป็นมูลค่าทางการเงินที่เสียโอกาสในการขายไป 18 บาทต่อชิ้น โดยกำลังการผลิตปกติต่อวัน อยู่ที่ 12 - 36 รอบการผลิต (1 รอบการผลิต = 26 ชิ้น) ดังนั้นในหนึ่งวันการผลิตจะมีของเสียอย่างน้อยที่สุด 12 ชิ้นต่อวันหรือคิดเป็นมูลค่า 216 บาท หรือถ้าพิจารณาเป็นต่อเดือน สมมติให้หนึ่งเดือนผลิต 20 วัน แสดงว่าจะเสียโอกาสในการขายถึง 4,320 บาท หรือต่อปีคิดเป็น 51,840 บาท

5.2 สรุปแนวทางและข้อคิดที่ได้จากการประยุกต์

จากกระบวนการของวิธีคิดเชิงออกแบบบริการทั้ง 4 ขั้นตอน ได้แก่ ขั้นที่ 1 การค้นคว้าและสำรวจ (Discover) ขั้นที่ 2 การกำหนดกรอบของปัญหา (Define) ขั้นที่ 3 การนำเสนอแนวทางที่สร้างสรรค์ (Develop) ขั้นที่ 4 การทดสอบวิธีการต้นแบบ (Deliver) สามารถสรุปแนวทางและข้อคิดที่ได้จากการประยุกต์แนวคิดดังกล่าวในงานวิจัยได้ดังนี้

การค้นคว้าและสำรวจโดยการรวบรวมข้อมูลและการทำความเข้าใจกลุ่มเป้าหมายหรือผู้ที่เกี่ยวข้อง (Discover) ควรเริ่มต้นจากการทำความเข้าใจกลุ่มผู้มีส่วนได้ส่วนเสียก่อน อาจใช้การสังเกตวิธีการทำงาน และหรือการสัมภาษณ์ เพื่อให้ทราบถึงปัญหาในมุมกว้างและสามารถเข้าใจประสบการณ์ทางความรู้สึกของผู้มีส่วนได้ส่วนเสียที่มีต่อกิจกรรมที่เกี่ยวข้องได้ ดังนั้นการทำงานในขั้นตอนนี้ไม่จำเป็นต้องคาดหวังว่าจะได้หัวข้อของปัญหาที่เฉพาะเจาะจงนัก

การกำหนดกรอบของปัญหา (Define) ในขั้นตอนของการกำหนดกรอบของปัญหานั้น ควรเริ่มต้นที่การศึกษาข้อมูลเชิงลึก การวิเคราะห์และสังเคราะห์ข้อมูล เพื่อให้สามารถกำหนดหัวข้อของปัญหาที่เฉพาะเจาะจงและสามารถกำหนดขอบเขตของปัญหาได้ และยังคงให้ความสำคัญกับการทำงานร่วมกันระหว่างกลุ่มผู้มีส่วนได้ส่วนเสียที่เกี่ยวข้องอยู่เสมอ

สำหรับการนำเสนอแนวทางที่สร้างสรรค์ (Develop) ในขั้นตอนนี้ควรเน้นการคิดแบบอเนกนัยเพื่อให้เห็นภาพรวมของทุกองค์ประกอบเพื่อสร้างแนวทางที่เป็นไปได้ทั้งหมดและตามด้วยการคิดแบบอเนกนัยที่มุ่งการคิดวิเคราะห์เพื่อนำไปสู่การคัดกรองให้ได้แนวคิดที่สร้างสรรค์ ถ้าหากพบว่าข้อมูลที่รวบรวมมาจากขั้นตอนก่อนหน้ามีไม่เพียงพอสำหรับการสร้างแนวคิดสามารถย้อนกลับไปดำเนินการในขั้นตอนของ Discover และ Define เพิ่มเติมได้ ในส่วนของการทดสอบแนวคิดนั้น สามารถใช้การทดลองอย่างง่ายและประหยัดเพื่อทดสอบว่าแนวคิดที่นำเสนอั้นจะมีความเป็นไปได้มากน้อยเพียงใด นอกจากนั้นยังควรให้ความสำคัญกับการทำงานร่วมกันระหว่างกลุ่มผู้มีส่วนได้ส่วนเสียเช่นเคย

สำหรับการทดสอบวิธีการต้นแบบหรือผลิตภัณฑ์ต้นแบบ (Deliver) เน้นการพัฒนาต่อยอดจากแนวคิดที่สร้างสรรค์ที่ได้ผ่านการทดลองอย่างง่ายมาแล้วในขั้นตอนก่อนหน้า การทำให้ต้นแบบหรือวิธีการต้นแบบประสบความสำเร็จในการประยุกต์ใช้นั้น นอกจากต้นแบบหรือวิธีการต้นแบบจะต้องนำไปใช้ได้จริงแล้ว ยังต้องได้รับการยินยอมประยุกต์ใช้ต้นแบบหรือวิธีการต้นแบบอย่างเต็มใจจากกลุ่มผู้มีส่วนได้ส่วนเสียทั้งหมด อาจใช้หลักการของการเป็นเจ้าของความคิด (Ownership) (Stickdorn & Schneider, 2011) เพื่อให้เกิดการยินดีที่จะใช้ต้นแบบหรือวิธีการต้นแบบนั้น ๆ เนื่องจากเป็นความภาคภูมิใจในการเป็นเจ้าของความคิดนั้นหรือเป็นเจ้าของส่วนหนึ่งของความคิดนั้น ๆ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการยอมรับและยินดีที่จะปรับเปลี่ยนไปสู่การทำงานด้วยวิธีการทำงานใหม่ในผู้ทำงานที่เกี่ยวข้อง สำหรับกลุ่มผู้มีส่วนได้ส่วนเสียระดับสูงที่มีหน้าที่ในการกำหนดนโยบายต่าง ๆ ขององค์กร อาจใช้หลักการการนำเสนอทั้งข้อมูลเชิงคุณภาพและข้อมูลเชิงปริมาณเพื่อสะท้อนคิดในเชิงผลประโยชน์ในการทำกำไรของการปรับปรุงนั้น ๆ การพัฒนาต้นแบบหรือวิธีการต้นแบบจะประสบความสำเร็จได้ก็ต่อเมื่อมีการนำไปใช้ได้จริง และเต็มไปด้วยความรู้สึกปิติยินดีของกลุ่มที่มีส่วนได้ส่วนเสียทุกกลุ่ม

6. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณกรมส่งเสริมอุตสาหกรรม กระทรวงอุตสาหกรรมและหน่วยร่วมดำเนินการ สำนักบริการวิชาการ มหาวิทยาลัยบูรพาและศูนย์ส่งเสริมอุตสาหกรรมภาคที่ 9 ที่ได้ส่งเสริมให้มีโครงการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตและการบริหารธุรกิจอุตสาหกรรมเกษตรแปรรูปนี้ ที่ทำให้คณะผู้วิจัยได้มีโอกาสประยุกต์ใช้แนวคิดใหม่ ๆ ในการทำงานวิจัย

ขอขอบคุณสมาชิกวิสาหกิจชุมชนส่งเสริมอาชีพชุมชนเกาะกอกที่ให้ข้อมูลและให้ความร่วมมือด้วยดีตลอดโครงการ นอกจากนี้ยังขอขอบคุณอาจารย์อานนท์ เสือวงษ์ไพศาล ที่กรุณาสละเวลาอันมีค่าช่วยคณะผู้วิจัยวาดแบบพิมพ์ขนมและตัวต้นขนมในรูปที่ 5 และท้ายที่สุดขอขอบคุณคุณศิริชัย ปันสมสกุลและคุณนายสิริวดี จันทร์พร นักวิทยาศาสตร์ ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ช่วยผลิตตัวต้นแบบให้คณะผู้วิจัยเพื่อใช้ในการดำเนินงานวิจัยในครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

Ball, J. (2019). *The double diamond: A universally accepted depiction of the design process*. <https://www.designcouncil.org.uk/news-opinion/what-framework-innovation-design-councils-evolved-double-diamond>

- Brown, T. (2009). *Change by design: how design thinking transforms organizations and inspires innovation*. Harper Collins Publishers.
- Canada Ministry of Agriculture, Food and Rural Affairs. (2018). *Food Grade Materials*. <http://www.omafrs.gov.on.ca/english/food/inspection/maple/mple-guidance-S1-1-3.htm#1.3.4>
- Enninga, T., Manschot, M., Gessel, C. V., Gijbels, J., Lugt, R., Visser, F. S., Verhoeven, F., & Godfroij, B. (2013). *Service design: Insights from nine case studies*. https://www.stby.eu/wp_15/wp-content/uploads/2013/12/Service-Design-insights-from-nine-case-studies.pdf
- Institute of Design at Stanford. (2009). *Bootcamp bootleg*. <https://dschool.stanford.edu/resources/the-bootcamp-bootleg>
- Jansong, W. & Authayarat, W. (2017). Customer journey map to identify service problem for service improvement in industry sector In S. Prombanpong (Ed.), *Proceeding of the 8th National Conference of Industrial Operations Development 2017* (pp. 701 - 711). Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi.
- Jiamsanguanwong, A. , Tientrakul, P, Sookseng, F. , Ophaswongse, C. , & Kittithreerapornchai, O. (2020, February 3). System improvement of medicine delivery service: Case study of traditional Chinese medicine. *International Journal of Healthcare Management*. <https://doi.org/10.1080/20479700.2020.1723945>
- Kalbach, J. (2016). *Mapping experience: A complete guide to creating value through journeys, blueprints & diagrams*. O'Reilly Media.
- Kanjanapanyakom, R. (2009). *Industrial Work Study*. Top.
- Pongchairerks, P. (2013). Benefits and applications of methods engineering. *Kasetsart Engineering Journal*, 83(26), 84-91.
- Shostack, G. L. (1982). How to design a service. *European Journal of Marketing*, 16(1), 49 - 63. <https://doi.org/10.1108/EUM00000000004799>
- Shostack, G. L. (1984, January 1). Designing services that deliver. *Harvard Business Review*. <https://hbr.org/>
- Stickdorn, M., & Schneider, J. (2011). *This is service design thinking: Basics - tools - cases*. John Wiley & Sons.
- Stickdorn, M., Hormess, M., Lawrence, A. & Schneider, J. (2018). *This is service design doing: applying service design thinking in the real world: a practitioner's handbook*. O'Reilly Media.
- Thailand Creative & Design Center. (2014). *Service design workbook*. https://web.tcdc.or.th/upload/Service_Design_Workbook_by_TCDC.pdf
- U.S. Department of Health and Human Services. (2019). *CFR - Code of Federal Regulations Title 21*. <https://www.accessdata.fda.gov/scripts/cdrh/cfdocs/cfcr/CFRSearch.cfm?fr=177.1010>

8. ประวัติผู้วิจัย



ดร. บัญชา อริยะจรรยา สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอก สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ University of Texas at Arlington ประเทศสหรัฐอเมริกา ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง อาจารย์ประจำ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา งานวิจัยที่สนใจคือการออกแบบการทดลองเชิงสถิติ (Statistical Experimental Design) การลดของเสียและการเพิ่มผลผลิตภาพในกระบวนการผลิต



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรัตตา อุทัยรัตน์ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอก สาขาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการ สถาบันเทคโนโลยีแห่งโตเกียว ประเทศญี่ปุ่น ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ประจำภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา งานวิจัยที่สนใจคือการออกแบบระบบบริการ (Service design) การออกแบบประสบการณ์ (Experience design) และการเพิ่มผลผลิตในกระบวนการผลิต

ความต้านทานการลื่นไถลของแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีวัสดุผิวทางเดิมเป็นส่วนผสม Skid resistance of Asphalt Hot-mix Recycling

ณัฏฐวิทย์ เศรษฐยุทธพงษ์¹, กรกฏ นุสิต^{1*}, พีรพงศ์ จิตเสงี่ยม², วีระชัย วงษ์วีระนิมิตร³, นันทวัฒน์ ลือสิงหนาท³
Nathanyawat Sedthayutthaphong¹, Korakod Nusit^{1*}, Peerapong Jitsangiam², Weerachai Wongweeranimit³,
Nuntawat Lersinghanart³

¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก

²ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่

³บริษัท อินฟรา พลัส จำกัด จังหวัดกรุงเทพมหานคร

¹Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Naresuan University, Phitsanulok

²Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University, Chiang Mai

³INFRAPLUS CO.,LTD., Bangkok

*Corresponding author e-mail: korakodn@nu.ac.th; Nathanyawat@outlook.co.th

(Received: 1 July 2020, Revised: 4 January 2021, Accepted: 14 January 2021)

บทคัดย่อ

ปัจจุบัน ทรัพยากรที่เหมาะสมสำหรับใช้ก่อสร้างผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตมีปริมาณลดน้อยลง ดังนั้น เพื่อลดการใช้ทรัพยากรใหม่ ในการก่อสร้างผิวทางจึงมีการนำวัสดุผิวทางเดิม (Reclaim Asphalt Pavement) มาปรับปรุงคุณสมบัติเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ ซึ่งจากการทบทวนวรรณกรรมพบว่า งานวิจัยในอดีตส่วนมากมุ่งเน้นศึกษาประสิทธิภาพการใช้งาน (Performance) ของแอสฟัลต์ คอนกรีตที่มีผิวทางเดิมเป็นส่วนผสม แต่งานวิจัยด้านการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตให้มีความปลอดภัย (Safety) เพียงพอนั้น ยังมีจำนวนจำกัดอยู่ทั้งภายในประเทศและต่างประเทศ เพื่อมุ่งเน้นในการคำนึงถึงมุมมองด้านความปลอดภัยตั้งแต่ขั้นตอนการ ออกแบบส่วนผสม จึงเป็นสาเหตุให้เกิงานวิจัยเรื่องนี้ขึ้นสำหรับงานวิจัยนี้มีการออกแบบสูตรส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตด้วย วิธีมาร์แชลล์ (Marshall) ตามมาตรฐานของกรมทางหลวง 3 ชนิด คือ 1) แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีส่วนผสมของวัสดุผิวทางเดิมปริมาณ ร้อยละ 50 2) แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีปริมาณผิวทางเดิมเป็นส่วนผสมทั้งหมด และ 3) แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้วัสดุมวลรวมใหม่เป็น ส่วนผสมทั้งหมด และใช้แอสฟัลต์ซีเมนต์เกรด AC 60/70 เป็นวัสดุเชื่อมประสาน นำมาทดสอบค่าความต้านทานการลื่นไถล (Skid resistance) ด้วยเครื่องมือ British Pendulum Tester และ Dynamic Friction Tester โดยจำลองการเสื่อมสภาพของผิว ทางในระยะยาว (Long-Term deterioration) ด้วยเครื่องเร่งการขัดสี (Three-Wheel Polishing Device) จากผลการทดสอบ ตามมาตรฐานมาร์แชลล์พบว่า การเพิ่มปริมาณวัสดุผิวทางเดิมในส่วนผสมของแอสฟัลต์คอนกรีต ส่งผลให้ค่าเสถียรภาพ (Stability) มีแนวโน้มสูงขึ้นและค่าการไหล (Flow) ลดลง สำหรับการทดสอบค่าความต้านทานการลื่นไถลของส่วนผสมทั้ง 3 ชนิดพบว่า แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้วัสดุมวลรวมใหม่เป็นส่วนผสมทั้งหมดมีค่าความฝืดที่คำนวณตามมาตรฐาน International Friction Index มากกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีส่วนผสมของวัสดุผิวทางเดิมปริมาณร้อยละ 50 และแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีปริมาณผิวทางเดิม เป็นส่วนผสมทั้งหมดมีค่าความเสียดทานต่ำสุด โดยค่าความฝืดของแอสฟัลต์คอนกรีตในงานวิจัยนี้มีความสัมพันธ์กับผลการทดสอบ Los Angeles Abrasion แต่ไม่สอดคล้องกับผลการทดสอบ Polished Stone value (PSV)

คำสำคัญ: ความต้านทานการลื่นไถล, วัสดุผิวทางเดิม, ความปลอดภัยของผิวถนน, แอสฟัลต์คอนกรีตผสมร้อน

Abstract

Recently, the resources for asphalt pavement construction have been decreased. Therefore, the asphalt hot-mix recycling was developed by using the recycled or reclaim asphalt pavement (RAP) as the asphalt concrete aggregates. The literature reviews indicate that the recent researches focused on the performances and strength

of asphalt hot-mix recycling, however, there are a few numbers of researches focusing on the safety issues of these materials. Accordingly, this research aims to evaluate the skid resistance of asphalt hot-mix recycling with different amount of RAP in the mixtures. Three types of asphalt concrete were designed according to the Marshall method; (1) the asphalt concrete with 50% of RAP, (2) the asphalt concrete with 100% of RAP, and (3) the asphalt concrete with no RAP. The asphalt binder grade AC60-70 was used as the supplementary binder for every asphalt concrete mixture in this research. The skid resistance of three asphalt mixtures were measured by British Pendulum Tester and Dynamic Friction Tester. The three-wheel polishing device was applied in order to simulate the long-term deterioration for each type of the mixtures. The strength test show that, as increasing amount of RAP, more stability of asphalt concrete mixture, however, less flow of the mixed materials. Moreover, the results show that asphalt concrete with no RAP product the skid resistance value greater than this value of asphalt concrete with 50% and 100% of RAP. This research reveals that the skid resistance of asphalt concrete is relate to the results of Los Angeles Abrasion test, but not for the Polished Stone Value (PSV) test.

Keywords: Skid Resistance, Reclaim Asphalt Pavement, Road Safety, Hot-Mix Asphalt

1. บทนำ

ในปัจจุบันโครงข่ายถนนทั่วประเทศไทยมีปริมาณเพิ่มขึ้นเพื่อตอบสนองทางด้านระบบคมนาคม ซึ่งร้อยละ 90 เป็นผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต ในขณะที่ปริมาณการใช้งานที่เพิ่มขึ้นอาจทำให้ผิวทางเสื่อมสภาพหรือได้รับความเสียหาย ส่งผลต่อความปลอดภัย (Safety) เช่นประสิทธิภาพการใช้งานลดลง ความเสียหายหรือความผิดของผิวทางไม่เพียงพอ อาจก่อให้เกิดอุบัติเหตุบนท้องถนนจึงต้องซ่อมแซมหรือทำการก่อสร้างถนนใหม่ ซึ่งส่งผลทำให้ทรัพยากรธรรมชาติที่มีอยู่อย่างจำกัดลดน้อยลง จากการศึกษางานวิจัยทั้งในประเทศและต่างประเทศ พบว่าวัสดุผิวทางเดิม (Reclaim Asphalt Pavement, RAP) ที่ได้จากการขุดหรือผิวทางเก่าเป็นอีกทางเลือกที่สามารถนำกลับมาใช้ผิวทางใหม่ได้

งานวิจัยของ Hu et al. (2012) ได้นำวัสดุผิวทางเดิม (RAP) มาเป็นส่วนผสมในผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต และทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานพบว่าเมื่อใช้ปริมาณผิวทางเดิมในปริมาณมากขึ้นจะช่วยเพิ่มค่าความต้านทานการเกิดร่องล้อ แต่ความต้านทานการเสียหายเนื่องจากความชื้น และประสิทธิภาพการทำงานที่อุณหภูมิต่ำจะลดลง ซึ่งมีลักษณะคล้ายกับวิจัยของ Izaks et al. (2015) เมื่อใช้ปริมาณผิวทางเดิมเพิ่มมากขึ้นส่งผลให้ค่าความต้านทานการเกิดร่องล้อสูงกว่าเล็กน้อยเมื่อเทียบกับผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตปกติ แต่ความต้านทานความล้าลดลง และเมื่อเติมแอสฟัลต์ซีเมนต์ใหม่เพื่อปรับปรุงคุณสมบัติวัสดุเชื่อมประสานในผิวทางเดิมจะช่วยเพิ่มความทนทาน และต้านทานความล้าได้ดี โดยงานวิจัยส่วนมากนิยมศึกษาทางด้านประสิทธิภาพการใช้งาน (Performance) ของแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีส่วนผสมของผิวทางเดิม และให้ผล

การศึกษาที่แตกต่างกันไปเนื่องจากคุณสมบัติ และการออกแบบส่วนผสมของวัสดุผิวทางเดิมที่มีความแตกต่างกัน ในการออกแบบวัสดุผิวทางให้มีความปลอดภัยนั้น มีความสัมพันธ์โดยตรงกับความเสียหายหรือค่าความต้านทานการลื่นไถลของพื้นทาง (Austroads, 2011; American Society for Testing and Materials, 2011; Chulalongkorn University Transportation Institute, 2013; Chulalongkorn University Transportation Institute, 2015) ด้วยเหตุนี้ คุณสมบัติด้านความเสียหายและการต้านทานการลื่นไถลของพื้นทาง จึงเป็นปัจจัยสำคัญประการหนึ่งที่จะส่งเสริมให้เกิดความปลอดภัยในการใช้รถใช้ถนนเพิ่มขึ้น และการศึกษาในประเด็นนี้ยังไม่มีมากนัก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเทศไทย

ผู้วิจัยจึงมีแนวคิดศึกษาในด้านความปลอดภัย (Safety) ของวัสดุที่ใช้ทำผิวทางโดยนำวัสดุผิวทางเก่า (RAP) มาเป็นส่วนผสม และออกแบบส่วนผสมด้วยวิธีมาร์แชลล์ตามมาตรฐานกรมทางหลวง เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนามาตรฐานการออกแบบผิวทางของประเทศไทยในอนาคต

2. วิธีดำเนินงานวิจัย

2.1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ มีขั้นตอนการดำเนินงาน แสดงในแผนผังวิธีการทำงาน ดังรูปที่ 1

2.2 วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

2.2.1 วัสดุผิวทางเดิม (RAP)

วัสดุผิวเดิมไม่ผ่านกระบวนการคัดแยกขนาดจำนวน 1 แหล่ง อายุของผิวทางก่อนการขุดลอก 4-5 ปี ซึ่งเป็นวัสดุ

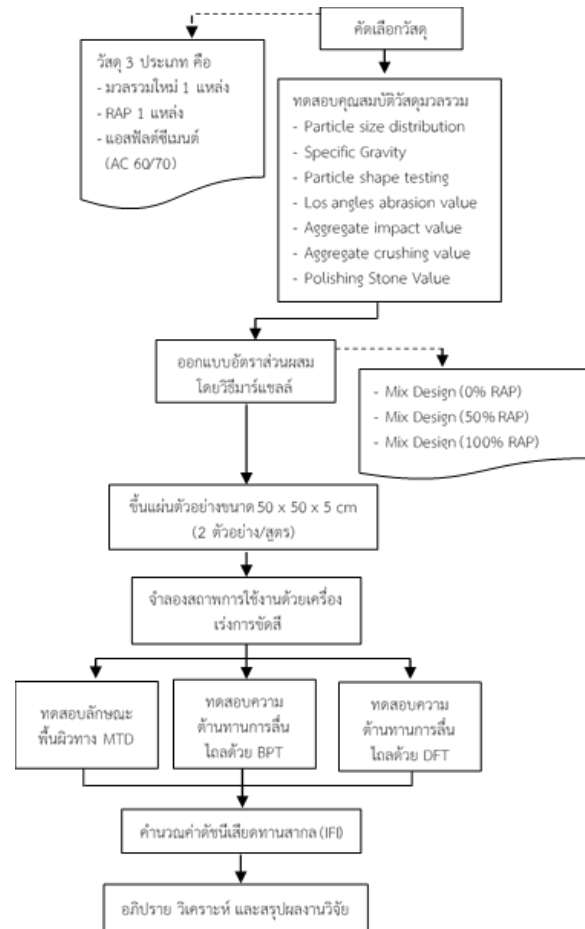
ที่เหมาะสมสำหรับนำกลับมาใช้เป็นวัสดุมวลรวมสำหรับ
ปูผิวทางใหม่ และมีคุณสมบัติให้เป็นไปตามมาตรฐานของ
กรมทางหลวงที่ ทล.-ม. 410/2542



รูปที่ 2 วัสดุผิวทางเดิม (RAP)

2.2.2 วัสดุมวลรวมใหม่ (Virgin Aggregates)

วัสดุมวลรวมใหม่ที่ใช้ในงานวิจัยเป็นหินปูน (Limestone)
เนื่องจากในการก่อสร้างสายทางบริเวณพื้นที่นี้ใช้หินปูน และ
มีแหล่งผลิตเพียงไม่กี่แหล่งที่ใช้ในการสร้างถนน ซึ่งวัสดุมวล
รวมเก็บจากยุงหินร้อน (Hot Bin) จำนวน 1 แหล่งจากโรงโม่
หินสุวรรณ จังหวัดสุโขทัย ทั้ง 4 ยุงหิน ประกอบด้วย Bin
ที่มีขนาด NAMS (Nominal Aggregate Maximum Size)
ขนาด 3/4 นิ้ว (Bin 4) ขนาด 1/2 นิ้ว (Bin 3) ขนาด 3/8 นิ้ว
(Bin 2) และหินฝุ่น (Bin 1) วัสดุมวลรวมใหม่มีคุณสมบัติตาม
มาตรฐานของกรมทางหลวงที่ ทล.-ม. 408/2532



รูปที่ 1 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงาน



รูปที่ 3 วัสดุมวลรวมใหม่ (Virgin Aggregates)

2.2.3 แอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt cement)

แอสฟัลต์ซีเมนต์ใช้เกรด 60-70 ตามข้อกำหนดของกรมทาง
หลวงที่ ทล.- ก. 401/2531 “Specification for Asphalt
Cement”

2.3 การทดสอบในห้องปฏิบัติการ

การกำหนดตัวแปรสำหรับการศึกษาในงานวิจัยนี้ ประกอบด้วย ตัวแปรตาม (Independent variable) คือ ค่าความต้านทานการลื่นไถล (Skid resistance) ซึ่งขึ้นอยู่กับ ตัวแปรต้น (Dependent variable) หลายตัวแปร อาทิเช่น 1) ปริมาณวัสดุผิวทางเดิม (RAP) 2) คุณสมบัติของมวลรวม 3) อายุการใช้งาน 4) ลักษณะพื้นผิว และ 5) สภาพแวดล้อม เช่น สภาพเปียก-แห้ง สิ่งเปรอะเปื้อน อุณหภูมิ และฤดูกาล เป็นต้น

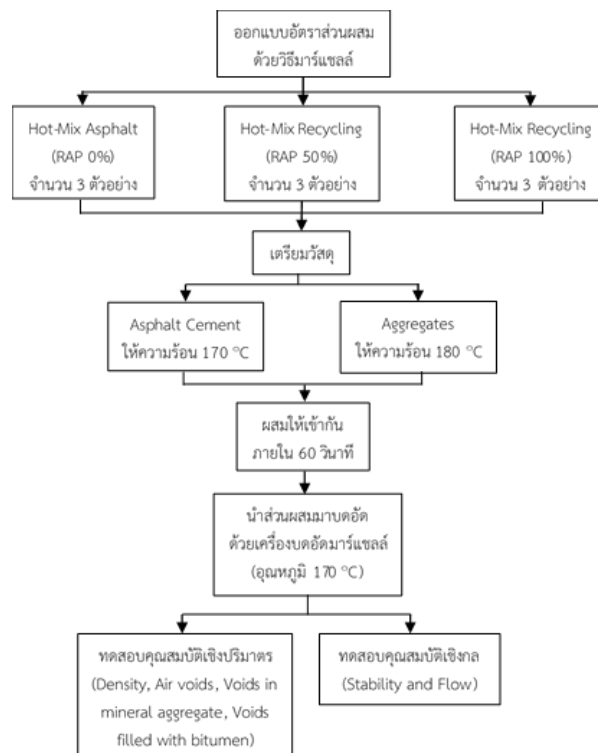
แต่สำหรับการศึกษานี้กำหนดตัวแปรต้น ทั้งหมด 4 ตัวแปร เนื่องจากเป็นตัวแปรที่สามารถทดสอบและหาค่าได้ในระหว่างการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต ซึ่งประกอบด้วย 1) ปริมาณวัสดุผิวทางเดิม (การออกแบบส่วนผสมของแอสฟัลต์คอนกรีตทั้ง 3 สูตรส่วนผสม) 2) คุณสมบัติของมวลรวม สำหรับประเมินค่าความต้านทานการลื่นไถล สามารถหาได้จากการทดสอบ Polishing Stone Value และ Los Angeles Abrasion ซึ่งเป็นการทดสอบที่กล่าวถึงลักษณะพื้นผิวของมวลรวมที่เปลี่ยนแปลงไปภายหลังการขัดสี 3) ความขรุขระของพื้นผิว สามารถหาได้จากการทดสอบ Sand Patch Method (SPM) และ 4) อายุการใช้งานของวัสดุผิวทาง

2.3.1 การออกแบบสูตรส่วนผสมของแอสฟัลต์คอนกรีต

สำหรับการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีปริมาณผิวทางเดิมเป็นส่วนผสมทั้งหมด และแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีส่วนผสมของวัสดุผิวทางเดิมปริมาณร้อยละ 50 อ้างอิงมาตรฐานกรมทางหลวงที่ ทล.-ม. 410/2542

และการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้วัสดุมวลรวมใหม่เป็นส่วนผสมทั้งหมด อ้างอิงตามมาตรฐานกรมทางหลวงที่ ทล.-ม. 408/2532 โดยกำหนดอัตราส่วนผสมของวัสดุมวลรวมเป็น 50:20:15:15 (ร้อยละของหิน Bin 1: Bin 2: Bin 3: Bin 4)

ขั้นตอนการออกแบบส่วนผสม แสดงในแผนผังวิธีการออกแบบส่วนผสม ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แผนผังวิธีการออกแบบส่วนผสม

2.3.2 การจำลองสภาพการใช้งาน และการทดสอบค่าความต้านทานการลื่นไถล ของแอสฟัลต์คอนกรีต

ในงานวิจัยนี้ดำเนินการทดสอบแอสฟัลต์คอนกรีต ซึ่งประกอบไปด้วย 3 สูตรส่วนผสม คือ 1) แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีส่วนผสมของวัสดุผิวทางเดิมปริมาณร้อยละ 50 2) แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีปริมาณผิวทางเดิมเป็นส่วนผสมทั้งหมด และ 3) แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้วัสดุมวลรวมใหม่เป็นส่วนผสมทั้งหมด

1. การเตรียมตัวอย่างทดสอบ

1) เตรียมวัสดุมวลรวม และแอสฟัลต์ซีเมนต์ตามอัตราส่วนผสม โดยใช้วัสดุมวลรวม 5 กิโลกรัมต่อ 1 ตัวอย่าง

2) นำวัสดุมวลรวมเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง และให้ความร้อนแอสฟัลต์ซีเมนต์ที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียส

3) ผสมส่วนผสมให้เข้ากัน และนำเข้าเตาอบที่อุณหภูมิ 170 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 4 ชั่วโมง

4) เตรียมแบบหล่อสำหรับขึ้นแผ่นตัวอย่างขนาด 50 x 50 ซม. เทส่วนผสมลงในแบบหล่อทำการบดอัดด้วยเครื่องตบดินแบบเดินตาม (Walk-behind Compactor)

5) พักตัวอย่างไว้เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำออกจากแบบหล่อ



รูปที่ 5 แผ่นตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต

2. การจำลองสภาพการใช้งานแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยเครื่องเร่งการขัดสี (Three-Wheel Polishing Device: TWPD)

สำหรับงานวิจัยนี้ดำเนินการจำลองสภาพผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตที่ผ่านการใช้งานโดยใช้เครื่องเร่งการขัดสี (TWPD) ซึ่งมีอ้างอิงงานวิจัยจากของ National Center for Asphalt Technology (NCAT) แห่งประเทศสหรัฐอเมริกา โดยทำการศึกษาพฤติกรรมการสูญเสียค่าความต้านทานการลื่นไถล (Skid Resistance) ของแอสฟัลต์คอนกรีต โดยใช้เครื่องมือเร่งการขัดสี (TWPD) ซึ่งเครื่องมือประกอบไปด้วยล้อขนาด 8 x 3 นิ้ว จำนวน 3 ล้อโดยล้อทั้ง 3 ยึดติดอยู่กับแผ่นจานหมุน (Circular Iron Plates) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 11-3/16 นิ้ว ควบคุมด้วยมอเตอร์ โดย Omega Digital Counter เป็นตัวนับจำนวนรอบสะสม และระหว่างการทดสอบจะจำลองสภาพผิวถนนแบบเปียก (Vollor & Hanson, 2016)



รูปที่ 6 เครื่อง Three-Wheel Polishing Device (TWPD)

โดยการจำลองสภาพการใช้งานด้วยเครื่องเร่งการขัดสี มีขั้นตอนการดำเนินงานดังต่อไปนี้

- 1) เตรียมแผ่นตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตเพื่อบรรจุเข้าเครื่องเร่งการขัดสี (TWPD)
- 2) ตั้งค่าจำนวนรอบการหมุนของการขัดสีอยู่ที่ 100 รอบต่อนาที
- 3) เปิดเครื่องเร่งการขัดสีพร้อมตั้งค่าจำนวนรอบการขัด โดยอ้างอิงจากงานวิจัยของ NCAT (0, 5,000, 10,000, 15,000, 25,000, 50,000 และ 100,000 รอบ)



รูปที่ 7 การทดสอบการขัดสีด้วยเครื่อง TWPD

3. การทดสอบความหนาเฉลี่ย (Mean Texture Depth, MTD) ของพื้นผิวแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธี Sand Patch Method (SPM) เพื่อหาค่าความขรุขระของพื้นผิว

เป็นการวัดโดยอาศัยวิธี Volumetric-Based หรือการวัดเชิงปริมาตรซึ่งจะเป็นการวัดลักษณะพื้นผิว Macro-Texture โดยการทดสอบอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM E 965 หรือ ISO 10844

1) เตรียมทราย (Ottawa) ที่ทราบความหนาแน่น (Density) และน้ำหนัก (Weight) เกล็ดบนแผ่นตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตให้แผ่เป็นรูปวงกลม

2) วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของทรายที่ทำการเกลี่ยบนแผ่นตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตพร้อมทั้งหาพื้นที่ (Area)

3) นำค่าได้จากการทดสอบมาคำนวณหาความหนาเฉลี่ยของพื้นผิวแอสฟัลต์คอนกรีต (Texter depth)

หมายเหตุ ดำเนินการทดสอบ MTD ก่อนการทดสอบค่าความต้านทานการลื่นไถลของแผ่นตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีต โดยทดสอบก่อน และภายหลังการจำลองสภาพการใช้งาน



รูปที่ 8 การทดสอบ MTD ด้วยวิธี Sand Patch Method (SPM)

4. การทดสอบค่าความต้านทานการลื่นไถลหรือค่าความเสียดทาน (Skid Resistance)

1) ทดสอบค่าความต้านทานการลื่นไถลด้วยเครื่องมือทดสอบ British Pendulum Tester (BPT) อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM E303

● เครื่องมือทดสอบ

a. British Pendulum Tester (BPT) โดยใช้แผ่นยางทดสอบรูปสี่เหลี่ยมพื้นผ้าขนาด 25 x 76 มม 6 มิลลิเมตร ยึดติดกับแผ่นอลูมิเนียม

b. เครื่องวัดอุณหภูมิ สำหรับวัดอุณหภูมิผิวหน้าตัวอย่าง



รูปที่ 9 การทดสอบค่าความต้านทานการลื่นไถลด้วยเครื่องมือ BPT ก่อนการจำลองสภาพการใช้งาน

- การทดสอบ

a. ประกอบชุดขาตั้งเครื่อง และปรับระดับฐานด้วยสกรูปรับระดับ พร้อมวางเครื่องมือทดสอบ BPT บนแผ่นตัวอย่างทดสอบ

b. ตั้งค่าศูนย์โดยการปล่อยแขนลูกตุ้มเหวี่ยงในแนวตั้งให้เข็มอ่านค่าหยุดที่ตำแหน่งเลขศูนย์

c. วัดระยะยดระหว่างยางทดสอบบนหัวลูกตุ้มกับผิวหน้าตัวอย่างให้ได้ระยะ 12.5 เซนติเมตร วัดอุณหภูมิ พร้อมสเปรย์น้ำให้เปียกทั้งผิวตัวอย่าง และยางทดสอบ

d. ปล่อยแขนลูกตุ้มเหวี่ยงในแนวตั้งพร้อมอ่านที่แสดงบนหน้าปัดในเครื่องทดสอบ BPT ทำซ้ำกัน 5 ครั้ง บันทึกผล

e. เมื่อทดสอบเสร็จแล้วให้หมุนเครื่องทดสอบอีกด้าน และทำซ้ำแบบเดิม

หมายเหตุ ทดสอบแผ่นตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตก่อน และหลังการจำลองสภาพการใช้งาน



รูปที่ 10 การทดสอบค่าความต้านทานการลื่นไถลด้วยเครื่องมือ BPT ภายหลังการจำลองสภาพการใช้งาน

2) ทดสอบค่าความต้านทานการลื่นไถลด้วยเครื่องมือทดสอบ Dynamic Friction tester (DFT) อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM E1911

- เครื่องมือทดสอบ

a. ฐานหมุนและจานหมุน (Fly wheel) มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 350 มิลลิเมตร เชื่อมติดกับ Spring Balance

b. แผ่นยาง (Rubber slider) 3 แผ่นติดอยู่บนจานหมุนระยะห่างเท่ากัน แต่ละแผ่นรับน้ำหนักจากเครื่องข้างละ 11.8 นิวตัน

c. ถังน้ำเลี้ยง (Water Supply) ที่อยู่สูงกว่าเครื่องทดสอบ 0.6 เมตร

d. เครื่องวัดอุณหภูมิ สำหรับวัดอุณหภูมิผิวหน้าตัวอย่าง

- การทดสอบ

a. วางเครื่องทดสอบ DFT ลงบนแผ่นตัวอย่าง พร้อมเชื่อมต่อเครื่องทดสอบกับคอมพิวเตอร์เพื่อเก็บข้อมูลทดสอบ

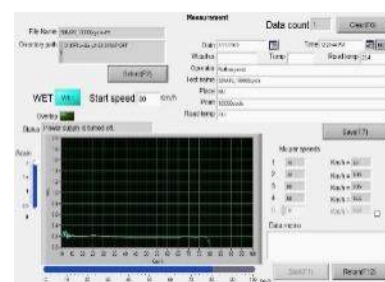
b. เปิดเครื่อง DFT พร้อมน้ำหล่อเลี้ยงระหว่างทดสอบเพื่อสร้างชั้นฟิล์ม

c. เครื่องจะทำการหมุนโดยมีรอบความเร็วสูงสุดที่ 80 กิโลเมตร/ชั่วโมง โดยจะแสดงผลเป็นกราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานและความเร็ว (กิโลเมตรต่อชั่วโมง)

หมายเหตุ ทดสอบแผ่นตัวอย่างแอสฟัลต์คอนกรีตก่อน และหลังการจำลองสภาพการใช้งาน



รูปที่ 11 การทดสอบค่าความต้านทานการลื่นไถลด้วยเครื่องมือ DFT ภายหลังการจำลองสภาพการใช้งาน



รูปที่ 12 ผลทดสอบค่าความต้านทานการลื่นไถลด้วยเครื่องมือ DFT

2.3.3 การทดสอบคุณสมบัติวัสดุรวมเพื่อประเมินค่าความต้านทานการลื่นไถล

1. Polishing Stone Value Test (PSV) อ้างอิงตามมาตรฐานการทดสอบของ B.S. 812 (1967) สำหรับงานวิจัยได้กำหนดตัวแปรต้น (Dependent variable) ได้แก่ พื้นผิววัสดุรวม (Micro-Texture) ตัวแปรตาม (Independent variable)

ได้แก่ อัตราการลดลงของความต้านทานการสิ้นเปลืองในเบื้องต้น ตัวแปรควบคุม (Control Variable) ได้แก่ จำนวนรอบการขัดสี ในการทดสอบตัวอย่างวัสดุรวม

1) เครื่องมือทดสอบ

a. เครื่องมือการขัดสี (Accelerated Polishing Machine)

b. British Pendulum Tester (BPT) โดยใช้แผ่นยาง ทดสอบรูปสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 3.1 หนา 0.6 เซนติเมตร ยึดติด กับแผ่นอลูมิเนียมและแผ่นยางต้องมีอายุน้อยกว่า 6 เดือน และมีคุณสมบัติดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติค่า Resilience % และ Hardness, IRH degree จำแนกตามอุณหภูมิ (BS 812-114:1989)

คุณสมบัติ	อุณหภูมิ (องศาเซลเซียส)				
	0	10	20	30	40
Resilience %	42 - 47	55 - 62	61 - 68	64 - 71	66 - 73
Hardness, IRH degree	55 ± 5				

2) การเตรียมตัวอย่าง

a. ตัวอย่างหินผ่านตะแกรง 9.52 มิลลิเมตร. (BS) ค้างบน ตะแกรง 7.94 มิลลิเมตร ตัวอย่างหินมีหน้าเรียบ ไม่แบน ไม่ยาว เกินไป

b. นำตัวอย่างหินมาล้างให้สะอาด และผึ่งให้แห้ง

c. เตรียมแบบหล่อ (Mold) พร้อมทาน้ำมัน

d. เรียงเม็ดหินลงในแบบหล่อ จำนวน 4 แบบหล่อ

e. โรยทรายละเอียดตามร่องระหว่างเม็ดหิน และฉีดน้ำให้ ทรายเปียก ทำการวางเหล็กเสริมขนาด 1.2 มิลลิเมตร

f. หล่อด้วยปูนทรายอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนักเมื่อปูน ทรายแข็งตัว ให้ปาดผิวหน้าให้เรียบ

g. บ่มตัวอย่างที่หล่อในแบบ 24 ชั่วโมงคลุมด้วยผ้าเปียก

h. ถอดตัวอย่างออกจากแบบ และนำไปแช่น้ำ 7-14 วัน โดยคว่ำตัวอย่างลง



รูปที่ 13 ตัวอย่างสำหรับการทดสอบ PSV

3) การขัดแผ่นตัวอย่างด้วยเครื่องขัด (Accelerated Polishing Machine)

a. นำตัวอย่างมาจัดเรียงในวงล้อเหล็ก และเดินเครื่อง ดำเนินขัดแผ่น 3 ชั่วโมงแรกขัดด้วยผงหยาบ ปลอยผงหยาบ ด้วยอัตรา 20-35 กรัมต่อนาที และปลอยน้ำจากขวดที่ติดอยู่ ด้านบนเครื่องทดสอบ

b. หยุดเครื่อง และดำเนินการขัดแผ่น 3 ชั่วโมงขัดด้วยผง ละเอียด เมื่อดำเนินการขัดเสร็จเรียบร้อยให้ฉีดน้ำทำความสะอาด แผ่นตัวอย่าง และทำความสะอาดเครื่องขัด



รูปที่ 14 ทำการขัดตัวอย่างด้วยเครื่องขัด

4) การทดสอบหาค่าเฉลี่ย PSV โดยใช้เครื่อง BPT

a. ปรับเครื่องมือโดยปรับระดับน้ำที่ฐานเครื่อง

b. ทดลองแกว่งเปล่า ๆ โดยไม่สัมผัสกับตัวอย่างเข็มต้องชี้ ที่เลข 0

c. เมื่อปรับเรียบร้อยแล้วจึงนำตัวอย่างเข้าที่จับ (C - clamp)

d. เลื่อนแขนแกว่งให้สัมผัสตัวอย่างเป็นระยะ 7.6 ± 0.1 เซนติเมตร

e. รดน้ำแผ่นตัวอย่างแล้วกดปุ่มปลอยแขนแกว่งให้แขน แกว่งสัมผัสตัวอย่างอ่านค่า PSV จากแผ่นดัชนี

f. อ่านค่าที่ได้จากการทดลอง 5 ครั้ง บันทึกค่าที่อ่านไว้ ค่า PSV เฉลี่ยของตัวอย่างหินแต่ละแผ่นจะสามารถคำนวณได้จาก ค่าที่อ่านได้ 3 ครั้งหลังและค่า PSV เฉลี่ยทั้งหมดจะได้รับการ เฉลี่ยจากตัวอย่างทั้ง 4 แผ่นอีกครั้งหนึ่ง



รูปที่ 15 ทดสอบ PSV โดยใช้เครื่อง BPT

การหาค่า PSV จะกระทำ 2 ครั้ง คือ ทดลองก่อนขัดตัวอย่างด้วยเครื่องขัดเรียกว่า ค่า PSV ก่อนขัดหรือ PSV (BEF) และทดลองหลังจากขัดด้วยเครื่องขัด เรียกว่า ค่า PSV หลังขัดหรือ PSV (AFT) ค่า PSV ที่นำไปใช้เปรียบเทียบคุณลักษณะของหินต่าง ๆ คือค่า PSV หลังขัดหรือ PSV (AFT) ค่า PSA (BEF) จะมากกว่าค่า PSV (AFT) เสมอไป

3. ผลการทดสอบ

3.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติวัสดุมวลรวม

สำหรับงานวิจัยนี้นอกจากทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุมวลรวมของวัสดุมวลรวมผิวทางเดิม (RAP) และวัสดุมวลรวมใหม่ (Virgin Aggregates) แล้วนั้นได้มีการทดสอบคุณสมบัติวัสดุมวลรวมเพื่อประเมินความสามารถในการต้านทานการลื่นไถลหรือความเสียดทาน จากผลการทดสอบ Los Angeles Abrasion (LA) แสดงผลดังตารางที่ 2 และผลการทดสอบ Polishing Stone Value (PSV) แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 2 ผลทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุมวลรวม

คุณสมบัติ	Aggregates					มาตรฐาน
	Fine	Coarse			RAP	
	Dust	3/8"	1/2"	3/4"		
Specific Gravity	2.65	2.67	2.67	2.68	2.66	-
Absorption (%)	1.42	0.60	0.50	0.48	0.24	-
Flakiness Index (%)	-	7.2	20.0	56.3	42.4	≤ 30
Elongation Index (%)	-	40.5	20.0	29.9	9.5	
Abrasion (%)	24.4				29.6	≤ 40

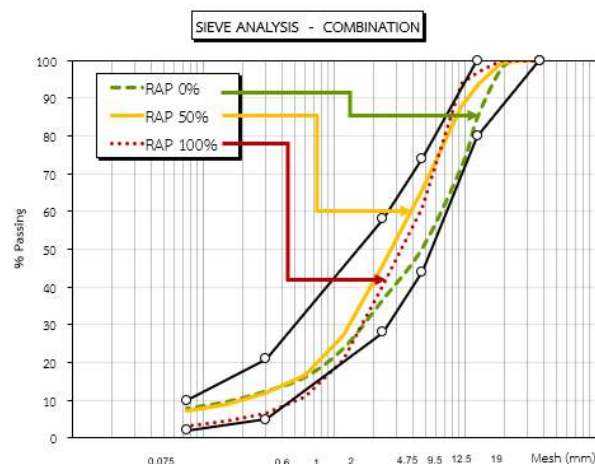
ตารางที่ 3 ผลทดสอบคุณสมบัติด้านความเสียดทานของวัสดุมวลรวม

วัสดุ รวม	PSV (Before)	PSV (After)	ΔPSV (After – Before)
Hot Bin	58.3	29.9	28.4
RAP	63.7	39.3	24.4

สำหรับวัสดุมวลรวมผิวทางเก่าให้ค่าการสึกหรอร้อยละ 29.6 ซึ่งมากกว่าวัสดุมวลรวมใหม่ และการทดสอบ Polishing Stone Value โดยอัตราการลดลง (ก่อนการขัด - หลังการขัด) ของวัสดุมวลรวมผิวทางเก่าจะมีค่าที่น้อยกว่าวัสดุมวลรวมใหม่

3.2 ผลการออกแบบส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีต

จากรูปที่ 15 เป็นกราฟแสดงขนาดผลของวัสดุมวลรวมภายหลังจากการผสมพบว่าสูตรส่วนผสมแอสฟัลต์คอนกรีตทั้ง 3 สูตรส่วนผสมนั้นผ่านตามเกณฑ์ที่กำหนด และนำไปออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีตด้วยวิธีมาร์แชลล์

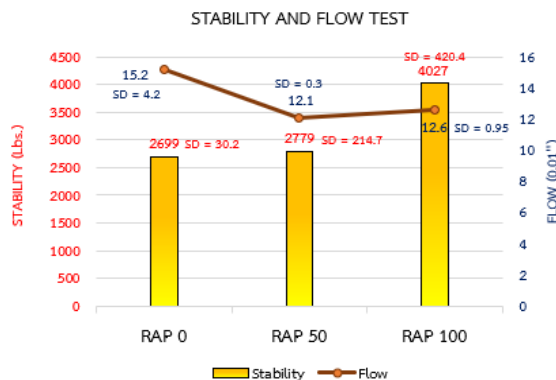


รูปที่ 15 ขนาดผลของมวลรวมภายหลังจากผสม

เมื่อนำมาทดสอบคุณสมบัติเชิงปริมาตร และคุณสมบัติเชิงกลของมาร์แชลล์ จากผลทดสอบแสดงดังตารางที่ 4 ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยจากสามก้อนตัวอย่าง พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณวัสดุผิวทางเดิม (RAP) ในส่วนผสมของแอสฟัลต์คอนกรีตนั้น ส่งผลให้ค่าเสถียรภาพเพิ่มขึ้น แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีปริมาณผิวทางเดิมเป็นส่วนผสมทั้งหมดนั้นให้ค่าสูงสุดอยู่ที่ 4,027 Lbs. และแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีปริมาณผิวทางเดิมร้อยละ 50 ให้ค่าการไหลต่ำสุดอยู่ที่ 12.1 (0.01 in) ดังแสดงในรูปที่ 15 แต่สูตรส่วนผสมทั้ง 3 ผ่านเกณฑ์ที่กำหนดของมาตรฐานกรมทางหลวง พร้อมนำไปขึ้นแผ่นตัวอย่างสำหรับจำลองสภาพการใช้งาน และทดสอบค่าความต้านทานการลื่นไถลโดยจะกล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

ตารางที่ 4 ผลทดสอบการออกแบบแอสฟัลต์คอนกรีต

MIX PROPORTION	RAP	0	50	100	ทล.ม. 408	ทล.-ม. 410
	HB 1	50	35	0		
	HB 2	20	5	0		
	HB 3	15	5	0		
	HB 4	15	5	0		
Asphalt Cement (%)		5.00	4.80	5.40	-	-
Density (gm./ml)		2.400	2.360	2.390	-	-
Air Void (%)		3.3	5.0	3.1	3 - 5	3 - 6
VMA (%)		14.0	15.1	14.5	14	14
VFB (%)		76.4	65.8	78.3	-	-
Stability (lbs)		2,699	2,779	4,027	1,800	1,500
Flow (0.01")		15.2	12.1	12.6	8 - 16	8 - 16

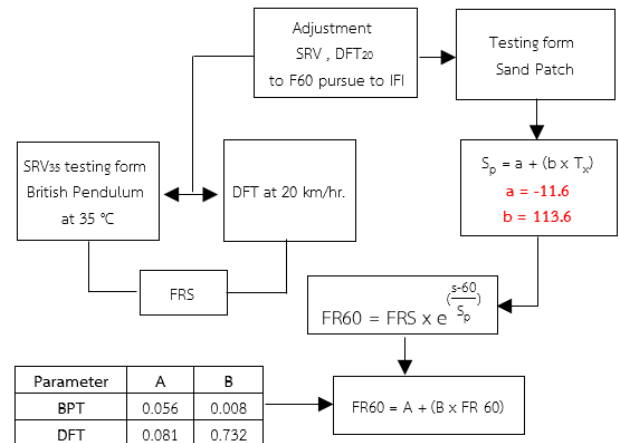


รูปที่ 16 ผลการทดสอบเสถียรภาพ และการไหลของแอสฟัลต์คอนกรีต

3.3 ผลการทดสอบค่าความต้านทานการลื่นไถลผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีต

3.3.1 ผลการทดสอบค่าความต้านทานการลื่นไถล

จากผลการทดสอบค่าความต้านทานการลื่นไถลด้วยเครื่องมือ BPT และ DFT ของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตทั้ง 3 สูตรส่วนผสม ผู้วิจัยได้ดำเนินการปรับแก้ให้เป็นดัชนีค่าความเสียดทานสากล (International Friction Index: IFI) ซึ่งเป็นวิธีการวัดค่าความต้านทานการลื่นไถลของเครื่องมือทดสอบค่าความเสียดทานแบบต่าง ๆ และนำค่ามาปรับแก้ความเร็วในการลื่นไถลที่ความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เพื่อให้เกิดความสอดคล้องกันระหว่างเครื่องมือแต่ละวิธี (Wilson, 2006) โดยมีขั้นตอนดังแสดงรูปที่ 17



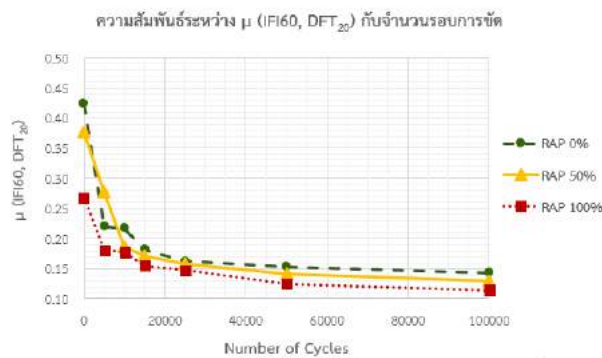
รูปที่ 17 ขั้นตอนการการคำนวณดัชนีความเสียดทานสากล (IFI) (สถาบันการขนส่ง จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย, 2013)

จาก รูปที่ 18 และ รูปที่ 19 เป็นกราฟระหว่างค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานที่ปรับแก้ความเร็วในการลื่นไถลที่ความเร็ว 60 กิโลเมตรต่อชั่วโมง (IFI60) กับจำนวนรอบการขัดของเครื่องมือ BPT และ DFT ตามลำดับ เมื่อมีการใช้งานเพิ่มมากขึ้น แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้วัสดุผสมใหม่เป็นส่วนผสมทั้งหมดจะมีค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทาน (IFI60) มากกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีส่วนผสมของวัสดุผิวทางเดิมปริมาณร้อยละ 50 และแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีปริมาณผิวทางเดิมเป็นส่วนผสมทั้งหมดมีค่าความเสียดทานต่ำสุด

และ ตารางที่ 5 แสดงถึงค่าความหนาเฉลี่ย (MTD) ของแอสฟัลต์คอนกรีตทั้ง 3 สูตรส่วนผสมเมื่อทดสอบด้วยวิธี Sand Patch Method (SPM) ก่อนการจำลองสภาพการใช้งาน (Initial) และภายหลังการจำลองสภาพการใช้งาน (Final) พบว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้วัสดุผสมใหม่เป็นส่วนผสมทั้งหมดมีค่ามากกว่าแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีส่วนผสมของวัสดุผิวทางเดิมปริมาณร้อยละ 50 และแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีปริมาณผิวทางเดิมเป็นส่วนผสมทั้งหมดมีค่าต่ำสุด



รูปที่ 18 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง μ (IFI60, BPT₁₀) กับจำนวนรอบการขัด



รูปที่ 19 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง μ (IFI60, DFT₂₀) กับจำนวนรอบการขัด

ตารางที่ 5 ค่าความหนาเฉลี่ย (MTD) ของพื้นผิวแอสฟัลต์คอนกรีต

Type	Mean Texture Depth (MTD)	
	Initial	Final
RAP 0%	0.870	0.473
RAP 50%	0.682	0.424
RAP 100%	0.660	0.361

4. อภิปราย และวิเคราะห์ผลการทดสอบ

จากตารางที่ 6 เป็นการเปรียบเทียบผลการทดสอบคุณสมบัติวัสดุมวลรวม คุณสมบัติมาร์แชลล์ และความต้านทานการลื่นไถลของแอสฟัลต์คอนกรีตทั้ง 3 สูตรส่วนผสม ประกอบด้วย 1) แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีส่วนผสมของวัสดุผิวทางเดิมปริมาณร้อยละ 50 2) แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีปริมาณผิวทางเดิมเป็นส่วนผสมทั้งหมด และ 3) แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้วัสดุมวลรวมใหม่เป็นส่วนผสมทั้งหมด

ตารางที่ 6 เปรียบเทียบผลการทดสอบคุณสมบัติวัสดุมวลรวม คุณสมบัติมาร์แชลล์ ความต้านทานการลื่นไถล และความหนาเฉลี่ยพื้นผิวของแอสฟัลต์คอนกรีตทั้ง 3 สูตรส่วนผสม

Type	Aggregates properties		Marshall properties		Skid Resistance	MTD
	Abrasion	PSV	Stability	Flow		
RAP 0 %	✓	✗	✗	✓✓	✓✓	①
RAP 50%	N/A	N/A	✓	✓	✓	②
RAP 100%	✗	✓	✓✓	✗	✗	③

หมายเหตุ ✓✓ ดีที่สุด, ✓ ปานกลาง, ✗ แย่ที่สุด ① มากสุด, ② ปานกลาง, ③ ต่ำที่สุด

4.1 การทดสอบคุณสมบัติวัสดุมวลรวม

จากตารางที่ 6 แสดงว่า ผลการทดสอบวัสดุมวลรวมใหม่ให้ค่าการสึกหรอ LAA (Abrasion) ต่ำกว่าวัสดุมวลรวมจากผิวทางเก่า นั่นหมายถึงวัสดุมวลรวมใหม่นั้นมีความทนทานต่อการสึกหรอดีกว่ามวลรวมจากผิวทางเก่า และเมื่อประเมินผล

ทดสอบกับค่าความต้านทานการลื่นไถลเมื่อปรับแก้ตามวิธีการของ IFI พบว่าผิวทางที่มีมวลรวมใหม่เป็นส่วนประกอบมีความต้านทานการลื่นไถลสูงกว่าวัสดุมวลรวมผิวทางเก่า ซึ่งมีความสอดคล้องกับผลการทดสอบ Abrasion แต่ในทางกลับกัน การทดสอบ Polishing Stone Value (PSV) ของวัสดุมวลรวมผิวทางเก่าพบว่าค่า Δ PSV ต่ำกว่าวัสดุมวลรวมใหม่ ซึ่งให้เห็นมวลรวมจากผิวทางเก่ามีความทนทานต่อการขัดสีสูงกว่ามวลรวมใหม่ แต่เมื่อประเมินผลทดสอบเทียบกับค่าความต้านทานการลื่นไถลเมื่อปรับแก้ตามวิธีการของ IFI พบว่าผลการทดสอบไม่บ่งบอกถึงความสัมพันธ์กับค่า Δ PSV

4.2 ผลการทดสอบค่าความต้านทานการลื่นไถลของผิวทางแอสฟัลต์คอนกรีตทั้ง 3 ส่วนผสม

รูปที่ 18 แสดงค่าความต้านทานการลื่นไถล (Skid Resistance Value, SRV) จากการทดสอบด้วยเครื่อง British Pendulum Tester (BPT) และ รูปที่ 19 แสดงค่าความต้านทานการลื่นไถลจากการทดสอบด้วยเครื่อง Dynamic Friction tester (DFT) เพื่อวิเคราะห์ความเหมาะสมในการก่อสร้างถนนแอสฟัลต์คอนกรีตให้เป็นไปตามมาตรฐานของกรมทางหลวง ซึ่งผลการเปรียบเทียบตามวิธีการของ IFI (International Friction Index) ให้ค่าความเสียดทานที่มีความเหมาะสมตามลำดับดังนี้ 1) แอสฟัลต์คอนกรีตที่ใช้วัสดุมวลรวมใหม่เป็นส่วนผสมทั้งหมด 2) แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีส่วนผสมของวัสดุผิวทางเดิมปริมาณร้อยละ 50 และ 3) แอสฟัลต์คอนกรีตที่มีปริมาณผิวทางเดิมเป็นส่วนผสมทั้งหมด ดังที่สรุปไว้ในตารางที่ 6

จากผลการทดสอบพบว่า เมื่อเพิ่มอัตราส่วนมวลรวมผิวทางเก่าในแอสฟัลต์คอนกรีตมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความต้านทานการลื่นไถลลดลง ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะพื้นผิวแอสฟัลต์คอนกรีตที่แสดงด้วยผลการทดสอบค่าความขรุขระ MTD (ตารางที่ 5)

ในทางกลับกันเมื่อเพิ่มปริมาณผิวทางเก่าจะส่งผลให้ในด้านประสิทธิภาพการใช้งาน (Performance) ดีขึ้น แต่มีลักษณะแข็งเปราะและขาดความยืดหยุ่น ดังแสดงด้วยค่า Stability และ Flow (รูปที่ 16) เนื่องจากวัสดุเชื่อมประสานในผิวทางเก่าผ่านการใช้งานมาเป็นระยะเวลาหนึ่ง วัสดุเชื่อมประสานอาจเสื่อมสภาพส่งผลให้แอสฟัลต์คอนกรีตมีความแข็ง และเกิดการแตกร้าวได้ง่าย

5. บทสรุป

งานวิจัยนี้ มุ่งเน้นศึกษาพฤติกรรมความต้านทานการลื่นไถลของวัสดุแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีส่วนผสมของผิวทางเก่าในอัตราส่วนที่ต่างกัน ซึ่งอาจส่งผลต่อความปลอดภัยของผู้ใช้รถใช้

ถนน จากการออกแบบส่วนผสมตามมาตรฐานมาร์แชลและการทดสอบค่าความต้านทานการลื่นไถลตามมาตรฐาน IFI พบว่า

- ค่าความต้านทานการลื่นไถลคำนวณตามมาตรฐาน IFI ของแอสฟัลต์คอนกรีตจะลดลงเมื่อปริมาณผิวทางเก่าในส่วนผสมเพิ่มมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับค่า MTD ของผิวแอสฟัลต์คอนกรีต ในทางกลับกันเมื่อเพิ่มปริมาณผิวทางเก่าในส่วนผสม ส่งผลให้ความแข็งแรงของส่วนผสมเพิ่มมากขึ้นแต่วัสดุขาดความยืดหยุ่น มีความเปราะ

- ผลการศึกษาพบว่าค่าความผิดของแอสฟัลต์คอนกรีตที่มีส่วนผสมของผิวทางเดิมนั้น ขึ้นอยู่กับค่าความต้านทานการสึกหรอ (LAA) แต่ไม่มีความสัมพันธ์กับค่า Polishing Stone Value (Δ PSV) เพราะพบว่า ค่าความต้านทานการสึกหรอที่มีค่าต่ำ ส่งผลให้ค่าความผิดตามมาตรฐาน IFI สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับผลการทดสอบทั้ง 3 ส่วนผสม

6. ข้อเสนอแนะ

6.1 สำหรับการศึกษาในงานวิจัยนี้ใช้วัสดุผิวทางเก่า (RAP) เป็นจำนวน 1 แหล่ง เพื่อให้ได้ผลการทดสอบที่แม่นยำมากยิ่งขึ้นควรมีการเพิ่มจำนวนแหล่งวัสดุผิวทางเก่า

6.2 เนื่องจากประสิทธิภาพการใช้งานของการนำวัสดุผิวทางเก่ามาใช้ใช้นั้น สิ่งที่ต้องคำนึงถึงนอกจากคุณสมบัติของวัสดุรวมในผิวทางเก่าแล้วนั้น จะต้องคำนึงถึงคุณสมบัติแอสฟัลต์ซีเมนต์ (Asphalt Binder) ในผิวทางเก่า ดังนั้นควรมีการทดสอบคุณสมบัติแอสฟัลต์ซีเมนต์ในผิวทางเก่าเพิ่มเติม

6.3 การทดสอบคุณสมบัติของวัสดุรวมเพื่อประเมินความสามารถในการต้านทานการลื่นไถลหรือความเสียดทานได้แก่ Polishing Stone Value (PSV) ได้ดำเนินการทดสอบเพียง 1 ตัวอย่าง ควรมีการทดสอบตัวอย่างเพิ่ม

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ ส่วนหนึ่งได้รับเงินทุนสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร สำหรับนายณัฐวิชัย เศรษฐยุทธพงษ์ (ทุนสนับสนุนการศึกษาสำหรับนิสิตระดับปริญญาโท ประจำปีการศึกษา 2562) นอกจากนี้ คณะผู้วิจัยต้องขอขอบคุณ รศ.ดร. พิรพงศ์ จิตเสงี่ยม จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ และ บริษัท อินฟรา พลัส จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือทดสอบ Dynamic Friction tester (DFT) และเครื่องจำลองการขัดสี นอกจากนี้ ยังขอขอบพระคุณ นายบำรุง บัวชื่น ที่ถ่ายทอดประสบการณ์ สอนวิธีการทำงานรวมถึงช่วยดูแลความปลอดภัยตลอดการทำงาน

8. เอกสารอ้างอิง

- American Society for Testing and Materials. (2011). *ASTM E274/E274M-11 Standard Test Method for Skid Resistance of Paved Surfaces Using a Full-Scale Tire*. West Conshohocken, PA.
- Austrroads. (2011). *Guidance for the Development of Policy to Manage Skid Resistance*. Austrroads Research Report, AP-374/11.
- Chulalongkorn University Transportation Institute. (2013). *Project for design and development of a method for estimating skid resistance of asphalt concrete with characteristics of aggregates*. Chulalongkorn University.
- Chulalongkorn University Transportation Institute. (2015). *Project for design and study of skid resistance by pavement age*. Chulalongkorn University.
- Hu, X., Nie, Y., Feng, Y., & Zhanq, Q. (2012). Pavement Performance of Asphalt Surface Course Containing Reclaimed Asphalt Pavement (RAP). *Journal of Testing and Evaluation*, 1-7.
- Izaks, R., Haritonovs, V., Klasa, I., & Zaumanis, M. (2015). Hot Mix Asphalt With High RAP Content. *Procedia Engineering* 114, 676-684.
- Vollor, T. W. (2006). *Development of Laboratory Procedure for Measuring Friction of HMA Mixture-Phase I*. National Center for Asphalt Technology (NCAT).

การนำฉนวนกันความร้อนเหลือทิ้งประยุกต์เป็นไส้กรองเครื่องฟอกอากาศ Utilization of PU Foam Insulation Waste to Air Purifier Filter

กมลชัย ยงประพัฒน์^{1*}, นิดา ชัยมูล², มณีรัตน์ องค์กรธรณ์³

Kamonchai Yongprapat^{1*}, Nida Chaimoon², Maneerat Ongwandee³

¹หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

²สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

³วิทยาลัยพัฒนามหานคร มหาวิทยาลัยนวมินทราธิราช กรุงเทพมหานคร

¹Master of Engineering Program in Civil Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University

²Division of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University

³Institute of Metropolitan Development, Navamindradhiraj University

* Corresponding author e-mail: 61010351006@msu.ac.th

(Received: 24 May 2020, Revised: 3 December 2020, Accepted: 17 December 2020)

บทคัดย่อ

ในปี 2560 ประเทศไทยผลิตขยะอิเล็กทรอนิกส์สูงถึง 0.4 ล้านตัน ซึ่งในจำนวนนี้เป็นตู้เย็นที่หมดสภาพโดยมีการคัดแยกชิ้นส่วนที่มูลค่าไปจำหน่าย ในขณะที่ฉนวนกันความร้อนโฟมพียูปริมาณกว่า 20,000 ลบ.ม. ถูกทิ้งในบ่อขยะของชุมชนหรือถูกลักลอบเผาทิ้ง งานวิจัยนี้ต้องการเพิ่มมูลค่าขยะโฟมพียูด้วยการใช้เป็นไส้กรองเครื่องฟอกอากาศ โดยออกแบบและสร้างเครื่องฟอกอากาศแบบเคลื่อนย้ายได้ที่ใช้ไส้กรองโฟมพียูจากฉนวนกันความร้อนเพื่อดักจับฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน (PM_{2.5}) โครงสร้างเครื่องฟอกอากาศทำจากอะลูมิเนียมขนาด 36x36x78 ลบ.ซม. หุ้มด้วยแผ่นเหล็กเรียบ ติดตั้งพัดลมทอยโซ่ ขนาด 220 วัตต์ มีกริลเลอร์เพื่อกระจายลม ส่วนไส้กรองทำจากเฟรมอะลูมิเนียมขนาด 31x5x44 ลบ.ซม. ทดสอบโฟมพียู 3 รูปแบบ ได้แก่ แบบเส้น แบบลูกเต๋า และแบบก้อน วัดสมรรถนะของเครื่องฟอกด้วยค่าอัตราการส่งอากาศที่ถูกฟอกต่อหน่วยเวลา (CADR) สำหรับกำจัดฝุ่น PM_{2.5} โดยจัดรูปในห้องทดสอบ 8 ลบ.ม. ให้ได้ความเข้มข้นเริ่มต้นประมาณ 250 มก./ลบ.ม. คำนวณค่า CADR จากข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น PM_{2.5} เป็นเวลา 1.5 ชม. ด้วยสมการสมดุลมวลของฝุ่นในห้องทดสอบและใช้การวิเคราะห์ถดถอยแบบไม่เป็นเชิงเส้น ผลการทดสอบพบว่า เมื่อสิ้นสุดระยะเวลาทดสอบระดับฝุ่นลดลงเหลือประมาณ 3-43 มก./ลบ.ม. เครื่องฟอกอากาศมีค่า CADR ได้ดังนี้ ไส้กรองโฟมพียูแบบเส้น 14.3, แบบลูกเต๋า 18.6 และแบบก้อน 21.3 ลบ.ม./ชม. โดยไส้กรองแบบก้อนให้ค่า CADR ใกล้เคียงเครื่องฟอกอากาศเชิงพาณิชย์บางรุ่นที่ใช้ไส้กรอง HEPA กำลังไฟ 35 วัตต์ เมื่อเสริมไส้กรองโฟมพียูด้วยแผ่นกรองหยาบสามารถเพิ่ม CADR ของเครื่องฟอกได้ร้อยละ 50-90 ค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องฟอกประมาณ 5,000 บาท ทั้งนี้โฟมพียูที่หมดความสามารถในการดักจับฝุ่นแล้วสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในขั้นสุดท้ายด้วยการผสมผลิตภัณฑ์มวลเบา

คำสำคัญ : โฟมพียู, เครื่องฟอกอากาศ, ค่าซีเอ็ดอาร์, ฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน

Abstract

In 2017, Thailand's electronic waste production reached 0.4 million which included refrigerator waste. Refrigerators that are no longer required are sorted and separated to recycle valued parts, while over 20,000 m³

of rigid polyurethane (PU) insulating foam is discarded in community dumping sites or illegally burned. This research aimed to add value to the PU foam waste by adopting it as an air purifier. Thus, we designed and constructed a prototype of a portable air purifier embedding a filter to trap $PM_{2.5}$ made from PU foam. Our designed $36 \times 36 \times 78\text{-cm}^3$ air purifier was made from aluminum and covered with galvanized iron flat sheet. It was equipped with a 220-W centrifugal fan and griller tower to distribute dirty air evenly. An air filter cartridge was a $31 \times 5 \times 44\text{-cm}^3$ aluminum frame filling with three individual PU foam shapes, including stripe, cubic and ball. We evaluated the air purifier performance, in terms of a clean air delivery rate (CADR) for removal of $PM_{2.5}$. Test particles were generated by burning an incense stick in an 8-m^3 test chamber to achieve an initial concentration of $250\text{ }\mu\text{g/m}^3$. CADRs were determined by fitting 1.5-h concentration profiles to mass balance models, using nonlinear regression. At the end of testing, the $PM_{2.5}$ concentrations were as low as $3\text{--}43\text{ }\mu\text{g/m}^3$. The CADRs for the stripe, cubic and ball shapes were 14.3, 18.6 and $21.3\text{ m}^3/\text{h}$, respectively. The ball-shape filter exhibited the similar CADR to the 35-Watt HEPA commercial air purifier. An additional prefilter sheet helped to increase the CADRs for all PU foam filter shapes by 50-90%. The production cost is 5,000 baht. It is noteworthy that the expired PU foam air filter can be ultimately used as an aggregate for lightweight concrete.

Keywords: PU foam, Air purifier, CADR, $PM_{2.5}$

1. ที่มาและความสำคัญ

ปัจจุบันเทคโนโลยีมีบทบาทสำคัญต่อการดำรงชีวิตประจำวันของมนุษย์มากขึ้น เช่น เครื่องใช้อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ เพื่อตอบสนองความต้องการของผู้ใช้ที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามเครื่องใช้อิเล็กทรอนิกส์เหล่านี้ได้กลายเป็นขยะในท้ายสุด การสำรวจในประเทศไทยโดยกรมควบคุมมลพิษในปี 2560 พบขยะอิเล็กทรอนิกส์ประมาณ 400,000 ตัน สามารถแบ่งออกได้ดังนี้ โทรศัพท์ 106,335 ตัน คิดเป็นร้อยละ 27 เครื่องปรับอากาศ 74,799 ตัน คิดเป็นร้อยละ 19 ตู้เย็น 65,765 ตัน คิดเป็นร้อยละ 17 เครื่องซักผ้า 60,492 ตัน คิดเป็นร้อยละ 16 คอมพิวเตอร์ 57,058 ตัน คิดเป็นร้อยละ 15 นอกนั้นเป็นโทรศัพท์ และกล้องถ่ายรูปดิจิทัล คิดเป็นร้อยละ 6 (WITTHAYA-ANUMAS, 2017)

ในประเทศไทย ขยะอิเล็กทรอนิกส์ (Waste Electrical & Electronic Equipment, WEEE) จะมีพ่อค้ารับซื้อจากบ้านเรือนก่อนถูกส่งต่อไปยังแหล่งคัดแยกขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่กระจายอยู่ทั่วประเทศเกือบ 100 แห่งในพื้นที่ 17 จังหวัด โดยจังหวัดที่มีชุมชนประกอบอาชีพคัดแยกขยะอิเล็กทรอนิกส์สูงสุด

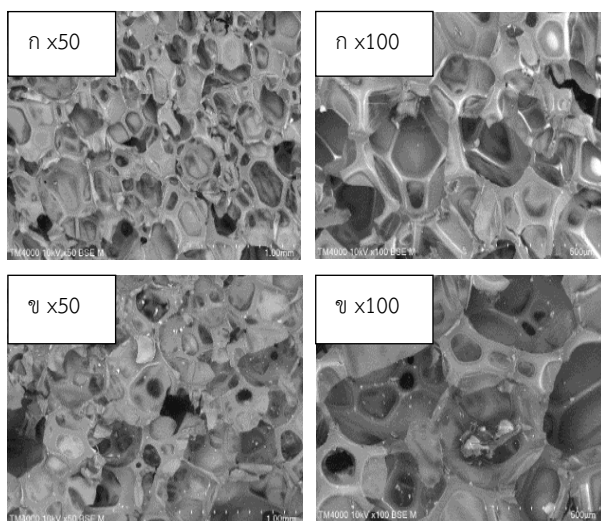
ได้แก่ กาฬสินธุ์ บุรีรัมย์ และอุบลราชธานี สำหรับแหล่งชุมชนคัดแยกขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่ใหญ่ที่สุดในประเทศไทยอยู่ในพื้นที่อำเภอฆ้องชัย จังหวัดกาฬสินธุ์ รองลงมาได้แก่ พื้นที่อำเภอบ้านใหม่ไชยพจน์ จังหวัดบุรีรัมย์ และอำเภอเขื่องใน จังหวัดอุบลราชธานี (Wassanadamrongdee, 2015; Thailand Development Research Institute, 2018) ในปัจจุบันขยะอิเล็กทรอนิกส์ที่เหลือจากการคัดแยกจำนวนมากและจัดเป็นขยะอันตราย โดยเฉพาะเศษแก้ว โฟม และกากยางรถ ถูกนำมากองทิ้งไว้ในบ่อขยะหรือพื้นที่สาธารณะ และบางส่วนถูกลักลอบทิ้งเองเพื่อต้องการพื้นที่ทิ้งเพิ่มเติมก่อให้เกิดมลพิษอากาศ การหาทางนำขยะเหล่านี้กลับมาใช้ใหม่จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่ได้รับ ความสนใจ

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการนำโฟมพียูที่ถูกทิ้งจากการคัดแยกชิ้นส่วนซากตู้เย็นมาใช้เป็นไส้กรองอากาศดักจับฝุ่นละอองขนาดเล็ก ซึ่งเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับโฟมพียูจากเดิมที่ต้องเสียค่าใช้จ่ายในการกำจัด โดยผู้วิจัยได้ออกแบบและสร้างเครื่องฟอกอากาศด้วยแนวคิดที่ประชาชนสามารถใช้เครื่องมือหรืออุปกรณ์ในท้องถิ่นสร้างได้เองในพื้นที่

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 วัสดุและการเตรียมวัสดุ

วัตถุดิบที่ใช้ในการทำไส้กรอง คือ โฟมพียูจากฉนวนกันความร้อนของตู้เย็น ได้จากแหล่งคัดแยกขยะอิเล็กทรอนิกส์ อำเภอบ้านใหม่ไชยพจน์ จังหวัดบุรีรัมย์ และอำเภอเขื่อนใน จังหวัดอุบลราชธานี ลักษณะของโฟมพียูวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด Scanning electron microscope (SEM, Hitachi, Japan) แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ภาพถ่ายโฟมพียูด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด กำลังขยาย 50 และ 100 เท่าของ (ก) โฟมที่เก็บในที่ร่ม และ (ข) โฟมที่วางกลางแจ้ง

จากภาพถ่าย SEM ของโฟมพียูแสดงลักษณะโครงสร้างที่เป็นช่องเปิดเชื่อมโยงกันเป็นชั้นๆ ช่องเปิดมีขนาด 20-50 ไมครอน โฟมพียูที่ไวกลางแจ้งผ่านสภาพอากาศถูกแดดลมพบว่า มีชิ้นส่วนโฟมขนาดเล็กๆ จำนวนมากปรากฏที่พื้นผิวโครงสร้าง ช่องเปิดแตกหักมากกว่าโฟมที่จัดเก็บในที่ร่ม ดังนั้นผิวสัมผัสจึงเป็นผอง ร่อนติดมือได้ ซึ่งไม่เหมาะสำหรับการนำมาผลิตเป็นไส้กรองของเครื่องฟอกอากาศกำจัดฝุ่นละอองขนาดเล็ก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้โฟมที่ถูกเก็บในที่ร่ม

โฟมพียูที่ได้จากแหล่งคัดแยกมีขนาดใหญ่จึงต้องตัดด้วยคัตเตอร์ให้มีรูปร่างที่จะใช้ทำไส้กรองในการทดสอบ 3 แบบ คือ (ก) แบบเส้นยาว 22 ซม. กว้าง 0.5-0.8 ซม. หยา 0.2-0.4 ซม. และ (ข) แบบลูกเต๋า ประมาณ 1x1x1 ซม. ส่วนโฟมพียู (ค) แบบก้อนขนาด 1-2 ซม. ได้จากการเตรียมโฟมด้วยการบดเพื่อนำไปผสมทำอิฐมวลเบาของ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี

ดังรูปที่ 2 หมายเหตุ การเลือกรูปทรงโฟมแบบเส้นและแบบลูกเต๋าได้จากการทดสอบเบื้องต้นในการดักจับฝุ่นขนาดเล็กพบว่า เป็นรูปทรงที่อากาศสามารถไหลผ่านได้ ไม่เกิดความดันย้อนกลับ (Back pressure) ในชั้นกรอง



รูปที่ 2 รูปร่างโฟมพียูที่ใช้ทำไส้กรองอากาศ (ก) แบบเส้น (ข) แบบลูกเต๋า และ (ค) แบบก้อน

2.2 การออกแบบและสร้างเครื่องฟอกอากาศ

เครื่องฟอกอากาศไส้กรองโฟมพียู ออกแบบเป็นทรงตู้สี่เหลี่ยม เลือกใช้อะลูมิเนียมเป็นโครงของเครื่องฟอกอากาศเพื่อง่ายต่อการประกอบ และออกแบบให้สามารถถอดไส้กรองอากาศที่เป็นเฟรมสี่เหลี่ยมผืนผ้าเพื่อเปลี่ยนวัสดุกรองคือโฟมพียูได้ ข้อมูลที่ใช้ในการออกแบบเครื่องฟอกแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ข้อมูลการออกแบบเครื่องฟอกอากาศ

ตัวแปร	ค่าที่ใช้ในการออกแบบ
ขนาดของเครื่องฟอก	36x36x78 ซม.มม.
พื้นที่ไส้กรอง (A_{filter})	770 ตร.มม.
ความเร็วลมผิวหน้าแผ่นกรอง (v)	2 เมตร/วินาที (120 ฟุต/นาที)
ความดันลดของแผ่นกรองโฟมพียู (Head)	2 นิ้วของน้ำ
อัตราการหมุนเวียนอากาศผ่านเครื่องฟอก (R)	10 รอบต่อ ชม.
ความสูงของพื้นที่ที่ต้องการฟอกอากาศ (H)	3 ม.

*ความเร็วสูงสุด 2.5 เมตร/วินาที (300 ฟุต/นาที) สำหรับไส้กรองชนิดใช้แล้วทิ้ง (Godish, 1989)

คำนวณอัตราการดูดอากาศที่ต้องการทำความสะอาดผ่านเครื่องฟอก (Q_{device}) ได้ดังสมการ

$$Q_{device} = A_{filter} \times v \quad (1)$$

จากข้อมูลในตารางที่ 1 จะได้ค่า Q_{device} เท่ากับ 554 ลบ.ม./ชม. สามารถคำนวณพื้นที่ใช้งานสำหรับการฟอกอากาศ (A) ได้ดังสมการ

$$A = \frac{Q_{\text{device}}}{(R \times H)} \quad (2)$$

จากข้อมูลในตารางที่ 1 จะได้ค่า $A = 18.5$ ตร.ม.

คำนวณกำลังไฟของพัดลมดูดอากาศของเครื่องฟอกได้ตั้ง
สมการ

$$P = \rho \times g \times Q_{\text{device}} \times \text{Head} \times SF \quad (3)$$

โดยที่

P คือ กำลังของพัดลม (วัตต์)

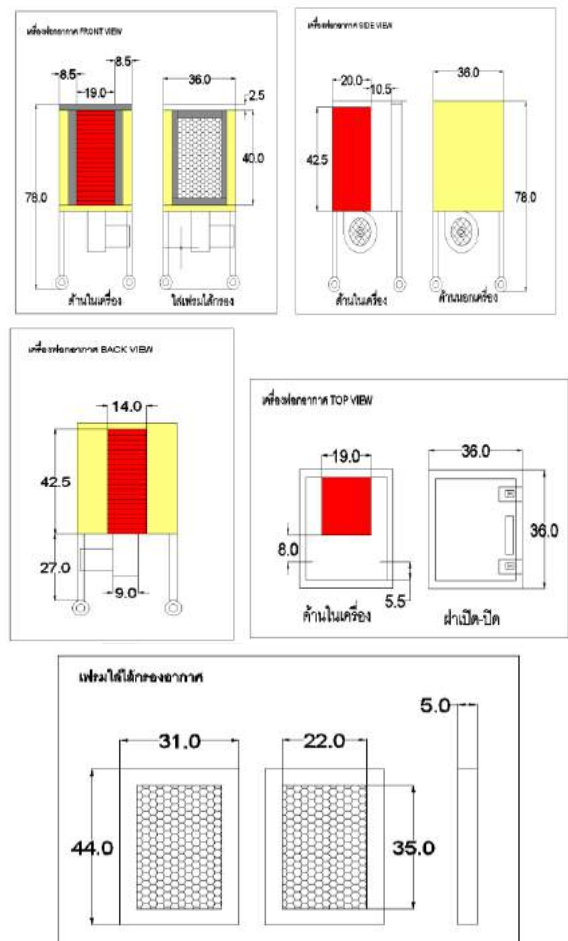
ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ (1.2 กก./ลบ.ม.)

g คือ แรงความโน้มถ่วง (9.8 เมตร/วินาที²)

SF คือ ค่าตัวคูณ safety factor กำหนดเท่ากับ 1.2

จะได้ค่ากำลังของพัดลมเท่ากับ 87 วัตต์ ในที่นี้เลือกพัดลม
แบบหอยโข่ง (Centrifugal fan) เพราะให้ความดันสถิตสูงกว่า
พัดลมแบบตามแนวแกน (Axial fan)

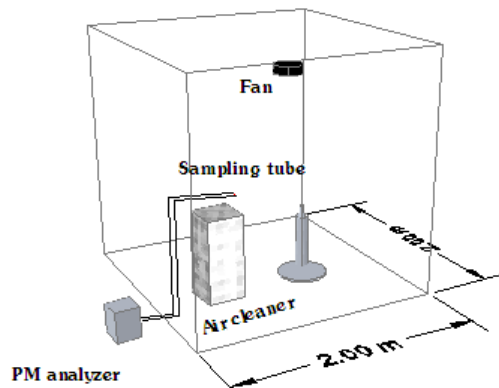
รูปที่ 3 แสดงแบบเครื่องฟอกอากาศของไส้กรองโฟมพียูทรง
ตุ้สสี่เหลี่ยมขนาด 36x36x78 ลบ.ซม. โครงอะลูมิเนียมหุ้มด้วย
แผ่นเหล็กเรียบสีครีม ติดตั้งพัดลมหอยโข่งขนาด 220 วัตต์ที่มี
ขายในท้องตลาด มีกริลเลอร์ (Griller) เพื่อกระจายลมดังแสดง
ในส่วนของพื้นที่สีแดง และติดล้อเพื่อให้สามารถเคลื่อนที่ได้
ส่วนวัสดุไส้กรองโฟมทำจากเฟรมอะลูมิเนียมขนาด 31x5x44
ลบ.ซม. มีพื้นที่ผิวระนาบเท่ากับ 770 ตร.ซม. ใส่โฟมที่เตรียมไว้
ในเฟรมจนเต็ม ซึ่งน้ำหนักโฟมได้ดังนี้ แบบเส้น 400 กรัม/เฟรม
แบบลูกเต๋าและแบบก้อน 440 กรัม/เฟรม



รูปที่ 3 แบบวาดของเครื่องฟอกอากาศในแต่ละมุมมองและเฟรมไส้กรอง
โฟมพียู

2.3 การทดสอบสมรรถนะเครื่องฟอกอากาศ

งานวิจัยนี้วัดอัตราการส่งอากาศที่ถูกฟอกต่อหน่วยเวลา
(Clean air delivery rate, CADR) ซึ่งเป็นมาตรวัดการทำงานของ
เครื่องฟอกอากาศแบบเคลื่อนย้ายได้ในการกำจัดฝุ่นละออง
ขนาดเล็กของสมาคมผู้ผลิตเครื่องใช้ไฟฟ้าภายในบ้านเรือนของ
ประเทศสหรัฐอเมริกา (Association of Home Appliance
Manufacturers, 2006) การทดสอบใช้ห้องทดสอบขนาด 8
ลบ.ม. ผืนภายในบุด้วยแผ่นอะลูมิเนียม เพดานห้องติดตั้งพัด
ลมเพื่อสร้างความผสมผสานของอากาศในห้อง ท่อชักตัวอย่าง
อากาศอยู่สูงจากพื้นห้องประมาณ 1 เมตร วัดค่าฝุ่นด้วยเครื่อง
DustTrak (TSI, USA) ส่วนแหล่งกำเนิดฝุ่นขนาดเล็กกว่า 2.5
ไมครอน (PM_{2.5}) ได้จากการจุดธูป ระบบการทดลองแสดงดัง
รูปที่ 4



รูปที่ 4 ห้องทดสอบและอุปกรณ์

ขั้นตอนการทดสอบเริ่มจากวัดความเข้มข้นภูมิหลังของ $PM_{2.5}$ (Background concentration) จากนั้นจุดรูปเพื่อให้ได้ระดับ $PM_{2.5}$ เริ่มต้นในห้องประมาณ 250 มก./ลบ.ม. ปิดประตูห้องแล้วเปิดเครื่องฟอกอากาศ บันทึกค่าความเข้มข้น $PM_{2.5}$ เป็นเวลา 1.5 ชม. นำชุดข้อมูลที่ได้นำมาพยากรณ์ค่า CADR ได้ด้วยสมการ (4) สมดุลมวลสารการเปลี่ยนแปลง $PM_{2.5}$ ในอากาศภายในห้องทดสอบซึ่งเป็นผลจาก 4 กลไกหลัก คือ การรั่วซึมอากาศของห้องทดสอบ (chamber leakage) การดูดอากาศของปั๊มเครื่องวัดฝุ่น การตกทับถมตามธรรมชาติของฝุ่นบนพื้นผนังห้องทดสอบ (natural deposition) และการดักจับฝุ่นละอองด้วยเครื่องฟอกอากาศ

$$\frac{dC_t}{dt} = \lambda C_{out} - \lambda C_t - \frac{Q_p}{V} C_t - \frac{CADR}{V} C_t - k_{PM} C_t \quad (4)$$

โดยที่

C_t คือ ความเข้มข้น $PM_{2.5}$ ในห้องที่ t (มก./ลบ.ม.)

C_{out} คือ ความเข้มข้น $PM_{2.5}$ นอกห้อง (มก./ลบ.ม.)

λ คือ อัตราการรั่วซึมอากาศของห้องทดสอบ (ต่อ ชม.)

Q_p คือ อัตราการดูดอากาศของเครื่องวัดฝุ่น (0.18 ลบ.ม./ชม.)

CADR คือ อัตราการส่งอากาศที่ถูกฟอกแล้ว (ลบ.ม./ชม.)

k_{PM} คือ สัมประสิทธิ์การตกทับถมตามธรรมชาติ $PM_{2.5}$ (ต่อ ชม.)

V คือ ปริมาตรห้องทดสอบ (8 ลบ.ม.)

t คือ เวลา (ชม.)

2.3.1 การหาอัตราการรั่วซึมของห้อง (λ)

ใช้ก๊าซ CO_2 เป็นก๊าซทำรอยตาม ASTM E741 tracer gas decay method (American Society for Testing and Materials, 2009) โดยจุดรูปเข้าไปในห้องทดสอบที่ไม่มีเครื่องฟอกให้ได้ความเข้มข้นเริ่มต้น 1000 พีพีเอ็ม เปิดเครื่องตรวจวัดและเก็บข้อมูลระดับ CO_2 เป็นเวลา 24 ชม. จากนั้นทำนายค่า λ ดังสมการ (5) ด้วยการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม nonlinear regression and curve fitting

$$C_t = C_0 e^{-(\lambda t)} + C_{out}(1 - e^{-(\lambda t)}) \quad (5)$$

โดยที่

C_t คือ ความเข้มข้น CO_2 ณ t ใดๆ (พีพีเอ็ม)

C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้น CO_2 (พีพีเอ็ม)

C_{out} คือ ความเข้มข้น CO_2 นอกห้องทดสอบ (พีพีเอ็ม)

ผลการวัดได้อัตราการรั่วซึมของห้องทดสอบเฉลี่ย 2 ครั้ง เท่ากับ 0.015 ต่อ ชม. มีค่า R^2 (Proportion of variance explained) จากการทำนายสูงกว่า 0.97

2.3.2 การหาค่าสัมประสิทธิ์การตกทับถมตามธรรมชาติของฝุ่น (k_{PM})

จุดรูปเข้าไปในห้องทดสอบที่ไม่มีเครื่องฟอกให้ได้ความเข้มข้นเริ่มต้น $PM_{2.5}$ 250 มก./ลบ.ม. เก็บค่าความเข้มข้นเป็นเวลา 24 ชม. หลังจากนั้นนำผลมาวิเคราะห์ โดยใช้สมการ (6) หา k_{PM} โดยค่า λ ได้จากการทดลอง 2.3.1

$$C_t = (C_0 - C_b) e^{-(\lambda + k_{PM})t} + C_b \quad (6)$$

โดยที่

C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้น $PM_{2.5}$ (มก./ลบ.ม.)

C_b คือ ความเข้มข้นภูมิหลัง $PM_{2.5}$ ณ สภาวะสมดุล (มก./ลบ.ม.)

ผลการวัดได้ค่า k_{PM} เฉลี่ย 2 ครั้ง เท่ากับ 0.102 ต่อ ชม. มีค่า R^2 สูงกว่า 0.98

2.3.3 การหาค่า CADR ของเครื่องฟอกอากาศ

จุดรูปเข้าไปในห้องทดสอบที่เตรียมไว้ให้ได้ความเข้มข้น $PM_{2.5}$ เริ่มต้น 250 มก./ลบ.ม. จากนั้นเปิดเครื่องฟอกอากาศที่บรรจุโฟมฟิวแต่ละรูปร่าง บันทึกความเข้มข้น $PM_{2.5}$ เป็นเวลา 1.5 ชม. นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์หา CADR โดยใช้สมการ (7) โดยค่า λ และ k_{PM} ได้จากการทดลอง 2.3.1 และ 2.3.2 ตามลำดับ

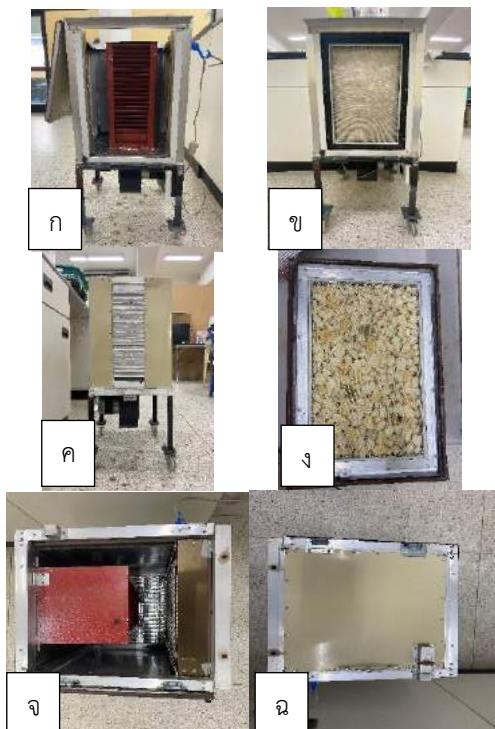
$$C_t = (C_0 - C_b) e^{-\left(\lambda + Q_p + k_{PM} + \left(\frac{CADR}{V}\right)\right)t} + C_b \quad (7)$$

ในการทดลองนี้ได้เพิ่มแผ่นกรองอากาศแบบหยาบ (Prefilter) ด้านในของเฟรมเพื่อรองรับโฟมฟิวและป้องกันฝุ่น โฟมขนาดใหญ่หลุดออกขณะใช้งาน ทำการทดลองซ้ำ 2 ครั้ง สำหรับไส้กรองแต่ละแบบ

3. ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

3.1 เครื่องฟอกอากาศที่สร้าง

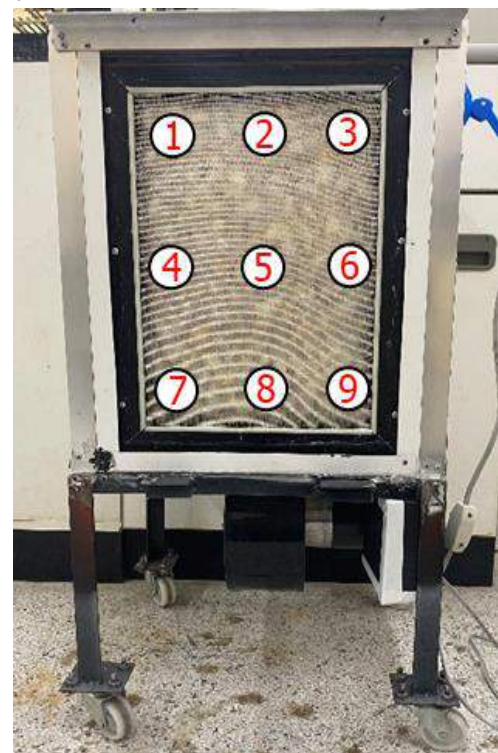
รูปที่ 5 แสดงเครื่องฟอกอากาศที่สร้างออกมาตามแบบ



รูปที่ 5 เครื่องฟอกอากาศไส้กรองโฟมฟิวทรงตัว

โดยโครงของเครื่องฟอกอากาศสร้างจากวัสดุอะลูมิเนียมหุ้มด้วยแผ่นเหล็กเรียบสีกกรม เชื่อมติดรอยต่อให้สนิทด้วยขบอยางและกาวซิลิโคน ติดตั้งพัดลมหอยโข่งบริเวณด้านล่างของเครื่องฟอกอากาศ และดูดอากาศจากด้านล่างส่งผ่านไปยังกริลเลอร์ดังรูป (ก) เพื่อกระจายลมไปด้านหน้าเครื่องฟอกอากาศที่ใส่เฟรมไส้กรองโฟมฟิวดังรูป (ข) ด้านหลังของกริลเลอร์ติดแผ่นโฟมกันกระแทก และกาวซิลิโคนเพื่อไม่ให้ลมออกดังรูป (ค) ส่วนเฟรมไส้กรองโฟมฟิวมีการติดเทปการโฟมตามขอบของเฟรมไส้กรองเพื่อไม่ให้มีช่องว่างระหว่างเฟรมกับร่องที่ใส่ดังรูป (ง) และสามารถถอดเฟรมไส้กรองออกจากตัวเครื่องได้โดยการเปิดจากด้านบนดังรูป (จ) เมื่อใส่เฟรมไส้กรองเข้าในเครื่องฟอกแล้วจะล็อคฝาบนด้วยกลอนดังรูป (ฉ) เพื่อไม่ให้อากาศดันฝาเปิดขณะใช้งาน

ทำการวัดความเร็วลมที่ผิวหน้าไส้กรองที่ใส่วัสดุกรองโฟมฟิวแต่ละรูปร่างขณะเปิดเครื่องใช้งานดังนี้ โดยแบ่งจุดวัดออกเป็น 9 จุดดังรูปที่ 6 สามารถสรุปค่าความเร็วลมได้ดังตารางที่ 2



รูปที่ 6 บริเวณที่ตรวจวัดความเร็วลมที่ผิวหน้าไส้กรอง

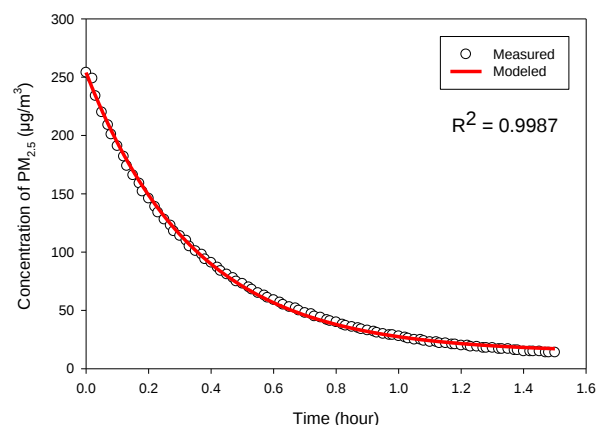
ตารางที่ 2 ความเร็วลมที่ผิวหน้าไส้กรองโฟมพียู

จุดที่วัด	ความเร็วลมผิวหน้า (เมตร/วินาที)		
	แบบเส้น	แบบลูกเต๋า	แบบก้อน
จุด 1	1.3	2	2
จุด 2	1	2	2
จุด 3	1.6	2.1	2
จุด 4	1.1	2	2.1
จุด 5	1.3	2	1.9
จุด 6	1.5	1.7	1.9
จุด 7	1.4	2	2
จุด 8	1.4	1.9	1.9
จุด 9	1.9	1.5	1.9
เฉลี่ย	1.5±0.4	1.9±0.2	2.0±0.1

จากตารางที่ 2 ค่าความเร็วลมผิวหน้าเฉลี่ยของไส้กรองโฟมพียูแบบก้อนและแบบลูกเต๋ามีค่าใกล้เคียงกันประมาณ 1.9-2.0 เมตร/วินาทีซึ่งใกล้เคียงค่าที่ออกแบบไว้ คือ 2 เมตร/วินาที ส่วนโฟมพียูแบบเส้นมีความเร็วลมผิวหน้า 1.5 เมตร/วินาที ซึ่งต่ำกว่าไส้กรองแบบก้อนและแบบลูกเต๋าเนื่องจากแบบเส้นเมื่อใส่ในเฟรมแล้วมีการเรียงตัวค่อนข้างแน่นทำให้มีช่องเปิดระหว่างชิ้นโฟมน้อย กว่าแบบก้อนและแบบลูกเต๋าดังนั้นจะใส่น้ำหนักที่มากกว่าก็ตาม

3.2 การประเมินความถูกต้องของแบบจำลองหาค่า CADR

รูปที่ 7 แสดงความเข้มข้นของ PM_{2.5} ที่วัดในห้องทดสอบที่ใช้เครื่องฟอกอากาศไส้กรองโฟมพียูแบบก้อนเป็นเวลา 1.5 ชม. (การทดลองไส้กรองโฟมแบบเส้นและแบบลูกเต๋ามีลักษณะกราฟความเข้มข้น PM_{2.5} คล้ายคลึงกับแบบก้อน) จุดวงกลมสีขาวคือค่าที่วัดได้จริง และเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทำนายของแบบจำลองสมการ (7) คือเส้นสีแดง พบว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองแนบสนิทกับค่าที่ได้จากการพยากรณ์ด้วยแบบจำลองโดยมีค่า R² ที่ได้จากการทดลองของไส้กรองทั้ง 3 แบบอยู่ ระหว่าง 0.97–0.99 และมีค่า Prob(t) เท่ากับ 0.00001 บ่งชี้ว่ามีโอกาสเพียง 1 ใน 100,000 ที่พารามิเตอร์ที่ทำนายคือ CADR จะเป็นศูนย์



รูปที่ 7 การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้น PM_{2.5} ในห้องทดสอบที่ใช้ไส้กรองโฟมพียูแบบก้อนไม่มีแผ่นกรองหยาบ

3.3 ค่า CADR ของเครื่องฟอกอากาศ

ผลการประเมินค่า CADR ของเครื่องฟอกอากาศไส้กรองของโฟมพียูทั้ง 3 แบบ และที่ใช้/ไม่ใช้แผ่นกรองหยาบสามารถสรุปได้ดังตารางที่ 3 และร้อยละการลดลงของ PM_{2.5} ในห้องทดสอบเมื่อสิ้นสุดการทดลอง 1.5 ชม.

ตารางที่ 3 CADR ของเครื่องฟอกอากาศที่ใช้โฟมพียูแต่ละรูปร่างและร้อยละการลดลงของ PM_{2.5} ในห้องทดสอบ

CADR มีแผ่นกรองหยาบ				
รูปร่างโฟม	CADR (ลบ.ม./ชม.)	R ²	ความเข้มข้น PM _{2.5} หลัง 1.5 ชม. (มคก./ลบ.ม.)	ร้อยละการลดลงของ PM _{2.5}
แบบเส้น	26 ± 1	99.17	43	96
แบบลูกเต๋า	32 ± 2	99.53	30	98
แบบก้อน	33 ± 1	99.44	16	98
CADR ไม่มีแผ่นกรองหยาบ				
รูปร่างโฟม	CADR (ลบ.ม./ชม.)	R ²	ความเข้มข้น PM _{2.5} หลัง 1.5 ชม. (มคก./ลบ.ม.)	ร้อยละการลดลงของ PM _{2.5}
แบบเส้น	16 ± 2	99.74	9	83
แบบลูกเต๋า	17 ± 1	99.91	4.5	88
แบบก้อน	21 ± 10	99.94	3	93

เมื่อสิ้นสุดระยะเวลาทดสอบ 1.5 ชม. ความเข้มข้นฝุ่น $PM_{2.5}$ ถูกกำจัดด้วยเครื่องฟอกอากาศร้อยละ 83-98 ไลกรองโฟมฟิยูที่มีค่า CADR มากที่สุดคือแบบก้อน รองลงมาคือแบบลูกเต๋าและแบบเส้น ทั้งนี้รูปร่างแบบเส้นอาจทำให้ไลกรองเกิดความดันสูญเสียมากกว่าแบบอื่นเนื่องจากช่องเปิดระหว่างชั้นโฟมน้อย ดังนั้นอัตราการส่งผ่านของลมออกจากไลกรองจึงต่ำไปด้วยซึ่งยืนยันได้จากค่าความเร็วลมที่ผิวหน้าไลกรองต่ำที่สุดเช่นกัน (ตารางที่ 2) ส่วนแบบลูกเต๋ามีค่า CADR ต่ำกว่าแบบก้อนเป็นเพราะลักษณะการตัดลูกเต๋าทำให้เกิดเศษผงที่ผิวโฟมหลุดออกมาได้เมื่อสัมผัสกับแรงลมที่ไหลผ่าน ดังนั้นจึงติดแผ่นกรองหยาบที่เฟรมเพื่อรองรับชั้นโฟม และกรองฝุ่นโฟมขนาดใหญ่ ผลการทดลองพบว่าการติดแผ่นกรองหยาบยังช่วยเพิ่มค่า CADR ในการดักจับฝุ่นละอองขนาดเล็กได้ด้วย โดยไลกรองแบบก้อนเพิ่มขึ้นร้อยละ 57 แบบลูกเต๋าเพิ่มขึ้นร้อยละ 76 และแบบเส้นเพิ่มขึ้นร้อยละ 62

ส่วนข้อจำกัดในการใช้งานเครื่องฟอกอากาศคือ มีเสียงค่อนข้างดังจากใบพัดลมขณะใช้งาน จึงอาจเหมาะสำหรับพื้นที่เปิดโล่ง เช่น พื้นที่ทำงานของโรงคัดแยกขยะอิเล็กทรอนิกส์ เป็นต้น หรือออกแบบตัวเครื่องให้สามารถเก็บเสียงของพัดลมได้ เนื่องจากตัวเครื่องฟอกอากาศต้นแบบนี้ยังมีการรั่วของอากาศเล็กน้อยบริเวณฝาปิดด้านบนและด้านหน้า จึงควรพัฒนาวิธีการเชื่อมรอยพับรอยต่อให้สนิทมากขึ้น เนื่องจากในงานวิจัยนี้ทำการทดสอบสมรรถนะของไลกรองแต่ละรูปแบบซ้ำเพียง 2 ครั้งซึ่งได้ค่า CADR ใกล้เคียงกัน ดังนั้นจึงยังไม่สามารถคาดการณ์อายุการใช้งานของไลกรองโฟมฟิยูในแง่ของความสามารถในการดักจับฝุ่นระยะยาวได้ ซึ่งจำเป็นต้องมีการศึกษาต่อไป

3.4 ค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องฟอกอากาศ

ค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องฟอกอากาศประกอบด้วย พัดลมดูดอากาศ โครอะลูมิเนียม แผ่นเหล็กเรียบ ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4 ซึ่งค่าใช้จ่ายนี้คิดจากค่าวัสดุที่เป็นของใหม่ทั้งหมด ถ้าใช้ส่วนประกอบที่เป็นของมือสอง เช่น พัดลมดูดอากาศ จะสามารถลดต้นทุนการก่อสร้างลงได้ รวมทั้งค่าจ้างเหมาสร้างเครื่องขึ้นแปรเปลี่ยนตามค่าแรงของแต่ละพื้นที่

ตารางที่ 4 ค่าใช้จ่ายในการสร้างเครื่องฟอกอากาศ

ส่วนประกอบเครื่อง	ราคา (บาท)
พัดลมดูดอากาศ	1700
แผ่นเหล็กเรียบ	400
โครอะลูมิเนียม	1500
เฟรมบรรจุไลกรองโฟมฟิยู	400
ค่าจ้างเหมาสร้างเครื่อง	1000
รวม	5000

4. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาการใช้ประโยชน์จากโฟมฟิยูเหลือทิ้งหลังจากการคัดแยกขยะอิเล็กทรอนิกส์ประเภทตู้เย็นมาใช้ทดแทนไลกรองอากาศเพื่อดักจับฝุ่นละอองขนาดเล็ก โดยศึกษาตัวแปรรูปร่างของโฟมฟิยู 3 รูปร่าง ได้แก่ แบบเส้นแบบลูกเต๋า และแบบก้อน พบว่าโฟมแบบก้อนให้ค่า CADR สูงสุดและเมื่อติดแผ่นกรองหยาบช่วยเพิ่มอัตราการผลิตอากาศสะอาดเพิ่มขึ้น 1.5 เท่า ใกล้เคียงเครื่องฟอกอากาศเชิงพาณิชย์บางรุ่นที่ใช้ไลกรอง HEPA กำลังไฟ 35 วัตต์ (Kruewan & Ongwandee, 2013) โฟมฟิยูหลังหมดอายุการใช้งานดักจับฝุ่นแล้ว สามารถนำไปใช้ประโยชน์ในขั้นสุดท้ายโดยใช้เป็นส่วนผสมของอิฐมวลเบาได้ งานวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงการใช้นวัตกรรมคิดแบบเศรษฐกิจหมุนเวียน หรือ Circular economy ในกระบวนการเปลี่ยนแปลงขยะให้กลายเป็นวัตถุดิบในการผลิตของบางอุตสาหกรรมได้อีก

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และ ศูนย์ความเป็นเลิศด้านการจัดการสารและของเสียอันตราย (ศสอ.) สำหรับทุนวิจัยประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 กรอบวิจัยทำหทัยไทยเรื่องการจัดการซากผลิตภัณฑ์เครื่องใช้ไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์และของเสียอันตรายชุมชน และขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ด้านสถานที่ดำเนินการวิจัย และศูนย์เครื่องมือกลาง มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ด้านเครื่องมือวิเคราะห์ขั้นสูง

6. เอกสารอ้างอิง

- Association of Home Appliance Manufacturers. (2006). *Method for measuring the performance of portable household electric room air cleaners (ANSI/AHAM AC-1)*. (n.p.)
- American Society for Testing and Materials. (2009). Standard test method for determining air change in a single zone by means of a tracer gas dilution (ASTM E741). (n.p.)
- Godish, T. (1989). *Indoor air pollution control*. 3. Lewis Publishers.
- Kruewan, A., & Ongwandee, M. (2013). Evaluation of portable household and in-car air cleaners for air cleaning potential and ozone-initiated pollutants. *Indoor and Built Environment*, 22, 659–668.
- Thailand Development Research Institute. (2018 August 20). Toxic waste of Thai industrial factories <https://tdri.or.th/2018/08/industrial-waste/>
- Wassanadamrongdee, S. (2015). Situation of Electronic Waste Problems. *Journal of Environment*, 19(3), 1-18.
- WITTHAYA-ANUMAS S. (2017 October). *Management Electronic waste In Thailand*. <https://tdri.or.th/wp-content/uploads/2018/04/wb133.pdf>

การพัฒนาระเบียงยางปูพื้นจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิไวนิลคลอไรด์
และคลอรีเนตพอลิเอทิลีน

Development of Rubber Floor Tile from Polymer Blends between Polyvinyl
Chloride and Chlorinated Polyethylene

ชาตรี หอมเขียว^{1,2*}, สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์^{1,2}, จักรนรินทร์ ฉัตรทอง^{1,2}

Chatree Homkhiew^{1,2*}, Surasit Rawangwong^{1,2}, Jaknarin Chatthong^{1,2}

¹สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

²หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการแปรรูปวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

¹Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya

²Materials Processing Technology Research Unit, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya

*Corresponding authors e-mail: chatree.h@rmutsv.ac.th

(Received: 5 June 2020, Revised: 14 January 2021, Accepted: 25 January 2021)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของปริมาณสารคลอรีเนตพอลิเอทิลีนต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพของพอลิเมอร์ผสม และมีเป้าหมายเพื่อพัฒนาพอลิเมอร์ผสมในงานวิจัยนี้เป็นแผ่นกระเบื้องยางปูพื้น ในการผลิตพอลิเมอร์ผสมดำเนินการผสมส่วนผสมต่าง ๆ โดยใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ และขึ้นรูปเป็นแผ่นขึ้นงานตัวอย่างโดยใช้เครื่องอัดรีด ซึ่งผลจากการวิเคราะห์ความแปรปรวนชี้ให้เห็นว่า การเติมสารคลอรีเนตพอลิเอทิลีนปริมาณ 0-30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) ต่อค่าความแข็งแรงดึง ค่าความดูลัสการดึง ค่าความเครียดสูงสุด ค่าความแข็ง และค่าการยุบตัวของพอลิเมอร์ผสม เมื่อเติมสารคลอรีเนตพอลิเอทิลีนเป็นส่วนผสมเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความดูลัสการดึง ค่าความแข็ง ค่าการสูญเสียน้ำหนัก และค่าการยุบตัวของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น แต่ค่าความแข็งแรงดึง ค่าความเครียดสูงสุดกลับมีค่าลดลงตามปริมาณสารคลอรีเนตพอลิเอทิลีน ขณะเดียวกันยังพบว่าพอลิเมอร์ผสมมีค่าความดูลัสการดึง ค่าความแข็ง และค่าการยุบตัวสูงกว่าพลาสติกพอลิไวนิลคลอไรด์ นอกจากนี้พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่เติมสารคลอรีเนตพอลิเอทิลีน 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีสมบัติทางกลและทางกายภาพดีกว่ากระเบื้องยางปูพื้นของบริษัท A

คำสำคัญ: พอลิไวนิลคลอไรด์, คลอรีเนตพอลิเอทิลีน, กระเบื้องยางปูพื้น, การวิเคราะห์สถิติ, การอัดรีด

Abstract

This research aimed to analyze the effect of chlorinated polyethylene contents on mechanical and physical properties of polymer blends. The goal of this research is to develop the polymer blends as rubber floor tile. In producing the polymer blends, a twin-screw extruder was used to blend mixture. The polymer blend pellets were then molded in a compression molding machine as sample panels. From results of experiment, analysis of variance (ANOVA) indicated that the addition of chlorinated polyethylene in range of 0-30 percentage by weight (wt%) significantly (P -value < 0.05) affected tensile strength, tensile modulus, maximum strain, hardness and residual indentation of the polymer blends. The increasing addition of the chlorinated polyethylene resulted an increase of tensile modulus, hardness, weight loss, residual indentation but a decrease of the tensile strength, maximum strain of the polymer blends. Likewise, the polymer blends gave clearly higher tensile modulus, hardness and residual indentation than polyvinyl chloride. Furthermore, the polymer blending with chlorinated polyethylene 10 wt% revealed better mechanical and physical properties than rubber floor tile of company A.

Keywords: Polyvinyl Chloride, Chlorinated Polyethylene, Rubber Floor Tile, Statistical Analysis, Hot Compression

1. บทนำ

กระเบื้องยางปูพื้นเป็นผลิตภัณฑ์หนึ่งที่อยู่ในแผนยกเลิกการนำเข้าการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีแร่ใยหินเป็นส่วนประกอบ ตามมติคณะรัฐมนตรี เมื่อวันที่ 12 เมษายน 2554 ว่าด้วยเรื่อง แนวทางการห้ามนำเข้าแร่ใยหินโครโซไทล์และผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนประกอบของแร่ใยหินโครโซไทล์เฉพาะกรณี และห้ามผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนประกอบของแร่ใยหินโครโซไทล์ที่ใช้วัตถุดิบอื่นหรือใช้ผลิตภัณฑ์อื่นทดแทนได้ (Thai Health on the Road to, 2013)

โดยทั่วไปกระเบื้องยางปูพื้นมักถูกผลิตขึ้นมาจากพลาสติกผสมกับแร่ใยหินและสารอื่น ๆ ซึ่งลักษณะที่โดดเด่นของกระเบื้องยางปูพื้น คือ มีความยืดหยุ่นพอสมควร และมีแรงหนืดในระหว่างที่สัมผัสกับกระเบื้องยางค่อนข้างสูง ทำให้สามารถลดโอกาสในการลื่นล้มหรือสะดุดล้มได้เป็นอย่างดี ขณะเดียวกันสามารถรองรับแรงกระแทกหรือน้ำหนักมาก ๆ ได้เป็นอย่างดี (Wood Grain Rubber Tiles, 2020) อย่างไรก็ตามเนื่องจากกระเบื้องยางปูพื้นมีส่วนผสมของแร่ใยหิน ทำให้ส่งผลกระทบต่อสุขภาพคนและสิ่งแวดล้อม ดังนั้นเพื่อตอบสนองนโยบายของรัฐและเพื่อสุขภาพที่ดีของผู้ใช้งานและผู้ผลิตกระเบื้องยางปูพื้น ทางคณะผู้วิจัยจึงได้มีแนวคิดพัฒนากระเบื้องยางปูพื้นจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิไวนิลคลอไรด์และสารคลอรีเนตพอลิเอทิลีน

พอลิไวนิลคลอไรด์ (Polyvinyl Chloride; PVC) เป็นพลาสติกชนิดเทอร์โมพลาสติกที่มีการผลิตเป็นอันดับสองรองจากพอลิเอทิลีน เนื่องจากสามารถนำไปใช้ประโยชน์ทั้งในด้านก่อสร้าง อุปกรณ์ไฟฟ้า ของใช้ในบ้าน งานบรรจุภัณฑ์ และงานด้านเกษตรกรรม เป็นต้น (Page et al., 2007; Kongthan, 2015) อีกทั้งมีสมบัติที่โดดเด่นคือ ไม่มีสี ใส ทนต่อสารเคมีและการขีดข่วน และเมื่อติดไฟสามารถดับไฟได้เอง (Kongthan, 2015) จากสมบัติที่ทนต่อสารเคมี การขีดข่วน และสามารถดับไฟได้เอง ทำให้นักวิจัยนี้เลือกใช้พลาสติกพอลิไวนิลคลอไรด์เป็นส่วนผสมหลัก เนื่องจากกระเบื้องยางปูพื้นเป็นผลิตภัณฑ์ที่มักใช้ปูในบ้าน ซึ่งมีโอกาสสัมผัสกับสารเคมี การขีดข่วน หรือการติดไฟจากความร้อนสูง อีกทั้งพลาสติกพอลิไวนิลคลอไรด์ที่ใช้เป็นพอลิไวนิลคลอไรด์คอมปาวด์ที่มีความยืดหยุ่นสูง เพื่อให้กระเบื้องยางมีความเหนียวและมีแรงหนืดในระหว่างที่สัมผัส

คลอรีเนตพอลิเอทิลีน (Chlorinated Polyethylene; CPE) เป็นสารที่มีส่วนผสมของคลอรีนประมาณ 30-42 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ซึ่งมักใช้ปรับปรุงสมบัติการกระแทก (Varma et al., 1999; Deanin & Chuang, 1987) ของพลาสติกพอลิไวนิลคลอไรด์แบบแข็ง (Vrandecic et al., 2004) ในขณะเดียวกันพอลิเมอร์ชนิดนี้มีสมบัติการเสถียรทางความร้อนสูง ด้านทาน

การลามไฟ ด้านทานสารเคมี และทนต่อสภาพอากาศได้ดี อีกทั้งยังมีสมบัติทางกลที่ดีอีกด้วย (Bhagabati et al., 2015) นอกจากนี้ Wu et al. (2004) พบด้วยว่า การเติมสารคลอรีเนตพอลิเอทิลีนสามารถปรับปรุงความต้านทานแรงกระแทกแบบไอซอด (Izod) ของนาโนคอมโพสิตได้อย่างมีนัยสำคัญ ขณะเดียวกันความหนืดของนาโนคอมโพสิตลดลง เมื่อเติมสารคลอรีเนตพอลิเอทิลีนเป็นส่วนผสม ดังนั้นความสามารถทางกระบวนการสามารถปรับปรุงได้โดยการเติมสารคลอรีเนตพอลิเอทิลีนเป็นส่วนผสม นอกจากนี้ Vrandecic et al. (2004) พบว่าสารคลอรีเนตพอลิเอทิลีนมีผลต่อการลดการเสื่อมสภาพของพอลิไวนิลคลอไรด์ จากข้อดีดังกล่าวของสารคลอรีเนตพอลิเอทิลีน ทำให้นักวิจัยนี้มีการนำสารคลอรีเนตพอลิเอทิลีนมาใช้เป็นส่วนผสม เพื่อปรับปรุงสมบัติของพลาสติกพอลิไวนิลคลอไรด์ให้มีสมบัติที่เหมาะสมต่อการผลิตเป็นกระเบื้องยางปูพื้น

อย่างไรก็ตามก่อนการนำสารคลอรีเนตพอลิเอทิลีนไปใช้เป็นส่วนผสมในพอลิไวนิลคลอไรด์เพื่อให้มีสมบัติที่เหมาะสมต่อการนำไปใช้ผลิตกระเบื้องยางปูพื้น มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องศึกษาวิจัยเพื่อทราบผลกระทบของปริมาณสารคลอรีเนตพอลิเอทิลีนต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพของพอลิเมอร์ผสมสุดท้ายผลจากงานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์อย่างมากต่ออุตสาหกรรมผลิตกระเบื้องยางปูพื้น

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

วัสดุที่ใช้พัฒนากระเบื้องยางปูพื้นประกอบด้วย พลาสติกพอลิไวนิลคลอไรด์คอมปาวด์ เกรด SFM3300 ผลิตโดย Teknor Apex Asia Pacific (Singapore) และสารคลอรีเนตพอลิเอทิลีน (Chlorinated Polyethylene) เกรด 135A ผลิตโดย Xingyang Shihua (China) นอกจากนี้มีการนำกระเบื้องยางปูพื้นที่จำหน่ายในเชิงพาณิชย์ จำนวน 2 บริษัท ดังแสดงในรูปที่ 1 มาเปรียบเทียบกับสมบัติกับวัสดุที่ได้จากงานวิจัยนี้ด้วย



รูปที่ 1 กระเบื้องยางปูพื้นของ (ก) บริษัท A และ (ข) บริษัท B

2.2 การขึ้นรูปแผ่นขึ้นงานตัวอย่าง

นำพลาสติกพอลิไวนิลคลอไรด์ผสมกับสารคลอรีนเทฟลอนที่ลิ้นตามสูตรที่กำหนด ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยการเข้าผสมประมาณ 3 นาที เพื่อให้วัสดุเกิดการกระจายตัวกันระหว่างวัสดุทั้งสอง จากนั้นนำวัสดุที่ผ่านการผสมเบื้องต้นใส่ในเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่ (รุ่น CTE-D25L40 บริษัท เจริญทัศน์ จำกัด สมุทรปราการ ประเทศไทย) ที่มีการควบคุมอุณหภูมิอยู่ในช่วง 165-190 องศาเซลเซียส และความเร็วหมุนของเกลียว คือ 60 รอบต่อนาที หลังจากนั้นนำเส้นพอลิเมอร์ที่ออกจากเครื่องอัดรีดไปตัดเป็นเม็ด (Pellets) ดังแสดงในรูปที่ 2

ในขั้นตอนต่อไปนำเม็ดพอลิเมอร์ผสมที่ได้ไปขึ้นรูปเป็นแผ่นขึ้นงานตัวอย่างโดยใช้เครื่องอัดรีด ซึ่งในการขึ้นรูปจะทำการอุ่นแม่พิมพ์จนมีอุณหภูมิ 190 องศาเซลเซียส จากนั้นนำเม็ดพอลิเมอร์ผสมใส่ในแม่พิมพ์และอัดด้วยแรงดัน 500 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 10 นาที เมื่อครบเวลาทำการอัดซ้ำด้วย

แรงดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 10 นาที และเมื่อครบเวลาที่กำหนด นำแม่พิมพ์และแผ่นขึ้นงานตัวอย่างใส่ในเครื่องอัดเย็นที่มีน้ำหมุนเวียน และอัดด้วยแรงดัน 1000 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เช่นกันเป็นเวลา 10 นาที เพื่อระบายความร้อนออกจากแผ่นขึ้นงานตัวอย่าง ดังแสดงในรูปที่ 2 หลังจากนั้นถอดแผ่นขึ้นงานตัวอย่างออกจากแม่พิมพ์และตัดเตรียมเป็นชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบต่าง ๆ ต่อไป

ตารางที่ 1 สูตรส่วนผสมของพอลิเมอร์ผสม

Code	PVC (wt%)	CPE (wt%)
P100	100	-
P90C10	90	10
P80C20	80	20
P70C30	70	30

หมายเหตุ: PVC คือ พอลิไวนิลคลอไรด์, CPE คือ สารคลอรีนเทฟลอนที่ลิ้น และ wt% คือ เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก



รูปที่ 2 กรรมวิธีการขึ้นรูปแผ่นขึ้นงานตัวอย่างจากพอลิเมอร์ผสมระหว่างพอลิไวนิลคลอไรด์และคลอรีนเทฟลอนที่ลิ้น

2.3 การวิเคราะห์ทางสถิติ

ผลกระทบของปริมาณสารคลอรีนเทฟลอนที่ลิ้นต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพของพอลิเมอร์ผสมดำเนินการวิเคราะห์ทางสถิติโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) และการเปรียบเทียบเชิงซ้อนทุกคู่ (Tukey's Multiple Comparison Test) ซึ่งในการวิเคราะห์ทางสถิตินี้ดำเนินการที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ ($\alpha=0.05$)

2.4 การทดสอบสมบัติทางกล

การทดสอบการดึง (Tensile Test) และการทดสอบความแข็ง (Hardness Test) เป็นการทดสอบที่ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D638 (ASTM, 2014) และ ASTM D2240 (ASTM, 2015) ตามลำดับ ในการทดสอบการดึง ใช้ชิ้นงาน

ทดสอบประเภทที่ 4 โดยชิ้นงานทดสอบมีขนาด 115 มิลลิเมตร $\times$ 19 มิลลิเมตร $\times$ 1.3 มิลลิเมตร และความเร็วที่ใช้ดึง คือ 5 มิลลิเมตรต่อนาที โดยใช้เครื่องทดสอบสมบัติทางกลอเนกประสงค์ (รุ่น NRI-TS500-50 บริษัท นรินทร์ อินสทรุเม้นท์ จำกัด สมุทรปราการ ประเทศไทย) สำหรับการทดสอบความแข็ง ชิ้นงานทดสอบมีขนาด 30 มิลลิเมตร $\times$ 30 มิลลิเมตร $\times$ 1.3 มิลลิเมตร และวัดความแข็งด้วย Durometer แบบ Shore D Scale (รุ่น GS-702G บริษัท Teclock Corporation จำกัด Nagano, Japan) ในการทดสอบสมบัติทางกลทั้ง 2 ประเภท ดำเนินการที่อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส และทดลองแบบสุ่ม 5 ตัวอย่าง ของแต่ละสูตรการทดลอง

การทดสอบการสึกหรอ (Abrasion Test) ของวัสดุ ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D3389 (ASTM, 2016) ซึ่งดำเนินการทดสอบโดยศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ โดยใช้เครื่อง Taber Abrasion (TABER Industries, USA) ในการทดสอบชิ้นงานมีลักษณะเป็นแผ่นบางกลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 105 มิลลิเมตร และดำเนินการทดสอบ 1000 รอบ (Cycle) โดยมีก้อนน้ำหนัก ขนาด 500 กรัม กดในขณะทดสอบ ซึ่งค่าที่ได้จากการทดสอบ คือ ค่าการสูญเสียน้ำหนัก (Weight Loss)

2.5 การทดสอบสมบัติทางกายภาพ

การทดสอบการรับแรง เป็นการปฏิบัติตามมาตรฐาน ASTM F970 (ASTM, 2017) โดยนำชิ้นงานทดสอบขนาด 30 มิลลิเมตร × 30 มิลลิเมตร × 1.3 มิลลิเมตร วัดความหนา เริ่มต้น จากนั้นใช้น้ำหนักประมาณ 250 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว กดทับชิ้นงานทดสอบเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบระยะเวลาที่กำหนด ปลดปล่อยให้ชิ้นงานคืนตัวเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และวัดความหนาซ้ำอีกครั้ง เพื่อคำนวณหาค่าการยุบตัวของแผ่น ชิ้นงานตัวอย่าง ซึ่งในการทดสอบกระทำที่อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส

3. ผลการวิจัย และการอภิปรายผล

งานวิจัยการพัฒนากระเบื้องยางปูพื้นจากพอลิเมอร์ผสม ระหว่างพอลิไวนิลคลอไรด์และคลอริเนตพอลิเอทิลีนได้ผลจากการทดลองของงานวิจัย ดังต่อไปนี้

3.1 การวิเคราะห์ผลทางสถิติ

ผลการวิเคราะห์ทางสถิติในผลกระทบของปริมาณสารคลอริเนตพอลิเอทิลีนต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพของพอลิเมอร์ผสม แสดงดังตารางที่ 2 ซึ่งพบว่า จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน ปริมาณสารคลอริเนตพอลิเอทิลีนในช่วง 10-30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญ ($P < 0.05$) ต่อทุกสมบัติทางกลและทางกายภาพคือ ค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดูลัสการดึง ค่าความเครียดสูงสุด ค่าความแข็ง และค่าการยุบตัว ของพอลิเมอร์ผสม นอกจากนี้ในตารางที่ 2 ยังชี้ให้เห็นด้วยว่า ค่า Coefficient of Determination (R^2) ของความแข็งแรงดึง มอดูลัสการดึง ความเครียดสูงสุด และความแข็ง มีค่าอยู่ในช่วง 92.3 เปอร์เซ็นต์ ถึง 95.6 เปอร์เซ็นต์ นั่นหมายความว่า ความผันแปรทั้งหมดที่เกิดขึ้นจากการทดลองที่ไม่สามารถอธิบายได้มีเพียง 4.6 เปอร์เซ็นต์ 7.7 เปอร์เซ็นต์ 4.8 เปอร์เซ็นต์ และ 4.4 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ อย่างไรก็ตาม ในสมบัติการยุบตัวมีค่า R^2 ค่อนข้างน้อยเพียง 63.1 เปอร์เซ็นต์ นั่น

หมายความว่า ประมาณ 36.1 เปอร์เซ็นต์ เป็นความผันแปรที่ไม่ได้มีผลมาจากปริมาณสารคลอริเนตพอลิเอทิลีน

เมื่อวิเคราะห์โดยใช้การเปรียบเทียบเชิงซ้อนทุกวิธี แสดงให้เห็นว่า ในค่ามอดูลัสการดึง การเติมสารคลอริเนตพอลิเอทิลีนเป็นส่วนผสมในพอลิไวนิลคลอไรด์ปริมาณ 10 ปริมาณ 20 และปริมาณ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ให้ค่ามอดูลัสการดึงสูงกว่าพอลิไวนิลคลอไรด์ที่ไม่เติมสารคลอริเนตพอลิเอทิลีนอย่างมีนัยสำคัญ ($\alpha = 0.05$) อย่างไรก็ตาม การเติมสารคลอริเนตพอลิเอทิลีนเป็นส่วนผสมปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ให้ค่ามอดูลัสการดึงน้อยกว่าการเติมสารคลอริเนตพอลิเอทิลีนปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อย่างไม่มีนัยสำคัญ และการเติมสารคลอริเนตพอลิเอทิลีนเป็นส่วนผสมปริมาณ 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ให้ค่ามอดูลัสการดึงสูงกว่าการเติมสารคลอริเนตพอลิเอทิลีนปริมาณ 20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (ตัวอักษร B) อย่างมีนัยสำคัญ ($\alpha = 0.05$)

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนในผลกระทบของปริมาณสารคลอริเนตพอลิเอทิลีนต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพของพอลิเมอร์ผสม

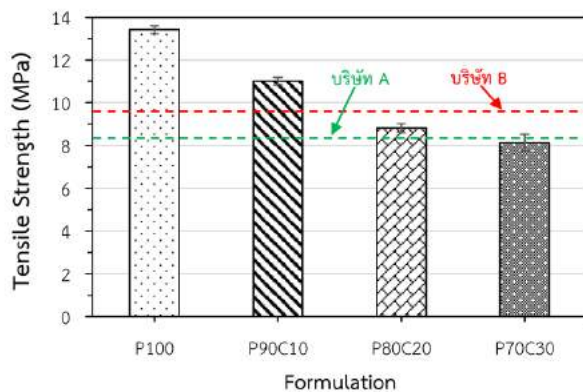
Property	CPE (wt%)				P-value	R^2 (%)
	0	10	20	30		
TS (MPa)	13.4 A	11.0 B	8.8 C	8.1 C	0.000*	95.4
TM (MPa)	22.5 A	59.2 B	70.9 B	121.2 C	0.000*	92.3
Strain (%)	372 A	270 B	234 C	173 D	0.000*	95.2
Hardness (Shore D)	51.4 A	54.8 B	56.5 C	58.1 D	0.000*	95.6
Residual (mm)	0.015 A	0.025 AB	0.034 AB	0.047 B	0.038*	63.1

หมายเหตุ: CPE คือ สารคลอริเนตพอลิเอทิลีน และ wt% คือ เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ในขณะเดียวกัน * หมายถึง ปริมาณสารคลอริเนตพอลิเอทิลีนมีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ($P < 0.05$) และในแต่ละสมบัติที่มีตัวอักษรเหมือนกัน (A-D) หมายถึง มีความแตกต่างอย่างไม่มีนัยสำคัญ ($\alpha = 0.05$)

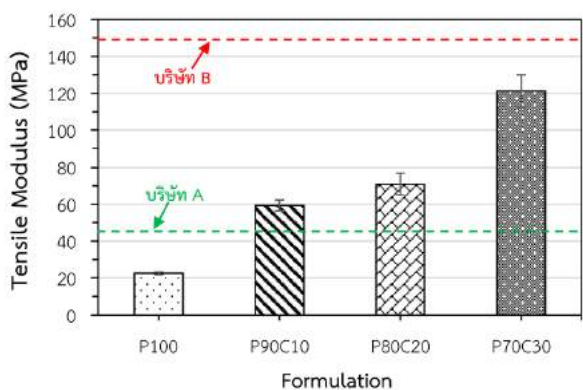
3.2 สมบัติการดึงของพอลิเมอร์ผสม

ผลกระทบปริมาณสารคลอริเนตพอลิเอทิลีนต่อค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดูลัสการดึงของพอลิเมอร์ผสม แสดงดังรูปที่ 3 และ 4 ตามลำดับ โดยพบว่า การเติมสารคลอริเนตพอลิเอทิลีนเป็นส่วนผสมเพิ่มขึ้นในช่วง 10-30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงลดลงตามปริมาณสารคลอริเนตพอลิเอทิลีนที่เติมเป็นส่วนผสม เนื่องจากสารคลอริเนตพอลิเอทิลีนไม่สามารถผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิไวนิลคลอไรด์ (Wu et al., 2004; Maksimov et al., 2004) ทำให้ประสิทธิภาพการถ่ายทอดแรงภายในโครงสร้างของพอลิเมอร์ผสมลดลง แต่

ค่ามอดูลัสการดึงกลับเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารคลอรีเนตพอลิเอทิลีน สิ่งนี้เป็นไปได้ว่า คลอรีเนตพอลิเอทิลีนมีความแข็งแรงสูงกว่าพอลิไวนิลคลอไรด์แบบยืดหยุ่น ในขณะเดียวกันเมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดูลัสการดึงระหว่างพอลิเมอร์ผสมกับกระเบื้องยางปูพื้นของบริษัท A และ B พบว่าพอลิเมอร์ผสมที่เติมสารคลอรีเนตพอลิเอทิลีน 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าความแข็งแรงดึงสูงกว่ากระเบื้องยางปูพื้นของบริษัท A และ B แต่เมื่อเติมสารคลอรีเนตพอลิเอทิลีน 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กลับทำให้พอลิเมอร์ผสมมีค่าความแข็งแรงดึงน้อยกว่ากระเบื้องยางปูพื้นของทั้ง 2 บริษัท และเมื่อพิจารณาค่ามอดูลัสการดึงพบว่า กระเบื้องยางปูพื้นของบริษัท A มีค่ามอดูลัสการดึงต่ำกว่าพอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วน แต่กระเบื้องยางปูพื้นของบริษัท B มีค่ามอดูลัสการดึงสูงกว่าในทุกอัตราส่วน



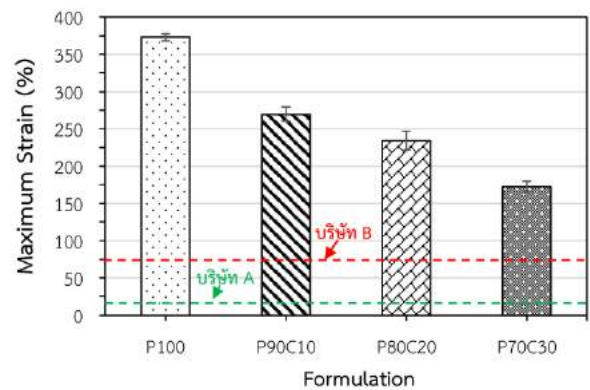
รูปที่ 3 ผลกระทบปริมาณสารคลอรีเนตพอลิเอทิลีนต่อค่าความแข็งแรงดึง



รูปที่ 4 ผลกระทบปริมาณสารคลอรีเนตพอลิเอทิลีนต่อค่ามอดูลัสการดึง

รูปที่ 5 แสดงผลกระทบปริมาณสารคลอรีเนตพอลิเอทิลีนต่อค่าความเครียดสูงสุดของพอลิเมอร์ผสม โดยชี้ให้เห็นว่า ค่าความเครียดสูงสุดของพอลิเมอร์ผสมมีค่าลดลงตามปริมาณสารคลอรีเนตพอลิเอทิลีนที่เติมเป็นส่วนผสม ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Maksimov et al. (2004) ที่พบว่า ค่าความเครียด

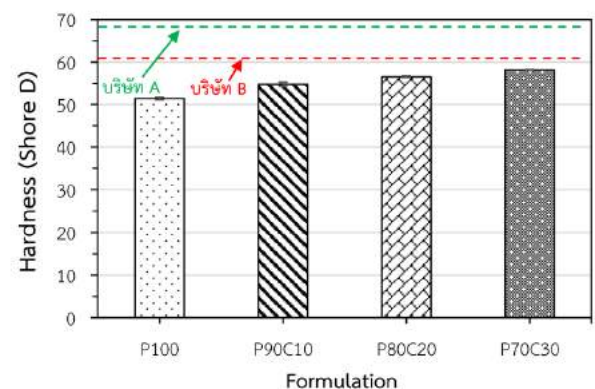
สูงสุดของพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงลดลงตามปริมาณคลอรีเนตพอลิเอทิลีนที่เติมเป็นส่วนผสม เนื่องจากวัสดุทั้งสองไม่สามารถผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันได้ ทำให้ความสามารถในการยึดตัวของพอลิเมอร์ผสมลดลง นอกจากนี้พบว่า พอลิเมอร์ผสมทุกอัตราส่วนมีค่าความเครียดสูงสุดมากกว่ากระเบื้องยางปูพื้นของทั้งบริษัท A และ B



รูปที่ 5 ผลกระทบปริมาณสารคลอรีเนตพอลิเอทิลีนต่อค่าความเครียดสูงสุด

3.3 สมบัติความแข็งของพอลิเมอร์ผสม

รูปที่ 6 แสดงผลกระทบปริมาณสารคลอรีเนตพอลิเอทิลีนต่อค่าความแข็งของพอลิเมอร์ผสม ซึ่งพบว่า การเติมสารคลอรีเนตพอลิเอทิลีนเป็นส่วนผสมในพอลิเมอร์ผสมมากขึ้น ส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นอย่างช้า ๆ ตามปริมาณของสารคลอรีเนตพอลิเอทิลีนที่เติมเป็นส่วนผสมในช่วง 10-30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สิ่งนี้เป็นไปได้ว่า คลอรีเนตพอลิเอทิลีนมีความแข็งแรงมากกว่าพอลิไวนิลคลอไรด์แบบยืดหยุ่น นอกจากนี้เมื่อเปรียบเทียบค่าความแข็งระหว่างพอลิเมอร์ผสมกับกระเบื้องยางปูพื้นของบริษัท A และ B พบว่า พอลิเมอร์ผสมมีค่าความแข็งน้อยกว่ากระเบื้องยางปูพื้นของบริษัท A และ B

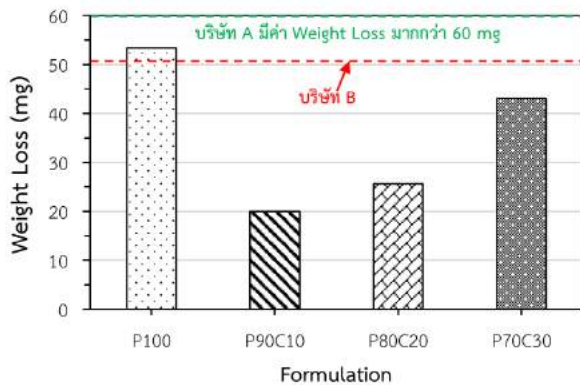


รูปที่ 6 ผลกระทบปริมาณสารคลอรีเนตพอลิเอทิลีนต่อค่าความแข็ง

3.4 สมบัติการสึกหรอของพอลิเมอร์ผสม

ผลกระทบปริมาณสารคลอรีนตพอลิเอทิลีนต่อค่าการสูญเสียน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสม แสดงดังรูปที่ 7 ซึ่งชี้ให้เห็นว่า การเติมสารคลอรีนตพอลิเอทิลีนปริมาณ 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสมลดลงอย่างชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบกับพลาสติกพอลิไวนิลคลอไรด์ 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก แต่เมื่อเติมสารคลอรีนตพอลิเอทิลีนเป็นส่วนผสมเพิ่มขึ้นในช่วง 20-30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก กลับทำให้ค่าการสูญเสียน้ำหนักของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารคลอรีนตพอลิเอทิลีน ในความเป็นจริงกลไกการสึกหรอของพอลิเมอร์เกิดจากการเสียดสีที่รุนแรงระหว่างผิวหน้าที่อ่อนของพอลิเมอร์กับพื้นผิวที่แข็งและหยาบของล้อหิน (Abu-Abdeen & Elamer, 2010) ดังนั้นวัสดุที่มีผิวหน้าที่อ่อน และมีการประสานที่ไม่แข็งแรงภายในโครงสร้าง จะมีการสูญเสียน้ำหนักได้ง่ายกว่า

นอกจากนี้พบว่า พอลิเมอร์ผสมสารคลอรีนตพอลิเอทิลีนทุกสูตรมีค่าการสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่ากระเบื้องยางปูพื้นของทั้งบริษัท A และ B และพบว่า พลาสติกพอลิไวนิลคลอไรด์ที่ไม่ผสมสารคลอรีนตพอลิเอทิลีนมีค่าการสูญเสียน้ำหนักมากกว่ากระเบื้องยางปูพื้นของบริษัท B นั่นหมายความว่า การเติมสารคลอรีนตพอลิเอทิลีนในช่วง 10-30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก สามารถปรับปรุงค่าการสูญเสียน้ำหนักของพอลิไวนิลคลอไรด์ได้



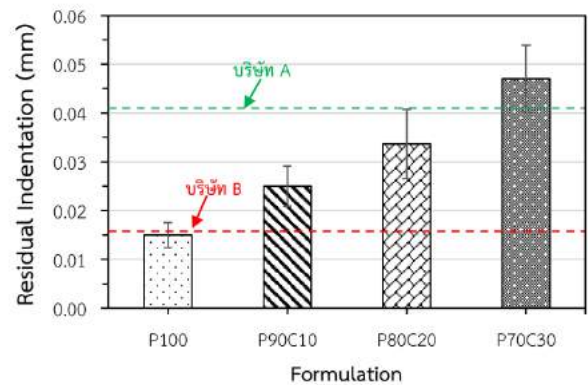
รูปที่ 7 ผลกระทบปริมาณสารคลอรีนตพอลิเอทิลีนต่อค่าการสูญเสีย น้ำหนัก

3.5 สมบัติการรับแรงของพอลิเมอร์ผสม

รูปที่ 8 แสดงผลกระทบปริมาณสารคลอรีนตพอลิเอทิลีนต่อค่าการยุบตัวของพอลิเมอร์ผสม โดยพบว่า การเติมสารคลอรีนตพอลิเอทิลีนเพิ่มขึ้นในช่วง 10-30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ส่งผลให้ค่าการยุบตัวของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้นตามปริมาณสารคลอรีนตพอลิเอทิลีนที่เติมเป็นส่วนผสม สิ่งนี้เป็นไปได้ว่า การเติมคลอรีนตพอลิเอทิลีนในพอลิไวนิลคลอไรด์แบบยืดหยุ่น ส่งผลให้พอลิเมอร์ผสมมีความยืดหยุ่นลดลง ซึ่งสังเกตได้จากค่า

มอดูลัสการดึงและค่าความแข็ง ทำให้เมื่อรับแรงกดทับเป็นเวลานาน ความสามารถในการคืนตัวของพอลิเมอร์ผสมลดลงตามปริมาณสารคลอรีนตพอลิเอทิลีนที่เติมเป็นส่วนผสม ในขณะเดียวกันพบว่า พอลิเมอร์ผสมมีค่าการยุบตัวมากกว่าพอลิไวนิลคลอไรด์ 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

เมื่อเปรียบเทียบค่าการยุบตัวของพอลิเมอร์ผสมกับกระเบื้องยางปูพื้นของบริษัท A และ B พบว่า พอลิเมอร์ผสมที่เติมสารคลอรีนตพอลิเอทิลีน 10-20 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีค่าการยุบตัวสูงกว่ากระเบื้องยางปูพื้นของบริษัท B และเมื่อเติมสารคลอรีนตพอลิเอทิลีนเพิ่มขึ้นเป็น 30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก ทำให้พอลิเมอร์ผสมมีค่าการยุบตัวมากกว่ากระเบื้องยางปูพื้นของทั้งบริษัท A และ B



รูปที่ 8 ผลกระทบปริมาณสารคลอรีนตพอลิเอทิลีนต่อค่าการยุบตัว

4. สรุปผล

ผลจากการศึกษาผลกระทบของปริมาณสารคลอรีนตพอลิเอทิลีนต่อสมบัติทางกลและทางกายภาพของพอลิเมอร์ผสม เพื่อพัฒนาพอลิเมอร์ผสมเป็นกระเบื้องยางปูพื้นพบว่า ปริมาณสารคลอรีนตพอลิเอทิลีนในช่วง 10-30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อค่าความแข็งแรงดึง ค่ามอดูลัสการดึง ค่าความเครียดสูงสุด ค่าความแข็ง และค่าการยุบตัวของพอลิเมอร์ผสม โดยค่ามอดูลัสการดึง ค่าความแข็ง ค่าการสูญเสีย น้ำหนัก และค่าการยุบตัวของพอลิเมอร์ผสมเพิ่มขึ้น เมื่อเติมสารคลอรีนตพอลิเอทิลีนเป็นส่วนผสมในพลาสติกพอลิไวนิลคลอไรด์เพิ่มขึ้นในช่วง 10-30 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก อย่างไรก็ตามค่าความแข็งแรงดึง ค่าความเครียดสูงสุดกลับมีค่าลดลง พฤติกรรมนี้เกิดจากสารคลอรีนตพอลิเอทิลีนไม่สามารถผสมเข้าเป็นเนื้อเดียวกันกับพอลิไวนิลคลอไรด์ได้ ทำให้ความสามารถในการยึดตัวและประสิทธิภาพการถ่ายทอดแรงภายในโครงสร้างของพอลิเมอร์ผสมลดลง ในขณะเดียวกันพบว่า การเติมสารคลอรีนตพอลิเอทิลีนสามารถปรับปรุงสมบัติค่ามอดูลัสการดึง ค่าความแข็ง และค่าการสูญเสีย น้ำหนัก

ของพลาสติกพอลิไวนิลคลอไรด์ เมื่อเปรียบเทียบกับพลาสติกพอลิไวนิลคลอไรด์ 100 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก นอกจากนี้จากผลการวิจัยสามารถสรุปได้ว่า พอลิเมอร์ผสมที่เติมสารคลอรีนในพอลิเอทิลีน 10 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก มีความเหมาะสมในการนำไปใช้พัฒนาเป็นกระเบื้องยางปูพื้นต่อไป เนื่องจากมีค่าความแข็งแรงดึงและค่าความเครียดสูงสุดมากกว่า และค่าการสูญเสียน้ำหนักน้อยกว่ากระเบื้องยางปูพื้นของทั้งบริษัท A และ B

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณเงินแผ่นดิน (รหัสข้อเสนองานวิจัย 2562A17102147) มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ประจำปี 2562 และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ และคณะผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ที่สนับสนุนการดำเนินงานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- Abu-Abdeen, M., & Elamer, I. (2010). Mechanical and swelling properties of thermoplastic elastomer blends. *Materials and Design*, 31(2), 808-815. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2009.07.059>
- ASTM. (2014). ASTM D638-14. *Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D0638-14>
- ASTM. (2015). ASTM D2240-15e1. *Standard Test Method for Rubber Property-Durometer Hardness*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D2240-15>
- ASTM. (2016). ASTM D3389-16. *Standard Test Method for Coated Fabrics Abrasion Resistance (Rotary Platform Abrader)*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/D3389-16>
- ASTM. (2017). ASTM F970-17. *Standard Test Method for Measuring Recovery Properties of Floor Coverings after Static Loading*. ASTM International. <https://doi.org/10.1520/F0970-17>
- Bhagabati, P., Chaki, T. K., & Khastgir, D. (2015). Chlorinated polyethylene (CPE) / ethylene methacrylate copolymer (EMA) / sepiolite nanocomposite via a facile one- step covalent modification technique. *RSC Advances*, 5, 60294-60306. <https://doi.org/10.1039/C5RA06488K>
- Deanin, R. D., & Chuang, W. L. (1987). ABS and CPE modifiers in rigid PVC. *Journal of Vinyl Technology*, 9(2), 60- 65. <https://doi.org/10.1002/vnl.730090206>
- Kongthan, J. (2015). *Physical properties of poly(vinyl chloride)/poly(butylene succinate)/wood flour composites*. Chulalongkorn University. <http://cuir.car.chula.ac.th/handle/123456789/61491>

- Maksimov, R. D., Ivanova, T., Kalnins, M., & Zicans, J. (2004). Mechanical properties of high- density polyethylene/ chlorinated polyethylene blends. *Mechanics of Composite Materials*, 40, 331-340. <https://doi.org/10.1023/B:MOCM.0000039749.59104.7d>
- Page, D. J. Y. S., Cunningham, N., Chan, N., Carran, G., & Kim, J. (2007). Mechanical and heat deflection properties of PVC/ PMMA/ montmorillonite composites. *Journal of Vinyl & Additive Technology*, 13(2), 91-97. <https://doi.org/10.1002/vnl.20108>
- Thai Health on the Road to. (2013). *Thai society without asbestos*. <https://thaipublica.org>
- Varma, A. J., Deshpade, S. V., & Kondapalli, P. (1999). A comparative study of the thermal behavior of PVC, a series of synthesized chlorinated polyethylenes and HDPE. *Polymer Degradation and Stability*, 63(1), 1-3. [https://doi.org/10.1016/S0141-3910\(98\)00051-2](https://doi.org/10.1016/S0141-3910(98)00051-2)
- Vrandecic, N. S., Klaric, I., & Kovacic, T. (2004). Kinetics of thermooxidative degradation of poly(vinyl chloride) / chlorinated polyethylene blends. *Polymer Degradation and Stability*, 84(1), 31-39. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2003.08.013>
- Vrandecic, N. S., Klaric, I., & Kovacic, T. (2004). Thermooxidative degradation of poly(vinyl chloride) / chlorinated polyethylene blends investigated by thermal analysis methods. *Polymer Degradation and Stability*, 84(1), 23-30. <https://doi.org/10.1016/j.polymdegradstab.2003.08.012>
- Wood Grain Rubber Tiles. (2020). *Wood grain rubber tiles T-FLEX MASTER*. www.9000Group.com/ Wood grain rubber tiles
- Wu, D., Wang, W., Song, Y., & Jin, R. (2004). Nanocomposites of poly(vinyl chloride) and nanometric calcium carbonate particles: Effects of chlorinated polyethylene on mechanical properties, morphology, and rheology. *Journal of Applied Polymer Science*, 92(4), 2714-2723. <https://doi.org/10.1002/app.20295>

7. ชีวประวัติ



รองศาสตราจารย์ ดร.ชาตรี หอมเขียว สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอก สาขาวิศวกรรมอุตสาหการและระบบมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมอุตสาหการ และดำรงตำแหน่งหัวหน้าหน่วยวิจัยเทคโนโลยีการแปรรูปวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย งานวิจัยที่สนใจ คือ วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ แผ่นใยไม้อัด และการออกแบบการทดลอง



รองศาสตราจารย์สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์ สำเร็จ
การศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรม
ระบบการผลิต มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระ
จอมเกล้าธนบุรี ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรอง
ศาสตราจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
ราชมงคลศรีวิชัย งานวิจัยที่สนใจ คือ วิศวกรรม
การผลิต การยศาสตร์ และการออกแบบ
ผลิตภัณฑ์



ผู้ช่วยศาสตราจารย์จักรนรินทร์ ฉัตรทอง
สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชา
วิศวกรรมการผลิต สถาบันเทคโนโลยีพระจอม
เกล้าพระนครเหนือ ปัจจุบันดำรงตำแหน่งผู้ช่วย
ศาสตราจารย์ประจำสาขาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
ราชมงคลศรีวิชัย งานวิจัยที่สนใจ คือ วิศวกรรม
การผลิต และการออกแบบชิ้นส่วนการผลิต

แบบจำลองค่าที่ดีที่สุดสำหรับการกำหนดตำแหน่งที่ตั้งโรงงานในนิคมอุตสาหกรรมโดยพิจารณา
ต้นทุนด้านความเสี่ยงจากเหตุฉุกเฉิน

Optimization Model for Industrial Location in Industrial Estate Problem
under Risk Cost from Emergency Case

นิรุทธิ์ วัฒนะแสง^{1,2}, กสิณ รังสิกรรพม^{1*}
Niroot Wattanasang^{1,2}, Kasin Ransikarbun^{1*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี 34190

²ภาควิชาวิศวกรรมความปลอดภัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ 10160

¹Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Ubon Ratchathani University, 34190

²Department of Safety Engineering, Faculty of Engineering, Southeast Asia University 10160

*Corresponding author e-mail: kasinphd@gmail.com

(Received: 24 May 2020, Revised: 3 December 2020, Accepted: 17 December 2020)

บทคัดย่อ

ปัจจุบันหลาย ๆ ประเทศได้มีการจัดตั้งนิคมอุตสาหกรรมโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อใช้เป็นพื้นที่ในการประกอบกิจการของโรงงานอุตสาหกรรมและเป็นการส่งเสริมภาคอุตสาหกรรมให้เจริญเติบโต รวมถึงการเพิ่มจำนวนของนิคมอุตสาหกรรมเพื่อเป็นการรองรับการขยายตัวทางภาคเศรษฐกิจ อย่างไรก็ตาม งานวิจัยด้านการออกแบบตำแหน่งที่ตั้งโรงงานในนิคมอุตสาหกรรมในปัจจุบันยังมีจำกัด นอกจากนี้งานวิจัยที่มีอยู่ก็พิจารณาปัจจัยด้านต้นทุนเพียงอย่างเดียว โดยงานวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาปัจจัยด้านความเสี่ยงที่ส่งผลต่อการกำหนดตำแหน่งที่ตั้งของโรงงานในนิคมอุตสาหกรรม โดยเริ่มจากพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบโปรแกรมเชิงเส้นผสมจำนวนเต็ม โดยในกรณีศึกษาจะแบ่งประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมในนิคมอุตสาหกรรมออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภทโรงงานที่มีลักษณะอันตรายและโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไป นอกจากนี้ยังได้จำลองผลกระทบของความรุนแรงจากกรณีเกิดเหตุฉุกเฉินของโรงงานอุตสาหกรรมโดยใช้โปรแกรม Areal Locations of Hazardous Atmospheres (ALPHA) เพื่อใช้เป็นข้อมูลป้อนให้กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ โดยผลการจำลองได้ออกแบบตำแหน่งที่ตั้งของโรงงานให้มีมูลค่าความเสียหายน้อยที่สุด คือ 47,970,000 บาท ซึ่งถือว่าเป็นมูลค่าน้อยที่สุด และพบว่าตำแหน่งของโรงงานอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ถูกกำหนดให้อยู่บริเวณพื้นที่ลึกเข้าไปด้านในนิคมอุตสาหกรรมและมีการกระจายของโรงงาน เพื่อหลีกเลี่ยงพื้นที่เสี่ยงที่ได้รับผลกระทบเมื่อเกิดเหตุฉุกเฉิน โดยมีบางส่วนที่ถูกเลือกให้ตั้งในพื้นที่ที่มีความเสี่ยงซึ่งเป็นพื้นที่ขนาดเล็กและได้รับผลกระทบน้อย ซึ่งผลจากการบูรณาการการศึกษาระหว่างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์และแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ในงานวิจัยนี้ สามารถนำไปเป็นเครื่องมือเพื่อช่วยในการตัดสินใจออกแบบที่ตั้งโรงงานอุตสาหกรรมหรือออกแบบสถานที่ที่ต้องการศึกษาต่าง ๆ ต่อไป

คำสำคัญ: การออกแบบตำแหน่งที่ตั้งโรงงานอุตสาหกรรม, แบบจำลองค่าที่ดีที่สุด, แบบจำลอง ALPHA, นิคมอุตสาหกรรม, ต้นทุนด้านความเสี่ยง

Abstract

Many countries, nowadays, had established industrial estates with an aim to operate industrial activities and support the growing industrial sector. In addition, an increasing trend of new industrial estates is arising to support economics and business expansion. However, studies that focus on factory location for industrial estates are scarce. In addition, existing studies only cover the cost criterion. In this study, we propose the Mixed-Integer Linear Programming (MILP) model to determine the location of factory plants in an industrial estate with a focus on the risk-cost criterion. The model classifies two types of industrial plants, which are hazardous-material factory and general-type factory. In order to incorporate the safety factor, the model considers the risk and severity in an emergency case simulated using the Areal Locations of Hazardous Atmospheres (ALOHA) program. The simulation results are used as input for the developed MILP model. The results with the minimum risk cost at 47,970,000 Baht show that location of most industrial plants are located at the outer area of the industrial estate. These locations are scatteringly located around the boarder of industrial estate, given a consideration of the high-risk areas in an emergency situation. Although there are a few areas of high risk chosen for plant assignments, these areas are relatively small in size, allowing minimal impact. The integrated mathematical and simulation model in this research can be further used as a tool to support design decisions for other industrial locational studies.

Keywords: Industrial Plant Location, Optimization Model, ALOHA Simulation, Industrial Estate, Risk-Cost Criterion

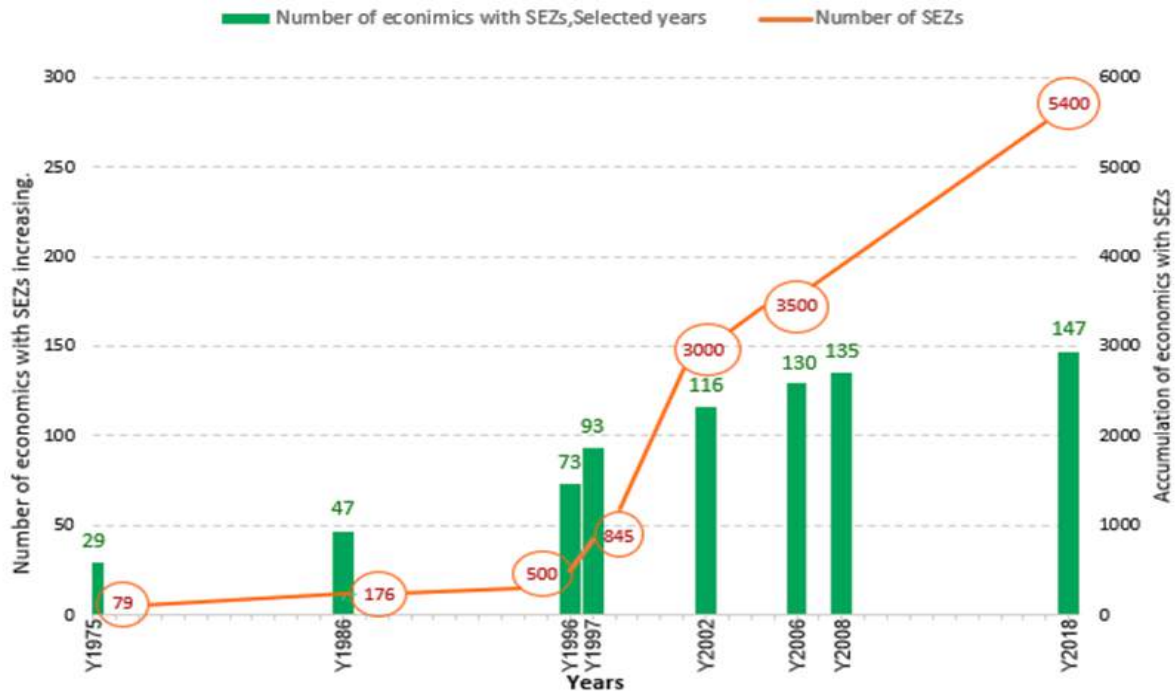
1. ที่มาและความสำคัญของปัญหา

ปัจจุบันหลาย ๆ ประเทศมีการปรับตัวและพัฒนากระบวนการเชิงธุรกิจให้มีความก้าวหน้าและทันต่อกระแสของการเปลี่ยนแปลง เช่น มีการส่งเสริมเทคโนโลยีทางด้านดิจิทัล ทางด้านการท่องเที่ยว รวมถึงการส่งเสริมทางด้านอุตสาหกรรม ซึ่งการให้ความสำคัญในการส่งเสริมทางด้านอุตสาหกรรมเป็นผลทำให้หลาย ๆ ประเทศมีการขยายตัวเพิ่มพื้นที่สำหรับรองรับการเจริญเติบโตของอุตสาหกรรมต่าง ๆ ตัวอย่างเช่น การเพิ่มเขตเศรษฐกิจพิเศษหรือพื้นที่สำหรับสร้างนิคมอุตสาหกรรม การให้สิทธิพิเศษสำหรับการลงทุนเพื่อเป็นการดึงดูดนักลงทุน โดยจากรายงานของ United Nations Conference on Trade and Development (UNCTAD) แสดงข้อมูลปี ค.ศ. 2018 พบว่ามีจำนวนเขตเศรษฐกิจพิเศษสะสมรวม 5,400 แห่ง โดยเพิ่มจากปี ค.ศ. 1975 จำนวน 79 แห่ง (UNCTAD, 2019) ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งถือได้ว่าเป็นการเพิ่มขึ้นของพื้นที่อุตสาหกรรมอย่างมาก

โดยในประเทศไทยเอง จำเป็นต้องมีการพัฒนาและเตรียมความพร้อมในการเพิ่มขีดความสามารถในการรองรับการขยายตัวของภาคอุตสาหกรรม โดยได้มีการจัดตั้งเขตนิคมอุตสาหกรรมในแต่ละภูมิภาคจำนวนทั้งหมด 55 นิคม

อุตสาหกรรม โดยกระจายครอบคลุม 16 จังหวัดทั่วประเทศ (BOI, 2016) ซึ่งยังไม่รวมถึงเขตเศรษฐกิจพิเศษที่จะเพิ่มขึ้นในอีก 10 จังหวัด ซึ่งได้มีการดำเนินการอย่างต่อเนื่องตั้งแต่ปี ค.ศ. 2016 จนถึงปัจจุบัน (IEAT, 2020)

ทั้งนี้ การเพิ่มขึ้นของจำนวนนิคมอุตสาหกรรมที่มากขึ้นนี้แม้จะมีข้อดีในด้านการรองรับการลงทุนและการเติบโตของภาคอุตสาหกรรม แต่ก็มีความเสี่ยงที่อาจก่อให้เกิดความสูญเสียของชีวิตและทรัพย์สินในกรณีการเกิดเหตุการณ์ฉุกเฉินหรือเหตุการณ์ไม่คาดคิด เนื่องจากความเสี่ยงของโรงงานอุตสาหกรรมมีหลายรูปแบบมากขึ้น ซึ่งยังรวมถึงปัญหาความหนาแน่นของโรงงานอุตสาหกรรมในแต่ละพื้นที่ โดยเฉพาะเหตุการณ์ที่เกิดขึ้น เช่นการเกิดเหตุการณ์ไฟไหม้ หรือการระเบิดหรือเกิดเหตุการณ์สารเคมีรั่วไหลของโรงงานอุตสาหกรรมในแต่ละนิคมอุตสาหกรรม ส่งผลให้เกิดความสูญเสียอย่างมาก ซึ่งจำเป็นต้องมีการพิจารณามาตรการในการบริหารจัดการและป้องกันเพื่อไม่ให้เกิดเหตุการณ์ฉุกเฉินต่าง ๆ หรือเพื่อให้เกิดผลกระทบน้อยที่สุด โดยเริ่มตั้งแต่ขั้นตอนการวางแผนออกแบบพิจารณาพื้นที่สำหรับเป็นสถานที่ตั้งนิคมอุตสาหกรรม (Wattanasang & Ransikarbum, 2019)



รูปที่ 1 แสดงแนวโน้มการเพิ่มจำนวนเขตเศรษฐกิจพิเศษทั่วโลก ตั้งแต่ปี ค.ศ. 1975-2018 (UNCTAD, 2019)

ในงานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาการออกแบบตำแหน่งที่ตั้ง (Location Problem) ที่เหมาะสมของโรงงานอุตสาหกรรมในเขตนิคมอุตสาหกรรม โดยพิจารณาปัจจัยทางด้านความเสี่ยงจากเหตุฉุกเฉิน ซึ่งพิจารณาการเกิดผลกระทบและความสูญเสียของชีวิตทรัพย์สินในกรณีที่เกิดเหตุฉุกเฉิน ทั้งนี้ ปัจจัยทางด้านความเสี่ยง เป็นการสะท้อนถึงการพิจารณาความปลอดภัย ซึ่งในงานวิจัยนี้ ใช้การพิจารณาความเสียหายและความเสี่ยงจากกรณีการเกิดเหตุฉุกเฉินในนิคมอุตสาหกรรม ซึ่งถือว่าเป็นปัจจัยที่สำคัญ โดยเริ่มจากการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบโปรแกรมเชิงเส้นผสมจำนวนเต็ม (Mixed-Integer Linear Programming – MILP) สำหรับปัญหาการพิจารณาเลือกตำแหน่งที่ตั้งของโรงงานอุตสาหกรรมในเขตนิคมอุตสาหกรรม ซึ่งทำการพิจารณาความเสี่ยงของการเกิดเหตุฉุกเฉิน จากการใช้โปรแกรม Areal Locations of Hazardous Atmospheres (ALOHA) เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ระดับความเสี่ยงจากการจำลองสถานการณ์กรณีเกิดเหตุฉุกเฉินของสารเคมี โดยพิจารณาความรุนแรงของสารเคมีที่เกิดขึ้น

สำหรับในการศึกษานี้ได้กำหนดวัตถุประสงค์ในการศึกษาออกเป็น 2 ประเด็นคือ เพื่อพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์รูปแบบโปรแกรมเชิงเส้นผสมจำนวนเต็ม (MILP) สำหรับปัญหาการออกแบบตำแหน่งที่ตั้งของโรงงานในนิคมอุตสาหกรรม

ภายใต้ปัจจัยทางด้านความปลอดภัย โดยเพื่อวิเคราะห์ความรุนแรงของสารเคมีจากกรณีการเกิดเหตุการณ์ระเบิด และการฟุ้งกระจายโดยการใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ สำหรับเหตุการณ์ความรุนแรงด้วยโปรแกรม ALOHA ซึ่งเป็นการบูรณาการร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

2. ทฤษฎีงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

จากการทบทวนงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับลักษณะปัญหาที่เกี่ยวกับการพิจารณาการวางผังของโรงงานอุตสาหกรรม พบว่างานวิจัยที่มีอยู่ส่วนใหญ่เป็นการศึกษาเกี่ยวกับการออกแบบสถานที่ตั้งของโรงงาน (Facility Location Problem) ในระบบเครือข่าย (Network) รวมถึงปัญหาการออกแบบแผนผังของกระบวนการผลิตภายในโรงงานอุตสาหกรรม (Facility Layout Problem) ที่มุ่งเน้นการจัดการภายในโรงงาน โดยพิจารณาปัจจัยด้านต้นทุนที่ต่ำที่สุด เช่น การศึกษาการออกแบบแผนผังกระบวนการผลิตของอุตสาหกรรมเกี่ยวกับโรงงานปิโตรเคมี โดยพิจารณาความต่อเนื่องของกระบวนการผลิตหลัก เช่น ขั้นตอนการเคลื่อนย้ายขนถ่ายวัตถุดิบและระบบไอน้ำที่ใช้ในกระบวนการผลิต ปริมาณท่อที่ใช้งาน ระบบปั๊มดูดวัตถุดิบ และเนื้อที่ที่ใช้งาน โดยกำหนดวัตถุประสงค์ของการออกแบบให้มีความต้นทุนต่ำที่สุดด้วยการใช้วัตถุดิบน้อยที่สุด และระบบท่อสำหรับ

วัตถุดิบขั้นสุด เป็นต้น (Caputo et al., 2015; Wu et al., 2016) นอกจากนี้ Chae and Regan (2016) ได้ออกแบบแผนผังของโรงงาน โดยพิจารณาการดูแลจัดการ ระบบสาธารณูปโภค และอุปกรณ์เครื่องจักร โดยจำลองแผนผังในลักษณะแบบต่าง ๆ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อลดต้นทุนในการใช้วัตถุดิบให้ต่ำที่สุด เป็นต้น

ทั้งนี้ จะเห็นได้ว่างานวิจัยที่เกี่ยวกับการออกแบบตำแหน่งที่ตั้งในระดับของนิคมอุตสาหกรรม (Industrial Estate Layout) ซึ่งเป็นการศึกษาในขอบเขตที่กว้างมากขึ้น มีผู้ดำเนินการศึกษาและวิจัยน้อย ซึ่งยังไม่เป็นที่แพร่หลายมากนัก ดังตัวอย่างเมื่อไม่นานมานี้ มีงานวิจัยที่ศึกษาการวางแผนตำแหน่งวางผังของโรงงานในนิคมอุตสาหกรรม โดยงานวิจัยส่วนใหญ่เน้นที่ปัจจัยทางด้านต้นทุน ควบคู่กับปัจจัยทางด้านความปลอดภัยมากขึ้น เช่น การศึกษาโดยจำลองแผนผังขอบเขตของนิคมอุตสาหกรรมและกำหนดตำแหน่งการวางผังของโรงงานอุตสาหกรรมโดย Wang et al. (2017) ซึ่งพบว่าการจัดการตำแหน่งแผนผังของโรงงานอุตสาหกรรมอย่างเหมาะสมจะสามารถลดต้นทุนในการติดตั้งระบบท่อและลดความเสี่ยงที่อาจก่อให้เกิดอุบัติเหตุได้ โดยผู้วิจัยได้ทำการแบ่งพื้นที่ที่จะศึกษาออกเป็นโซนพร้อมทั้งวิเคราะห์ตำแหน่งการวางผังของโรงงานในนิคมอุตสาหกรรมอย่างไรก็ตาม งานวิจัยเหล่านี้ส่วนใหญ่เป็นกรณีศึกษาในต่างประเทศ และควรมีการบูรณาการร่วมกับแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ด้วย (Kim et al., 2016; Ransikarbum et al., 2017; Chanthakhot & Ransikarbum, 2019; Wattanasang & Ransikarbum, 2019; Ransikarbum, 2020)

สำหรับงานวิจัยที่เน้นการพิจารณาด้านความปลอดภัยในโรงงาน พบว่ามีการนำความเสี่ยงที่อาจเกิดเหตุฉุกเฉินมาพิจารณา เช่น การทำการศึกษาและออกแบบแผนผังกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมโดยพิจารณาการแพร่กระจายของสารเคมี และแก๊สพิษ ด้วยการกำหนดแผนผังและตำแหน่งติดตั้งของพื้นที่ต่าง ๆ เช่น ห้องควบคุมกระบวนการผลิตในโรงงาน และพิจารณาตำแหน่งการจัดวางเพื่อป้องกันผลกระทบจากการสัมผัสสารเคมีรั่วไหล (Yuan et al., 2013; Alves et al., 2016) นอกจากนี้ Medina-Herrera et al. (2014) ได้นำวิธีการวิเคราะห์ความเสี่ยงเชิงปริมาณ (Quantitative Risk Assessment – QRA) มาใช้ใน

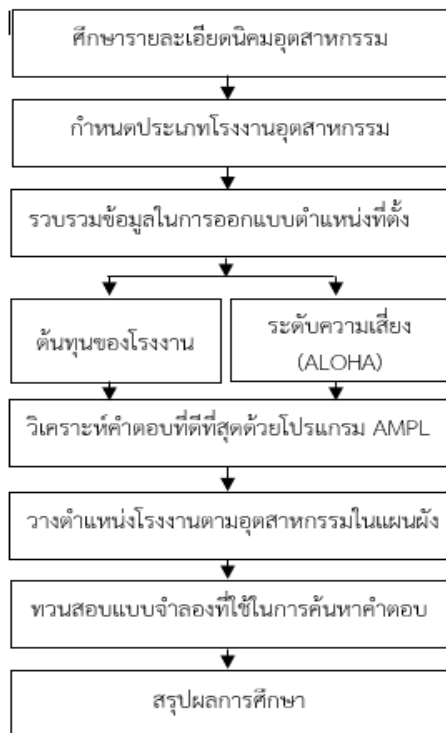
การศึกษาออกแบบแผนผังโรงงานให้มีความเหมาะสมที่สุดซึ่งได้จำลองสถานการณ์เพื่อพิจารณาตำแหน่งของอุปกรณ์และกระบวนการผลิตเพื่อลดต้นทุนที่เป็นปัจจัยด้านความเสี่ยงที่จะส่งผลกระทบต่อผู้ปฏิบัติงาน กระบวนการผลิต และอุปกรณ์ นอกจากนี้ Patsiatzis et al. (2004) ได้ศึกษาปัจจัยด้านความปลอดภัยของแผนผังกระบวนการผลิตของอาคารโรงงานสารเคมีที่โดยพิจารณาความสัมพันธ์ของอุปกรณ์ เครื่องมือ จำนวนและประเภทของอุปกรณ์ โดยมีการออกแบบติดตั้งของอุปกรณ์ความปลอดภัยเข้ากับอุปกรณ์ที่ใช้ในกระบวนการผลิตเพื่อเป็นการป้องกันและลดโอกาสของการการเกิดอุบัติเหตุและความเสี่ยงที่อาจทำให้เกิดความเสียหายของบริษัท

ในส่วนของการจำลองความรุนแรงกรณีเกิดเหตุฉุกเฉินได้มีการประยุกต์ใช้โปรแกรมจำลองทางคอมพิวเตอร์ โดยโปรแกรมจำลองที่นำมาประยุกต์ใช้เป็นหนึ่งในโปรแกรมจำลองเหตุการณ์ต่าง ๆ ที่มีการนำมาประยุกต์ใช้คือโปรแกรม Areal Locations of Hazardous Atmospheres (ALOHA) ซึ่งนำมาใช้ในการจำลองทิศทางและระยะการแพร่กระจายของสารเคมีเพื่อคาดการณ์ความรุนแรงที่อาจเกิดขึ้น โดยผลการศึกษาการออกแบบแผนผังภายในโรงงานผลิตแอมโมเนียและพิจารณามูลค่าความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นจากกรณีการเกิดเหตุฉุกเฉินกรณีแอมโมเนียรั่วไหลที่จากการระเบิดที่มีสาเหตุมาจากแรงดันในกระบวนการผลิตหลักที่เกินมาตรฐานของกระบวนการผลิต ซึ่งส่งผลกระทบต่อต้นทุนของการผลิต และการบำรุงรักษา (Rahman et al., 2014) นอกจากนี้ยังมีการประยุกต์ใช้ ALOHA สำหรับศึกษาประเมินผลกระทบโดยจำลองการรั่วไหลและการระเบิดของถังเก็บและจ่ายก๊าซแอลพีจีในโรงงานผลิตขึ้นส่วนรถยนต์และโรงงานผลิตเครื่องปรับอากาศชนิดแยกส่วน โดยใช้แบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ (Chanthakhot et al., 2014) อย่างไรก็ตาม งานวิจัยที่เป็นการบูรณาการระหว่างแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์และแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ยังมีอยู่อย่างจำกัด

3. วิธีดำเนินการวิจัย

การออกแบบที่ตั้งของโรงงานอุตสาหกรรมในเขตนิคมอุตสาหกรรมในการศึกษานี้ ผู้วิจัยได้ทำการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในการออกแบบตำแหน่งที่ตั้งโรงงานอุตสาหกรรมในนิคมอุตสาหกรรมโดยพิจารณามุมมองด้าน

ความปลอดภัย จากการวิเคราะห์ต้นทุนจากความเสี่ยงจากกรณี เหตุฉุกเฉิน โดยมีขั้นตอนในการศึกษาดังแสดงในรูปที่ 2 ดังนี้



รูปที่ 2 แสดงขั้นตอนในการศึกษาการออกแบบที่ตั้งของโรงงาน อุตสาหกรรมในเขตนิคมอุตสาหกรรม

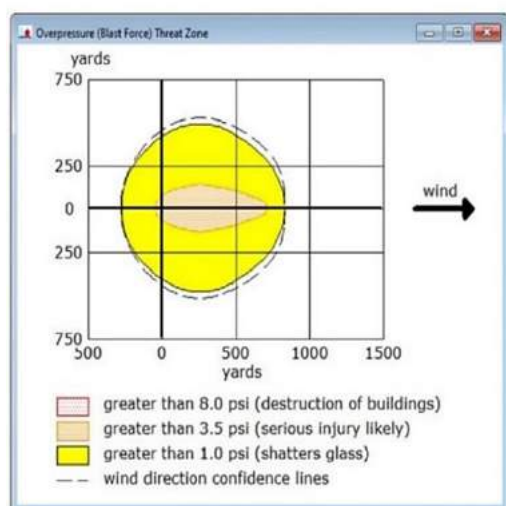
โดยในการศึกษาการออกแบบตำแหน่งที่ตั้งของโรงงาน อุตสาหกรรมในนิคมอุตสาหกรรมเริ่มต้นจากการกำหนด ขอบเขตโดยใช้กรณีศึกษาของเขตนิคมอุตสาหกรรมในภาค ตะวันออกของประเทศไทย โดยการกำหนดประเภทของโรงงาน อุตสาหกรรมที่พิจารณามีลักษณะเป็นโรงงานอุตสาหกรรมที่มี ความเป็นอันตรายในกระบวนการผลิต และมีความเสี่ยงสูงต่อ การเกิดเหตุฉุกเฉิน เช่น มีแก๊สไวไฟ สารพิษ และสารเคมี อันตราย เป็นต้น และโรงงานอุตสาหกรรมที่มีกระบวนการผลิต ทั่ว ๆ ไป ที่มีความเป็นอันตรายน้อย โดยรูปแบบของปัญหาที่

ศึกษาเป็นแบบหนึ่งฟังก์ชันเป้าหมาย (Single objective optimization model) คือพิจารณาปัจจัยด้านความเสี่ยงจาก ความเสียหายของการตั้งโรงงานอุตสาหกรรมโดยพิจารณา ความเสี่ยงที่อาจก่อให้เกิดเหตุฉุกเฉิน ซึ่งข้อมูลทำการรวบรวม เพื่อพิจารณามี 2 ส่วนคือ ต้นทุนของโรงงานอุตสาหกรรมที่ ออกแบบให้จัดตั้งในแต่ละพื้นที่ของกริดและข้อมูลระดับความ เสี่ยงที่ได้จากการนำผลการจำลองการเกิดเหตุฉุกเฉินด้วย โปรแกรมจำลอง ALOHA มาแทนค่าในแต่ละพื้นที่ของกริดซึ่ง เพื่อใช้เป็นข้อมูลป้อนให้กับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

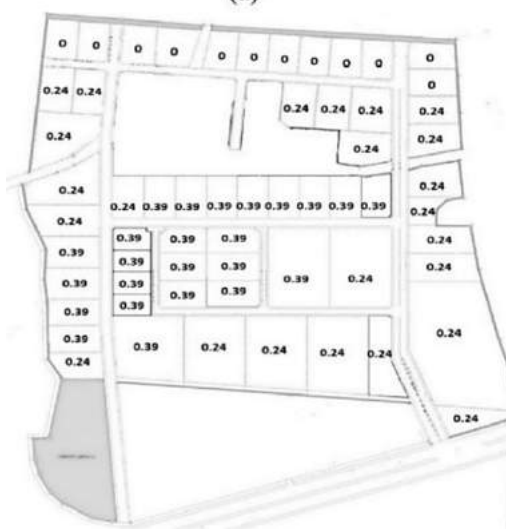
โดยการจำลองการเกิดเหตุฉุกเฉินเป็นการจำลองการ แพร่กระจายของสารเคมีในอากาศจากรูปแบบการรั่วไหลหรือ การระเบิด รวมทั้งสามารถระบุข้อมูลระดับที่จะเกิดอันตราย โดยในการศึกษานี้ ได้ใช้โปรแกรม ALOHA มาใช้เพื่อจำลองการ แพร่กระจายและการระเบิดของสารเคมีในกรณีศึกษา โดยใช้ สารเคมีประเภท Hydrogen Sulfide (H_2S) โดยผลที่ได้จาก โปรแกรม ALOHA จะแสดงลักษณะของทิศทาง การแพร่กระจายของแรงดันที่เกิดขึ้นตามสภาพภูมิอากาศของพื้นที่และ นำผลของความรุนแรงจากการระเบิดและการฟุ้งกระจายของ สารเคมี มาพิจารณาความน่าจะเป็นของระดับความเสี่ยงในแต่ละ พื้นที่ (Wang et al., 2017) ของกริดซึ่งสามารถคำนวณได้ จากสมการที่ (1)

$$Y = -15.6 + 1.93 \ln p^0 \quad (1)$$

โดยรูปแบบของจำลองการแพร่กระจายการระเบิดของ สารเคมีและความน่าจะเป็นของระดับความเสี่ยงสามารถแสดง ในรูปที่ 3



(a)



(b)

รูปที่ 3 (a) การจำลองการแพร่กระจายของสารเคมีและ (b) ระดับความเสี่ยงของแต่ละพื้นที่

เมื่อได้ข้อมูลระดับความเสี่ยงของแต่ละพื้นที่ของกริดแล้ว ขั้นตอนต่อไป เป็นการนำข้อมูลที่ได้จาก ALOHA มาแทนค่าในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ MILP ที่พัฒนาขึ้นและนำมาประยุกต์ใช้ในงานวิจัยสำหรับการตัดสินใจการออกแบบตำแหน่งที่ตั้งของโรงงานอุตสาหกรรมในเขตนิคมอุตสาหกรรม โดยในการศึกษานี้จะกำหนดแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์ที่มีฟังก์ชันเป้าหมายแบบวัตถุประสงค์เดียว (Single Objective Function) โดยพิจารณาปัญหาในการหาค่าแบบน้อยที่สุด (Minimization Problem) จากปัจจัยทางด้านความเสี่ยงที่อาจก่อให้เกิดเหตุการณ์ ทั้งนี้ ในงานวิจัยนี้ ผู้ทำวิจัยได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองกับผู้เชี่ยวชาญของ

โรงงานอุตสาหกรรม รวมถึงได้ทดสอบนำแบบจำลองไปวิเคราะห์ปัญหาตำแหน่งที่ตั้งของโรงงานอุตสาหกรรม ในกรณีเพื่อหาระยะของการติดตั้งในกรณีไม่มีความสูญเสียด้วย (Wattanasang & Ransikarbum, 2020)

ทั้งนี้ ได้กำหนดรายละเอียดการศึกษาประกอบไปด้วย ฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective Function) สมการข้อจำกัดต่าง ๆ (Constraints) ตัวแปรที่ใช้ในการตัดสินใจ (Decision Variables) รวมถึงพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง (Parameters) ซึ่งอธิบายได้ดังนี้

3.1 สมมติฐานในงานวิจัย

- มูลค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นจากเหตุการณ์ฉุกเฉิน เป็นการพิจารณาจากต้นทุนในการก่อสร้างของอาคารแต่ละขนาด ซึ่งต้นทุนการก่อสร้างขึ้นกับขนาดของกริดในนิคมอุตสาหกรรมของกรณีศึกษา
- ความเสียหายจากความเสี่ยงที่เกิดขึ้นเป็นการพิจารณาความเสี่ยงจากก๊าซ H_2S ในโปรแกรม ALOHA ซึ่งความรุนแรงที่เกิดขึ้นจะขึ้นอยู่กับประเภทของสารเคมีเช่นเดียวกัน
- ข้อกำหนดด้านระยะห่างระหว่างโรงงานต่าง ๆ ในกรณีศึกษานี้ เป็นการใช้อัตราที่สะท้อนมาจากกฎหมาย รวมถึงจากความต้องการของผู้มีอำนาจในการตัดสินใจในนิคมอุตสาหกรรม

3.2 Notations

เซต (Set)

G คือ พื้นที่กริด (Grid) ของนิคมอุตสาหกรรมที่ทำการศึกษา โดยแบ่งออกเป็นลักษณะตาราง แสดงด้วย k

P คือ จำนวนโรงงานอุตสาหกรรมแต่ละประเภทที่จัดตั้งในแต่ละพื้นที่ของนิคมอุตสาหกรรม แสดงด้วย i

P^{TX} คือ ประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมที่มีวัตถุดิบและสารเคมีที่มีความเป็นอันตรายสูง $\in P$

P^{ID} คือ ประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไป ที่ไม่มีสารเคมีที่มีความเป็นอันตรายสูง $\in P$

พารามิเตอร์ (Parameters)

d_k^x คือ ระยะทางตามแนวแกน X ของตารางโดยเริ่มต้นที่ด้านหน้านิคมอุตสาหกรรมจนถึง k^{th} ; $k \in G$

d_k^y คือ ระยะทางตามแนวแกน Y ของตารางโดยเริ่มต้นที่ด้านหน้านิคมอุตสาหกรรมจนถึง k^{th} , $k \in G$

r_k คือ ระดับความเสี่ยงของพื้นที่แต่ละพื้นที่ในนิคมอุตสาหกรรมโดยใช้ผลจากโปรแกรม ALOHA, $k \in G$

c_k^{fc} คือ ต้นทุนของโรงงานอุตสาหกรรมตามขนาดของพื้นที่ที่จัดตั้ง, $k \in G$

$d_{i,j}^{TX_ID}$ คือ ระยะห่างน้อยที่สุดสำหรับการตั้งโรงงานอุตสาหกรรมที่มีความเป็นอันตรายกับโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไป (เมตร), $i \in P^{TX}$, $j \in P^{ID}$

$m_{i,j}^{TX_ID_1,2,3,4}$ คือ ระยะห่างมากที่สุดสำหรับการตั้งโรงงานอุตสาหกรรมที่มีความเป็นอันตรายกับโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไป (เมตร), $i \in P^{TX}$, $j \in P^{ID}$

ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variables)

B_{ik} คือ ตัวแปรแบบ 0-1 (Binary) สำหรับเลือกที่จะตั้งโรงงานอุตสาหกรรม (1) หรือไม่เลือกตั้งโรงงานอุตสาหกรรม (0) สำหรับ $k \in G$, $i \in P$

$SEP_{i,j}^{TX_ID_1,2,3,4}$ คือ ตัวแปรเสริมแบบ 0-1 (Binary) ในการกำหนดระยะห่างเพื่อความปลอดภัยระหว่างโรงงานอุตสาหกรรมอันตรายและโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไป $i \in P^{TX}$, $j \in P^{ID}$

X_i คือ ระยะทางตามแนวแกน X ของโรงงานอุตสาหกรรมที่ถูกตั้ง $i \in P$

Y_i คือ ระยะทางตามแนวแกน Y ของโรงงานอุตสาหกรรมที่ถูกตั้ง $i \in P$

3.3 ฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective functions)

ในงานวิจัยนี้ ใช้การกำหนดฟังก์ชันเป้าหมายทางด้านความปลอดภัยในนิคมอุตสาหกรรม โดยสมการที่ (1) แสดงฟังก์ชันเป้าหมายซึ่งคิดจากต้นทุนทางด้านความเสี่ยงกรณีเกิดเหตุฉุกเฉินของโรงงานอุตสาหกรรม โดยเป็นลักษณะปัญหาแบบค่าตอบ ที่น้อยที่สุด (Minimization)

$$\text{Minimize } Z = \sum_{i \in P} \sum_{k \in G} \{r_k c_k^{fc}\} B_{i,k} \quad (1)$$

3.4 สมการข้อจำกัด (Constraints)

ในการศึกษานี้ มีการกำหนดสมการเงื่อนไขทางด้านข้อจำกัดที่เกี่ยวข้องที่ใช้ในปัญหาการออกแบบตำแหน่งที่ตั้งโรงงานอุตสาหกรรมในเขตนิคมอุตสาหกรรมซึ่งแสดงรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

3.4.1 สมการข้อจำกัดไม่ให้ตำแหน่งที่ตั้งวางซ้อนทับกัน (Non-overlapping Constraint)

สมการที่ (2) และสมการที่ (3) แสดงข้อจำกัดที่ทำให้แน่ใจว่าโรงงานอุตสาหกรรมที่ถูกพิจารณาให้ตั้งในพื้นที่เขตนิคมอุตสาหกรรมจะไม่ทับซ้อนกัน โดยสมการที่ (2) จะเป็นการกำหนดให้แต่ละโรงงานต้องถูกวางตำแหน่งในพื้นที่ของแผนผังของนิคมอุตสาหกรรม ส่วนสมการที่ (3) กำหนดว่าสำหรับแต่ละพื้นที่ของนิคมอุตสาหกรรมอาจทำการตั้งโรงงานหรือไม่ตั้งโรงงานก็ได้

$$\sum_{k \in K} B_{i,k} = 1 \quad ; \forall i \in P \quad (2)$$

$$\sum_{i \in P} B_{i,k} \leq 1 \quad ; \forall k \in G \quad (3)$$

3.4.2 สมการข้อจำกัดในการคำนวณระยะห่างของโรงงานอุตสาหกรรม (Distance constraints)

หลังจากที่ทราบตำแหน่งโรงงานบนพื้นที่นิคมอุตสาหกรรมแล้ว ในการตั้งโรงงานบนพื้นที่สามารถวัดระยะทางตามแนวแกน X จากจุดอ้างอิงจุดเริ่มต้นจนถึงตำแหน่งที่ตั้งบนแผนผังซึ่งแทนด้วย d_k^x และระยะทางตามแนวแกน y จากจุดอ้างอิงจุดเริ่มต้นจนถึงตำแหน่งที่ตั้งบนแผนผังซึ่งแทนด้วย d_k^y ของแต่ละตำแหน่งที่ตั้งได้ ซึ่งจะทำให้ทราบตำแหน่งที่ตั้งโรงงานของ X_i, Y_i ตามสมการที่ (4)-(7)

$$-m(1 - B_{i,k}) \leq (d_k^x - X_i) \quad ; \forall i \in P, \forall k \in G \quad (4)$$

$$(d_k^x - X_i) \leq m(1 - B_{i,k}) \quad ; \forall i \in P, \forall k \in G \quad (5)$$

$$-m(1 - B_{i,k}) \leq (d_k^y - Y_i) \quad ; \forall i \in P, \forall k \in G \quad (6)$$

$$(d_k^y - Y_i) \leq m(1 - B_{i,k}) \quad ; \forall i \in P, \forall k \in G \quad (7)$$

3.4.3 สมการข้อจำกัดของระยะห่างน้อยที่สุดระหว่างโรงงานอุตสาหกรรม (Separation-distance constraints for minimum condition)

ชุดสมการข้อจำกัดต่อไป เป็นการกำหนดระยะห่างขั้นต่ำระหว่างโรงงาน สำหรับแนวคิดทางด้านความปลอดภัยของโรงงานอุตสาหกรรมแต่ละประเภท ซึ่งช่วยให้ลดความเสียหายในกรณีเมื่อเกิดเหตุฉุกเฉินได้ (Jung et al., 2010) ซึ่งสามารถคำนวณได้ดังแสดงในสมการที่ (8)

$$|x_i - x_j| + |y_i - y_j| \geq d_{i,j} ; \forall i \in P^{TX}, \forall j \in P^{ID} \quad (8)$$

ทั้งนี้เนื่องจากสมการข้อจำกัดนี้เป็นรูปแบบของ non-linear ซึ่งอยู่ในรูป absolute value ดังนั้น สามารถทำการถอดค่า absolute ออกและแปลงสมการให้อยู่ในรูปเชิงเส้นตรง (linear) ได้ โดยกำหนดระยะห่างเพื่อความปลอดภัยระหว่างโรงงานอุตสาหกรรมประเภทสารเคมีอันตรายและโรงงานอุตสาหกรรมทั่วไป ได้ดังแสดงในสมการที่ (9) – (13)

$$\begin{aligned} (X_i - X_j) + (Y_i - Y_j) &\geq \\ d_{i,j}^{TX-ID} SEP_{i,j}^{TX-ID-1} - (m(1 - SEP_{i,j}^{TX-ID-1})) & \\ ; \forall i \in P^{TX}, \forall j \in P^{ID} \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} (X_i - X_j) - (Y_i - Y_j) &\geq \\ d_{i,j}^{TX-ID} SEP_{i,j}^{TX-ID-2} - (m(1 - SEP_{i,j}^{TX-ID-2})) & \\ ; \forall i \in P^{TX}, \forall j \in P^{ID} \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} -(X_i - X_j) + (Y_i - Y_j) &\geq \\ d_{i,j}^{TX-ID} SEP_{i,j}^{TX-ID-3} - (m(1 - SEP_{i,j}^{TX-ID-3})) & \\ ; \forall i \in P^{TX}, \forall j \in P^{ID} \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} -(X_i - X_j) - (Y_i - Y_j) &\geq \\ d_{i,j}^{TX-ID} SEP_{i,j}^{TX-ID-4} - (m(1 - SEP_{i,j}^{TX-ID-4})) & \\ ; \forall i \in P^{TX}, \forall j \in P^{ID} \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} SEP_{i,j}^{TX-ID-1} + SEP_{i,j}^{TX-ID-2} + SEP_{i,j}^{TX-ID-3} + \\ SEP_{i,j}^{TX-ID-4} \geq 1 ; \forall i \in P^{TX}, \forall j \in P^{ID} \end{aligned} \quad (13)$$

3.4.4 สมการข้อจำกัดของระยะห่างมากที่สุดระหว่างโรงงานอุตสาหกรรม (Separation-distance constraints for maximum condition)

สมการเงื่อนไขชุดต่อไปเป็นการพิจารณาระยะห่างระหว่างโรงงานอุตสาหกรรมแต่ละประเภทในนิคมอุตสาหกรรมโดยพิจารณาเงื่อนไขให้มีระยะห่างกันไม่เกินข้อกำหนด ($m_{i,j}$) ของทางนิคมอุตสาหกรรม ดังแสดงในสมการที่ (14)

$$|x_i - x_j| + |y_i - y_j| \leq m_{i,j} ; \forall i \in P^{TX}, \forall j \in P^{ID} \quad (14)$$

ทั้งนี้เนื่องจากสมการเป็นรูปแบบของ non-linear ในรูป absolute value ซึ่งสามารถแปลงสมการให้เป็นรูปแบบเชิงเส้นตรง (linear) ได้ ดังแสดงในสมการที่ (15) – (19)

$$\begin{aligned} (X_i - X_j) + (Y_i - Y_j) &\leq m_{i,j}^{TX-ID-1} \\ ; \forall i \in P^{TX}, \forall j \in P^{ID} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} (X_i - X_j) + (Y_i - Y_j) &\leq m_{i,j}^{TX-ID-2} \\ ; \forall i \in P^{TX}, \forall j \in P^{ID} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} -(X_i - X_j) + (Y_i - Y_j) &\leq m_{i,j}^{TX-ID-3} \\ ; \forall i \in P^{TX}, \forall j \in P^{ID} \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} -(X_i - X_j) - (Y_i - Y_j) &\leq m_{i,j}^{TX-ID-4} \\ ; \forall i \in P^{TX}, \forall j \in P^{ID} \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} m_{i,j}^{TX-ID-1} + m_{i,j}^{TX-ID-2} + m_{i,j}^{TX-ID-3} + \\ m_{i,j}^{TX-ID-4} \geq 1 ; \forall i \in P^{TX}, \forall j \in P^{ID} \end{aligned} \quad (19)$$

3.4.5 สมการข้อจำกัดของประเภทของตัวแปร (Variable-type Constraint)

สมการเงื่อนไขส่วนสุดท้ายกำหนดลักษณะของตัวแปรที่ใช้ในสมการและอสมการ ที่ (20)–(23)

$$B_{i,k} \in \{0,1\} ; \forall_{i,k} \quad (20)$$

$$X_i \geq 0 ; \forall_i \quad (21)$$

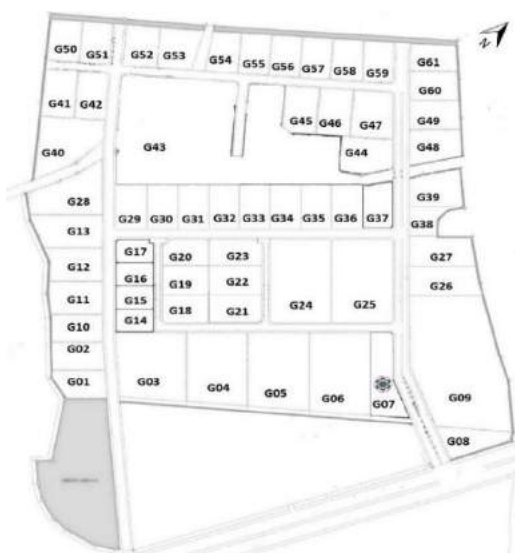
$$Y_i \geq 0 ; \forall_i \quad (22)$$

$$SEP_{i,j}^{TX-ID-1,2,3,4} \in \{0,1\} ; \forall_{i,j} \quad (23)$$

4. ผลการวิจัยและการอภิปรายผล

4.1 กรณีศึกษาของนิคมอุตสาหกรรม

นิคมอุตสาหกรรมที่ดำเนินการศึกษาในงานวิจัยนี้ ตั้งอยู่ในพื้นที่ภาคตะวันออกของประเทศไทย โดยนิคมอุตสาหกรรมจะตั้งใกล้กับถนนหลัก โดยมีเส้นทางสำหรับเข้าและออกจากนิคมอุตสาหกรรม ซึ่งมีการกำหนดเป็น 2 เส้นทาง คือเส้นทางแรกอยู่ทางด้านทิศตะวันออกเฉียงใต้ เป็นทางเข้าหลักซึ่งติดกับถนนเส้นหลัก และเส้นทางที่สองอยู่ทางด้านทิศตะวันตกเป็นทางเข้ารองซึ่งติดกับถนนคู่ขนาน ทั้งนี้ ภายในนิคมอุตสาหกรรมจะมีการแบ่งพื้นที่เป็นสัดส่วนขนาดต่าง ๆ จำนวน 61 พื้นที่ (grids) ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 แสดงแผนผังนิคมอุตสาหกรรมโดยแบ่งพื้นที่ตามกริด

ทั้งนี้ ประเภทของโรงงานอุตสาหกรรมถูกพิจารณาให้จัดตั้งในพื้นที่ที่ได้กำหนดไว้บนแผนผังซึ่งจะมีขนาดแตกต่างกัน โดยได้กำหนดขนาดพื้นที่ของตารางกริดในนิคมอุตสาหกรรม แบ่งออกเป็น 3 ระดับ ตามข้อมูลที่แสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงรายละเอียดข้อมูลของขนาดพื้นที่ ระยะห่าง และต้นทุนของโรงงานแต่ละประเภท

ประเภทของพื้นที่	ขนาดพื้นที่ (ตร.ม)	ต้นทุนความเสียหาย (บาท)	ระยะห่างระหว่างโรงงาน (เมตร)
	BSA (2019)	Thai Appraisal (2018)	
ขนาดเล็ก	น้อยกว่า 5,000	น้อยกว่า 39,000,000	น้อยกว่า 340

ตารางที่ 1 (ต่อ)

ประเภทของพื้นที่	ขนาดพื้นที่ (ตร.ม)	ต้นทุนความเสียหาย (บาท)	ระยะห่างระหว่างโรงงาน (เมตร)
	BSA (2019)	Thai Appraisal (2018)	
ขนาดใหญ่	มากกว่า 10,000	มากกว่า 78,000,000	มากกว่า 681

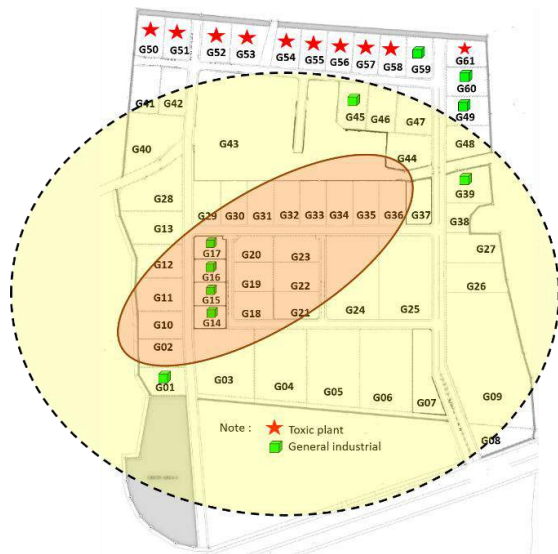
จากข้อมูลในตาราง สามารถทำการแบ่งขนาดของพื้นที่ (Area Type) ตามแผนผังของนิคมอุตสาหกรรมได้เป็น 3 ขนาด คือพื้นที่ขนาดเล็ก พื้นที่ขนาดกลาง และพื้นที่ขนาดใหญ่ ซึ่งความแตกต่างของขนาดพื้นที่ จะส่งผลกับต้นทุนทางด้านความเสี่ยงในกรณีที่เกิดอุบัติเหตุหรือเหตุการณ์ฉุกเฉิน โดย ส่งผลให้อาคารของโรงงานอุตสาหกรรมเกิดความเสียหายในระดับที่แตกต่างกัน ทั้งนี้ ในการศึกษาในงานวิจัยนี้ ได้จำลองการจัดตั้งโรงงานแต่ละประเภทจำนวนทั้งสิ้น 20 โรงงาน ซึ่งประมาณการจากจำนวนโรงงานที่ประกอบกิจการในนิคมอุตสาหกรรมในปัจจุบัน

4.2 ผลการหาค่าที่ดีที่สุด

ปัจจัยทางด้านต้นทุนด้านความเสี่ยงจากเหตุฉุกเฉิน ซึ่งนำมาใช้แทนการพิจารณาความปลอดภัยที่นำมาพิจารณาในการเลือกตำแหน่งสำหรับตั้งโรงงานอุตสาหกรรมในเขตนิคมอุตสาหกรรมในงานวิจัยนี้ พิจารณาถึงมูลค่าความเสียหายของโรงงานอุตสาหกรรมที่อาจเกิดขึ้นจากการเกิดเหตุฉุกเฉิน ซึ่งมูลค่าความเสียหายที่เกิดขึ้นสามารถพิจารณาได้จากโอกาสที่โรงงานอุตสาหกรรมที่ถูกออกแบบให้ตั้งในแต่ละกริดจะสัมผัสระดับความเสี่ยงในแต่ละพื้นที่เมื่อเกิดเหตุฉุกเฉินซึ่งมีระดับความน่าจะเป็นในช่วง 0-1 เพื่อพิจารณาการก่อให้เกิดความเสียหายต่อการตั้งโรงงานอุตสาหกรรมในพื้นที่นั้น ๆ

ทั้งนี้ ในการแสดงผลจากการระเบิดนั้น สามารถจำลองรัศมีการแพร่กระจายของความรุนแรงด้วยโปรแกรม ALOHA ได้ดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งพบว่าเมื่อเกิดเหตุฉุกเฉินแล้ว จะเกิดการแพร่กระจายส่งผ่านของแรงดันจากการระเบิดของก๊าซไฮโดรซัลไฟด์ (H_2S) โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ระดับ คือ ระดับความดันสูงสุดเท่ากับ 3.5 psi (24.2 kPa) ซึ่งมีความเป็นอันตรายมากโดยแทนด้วยสัญลักษณ์เส้นที่กรอบภายในรูปวงรี และระดับความดันสูงสุดจากการระเบิด 1.0 psi (6.9 kPa) ซึ่ง

มีความเป็นอันตรายน้อยกว่า โดยแทนด้วยสัญลักษณ์พื้นที่วงกลมสีแดง



รูปที่ 5 แสดงแผนผังการจัดตั้งโรงงานนิคมอุตสาหกรรม

ทั้งนี้ ในการหาคำตอบจากฟังก์ชันเป้าหมายที่ต้องการ โดยกำหนดให้มูลค่าความเสียหายกรณีเกิดเหตุฉุกเฉินให้มิต่ำน้อยที่สุด โดยพิจารณาระดับความเสี่ยงในแต่ละพื้นที่ที่อาจก่อให้เกิดความเสียหายกับต้นทุนของโรงงานอุตสาหกรรม โดยใช้คอมพิวเตอร์พกพา (Laptop) i5-8250U CPU @ 3.4 GHz and 8.0 GB of RAM โปรแกรม AMPL และใช้ CPLEX Solver เวอร์ชัน 12.9.0 ในการค้นหาคำตอบ พบว่าสามารถแสดงผลได้ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงรายละเอียดมูลค่าความเสียหายที่อาจเกิดขึ้นกรณีเกิดเหตุฉุกเฉิน

โรงงานอุตสาหกรรม/ (กริด)	โอกาสสัมพัทธ์ความเสี่ยง	ต้นทุนของโรงงานอุตสาหกรรม (บาท)	มูลค่าความเสียหายแต่ละกริด (บาท)
P1 (G51)	0	24,375,000	0
P2 (G50)	0	24,375,000	0
P3 (G53)	0	24,375,000	0
P4 (G52)	0	24,375,000	0
P5 (G57)	0	24,375,000	0
P6 (G61)	0	18,281,250	0
P7 (G56)	0	24,375,000	0
P8 (G54)	0	24,375,000	0
P9 (G55)	0	24,375,000	0

ตารางที่ 2 (ต่อ)

โรงงานอุตสาหกรรม/ (กริด)	โอกาสสัมพัทธ์ความเสี่ยง	ต้นทุนของโรงงานอุตสาหกรรม (บาท)	มูลค่าความเสียหายแต่ละกริด (บาท)
P10 (G58)	0	24,375,000	0
P11 (G59)	0	24,375,000	0
P12 (G60)	0	29,250,000	0
P13 (G45)	0.24	21,937,500	5,265,000
P14 (G49)	0.24	29,250,000	7,020,000
P15 (G39)	0.24	29,250,000	7,020,000
P16 (G17)	0.39	14,625,000	5,703,750
P17 (G16)	0.39	14,625,000	5,703,750
P18 (G15)	0.39	14,625,000	5,703,750
P19 (G14)	0.39	14,625,000	5,703,750
P20 (G2)	0.24	24,375,000	5,850,000

ทั้งนี้ ผลการวิเคราะห์พบว่าลักษณะตำแหน่งของการจัดตั้งตำแหน่งโรงงานอุตสาหกรรมในเขตนิคมอุตสาหกรรมส่วนใหญ่ถูกเลือกให้อยู่บริเวณพื้นที่ด้านในของนิคมอุตสาหกรรมเนื่องจากเป็นตำแหน่งที่อยู่นอกขอบเขตของรัศมีที่ได้รับผลกระทบได้แก่ พื้นที่ G49 – G61 จำนวน 13 โรงงาน อย่างไรก็ตาม พบว่ามี 3 โรงงาน (G1, G39, G45) ถูกออกแบบให้อยู่ในขอบเขตของรัศมีที่ได้รับผลกระทบเล็กน้อย และ 4 โรงงาน (G14 – G17) อยู่ในพื้นที่ความเสี่ยงสูงซึ่งอธิบายได้ว่า พื้นที่เหล่านี้เป็นพื้นที่ขนาดเล็กเมื่อเทียบกับพื้นที่อื่น ๆ ที่หากเกิดอันตราย จะส่งผลให้เกิดมูลค่าความเสียหายน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับพื้นที่อื่น ๆ ตามฟังก์ชันเป้าหมายที่กำหนดให้การออกแบบตำแหน่งที่ตั้งมีต้นทุนความเสียหายน้อยที่สุด นอกจากนี้ ตำแหน่งที่ตั้งที่ได้ เป็นไปตามข้อจำกัดของสมการเงื่อนไขที่กำหนดระยะที่ตั้งของโรงงานแต่ละแห่ง โดยโรงงานที่เป็นโรงงานประเภททั่วไปซึ่งมีความเป็นอันตรายน้อย จะถูกออกแบบให้ตำแหน่งที่ตั้งอยู่ใกล้กัน โดยเมื่อพิจารณามูลค่าความเสียหายที่เกิดโดยรวมที่อาจเกิดขึ้นจากกรณีเกิดเหตุการณ์ฉุกเฉินจะมีมูลค่าเท่ากับ 47,970,000 บาท ซึ่งน้อยที่สุด โดยการวิเคราะห์และประมวลผลในการหาคำตอบที่ดีที่สุดใช้ระยะเวลาสั้น ซึ่งแสดงรายละเอียดการประมวลผลของจำนวนตัวแปรตัดสินใจและสมการข้อจำกัดที่เกี่ยวข้องกับกรณีศึกษาในงานวิจัยนี้ ได้ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงรายละเอียดจำนวนตัวแปรและสมการเงื่อนไข

รายละเอียด	จำนวน
ตัวแปรตัดสินใจ	
$B_{i,k}$	1,220
X_i	20
Y_j	20
$SEP_{i,j}^{TX_ID_1,2,3,4}$	400
สมการข้อจำกัด	
ชุดที่ 1. สมการข้อจำกัดกำหนดตำแหน่งที่ตั้งวางไม่ซ้อนทับกัน	81
ชุดที่ 2. สมการข้อจำกัดในการคำนวณระยะห่างของโรงงานอุตสาหกรรม	4,880
ชุดที่ 3. สมการข้อจำกัดของระยะห่างน้อยที่สุดระหว่างโรงงานอุตสาหกรรม	400
ชุดที่ 4. สมการข้อจำกัดของระยะห่างมากที่สุดระหว่างโรงงานอุตสาหกรรม	400

5. สรุปผลและแนวทางการวิจัยในอนาคต

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการออกแบบตำแหน่งที่ตั้งของโรงงานอุตสาหกรรมในเขตนิคมอุตสาหกรรม โดยทำการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบค่าที่ดีที่สุด และทำการพิจารณาปัจจัยด้านความเสียหายจากความเสี่ยงในการเกิดเหตุฉุกเฉิน ซึ่งเป็นการพิจารณาประเด็นด้านความปลอดภัยในการตัดสินใจ โดยคำนวณจากมูลค่าความเสียหายและความเสี่ยงที่เกิดจากเหตุฉุกเฉินของโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นการบูรณาการผลการวิจัยร่วมกับโปรแกรมแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ ALOHA ในการวิเคราะห์ความเสี่ยงจากการระเบิดของสารเคมีในกรณีศึกษา โดยรูปแบบการตัดสินใจของตำแหน่งของโรงงานอุตสาหกรรมมีลักษณะกระจายตัวเป็นส่วนใหญ่ ซึ่งถูกออกแบบให้อยู่บริเวณพื้นที่ลึกเข้าไปด้านในนิคมอุตสาหกรรมเพื่อหลีกเลี่ยงผลกระทบที่จะเกิดขึ้นกรณีเกิดเหตุฉุกเฉิน โดยยังคงมีโรงงานอุตสาหกรรมบางส่วนถูกออกแบบให้อยู่ในพื้นที่ที่มีความเสี่ยงต่อการสัมผัสความเป็นอันตรายมาก ทั้งนี้เนื่องจากขนาดของพื้นที่ที่ทั้ง 4 โรงงานถูกกำหนดให้ต้องมีขนาดเล็กที่สุดเมื่อเทียบกับพื้นที่อื่น ๆ ทำให้ความสูญเสียที่อาจเกิดขึ้นจะมีมูลค่าน้อยกว่าพื้นที่อื่น ๆ ทั้งนี้ ผลการศึกษาจากการใช้โปรแกรม ALOHA ร่วมกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้น

สามารถนำมาใช้ในการจำลองความเสี่ยงที่จะเกิดขึ้นในกรณีที่เกิดเหตุฉุกเฉินของโรงงานอุตสาหกรรมโดยพิจารณาจากความเสี่ยงที่แพร่กระจายไปยังพื้นที่อื่น ๆ ในเขตนิคมอุตสาหกรรม ซึ่งทำให้สามารถวิเคราะห์หาค่าความเสี่ยงที่แพร่กระจายซึ่งเหมาะในการนำไปใช้พิจารณาจัดตั้งโรงงานอุตสาหกรรมในนิคมอุตสาหกรรมต่าง ๆ ได้อย่างเหมาะสม

ทั้งนี้ การศึกษาในกรณีตัวอย่างนี้เป็นการศึกษาในเขตนิคมอุตสาหกรรมซึ่งผู้ที่สนใจสามารถนำไปประยุกต์ใช้ได้ในด้านอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการวางแผนผังได้ โดยอาจขยายขอบเขตในการศึกษา เช่น การเพิ่มปัจจัยที่ใช้พิจารณา โดยวิเคราะห์ฟังก์ชันเป้าหมายแบบหลายวัตถุประสงค์ นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้ในกรณีศึกษาที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เช่น รูปแบบของพื้นที่นิคมอุตสาหกรรมที่ใหญ่ขึ้น หรือในระดับจังหวัดหรือระดับภูมิภาค โดยปรับเปลี่ยนรายละเอียดแต่ละปัจจัยให้เหมาะสมกับสภาพปัญหาของกรณีศึกษา นอกจากนี้รูปแบบของการหาคำตอบสำหรับการศึกษานี้เป็นการหาคำตอบด้วยวิธีค่าแม่นยำ (Exact) ซึ่งเหมาะสมกับขนาดของปัญหาในกรณีศึกษาในงานวิจัยนี้ อย่างไรก็ตาม หากมีจำนวนตัวแปรปริมาณมากและปัญหาที่ซับซ้อนมากขึ้น อาจจำเป็นต้องใช้วิธีการค้นหาคำตอบในกลุ่มของวิธีการประมาณค่า เช่น Metaheuristic นอกจากนี้การจำลองผลกระทบจากกรณีเกิดเหตุฉุกเฉิน อาจพิจารณาเพิ่มขอบเขตของพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบกับพื้นที่เสี่ยงที่มีอยู่ในชุมชน เนื่องจากอาจทำให้เกิดกรณีการแพร่กระจาย และระดับของอันตรายที่แตกต่างกัน รวมถึงอาจพิจารณาปัจจัยที่ครอบคลุมและเกี่ยวข้องกับความยั่งยืน (Sustainability) ทั้งทางด้านเศรษฐกิจ (Economics) ด้านสังคม (Social) และด้านสิ่งแวดล้อม (Environmental) ซึ่งอาจนำเครื่องมือด้านการวิเคราะห์แบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-Objective Optimization) กระบวนการตัดสินใจแบบหลากหลายเกณฑ์ (Multi-Criteria Decision Analysis) และการพัฒนาระบบสนับสนุนการตัดสินใจ (Decision-Support System) (Ransikarbum & Mason, 2016; Ransikarbum et al., 2017; Oh et al., 2019, Chaiyaphan & Ransikarbum, 2020, Puchongkawarin & Ransikarbum, 2020; Ransikarbum et al., 2020, Wattanasang & Ransikarbum, 2021) มาร่วมวิเคราะห์

6. เอกสารอ้างอิง

- Alves, D. T. S., de Medeiros, J. L., & Ofelia de Queiroz, F. A. (2016). Optimal determination of chemical plant layout via minimization of risk 20.to general public using Monte Carlo and Simulated Annealing techniques. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 41, 202-214.
- BOI. (201 9 , Apr 24) . *Thailand Board of Investment*. <https://www.boi.go.th/>
- Caputo, A. C., Pelagagge, P. M., Palumbo, M., & Salini, P. (2015). Safety- based process plant layout using genetic algorithm. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 34, 139-150.
- Chae, J., & Regan, A. C. (2016). Layout design problems with heterogeneous area constraints. *Computers & Industrial Engineering*, 102, 198-207.
- Chaiyaphan, C., & Ransikarbum, K. (2020). Criteria analysis of food safety using the Analytic Hierarchy Process (AHP)-a case study of Thailand's fresh markets. In E3S Web of Conferences (Vol. 141, p. 02001). EDP Sciences.
- Chanthakhot, W., Wattanaseang, N., Wiselsa, K., & Ransikarbum, K. (2018, July) . *Computer Simulation- based Impact Assessment of LPG Storage Tank's Leakage and Explosion in Split-type Air Conditioner Factory* [Paper presentation] . In 2018 IE Network Conference, Bangkok, Thailand.
- Chanthakhot, W. , & Ransikarbum, K. (2019, December) . *Numerical Simulation for Fire Emergency Planning in a Home Appliances Factory* [Paper presentation] . In 2019 Research, Invention, and Innovation Congress (RI2C) IEEE. Bangkok, Thailand.
- IEAT. (2020, March 2) . *Annual Report 2018*. <https://www.ieat.go.th/annual-report>
- Jung, S., Ng, D., Laird, C. D., & Mannan, M. S. (2010). A new approach for facility siting using mapping risks on a plant grid area and optimization. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 23(6), 824-830.
- Kim, J., Ransikarbum, K., Kim, N., & Paik, E. (2016, May). Agent-based simulation modeling of low fertility trap hypothesis. In Proceedings of the 2016 ACM SIGSIM Conference on Principles of Advanced Discrete Simulation (pp. 83-86).
- Medina-Herrera, N., Jiménez-Gutiérrez, A., & Grossmann, I. E. (2014). A mathematical programming model for optimal layout considering quantitative risk analysis. *Computers & Chemical Engineering*, 68, 165-181.
- Oh, Y., Ransikarbum, K., Busogi, M., Kwon, D., & Kim, N. (2019). Adaptive SVM-based real-time quality assessment for primer-sealer dispensing process of sunroof assembly line. *Reliability Engineering & System Safety*, 184, 202-212.
- Patsiatzis, D. I., Knight, G., & Papageorgiou, L. G. (2004). An MILP approach to safe process plant layout. *Chemical Engineering Research and Design*, 82(5), 579-586.
- Puchongkawarin, C., & Ransikarbum, K. (2020). An Integrative Decision Support System for Improving Tourism Logistics and Public Transportation in Thailand. *Tourism Planning & Development*, 1-16.
- Rahman, S. M. T., Salim, M. T., & Syeda, S. R. (2014). Facility layout optimization of an ammonia plant based on risk and economic analysis. *Procedia Engineering*, 90, 760-765.
- Ransikarbum, K. (2020). Analysis of Traffic Flow at a Red Light Intersection using Computer Simulation technique. *Thai Journal of Operations Research: TJOR*, 8(2), 1-14.
- Ransikarbum, K., & Mason, S. J. (2016). Multiple- objective analysis of integrated relief supply and network restoration in humanitarian logistics operations. *International Journal of Production Research*, 54(1), 49-68.
- Ransikarbum, K., & Mason, S. J. (2016). Goal programming-based post- disaster decision making for integrated relief distribution and early- stage network restoration. *International Journal of Production Economics*, 182, 324-341.
- Ransikarbum, K., Kim, N., Ha, S., Wysk, R. A., & Rothrock, L. (2017). A highway-driving system design viewpoint using an agent-based modeling of an affordance-based finite state automata. *IEEE Access*, 6, 2193-2205.
- Ransikarbum, K., Ha, S., Ma, J., & Kim, N. (2017). Multi-objective optimization analysis for part-to- Printer assignment in a network of 3D fused deposition modeling. *Journal of Manufacturing Systems*, 43, 35-46.
- Ransikarbum, K., Pitakaso, R., & Kim, N. (2020). A Decision-Support Model for Additive Manufacturing Scheduling Using an Integrative Analytic Hierarchy Process and Multi-Objective Optimization. *Applied Sciences*, 10(15), 5159.
- Thai Appraisal. (2018, March 3). *The 2018 costs of constructions*. <http://www.thaiappraisal.org/thai/value/value.php>
- BSA. (2019, March 1). *Building inspection law*. <http://www.bsa.or.th/>

UNCTAD. (2020, February 24). World investment reports 2019:

Special Economic Zones. <https://unctad.org/>

Wang, R., Wu, Y., Wang, Y., & Feng, X. (2017). An industrial area layout design methodology considering piping and safety using genetic algorithm. *Journal of cleaner production*, 167, 23-31.

Wattanasang, N., & Ransikarbum, K. (2019, December). *Cost Optimization Model for Plant Assignment in Industrial Estate Planning. In 2019 Research, Invention, and Innovation Congress (RI2C) IEEE*, Bangkok, Thailand.

Wattanasang, N. & Ransikarbum, K. (2020). Sites Selection of industrial estates for Thailand Border's Special Economic Zones using Data Envelopment Analysis. *UBU Engineering Journal*, 13(2), 14-26.

Wattanasang, N., & Ransikarbum, K. (2021). Model and Analysis of Economic-and Risk-Based Objective Optimization Problem for Plant Location within Industrial Estates Using Epsilon-Constraint Algorithms. *Computation*, 9(4), 46.

Wu, Y., Wang, Y., & Feng, X. (2016). A heuristic approach for petrochemical plant layout considering steam pipeline length. *Chinese journal of chemical engineering*, 24(8) , 1032-1037

Yuan, X. U., Zhenyu, W. A. N. G., & Qunxiong, Z. H. U. (2013). An improved hybrid genetic algorithm for chemical plant layout optimization with novel non-overlapping and toxic gas dispersion constraints. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 21(4), 412-419.

7. ชีวประวัติ



Niroot Wattanasang received the B.Sc. in Industrial Hygiene and Safety from Burapha University and M.Eng. Degree in Safety Engineering and Environmental Management from Kasetsart University. Currently, he is pursuing the Ph.D. degree in Industrial Engineering at Ubon Ratchathani University. He also works as the safety instructor and consultant. His research interest includes Safety Management and Multi Criteria Decision Analysis.



Kasin Ransikarbum received the B.Eng., M.S., and Ph.D. Degrees in Industrial Engineering from King Mongkut's University of Technology Thonburi; Pennsylvania State University, USA; and Clemson University, USA, respectively. He was also a postdoctoral researcher at Ulsan National Institute of Science and Technology, Republic of Korea. Currently, he works at the Industrial Engineering, Ubonratchathani University, Thailand. His research interest includes supply chain modeling and applied optimization and simulation.

การออกแบบผลิตภัณฑ์ด้วยวิธีการออกแบบเจเนอเรทีฟแบบหลายวัตถุประสงค์
กรณีศึกษาการออกแบบเครื่องประดับเข็มกลัดอาร์ตเดโคแบบกลัดคู่
Product Design with Multi-objective Optimization Generative Design Method:
A Case Study of Art Deco Double Clip Brooch Design

สุนิษา แสนศรี, สมลักษณ์ วรรณฤมล กิเยลาโรว่า*
Sunisa Sansri, Somlak Wannarumon Kielarova*

iD3 หน่วยวิจัย ด้านการออกแบบ การตัดสินใจ และการพัฒนาทางอุตสาหกรรม
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
iD3 Research Center for Industrial Design, Decision and Development
Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Naresuan University

*Corresponding author e-mail: somlakw@nu.ac.th

(Received: 21 July 2020, Revised: 14 January 2021, Accepted: 27 January 2021)

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอระบบออกแบบอัตโนมัติด้วยหลักการของเจเนอเรทีฟดีไซน์ ที่ช่วยค้นหาคำตอบที่เหมาะสมแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-objective Optimization Generative Design: MOOGD) เพื่อสร้างคำตอบของงานออกแบบที่แสดงผลลัพธ์ในลักษณะของโมเดลสามมิติที่มีความหลากหลายและเป็นจำนวนมาก ภายใต้วัตถุประสงค์ในการออกแบบที่มากกว่าหนึ่งวัตถุประสงค์ โดยเริ่มจากการสร้างโมเดลพารามิเตอร์ของผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นการสร้างโมเดลสามมิติของผลิตภัณฑ์ด้วยพารามิเตอร์ และควบคุมการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโมเดลสามมิติด้วยพารามิเตอร์ และพัฒนากระบวนการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมแบบหลายวัตถุประสงค์ด้วยอัลกอริทึมที่พัฒนาการความแข็งแรงของพาเรโต 2 (Strength Pareto Evolutionary Algorithm II) ดังนั้นอัลกอริทึม MOOGD ใช้วิธีค้นหาคำตอบที่อยู่บริเวณด้านหน้าของพาเรโต (Pareto-Optimal Front) โดยจะให้ชุดคำตอบที่มากกว่าหนึ่งคำตอบ ซึ่งชุดคำตอบเหล่านี้ จะถูกถอดรหัสโดยอัตโนมัติแปลงเป็นโมเดลสามมิติ นำเสนอต่อนักออกแบบบนโปรแกรมช่วยในการออกแบบ ดังนั้น MOOGD ทำหน้าที่เสมือนเป็นเครื่องมือช่วยในการตัดสินใจในกระบวนการออกแบบผลิตภัณฑ์ งานวิจัยนี้ได้นำเสนอตัวอย่างกรณีศึกษาการออกแบบเข็มกลัดสไตล์อาร์ตเดโค ที่สามารถแยกออกเป็นสองชิ้น (Art Deco Double Clip Brooch) โดยมีวัตถุประสงค์ในการออกแบบให้ได้น้ำหนักของเข็มกลัดที่น้อยที่สุด พร้อมกับมีสัดส่วนของเข็มกลัดใกล้เคียงกับอัตราส่วนทองคำมากที่สุด ครอบคลุมงานวิจัยนี้ สามารถนำไปพัฒนาประยุกต์ใช้กับการออกแบบผลิตภัณฑ์อื่นๆ ได้

คำสำคัญ: ระบบออกแบบอัตโนมัติ ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมแบบโต้ตอบ อัลกอริทึมที่พัฒนาการแบบหลายวัตถุประสงค์ อัลกอริทึมที่พัฒนาการความแข็งแรงของพาเรโต อัตราส่วนทอง

Abstract

This research proposes Multi-Objective Optimization Generative Design (MOOGD) system that searches the optimal solutions within multiple objectives. MOOGD is able to generate various and number of three-dimensional (3D) models of the solutions. The parametric design model algorithm is created to generate parametric 3D models and parametrically control shapes of the 3D models. As well as, the optimal search for multiple objectives is developed based on Strength Pareto Evolutionary Algorithm II (SPEA-II). MOOGD uses Pareto-Optimal Front method to search a set of optimal solutions. Those solutions are automatically decoded to 3D models and presented in Computer-Aided Design (CAD) software to designers. MOOGD, therefore, works as a decision support tool in product design process. The research methodology is presented via a case study of

the design of Art Deco double clip brooch with two objectives: minimum weight of the brooch, while maximize golden ratio of the brooch. The research methodology can be applied to design other industrial products.

Keywords: Generative design, Interactive Genetic Algorithm, Multi-objective optimization, SPEA-II, Golden ratio

1. บทนำ

ในปัจจุบันคอมพิวเตอร์ช่วยในงานออกแบบและงานศิลปะ (Computer-aided Design: CAD) เป็นเครื่องมือสำคัญในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ โดยจะช่วยผู้ที่สนใจและนักออกแบบตั้งแต่กระบวนการสร้างแนวคิดไปจนถึงการพิจารณาถึงการออกแบบรูปร่างรูปทรงและรายละเอียดที่ต่าง ๆ (Séquin, 1997) กระบวนการสร้างแนวคิดเป็นกระบวนการในการสร้างการออกแบบที่ไม่จำกัดหรือเป็นการสร้างการออกแบบเพื่อหาทางเลือกที่มากมายหลากหลาย (Lipson & Shpitalni, 2000) ดังนั้นในขั้นตอนนี้นักออกแบบมักจะทำกิจกรรมที่ทำให้เกิดแนวคิด เช่น การออกแบบและบันทึกแนวคิด การต่อยอดแนวคิด หรือการสำรวจแนวคิดที่เป็นไปได้ ซึ่งปัญหาการออกแบบผลิตภัณฑ์โดยส่วนใหญ่จะกำหนดด้วยวัตถุประสงค์ต่าง ๆ โดยครอบคลุมทั้งวัตถุประสงค์ทางด้านปริมาณและวัตถุประสงค์ทางด้านคุณภาพ ซึ่งนับว่าเป็นปัญหาการออกแบบที่ต้องการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์

ในส่วนของวัตถุประสงค์ด้านคุณภาพ เช่น ความสวยงาม อารมณ์ ความพึงพอใจ หรือความรู้สึกนั้น เป็นวัตถุประสงค์ที่ต้องมีมนุษย์เข้าไปเกี่ยวข้อง ทำให้เกิดความไม่แน่นอนตามแต่ละบุคคลไป วัตถุประสงค์เหล่านี้จะกำหนดด้วยวัตถุประสงค์ที่ต้องการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์

ในส่วนของการออกแบบด้านคุณภาพ เช่น ความสวยงาม อารมณ์ ความพึงพอใจ หรือความรู้สึกนั้น เป็นวัตถุประสงค์ที่ต้องมีมนุษย์เข้าไปเกี่ยวข้อง ทำให้เกิดความไม่แน่นอนตามแต่ละบุคคลไป วัตถุประสงค์เหล่านี้จะกำหนดด้วยวัตถุประสงค์ที่ต้องการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์

กิจกรรมต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในการออกแบบนั้น นำมาซึ่งการออกแบบที่หลากหลาย นักออกแบบจึงต้องการเครื่องมือที่จะช่วยพวกเขาเลือกแนวคิดที่ดีที่สุด ด้วยเหตุผลนี้จึงเป็นแรงจูงใจที่ทำให้เกิดการพัฒนาระบบออกแบบอัตโนมัติเชิงโต้ตอบ ร่วมกับการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์เพื่อช่วยสนับสนุนนักออกแบบระหว่างการออกแบบแนวคิดซึ่งเป็นขั้นตอนเริ่มต้นของกระบวนการออกแบบ และระบบที่พัฒนานี้ยังช่วยกลุ่มนักออกแบบที่ไม่นิยมใช้เทคโนโลยี CAD ให้สามารถเข้าถึง CAD ให้ง่ายขึ้น

Computation: IEC) การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ด้วยอัลกอริทึมทางพันธุกรรม (Multi-objective Optimization with Genetic Algorithm) อัล ก อ ริ ทึม ที่ มี วิวัฒนาการความแข็งแรงของพาเรโต (Strength Pareto Evolutionary Algorithm II: SPEA-II) การออกแบบเครื่องประดับ การออกแบบแผนการตลาดและการวิเคราะห์ข้อมูล การออกแบบสอบถาม และโปรแกรมออกแบบ Rhinoceros ส่วนที่ 3 กรอบแนวคิดของงานวิจัย ส่วนที่ 4 การศึกษากรณีการออกแบบเข็มกลัดอาร์ตเดโคแบบกลัดคู่ และส่วนที่ 5 บทสรุปของงานวิจัยและงานในอนาคต

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ระบบออกแบบเจเนอเรทีฟ (Generative Design System)

ระบบออกแบบเจเนอเรทีฟ คือ ระบบออกแบบโดยอัตโนมัติ โดยระบบสามารถออกแบบรูปร่างรูปทรงได้เป็นจำนวนมากภายในขอบเขตที่นักออกแบบหรือผู้ใช้เป็นผู้กำหนด กระบวนการทำงานของระบบออกแบบเจเนอเรทีฟ ส่วนใหญ่จะมีการทำซ้ำเพื่อให้เกิดรูปร่างรูปทรงที่เปลี่ยนแปลงไปจากเดิมอย่างหลากหลาย (Soddu, 1994) ในการออกแบบนั้น การใช้มีवादแนวคิดที่ออกแบบมาจากหัวของนักออกแบบโดยตรง เป็นวิธีที่นักออกแบบนิยมทำกันอย่างแพร่หลาย เพราะเป็นวิธีที่ง่าย สะดวก และประหยัด หากแต่อาจเกิดปัญหาจากความเหนื่อยล้าในการที่จะคิดออกแบบแนวคิดให้ออกมาเป็นจำนวนมาก ๆ จึงมีการพัฒนาระบบออกแบบเจเนอเรทีฟ ขึ้นมาเพื่อช่วยนักออกแบบในการออกแบบผลิตภัณฑ์หรือค้นหารูปร่างรูปทรงที่หลากหลาย

ระบบออกแบบเจเนอเรทีฟ ได้ถูกนำไปใช้ในการออกแบบสิ่งต่าง ๆ มากมาย โดยมี 5 เทคนิคที่นิยมอย่างแพร่หลาย (Singh & Gu, 2012) ได้แก่ ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm) ไวยากรณ์รูปร่าง (Shape Grammar) เซลลูลาร์ออโตมาตา (Cellular Automata) ระบบแอล (L-System) และความฉลาดแบบกลุ่ม (Swarm Intelligence)

มีงานวิจัยมากมายที่นำระบบออกแบบเจเนอเรทีฟ ไปพัฒนาระบบออกแบบ Agarwal and Cagan (1998) ได้นำระบบออกแบบเจเนอเรทีฟไปพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องชงกาแฟ โดยใช้เทคนิค ไวยากรณ์รูปร่าง Tang et al. (2013) ได้นำเทคนิคขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมร่วมกับเทคนิค Artificial

Neural Network ไปใช้ในการออกแบบรูปร่างของโทรศัพท์มือถือ โดยมีคนเข้าไปเกี่ยวข้องในขั้นตอนการประเมินรูปร่างของโทรศัพท์มือถือที่มีขายในท้องตลาดก่อนที่จะนำผลประเมินเหล่านั้นไปร่วมออกแบบ หรือแม้กระทั่งในงานออกแบบเครื่องประดับ ซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์ที่ขนาดเล็ก ต้องอาศัยความชำนาญในการออกแบบแต่ละชิ้น Kiarova & Pradujphongphet (2013) ได้นำเทคนิค ไวทยากรณ์รูปร่าง มาพัฒนาออกแบบแหวนให้มีรูปร่างรูปทรงที่แปลกใหม่เป็นจำนวนมาก

2.2 การคำนวณเชิงวิวัฒนาการแบบโต้ตอบ (Interactive Evolutionary Computation: IEC)

IEC คือ เทคนิคในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดซึ่งอยู่บนพื้นฐานของการคำนวณเชิงวิวัฒนาการ (Evolutionary Computation: EC) แต่จะการใช้การประเมินของมนุษย์ในส่วนฟังก์ชันวัตถุประสงค์ (Fitness Function) เพราะฉะนั้นการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดด้วยระบบ IEC จะมีเป้าหมายเพื่อให้บรรลุผลที่ต้องการโดยขึ้นอยู่กับประเมินของผู้ใช้งาน Takagi (2001) กล่าวไว้ว่า IEC ถือเป็นวิธีการที่ฝังเอาอารมณ์ ความพึงพอใจ ญาณหยั่งรู้ หรือความรู้สึก (Named Kansei) ของมนุษย์เข้าไปในเป้าหมายของระบบ นิยมนำไปใช้ในงานต่าง ๆ ที่หลากหลาย เช่น การสร้างสรรค์ภาพทางศิลปะ การออกแบบผลิตภัณฑ์ และด้านวิศวกรรม ในบทความนี้เรามุ่งเน้นไปที่การนำไปใช้ในการออกแบบผลิตภัณฑ์และการออกแบบเชิงอุตสาหกรรม

Brintrup et al. (2007) ได้ทำการพัฒนา IGA สำหรับการออกแบบเก้าอี้โดยมีฟังก์ชันวัตถุประสงค์ที่เป็นทั้งด้านปริมาณและด้านคุณภาพ พวกเขาได้ทำการเปรียบเทียบประเภทของ IGA ที่แตกต่างกันในหลาย ๆ เกณฑ์ด้วยกัน Hu et al. (2008) พัฒนาระบบ CAD เชิงวิวัฒนาการร่วมกับการโต้ตอบ (Interactive Co-Evolutionary CAD System) ที่ใช้สำหรับการออกแบบรูปแบบของเสื้อผ้า โดยส่วนสำคัญของระบบเป็นการใช้แรงบันดาลใจของผู้ใช้ร่วมกับอัลกอริทึมเชิงวิวัฒนาการสำหรับการทำงานกับผู้ที่มีพหุมิติทักษะอยู่บ้างแล้ว Sun et al. (2012) พัฒนา IGA สำหรับการออกแบบเลนส์ของแว่นกันแดดโดยอัลกอริทึมที่สามารถที่จะทำงานร่วมกับกลุ่มประชากรขนาดใหญ่ซึ่งใช้วิธีการเรียนรู้ถึงการควบคุม Lu et al. (2014) เสนอการออกแบบการโต้ตอบเชิงวิวัฒนาการ (Interactive Evolutionary) ในการสร้างรูปแบบลายหินอ่อนบนสิ่งทอ Dou et al. (2016) เสนออัลกอริทึมทางพันธุกรรมเชิงโต้ตอบแบบหลายขั้นตอน (Multi-Stage Interactive Genetic Algorithm: MS-IGA) โดยมีการแบ่งกลุ่มประชากรที่มีขนาดใหญ่ใน IGA แบบดั้งเดิม

ออกเป็นหลาย ๆ ขั้นตอนในความสัมพันธ์ในการทำงานที่ต่างหาก พวกเขาระบุยุคที่ใช้ MS-IGA สำหรับระบบออกแบบคอนโซลรถยนต์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อนำเอาความต้องการของแต่ละผู้เข้ามาทำการออกแบบผลิตภัณฑ์ให้สำเร็จ Kiarova and Sansri (2016) เสนอระบบออกแบบ Interactive Genetic Algorithm (IGA) ที่ทำงานร่วมกับ Multi-Objective Genetic Algorithm (MOGA) ในการออกแบบขวดน้ำหอม โดยวัตถุประสงค์เชิงปริมาณ ได้แก่ ความสูง 10 เซนติเมตร และปริมาณ 100 มิลลิลิตร ส่วนวัตถุประสงค์เชิงคุณภาพคือความพึงพอใจของผู้ใช้งานระบบ

2.3 การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ด้วยอัลกอริทึมทางพันธุกรรม (Multi-objective Optimization with Genetic Algorithm)

อัลกอริทึมทางพันธุกรรม (Genetic Algorithm) เป็นส่วนหนึ่งของ EC โดยเทคนิคนี้มักจะถูกนำไปใช้ในการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ เพราะมีความเหมาะสมหลายประการ (Deb, 2011)

Shibuya et al. (1991) ได้ทำการผสมผสานระหว่างการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ร่วมกับ IGA เพื่อประยุกต์ใช้ในการออกแบบแอนิเมชัน ระบบของพวกเขาช่วยให้ผู้ใช้มีส่วนช่วยในการจัดอันดับตามความคิดเห็นส่วนบุคคล Brintrup et al. (2008) นำเสนอกรอบของการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ด้วย IGA สำหรับปัญหาการออกแบบเก้าอี้ Zhang et al. (2016) ได้นำเสนอ MOGA ในการหารูปร่างฟรiform ของตึกในเขตโซนหนาแน่นของประเทศจีน โดย MOGA โดยมีวัตถุประสงค์ 3 ข้อ ได้แก่ ได้รับรังสีจากดวงอาทิตย์มากที่สุด (Solar Radiation Gain) บริเวณพื้นที่ที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด (Space Efficiency) และ ค่าสัมประสิทธิ์รูปร่างน้อยที่สุด (Shape Coefficient) วิธีการหาค่าตอบที่เหมาะสมที่สุดบริเวณด้านหน้าของพาเรโตถูกนำเสนอมาใช้ในการแก้ปัญหา และช่วยนักออกแบบในการตัดสินใจขั้นสุดท้าย ในระบบการออกแบบนั้นการคำนวณที่อยู่บนพื้นฐานของกรอบแนวคิดจะสำเร็จได้ก็ต่อเมื่อมีการควบคุมดูแลในด้านคุณภาพด้วย ในงานที่เกี่ยวข้องกับเครื่องประดับ Sansri and Kiarova (2018) ได้นำการหาค่าที่เหมาะสมแบบหลายวัตถุประสงค์มาประยุกต์ใช้ในการออกแบบเข็มกลัด โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาเข็มกลัดที่ผลิตโดยใช้น้ำหนักของโลหะน้อยที่สุด และต้องการหารูปร่างของเข็มกลัดที่มีสัดส่วนเข้าใกล้ (Golden Ratio)

2.4 อัลกอริทึมวิวัฒนาการแบบความแข็งแรงของพาเรโต (Strength Pareto Evolutionary Algorithm II: SPEA-II)

อัลกอริทึมวิวัฒนาการแบบความแข็งแรงของพาเรโต หรือ SPEA นำเสนอโดย Zitzler and Thiele (1999) โดยลักษณะของ SPEA มีดังนี้: 1) การจัดเก็บคำตอบ จะจัดเก็บจากคำตอบที่ไม่ได้ถูกรอรับจากภายนอก 2) การประเมินสมรรถภาพของแต่ละคำตอบ จะขึ้นอยู่กับจำนวนคำตอบที่ไม่ได้ถูกรอรับจากรอบก่อนหน้า 3) ใช้การครอบงำแบบพาเรโต เพื่อรักษาความหลากหลายของประชากร 4) มีการลดคำตอบที่ไม่ได้ถูกรอรับหรือคำตอบที่ไม่โดดเด่นด้วยการจัดกลุ่ม

ต่อมา Zitzler et al. (2001) ได้ทำการพัฒนาปรับปรุง SPEA โดยตั้งชื่อว่า SPEA-II พวกเขาพยายามที่จะลดจุดอ่อนของ SPEA เพื่อออกแบบอัลกอริทึม EMO ที่ทันสมัย โดย SPEA-II มี 3 ข้อที่แตกต่างจาก SPEA ดั้งเดิม ได้แก่ 1) การกำหนดค่าความเหมาะสมซึ่งคำนึงถึงคำตอบทั้งหมดในการค้นหา 2) การค้นหาโดยใช้เทคนิคการประเมินค่าความหนาแน่นของเพื่อนบ้าน (Nearest Neighbor) ในการประเมินความหนาแน่น และ 3) มีกระบวนการจัดเก็บอย่างถาวร

2.5 การออกแบบเครื่องประดับ

วัตถุประสงค์ของการเลือกใช้เครื่องประดับนั้นมีมากมาย ไม่ว่าจะเป็นเพื่อความสวยงาม เพื่อแสดงถึงตำแหน่งหน้าที่ หรือเพื่อแสดงออกถึงเอกลักษณ์ (Chuthavipa, 2002) การออกแบบเครื่องประดับแต่ละประเภทจะแตกต่างกันออกไปตามวัตถุประสงค์ แต่โดยรวมจะคำนึงถึงความสวยงามเป็นสำคัญ โดยแนวทางสำหรับการออกแบบเครื่องประดับแต่ละประเภทจะต่างกันออกไป อาทิเช่น การออกแบบแหวน จะออกแบบให้มีลักษณะโค้งมนเข้ากับลักษณะของนิ้วมือเพื่อลดการกระแทก เพราะนิ้วมือเป็นส่วนที่สัมผัสหรือกระทบกับสิ่งอื่น ๆ ได้ง่าย การออกแบบเข็มกลัด จะออกแบบโดยเน้นไปที่เรื่องความสมดุล เพราะเข็มกลัดต้องติดอยู่กับผ้า หากไม่สมดุลจะทำให้เข็มกลัดถ่วงไปด้านใดด้านหนึ่ง

การออกแบบเครื่องประดับนั้นยังสามารถแบ่งได้ตามยุคสมัย (Jongyoklang, 2012) ดังนี้ เครื่องประดับสมัยอียิปต์ โบราณ เครื่องประดับสมัยอินเดียโบราณ เครื่องประดับสมัยอิตาลีโบราณ เครื่องประดับสมัยกรีกและโรมัน เครื่องประดับสมัยอียิปต์ เครื่องประดับสมัยเรอเนซองส์ เครื่องประดับสมัยบารอก เครื่องประดับสมัยวิกตอเรีย เครื่องประดับสมัยอาร์ตนูโว และเครื่องประดับสมัยอาร์ตเดโค

เครื่องประดับสมัยอาร์ตเดโคอยู่ในช่วงปี ค.ศ. 1910 – ค.ศ. 1930 (Mouillefarine & Posseme, 2009) โดยเกิดขึ้น

หลังสงครามโลกครั้งที่หนึ่ง รู้จักแพร่หลายในงานนิทรรศการนานาชาติ de Arts Decoratifs et Industriels Modernes ในกรุงปารีส เมื่อปี ค.ศ. 1925 โดยเครื่องประดับในยุคสมัยนี้มีลักษณะโดดเด่น คือ การนำรูปทรงเรขาคณิตมาใช้ในการออกแบบ โดยยุคสมัยนั้นเกิดการเจียรไนอัญมณีแบบทรงกลม (Round) สี่เหลี่ยมผืนผ้า (Baguette) และ สี่เหลี่ยมจัตุรัส (Square) ทำให้เหมาะแก่การนำไปออกแบบกับรูปทรงเรขาคณิต และการฝังอัญมณีนั่นจะเป็นการฝังแบบจิกไข่ปลา (Pave Setting) และการฝังริด (Channel Setting)

2.6 การออกแบบแผนการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล

การออกแบบแผนการทดลอง (Experimental Design or Design of Experiments) (Nayutthaya, 2008) คือ การทดสอบแค่เพียงหนึ่งครั้งหรือหลาย ๆ ครั้งอย่างต่อเนื่อง เพื่อสังเกตและทราบถึงสาเหตุต่าง ๆ ที่ก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของผลลัพธ์ที่ได้ (Outputs or Responses) มีการเปลี่ยนแปลงค่าตัวแปรนำเข้า (Input Variables) ในกระบวนการนั้น ๆ โดยส่วนของการกำหนดค่าตัวแปรนำเข้า หรือค่าพารามิเตอร์ที่จะนำไปใช้ในกระบวนการนั้นเป็นสิ่งที่น่าสนใจ จะเรียกว่าขั้นตอน Parameter Design ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งในการออกแบบกระบวนการ (Design Process) อีกด้วย

การทดลองแฟคทอเรียล เป็นการทดลองที่ถูกนำไปใช้อย่างแพร่หลายในการออกแบบแผนการทดลอง เพราะสามารถที่จะศึกษาปัจจัยได้พร้อมกันหลาย ๆ ปัจจัย การทดลองแฟคทอเรียลสามารถแบ่งออกเป็นกรณีหลัก ๆ ได้แก่ การทดลองแฟคทอเรียลเต็มรูป (Full Factorial Experiment) และการทดลองแฟคทอเรียลบางส่วน (Fractional Factorial Experiment) ซึ่งจะนิยมใช้ในกรณีที่จำนวนของปัจจัยมีเยอะ ทำให้ต้องทำการทดลองจำนวนมาก ทำให้การใช้ทรัพยากรเพื่อการทดลองมากยิ่งขึ้นตามไปด้วย

สถิติในการวิเคราะห์ข้อมูล หมายถึง วิธีการจัดการกับข้อมูลตั้งแต่เริ่มการเก็บรวบรวมข้อมูลจนถึงกระทั่งการวิเคราะห์และแปลผลข้อมูล เพื่อใช้ในการตัดสินใจในภาวะความไม่แน่นอน (Uncertain) โดยอยู่บนพื้นฐานของหลักความน่าจะเป็น (Probability) โดยแบ่งออกเป็น 2 ประเภท ได้แก่ สถิติเชิงพรรณนา (Descriptive Statistics) เช่น การแจกแจงความถี่ การวัดแนวโน้มเข้าสู่ส่วนกลาง การวัดการกระจาย และสถิติอ้างอิง (Inference Statistics) หรือเรียกอีกอย่างว่าสถิติเชิงอนุมาน คือ การนำผลข้อมูลที่ผู้วิจัยเก็บรวบรวมมาจากกลุ่มตัวอย่าง (Sample) ไปใช้ในการอ้างอิงรวมถึงอธิบายถึงกลุ่มประชากร (Population) ทั้งหมด โดยใช้ความน่าจะเป็น (Probability)

2.7 การออกแบบสอบถาม

แบบสอบถาม คือ เครื่องมือที่นิยมนำไปใช้ในงานวิจัยอย่างแพร่หลายที่สุด เป็นการจัดรวบรวมคำถามเป็นชุดอย่างมีระบบ เพื่อใช้วัดสิ่งที่ต้องการจะวัดจากกลุ่มตัวอย่างหรือกลุ่มประชากรทำให้ได้มาซึ่งข้อเท็จจริง (Sinjaru, 2012) ลักษณะของแบบสอบถามแบ่งออกเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่ แบบสอบถามปลายเปิด สามารถให้ผู้ตอบแบบสอบถามตอบแบบสอบถามได้อย่างอิสระ และแบบสอบถามปลายปิด เป็นแบบสอบถามที่ต้องการคำตอบที่เฉพาะเจาะจง มีตัวเลือกให้เลือกตอบชัดเจน (Yotongyos, 2016)

ขั้นตอนในการสร้างแบบสอบถาม แบ่งเป็น 13 ขั้นตอน ดังนี้ 1) ศึกษาและรวบรวมข้อมูล เพื่อนำมากำหนดโครงสร้างของคำถาม 2) กำหนดโครงสร้างของแบบสอบถาม 3) สร้างแบบสอบถาม 4) เสนอที่ปรึกษาในการตรวจสอบแบบสอบถาม โดยตรวจสอบความเหมาะสมด้านภาษา ความเหมาะสมด้านการเลือกใช้รูป 5) นำแบบสอบถามนั้นนำเสนอแก่ผู้เชี่ยวชาญ เพื่อตรวจสอบค่าความเที่ยงตรงของแบบสอบถาม 6) คำนวณค่าความเที่ยงตรงตามเนื้อหาของแบบสอบถาม โดยค่าสถิติที่ใช้ในการหาคุณภาพได้แก่ ค่าความสอดคล้องระหว่างข้อคำถามกับวัตถุประสงค์หรือเนื้อหา (Index of Item Objective Congruence: IOC) 7) ทดลองใช้แบบสอบถามกับกลุ่มทดลอง เพื่อคำนวณหาความเชื่อมั่น และอำนาจจำแนก 8) คำนวณค่าความเชื่อมั่น และอำนาจจำแนกของแบบสอบถาม 9) ปรับปรุงแก้ไขแบบสอบถาม 10) ตรวจสอบแบบสอบถาม 11) จัดทำแบบสอบถามฉบับสมบูรณ์ 12) นำไปสอบถามกลุ่มเป้าหมาย 13) วิเคราะห์และสรุปผล โดยการวิเคราะห์ข้อมูลจะใช้โปรแกรม เช่น โปรแกรม SPSS Statistics หรือโปรแกรม Minitab ช่วยในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

2.8 โปรแกรมออกแบบ Rhinoceros

โปรแกรมออกแบบ Rhinoceros (McNeel, 2017) เป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้สำหรับสร้างโมเดลสามมิติ นิยมนำไปใช้ในการออกแบบผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ เพราะมีความโดดเด่นในการสร้างรูปทรงอย่างอิสระ หรือรูปทรง Free Form สามารถแก้ไขโมเดลนั้นได้อย่างง่ายดาย รวมถึงสามารถเรนเดอร์โมเดลนั้นให้มีความเหมือนจริง

นอกจากนี้โปรแกรมออกแบบ Rhinoceros ยังมี Plug-in เสริมช่วยนักออกแบบในด้านต่างๆ เช่น Plug-in เสริม Grasshopper ถูกพัฒนาขึ้นโดย Scott Davidson (Davidson, 2017) เป็นอัลกอริทึมการสร้างโมเดล (Algorithmic Modeling) จะสร้างโมเดลในลักษณะที่เป็นพารามิเตอร์ที่ขึ้นกล่าวคือโมเดลจะสามารถปรับเปลี่ยนรูปร่างได้โดยอาศัยตัวพารามิเตอร์ที่แตกต่างกัน

Plug-in เสริม Octopus ถูกพัฒนาขึ้นโดย Robert Vierlinger (Vierlinger, 2017) ประยุกต์ใช้หลักวิวัฒนาการสำหรับพารามิเตอร์ที่ขึ้น และการแก้ปัญหาในวัตถุประสงค์เดียว หรือปัญหาที่มากกว่าหนึ่งวัตถุประสงค์ ถูกสร้างขึ้นมาจากหลักการ SPEA-II

3. กรอบแนวคิดของงานวิจัย

งานวิจัยนี้เสนอกรอบแนวคิดการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดแบบหลายวัตถุประสงค์ในการออกแบบอัตโนมัติ (MOOGD) สำหรับการหารูปทรงที่เหมาะสมที่สุดซึ่งจะช่วยแก้ปัญหาในกระบวนการการออกแบบผลิตภัณฑ์

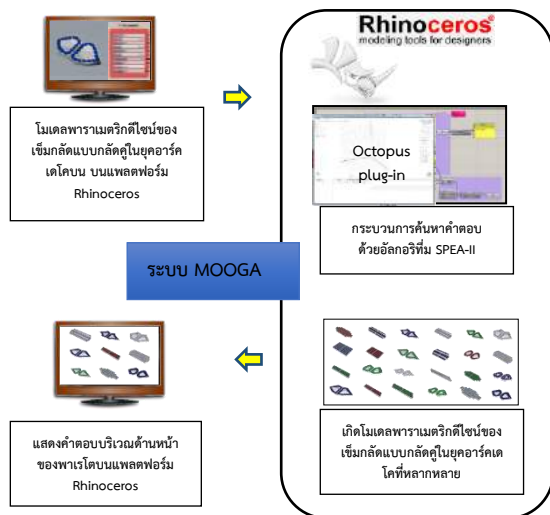
ในการพัฒนาระบบ MOOGA เพื่อค้นหาคำตอบภายใต้หลายวัตถุประสงค์ มีขั้นตอนหลักๆ ดังนี้

1. เริ่มจากการสร้างโมเดลพารามิเตอร์ที่ขึ้นของผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นการสร้างโมเดลสามมิติของผลิตภัณฑ์ด้วยพารามิเตอร์ และควบคุมการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของโมเดลสามมิติด้วยพารามิเตอร์

2. พัฒนาระบบการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมแบบหลายวัตถุประสงค์ด้วยอัลกอริทึมที่พัฒนาการความแข็งแรงของพารेट 2 (SPEA-II) ซึ่งใช้วิธีค้นหาคำตอบที่อยู่บริเวณด้านหน้าของพารेट (Pareto-Optimal Front) โดยจะให้ชุดคำตอบที่มากกว่าหนึ่งคำตอบ

3. พัฒนาอัลกอริทึมเพื่อทำการถอดรหัสคำตอบ และแปลงเป็นโมเดลสามมิติโดยอัตโนมัติ เพื่อนำเสนอต่อนักออกแบบโปรแกรมช่วยในการออกแบบ

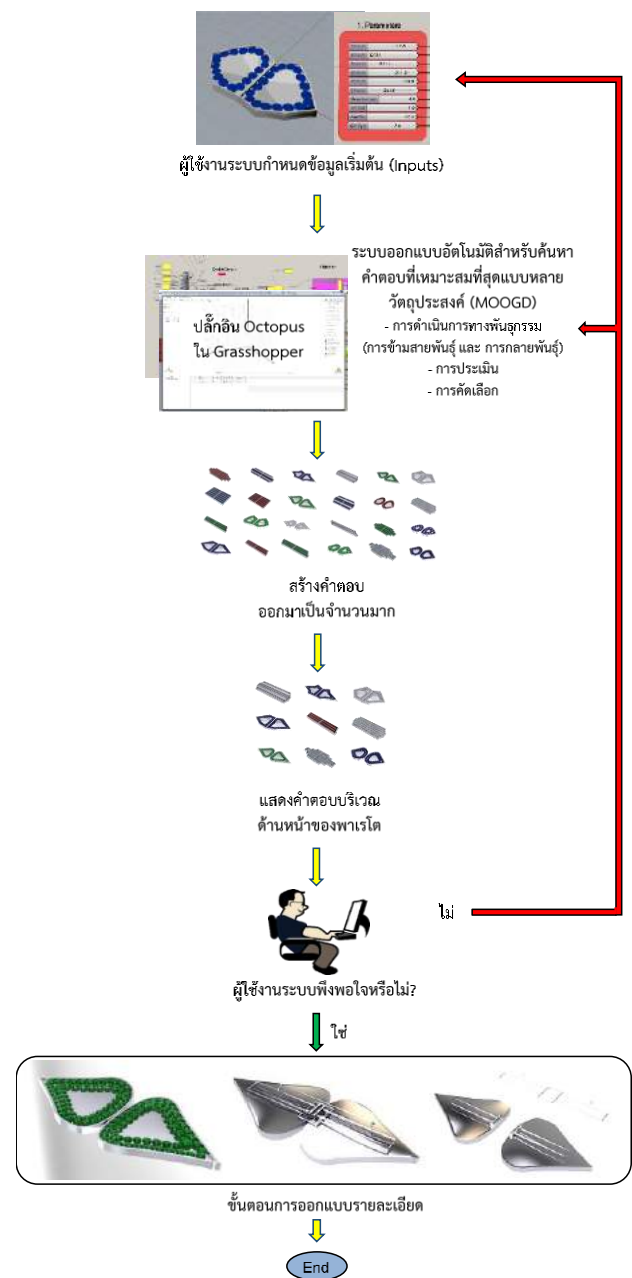
ในการพัฒนา อัลกอริทึม SPEA-II จะเริ่มจากสุ่มประชากรเริ่มต้นและใช้วิธีหาคำตอบบริเวณด้านหน้าของพารेटในการหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดภายใต้วัตถุประสงค์ที่กำหนด โดยจะหาคำตอบที่โดดเด่นที่อยู่ด้านหน้าของพารेट ซึ่งไม่ถูกรอบงำด้วยคำตอบอื่น ๆ ถ้ายังไม่เข้าเงื่อนไขกระบวนการหยุดค้นหาคำตอบ จะมีการนำคำตอบในรอบนั้น ๆ มาเข้าสู่รอบถัดไปโดยการดำเนินการทางพันธุกรรม (การข้ามสายพันธุ์และการกลายพันธุ์) จากนั้นจะมีการรวมคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำในรอบก่อนหน้าและคำตอบในรอบปัจจุบัน เพื่อนำมาหากลุ่มคำตอบที่ไม่ถูกรอบงำต่อไป หากกลุ่มคำตอบที่ได้มามีมากเกินกว่าที่กำหนดไว้จะใช้เทคนิคการประเมินค่าความหนาแน่นของเพื่อนบ้านในการลบคำตอบออกไป สำหรับเงื่อนไขในการหยุดนั้นจะใช้การเปลี่ยนแปลงโดยเฉลี่ยของการแพร่กระจายคำตอบบนส่วนหน้าของพารेट หรือจำนวนรุ่นที่มากที่สุด และสุดท้ายระบบจะแสดงกลุ่มคำตอบที่ได้จากระบบผ่านโปรแกรม CAD ไปยังผู้ใช้งานระบบหรือนักออกแบบ ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 การพัฒนาระบบ MOOGA

ในระบบออกแบบอัตโนมัติ MOOGD ที่นำเสนอนี้ การทำงานจะเริ่มจากผู้ใช้ระบบโดยจะเป็นนักออกแบบ หรือ ผู้ใช้งานที่สนใจออกแบบผลิตภัณฑ์เป็นผู้กำหนดข้อมูลเริ่มต้น หรือพารามิเตอร์แต่ละตัว (Inputs) เพื่อให้แสดงรูปร่างของ ผลิตภัณฑ์ที่ผู้ใช้งานพึงพอใจ ข้อมูลเหล่านั้นจะถูกนำมาสร้าง เป็นโมเดลพารามิเตอร์ดีไซน์ และเข้าสู่วิธีการคำนวณค้นหา คำตอบภายใต้วัตถุประสงค์สัดส่วน และน้ำหนักต่อไป

โดยระบบจะเข้าสู่กระบวนการ Multi-objective Optimization เพื่อค้นหาคำตอบที่เหมาะสมที่สุดผ่าน อัลกอริทึม SPEA-II สุดท้ายระบบจะใช้วิธี Pareto-based Method เพื่อกรองกลุ่มคำตอบที่อยู่บริเวณด้านหน้าของ พารेटโ ซึ่งคำตอบที่โดดเด่นที่คำนึงถึงทุกวัตถุประสงค์ นำ กลุ่มคำตอบเหล่านั้นมาแสดงแก่ผู้ใช้งานระบบอีกครั้งเพื่อให้ผู้ใช้ พิจารณารูปแบบของผลิตภัณฑ์ว่าพึงพอใจหรือไม่ หากผู้ใช้ พึงพอใจรูปแบบใดก็สามารถนำรูปแบบนั้นไปเข้าสู่ขั้นตอนการ ออกแบบรายละเอียดต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 2



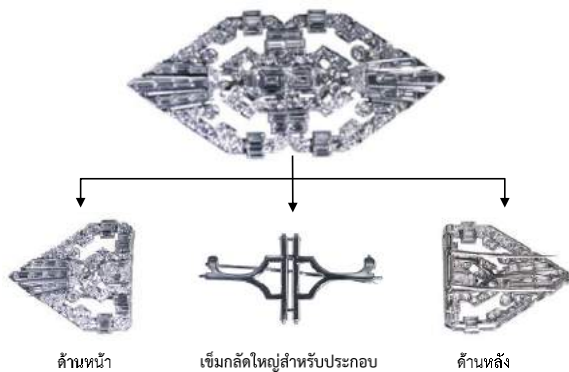
รูปที่ 2 กรอบแนวคิดของงานวิจัย

4. กรณีศึกษาการออกแบบเชื่อมกลัดอาร์ตเดโคแบบกลัดคู่

งานวิจัยนี้เสนอกรอบแนวคิดการหาค่าที่เหมาะสมที่สุด แบบหลายวัตถุประสงค์ในการออกแบบ โดยงานวิจัยนี้ได้เลือก ปัญหาการออกแบบเครื่องประดับเชื่อมกลัดอาร์ตเดโคแบบกลัดคู่ เป็นกรณีศึกษา

เครื่องประดับเข็มกลัดแบบกลัดคู่เป็นเครื่องประดับหนึ่งที่ถือกำเนิดขึ้นในยุคอาร์ตเดโค โดย Louis Cartier ในปี ค.ศ. 1927 เป็นผู้ริเริ่มในการผลิต (Kang, 2014) มีลักษณะเด่น คือ เข็มกลัดสามารถแยกออกมาเป็นสองชิ้น หรือรวมกันเป็นชิ้นใหญ่ขึ้นเดียว ทำให้สามารถใช้กลัดตกแต่งเสื้อผ้าได้หลากหลายแบบ โดยเข็มกลัดประเภทนี้นิยมนำอัญมณีประเภทเพชรมาจัดเรียง และออกแบบรูปทรงเข็มกลัดให้เป็นรูปทรงเรขาคณิต เช่น รูปทรงสี่เหลี่ยม รูปทรงสามเหลี่ยม รวมถึงออกแบบให้เข็มกลัดทั้งสองข้างมีความสมมาตรกัน (Martinez, 2016) ดังแสดงในรูปที่ 3

จากการศึกษาข้อมูลเกี่ยวกับการออกแบบเข็มกลัดนั้น การออกแบบจะไม่นิยมให้ใหญ่รุ่งรังและไม่ออกแบบให้มีน้ำหนักมากจนเกินไป เพราะจะรังสีเสื้อผ้าลงมาทำให้เสียรูปได้ และผู้ออกแบบจะเน้นในเรื่องความสมดุลของเข็มกลัดเพราะหากออกแบบมาไม่มีความสมดุลทำให้น้ำหนักถ่วงไปด้านใดด้านหนึ่ง จะส่งผลให้เข็มกลัดเอียงได้เมื่อมีการนำไปประดับบนเสื้อผ้า ในส่วนของเข็มกลัดอาร์ตเดโคแบบกลัดคู่ Sansri (2018) ได้ทำการเก็บรวบรวมข้อมูลเข็มกลัดอาร์ตเดโคแบบกลัดคู่ ทั้งสิ้นจำนวน 100 แบบ โดยสัดส่วน (ความยาว/ความกว้าง) ของเข็มกลัดที่พบมากที่สุด คือ สัดส่วน 2.5 ดังนั้นในการออกแบบเข็มกลัดครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการออกแบบอยู่ 2 ข้อ ได้แก่ การหาเข็มกลัดที่มีน้ำหนักน้อยที่สุด และการหาสัดส่วนของเข็มกลัดที่เข้าใกล้สัดส่วน 2.5 มากที่สุด



รูปที่ 3 เข็มกลัดอาร์ตเดโคแบบกลัดคู่

ที่มา: Fearnley, 2018

4.1 การกำหนดพารามิเตอร์และขอบเขต

โมเดลของเข็มกลัดสร้างขึ้นจากพารามิเตอร์จำนวน 10 ตัว บนโปรแกรม Rhinoceros และ ตัวเสริม (plugin) Grasshopper ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ควบคุมการสร้างรูปร่าง รวมถึงน้ำหนักและสัดส่วนของเข็มกลัด ซึ่งขอบเขตของพารามิเตอร์ทั้ง 10 ตัว แสดงดังตารางที่ 1 ดังนี้

ตารางที่ 1 แสดงค่าของพารามิเตอร์

ลำดับ	พารามิเตอร์	ขอบเขต
1	Shape Control	Y Point1
2		X Point2
3		Y Point2
4		X Point3
5		Y Point3
6		X Point4
7	Shape Grammar	0 – 4
8	Gem Cut	0 – 1
9	Gem Size	2.5 – 5.0
10	Gem Type	0 - 3

จากตารางที่ 1 Shape Control เป็นพารามิเตอร์สำหรับควบคุมรูปร่างของโครงเข็มกลัด โดยจะประกอบไปด้วยพารามิเตอร์จำนวน 6 ตัว ในแต่ละตัวแสดงถึงค่าบนแกน X และแกน Y ที่ทำให้เกิดจุด (ตำแหน่ง) จำนวน 4 จุด

Shape Grammar เป็นพารามิเตอร์สำหรับควบคุมรูปแบบของโมเดลสามมิติของเข็มกลัด แสดงด้วยจำนวนเต็มระหว่าง 0-4 ซึ่งแต่ละค่าจะแสดงรูปแบบการสร้างโมเดลสามมิติด้วยวิธีที่แตกต่างกันออกไป

Gem Cut เป็นพารามิเตอร์สำหรับควบคุมรูปร่างของอัญมณีที่ถูกใช้ฝังบนตัวเรือนของเข็มกลัด แสดงด้วยจำนวนเต็มระหว่าง 0-1 ค่า 0 จะแสดงถึงรูปร่างอัญมณีรูปกลม และ ค่า 1 จะแสดงถึงรูปร่างอัญมณีที่มีรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

Gem Size เป็นพารามิเตอร์สำหรับควบคุมขนาดของอัญมณีที่ถูกใช้ฝังบนตัวเรือนของเข็มกลัด แสดงด้วยจำนวนจริงระหว่าง 2.5 – 5.0 ซึ่งค่านี้จะแสดงถึงความกว้างของอัญมณี มีหน่วยเป็นมิลลิเมตร

Gem Type เป็นพารามิเตอร์สำหรับควบคุมประเภทของอัญมณีที่ใช้ในการประดับบนเข็มกลัด แสดงด้วยตัวเลขจำนวนเต็มระหว่าง 0 – 3 ค่า 0 จะแสดงอัญมณีประเภทเพชรที่มีสีขาว, ค่า 1 จะแสดงอัญมณีประเภทแซฟไฟร์ที่มีสีน้ำเงิน, ค่า 2 จะแสดงอัญมณีประเภทมรกตที่มีสีเขียว และ ค่า 3 จะแสดงอัญมณีประเภททับทิมที่มีสีแดง

โดยน้ำหนักของเข็มกลัดจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ทั้ง 10 ตัว ดังตารางที่กล่าวมา แต่สัดส่วนของเข็มกลัดจะขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์จำนวน 7 ตัว (จากทั้งหมด 10 ตัว) ได้แก่ Shape Control จำนวน 6 ตัว และ Shape Grammar

4.2 การตั้งค่าภายในระบบ MOOGD

ระบบ MOOGD ถูกพัฒนาขึ้นบนตัวเสริม Grasshopper ในโปรแกรม Rhinoceros 5.0 บนคอมพิวเตอร์เวิร์คสเตชัน (Intel Xeon 2.8 GHz processor, 8G RAM, 64 bit) โดย

ระบบที่ถูกพัฒนาขึ้นประมวลผลค้นหาคำตอบโดยตัวเสริม Octopus

จากงานวิจัยของ Sansri (2018) ได้มีการหาระดับการตั้งค่าที่เหมาะสมที่สุดให้แก่ปัจจัยต่าง ๆ ทั้ง 6 ปัจจัย ได้แก่ Populations Size, Max Generations, Elitism, Mutation Probability, Mutation Rate และ Crossover Rate ที่อยู่ในตัวเสริม Octopus โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วน 2^{6-3} โดยในแต่ละปัจจัยจะถูกกำหนดให้มี 2 ระดับที่แตกต่างกันออกไป ได้แก่ ระดับต่ำและระดับสูง จากผลการทดลองดังกล่าวปรากฏว่า การตั้งค่าในแต่ละพารามิเตอร์ที่เหมาะสมแสดงรายละเอียด ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงการตั้งค่าพารามิเตอร์ใน GA

ลำดับ	พารามิเตอร์	ค่า
1	Populations Size	20
2	Max Generations	5
3	Elitism	0.5
4	Mutation Probability	0.9
5	Mutation Rate	0.5
6	Crossover Rate	0.5

เมื่อกำหนดการตั้งค่าพารามิเตอร์ดังรายละเอียดข้างต้น ระบบ MOOGA จะดำเนินการค้นหาคำตอบเพื่อให้สอดคล้องกับวัตถุประสงค์ทั้ง 2 ข้อ ได้แก่ สัดส่วนเข้าใกล้ 2.5 (อัตราส่วนทอง) และน้ำหนักน้อย โดยการแสดงคำตอบจะแสดงเป็นกลุ่ม กล่าวคือมีมากกว่าสองคำตอบ ในบางคำตอบอาจจะเด่นในวัตถุประสงค์ด้านสัดส่วน มีสัดส่วนเข้าใกล้ 2.5 มากที่สุด ในบางคำตอบอาจจะเด่นในวัตถุประสงค์ด้านน้ำหนัก มีน้ำหนักน้อยที่สุด ในขั้นตอนนี้ผู้ใช้งานระบบสามารถที่เลือกคำตอบที่ตรงกับความต้องการของตนเอง เพื่อนำไปเข้าสู่ขั้นตอนการออกแบบรายละเอียด และพัฒนาเป็นชิ้นงานต้นแบบต่อไป

4.3 การทดสอบความพึงพอใจของกลุ่มตัวอย่างที่มีต่อผลลัพธ์ที่ถูกสร้างขึ้นจากระบบ

การทดสอบความพึงพอใจของกลุ่มตัวอย่างที่มีต่อผลลัพธ์ที่ถูกสร้างขึ้นจากระบบ จากผู้ตอบแบบสอบถามทั้งหมดจำนวน 100 คน ตามหลักการคำนวณขนาดตัวอย่างด้วยวิธีของ Taro Yamane (1970) กลุ่มตัวอย่างนั้นเป็นผู้หญิงที่มีอายุอยู่ในช่วง 25 ปี – 55 ปี Insuya et al. (2016) เพราะเป็นบุคคลที่อยู่ในช่วงวัยผู้ใหญ่ตอนต้น (Early Adulthood) ที่มักจะมีรสนิยมในการแต่งตัว รักสวยรักงาม ไปจนถึงวัยกลางคน (Middle Adulthood) ที่มีตำแหน่งหน้าที่การงานและทรัพย์สินที่มั่นคงแล้ว สามารถที่จะเลือกซื้อสินค้าที่มีราคาสูงหรือสินค้าฟุ่มเฟือยได้

งานวิจัยนี้เลือกวิเคราะห์ความพึงพอใจต่อกลุ่มคำตอบที่อยู่บนส่วนหน้าของพาเรโต และกลุ่มคำตอบที่ไม่ได้อยู่บนส่วนหน้าของพาเรโต ว่ามีความแตกต่างกันหรือไม่ โดยมีตัวอย่างของรูปร่างเข็มกลัดที่จัดอยู่ในกลุ่มส่วนหน้าของพาเรโต จำนวน 10 รูป ดังแสดงในรูปที่ 4 และรูปร่างเข็มกลัดที่ไม่ได้จัดอยู่ในกลุ่มส่วนหน้าของพาเรโต จำนวน 10 รูป ดังแสดงในรูปที่ 5 ให้ผู้ตอบแบบสอบถามทำการให้คะแนนความชื่นชอบ โดยใช้เครื่องมือแบบสอบถามแบบมาตราส่วนประมาณค่า (Rating Scale) 5 ระดับตามวิธีของ Likert (1961) และแปรผลโดยใช้เกณฑ์ของ Best (1981) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ค่าเฉลี่ย 4.21 - 5.00 หมายถึง พึงพอใจมากที่สุด

ค่าเฉลี่ย 3.41 - 4.20 หมายถึง พึงพอใจมาก

ค่าเฉลี่ย 2.61 - 3.40 หมายถึง พึงพอใจปานกลาง

ค่าเฉลี่ย 1.81 - 2.60 หมายถึง พึงพอใจน้อย

ค่าเฉลี่ย 1.00 - 1.80 หมายถึง พึงพอใจน้อยที่สุด



รูปที่ 4 รูปร่างเข็มกลัดที่จัดอยู่ในกลุ่มส่วนหน้าของพาเรโต



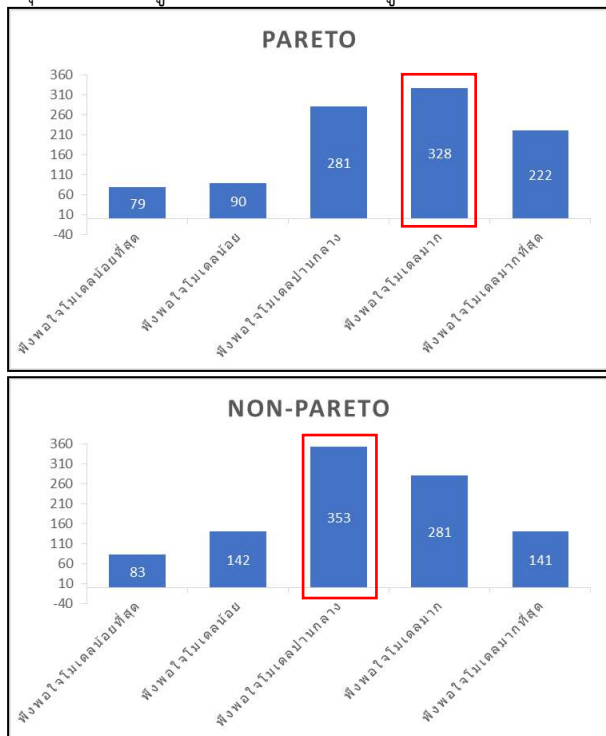
รูปที่ 5 รูปร่างเข็มกลัดที่ไม่ได้จัดอยู่ในกลุ่มส่วนหน้าของพาเรโต

จากแบบสอบถามจะได้ข้อมูลทั้งหมด 2 ชุด คือ ข้อมูลคะแนนเฉลี่ยของกลุ่มคำตอบที่อยู่บนส่วนหน้าของพารेटโ จำนวน 100 ข้อมูล และข้อมูลคะแนนเฉลี่ยของกลุ่มคำตอบที่ไม่ได้อยู่บนส่วนหน้าของพารेटโ จำนวน 100 ข้อมูล ได้ผลลัพธ์ดังนี้

ตารางที่ 3 แสดงค่าสถิติเชิงพรรณนาของความพึงพอใจต่อโมเดลสามมิติแบบแยกกลุ่มคำตอบที่อยู่บนพารेटโ และไม่ได้อยู่บนพารेटโ

	N	Mini mum	Maxi mum	Mean	SD	Mode
พารेटโ	100	1	5	3.52	0.84	4
ไม่ได้อยู่บนพารेटโ	100	1	4.90	3.26	0.76	3

จากตารางที่ 3 ตารางแสดงค่าสถิติเชิงพรรณนาแบบแยกกลุ่มคำตอบที่อยู่บนพารेटโ และไม่ได้อยู่บนพารेटโ จากทั้งหมดจะพบว่าค่าเฉลี่ยความพึงพอใจที่สูงที่สุดมาจาก กลุ่มคำตอบที่อยู่บนพารेटโ คือ 3.52 ส่วนค่าฐานนิยม จะพบว่าค่าฐานนิยมความพึงพอใจที่สูงที่สุดก็มาจากกลุ่มคำตอบที่อยู่บนพารेटโเช่นกัน คือ 4 แสดงว่าค่ากลางทั้งสองชนิดสอดคล้องไปในทิศทางเดียวกันโดยผู้ตอบแบบสอบถามชื่นชอบกลุ่มคำตอบที่อยู่บนพารेटโมากกว่ากลุ่มคำตอบที่ไม่ได้อยู่บนพารेटโ และรูปที่ 6 แสดงความถี่ของการให้คะแนนความพึงพอใจแบบแยกกลุ่มคำตอบที่อยู่บนพารेटโ และไม่ได้อยู่บนพารेटโ



รูปที่ 6 แสดงความถี่ของคะแนนความพึงพอใจในแบบแยกกลุ่มคำตอบที่อยู่บนพารेटโและไม่ได้อยู่บนพารेटโ

สำหรับขั้นตอนการทดสอบสมมติฐานนั้น งานวิจัยนี้ได้ตั้งสมมติฐาน ความพึงพอใจต่อกลุ่มคำตอบที่อยู่บนส่วนหน้าของพารेटโจะมากกว่ากลุ่มคำตอบที่ไม่ได้อยู่บนส่วนหน้าของพารेटโ เพราะกลุ่มคำตอบบนส่วนหน้าพารेटโจะเป็นกลุ่มคำตอบที่มีน้ำหนักน้อย และมีสัดส่วนเข้าใกล้ 2.5 ซึ่งผู้ท้าววิจัยหวังว่าจะทำให้ผู้ตอบแบบสอบถามพึงพอใจมากกว่ากลุ่มคำตอบที่ไม่ได้อยู่บนส่วนหน้าพารेटโ โดยขั้นตอนการตั้งสมมติฐานทางสถิติมีดังนี้ ตั้งสมมติฐานทางสถิติ

สมมติฐานหลัก (H_0): คะแนนความพึงพอใจเฉลี่ยต่อกลุ่มคำตอบที่อยู่บนส่วนหน้าของพารेटโ น้อยกว่าหรือเท่ากับกลุ่มคำตอบที่ไม่ได้อยู่บนส่วนหน้าของพารेटโ ($\mu \leq \mu_0$)

สมมติฐานรอง (H_1): คะแนนความพึงพอใจเฉลี่ยต่อกลุ่มคำตอบที่อยู่บนส่วนหน้าของพารेटโ มากกว่ากลุ่มคำตอบที่ไม่ได้อยู่บนส่วนหน้าของพารेटโ ($\mu > \mu_0$)

กำหนดระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$

เลือกสถิติที่ใช้ในการทดสอบสมมติฐานโดยเลือกใช้สถิติ Pair t - test มาใช้ในการทดสอบเพราะจำนวนของทั้งสองข้อมูลมากกว่า 30 จำนวน และกลุ่มตัวอย่าง 2 กลุ่มไม่เป็นอิสระต่อกัน

ทำการทดสอบผลในโปรแกรม SPSS ได้ผลดังตารางที่ 4 และตารางที่ 5

ตารางที่ 4 แสดงสถิติเชิงพรรณนา

Row	Group Variable	N	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean
1	Pareto	100	3.524	0.841	0.084
2	Non-Pareto	100	3.255	0.761	0.076

ตารางที่ 5 แสดงตาราง Paired Samples Test

	Mean	Std. Deviation	Std. Error Mean	t	df	Sig.(2-tailed)
Pareto-Non Pareto	0.23	0.38	0.04	7.035	99	0.00

สรุปผล เนื่องจาก P-Value 0.000 โดยเป็นการทดสอบทางเดียวจึงนำค่า Sig. 1-tailed ไปหาร 2 ปรากฏว่าได้เท่ากับ 0.00 ซึ่งมีค่าน้อยกว่า 0.05 ดังนั้นทำให้สรุปได้ว่าปฏิเสธสมมติฐานหลัก (H_0) และยอมรับสมมติฐานรอง (H_1) ที่ระดับนัยสำคัญ $\alpha = 0.05$ หรือคะแนนความพึงพอใจเฉลี่ยต่อกลุ่มคำตอบที่อยู่บนส่วนหน้าของพารेटโ มีค่าเฉลี่ยมากกว่ากลุ่มคำตอบที่ไม่ได้

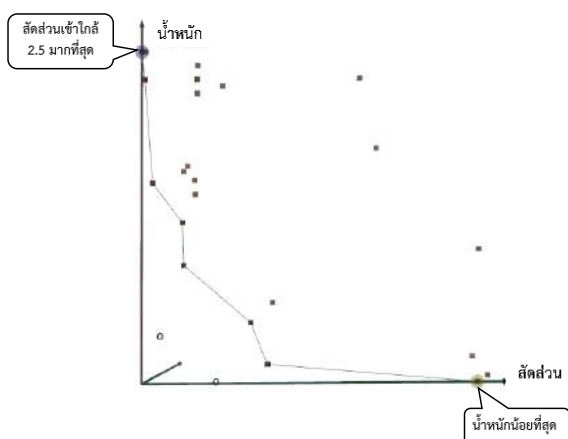
อยู่บนส่วนหน้าของพาเรโต ซึ่งสอดคล้องกับค่าสถิติเชิงพรรณนา ทำให้สามารถสรุปได้ว่ากลุ่มตัวอย่างพึงพอใจคำตอบที่อยู่บนพาเรโตมากกว่า

4.4 ผลลัพธ์

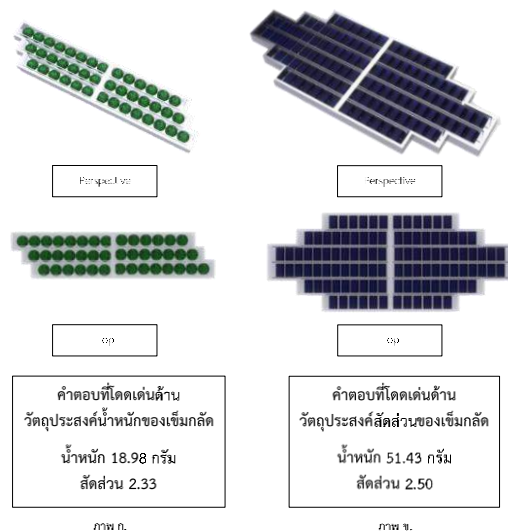
จากการทำงานของระบบ MOOGD จะเริ่มต้นทำงานโดยข้อมูลเริ่มต้นที่ผู้ใช้งานเป็นผู้กำหนด หลังจากนั้นระบบ MOOGD จะทำการค้นหารูปร่างของเข็มกลัดที่เหมาะสมที่สุดโดยคำนึงถึงวัตถุประสงค์ด้านน้ำหนักและสัดส่วนของเข็มกลัดจนกระทั่งระบบหยุดและแสดงคำตอบที่อยู่บริเวณด้านหน้าของพาเรโต โดยในรอบสุดท้ายของระบบกลุ่มคำตอบที่อยู่บริเวณด้านหน้าของพาเรโตมีทั้งสิ้นจำนวน 8 คำตอบ ดังแสดงด้วยเส้นที่ลากผ่านกล่องลูกบาศก์จำนวน 8 กล่อง ซึ่งแสดงถึงบริเวณด้านหน้าของพาเรโต ดังรูปที่ 6

และคำตอบที่โดดเด่นที่แตกต่างกันในวัตถุประสงค์ทั้งสองด้าน แสดงในรูปที่ 7 รูป ก. แสดงรูปของคำตอบที่โดดเด่นในด้านน้ำหนักน้อยที่สุด คือ มีน้ำหนัก 18.98 กรัม โดยตัวเรือนเข็มกลัดทำจากโลหะประเภทเงิน มีขนาดด้านยาว 66.00 มิลลิเมตร ด้านกว้าง 28.30 มิลลิเมตร สัดส่วน 2.33 ประดับด้วยอัญมณีประเภทมรกตรูปทรงกลม ขนาด 3.80 มิลลิเมตร จำนวน 42 เม็ด

ส่วนรูปที่ 7 รูป ข. แสดงรูปของคำตอบที่โดดเด่นในด้านสัดส่วนที่เข้าใกล้ 2.5 มากที่สุด คือ มีขนาดด้านยาว 79.80 มิลลิเมตร ด้านกว้าง 31.90 มิลลิเมตร สัดส่วน 2.50 โดยตัวเรือนเข็มกลัดทำจากโลหะประเภทเงิน มีน้ำหนัก 51.43 กรัม ประดับด้วยอัญมณีประเภทพลีนรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ขนาด 4.4 มิลลิเมตร จำนวน 108 เม็ด



รูปที่ 6 คำตอบที่อยู่บริเวณด้านหน้าพาเรโตของระบบ MOOGD



รูปที่ 7 คำตอบที่โดดเด่นในแต่ละวัตถุประสงค์

โมเดลของเข็มกลัดแบบกลัดคู้นี้พัฒนาบนตัวเสริม Grasshopper บนโปรแกรม Rhinoceros และระบบ MOOGD พัฒนาโดยใช้ลอจิกที่เพิ่ม SPEA-II ที่อยู่ในตัวเสริม Octopus บน Grasshopper ระบบที่นำเสนอจะแสดงผลลัพธ์แก่ผู้ใช้งานเป็นกลุ่มคำตอบ โดยผู้ใช้งานสามารถเลือกคำตอบที่พึงพอใจมากที่สุด หรือคำตอบที่เหมาะสมกับวัตถุประสงค์ของผู้ใช้งานได้ตามความชื่นชอบ

5. วิจัยผลการดำเนินงานวิจัย

ผลการพัฒนาของระบบ MOOGA ในการกำหนดพารามิเตอร์และขอบเขตมีการกำหนดพารามิเตอร์ไว้จำนวน 10 ตัว สำหรับออกแบบเครื่องประดับเข็มกลัดแบบกลัดคู้ โดยแต่ละพารามิเตอร์มีขอบเขตที่ชัดเจน จากขอบเขตเหล่านี้จะทำให้ได้ทราบถึงบริเวณพื้นที่ของคำตอบทั้งหมด หากมีการเพิ่มขอบเขตของพารามิเตอร์เหล่านั้น จะทำให้ขนาดของพื้นที่คำตอบใหญ่มากขึ้นตามไปเช่นกัน อาจทำให้ระบบมีโอกาสพบกับรูปร่างเข็มกลัดที่เข้าใกล้วัตถุประสงค์มากยิ่งขึ้น

ระบบ MOOGA นี้มีการกล่าวถึงการตั้งค่าภายในระบบจากงานวิจัย Sansri (2018) ได้มีการศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องทั้งสิ้น 6 ปัจจัย ได้แก่ Populations Size, Max Generations, Elitism, Mutation Probability, Mutation Rate และ Crossover Rate หากทำการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับปัจจัยอื่นที่นอกเหนือจากปัจจัยดังกล่าว อาจทำให้ระบบมีการค้นหาคำตอบที่มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น และใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลบางส่วน 2^{6-3} เพราะทำให้ประหยัดเวลาและทรัพยากร ขณะเดียวกันหากทำการทดลองแบบแฟคทอเรียลเต็มรูปแบบ จะทำให้ขยายขอบเขตของการสรุปผลได้ดีกว่า และในการทดสอบความพึงพอใจของกลุ่ม

ตัวอย่างที่มีต่อผลลัพธ์ที่ถูกสร้างขึ้นจากระบบ โดยวิเคราะห์ความพึงพอใจต่อกลุ่มคำตอบที่อยู่บนส่วนหน้าของพาเรโต และกลุ่มคำตอบที่ไม่ได้อยู่บนส่วนหน้าของพาเรโต ผลลัพธ์ทำให้ทราบว่าคะแนนความพึงพอใจเฉลี่ยต่อกลุ่มคำตอบที่อยู่บนส่วนหน้าของพาเรโต มีค่าเฉลี่ยมากกว่ากลุ่มคำตอบที่ไม่ได้อยู่บนส่วนหน้าของพาเรโต ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาข้อมูลของ เชื่อมกลัดอาร์ตเดโคแบบกลัดคู่ที่มักจะพบเจอกับเชื่อมกลัดที่มีสัดส่วนเข้าใกล้ 2.5 และหลักการออกแบบเชื่อมกลัด ที่ออกแบบมาให้มีน้ำหนักน้อยเพื่อให้ผู้สวมใส่รู้สึกสบาย ไม่หนักจนเกินไป และเป็นการใช้วัสดุอย่างคุ้มค่า

6. บทสรุป

บทความนี้นำเสนอระบบ MOOGD ที่ใช้ในการแก้ปัญหา งานออกแบบที่มีวัตถุประสงค์มากกว่าหนึ่งวัตถุประสงค์ โดยนำเสนอกรณีศึกษาการออกแบบเชื่อมกลัดอาร์ตเดโคแบบกลัดคู่ ซึ่งมีวัตถุประสงค์การออกแบบเชื่อมกลัดที่ต้องการออกแบบให้เชื่อมกลัดมีน้ำหนักน้อยที่สุด พร้อมทั้งมีสัดส่วนใกล้เคียงกับ 2.5 มากที่สุด

โดยระบบ MOOGD ที่กล่าวถึงพัฒนาอยู่บนแพลตฟอร์ม Rhinoceros โดยใช้ตัวเสริม Grasshopper ในการสร้างรูปร่าง โมเดลสามมิติของเชื่อมกลัดอาร์ตเดโคแบบกลัดคู่ จากนั้นระบบ จะทำการค้นหาคำตอบโดยนำอัลกอริทึมวิวัฒนาการแบบหลาย วัตถุประสงค์ประเภท SPEA-II ซึ่งอยู่ในตัวเสริม Octopus มา คำนวณค้นหาคำตอบที่เหมาะสมแล้วนำเสนอคำตอบเหล่านั้น ไปยังผู้ใช้งานในลักษณะของกลุ่มคำตอบที่มีคำตอบมากกว่า หนึ่งคำตอบ เพื่อให้ผู้ใช้งานได้พิจารณาและเลือกตามความชื่นชอบของผู้ใช้งาน

โดยบทความนี้ได้ทำการทดสอบความพึงพอใจของกลุ่ม ตัวอย่างที่มีต่อผลลัพธ์ที่ถูกสร้างขึ้นจากระบบ เปรียบเทียบกัน ระหว่างกลุ่มคำตอบที่เข้าใกล้วัตถุประสงค์ในเรื่องของสัดส่วน และน้ำหนักที่เรียกว่ากลุ่มคำตอบที่อยู่บนส่วนหน้าของพาเรโต และกลุ่มคำตอบที่จัดว่าอยู่ห่างจากวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้ ไม่ได้อยู่บนส่วนหน้าของพาเรโต ผลลัพธ์ทำให้ทราบว่าคะแนน ความพึงพอใจเฉลี่ยต่อกลุ่มคำตอบที่อยู่บนส่วนหน้าของพาเรโต มีค่าเฉลี่ยมากกว่ากลุ่มคำตอบที่ไม่ได้อยู่บนส่วนหน้าของ พาเรโต กลุ่มตัวอย่างพึงพอใจกับคำตอบที่อยู่บนส่วนหน้า พาเรโต หรือกล่าวว่ากลุ่มตัวอย่างชื่นชอบเชื่อมกลัดที่มีสัดส่วน เข้าใกล้ 2.5 และมีน้ำหนักน้อยมากกว่า

นอกจากนี้กระบวนการพัฒนาระบบ MOOGD ของงานวิจัย นี้ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการพัฒนาระบบออกแบบใน ผลิตภัณฑ์อื่น ๆ ได้ต่อไปในอนาคต

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ ได้รับทุนสนับสนุนโครงการวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน ปีงบประมาณ 2561 มหาวิทยาลัยนเรศวร รหัสโครงการ R2561B072 และ ได้รับทุนสนับสนุนการศึกษาในหลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการจัดการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ผู้เขียนขอขอบพระคุณแหล่งทุนดังกล่าว มา ณ โอกาสนี้

8. เอกสารอ้างอิง

- Agarwal, M., & Cagan, J. (1998). A blend of different tastes: the language of coffeemakers. *Environment and Planning B: Planning and Design*, 25(2), 205-226.
- Best, J. W. (1981). *Research in education*. Prentice-Hall.
- Brintrup, A. M., Ramsden, J., & Tiwari, A. (2007). An interactive genetic algorithm-based framework for handling qualitative criteria in design optimization. *Computers in Industry*, 58(3), 279-291.
- Brintrup, A. M., Ramsden, J., Takagi, H., & Tiwari, A. (2008). Ergonomic chair design by fusing qualitative and quantitative criteria using interactive genetic algorithms. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation*, 12(3), 343-354.
- Chuthavipa, W. (2002). *Jewelry design*. The Publisher of Chulalongkorn University.
- Davidson, S. (2017). *Grasshopper Algorithmic Modeling for Rhino*. Grasshopper. <http://www.grasshopper3d.com/>
- Deb, K. (2011). *Multi-objective Optimisation Using Evolutionary Algorithms: An Introduction*. Springer London.
- Dou, R., Zong, C., & Nan, G. (2016). Multi-stage interactive genetic algorithm for collaborative product customization. *Knowledge-Based Systems*, 92, 43-54.
- Hu, Z. H., Ding, Y. S., Zhang, W. B., & Yan, Q. (2008). An interactive co-evolutionary CAD system for garment pattern design. *Computer-Aided Design*, 40(12), 1094-1104.
- Insuya, J., Laokafang, P., Jitkwang, P., Chomphooja, S. & Ratanamano, S. (2016). *Adolescents and middle-aged*. Human cmu. <http://human.cmu.ac.th/home/hc/ebook/006305/07-teenage.pdf>
- Jongyoklang, S. (2012). *Elements of jewelry design*. Blogger. http://blackevil408.blogspot.com/p/blog-page_6677.html
- Kang, B. (2014). *Covetable Convertible - Art Deco Jewels*. <http://revivaljewels.com/blog/2014/7/8/how-to-get-additional-wardrobe-mileage-from-your-jewellery>

- Kielarova, S. W., & Pradujphonphet, P. (2013). Development of generative jewelry design system using shape grammar method: a case study of jewelry ring design. *Naresuan University Journal: Science and Technology*, 8(2), 21-34.
- Kielarova, S. W., & Sansri, S. (2016, December). Shape optimization in product design using interactive genetic algorithm integrated with multi-objective optimization. In *International Workshop on Multi-disciplinary Trends in Artificial Intelligence* (pp. 76-86). Springer.
- Likert, R. (1961). *New patterns of management*. McGraw-Hill.
- Lipson, H., & Shpitalni, M. (2000). Conceptual design and analysis by sketching. *AI EDAM*, 14(5), 391-401.
- Lu, S., Mok, P. Y., & Jin, X. (2014). From design methodology to evolutionary design: An interactive creation of marble-like textile patterns. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*, 32, 124-135.
- Martinez, S. (2016). *Dress Clips*. Lang Antiques http://university.langantiques.com/index.php/Dress_Clips
- McNeel, R. (2017). *Rhinoceros*. Rhinoceros. <https://www.rhino3d.com/>
- Mouillefarine, L., & Posseme, E. (2009). *Art deco jewelry: modernist masterworks and their makers*. Thames & Hudson.
- Nayuthaya, P. (2008). *Design and analysis of experiments*. Top Publishing.
- Sansri, S. (2018). *Development of generative jewelry design system with interactive evolutionary multi-objective optimization for art deco double clip brooch design* (Unpublished master's thesis). Naresuan University.
- Sansri, S., & Kielarova, S. W. (2018). Multi-objective shape optimization in generative design: art deco double clip brooch jewelry design. In *IT Convergence and Security 2017* (pp. 248-255). Springer, Singapore.
- Séquin, C. H. (1997). Virtual prototyping of scherk-collins saddle rings. *Leonardo*, 30(2), 89-96.
- Shibuya, M., Kita, H., & Kobayashi, S. (1999). Integration of multi-objective and interactive genetic algorithms and its application to animation design. *1999 IEEE International Conference on Systems, Man, and Cybernetics* (pp. 646-651). IEEE.
- Singh, V., & Gu, N. (2012). Towards an integrated generative design framework. *Design studies*, 33(2), 185-207.
- Sinjaru, T. (2012). *Research and statistical analysis with SPSS and AMOS*. Business R & D Ordinary Partnership.
- Soddu, C. (1994). *GENERATIVE ART*. http://www.soddu.it/design/GA_soddu_e.htm
- Sun, X., Gong, D., & Zhang, W. (2012). Interactive genetic algorithms with large population and semi-supervised learning. *Applied Soft Computing*, 12(9), 3004-3013.
- Takagi, H. (2001). Interactive evolutionary computation: Fusion of the capabilities of EC optimization and human evaluation. *IEEE*, 89(9), 1275-1296.
- Takagi, H. (2001). Interactive evolutionary computation: Fusion of the capabilities of EC optimization and human evaluation. *IEEE*, 89(9), 1275-1296.
- Tang, C. Y., Fung, K. Y., Lee, E. W., Ho, G. T., Siu, K. W., & Mou, W. L. (2013). Product form design using customer perception evaluation by a combined superellipse fitting and ANN approach. *Advanced Engineering Informatics*, 27(3), 386-394.
- Vierlinger, R. (2017). *Octopus*. Octopus. <http://www.food4rhino.com/app/octopus>
- Yamane, T. (1970). *Statistics : An Introductory Analysis*. Harper & Row.
- Yotonyos, M. (2016). *Questionnaire for research*. KM_Research. www.bcn.ac.th/web/2007/KM_Research/การสร้างแบบสอบถามเพื่อการวิจัย.pdf
- Zhang, L., Zhang, L., & Wang, Y. (2016). Shape optimization of free-form buildings based on solar radiation gain and space efficiency using a multi-objective genetic algorithm in the severe cold zones of China. *Solar Energy*, 132, 38-50.
- Zitzler, E., & Thiele, L. (1999). Multiobjective evolutionary algorithms: a comparative case study and the strength Pareto approach. *IEEE transactions on Evolutionary Computation*, 3(4), 257-271.
- Zitzler, E., Laumanns, M., & Thiele, L. (2001). SPEA2: Improving the strength Pareto evolutionary algorithm. *TIK-report*, 103.

9. ประวัติผู้เขียนบทความ



นางสาวสุนิษา แสนศรี จบการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการ มหาวิทยาลัยนครสวรรค์ ผลงานวิจัยที่ผ่านมาจะเน้นด้าน ระบบออกแบบอัตโนมัติ (Generative Design) ปัจจุบันดำรงตำแหน่งสังกัดคณะโลจิสติกส์และดิจิทัลซัพพลายเชน มหาวิทยาลัยนครสวรรค์



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมลักษณ์ วรรณฤมล
ก็เยลาโรว่า สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาห-
การ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ สำเร็จการศึกษา
ระดับปริญญาโท สาขา Manufacturing

Systems Engineering และระดับปริญญาเอก Doctor of Engineering
สาขา Design and Manufacturing Engineering จาก สถาบัน Asian
Institute of Technology หลังจากนั้น ได้รับทุนสนับสนุนเพื่อทำ Post
doctoral research ใน สาขา Jewelry Engineering ณ สถาบัน
Politecnico di Torino ประเทศอิตาลี เริ่มรับราชการเป็นอาจารย์ประจำ
สังกัดภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย
นเรศวร ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2540 โดยมีผลงานวิจัยทางด้าน การพัฒนาระบบ
ออกแบบอัตโนมัติ (Generative Design), การออกแบบผลิตภัณฑ์
(Product Design), การออกแบบเชิงพารามेटริก (Parametric Design)
และ Artificial Intelligence for Product Design

ความต้านทานคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตผสมซิลิกาฟุ้ง

Chloride Resistance and Compressive Strength of Concrete with Silica Fume

ทวีชัย สรรณวนิช*, อัญชนา กิจจานนท์

Taweetchai Sumranwanich*, Aunchana Kijjanon

หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษาบูรพา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา จังหวัดชลบุรี ประเทศไทย

Burapha Construction and Maintenance Technology Research Unit, Faculty of Engineering, Burapha University, Chonburi, Thailand

*Corresponding author e-mail: twc@buu.ac.th

(Received: 29 July 2020, Revised: 1 February 2021, Accepted: 10 February 2021)

บทคัดย่อ

บทความนี้มุ่งศึกษาความต้านทานคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีตผสมซิลิกาฟุ้ง โดยใช้ซิลิกาฟุ้งแทนที่วัสดุประสานที่ร้อยละ 5, 7.5, 10 และ 15 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.50 โดยทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 7, 28 และ 91 วัน ทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมดที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน จากนั้นเผชิญคลอไรด์ที่ความเข้มข้นคลอไรด์ 5.0% เป็นระยะเวลา 28, 56 และ 91 วัน และทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 7, 14, 28, 56 และ 91 วัน และจากผลการทดลองพบว่า การใช้ซิลิกาฟุ้งแทนที่วัสดุประสานในคอนกรีตทำให้ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตดีขึ้นและกำลังอัดของคอนกรีตสูงขึ้น โดยการใช้ซิลิกาฟุ้งแทนที่ร้อยละ 15 ทำให้คอนกรีตมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดดีที่สุด เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตพบว่าปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ลดลงเมื่อกำลังอัดเพิ่มขึ้น จากสมการความสัมพันธ์สามารถหาค่าปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ได้จากค่ากำลังอัดคอนกรีต

คำสำคัญ: คอนกรีต, ซิลิกาฟุ้ง, ความต้านทานคลอไรด์, สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์, กำลังอัด

Abstract

This paper aims to study the chloride penetration resistance and compressive strength of concrete containing silica fume. The binder content in concrete was replaced by silica fume at 5%, 7.5%, 10% and 15% by weight of binder. The water to binder ratios were used at 0.40 and 0.50. The rapid chloride penetrations of concrete were tested at 7, 28 and 91 days of water curing. Chloride penetration by bulk diffusion were tested at 28 days of water curing and immersed in 5.0% chloride concentration for 28, 56 and 91 days. The compressive strengths of concrete were tested at 7, 14, 28, 56 and 91 days of water curing. From the experimental results, it was found that the use of silica fume to replace binder content in concrete resulted in the increase of the chloride penetration resistance and compressive strength of concrete. Concrete with 15% silica fume replacement had the highest chloride penetration resistance and compressive strength. Considering the relationship between compressive strength and charge passed content and chloride diffusion coefficient of

Naresuan University Engineering Journal, Vol.16, No.1, Jan - June 2021, pp.107-118

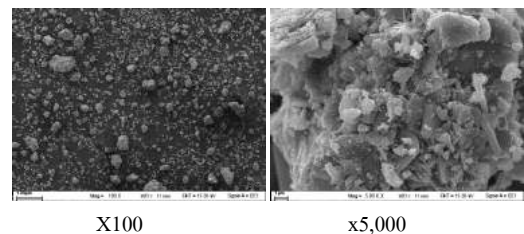
concrete, it was noted that the charge passed content and the chloride diffusion coefficient decreased with increasing compressive strength. Based on the relationship equations, the charged pass content and the chloride diffusion coefficient can be determined from the compressive strength of concrete.

Keywords: Concrete, Silica Fume, Chloride Resistance, Chloride Diffusion Coefficient, Compressive Strength

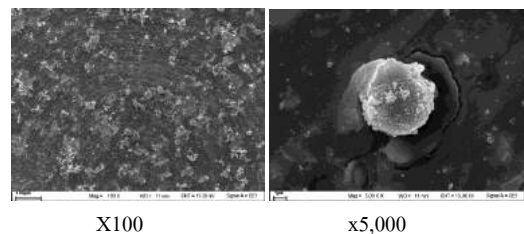
1. บทนำ

ปัญหาการเกิดสนิมของเหล็กเสริมเป็นปัญหาที่พบมากในโครงสร้างคอนกรีตเสริมเหล็ก โดยเฉพาะโครงสร้างที่ตั้งอยู่ในสิ่งแวดล้อมทะเลหรือพื้นที่น้ำกร่อย เพราะมีโอกาสสัมผัสกับความชื้น ไอเกลือ และน้ำทะเลโดยตรง ซึ่งสภาวะดังกล่าวมีผลต่อการทำลาย และลดอายุการใช้งานของโครงสร้างคอนกรีตได้อย่างรุนแรง (Sumranwanich & Tangtermsirikul, 2018; Tangtermsirikul, 2003) ด้วยเหตุนี้ปัญหาด้านความคงทนของคอนกรีตจึงได้รับการปรับปรุงโดยใช้วัสดุปอซโซลาน เช่น ซิลิกาฟุ้ง (Silica fume) เข้ามาแทนที่บางส่วนของปูนซีเมนต์ เนื่องจากซิลิกาฟุ้งมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าอนุภาคของปูนซีเมนต์ ดังนั้นอนุภาคของซิลิกาฟุ้งจึงสามารถเข้าไปเติมเต็มโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นเพิ่มมากขึ้น ความทึบแน่นของคอนกรีตสามารถช่วยป้องกันการการแทรกซึมสารเคมีภายในเนื้อคอนกรีตได้อย่างมาก นอกจากนี้ ซิลิกาฟุ้งมีปริมาณ SiO_2 เป็นองค์ประกอบมากกว่าร้อยละ 90 จึงสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกได้อย่างมาก เพิ่มปริมาณแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรตได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Siddique, 2011; Barbhuiya & Qureshi, 2016) มีงานวิจัยที่ได้ศึกษาการใช้ซิลิกาฟุ้งแทนที่บางส่วนของคุณสมบัติความคงทนของคอนกรีตให้ดีขึ้น โดย Khan and Siddique (2011) รายงานว่า ซิลิกาฟุ้งช่วยเพิ่มประสิทธิภาพด้านต่าง ๆ ของคอนกรีตให้ดีขึ้น เช่น ลดการซึมผ่านของน้ำ ลดโครงสร้างโพรงช่องว่างของคอนกรีต เพิ่มความต้านทานการเกิดสนิม เพิ่มความต้านทานซัลเฟต รวมถึงเพิ่มความต้านทานการเกิดปฏิกิริยาระหว่างด่างกับมวลรวมของคอนกรีตด้วย และงานวิจัยของ Song et al. (2007) พบว่า การใช้ซิลิกาฟุ้งสามารถลดการซึมผ่านน้ำได้ดี เนื่องจากซิลิกาฟุ้งสามารถลดโพรงช่องว่างในคอนกรีตได้ และเมื่อพิจารณาคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตจากงานวิจัยของ Bagheri et al. (2012) พบว่า

กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ซิลิกาฟุ้งในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น ในขณะที่ความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์ก็มากขึ้นด้วย แต่จากการศึกษาในอดีตยังไม่มีการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตผสมซิลิกาฟุ้ง ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์มีความสำคัญยิ่งในการออกแบบส่วนผสมคอนกรีตให้มีความคงทนระยะยาว



รูปที่ 1 ลักษณะอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จากการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)



รูปที่ 2 ลักษณะอนุภาคของซิลิกาฟุ้ง จากการถ่ายภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM)

ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งศึกษาความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง การแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมดและกำลังอัดของคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟุ้ง พร้อมทั้งมุ่งหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตด้วย เพื่อพัฒนาสมการอย่างง่ายสำหรับใช้ทำนายสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์และการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่งจากกำลังอัดของคอนกรีต

2. วิธีการศึกษา

2.1 วัสดุและส่วนผสม

ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (C) ซึ่งมีลักษณะอนุภาคดังแสดงในรูปที่ 1 เป็นวัสดุประสานหลัก และใช้ซิลิกาฟูม (SF) แทนที่วัสดุประสานบางส่วน โดยมีลักษณะอนุภาคดังแสดงในรูปที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสานแสดงไว้ในตารางที่ 1 สำหรับส่วนผสมคอนกรีตที่ใช้ในการศึกษาแสดงไว้ในตารางที่ 2 ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานเท่ากับ 0.40 และ 0.50 ซึ่งใช้มากในส่วนผสมคอนกรีตที่ต้องการความคงทน ใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานบางส่วนที่ร้อยละ 5, 7.5, 10 และ 15 โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน ใช้หินที่อิมมัวผิวแห้ง (R) ที่มีขนาดใหญ่กว่า 4.75 มม และมีขนาดโตสุด 19 มม ใช้ทรายบดที่อิมมัวผิวแห้ง (S)

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสาน

องค์ประกอบทางเคมี (%)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (C)	ซิลิกาฟูม (SF)
SiO ₂	21.30	92.00
Al ₂ O ₃	4.96	0.70
Fe ₂ O ₃	3.10	1.20
CaO	66.61	0.20
MgO	1.81	0.20
SO ₃	2.72	-
Na ₂ O	0.20	-
K ₂ O	0.5	-
LOI	0.74	-
สมบัติทางกายภาพ		
ความถ่วงจำเพาะ	3.13	2.20
ความละเอียดโดยวิธีของเบลน (ชม ² /กรัม)	3,028	150,000

ตารางที่ 2 ส่วนผสมคอนกรีต

Mix id	Mix proportions (kg/m ³)					
	C	SF	SP	W	S	R
C40	421	-	-	144	799	1,025
C40-SF5	396	21	1.3	142	799	1,025
C40-SF7.5	384	31	1.2	141	799	1,025
C40-SF10	372	41	1.2	140	799	1,025
C40-SF15	348	61	2.0	138	799	1,025
C50	369	-	-	161	799	1,025
C50-SF5	348	18	-	159	799	1,025
C50-SF7.5	338	27	-	169	799	1,025
C50-SF10	327	36	-	158	799	1,025
C50-SF15	307	54	-	156	799	1,025

หมายเหตุ: “C40” หมายถึง คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และ w/b 0.40, “C40-SF(X)” หมายถึง คอนกรีตที่ใช้ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 w/b 0.40 และใช้ซิลิกาฟูมแทนที่วัสดุประสานร้อยละ X, “C” หมายถึง ปูนซีเมนต์, “SF” หมายถึง ซิลิกาฟูม, “SP” หมายถึง Superplasticizer, “S” หมายถึง ทราย, “R” หมายถึง หิน, “W” หมายถึง น้ำ



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

รูปที่ 3 ขั้นตอนการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบเร่ง

ตารางที่ 3 ความสามารถในการแทรกซึมคลอไรด์ไอออนของคอนกรีต

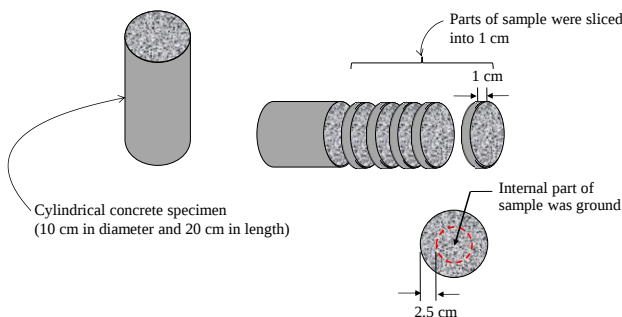
Charge passed (Coulombs)	Chloride ion penetrability
> 4,000	High
2,000 – 4,000	Moderate
1,000 – 2,000	Low
100 – 2,000	Very low
< 100	Negligible

ที่มีขนาดเล็กกว่า 4.75 มม แต่ใหญ่กว่า 0.075 มม

2.2 การทดสอบ

2.2.1 การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรง

การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงทำตามมาตรฐาน ASTM C1202 แสดงดังรูปที่ 3 โดยการหาค่าประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านโพรงช่องว่างที่อัดตัวด้วยน้ำภายในคอนกรีต โดยหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม สูง 20 ซม จำนวน 1 ก้อนต่อ 1 อายุทดสอบ โดย 1 ก้อนจะแบ่งทดสอบบริเวณส่วนบน ส่วนกลางและส่วนล่างของตัวอย่างทดสอบที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 7, 28 และ 91 วัน โดยภายหลังครบกำหนดระยะเวลาบ่มน้ำ นำตัวอย่างมาตัดให้มีความหนา 5 ซม



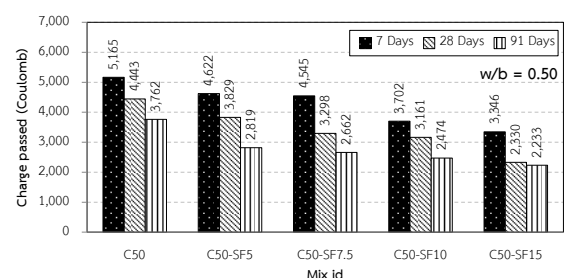
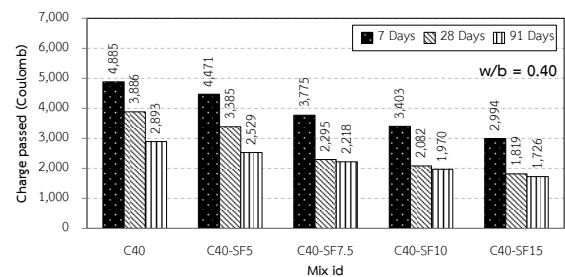
รูปที่ 4 การเตรียมผงตัวอย่างจากการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรงทั้งหมด

3 ขึ้นดังรูปที่ 3(a) และทำการทดสอบ โดยเริ่มจากประกอบตัวอย่างเข้าเซลล์ทดสอบดังรูปที่ 3(b) แล้วเติมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 0.3M ที่ขั้วบวก (Anode) และสารละลายโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความเข้มข้น 3% ที่ขั้วลบ (Cathode) ดังรูปที่ 3(c) จ่ายค่าศักย์ไฟฟ้าเท่ากับ 60 ± 0.01 Volts ดังรูปที่ 3(d) ทดสอบต่อเนื่องเป็นเวลา 6 ชั่วโมง ทำการเก็บข้อมูลกระแสไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างแล้วคำนวณหาค่าประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านในหน่วยคูลอมป์

ดังรูปที่ 3(e) และนำค่าที่ได้จากทั้ง 3 ก้อนมาหาค่าเฉลี่ย จากค่าที่ได้สามารถพิจารณาเกณฑ์คุณภาพตามตารางที่ 3

2.2.2 การทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมดของคอนกรีต

ทำการทดสอบการแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมดของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C1556 โดยหาปริมาณคลอไรด์ที่แทรกซึมเข้าไปในแต่ละความลึกในรูปแบบปริมาณคลอไรด์ทั้งหมด (Total chloride) ของคอนกรีต โดยเริ่มจากหล่อตัวอย่างคอนกรีตทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 ซม สูง 20 ซม จำนวน 1 ก้อนต่อ 1 อายุทดสอบ จากนั้นบ่มตัวอย่างในน้ำเป็นเวลา 28 วัน เมื่อครบระยะเวลาบ่มน้ำ นำตัวอย่างเคลือบผิวด้านข้างและด้านล่างด้วยพ็อกซี ยกเว้นด้านบนหนึ่งด้านเพื่อควบคุมให้คลอไรด์แพร่เข้าสู่คอนกรีตในทิศทางเดียว จากนั้นนำตัวอย่างไปเผิชิยสารละลายคลอไรด์ความเข้มข้นคลอไรด์ 5% เป็นระยะเวลา 28, 56 และ 91 วัน เมื่อครบระยะเวลาเผิชิยคลอไรด์ นำตัวอย่างตัดหนาชั้นละ 1 ซม ดังรูปที่ 4 จากนั้นนำตัวอย่างที่ตัดแล้วมาบดเป็นผงเพื่อทดสอบหาปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดตามมาตรฐาน ASTM C1152 ต่อไป



รูปที่ 5 ผลกระทบของระยะเวลาบ่มน้ำต่อการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรง

2.2.3 การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต

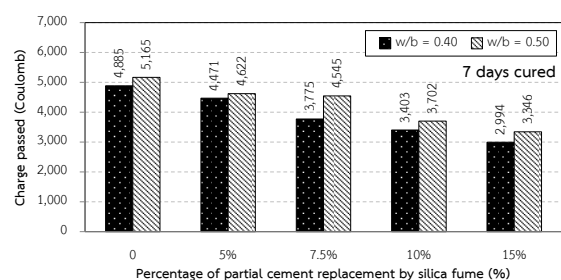
ทำการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตตามมาตรฐาน BS EN 1881-116 โดยใช้ตัวอย่างคอนกรีตทรงลูกบาศก์ขนาด $10 \times 10 \times 10$ ซม.³ และทดสอบที่ระยะเวลารับน้ำ 7, 14, 28, 56 และ 91 วัน ตามลำดับ

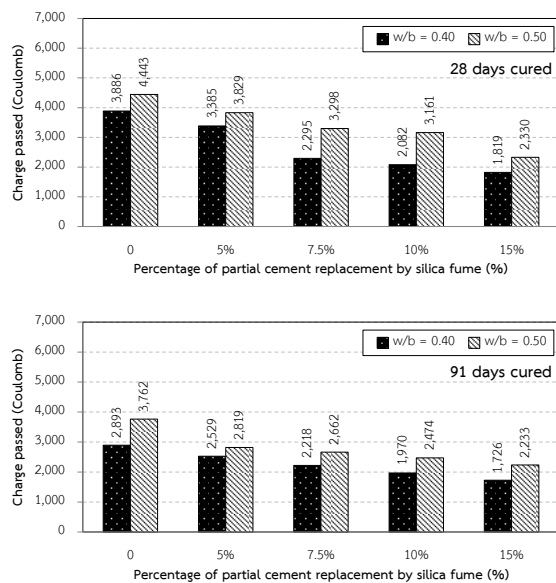
3. ผลการทดลองและอภิปราย

3.1 ปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านคอนกรีต

เมื่อพิจารณาผลกระทบของระยะเวลารับน้ำดังรูปที่ 5 พบว่า คอนกรีตมีค่าปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตต่ำลงเมื่อระยะเวลารับน้ำนานขึ้น หรืออาจกล่าวได้ว่าคอนกรีตมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงขึ้นเมื่อมีระยะเวลารับน้ำนานขึ้น โดยมีแนวโน้มลักษณะเดียวกันในทุก ๆ ส่วนผสมคอนกรีต ซึ่งก็พบในงานวิจัยของ Barbhuiya and Qureshi (2016) เช่นกัน เนื่องจากคอนกรีตที่มีระยะเวลารับน้ำที่นานขึ้น การเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิกก็เกิดเพิ่มมากขึ้นทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำเพิ่มมากขึ้นด้วย เมื่อคอนกรีตมีความทึบน้ำส่งผลให้ปริมาณไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านโพรงช่องว่างภายในคอนกรีตได้ยากขึ้น ความต้านทานคลอไรด์ของคอนกรีตจึงสูงขึ้นตามไปด้วย หากพิจารณาการลดลงของปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านที่ระยะเวลารับน้ำ 7 วัน กับ 28 วัน พบว่าการลดลงของทุกส่วนผสมคอนกรีตมีค่าใกล้เคียงกัน อาจเนื่องจากผลของการเติมเต็มโพรงช่องว่างในคอนกรีต แต่เมื่อพิจารณาที่ระยะเวลารับน้ำ 28 วัน กับ 91 วัน ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 กลับพบว่า คอนกรีตล้วนและคอนกรีตผสมซิลิกาฟูมร้อยละ 5 มีการลดลงของปริมาณประจุไฟฟ้ามากกว่าคอนกรีตผสมซิลิกาฟูมร้อยละ 7.5, 10 และ 15 อาจเป็นผลมาจากการใช้ซิลิกาฟูมในปริมาณที่มากทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานิกในระยะยาวได้น้อยกว่ารวมทั้งการใช้ซิลิกาฟูมมากทำให้มีปริมาณปูนซีเมนต์น้อยลงด้วย ผลลักษณะดังกล่าวก็สามารถเห็นได้ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 เช่นกัน เมื่อพิจารณาเกณฑ์ความสามารถแทรกซึมคลอไรด์จากปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตตามตารางที่ 3 พบว่าที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 คอนกรีตล้วนและคอนกรีตผสมซิลิกาฟูมร้อยละ 5 ที่ระยะเวลารับน้ำ 7 วัน มีค่าประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตเท่ากับ 4,885 และ 4,471

คูลอมป์ ตามลำดับ ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่มีการแทรกซึมคลอไรด์สูง ในขณะที่คอนกรีตผสมซิลิกาฟูมร้อยละ 7.5, 10 และ 15 มีค่าประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตเท่ากับ 3,775, 3,403 และ 2,994 คูลอมป์ ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในเกณฑ์ที่มีการแทรกซึมคลอไรด์ปานกลาง หากพิจารณาที่ระยะเวลารับน้ำ 28 วัน พบว่า คอนกรีตล้วนและคอนกรีตผสมซิลิกาฟูมร้อยละ 5, 7.5 และ 10 มีการแทรกซึมคลอไรด์อยู่ในเกณฑ์ปานกลาง ขณะที่คอนกรีตผสมซิลิกาฟูมร้อยละ 15 มีการแทรกซึมคลอไรด์อยู่ในเกณฑ์ต่ำ และที่ระยะเวลารับน้ำ 91 วัน คอนกรีตล้วนและคอนกรีตผสมซิลิกาฟูมร้อยละ 5 และ 7.5 ยังคงมีการแทรกซึมคลอไรด์อยู่ในเกณฑ์ปานกลาง ในขณะที่คอนกรีตผสมซิลิกาฟูมร้อยละ 10 และ 15 มีการแทรกซึมคลอไรด์อยู่ในเกณฑ์ต่ำ หากพิจารณาที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 พบว่า ที่ระยะเวลารับน้ำ 7 วัน คอนกรีตล้วนและคอนกรีตผสมซิลิกาฟูมร้อยละ 5 และ 7.5 มีการแทรกซึมคลอไรด์อยู่ในเกณฑ์สูง โดยมีค่าประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ 5,165, 4,622 และ 4,545 คูลอมป์ ตามลำดับ ในขณะที่คอนกรีตผสมซิลิกาฟูมร้อยละ 10 และ 15 มีการแทรกซึมคลอไรด์อยู่ในเกณฑ์ปานกลาง โดยมีค่าประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ 3,702 และ 3,346 คูลอมป์ ตามลำดับ ที่ระยะเวลารับน้ำ 28 วัน พบว่า มีเพียงคอนกรีตล้วนที่มีการแทรกซึมคลอไรด์อยู่ในเกณฑ์สูง ในขณะที่คอนกรีตผสมซิลิกาฟูมทุกร้อยละการแทนที่มีการแทรกซึมคลอไรด์อยู่ในเกณฑ์ปานกลาง และที่ระยะเวลารับน้ำ 91 วัน ทุกส่วนผสมมีการแทรกซึมคลอไรด์อยู่ในเกณฑ์ปานกลาง

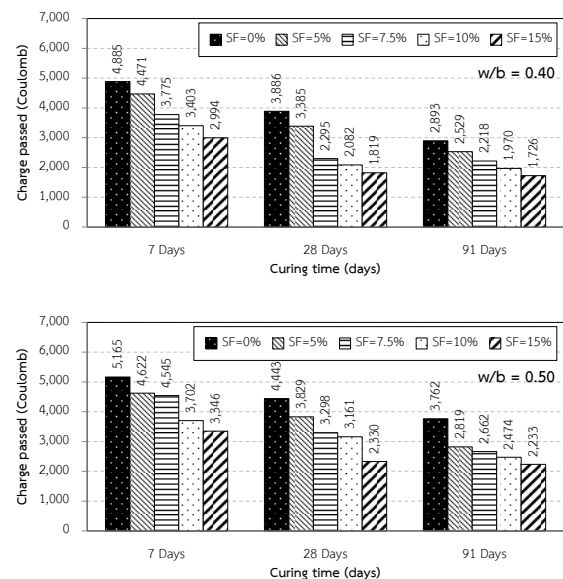




รูปที่ 6 ผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรง

เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานดังรูปที่ 6 พบว่า คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 มีค่าประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ซึ่งก็พบในงานวิจัยของ Barbhuiya and Qureshi (2016) ที่ได้ศึกษาผลกระทบของซิลิกาฟุ่มต่อความแข็งแรงและความคงทนของคอนกรีต โดยคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงกว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำมีการใช้น้ำเป็นส่วนผสมคอนกรีตน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูงส่งผลให้คอนกรีตมีโพรงช่องว่างที่เกิดจากน้ำที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิกน้อยกว่า จึงทำให้คอนกรีตมีความทึบแน่นส่งผลให้การเคลื่อนที่ผ่านของประจุไฟฟ้าเป็นไปได้ยาก หากพิจารณาการลดลงของปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ต่างกันพบว่า ผลต่างของคอนกรีตล้วนและ คอนกรีตผสมซิลิกาฟุ่มร้อยละ 5 และ 15 ที่ระยะเวลาบ่ม 7, 28 และ 91 วัน มีผลต่างที่ใกล้เคียงกัน ในขณะที่คอนกรีตผสมซิลิกาฟุ่มร้อยละ 7.5 และ 10 มีผลต่างที่สูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัดที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน ทั้งนี้อาจเป็นผลมาจากการใช้ w/b ที่ 0.40 ส่งผลให้คอนกรีตมีการปรับปรุงโครงสร้างโพรง

ช่องว่างอย่างมากในช่วงอายุต้น (7 วัน และ 28 วัน) ในขณะที่การใช้ w/b ที่ 0.50 มีการปรับปรุงโครงสร้างโพรงช่องว่างเพียงเล็กน้อยเท่านั้นในช่วงอายุต้น เนื่องจากการใช้ w/b ในปริมาณที่สูงส่งผลให้โครงสร้างโพรงช่องว่างเกิดขึ้นสูงตามไปด้วย ด้วยเหตุนี้การใช้ซิลิกาฟุ่มร้อยละ 7.5 และ 10 จึงปรับปรุงโครงสร้างโพรงช่องว่างในช่วงอายุต้นได้เพียงเล็กน้อยเท่านั้น จากคำอธิบายข้างต้นจึงทำให้ผลต่างของประจุไฟฟ้าของคอนกรีตผสมซิลิกาฟุ่มร้อยละ 7.5 และ 10 ที่ w/b ที่ 0.40 และ 0.50 แตกต่างกันอย่างเห็นได้ชัด แต่เมื่อระยะเวลาบ่มนานขึ้น (28 วัน และ 91 วัน) พบว่า ผลต่างมีค่าน้อยลง นั้นแสดงให้เห็นว่าคอนกรีตผสมซิลิกาฟุ่มร้อยละ 7.5 และ 10 ที่ w/b ที่ 0.50 สามารถปรับปรุงโครงสร้างโพรงช่องว่างได้อย่างมากเมื่อระยะเวลาบ่มนานขึ้น



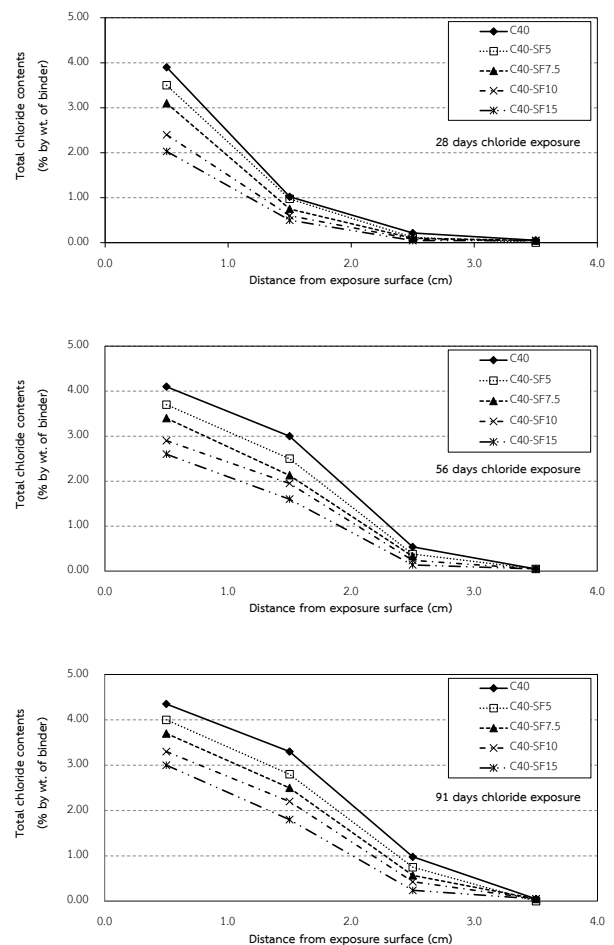
รูปที่ 7 ผลกระทบของร้อยละการแทนที่ของซิลิกาฟุ่มต่อการแทรกซึมคลอไรด์แบบแรง

รูปที่ 7 แสดงผลกระทบของร้อยละการแทนที่ของซิลิกาฟุ่มจากรูปพบว่า ทั้งอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 คอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ่มมีค่าประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตล้วนทุกระยะเวลาบ่มน้ำ ซึ่งผลเช่นนี้พบในงานวิจัยของ Barbhuiya and Qureshi (2016), Juan and Lucio (2012) และ Cabrera and Claisse (1990) โดยคอนกรีตที่ผสมซิลิกาฟุ่มมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์

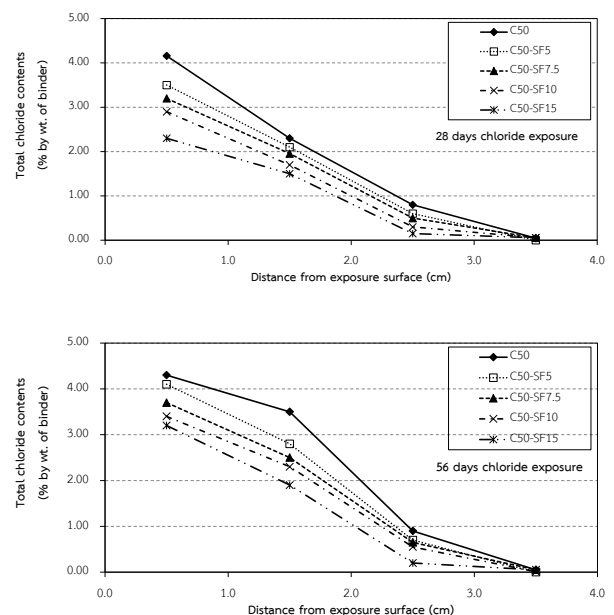
สูงกว่าคอนกรีตล้วน เมื่อพิจารณาร้อยละการแทนที่ของปูนซีเมนต์ด้วยซิลิกาฟุ่ม พบว่า คอนกรีตมีค่าประจุไฟฟ้าต่ำลง เมื่อเพิ่มร้อยละการแทนที่ของซิลิกาฟุ่ม ซึ่งจากรูปจะเห็นว่า คอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ่มร้อยละ 15 มีค่าประจุไฟฟ้าต่ำที่สุด หรือมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงที่สุด เนื่องจากซิลิกาฟุ่มสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับ Ca(OH)_2 ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์และก่อให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) เพิ่มขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของ CSH สามารถช่วยเติมเต็มโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตส่งผลให้คอนกรีตมีความแน่นและทึบมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้อนุภาคของซิลิกาฟุ่มมีขนาดเล็กสามารถช่วยเติมเต็มโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบน้ำเพิ่มมากขึ้นด้วย ด้วยเหตุนี้ประจุไฟฟ้าจึงเคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตได้ยาก (Bagheri et al., 2012; Soutsos, 2010; Gonen & Yazicioglu, 2007; Gjrov, 1993)

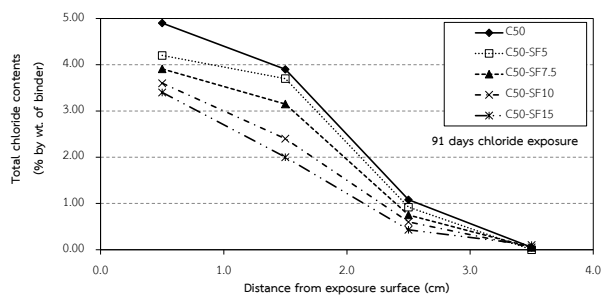
3.2 การแทรกซึมคลอไรด์แบบแพร่ทั้งหมดของคอนกรีต

รูปที่ 8 และ 9 แสดงการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมซิลิกาฟุ่มที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 และใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่วัสดุประสานร้อยละ 5, 7.5, 10 และ 15 ตามลำดับ จากรูปพบว่า การแทรกซึมคลอไรด์ทั้งหมดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาเผชิญคลอไรด์นานขึ้น และเมื่อพิจารณาผลกระทบของร้อยละการแทนที่วัสดุประสานด้วยซิลิกาฟุ่มพบว่า ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดลดลงเมื่อร้อยละการแทนที่วัสดุประสานด้วยซิลิกาฟุ่มเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองของ Cabrera and Claisse (1990) เนื่องจากซิลิกาฟุ่มสามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับ Ca(OH)_2 ที่เกิดจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์และก่อให้เกิดแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) เพิ่มขึ้น ซึ่งการเพิ่มขึ้นของ CSH สามารถช่วยเติมเต็มโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตส่งผลให้คอนกรีตมีความแน่นและทึบมากยิ่งขึ้น นอกจากนี้อนุภาคของซิลิกาฟุ่มมีขนาดเล็กสามารถช่วยเติมเต็มโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบน้ำเพิ่มมากขึ้นด้วย (Camarini, 2013; Rao, 2003; Cohen & Klitsikas, 1986)



รูปที่ 8 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมซิลิกาฟุ่มที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40





รูปที่ 9 การแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตผสมซิลิกาฟุ่มที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

เมื่อพิจารณาผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานพบว่า คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 มีการแทรกซึมคลอไรด์ของคอนกรีตต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ซึ่งก็พบในงานวิจัยของ Barbhuiya & Qureshi (2016) ที่ศึกษาผลกระทบของซิลิกาฟุ่มต่อความแข็งแรงและความคงทนของคอนกรีต โดยคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงกว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำมีการใช้น้ำเป็นส่วนผสมคอนกรีตน้อยกว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานสูง ส่งผลให้คอนกรีตมีโพรงช่องว่างที่เกิดจากน้ำที่เหลือจากการทำปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิกน้อยกว่า จึงทำให้คอนกรีตมีความทึบน้ำสูง

จากผลการแทรกซึมปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ได้จากการทดสอบนำมาคำนวณหาสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ (Chloride diffusion coefficient) ของคอนกรีตตามสมการคำตอบของ Fick's 2nd law ดังสมการที่ (1)

$$C(x,t) = (C_s - C_i) \left[1 - \operatorname{erf} \left(\frac{x}{\sqrt{D_{Cl} \times t}} \right) \right] + C_i \quad (1)$$

โดยที่ $C(x,t)$ คือ ปริมาณคลอไรด์ทั้งหมดที่ระยะ x เวลา t ใดๆ (% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน), x คือ ระยะหุ้มเหล็กเสริม (ซม), D_{Cl} คือ สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ในคอนกรีต (ซม²/ปี), t คือ ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ (ปี), C_i คือ ปริมาณคลอไรด์เริ่มต้นในคอนกรีต (% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน), C_s คือ

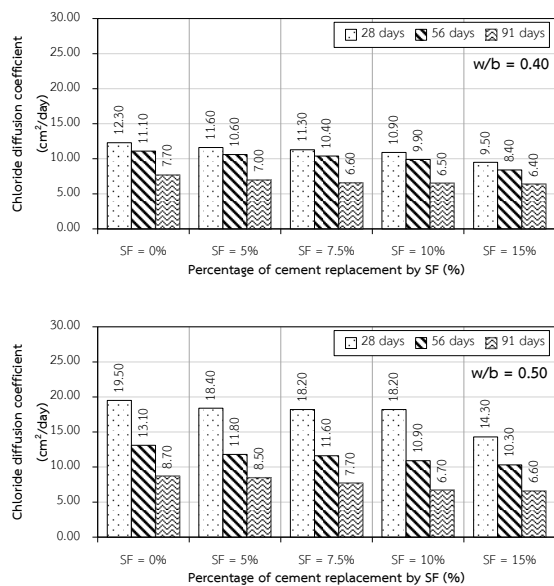
ปริมาณคลอไรด์ที่ผิวหน้าของคอนกรีต (% โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน)

รูปที่ 10 แสดงสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตผสมซิลิกาฟุ่มที่การแทนที่วัสดุประสานด้วยซิลิกาฟุ่มร้อยละ 0, 5, 7.5, 10 และ 15 ที่อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 และ 0.50 จากรูปพบว่า สัมประสิทธิ์การแพร่มีค่าลดลงเมื่อเพิ่มร้อยละการแทนที่วัสดุประสานด้วยซิลิกาฟุ่ม กล่าวคือ คอนกรีตมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงขึ้น ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับผลการทดลองของ Krishnakumar et al. (2013) และ Juan & Lucio (2012) นอกจากนี้ เมื่อพิจารณาร้อยละการแทนที่วัสดุประสานด้วยซิลิกาฟุ่มและระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ที่เท่ากัน คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 มีสัมประสิทธิ์การแพร่ของคลอไรด์ต่ำกว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

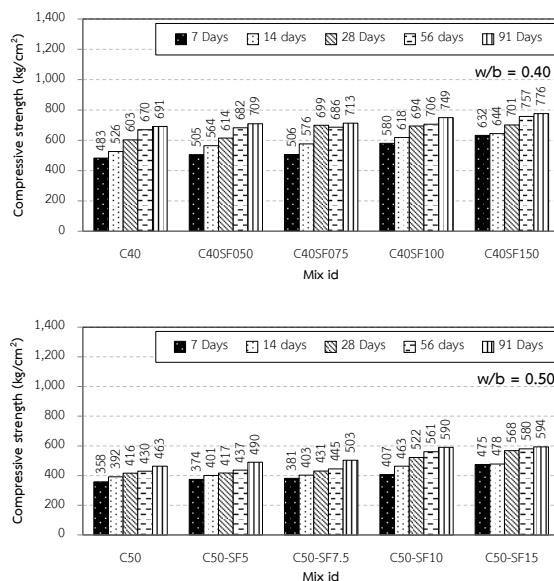
3.3 กำลังอัดของคอนกรีต

เมื่อพิจารณาผลกระทบของระยะเวลาบ่มน้ำของคอนกรีตที่ 7, 14, 28, 56 และ 91 วัน ดังรูปที่ 11 พบว่า คอนกรีตมีกำลังอัดสูงขึ้นเมื่อระยะเวลาบ่มน้ำนานขึ้น โดยมีแนวโน้มลักษณะเดียวกันในทุก ๆ ส่วนผสมคอนกรีต ซึ่งก็พบในงานวิจัยของ Barbhuiya & Qureshi (2016) และ Raveendran et al. (2015) เนื่องจากคอนกรีตที่มีระยะเวลาบ่มน้ำที่นานขึ้นทำให้เกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันและปอซโซลานิกของคอนกรีตเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็นเวลานาน ส่งผลให้เกิดผลผลิตจากปฏิกิริยาไฮเดรชันและปฏิกิริยาปอซโซลานิก เช่น CSH และ CAH เป็นต้น เพิ่มมากขึ้น โดยผลผลิตที่เกิดขึ้นดังกล่าวส่งผลให้คอนกรีตมีกำลังอัดเพิ่มขึ้นด้วย

เมื่อพิจารณาผลกระทบของการใช้ซิลิกาฟุ่มแทนที่ปูนซีเมนต์บางส่วนต่อกำลังอัดของคอนกรีตที่ระยะเวลาการบ่มน้ำ 7, 14, 28, 56 และ 91 วัน พบว่า คอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ่มมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตล้วน และกำลังอัดของคอนกรีตมี



รูปที่ 10 สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต



รูปที่ 11 กำลังอัดของคอนกรีตผสมซิลิกาฟูม

แนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่อใช้ซิลิกาฟูมในปริมาณที่มากขึ้น ซึ่งก็พบในงานวิจัยของ Barbhuiya and Qureshi (2016) และ Raveendran et al. (2015) เช่นกัน โดยการใช้ซิลิกาฟูมร้อยละ 15 มีค่ากำลังอัดสูงที่สุดเมื่อเทียบกับการใช้ซิลิกาฟูมแทนที่ในร้อยละอื่น ๆ เนื่องจากซิลิกาฟูมเป็นวัสดุปอซโซลานที่สามารถทำปฏิกิริยาปอซโซลานิกกับ Ca(OH)_2 เกิดผลผลิต เช่น CSH เป็นต้น ซึ่งผลผลิตดังกล่าวส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีต

เพิ่มขึ้น นอกจากนี้อนุภาคขนาดเล็กของซิลิกาฟูมสามารถเติมเต็มโพรงช่องว่างภายในเนื้อคอนกรีตส่งผลให้คอนกรีตมีความทึบน้ำเพิ่มขึ้นด้วย

เมื่อผลกระทบของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน พบว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 มีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Barbhuiya & Qureshi (2016) เนื่องจากคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่ำมีปริมาณน้ำอิสระที่น้อยกว่า ทำให้เกิดความพรุนภายในเนื้อคอนกรีตน้อยลง ส่งผลให้คอนกรีตมีทึบน้ำสูงเมื่อเทียบกับคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่สูงกว่า

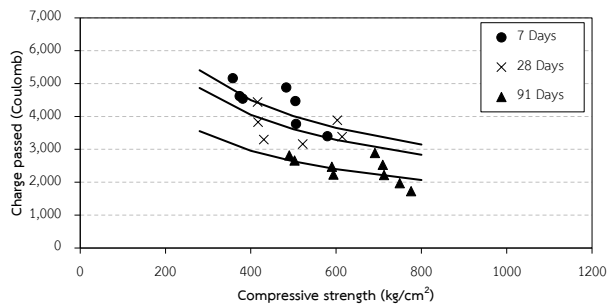
3.4 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต

โดยทั่วไปแล้วโครงสร้างโพรงช่องว่างของคอนกรีตส่งผลต่อคุณสมบัติทางกลและความคงทนของคอนกรีต จากผลการทดลองพบว่า การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดมีความสัมพันธ์กับการลดลงของค่าประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านตัวอย่างคอนกรีตและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต ซึ่งในการศึกษานี้ได้นำผลมาหาความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตได้ดังแสดงในรูปที่ 12 และ 13 ตามลำดับ โดยใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอย (Regression analysis) ซึ่งความสัมพันธ์ที่ได้เป็นไปในรูปแบบของ Exponential โดยสมการความสัมพันธ์อย่างง่ายระหว่างกำลังอัดและปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตที่ระยะเวลาบ่มน้ำ 7, 28 และ 91 วัน ได้แสดงไว้ในสมการที่ (2) ถึง (4) โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.91, 0.77 และ 0.87 ตามลำดับ เมื่อทำการรวมสมการที่ (2) ถึง (4) จะได้สมการที่ (5) ซึ่งมีค่า R^2 เท่ากับ 0.75

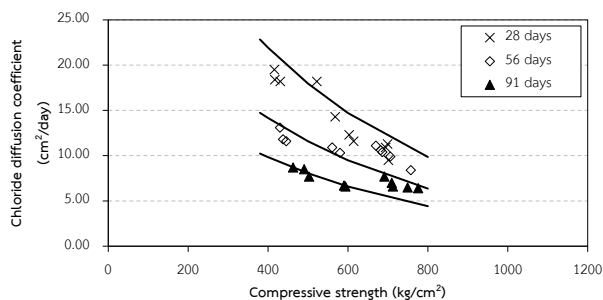
สำหรับ ระยะเวลาบ่มน้ำ 7 วัน;

$$\text{RCPT} = 100,701.9C_s^{(-0.516)} \quad \text{มีค่า } R^2 = 0.91 \quad (2)$$

สำหรับ ระยะเวลาบ่มน้ำ 28 วัน;



รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านคอนกรีตผสมซีลีก้าฟุ่ม



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตผสมซีลีก้าฟุ่ม

$$RCPT = 86,163.0C_s^{(-0.516)} \quad \text{มีค่า } R^2 = 0.77 \quad (3)$$

สำหรับ ระยะเวลาบ่มน้ำ 91 วัน;

$$RCPT = 63,617.2C_s^{(-0.516)} \quad \text{มีค่า } R^2 = 0.87 \quad (4)$$

สำหรับระยะเวลาบ่มน้ำ ta ใดๆ;

$$RCPT = (102,556e^{(-0.005 \times ta)})C_s^{(-0.516)} \quad \text{มีค่า } R^2 = 0.75 \quad (5)$$

โดยที่ RCPT คือ ปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านคอนกรีต (Coulombs)

C_s คือ กำลังอัดของคอนกรีต (kg/cm^2)

ta คือ ระยะเวลาบ่มน้ำ (days)

สำหรับสมการความสัมพันธ์อย่างง่ายระหว่างกำลังอัดและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตที่ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28, 56 และ 91 วัน ได้แสดงไว้ในสมการที่ (6) ถึง (8) ตามลำดับ โดยมีค่า R^2 เท่ากับ 0.95, 0.79 และ 0.96 ตามลำดับ เมื่อทำการรวมสมการที่ (6) ถึง (8) จะได้สมการที่ (9) ซึ่งมีค่า R^2 เท่ากับ 0.78

สำหรับ ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 28 วัน;

$$D_a = 48.834e^{-0.002 \times C_s} \quad \text{มีค่า } R^2 = 0.95 \quad (6)$$

สำหรับ ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 56 วัน;

$$D_a = 31.511e^{-0.002 \times C_s} \quad \text{มีค่า } R^2 = 0.79 \quad (7)$$

สำหรับ ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ 91 วัน;

$$D_a = 21.885e^{-0.002 \times C_s} \quad \text{มีค่า } R^2 = 0.96 \quad (8)$$

สำหรับ ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ t ใดๆ;

$$D_a = (448.93 \times t^{-0.665})e^{(-0.002 \times C_s)} \quad \text{มีค่า } R^2 = 0.78 \quad (9)$$

โดยที่ D_a คือ สัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีต (cm^2/day)

C_s คือ กำลังอัดของคอนกรีต (kg/cm^2)

t คือ ระยะเวลาเผชิญคลอไรด์ (days)

4. สรุปผล

จากการศึกษาผลกระทบของซีลีก้าฟุ่มต่อความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์และกำลังอัดของคอนกรีต สามารถสรุปผลได้ดังนี้

1. คอนกรีตที่ใช้ซีลีก้าฟุ่มมีความต้านทานการแทรกซึมคลอไรด์สูงกว่าคอนกรีตล้วน และความต้านทานเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่ม

ร้อยละการแทนที่ของซิลิกาฟุ้ง โดยคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ้งร้อยละ 15 มีความต้านทานคลอไรด์สูงที่สุด

2. คอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ้งมีกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตล้วนและกำลังอัดมีค่าเพิ่มมากขึ้นเมื่อเพิ่มร้อยละการแทนที่ที่มากขึ้น โดยคอนกรีตที่ใช้ซิลิกาฟุ้งร้อยละ 15 มีกำลังอัดสูงที่สุด

3. คอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.40 มีความต้านทานคลอไรด์และกำลังอัดสูงกว่าคอนกรีตที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.50

4. การเพิ่มขึ้นของกำลังอัดของคอนกรีตทำให้ปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตลดลง และจากความสัมพันธ์ดังกล่าว สามารถสร้างสมการความสัมพันธ์ระหว่างกำลังอัดกับปริมาณประจุไฟฟ้าเคลื่อนที่ผ่านและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์ของคอนกรีตได้ เพื่อใช้ในการทำนายค่าปริมาณประจุไฟฟ้าที่เคลื่อนที่ผ่านและสัมประสิทธิ์การแพร่คลอไรด์จากค่ากำลังอัดของคอนกรีตได้

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนทุนอุดหนุนการวิจัยมหาวิทยาลัยบูรพา สัญญาเลขที่ 18/2560 และการสนับสนุนจากหน่วยวิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและบำรุงรักษาบูรพา (BCONTEC) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

6. เอกสารอ้างอิง

ASTM C1202. (2000). *Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration*. American Society for Testing and Materials.

ASTM C1556. (2000). *Standard Test Method for Determining the Apparent Chloride Diffusion Coefficient of Cementitious Mixtures by Bulk Diffusion*. American Society for Testing and Materials.

ASTM C1152. (2000). *Standard Test Method for Acid-Soluble Chloride in Mortar and Concrete*. American Society for Testing and Materials.

Bagheri, A. R., Zanganeh, H., & Moalemi, M. M. (2012). Mechanical and durability properties of ternary concretes containing silica fume and low reactivity blast furnace slag. *Cement and Concrete Composites*, 34, 663–670.

Barbhuiya, S., & Qureshi, M. (2016). Effect of silica fume on the strength and durability properties of concrete. 2016, 117-120.

Cabrera, J. G., & Claisse, P. A. (1990). Measurement of chloride penetration into silica fume concrete. *Cement and Concrete Composites*, 12, 157-161.

Camarini, G., Bardella, P. S., & Barbosa, D. C. (2013). Chloride penetration depth in silica fume concrete. *LACSIT International Journal of Engineering and Technology*, 5, 717 – 720.

Cohen, M. D., & Klitsikas, M. (1986). Mechanisms of hydration and strength developments in Portland cement composites containing silica fume particles. *Indian Concrete Journal*, 60, 296-300.

Gjrović, O. E. (1993). Durability of concrete containing condensed silica fume. *ACI Special Publications SP*, 79, 695-708.

Gonen, T., & Yazicioglu, S. (2007). The influence of mineral admixtures on the short and long-term performance of concrete. *Build. Environ*, 42, 3080-3085.

Juan, L. M., & Lucio, G. L. Y. (2012). Effect of silica fume addition on the chloride-related transport properties of high-performance concrete. *Dyna*, 171, 105-110.

Khan, M. I., & Siddique, R. (2011). Utilization of silica fume in concrete: Review of durability properties. *Resources, Conservation and Recycling*, 57, 30-35.

Krishnakumar, S., Asif, A. V., Akhil, R. R., & Jayasree, J. T. (2013). Effect of silica fume on the resistance to chloride ion penetration in high performance concrete. *American Journal of Engineering Research (AJER)*, 2, 01-05.

Method for determination of compressive strength of concrete cubes, British Standards (BS), BS 1881-116.

Rao, G. A. (2003). Investigations on the performance of silica fume-incorporated cement pastes and mortars. *Cement and Concrete Research*, 33, 1765-1770.

Raveendran, K. G., Rameshkumar, V., Saravanan, M., Kanmani, P., & Sudhakar, S. (2015). Performance of silica fume on strength and durability of concrete. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 4, 10162-10166.

- Siddique, R. (2011). Utilization of silica fume in concrete: Review of hardened properties. *Resource, Conservation and Recycling*, 55, 923-932.
- Song, H. W., Jang, J. W., Saraswathy, V., & Byun, K. J. (2007). An estimation of the diffusivity of silica fume concrete. *Building and Environment*, 42, 1358-1367.
- Soutsos, M. (2010). *Concrete durability*. Thomas Telford Limited.
- Sumranwanich, T., & Tangtermsirikul, S. (2018). *Concrete structure deterioration*. Charansanitwong Printing.
- Tangtermsirikul, S. (2003). *Durability and mix design of concrete*. Thammasat University, Rangsit Campus.

7. ประวัติผู้เขียนบทความ

ทวีชัย สำราญวานิช



ตำแหน่ง: รองศาสตราจารย์

สังกัด: หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและ
บำรุงรักษาบูรพา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
จังหวัดชลบุรี ประเทศไทย

อัญชนา กิจจานนท์



ตำแหน่ง: นิสิตปริญญาเอก

สังกัด: หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการก่อสร้างและ
บำรุงรักษาบูรพา ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
จังหวัดชลบุรี ประเทศไทย

การพัฒนาประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตยางแท่ง STR 20 โดยใช้การออกแบบการทดลอง
The Efficiency Improvement of STR 20 Block Rubber Production Process
by Using Design of Experiments

นิภาส ลีนะธรรม^{1*}, วีระยุทธ สุดสมบูรณ์¹, สิริชัย แก้วเกื้อกูล², ฉัตรชัย แก้วดี¹, วีรพล ปานศรีนวล¹
Nipas Leenatham^{1*}, Weerayute Sudsomboon¹, Sittichai Kaewkuekool², Chatchai Kaewdee¹,
Weeraphol Pansrinual¹

¹สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

²ภาควิชาครุศาสตร์อุตสาหกรรม คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรมและเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

¹Graduate Program in Industrial Technology, Faculty of Industrial Technology,
Nakhon Si Thammarat Rajabhat University

²Department of Production Technology Education, Faculty of Industrial Education and Technology,
King Mongkut's University of Technology Thonburi

*Corresponding author e-mail: 6177707002@nstru.ac.th

(Received: 17 August 2020, Revised: 20 January 2021, Accepted: 27 January 2021)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตยางแท่ง STR 20 ภายใต้ข้อจำกัดที่เป็นไปได้ จากการศึกษาสภาพของปัญหาในปัจจุบันพบว่า มีสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวจากยางแท่งไม่สมบูรณ์สูงกว่าข้อกำหนดขีดจำกัด ด้านบนที่โรงงานกำหนด โดยจากการวิเคราะห์ด้วยแผนภาพสาเหตุและผล และการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบใน กระบวนการผลิตพบว่าปัญหาการเกิดจุดขาวมีสาเหตุหลักมาจากค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในกระบวนการผลิตยางแท่งไม่เหมาะสม ในการจัดการกับปัญหาดังกล่าวอย่างเป็นระบบ ได้ประยุกต์ใช้แนวคิดระบบการผลิตแบบลีนซิกซ์ซิกม่าเพื่อปรับปรุงงาน ใช้การออกแบบการ ทดลองแบบแฟคทอเรียล 2^K เพื่อกรองปัจจัยของระบบในเบื้องต้น และการออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนเพื่อหาสภาวะที่ เหมาะสมในกระบวนการผลิต จากผลการวิจัยพบว่า ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตยางแท่ง คือ อุณหภูมิในการอบ ยางแท่งไล่ความชื้น 110 องศาเซลเซียส อุณหภูมิในการอบยางแท่งเพื่อให้ยางแท่ง 120 องศาเซลเซียส เวลาในการอบยางแท่ง 210 นาที ขนาดความหนาของยางผสม 3 มิลลิเมตร และเมื่อนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ไปใช้ในกระบวนการผลิตจริงพบว่า สัดส่วนของยางแท่ง ที่เกิดจุดขาวจากยางแท่งไม่สมบูรณ์ลดลงจากเดิมคิดเป็น 17.16 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสมรรถภาพกระบวนการหลังการปรับปรุง C_{pk} เท่ากับ 1.45 แสดงว่ากระบวนการอยู่ในเกณฑ์ดี โดยช่วงความเชื่อมั่นของกระบวนการเท่ากับ $1.04 < C_{pk} < 1.87$ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และสามารถคาดการณ์ได้ว่าต้นทุนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวจากยางแท่งไม่สมบูรณ์ซึ่งต้องนำมาผลิตซ้ำจะลดลงได้ 924,630 บาทต่อปี

คำสำคัญ : การออกแบบการทดลอง, การวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการ, มาตรฐานยางแท่งไทย 20, จุดขาวในยางแท่ง

Abstract

The objective of this research is to investigate optimum parameters for STR 20 block rubber production process while all possible constraints are carefully taken into consideration. According to the current problem study, it was found that the proportion of the achieved rubber with white-spot problems, caused by inappropriate drying process, went higher than the factory acceptable range. The analysis was done by applying the Cause-and-Effect diagram and Failure Mode and Effect Analyze method (FMEA). It revealed that the white-spot problems were mainly caused by improper working parameters operated in the production process. In order to systematically solve the problems, the Lean Six Sigma approach was integrated. The 2^K Factorial experiment design was used to screen for system variables and Box-Behnken experiment design was applied to get the optimal production conditions. The experimental designs provided the optimum drying process parameters. For the STR 20 block rubber drying process, the appropriate moisture discharging and drying temperatures were 110 and 120 degree Celsius, respectively. The 3-millimeter-thick mixed rubber should be dried in 210 minutes. The achieved parameters were then used in the onsite production line. The results showed that the new parameter process decreased the fraction the problematic white-spot rubber by 17.16 percent. The capability analysis (C_{pk}) was 1.45 with 0.05 significance level. It indicated the highly efficient process as the confidence interval of the process was $1.04 < C_{pk} < 1.87$. The estimated reduced cost from white-spot block rubber reprocessing was 924,630 Baht per year.

Keyword : Design of Experiments, Process Capability Analysis, Standard Thai Rubber 20, White-spot problem in rubber.

1. บทนำ

อุตสาหกรรมยางพาราเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจโลก จีนเป็นประเทศที่มีการนำเข้ายางพาราและผลิตภัณฑ์ยางพารามากเป็นอันดับหนึ่งของโลก (30 เปอร์เซ็นต์ของมูลค่าการนำเข้าของโลก) ตามด้วยสหรัฐอเมริกา ญี่ปุ่น และอินเดีย ไทยเป็นประเทศที่มีการส่งออกยางพาราสูง โดยในปี พ.ศ. 2562 ประเทศไทยมีการส่งออกยางพาราประมาณ 4.81 ล้านตัน (Puangthong & Daengkanit, 2020) จากการที่ไทยสามารถผลิตน้ำยางดิบได้เป็นจำนวนมากนี้เอง จึงทำให้ไทยมีอุตสาหกรรมต่อเนื่องเกี่ยวกับยางพาราเกิดขึ้นมากมาย เช่น ยางแท่ง ยางแผ่น ยางเครป ยางมียาง ยางอนามัย ยางรถยนต์ เป็นต้น ซึ่งอุตสาหกรรมการผลิตยางแท่ง STR 20 (Standard Thai Rubber 20) ก็เป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมยางพาราที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจไทย โดยในกระบวนการผลิตยางแท่งมีหลายขั้นตอน ได้แก่ รับซื้อวัตถุดิบ คัดแยกวัตถุดิบ ล้างทำความสะอาด ผสมและตัดฝอย อบยางแท่ง

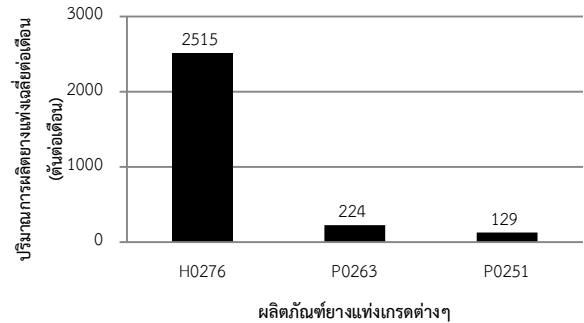
บรรจุสินค้า และคลังสินค้า ทุกส่วนล้วนมีความสำคัญมากในกระบวนการผลิตยางแท่ง และเนื่องจากในปัจจุบันมีการแข่งขันในอุตสาหกรรมยางแท่งสูงมาก ดังนั้นผู้ผลิตยางแท่งต้องทำการพัฒนาและปรับปรุงทั้งในส่วน บุคลากร เครื่องจักร วัตถุดิบ และวิธีการต่างๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตสินค้าให้สูงขึ้นและตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้า โดยเฉพาะกระบวนการควบคุมคุณภาพ เพราะคุณภาพมีความเกี่ยวข้องกับต้นทุนการผลิต หน้าที่การใช้งาน ตลอดจนรูปร่างลักษณะของผลิตภัณฑ์ และถ้าการผลิตขาดกระบวนการควบคุมคุณภาพ ผลผลิตที่ได้ก็จะขาดคุณภาพ กระบวนการควบคุมคุณภาพจึงถือว่าเป็นความจำเป็นของกระบวนการผลิตเพื่อให้ผลผลิตได้มาตรฐานตามต้องการ (Ramamamy, 2009)

โดยจากการศึกษาข้อมูลเบื้องต้นพบว่า บริษัทกรณีศึกษาดำเนินธุรกิจเกี่ยวกับการผลิตยางแท่ง สามารถแบ่งผลิตภัณฑ์ยางแท่งออกได้เป็น 3 เกรด ตามอัตราส่วนผสมระหว่างเศษยางและยางแผ่น ได้แก่ H0276 (80:20) P0263 (60:40) และ

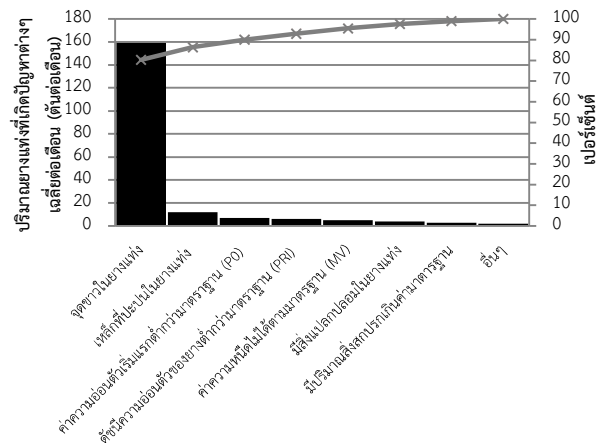
P0251 (40:60) และมีการจัดระบบการผลิตแบบต่อเนื่อง (Continuous Production System) ด้วยการผลิตตามคำสั่งซื้อจากลูกค้า (Make to Order) เป็นหลัก ซึ่งในปัจจุบันปริมาณการผลิตยางแท่ง ในช่วงระหว่างปี พ.ศ. 2562 พบว่า ผลิตภัณฑ์ยางแท่งเกรด H0276 มีปริมาณการผลิตเฉลี่ยต่อเดือนสูงสุดเท่ากับ 2,515 ตันต่อเดือน หรือคิดเป็น 87.69 เปอร์เซ็นต์ จากปริมาณการผลิตผลิตภัณฑ์ทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 1 งานวิจัยนี้จึงเลือกศึกษาผลิตภัณฑ์ยางแท่งเกรด H0276 ซึ่งถือว่าเป็นผลิตภัณฑ์หลักของบริษัทกรณีศึกษา และเพื่อเป็นแนวทางในการปรับปรุงยางแท่งเกรดอื่นๆ ทั้งนี้ หากพิจารณาปัญหาของยางแท่งในแต่ละประเภท พบปัญหาต่างๆ ได้แก่ จุดขาวในยางแท่งจากยางแห้งไม่สมบูรณ์ เหล็กที่ปะปนในยางแท่งจากกระบวนการผลิต ค่าความอ่อนตัวเริ่มแรกต่ำกว่ามาตรฐาน (P0) ดัชนีความอ่อนตัวของยางต่ำกว่ามาตรฐาน (PRI) ค่าความหนืดไม่ได้ตามมาตรฐาน (MV) มีสิ่งแปลกปลอมในยางแท่ง และมีปริมาณสิ่งสกปรกเกินค่ามาตรฐาน และจากหลักการพาเรโตกฎ 80:20 โดยเป็นกฎที่อธิบายหลักการว่าผลลัพธ์ส่วนใหญ่กว่า 80 เปอร์เซ็นต์ มักเกิดจากตัวแปรขนาดเล็กเพียง 20 เปอร์เซ็นต์ ดังนั้นปัญหาปริมาณยางแท่งที่เกิดจุดขาวจากยางแห้งไม่สมบูรณ์เฉลี่ย เท่ากับ 159 ตันต่อเดือน หรือคิดเป็น 80.30 เปอร์เซ็นต์ จากปัญหาทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 2 งานวิจัยนี้จึงเลือกพัฒนาและปรับปรุงปัญหาจุดขาวในยางแท่งจากยางแห้งไม่สมบูรณ์เป็นโจทย์วิจัยหลักต่อไป

จากปัญหาดังกล่าวที่เกิดขึ้นกับกระบวนการการผลิตยางแท่ง คณะผู้วิจัยจึงได้ประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลอง (Design of Experiments) (Sudasma- na- Ayudthya & Luangpaiboon, 2008) และแนวคิดระบบการผลิตแบบลีนซิกซ์ซิกมา (Lean Six Sigma) (Breyfogle III, 2003) เพื่อที่จะลดปัญหาในกระบวนการผลิต และถือได้ว่าเป็นวิธีการที่มีประสิทธิภาพในการปรับปรุงคุณภาพ อีกทั้งวิธีการดังกล่าวถือว่าการปรับปรุงกระบวนการอย่างต่อเนื่องเพื่อสร้างผลกำไร โดยการกำจัดความแปรปรวน ลดความสูญเสียต่างๆ และเป็นการเพิ่มความพึงพอใจของลูกค้าที่มีต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์อีกด้วย ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ คือ เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตยางแท่ง STR 20 ภายใต้ข้อจำกัดที่เป็นไปได้ โดยการศึกษาปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวจากยางแห้งไม่สมบูรณ์

นอกจากนั้นยังเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบการในอุตสาหกรรมอื่นๆ ที่ใกล้เคียงกัน และเผยแพร่ผลงานวิจัยต่อสถานประกอบการผลิตยางแท่งต่อไป



รูปที่ 1 ปริมาณการผลิตยางแท่งของแต่ละเกรด



รูปที่ 2 ปริมาณยางแท่งที่เกิดปัญหาต่างๆ

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับยางแท่ง

ยางแท่งมีชื่อเรียกโดยสากลว่า ยางธรรมชาติที่ระบุค่าทางเทคนิค (Technically Specified Natural Rubber) เป็นผลิตภัณฑ์ยางที่ผลิตขึ้นด้วยกรรมวิธีมาตรฐานสามารถควบคุมสมบัติและคุณภาพได้ ส่งผลให้ปริมาณความต้องการของยางประเภทนี้เพิ่มสูงขึ้นเรื่อยๆ เนื่องจากเป็นยางที่ง่ายต่อการควบคุมคุณภาพและเป็นวัตถุดิบที่ง่ายต่อการนำไปผลิตและแปรรูปต่อ จนในปัจจุบันยางแท่งกลายเป็นผลิตภัณฑ์หลักของยางธรรมชาติที่มีการซื้อขาย ประเทศหลักที่มีการผลิตและส่งออกยางแท่งประกอบด้วย ไทย มาเลเซีย อินโดนีเซีย เวียดนาม และอินเดีย ซึ่งในแต่ละประเทศจะมีการกำหนดมาตรฐานยาง ซึ่งจะระบุค่าสมบัติต่างๆ ในแต่ละคุณภาพแตกต่างกัน หน่วยงานแรก

ที่ทำการประกาศมาตรฐานยางแท่งคือ องค์การระหว่างประเทศว่าด้วยการมาตรฐาน (The International Standards Organization) โดยมีการประกาศใช้ครั้งแรกเมื่อ พ.ศ. 2507 คือ ISO 2000 และต่อมาในปี พ.ศ. 2508 ประเทศมาเลเซียได้ทำการประกาศใช้มาตรฐานยางแท่งของตนเอง โดยใช้ชื่อว่า มาตรฐานยางมาเลเซีย (Standard Malaysian Rubber) เช่นเดียวกับประเทศผู้ผลิตยางแท่งอื่น ก็มีการประกาศใช้มาตรฐานยางแท่งของประเทศตนเอง เช่น ประเทศอินโดนีเซีย ใช้มาตรฐาน (Standard Indonesian Rubber) ประเทศเวียดนามใช้มาตรฐาน (Standard Vietnamese Rubber) เป็นต้น (Satsue & Phitthayaphinant, 2019)

กระบวนการผลิตยางแท่ง (Sae-ui & Sirisingha, 2007) ประกอบด้วย การรับซื้อวัตถุดิบโดยรับซื้อยางพาราที่มีลักษณะเป็นเศษยางและยางแผ่นดิบ จากเกษตรกรหรือร้านค้าซึ่งต้องปราศจากการปนเปื้อนของสิ่งแปลกปลอมต่างๆ จากนั้นนำไปพักไว้ในสถานที่เตรียมวัตถุดิบ โดยการแปรรูปวัตถุดิบเริ่มจากนำเศษยางและยางแผ่นดิบมาผสมรวมกันตามอัตราส่วนที่กำหนด จากนั้นนำวัตถุดิบที่ผสมแล้วมาทำการรีดยาง และตัดย่อยยางให้มีขนาดเล็กลง จนมีลักษณะเป็นเม็ดฝอย และส่งต่อไปยังบ่อพักเพื่อสเปรย์น้ำและล้างสิ่งสกปรกโดยล้างซ้ำไปมาจนสะอาดแล้วนำไปใส่ลงในแม่พิมพ์หรือตะก่ง เมื่อบรรจุวัตถุดิบลงในตะก่งแล้ว ขั้นตอนถัดไปคือการอบยางให้แห้งด้วยเตาอบ โดยการทำงานของเตาอบเริ่มจากการใช้ความร้อนไล่ความชื้นออกจากก้อนยางในช่วงแรก แล้วต่อด้วยการให้ความร้อนสูงเพื่อทำให้ยางแห้งในช่วงที่สอง หลังจากนั้นให้เวลาในการถ่ายเทความร้อนกระจายทั่วเม็ดยางและให้เนื้อยางทุกส่วนได้รับความร้อนทั่วถึงกัน ยางที่ได้จะแห้งโดยสมบูรณ์ในส่วนนี้และเพื่อที่จะได้ยางที่ออกมาไม่เป็นจุดขาว (White Spots) หากยางที่ออกมายังเป็นจุดขาวถือว่าเป็นข้อบกพร่องในกระบวนการผลิต ซึ่งสามารถแบ่งเกณฑ์การตรวจสอบจุดขาวในยางแท่งได้ 4 เกรด แสดงดังตารางที่ 1 และรูปที่ 3

สำหรับยางแท่งที่ได้คุณภาพจะถูกถ่วงน้ำหนักผ่านเครื่องตรวจจับโลหะ และสุมตัดตัวอย่างยางแท่งส่งให้กับห้องปฏิบัติการเพื่อทดสอบค่าต่างๆ สำหรับยางแท่งที่ได้คุณภาพตามข้อกำหนดของลูกค้านำไปห่อด้วยพลาสติก และจัดเรียงบนพาเลทเพื่อนำไปจัดเก็บก่อนจัดส่งไปยังลูกค้าต่อไป

ตารางที่ 1 เกณฑ์การตรวจสอบจุดขาวในยางแท่ง

ขนาดของจุดขาว	การตัดสินใจ
ระดับ A : ไม่พบจุดขาว	ยอมรับ
ระดับ B : ขนาดจุดขาว ≤ 3 มิลลิเมตร จำนวนจุดขาว ≤ 10 จุด	ยอมรับ
ระดับ C : ขนาดจุดขาว ≤ 3 มิลลิเมตร จำนวนจุดขาว > 10 จุด	ไม่ยอมรับ
ระดับ D : ขนาดจุดขาว > 3 มิลลิเมตร จำนวนจุดขาว ≥ 1 จุด	ไม่ยอมรับ

ที่มา : ข้อมูลจากฝ่ายผลิตของโรงงานกรณีศึกษา



รูปที่ 3 ตัวอย่างจุดขาวในยางแท่ง

2.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับการออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียล (Factorial Experiment)

การออกแบบเชิงแฟคทอเรียลใช้มากในการทดลองที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยหลายปัจจัย (Multiple Factor Experiment) (Montgomery, 2019) ซึ่งเราต้องการที่จะศึกษาอิทธิพลของปัจจัยมากกว่าหนึ่งปัจจัยพร้อมกัน โดยให้ความสนใจที่อิทธิพลร่วมของปัจจัย ซึ่งเป็นอิทธิพลที่ส่งผลให้กับตัวแปรตอบสนอง ที่เกิดจากปัจจัยเหล่านั้น โดยทั่วไปแล้วอาจกล่าวได้ว่า การออกแบบเชิงแฟคทอเรียล หมายถึง การทดลองที่พิจารณาถึงผลที่เกิดจากการรวมกันของระดับของปัจจัยตั้งแต่ 2 ปัจจัยขึ้นไป ซึ่งเรียกว่า ทรีทเมนต์คอมบินเนชัน (Treatment Combination) และเนื่องจากมีปัจจัยมากกว่า 1 ปัจจัย ดังนั้น นอกจากจะเกิดอิทธิพลของปัจจัยหลัก (Main Effect) ที่สนใจแล้วยังอาจเกิดอิทธิพลของปัจจัยร่วม (Interaction Effect) ได้ด้วย

การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^k จะใช้กับการทดลองที่มีปัจจัยทั้งหมด k ปัจจัย ซึ่งแต่ละปัจจัยจะประกอบด้วย 2 ระดับเท่านั้น ระดับเหล่านี้จะเกิดจากข้อมูลเชิงปริมาณ เช่น อุณหภูมิ ความดัน ความเร็วหรือเวลา

เป็นต้น หรืออาจจะเกิดจากข้อมูลเชิงคุณภาพก็ได้ เช่น เครื่องจักร หรือคนงาน เป็นต้น และใน 2 ระดับที่กล่าวถึงนี้จะแทนระดับสูงหรือต่ำของปัจจัยเหล่านั้น และจะแทนระดับทั้งสองด้วยเครื่องหมาย (-) และ (+) ตามลำดับ ในข้อมูล 1 ซ้ำ ที่บริบูรณ์สำหรับการออกแบบนี้จะประกอบด้วยข้อมูลทั้งสิ้น $2 \times 2 \times \dots \times 2 = 2^K$ ข้อมูล (Leenatham & Khemavuk, 2019)

การออกแบบการทดลองเชิงแฟคทอเรียลแบบ 2^K มีประโยชน์มากต่อการทดลองในช่วงเริ่มแรก เมื่อมีปัจจัยเป็นจำนวนมากที่เราต้องการที่จะตรวจสอบ การออกแบบเช่นนี้จะทำให้เกิดการทดลองจำนวนน้อยที่สุดที่สามารถจะทำได้ เพื่อศึกษาถึงผลของปัจจัยทั้ง k ชนิดได้อย่างบริบูรณ์ ดังนั้นการออกแบบการทดลองชนิดนี้จะทำให้สามารถกรองปัจจัยที่มีอยู่เป็นจำนวนมากให้เหลือน้อยลงได้ (Sudasna-na-Ayudthya & Luangpaiboon, 2008)

3.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับการออกแบบการทดลองบ็อกซ์-เบห์นเคน (Box-Behnken Experiment)

เป็นแผนการทดลองที่มีประสิทธิภาพสำหรับกรณีศึกษาปัจจัยที่มีสามระดับ โดยเฉพาะกรณีที่ต้องการสร้างสมการตัวแบบเมื่อปัจจัยเป็นปัจจัยเชิงปริมาณ ซึ่งพัฒนาขึ้นมาโดยนายบ็อกซ์และนายเบห์นเคน ซึ่งได้พัฒนาประสิทธิภาพการออกแบบการทดลองแบบสามระดับสำหรับพิทพื้นผิวตอบสนองที่มีสมการอันดับสอง (Second-Order) ลักษณะของการออกแบบการทดลองบ็อกซ์-เบห์นเคน จะใช้หลักการของ 2^2 แฟคทอเรียลเต็มรูปแบบวนกับจุดกึ่งกลาง (Central Point) รวมเข้าไป โดยได้จัดทำตารางสำหรับแผนการทดลองเพื่อใช้กับปัจจัยได้สูงสุดไม่เกิน 16 ปัจจัย (ไม่รวมกรณี 8 ปัจจัย) แผนการทดลองนี้ไม่มีการพิจารณาจุดมุม (Myers et al., 2016)

แผนการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน มีลักษณะเกือบจะเป็น Orthogonal จำนวนการทดลองแต่ละคอมบินชัน ทำในจำนวนครั้งที่ไม่เท่ากัน โดยเฉพาะการทดลองที่ทำ ณ จุดศูนย์กลาง (Center points) ข้อดี คือ มีค่ารายละเอียดของแผนการทดลองเท่ากับ IV ซึ่งทำให้สามารถศึกษาผลกระทบเชิงเส้น ผลกระทบเชิงเส้นกำลังสองและผลกระทบร่วม 2 ปัจจัย และในกรณีปัจจัยที่ศึกษามีจำนวน 3 หรือ 4 ปัจจัย จำนวนการทดลองน้อยกว่าแบบพื้นผิวตอบสนองแบบส่วนประสมกลาง ซึ่งช่วยลดค่าใช้จ่ายในการทดลองได้ ข้อเสีย คือ แผนการทดลองนี้จะมี

ประสิทธิภาพด้อยกว่าการทดลองแบบพื้นผิวตอบสนองแบบส่วนประสมกลาง เมื่อจำนวนปัจจัยที่ศึกษามีจำนวนมากกว่า 4 ปัจจัยขึ้นไป (Khuri, 2006)

4.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับการวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการ (Process Capability Analysis)

การวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการ (Process Capability Analysis : C_{pk}) (Montgomery, 2019) เป็นวิธีหนึ่งที่ใช้เพื่อกำหนดความสามารถของกระบวนการผลิตว่าสามารถผลิตสินค้าได้ตรงตามข้อกำหนด (Specification Limit) หรือไม่ ซึ่งความสามารถของกระบวนการคือ ความสม่ำเสมอ (Uniform) ของกระบวนการ โดยจะมีการวัดความสม่ำเสมอจากความแปรเปลี่ยนภายในกระบวนการ ด้วยค่าลักษณะคุณภาพของผลผลิตจากกระบวนการนั้น โดยความหมายของค่า C_{pk} มีดังนี้

2.4.1 $C_{pk} < 1$ กระบวนการผลิตแย่มาก มีการผลิตสินค้าไม่ตรงตามข้อกำหนดที่ต้องการและมีของเสียเกิดขึ้นจากการผลิต ควรจะต้องมีการปรับปรุงกระบวนการในด้านการลดความแปรปรวนของกระบวนการผลิตลง ซึ่งสามารถทำได้โดยเปลี่ยนหรือปรับตั้งเครื่องจักรใหม่เลือกวัตถุดิบที่เหมาะสม ฝึกอบรมพนักงานให้มีความชำนาญมากขึ้น เป็นต้น

2.4.2 $C_{pk} = 1$ กระบวนการเกือบจะใช้ไม่ได้ แทบจะหลุดออกนอกข้อกำหนดเนื่องจากความกว้างของข้อกำหนดมีขนาดเท่ากับความกว้างของ 6 ซิกมาพอดี

2.4.3 $1 < C_{pk} < 1.33$ กระบวนการพอใช้ได้

2.4.4 $C_{pk} > 1.33$ กระบวนการดีมาก

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Kaewploy and Boonseng (2014) งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการอบไม้ยางพาราโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองปัจจัยที่ทำการศึกษาประกอบด้วยอุณหภูมิ เวลา และการเปิด-ปิดปล่องระบายในกระบวนการอบ เพื่อให้ได้ค่าเปอร์เซ็นต์ความชื้นตามมาตรฐานที่กำหนดโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบห์นเคน และเมื่อทำการวิเคราะห์พบว่า สามารถกำหนดสภาวะในการอบไม้ยางพาราด้วยสมการถดถอยคือ เปอร์เซ็นต์ความชื้น = $343.640 - 0.788A - 42.464B + 1.339B^2 +$

0.053AB ซึ่งเป็นสมการที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลที่มีความเชื่อถือได้

Homkhiew et al. (2017) งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์การขึ้นรูปอัดร้อนที่เหมาะสมของวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงและผงไมยางพารา โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน ปัจจัยที่ทำการศึกษาประกอบไปด้วย อุณหภูมิการอัดร้อน ระยะเวลาการอัด และความหนาแน่น ผลจากการทดลองพบว่า ทั้งสามปัจจัยนี้มีผลกระทบอย่างมีนัยสำคัญต่อความแข็งแรงดัด โมดูลัสการดัด ความแข็งแรงดึง โมดูลัสการดึง และการดูดซับน้ำ และพบว่าวัสดุเชิงประกอบที่ขึ้นรูปด้วยพารามิเตอร์ที่เหมาะสม มีสมบัติแตกต่างจากค่าที่ได้จากการทำนายไม่เกิน 3.78 เปอร์เซ็นต์

Srerungruang et al. (2017) งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาหาสภาวะที่เหมาะสมในการฉีดล้างด้านหลังตะแกรงของเครื่องเหวี่ยงแยกเพื่อลดการสูญเสียแป้งมันสำปะหลัง การทดลองถูกออกแบบโดยใช้วิธีการแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน และหาค่าสภาวะที่ทำให้ค่าร้อยละการสูญเสียแป้งต่ำที่สุดโดยใช้วิธีพื้นผิวตอบสนอง จากผลการทดลองสามารถทำนายสภาวะการทำงานที่เหมาะสมของการฉีดล้างด้านหลังตะแกรง คือระยะเวลาในการฉีดล้าง 63 วินาที เวลาหยุดฉีด 5 วินาที และใช้หัวฉีดสเปรย์ที่ทำมุมกับก้านฉีดที่ 33 องศา พบว่า ปริมาณแป้งที่สูญเสียไปในกากหลังการปรับปรุง ลดลง 11.8 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งให้เห็นว่าสามารถรบกวนการเกิดการอุดตันได้จริง

Ketsarapong and Sriyanalugsana (2019) งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตตู้แช่อาหารโดยการประยุกต์ใช้เทคนิคซิกซ์ ซิกม่า เพื่อที่จะแก้ไขปรับปรุงกระบวนการควบคู่กับเครื่องมือคุณภาพ และการวิเคราะห์ผลกระทบอันเนื่องมาจากความผิดพลาดในกระบวนการ (Failure Mode and Effect Analyze Process: FMEA) สำหรับวิเคราะห์สาเหตุของข้อบกพร่อง โดยบริษัทกรณีศึกษา มีการผลิตตู้แช่อาหารเฉลี่ย 161 ตู้ต่อเดือน ซึ่งพบข้อบกพร่องเฉลี่ยเท่ากับ 93,168 PPM หลังจากดำเนินการปรับปรุง ข้อบกพร่องเฉลี่ยลดลงเหลือ 26,666.67 PPM ซึ่งลดลงจากก่อนปรับปรุง 28.62 เปอร์เซ็นต์

Sliva & Ferreira (2017) งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดเวลาการทำงานและลดต้นทุนในกระบวนการอัดขึ้นรูปยาง

รถยนต์โดยใช้วิธีการซิกซ์ซิกม่า เพื่อที่จะแก้ไขปรับปรุงกระบวนการ ด้วยขั้นตอนทั้งสิ้น 5 ขั้นตอน คือการกำหนดปัญหา (Define) การประเมินวิธีการวัดผล (Measure) การวิเคราะห์ปัญหา (Analyze) การดำเนินการปรับปรุง (Improve) และการควบคุม (Control) โดยได้พัฒนาเครื่องจักรในการผสมยางเป็นนวัตกรรมแบบใหม่ ผลจากการทดลองพบว่า และสามารถลดเวลาในการทำงานได้ 0.89 เปอร์เซ็นต์ และสามารถลดต้นทุนได้ 165,000 ยูโรต่อปี ส่งผลให้ประสิทธิภาพกระบวนการผลิตเพิ่มขึ้น

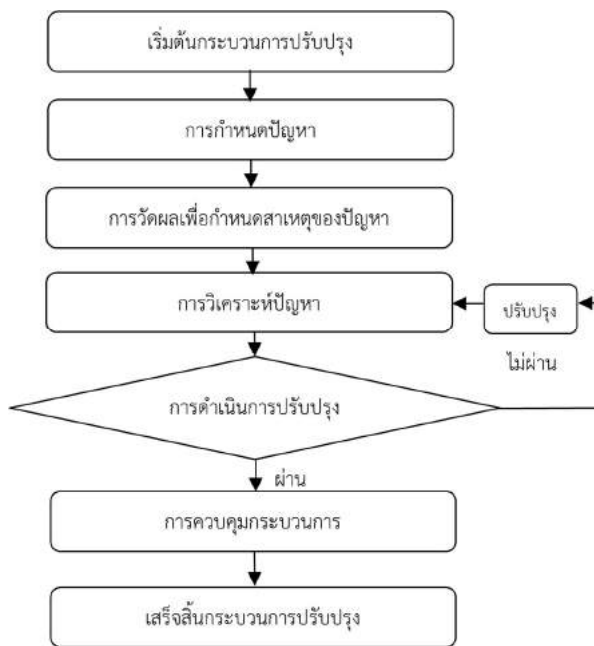
Hassan (2013) งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อลดความสูญเสียในกระบวนการผลิตขวดเชื่อมโดยใช้วิธีการซิกซ์ซิกม่าและอาศัยแนวคิดระบบการผลิตแบบลีน และทำการวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้แผนผังสาเหตุและผล (Cause and Effect Diagram) ซึ่งได้สาเหตุที่ทำให้เกิดปัญหาและมีผลกระทบต่อการเกิดของเสียมากที่สุดมีอยู่ 7 สาเหตุ โดยส่วนมากจะเกิดจากวิธีการทำงาน และพบว่าจำนวนของเสียลดลงจากเดิม 34.78 เปอร์เซ็นต์ ถือเป็นหนึ่งในแนวทางที่ประสบความสำเร็จในด้านการปรับปรุงคุณภาพและลดต้นทุน

Coelho et al. (2019) งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการสกัดโปรตีนจากเนื้อแพะโดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียลเพื่อกรองปัจจัยที่มีอยู่ให้เหลือน้อยลง และวิธีการแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการผลิต โดยปัจจัยที่ทำการศึกษาประกอบด้วยอุณหภูมิ (25–50 องศาเซลเซียส) เวลาในการสกัด (8-20 นาที) ปริมาณตัวแยกขนาด (3–10 มิลลิลิตร) และความเข้มข้นของเครื่องสกัด (0.05–0.1 โมลาริต) เมื่อทำการวิเคราะห์พบว่า โปรตีนจากเนื้อแพะที่สกัดด้วยพารามิเตอร์ที่เหมาะสมนี้ มีปริมาณโปรตีนเพิ่มสูงขึ้นคิดเป็น 30.5 เปอร์เซ็นต์

ดังนั้นงานวิจัยนี้จะประยุกต์ใช้แนวคิดระบบการผลิตแบบลีนซิกซ์ซิกม่า (Lean six sigma) เพื่อเป็นวิธีการในการปรับปรุงงานให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ประกอบกับใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล 2^K เพื่อกรองปัจจัยที่มีอยู่ให้เหลือน้อยลงและวิธีการออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการผลิต ส่งผลให้ปริมาณยางแท่งที่เกิดจุดขาวจากยางแห้งไม่สมบูรณ์ในกระบวนการผลิตลดลง ภายใต้ข้อจำกัดที่เป็นไปได้

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการศึกษาค้นคว้าตามขั้นตอนของกระบวนการวิจัยจากเอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จึงได้กำหนดขั้นตอนและวิธีการดำเนินงานวิจัย โดยการประยุกต์ใช้แนวทางการแก้ปัญหาตามแนวคิดระบบการผลิตแบบลีนซิกซ์ซิกม่า ประกอบไปด้วย 5 ขั้นตอน คือ การกำหนดปัญหา (D: define) การวัดผลเพื่อกำหนดสาเหตุของปัญหา (M: measure) การวิเคราะห์ปัญหา (A: analyze) การดำเนินการปรับปรุง (I: improve) การควบคุมกระบวนการ (C: control) ซึ่งรายละเอียดแสดงดังรูปที่ 4 (Pyzdek & Keller, 2019)



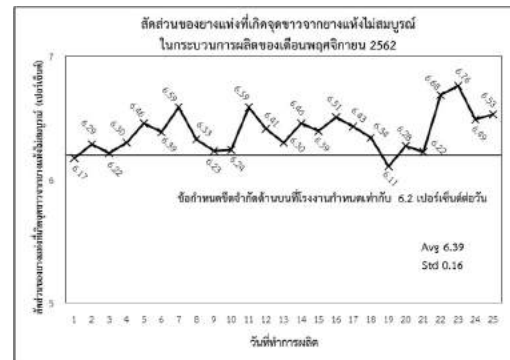
รูปที่ 4 แผนผังขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

4. ผลการวิจัย

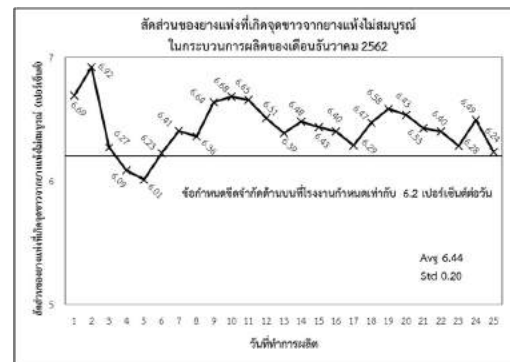
4.1 การกำหนดปัญหา

คณะผู้วิจัยได้ทำการเข้าไปศึกษาสภาพปัญหาจริงของกระบวนการผลิตยางแท่งเกี่ยวกับปัญหาหลักดังกล่าวข้างต้น โดยทำการเก็บข้อมูลสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวจากยางแท่งไม่สมบูรณ์ เพื่อให้แน่ใจว่ากระบวนการมีปัญหาจริงและต้องการแก้ไขปรับปรุง ซึ่งในกระบวนการผลิตยางแท่งของ

โรงงานการศึกษา มีการผลิตในแต่ละวันด้วยจำนวนชั่วโมงการทำงานที่เท่ากัน โดยในหนึ่งวันทำงานมี 3 กะ ละ 7 ชั่วโมง รวมทำงานทั้งสิ้น 21 ชั่วโมงต่อวัน โดยเก็บข้อมูลระหว่างเดือนพฤศจิกายน – ธันวาคม พ.ศ. 2562 รวมทั้งหมด 2 เดือน เดือนละ 25 วัน วันละ 3 กะ ใช้ข้อมูลทั้งสิ้น 75 ครั้ง โดยนำข้อมูลมาคำนวณค่าสถิติต่างๆ และวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการแสดงดังรูปที่ 5 และตารางที่ 2



(ก)



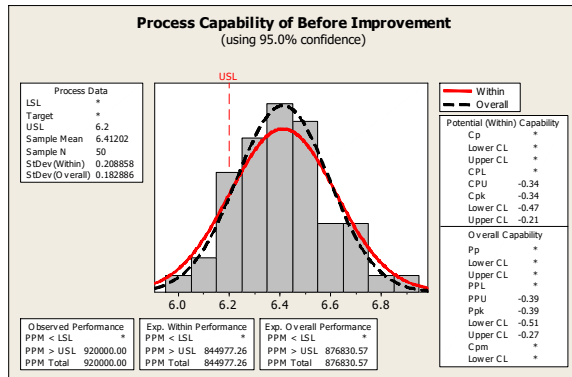
(ข)

รูปที่ 5 สัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวจากยางแท่งไม่สมบูรณ์ในเดือนพฤศจิกายน – ธันวาคม พ.ศ. 2562

จากรูปที่ 5 พบว่าสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวในเดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2562 (ก) คิดเฉลี่ยเป็น 6.39 เปอร์เซ็นต์ต่อวัน ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.16 เปอร์เซ็นต์ต่อวัน และในเดือนธันวาคม พ.ศ. 2562 (ข) คิดเฉลี่ยเป็น 6.44 เปอร์เซ็นต์ต่อวัน ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.20 เปอร์เซ็นต์ต่อวัน ส่งผลให้มีสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวจากยางแท่งไม่สมบูรณ์ สูงกว่าข้อกำหนดขีดจำกัดด้านบนที่โรงงานกำหนด คือ 6.2 เปอร์เซ็นต์ต่อวัน จึงต้องทำการปรับปรุงโดยการวิเคราะห์เพื่อหาสาเหตุในกระบวนการถัดไป

ตารางที่ 2 ค่าสถิติต่างๆ จากผลการทดลองก่อนการปรับปรุงสัดส่วนของ
ยางแท่งที่เกิดจุดขาวจากยางแท่งไม่สมบูรณ์ ในช่วงระหว่าง
เดือนพฤศจิกายน – ธันวาคม พ.ศ. 2562

ค่าทางสถิติ (เปอร์เซ็นต์ต่อวัน)	ก่อนการปรับปรุง
สัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวเฉลี่ย	6.41
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.18
ขอบเขตบนสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวเฉลี่ยในช่วงความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์	6.46



รูปที่ 6 การวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการของสัดส่วนของยางแท่งที่
เกิดจุดขาวก่อนการปรับปรุง

จากรูปที่ 6 แสดงว่าสมรรถภาพกระบวนการของสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวก่อนการปรับปรุงขาดประสิทธิภาพเนื่องจากมีค่า $C_{pk} = -0.34$ ซึ่งค่า $C_{pk} < 1$ แสดงว่ากระบวนการผลิตมีขีดความสามารถที่ไม่ดี ควรได้รับการปรับปรุงแก้ไขให้มีประสิทธิภาพต่อไป

4.2 การวัดผลเพื่อกำหนดสาเหตุของปัญหา

หลังจากดำเนินการศึกษากระบวนการโดยละเอียดแล้วนั้น ในขั้นตอนนี้จะใช้แผนภาพสาเหตุและผล (Montgomery, 2019) ที่แสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์ระหว่างสาเหตุและผลลัพธ์สำหรับปัญหาที่ทำการศึกษา ซึ่งแผนภาพนี้มีส่วนช่วยให้การวิเคราะห์ปัญหามีความง่ายและเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ โดยอาศัยการระดมสมองของผู้มีส่วนเกี่ยวข้องร่วมกันแสดงความคิดเห็นเพื่อค้นหาสาเหตุที่เป็นไปได้ทั้งหมด ความคิดเห็นนี้จะไม่จำกัดปริมาณและคุณภาพของความคิด เพื่อป้องกันการตกหล่นของสาเหตุที่อาจมีผลกระทบต่อปัญหา โดยใช้หลัก 4M ดังแสดงในรูปที่ 7 สาเหตุของสัดส่วนยางแท่งที่เกิดจุดขาวแบ่งออกได้เป็น 4 ส่วน คือ สาเหตุที่เกิดจากพนักงาน เครื่องจักร วิธีการ และวัตถุดิบ ซึ่งสามารถพิจารณาสาเหตุเบื้องต้น ได้ดังนี้

4.2.1 สาเหตุจากพนักงาน จากจำนวนพนักงานทั้งหมดส่วนใหญ่จะเป็นเพศชายประมาณร้อยละ 70 ส่วนที่เหลือเป็นพนักงานหญิง ซึ่งอายุของพนักงานทั้งหมดอยู่ในช่วง 20-50 ปี ซึ่งอยู่ในวัยทำงานจึงมีสุขภาพร่างกายแข็งแรง และมีการจัดฝึกอบรมให้แก่พนักงานอย่างต่อเนื่อง

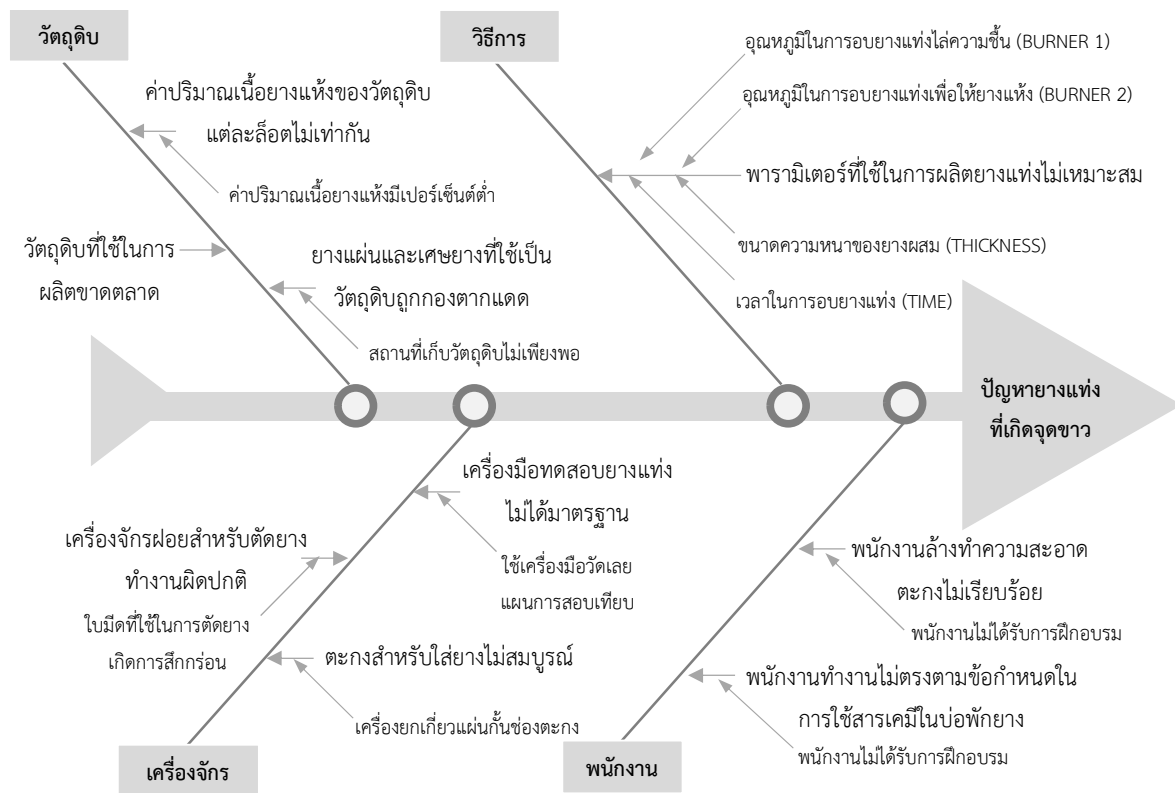
4.2.2 สาเหตุจากเครื่องจักร มีการบำรุงรักษาเชิงป้องกันและตรวจติดตามการใช้งานของเครื่องจักรตามแผนซ่อมบำรุงของแผนกซ่อมบำรุงอย่างสม่ำเสมอ

4.2.3 สาเหตุจากวัตถุดิบ มีแผนการสต็อกวัตถุดิบล่วงหน้าเพื่อให้เพียงพอต่อการผลิตยางแท่งและจัดเตรียมสถานที่สำหรับเก็บวัตถุดิบอย่างเพียงพอ และมีมาตรฐานในการใช้วัตถุดิบตามที่กำหนด

4.2.4 สาเหตุจากวิธีการ มีการควบคุมค่าของพารามิเตอร์จากข้อกำหนด แต่ไม่สามารถตรวจสอบหาผลกระทบที่เกิดขึ้นได้ โดยจะปรับลดค่าพารามิเตอร์ตามปัญหาที่เกิดขึ้นส่งผลให้มีปริมาณยางแท่งที่เกิดจุดขาวสูงในกระบวนการผลิต

4.3 การวิเคราะห์ปัญหา

จากการวัดผลเพื่อกำหนดสาเหตุของปัญหาข้างต้นนำไปสู่การวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบ (Failure Mode and Effect Analyze Process: FMEA) (Ramasmay, 2009) เป็นเทคนิคหรือกระบวนการอย่างเป็นระบบที่สร้างขึ้นเพื่อวิเคราะห์กิจกรรมในกระบวนการผลิต โดยการชี้แจงปัญหาหรือข้อบกพร่องใดๆ ที่มีโอกาสเกิดขึ้นในกิจกรรมนั้น โดยการพิจารณาจากดัชนีความเสี่ยงชี้แนะ (Risk Priority Number: RPN) ซึ่งได้จากการประเมินค่าความรุนแรง (Severity) โอกาสที่จะเกิด (Occurrence) และความสามารถในการตรวจพบข้อบกพร่องนั้นๆ (Detection) และค่าต่างๆถูกประเมินโดยคณะทำงานผู้เชี่ยวชาญทั้งหมด 10 ท่าน ซึ่งประกอบไปด้วยวิศวกรฝ่ายผลิต วิศวกรฝ่ายคุณภาพ วิศวกรฝ่ายซ่อมบำรุง และหัวหน้างานแผนกต่างๆ จากนั้นนำสาเหตุของปัญหายางแท่งที่เกิดจุดขาว มาวิเคราะห์ผลกระทบเพื่อหาค่าดัชนีความเสี่ยงชี้แนะคำนวณจากผลคูณของ $S \times O \times D = RPN$ ดังตารางที่ 3 และวิเคราะห์สาเหตุที่มีผลกระทบต่อปัญหาโดยใช้แผนภาพพาเรโตเพื่อทำการเลือกผลกระทบที่มีความรุนแรงมาก โดยมีค่า RPN มากกว่าหรือเท่ากับ 100 ไปปรับปรุงแก้ไขต่อไป ดังแสดงในรูปที่ 8



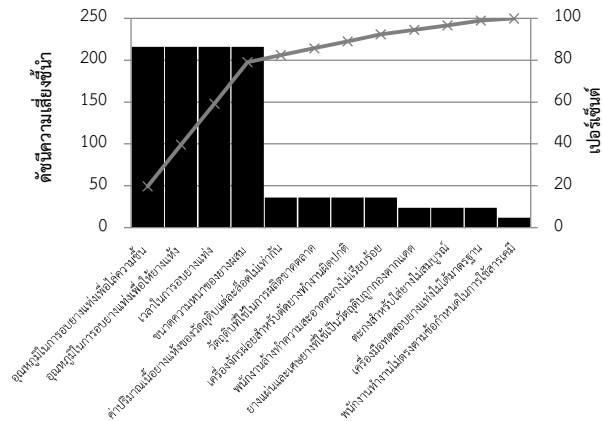
รูปที่ 7 แผนภาพสาเหตุและผล

ตารางที่ 3 การวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบ

สาเหตุจาก	ลักษณะข้อบกพร่อง	ผลกระทบข้อบกพร่อง	S	สาเหตุที่ทำให้เกิดข้อบกพร่อง	O	การควบคุมกระบวนการปัจจุบัน	D	RPN
เครื่องจักร	ตะกั่วสำหรับใส่ยางไม่สมบูรณ์	เกิดจุดขาวในยางแห้งจากยางแห้งไม่สมบูรณ์	6	เครื่องยกเกี่ยวแผ่นกันช่องตะกั่ว ทำให้เกิดการบิดเบี้ยว	2	มีแผนซ่อมบำรุงเชิงป้องกันตะกั่วก่อนการผลิตและมีการตรวจติดตามในทุกรอบการผลิตยางแห้ง	2	24
	เครื่องจักรฝอยสำหรับตัดยางทำงานผิดปกติ	เกิดจุดขาวในยางแห้งจากยางแห้งไม่สมบูรณ์	6	ใบมีดที่ใช้สำหรับการตัดยางเกิดการสึกกร่อนจากการใช้งาน	3	มีแผนการตรวจสอบการใช้ใบมีดตามมาตรฐานที่กำหนดในทุกรอบการผลิต	2	36
	เครื่องมือทดสอบยางแห้งไม่ได้มาตรฐาน	เกิดจุดขาวในยางแห้งจากยางแห้งไม่สมบูรณ์	6	มีการใช้เครื่องมือวัดเลยแผนการสอบเทียบเนื่องจากปริมาณการผลิตยางแห้งสูง	2	มีการตรวจสอบและติดตามแผนการสอบเทียบเครื่องมือวัดตามแผนที่กำหนดไม่ให้เลยแผนในทุกรอบการผลิตยางแห้ง	2	24

ตารางที่ 3 (ต่อ)

สาเหตุ จาก	ลักษณะ ข้อบกพร่อง	ผลกระทบข้อบกพร่อง	S	สาเหตุที่ทำให้เกิด ข้อบกพร่อง	O	การควบคุม กระบวนการ ปัจจุบัน	D	RPN
วิธีการ	พารามิเตอร์ที่ใช้ใน กระบวนการผลิตยาง แท่งไม่เหมาะสม	เกิดจุดขาวในยางแท่ง จากยางแท่งไม่สมบูรณ์	6	อุณหภูมิในการอบยางแท่ง ไล่ความชื้น (BURNER 1)	4	มีการควบคุมค่าของ พารามิเตอร์จาก ข้อกำหนด แต่ไม่ สามารถตรวจสอบ หาผลกระทบที่ เกิดขึ้น	9	216
			6	อุณหภูมิในการอบยางแท่ง เพื่อให้ยางแห้ง (BURNER 2)	4		9	216
			6	เวลาในการอบยางแท่ง (TIME)	4		9	216
			6	ขนาดความหนาของยางผสม (THICKNESS)	4		9	216
วัตถุดิบ	ค่าปริมาณเนื้อยาง แห้งของวัตถุดิบแต่ ละลือตไม่เท่ากัน	เกิดจุดขาวในยางแท่ง จากยางแท่งไม่สมบูรณ์	6	ค่าปริมาณยางแห้งของเศษ ยางและยางแผ่นที่ใช้เป็น วัตถุดิบมีเปอร์เซ็นต์ต่ำ	2	มีการตรวจสอบ และ ติดตามการใช้ วัตถุดิบตาม มาตรฐานที่กำหนด โดยมีค่าปริมาณยาง แห้งของเศษยางอยู่ ระหว่าง 70-75% และยางแผ่น 90-95%	3	36
	ยางแผ่นและเศษยาง ที่ใช้เป็นวัตถุดิบถูก กองตากแดด	เกิดจุดขาวในยางแท่ง จากยางแท่งไม่สมบูรณ์	6	สถานที่ใช้ในการเก็บสต็อก วัตถุดิบไม่เพียงพอ	2	สร้างโรงเก็บวัตถุดิบ เพิ่มเติม และมีการ สเปรย์น้ำในบ่อพัก ยางเพื่อให้ยางนุ่ม และให้สิ่งสกปรก หลุดออก	2	24
	วัตถุดิบที่ใช้ในการ ผลิตขาดตลาด	เกิดจุดขาวในยางแท่ง จากยางแท่งไม่สมบูรณ์	6	ทำให้ต้องใช้วัตถุดิบที่ ระยะเวลาในการบ่มไม่ครบ 15 วัน ตามมาตรฐานที่ กำหนด	3	มีแผนการสั่งซื้อ วัตถุดิบล่วงหน้า เพื่อให้เพียงพอ ต่อการผลิตยางแท่ง	2	36
พนักงาน	พนักงานล้างทำ ความสะอาดตะกอนไม่ เรียบร้อย	เกิดจุดขาวในยางแท่ง จากยางแท่งไม่สมบูรณ์	6	เศษยางแห้งอีกขาดติดที่ตะ กอนตอนทำการผลิตยางแท่ง	2	จัดอบรมพนักงาน และมีแผนในการ ตรวจติดตามการทำ ความสะอาดตะกอน หลังการใช้งาน	3	36
	พนักงานทำงานไม่ ตรงตามข้อกำหนด ในการใช้สารเคมีใน บ่อพักยาง	เกิดจุดขาวในยางแท่ง จากยางแท่งไม่สมบูรณ์	6	พนักงานไม่เข้าใจวิธีการ ทำงานเรื่องการตรวจสอบ ค่า PH ในบ่อพักยาง	1	จัดอบรมพนักงาน และตรวจติดตามใน การควบคุมค่า PH ระหว่าง 6-10 ในบ่อ พักยาง	2	12



รูปที่ 8 แผนภาพพารेटอดัชนีความเสียหาย (RPN)

จากรูปที่ 8 พบว่าสาเหตุที่มีความรุนแรงมากคือค่าความเสียหาย (RPN) สูง โดยส่งผลกระทบต่อปัญหายางแห้งที่เกิดจุดขาว มีจำนวน 4 สาเหตุหลัก ได้แก่ อุณหภูมิในการอบย่างแห้งไล่ความชื้น (BURNER 1) อุณหภูมิในการอบย่างแห้งเพื่อให้ง่ายแห้ง (BURNER 2) เวลาในการอบย่างแห้ง (TIME) และขนาดความหนาของยางรม (THICKNESS) ตามลำดับ จึงได้นำสาเหตุหลักดังกล่าวมาปรับปรุงแก้ไขต่อไป

4.4 การดำเนินการปรับปรุง

จากการวิเคราะห์สาเหตุที่แท้จริงของปัญหา ด้วยการวิเคราะห์ผลกระทบอันเนื่องมาจากความผิดพลาดในกระบวนการมาก่อนหน้านี้ หลังจากนั้นเพื่อหาวิธีการแก้ไขปัญหาดังกล่าว คณะผู้วิจัยได้ใช้การออกแบบการทดลอง 2 ขั้นตอนคือ ขั้นตอนแรกเป็นการทดลองเบื้องต้นเพื่อที่จะกรองปัจจัยที่ไม่มีผลต่อสัดส่วนของยางแห้งที่เกิดจุดขาวจากยางแห้งไม่สมบูรณ์โดยใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล 2^k และขั้นตอนที่สองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตโดยใช้การออกแบบการทดลองแบบบ็อกซ์-เบนเคน แล้วจึงทำการยืนยันผลการวิเคราะห์ข้อมูลต่อไป ดังนี้

4.4.1 การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล 2^k

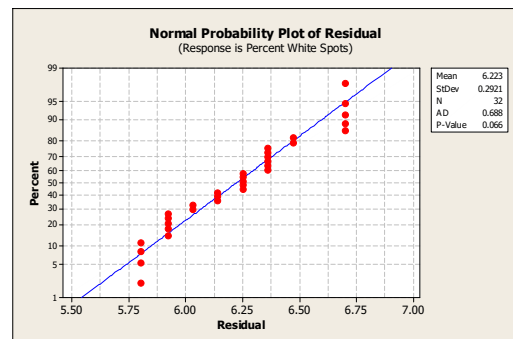
เมื่อได้ปัจจัยที่คาดว่าจะส่งผลกระทบต่อปัญหายางแห้งที่เกิดจุดขาว จึงได้นำปัจจัยทั้ง 4 ปัจจัย มาทำการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล 2^4 ซึ่งมี 16 การทดลอง แต่ผลการทดลองสามารถผลิตยางแห้ง 64 ตะก่ง ตะก่งละ 14 ตัวอย่าง รวมใช้จำนวนตัวอย่าง $64 \times 14 = 896$ ตัวอย่างต่อการทดลอง ประกอบไปด้วยปัจจัยควบคุม 4 ปัจจัย ซึ่งทำการศึกษาปัจจัย

ละ 2 ระดับ คือที่ระดับต่ำและสูง แต่ละระดับมีการทำซ้ำ 2 ซ้ำ รวมใช้จำนวนตัวอย่างทั้งสิ้น $16 \times 896 \times 2 = 28,672$ ตัวอย่าง ดังตารางที่ 4 และวิธีการตรวจสอบจุดขาวในยางแห้งจากยางแห้งไม่สมบูรณ์จะดูด้วยสายตา (Visual Control) โดยต้องพลิกยางแห้งเพื่อทำการตรวจเช็คจุดขาวรอบก่อนยางทุกก้อนตามเกณฑ์การตรวจสอบ และวัดค่าสัดส่วนของยางแห้งที่เกิดจุดขาวจากยางแห้งไม่สมบูรณ์ (Y) โดยการคิดสัดส่วนระหว่างจำนวนยางแห้งที่เกิดจุดขาวต่อจำนวนยางแห้งที่ผลิตทั้งหมดในแต่ละการทดลอง

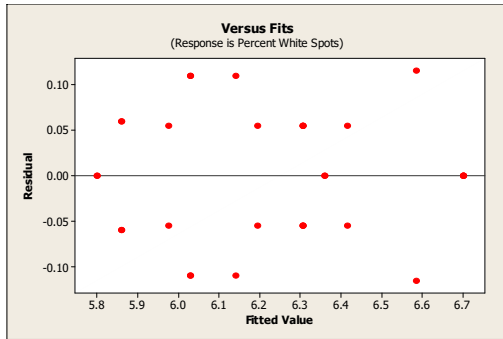
ตารางที่ 4 ปัจจัยและระดับในการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล 2^4

ปัจจัยที่ทำการศึกษา	สัญลักษณ์	ระดับ	
		ต่ำ	สูง
อุณหภูมิในการอบย่างแห้งไล่ความชื้น BURNER 1 (องศาเซลเซียส)	ปัจจัย A	95	105
อุณหภูมิในการอบย่างแห้งเพื่อให้ง่ายแห้ง BURNER 2 (องศาเซลเซียส)	ปัจจัย B	105	115
เวลาในการอบย่างแห้ง TIME (นาที)	ปัจจัย C	180	200
ขนาดความหนาของยางรม THICKNESS (มิลลิเมตร)	ปัจจัย D	4	6

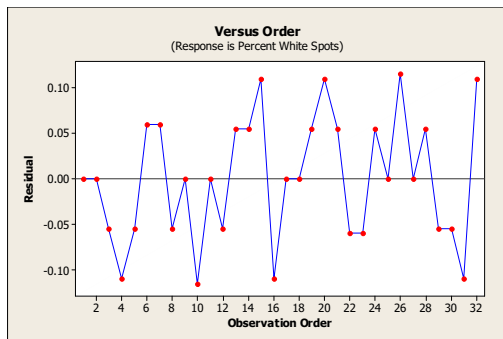
1) การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง เพื่อทดสอบว่าข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ และมีความเป็นอิสระต่อกันตรงตามข้อสมมติฐานเบื้องต้นของการออกแบบการทดลอง โดยแบ่งการทดสอบเป็นดังนี้



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 9 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

1.1) การตรวจสอบการกระจายแบบปกติ จากรูปที่ 9(ก) พบว่าค่า P-Value เท่ากับ 0.066 ซึ่งมีความมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงว่าไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ ดังนั้นจึงสรุปว่าค่าคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติ และข้อมูลที่ได้มีความถูกต้อง เชื่อถือได้

1.2) การตรวจสอบค่าคลาดเคลื่อนกับค่าพยากรณ์ จากรูปที่ 9(ข) พบว่าค่าคลาดเคลื่อนมีการกระจายแบบสุ่ม ไม่มีรูปแบบที่แน่นอนและมีค่าความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อนคงที่

1.3) การตรวจสอบค่าคลาดเคลื่อนกับลำดับเวลาที่เก็บข้อมูล จากรูปที่ 9(ค) พบว่าการกระจายตัวของค่าคลาดเคลื่อนมีความเป็นอิสระ มีการกระจายแบบสุ่ม ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน

2) การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance)

1.2) กำหนดรูปแบบจำลอง ดังนี้

$$Y_{ijklm} = \mu + A_i + B_j + C_k + D_l + (AB)_{ij} + (AC)_{ik} + (AD)_{il} + (BC)_{jk} + (BD)_{jl} + (CD)_{kl} + (ABC)_{ijk} + (ABD)_{ijl} + (ACD)_{ikl} + (BCD)_{jkl} + (ABCD)_{ijkl} + \epsilon_{ijklm} \quad (1)$$

โดยที่ $i = 1, 2; j = 1, 2; k = 1, 2; l = 1, 2; m = 1, 2$

2.2) ตั้งสมมติฐานการทดสอบ

H_0 : ปัจจัยไม่มีผลต่อสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวจากยางแท่งไม่สมบูรณ์

H_1 : ปัจจัยมีผลต่อสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวจากยางแท่งไม่สมบูรณ์

ทดสอบสมมติฐานที่ความเชื่อมั่น 95% หรือที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

3.2) ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล 2^4

ตารางที่ 5 การวิเคราะห์ความแปรปรวนการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล 2^4

แหล่งความผันแปร	องศาเสรี	ผลบวกกำลังสอง	ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสอง	ค่าสถิติ F	ค่า P-value
A	1	0.50250	0.502503	53.69	0.000*
B	1	0.30225	0.302253	32.29	0.000*
C	1	0.50250	0.502503	53.69	0.000*
D	1	0.44888	0.448878	47.96	0.000*
AB	1	0.22950	0.229503	24.52	0.000*
AC	1	0.05865	0.058653	6.27	0.024*
AD	1	0.12625	0.126253	13.49	0.002*
BC	1	0.00003	0.000028	0.00	0.957
BD	1	0.03990	0.039903	4.26	0.056
CD	1	0.01403	0.014028	1.50	0.239
ABC	1	0.00003	0.000028	0.00	0.957
ABD	1	0.01287	0.128778	13.76	0.002*
ACD	1	0.12625	0.126253	13.49	0.002*
BCD	1	0.01488	0.014878	1.59	0.225
ABCD	1	0.00165	0.001653	0.18	0.680
ความคลาดเคลื่อน	16	0.14975	0.009359		
ทั้งหมด	31	2.64585			

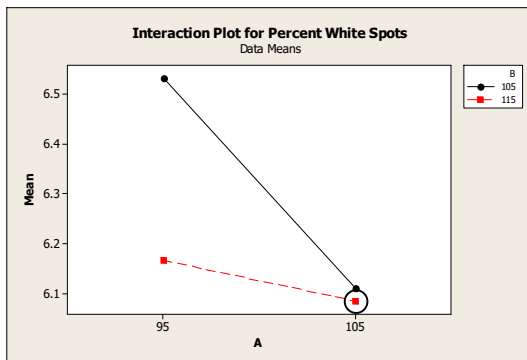
$S = 0.0967439$, $R-Sq = 94.34\%$, $R-Sq(adj) = 89.03\%$

จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนของการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล 2^4 ข้างต้นดังตารางที่ 5 พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวจากยางแท่งไม่สมบูรณ์ ซึ่งมีค่า P-Value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แบ่งออกเป็นอิทธิพลอันตรกิริยาของ 2 ปัจจัยและอิทธิพลหลัก โดย

อิทธิพลอันตรกิริยาของ 2 ปัจจัย คือ อุณหภูมิในการอบยางแห้งไล่ความชื้นและอุณหภูมิในการอบยางแห้งเพื่อให้ยางแห้ง (AB) อุณหภูมิในการอบยางแห้งไล่ความชื้นและเวลาในการอบยางแห้ง (AC) อุณหภูมิในการอบยางแห้งไล่ความชื้นและขนาดความหนาของยางผสม (AD) ซึ่งทำให้อิทธิพลหลัก คือ อุณหภูมิในการอบยางแห้งไล่ความชื้น (A) อุณหภูมิในการอบยางแห้งเพื่อให้ยางแห้ง (B) เวลาในการอบยางแห้ง (C) ขนาดความหนาของยางผสม (D) มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อสัดส่วนของยางแห้งที่เกิดจุดขาวจากยางแห้งไม่สมบูรณ์ โดยที่จะไม่พิจารณาอิทธิพลอันตรกิริยาดังแต่ 3 ปัจจัยขึ้นไป มีสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R-Square) เท่ากับ 94.34 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีค่าเข้าใกล้ 100 แสดงให้เห็นว่า ตัวแบบจำลองการถดถอยที่ได้มานั้นสามารถอธิบายความผันแปรของค่าตัวแปรตอบสนอง ที่กระจายรอบค่าเฉลี่ยได้เป็นอย่างดี (Chutima, 2002)

3) สรุปผลการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล 2^4 โดยพิจารณาจาก Factorial Plots (Chutima, 2002)

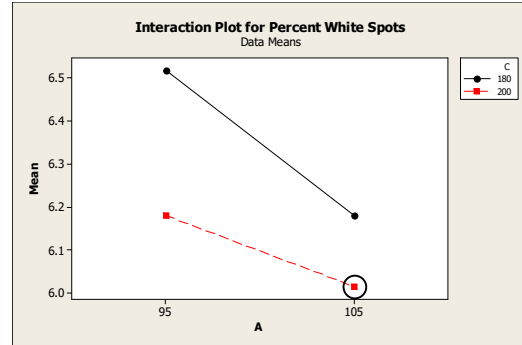
จากผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน ของการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล 2^4 ข้างต้น ดังตารางที่ 5 เมื่อนำปัจจัยที่มีผลต่อสัดส่วนของยางแห้งที่เกิดจุดขาวจากยางแห้งไม่สมบูรณ์ มาสร้างกราฟความสัมพันธ์ระหว่างแต่ละระดับของปัจจัยและสัดส่วนของยางแห้งที่เกิดจุดขาว ได้ผลดังนี้



รูปที่ 10 กราฟอิทธิพลอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิในการอบยางแห้งไล่ความชื้น (A) และอุณหภูมิในการอบยางแห้งเพื่อให้ยางแห้ง (B)

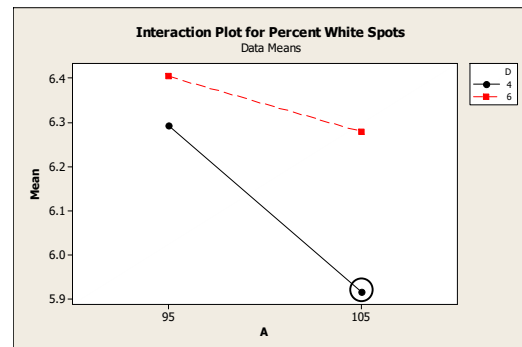
จากรูปที่ 10 สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อกำหนดอุณหภูมิในการอบยางแห้งไล่ความชื้น (A) 105 องศาเซลเซียส และอุณหภูมิในการอบยางแห้งเพื่อให้ยางแห้ง (B) ที่ 115 องศาเซลเซียส สัดส่วนของยางแห้งที่เกิดจุดขาว เท่ากับ 6.10

เปอร์เซ็นต์ สรุปได้ว่าการเพิ่มอุณหภูมิทั้งสองในการอบยางแห้งให้สูงขึ้นส่งผลให้สัดส่วนของยางแห้งที่เกิดจุดขาวลดลงตามลำดับ



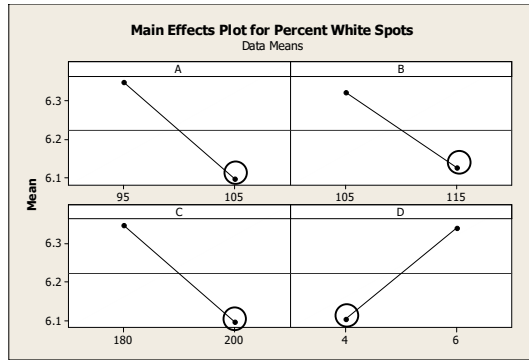
รูปที่ 11 กราฟอิทธิพลอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิในการอบยางแห้งไล่ความชื้น (A) และเวลาในการอบยางแห้ง (C)

จากรูปที่ 11 สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อกำหนดอุณหภูมิในการอบยางแห้งไล่ความชื้น (A) 105 องศาเซลเซียส และเวลาในการอบยางแห้ง (C) ที่ 200 นาที สัดส่วนของยางแห้งที่เกิดจุดขาว เท่ากับ 6.01 เปอร์เซ็นต์ สรุปได้ว่าการเพิ่มอุณหภูมิในการอบยางให้สูงขึ้นและเวลาการอบยางแห้งให้นานขึ้นส่งผลให้สัดส่วนของยางแห้งที่เกิดจุดขาวลดลงตามลำดับ



รูปที่ 12 กราฟอิทธิพลอันตรกิริยาระหว่างอุณหภูมิในการอบยางแห้งไล่ความชื้น (A) และขนาดความหนาของยางผสม (D)

จากรูปที่ 12 สามารถอธิบายได้ว่าเมื่อกำหนดอุณหภูมิในการอบยางแห้งไล่ความชื้น (A) 105 องศาเซลเซียส และขนาดความหนาของยางผสม (D) 4 มิลลิเมตร สัดส่วนของยางแห้งที่เกิดจุดขาว เท่ากับ 5.91 เปอร์เซ็นต์ สรุปได้ว่าการเพิ่มอุณหภูมิในการอบยางให้สูงขึ้นและความหนาของยางผสมที่ขนาดเล็กส่งผลให้สัดส่วนของยางแห้งที่เกิดจุดขาวลดลงตามลำดับ



รูปที่ 13 กราฟอิทธิพลหลักของปัจจัยที่มีผลต่อสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาว

จากรูปที่ 10 ถึง 13 สามารถอธิบายได้ว่ากราฟอิทธิพลหลักและอิทธิพลอันตรกิริยาควตังค่าที่เหมาะสมของปัจจัยที่มีผลต่อสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาว คือ อุณหภูมิในการอบยางแท่งไล่ความชื้น (A) ที่ระดับสูง 105 องศาเซลเซียส อุณหภูมิในการอบยางแท่งเพื่อให้ง่ายแห้ง (B) ที่ระดับสูง 115 องศาเซลเซียส เวลาในการอบยางแท่ง (C) ที่ระดับสูง 200 นาที ขนาดความหนาของยางผสม (D) ที่ระดับต่ำ 4 มิลลิเมตร จะส่งผลให้สัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวลดลง

4.4.2 การออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน

ตารางที่ 6 ปัจจัยและระดับในการออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์ - เบห์นเคน

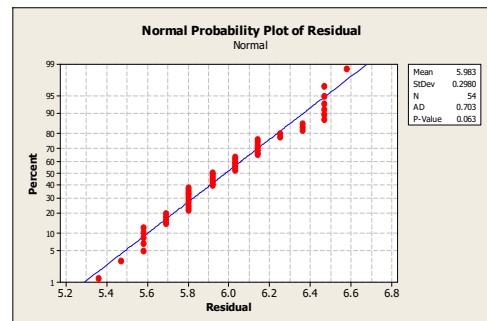
ปัจจัยที่ทำการศึกษา	สัญลักษณ์	ระดับ		
		ต่ำ	กลาง	สูง
อุณหภูมิในการอบยางแท่งไล่ความชื้น BURNER 1 (องศาเซลเซียส)	ปัจจัย A	100	105	110
อุณหภูมิในการอบยางแท่งเพื่อให้ง่ายแห้ง BURNER 2 (องศาเซลเซียส)	ปัจจัย B	110	115	120
เวลาในการอบยางแท่ง TIME (นาที)	ปัจจัย C	190	200	210
ขนาดความหนาของยางผสม THICKNESS (มิลลิเมตร)	ปัจจัย D	3	4	5

หลังจากที่ได้ทำการทดลองเบื้องต้นทำให้ได้ปัจจัยที่มีผลต่อสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวจากยางแท่งไม่สมบูรณ์ ในขั้นตอนต่อไปทำการทดลองเพื่อหาระดับที่เหมาะสมโดยใช้

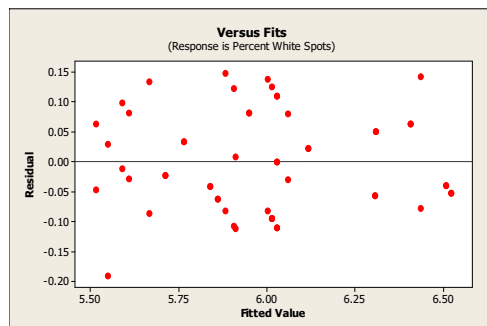
แผนการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน ซึ่งแผนการทดลองนี้ได้มีการกำหนดระดับของปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง 3 ระดับ และในการกำหนดระดับได้มีการปรับค่าระดับของปัจจัยต่างๆ ให้ออกนอกช่วงที่เคยทำการทดลองและผลิตจริงเล็กน้อย เพราะถ้าปรับค่าพารามิเตอร์มากเกินไป อาจทำให้สัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวลดลงแต่เกิดปัญหาอื่นๆ ตามมาได้ ดังตารางที่ 6

1) การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

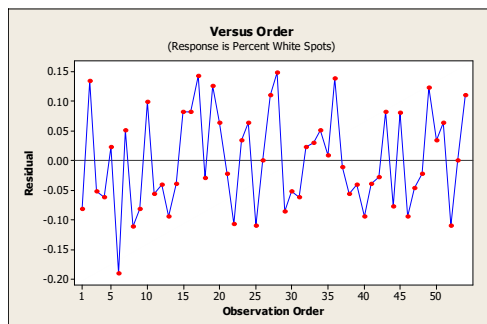
เพื่อทดสอบว่าข้อมูลมีการกระจายแบบปกติ และมีความเป็นอิสระต่อกัน ตรงตามข้อสมมติฐานเบื้องต้นของการออกแบบการทดลอง โดยแบ่งการทดสอบเป็นดังนี้



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 14 การตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง

1.1) การตรวจสอบการกระจายแบบปกติ จากรูปที่ 14(ก) พบว่าค่า P-Value เท่ากับ 0.063 ซึ่งมีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 แสดงว่าไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ ดังนั้นจึงสรุปว่าค่าคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงแบบปกติ และข้อมูลที่ได้มีความถูกต้อง เชื่อถือได้

2.1) การตรวจสอบค่าคลาดเคลื่อนกับค่าพยากรณ์ จากรูปที่ 14(ข) พบว่าค่าคลาดเคลื่อนมีการกระจายแบบสุ่ม ไม่มีรูปแบบที่แน่นอนและมีค่าความแปรปรวนของค่าคลาดเคลื่อนคงที่

3.1) การตรวจสอบค่าคลาดเคลื่อนกับลำดับเวลาที่เก็บข้อมูล จากรูปที่ 14(ค) พบว่าการกระจายตัวของค่าคลาดเคลื่อนมีความเป็นอิสระ มีการกระจายแบบสุ่ม ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน

2) ผลการวิเคราะห์การถดถอยแบบพหุคูณผลตอบสนอง (Myers et al., 2016)

ตารางที่ 7 วิเคราะห์การถดถอยแบบพหุคูณผลตอบสนองสำหรับการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน

ตัวแปรอิสระ	ค่าประมาณ β_i	ค่าสถิติ T	ค่า P-Value
Constant	6.0300	153.751	0.000
A	-0.21917	-11.176	0.000*
B	0.20875	10.645	0.000*
C	-0.24125	-12.303	0.000*
D	0.13833	7.054	0.000*
AA	-0.03000	-1.020	0.314
BB	-0.01687	-0.574	0.569
CC	0.00687	0.234	0.816
DD	-0.06500	-2.210	0.033*
AB	-0.11125	-3.275	0.002*
AC	-0.03000	-0.883	0.383
AD	-0.01375	-0.405	0.688
BC	-0.03875	-1.141	0.261
BD	0.11125	3.275	0.002*
CD	0.04250	1.251	0.218

จากตารางที่ 7 พบว่าปัจจัยที่มีผลต่อสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาว ซึ่งมีค่า P-Value น้อยกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 คือ

คือ อุณหภูมิในการอบยางแท่งไล่ความชื้น (A) อุณหภูมิในการอบยางแท่งเพื่อให้ยางแห้ง (B) เวลาในการอบยางแท่ง (C) ขนาดความหนาของยางผสม (D) พจน์กำลังสองของขนาดความหนาของยางผสม (DD) อิทธิพลอันตรกิริยาของ 2 ปัจจัยระหว่างอุณหภูมิในการอบยางแท่งไล่ความชื้นและอุณหภูมิในการอบยางแท่งเพื่อให้ยางแห้ง (AB) และอิทธิพลอันตรกิริยาของ 2 ปัจจัยระหว่างอุณหภูมิในการอบยางแท่งเพื่อให้ยางแห้งและขนาดความหนาของยางผสม (BD)

จากนั้นนำปัจจัยที่มีผลต่อสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวจากการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน มาทำการวิเคราะห์การถดถอยต่อเพื่อสร้างสมการถดถอยและพยากรณ์สัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาว และวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยต่างๆ ที่มีผลต่อสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาว ได้ผลดังตารางที่ 8

ตารางที่ 8 วิเคราะห์การถดถอยสำหรับตัวแปรอิสระ A B C D DD AB และ BD

ตัวแปรอิสระ	ค่าประมาณ β_i	ค่าสถิติ T	ค่า P-Value
Constant	6.00867	348.728	0.000
A	-0.21917	-11.377	0.000
B	0.20875	10.836	0.000
C	-0.24125	-12.523	0.000
D	0.13833	7.181	0.000
DD	-0.05700	-2.205	0.032
AB	-0.11125	-3.334	0.002
BD	0.11125	3.334	0.002

$S = 0.0943740$, $R-Sq = 91.29\%$, $R-Sq(adj) = 89.97\%$

จากตารางที่ 8 ได้สมการถดถอยดังนี้

$$Y = 6.00867 - 0.21917A + 0.20875B - 0.24125C + 0.13833D - 0.05700DD - 0.11125AB + 0.11125BD \quad (2)$$

โดยกำหนดให้

อุณหภูมิในการอบยางแท่งไล่ความชื้น (A)

มีค่าอยู่ระหว่าง 100 - 110 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิในการอบยางแท่งเพื่อให้ยางแห้ง (B)

มีค่าอยู่ระหว่าง 110 - 120 องศาเซลเซียส

เวลาในการอบยางแท่ง (C)

มีค่าอยู่ระหว่าง 190 – 210 นาที

ขนาดความหนาของยางผสม (D)

มีค่าอยู่ระหว่าง 3 - 5 มิลลิเมตร

ซึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ของการตัดสินใจ (R-Square) เท่ากับ 91.29 เปอร์เซ็นต์ หมายความว่าในความผันแปรของสัดส่วนยางแห้งที่เกิดจุดขาวทั้งหมด 100 เปอร์เซ็นต์ สมการถดถอยสามารถพยากรณ์ได้ถูกต้องถึง 91.29 เปอร์เซ็นต์

3) การตรวจสอบความเหมาะสมของรูปแบบ (Lack of Fit Test) มีสมมติฐาน ดังนี้ (Khuri, 2006)

H_0 : สมการเหมาะสมแล้ว

H_1 : สมการขาดความเหมาะสม

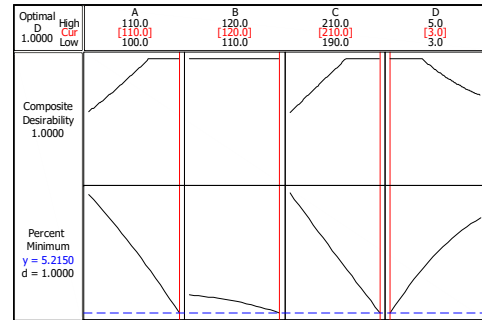
ทดสอบสมมติฐานที่ความเชื่อมั่น 95% หรือที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ตารางที่ 9 การวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อตรวจสอบความเหมาะสมของรูปแบบความถดถอย

แหล่งความผันแปร	องศาเสรี	ผลบวกกำลังสอง	ค่าเฉลี่ยผลบวกกำลังสอง	ค่าสถิติ F	ค่า P-value
Regression	7	4.29610	61373.0	68.91	0.000
Residual Error	46	0.40970	0.00891		
Lack of Fit	17	0.15600	0.00918	1.05	0.441
Pure Error	29	0.25370	0.00875		
Total	53	4.70580			

จากตารางที่ 9 จะเห็นได้ว่าค่า P-Value ของ Lack of Fit = 0.441 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.05 จึงไม่สามารถปฏิเสธ H_0 แสดงว่ารูปแบบการถดถอยที่ได้เหมาะสมแล้ว

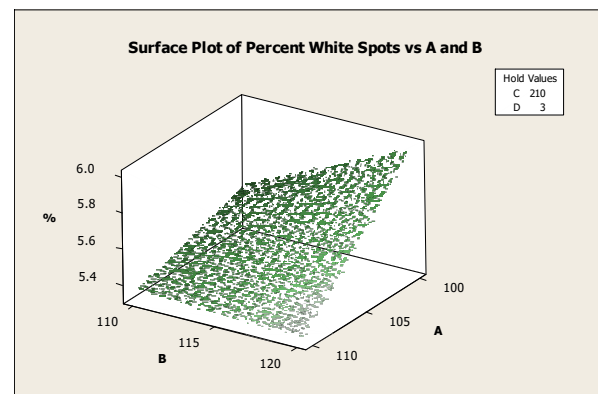
4) สรุปผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่ได้จากการออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคน โดยพิจารณาจากกราฟพื้นผิวผลตอบสนองและ Response Optimizer



รูปที่ 15 ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจาก Response Optimizer

ตารางที่ 10 ค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับกระบวนการผลิตยางแห้ง

ปัจจัย	ระดับ
อุณหภูมิในการอบยางแห้ง	110
ไล่ความชื้น (A)	องศาเซลเซียส
อุณหภูมิในการอบยางแห้ง	120
เพื่อให้ยางแห้ง (B)	องศาเซลเซียส
เวลาในการอบยางแห้ง (C)	210 นาที
ขนาดความหนาของยางผสม (D)	3 มิลลิเมตร

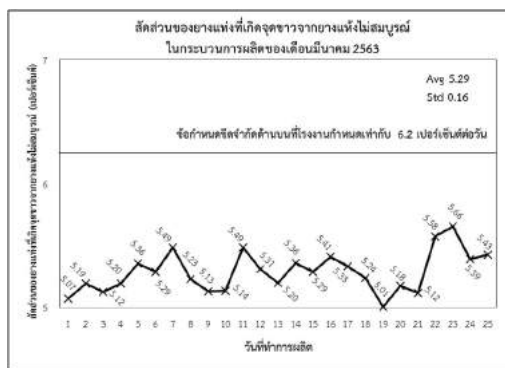


รูปที่ 16 กราฟพื้นผิวผลตอบสนองในความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิในการอบยางแห้งไล่ความชื้น (A) อุณหภูมิในการอบยางแห้งเพื่อให้ยางแห้ง (B) (เมื่อกำหนดเวลาในการอบยางแห้ง (C) ที่ 210 นาที และขนาดความหนาของยางผสม (D) 3 มิลลิเมตร)

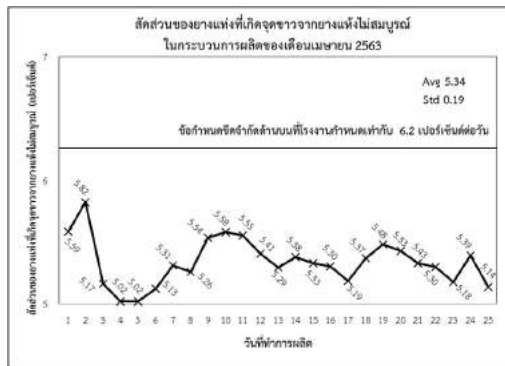
ผลการวิเคราะห์ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจากกราฟพื้นผิวผลตอบสนองและ Response Optimizer แสดงดังรูปที่ 15-16 และตารางที่ 10 โดยได้ค่าที่ดีที่สุด (Y) คือ มีสัดส่วนของยางแห้งที่เกิดจุดขาวจากยางแห้งไม่สมบูรณ์ เท่ากับ 5.215 เปอร์เซ็นต์ และวัดค่าความพึงพอใจโดยรวมของผลตอบสนอง (Composite Desirability: D) จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0-1 ถ้า D มี

ค่าเท่ากับ 1 หมายถึง ผลตอบนั้นได้รับความพึงพอใจอย่างสมบูรณ์ (Khuri, 2006)

หลังจากได้ดำเนินการปรับปรุงแก้ไขตามวิธีการข้างต้นแล้ว คณะผู้วิจัยได้ทำการเก็บข้อมูลสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวจากยางแท่งไม่สมบูรณ์หลังการปรับปรุงเพื่อใช้เปรียบเทียบกับกระบวนการ โดยเก็บข้อมูลระหว่างเดือนมีนาคม - เมษายน พ.ศ. 2563 รวมทั้งหมด 2 เดือน เดือนละ 25 วัน วันละ 3 กะ ใช้ข้อมูลทั้งสิ้น 75 ครั้ง โดยนำข้อมูลมาคำนวณค่าสถิติต่างๆ และวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการ แสดงดังรูปที่ 17 และตารางที่ 11



(ก)



(ข)

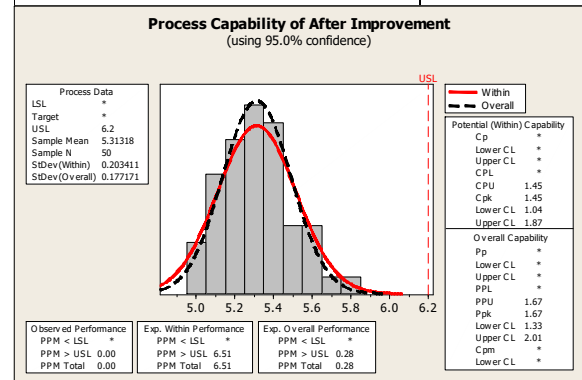
รูปที่ 17 สัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวจากยางแท่งไม่สมบูรณ์ในเดือนมีนาคม - เมษายน พ.ศ. 2563

จากรูปที่ 17 พบว่าสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวในเดือนมีนาคม พ.ศ. 2563 (ก) คิดเฉลี่ยเป็น 5.29 เปอร์เซ็นต์ต่อวัน ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.16 เปอร์เซ็นต์ต่อวัน ได้ลดลงกว่าเดิมคิดเป็น 17.47 เปอร์เซ็นต์ และในเดือนเมษายน พ.ศ. 2563 (ข) คิดเฉลี่ยเป็น 5.34 เปอร์เซ็นต์ต่อวัน ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.19 เปอร์เซ็นต์ต่อวัน ได้ลดลงกว่าเดิมคิดเป็น 16.69 เปอร์เซ็นต์ จากเดือนพฤศจิกายน - ธันวาคม พ.ศ. 2562

หลังจากการปรับปรุงกระบวนการผลิตยางแท่ง สามารถสรุปได้ว่าการปรับปรุงในกระบวนการนี้สามารถลดปัญหาได้จริง และตรงตามวัตถุประสงค์ที่กำหนดไว้

ตารางที่ 11 ค่าสถิติต่างๆ จากผลการทดลองหลังการปรับปรุงสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวจากยางแท่งไม่สมบูรณ์ ในช่วงระหว่างเดือนมีนาคม - เมษายน พ.ศ. 2563

ค่าทางสถิติ (เปอร์เซ็นต์ต่อวัน)	หลังการปรับปรุง
สัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวเฉลี่ย	5.31
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.18
ขอบเขตบนสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวเฉลี่ยในช่วงความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์	5.36



รูปที่ 18 การวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการของสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวหลังการปรับปรุง

จากรูปที่ 18 พบว่าผลการวิเคราะห์สมรรถภาพกระบวนการที่ได้จากข้อมูลกระบวนการผลิตหลังการปรับปรุง มีข้อกำหนดขีดจำกัดด้านบน (USL) เพียงด้านเดียว คือ สัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาว โดยค่าที่โรงงานกำหนดคือ 6.2 เปอร์เซ็นต์ต่อวัน มีค่า C_{pk} เท่ากับ 1.45 แสดงว่ากระบวนการอยู่ในเกณฑ์ดี ในช่วงความเชื่อมั่นของกระบวนการเท่ากับ $1.04 < C_{pk} < 1.87$

ตารางที่ 12 ต้นทุนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวซึ่งต้องนำมาผลิตซ้ำ

รายการ	บาท/กิโลกรัม
ต้นทุนคงที่	
- ค่าที่ดิน อาคารโรงงาน อุปกรณ์ เครื่องจักร รถยก	18.0
ยาง	
- ค่าใช้จ่ายในการบริหาร	09.0
- ค่าดอกเบี้ยเงินลงทุนหมุนเวียน	58.0

ตารางที่ 12 (ต่อ)

รายการ	บาท/ กิโลกรัม
ต้นทุนผันแปร	
- ค่าแรงงาน	72.0
- ค่าซ่อมบำรุงเครื่องจักร	07.0
- ค่าไฟฟ้า	50.0
- ก๊าซแอลพีจี	17.0
- น้ำบาดาล	03.0
- ค่าวัสดุสิ้นเปลือง	04.0
รวม	38.2

ที่มา : ข้อมูลจากฝ่ายบัญชีของโรงงานการศึกษา

จากตารางที่ 12 การศึกษาต้นทุนเชิงเศรษฐศาสตร์ของยางแท่งที่เกิดจุดขาวซึ่งต้องนำมาผลิตซ้ำ เท่ากับ 2.38 บาท/กิโลกรัม (Sriwarin et al., 2014) โดยหลังการปรับปรุงกระบวนการผลิต สัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวเฉลี่ย 5.31 เปอร์เซ็นต์ต่อวัน ได้ลดลงจากเดิมคิดเป็น 17.16 เปอร์เซ็นต์หรือลดลงเท่ากับ 388,500 กิโลกรัมต่อปี ดังนั้น สามารถคาดการณ์ได้ว่าต้นทุนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวซึ่งต้องนำมาผลิตซ้ำจะลดลงได้ 924,630 บาทต่อปี

4.5 การควบคุมกระบวนการ

ในขั้นตอนนี้จะเป็นการควบคุมกระบวนการเพื่อรักษาภาพหลังการปรับปรุงกระบวนการผลิต โดยมีการปรับปรุงคู่มือการปฏิบัติงาน (Work Instructions) ที่ได้จากการทดลองที่เหมาะสมจากการปรับปรุงมาแล้วนั้น เพื่อเก็บไว้เป็นมาตรฐานในการทำงานและใช้อบรม (Training) ให้คนรุ่นหลังต่อไป (Leenatham et al., 2019) จากนั้นคณะผู้วิจัยทำการยืนยันผลการปรับปรุงกระบวนการผลิตยางแท่ง เพื่อเป็นผลสรุปว่ากระบวนการผลิตที่ได้รับการปรับปรุงแล้วนั้นสามารถใช้ได้ในระยะยาว โดยได้ทำการทดลองเก็บข้อมูลสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาว ทั้งหมด 2 เดือน เดือนละ 25 วัน ในระหว่างเดือนพฤษภาคม – มิถุนายน พ.ศ. 2563 โดยแบ่งเป็นครั้งที่ 1 (25 วันในเดือนพฤษภาคม พ.ศ. 2563) และครั้งที่ 2 (25 วันในเดือนมิถุนายน พ.ศ. 2563) ใช้ข้อมูลทั้งสิ้น 50 ครั้ง

4.5.1 การคำนวณค่าสถิติต่างๆ

จากผลการทดลองยืนยันผลการวิเคราะห์ข้อมูลได้ค่าสถิติต่างๆ ได้แก่ สัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน และขอบเขตบนสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวเฉลี่ยในช่วงความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ แสดงดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 ค่าสถิติต่างๆ จากการทดลองยืนยันผลข้อมูลสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวจากยางแท่งไม่สมบูรณ์ในช่วงระหว่างเดือนพฤษภาคม – มิถุนายน พ.ศ. 2563

ค่าทางสถิติ (เปอร์เซ็นต์ต่อวัน)	ยืนยันผล
สัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวเฉลี่ย	5.30
ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	0.17
ขอบเขตบนสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวเฉลี่ยในช่วงความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์	5.34

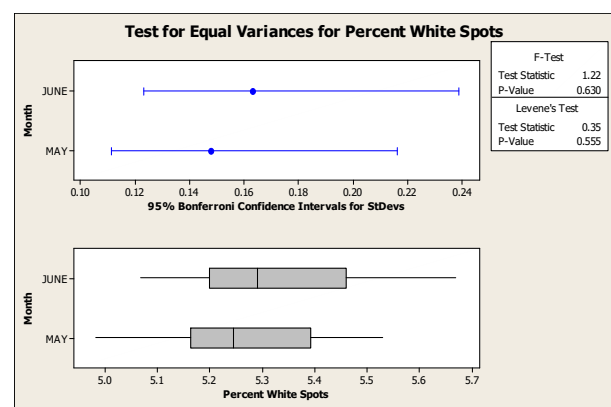
4.5.2 การทดสอบสมมติฐานกรณีเก็บตัวอย่างสองชุดที่เป็นอิสระต่อกัน

1) การทดสอบความแปรปรวน ในการทดลองเพื่อตรวจสอบสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวจากยางแท่งไม่สมบูรณ์ จากการเก็บข้อมูล 2 ครั้ง ว่าค่าความแปรปรวนของทั้งสองครั้งนี้มีค่าเท่ากันหรือไม่ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งมีสมมติฐาน ดังนี้

$$H_0 : \sigma_1^2 = \sigma_2^2$$

$$H_1 : \sigma_1^2 \neq \sigma_2^2$$

จะได้ผลการทดสอบความแปรปรวน ดังนี้



รูปที่ 19 กราฟแสดงผลการทดสอบความแปรปรวนของการยืนยันผลการวิเคราะห์ข้อมูล

จากรูปที่ 19 สามารถสรุปได้ว่าค่า P-Value เท่ากับ 0.630 มากกว่าค่าระดับนัยสำคัญ ดังนั้น จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลัก แสดงว่าไม่มีหลักฐานแน่ชัดที่จะบ่งชี้ว่าค่าความแปรปรวนของสัดส่วนยางแท่งที่เกิดจุดขาวจากยางแท่งไม่สมบูรณ์ ทั้งสองครั้งนี้ไม่เท่ากัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

2) การทดสอบค่าเฉลี่ย ในการทดสอบเพื่อตรวจสอบสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวจากยางแท่งไม่สมบูรณ์ จากการเก็บข้อมูล 2 ครั้ง ว่าค่าเฉลี่ยของทั้งสองครั้งนี้มีค่าเท่ากันหรือไม่ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ซึ่งมีสมมติฐาน ดังนี้

โดยทดสอบว่า

$$H_0 : \mu_1 = \mu_2$$

$$H_1 : \mu_1 \neq \mu_2$$

จะได้ผลการทดสอบค่าเฉลี่ย ดังนี้

ตารางที่ 14 ผลการทดสอบค่าเฉลี่ยของการยืนยันผลการวิเคราะห์ข้อมูล

แหล่งที่มา	ค่า T-Value	องศาเสรี (d.f.)	ค่า P-Value
สัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวจากยางแท่งไม่สมบูรณ์	1.25	48	218.0

จากตารางที่ 14 สามารถสรุปได้ว่าค่า P-Value เท่ากับ 0.218 มากกว่าค่าระดับนัยสำคัญ ดังนั้น จึงไม่สามารถปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ นั่นคือ ค่าเฉลี่ยของสัดส่วนยางแท่งที่เกิดจุดขาวจากยางแท่งไม่สมบูรณ์ ทั้งสองครั้งนี้ไม่ต่างกัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

5. สรุปผลและอภิปรายผลการวิจัย

5.1 สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตยางแท่ง STR 20 ภายใต้ข้อจำกัดที่เป็นไปได้ ผลการวิจัยพบว่า ก่อนปรับปรุงกระบวนการผลิต สัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวเฉลี่ย 6.41 เปอร์เซ็นต์ต่อวัน ซึ่งสูงกว่าข้อกำหนดขีดจำกัดด้านบนที่โรงงานกำหนด คือ 6.2 เปอร์เซ็นต์ต่อวัน โดยจากการวิเคราะห์ด้วยแผนภาพสาเหตุและผล และการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบในกระบวนการผลิตพบว่า มีสาเหตุหลักมาจากค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในกระบวนการ

ผลิตยางแท่งไม่เหมาะสม ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงได้ประยุกต์ใช้แนวคิดระบบการผลิตแบบลีนซิกซ์ซิกม่าเพื่อปรับปรุงงาน และใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล 2^K เพื่อรองรับปัจจัยในเบื้องต้นและการออกแบบการทดลองแบบบล็อกซ์-เบห์นเคนเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมในกระบวนการผลิต จากผลการทดลองพบว่า ค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตยางแท่ง คือ อุณหภูมิในการอบยางแท่งไล่ความชื้น 110 องศาเซลเซียส อุณหภูมิในการอบยางแท่งเพื่อให้ยางแท่ง 120 องศาเซลเซียส เวลาในการอบยางแท่ง 210 นาที ขนาดความหนาของยางผสม 3 มิลลิเมตร หลังการปรับปรุงกระบวนการผลิต สัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวเฉลี่ย 5.31 เปอร์เซ็นต์ต่อวัน ได้ลดลงจากเดิมคิดเป็น 17.16 เปอร์เซ็นต์ มีค่าสมรรถภาพกระบวนการหลังการปรับปรุง C_{pk} เท่ากับ 1.45 แสดงว่ากระบวนการอยู่ในเกณฑ์ดี โดยช่วงความเชื่อมั่นของกระบวนการเท่ากับ $1.04 < C_{pk} < 1.87$ ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และสามารถคาดการณ์ได้ว่าต้นทุนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวซึ่งต้องนำมาผลิตซ้ำจะลดลงได้ 924,630 บาทต่อปี

5.2 อภิปรายผลการวิจัย

จากการประยุกต์ใช้การออกแบบการทดลองเชิงวิศวกรรมเพื่อหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการผลิตยางแท่งพบว่า ทุกปัจจัยที่ทำการทดลองมีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวจากยางแท่งไม่สมบูรณ์ และสามารถวิเคราะห์ผลการทดลองต่อได้ว่าสภาวะเหมาะสมในกระบวนการผลิตที่ส่งผลให้สัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวลดลง มีระดับของปัจจัยอุณหภูมิในการอบยางแท่งไล่ความชื้น (A) อุณหภูมิในการอบยางแท่งเพื่อให้ยางแท่ง (B) และเวลาในการอบยางแท่ง (C) ที่ระดับสูง ซึ่งแปรผกผันกับระดับของปัจจัยขนาดความหนาของยางผสม (D) ที่ระดับต่ำ โดยสามารถอธิบายได้ดังนี้

5.2.1 อุณหภูมิในการอบยางแท่งไล่ความชื้น (A) พบว่าเมื่อปรับอุณหภูมิที่ 95 องศาเซลเซียสจะส่งผลให้เกิดสัดส่วนของยางแท่งที่เกิดจุดขาวสูงกว่าที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เนื่องจากยางก่อนอบจะมีความชื้นค่อนข้างสูงโดยเฉลี่ย 20 เปอร์เซ็นต์ (Sae-ui & Sirisingha, 2007) ดังนั้นในการผลิตยางแท่งควรที่จะไล่ความชื้นออกจากเม็ดยางให้ได้มากที่สุดซึ่งจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิช่วงแรกของการอบยางที่พอเหมาะ และใน

การปรับค่าอุณหภูมิช่วงแรกไม่ควรที่จะสูงจนเกินไปเพราะอาจส่งผลกระทบบ้างได้

5.2.2 อุณหภูมิในการอบย่างแห้งเพื่อให้ยางแห้ง (B) พบว่าเมื่อปรับอุณหภูมิที่ 105 องศาเซลเซียสจะส่งผลให้เกิดสัดส่วนของยางแห้งที่เกิดจุดขาวสูงกว่าที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เนื่องจากอุณหภูมิการอบย่างในช่วงที่สองจะสูงที่สุด เพื่อให้ยางได้รับความร้อนและแห้งอย่างทั่วถึงทั้งบนผิวและภายในเม็ดยาง และในการปรับค่าอุณหภูมิช่วงที่สองไม่ควรที่จะสูงจนเกินไปเพราะอาจส่งผลกระทบบ้างได้

5.2.3 เวลาในการอบย่างแห้ง (C) พบว่าเมื่อปรับเวลาในการอบย่างที่ 180 นาทีจะส่งผลให้เกิดสัดส่วนของยางแห้งที่เกิดจุดขาวสูงกว่าที่เวลาในการอบย่าง 210 นาที เนื่องจากการให้เวลาที่นานกว่าในการอบย่างทำให้การถ่ายเทความร้อนกระจายได้ทั่วเม็ดยาง ส่งผลให้เนื้อยางทุกส่วนได้รับความร้อนทั่วถึงกัน โดยยางจะแห้งโดยสมบูรณ์ และในการปรับเวลาในการอบย่างไม่ควรที่จะนานจนเกินไปเพราะอาจส่งผลกระทบบ้างได้

5.2.4 ขนาดความหนาของยางผสม (D) พบว่าเมื่อขนาดความหนาของยางผสมที่ 6 มิลลิเมตรจะส่งผลให้เกิดสัดส่วนของยางแห้งที่เกิดจุดขาวสูงกว่าที่ขนาดความหนาของยางผสม 3 มิลลิเมตร เนื่องจากเม็ดยางที่มีขนาดใหญ่เกินไปยางจะอบไม่สุกทำให้เกิดจุดขาวในยางได้ และถ้ามีขนาดเม็ดเล็กจนเกินไปหากอบย่างที่อุณหภูมิสูงจะทำให้สมบัติทางกายภาพของยางแห้งลดลงได้ ดังนั้นขนาดเม็ดยางที่มีขนาดพอเหมาะกับความร้อนในเตาอบจะสามารถผ่านช่องว่างระหว่างเม็ดยางได้สะดวกกว่าส่งผลให้การอบย่างแห้งโดยสมบูรณ์

6. ข้อเสนอแนะการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นแนวทางสำหรับการพัฒนาประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตยางแห้ง STR 20 ด้วยการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในกระบวนการต่อการลดสัดส่วนของยางแห้งที่เกิดจุดขาว อย่างไรก็ตามเพื่อให้งานวิจัยนี้สมบูรณ์มากยิ่งขึ้นควรต้องต่อยอดการปรับปรุง ในเรื่องการตรวจสอบจุดขาวในยางแห้งโดยทั่วไปจะใช้พนักงานฝ่ายควบคุมคุณภาพตัดสินใจแยกเกรดยางต่างๆ ว่ายอมรับหรือไม่ยอมรับด้วยสายตา (Visual Control) ซึ่งคณะผู้วิจัยเสนอแนะว่าควรสร้างเครื่องตรวจจับข้อบกพร่องอัตโนมัติด้วยการแยกคุณสมบัติของสียาง จะช่วยให้ได้ข้อมูลเกรดยางที่มีความถูกต้องและแม่นยำมากขึ้น อีกทั้งลด

ความผิดพลาดที่เกิดจากมนุษย์ได้อีกด้วย แต่ทั้งนี้ต้องพิจารณาในด้านความคุ้มค่าด้วย

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณ โรงงานกรณีศึกษา ที่ได้ให้โอกาสคณะผู้วิจัยได้ทำการศึกษาวิจัยเพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิตยางแห้ง ช่วยเหลืออนุเคราะห์ข้อมูลในการทำวิจัยฉบับนี้ และเอื้อเฟื้อสถานที่เพื่อการวิจัยด้วยดีเสมอมา

8. เอกสารอ้างอิง

- Breyfogle III, F. W. (2003). *Implementing six sigma: smarter solutions using statistical methods* (2nd ed.). John Wiley & Sons.
- Chutima, P. (2002). *Engineering experimental design*. Chulalongkorn University Press.
- Coelho, T., Braga, F., Silva, N., Dantas, C., Lopes, C., Sousa, S. & Vieira, E. (2019). Optimization of the protein extraction method of goat meat using factorial design and response surface methodology. *Journal of Food Chemistry*, 281, 63-70. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2018.12.055>
- Hassan, M. (2013). Applying lean six sigma for waste reduction in a manufacturing environment. *American Journal of Industrial Engineering*, 1(2), 28-35. <https://doi.org/10.12691/ajie-1-2-4>
- Homkhiew, C., Boomchouytan, W., & Rawangwong, S. (2017). Optimal manufacturing parameters of rubberwood flour/ high density polyethylene composites using box-behnken design. *The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, 27(2), 315-328. <https://doi.org/10.14416/j.kmutnb.2017.03.009>
- Kaewploy, S. & Boonseng, K. (2014). Design of experiment for evaluating the optimal condition in drying process of rubberwood. *Khon Kaen University Research Journal*, 19(2), 284-292.
- Ketsarapong, P. & Sriyanalugsana, S. (2019). Reducing defective in food refrigerator production process with six sigma technique. *Kasem Bundit Engineering Journal*, 9(2), 25-37.
- Khuri, A. (2006). *Response surface methodology and related topics*. World Scientific Publishing.

- Leenatham A. & Khemavuk P. (2019). Process improvement of PTCA guide wire by using design of experiment. *SWU Engineering Journal*, 14(2), 12-24.
- Leenatham N., Sudsomboon W., Kaewdee C. & Krainara A. (2019). Reducing of the wasting time in the dirt testing process of rubber by lean six sigma approach: a case study in a rubber factory. *Wichcha Journal*, 38(2), 104-119.
- Montgomery, D.C. (2019). *Design and analysis of experiments* (10th ed.). John Wiley & Sons.
- Montgomery, D.C. (2019). *Introduction to statistical quality control*. (8th ed.). John Wiley & Sons.
- Myers, R. H., Montgomery, D. C. & Anderson-Cook, C. M. (2016). *Response surface methodology: process and product optimization using designed experiments* (4th ed.). John Wiley & Sons.
- Puangthong, J. & Daengkanit, A. (2020). Rubber situation in year 2019 and trends year 2020. *Para Rubber Journal*, 41(2), 36-39.
- Pyzdek, T., & Kller, P. (2019). *The six sigma handbook* (5th ed.). McGraw Hill.
- Ramasamy, S. 2009). *Total quality management*. Tata McGraw Hill.
- Sae-ui, P., & Sirisingha, C. (2007). *Rubber production: process and testing*. SE-ED Publishing.
- Satsue, P., & Phitthayaphinant, P. (2019). Para-rubber industry under ASEAN economic community: manifestation of para-rubber plantation area in the large city of two sea. *King Mongkut's Agricultural Journal*, 37(4), 675-685.
- Sliva, T., & Ferreira, P. (2017). Improve the extrusion process in tire production using six sigma methodology. *Procedia manufacturing*, 13, 1104-1111. <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2017.09.171>
- Srerungruang, N., Neramittagapong, A., Sriprom, P., Kumsaen, T., Sangnak, S., & Neramittagapong, S. (2017). Optimization of back-washing condition for centrifugal extractor to minimize cassava starch loss. *Khon Kaen University Research Journal*, 17(2), 61-70.
- Sriwarin, P., Petchernoen, T., Ananta, M., & Kunilaasiri, A. (2014). The cost of processing primary rubber at the factory level. *Para Rubber Journal*, 18(3), 20-29.
- Sudasna-na-Ayudhya, P., & Luangpaiboon, P. (2008). *Design and analysis of experiment*. TOP Publishing.

การควบคุมอากาศยานไร้คนขับโดยสถาปัตยกรรมการควบคุมเชิงพฤติกรรม

Unmanned Aerial Vehicle Navigation using a Behaviour based Control Architecture

พนัส นัถฤทธิ์

Panus Nattharith

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

Department of Electrical and Computer Engineering, Faculty of Engineering, Naresuan University

*Corresponding author e-mail: panusn@nu.ac.th

(Received: 22 September 2020, Revised: 24 December 2020, Accepted: 21 January 2021)

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาระบบควบคุมการบินสำหรับอากาศยานไร้คนขับ (UAV) ซึ่งเป็นอากาศยานที่สามารถควบคุมได้จากระยะไกล โดยในปัจจุบันมีการใช้อากาศยานไร้คนขับเพื่อจุดประสงค์ต่างๆ อย่างแพร่หลาย ตัวอย่างเช่น การใช้ในงานสำรวจพื้นที่ การค้นหา การเกษตร และการถ่ายภาพ เป็นต้น อย่างไรก็ตามในการควบคุมอากาศยานดังกล่าวจากระยะไกล ผู้ควบคุมอาจไม่สามารถรับรู้สภาพแวดล้อมโดยรอบของอากาศยานได้ทั้งหมด ส่งผลให้อาจเกิดความผิดพลาดในการควบคุมได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำเสนอการพัฒนาระบบควบคุมการบินสำหรับอากาศยานไร้คนขับ โดยนำสถาปัตยกรรมการควบคุมเชิงพฤติกรรมมาประยุกต์ใช้ เพื่อควบคุมให้อากาศยานดังกล่าวสามารถหลีกเลี่ยงการเคลื่อนที่เข้าชนกับวัตถุที่ขวางได้โดยอัตโนมัติ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถควบคุมให้อากาศยานไร้คนขับเคลื่อนที่เข้าสู่จุดหมายในบริเวณพื้นที่ปฏิบัติงานได้อย่างถูกต้อง ปลอดภัย และมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: อากาศยานไร้คนขับ การเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ สถาปัตยกรรมการควบคุมเชิงพฤติกรรม

Abstract

This work describes a development of tele-operation control system for unmanned aerial vehicle (UAV). At this moment, the UAV is mostly used in various purposes such as surveillance, search and rescue mission, agriculture, and aerial photography. Generally, the UAV requires a human operator to remotely control it. This may introduce the problem as the pilot cannot observe all obstacles surrounding the UAV and this leads to mistakes during operation. Therefore, the UAV control system utilising a behaviour based control architecture has been developed in order to safely navigate the UAV to different goal locations. A series of experiments have been conducted and the results reveal that the UAV equipped with the developed system can effectively avoid collisions with unexpected obstacles and can successfully complete its tasks in a robust and smooth manner.

Key Words: Unmanned aerial vehicle, Robot navigation, Behaviour based control architecture

1. บทนำ

อากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle หรือ UAV) เป็นอากาศยานที่ไม่มีนักบินประจำการบนเครื่องแต่สามารถควบคุมการทำงานได้จากระยะไกล ในช่วงหลายปีที่ผ่านมาได้มีการนำอากาศยานไร้คนขับมาประยุกต์ใช้ในงานลักษณะต่างๆ เพิ่มขึ้นเป็นจำนวนมาก อาทิเช่น การใช้งานในปฏิบัติการทางทหาร การสำรวจ การทหาร และการรักษาความปลอดภัย เป็นต้น ทั้งนี้เนื่องจากมีข้อได้เปรียบหลายประการเหนืออากาศยานแบบมีนักบิน ยกตัวอย่างเช่น UAV มีขนาดเล็ก และมีต้นทุนในการขึ้นบินต่อครั้งต่ำ ส่งผลมีความคล่องตัวสูงในการใช้งาน นอกจากนี้หากเกิดอุบัติเหตุขึ้นกับ UAV จะไม่มีการสูญเสียต่อชีวิต เนื่องจากไม่มีผู้ปฏิบัติงานอยู่บนอากาศยาน (Oyekan & Hu, 2009) ปัญหาหลักในการควบคุมอากาศยานจากระยะไกล คือ ผู้ควบคุมไม่สามารถรับรู้สภาพแวดล้อมโดยรอบของอากาศยานได้ทั้งหมด ซึ่งอาจก่อให้เกิดความผิดพลาดในการควบคุม ยกตัวอย่างเช่น สถานการณ์ที่อากาศยานปฏิบัติงานในพื้นที่ที่มีต้นไม้บังทัศนวิสัยโดยรอบ ซึ่งอาจก่อให้เกิดการเคลื่อนที่เข้าชนกับสิ่งกีดขวางดังกล่าว หรือกรณีการปฏิบัติงานในบริเวณที่มีอาคารสูงเป็นจำนวนมาก อากาศยานอาจเคลื่อนที่เข้าปะทะกับตัวอาคารในทิศทางใดทิศทางหนึ่ง เช่น เคลื่อนที่ถอยหลังเข้าชนกับส่วนใดส่วนหนึ่งของอาคารที่ตั้งอยู่ในทิศทางดังกล่าว ส่งผลให้อาจเกิดความเสียหายขึ้นกับอากาศยานได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำเสนอการพัฒนาระบบควบคุมการบินสำหรับอากาศยานไร้คนขับ โดยระบบที่พัฒนาขึ้นจะช่วยชะลอความเร็วของอากาศยานลงโดยอัตโนมัติหากมีการเคลื่อนที่เข้าใกล้สิ่งกีดขวาง โดยความเร็วของอากาศยานจะสัมพันธ์กับระยะห่างจากสิ่งกีดขวางในทิศทางที่อากาศยานเคลื่อนที่อยู่ และหากมีการเคลื่อนที่เข้าในระยะวิกฤตซึ่งมีความเสี่ยงสูงที่จะเกิดการชน ระบบจะเข้าควบคุมการเคลื่อนที่ทั้งหมดโดยทำการยกเลิกคำสั่งจากผู้ควบคุมอากาศยาน และจะทำการบังคับให้อากาศยานเคลื่อนที่ออกจากระยะวิกฤตดังกล่าวไปยังบริเวณที่ปลอดภัยโดยอัตโนมัติ หลังจากนั้นผู้ควบคุมจึงจะสามารถกลับเข้าควบคุมอากาศยานได้อีกครั้ง ผลการทดสอบระบบที่พัฒนาขึ้นแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถควบคุมให้อากาศยานไร้คนขับเคลื่อนที่ใน

บริเวณพื้นที่ปฏิบัติงานได้อย่างถูกต้อง ปลอดภัย และมีประสิทธิภาพ

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การปฏิบัติงานของอากาศยานไร้คนขับส่วนใหญ่มักถูกสั่งงานจากระยะไกล ส่งผลให้เกิดข้อจำกัดซึ่งอาจนำไปสู่ความผิดพลาดในการปฏิบัติงานได้ เช่น ผู้ควบคุมอาจไม่สามารถรับรู้สภาพแวดล้อมโดยรอบของอากาศยาน หรือผู้ควบคุมอาจมีอาการเหนื่อยล้า หรือหลงทิศหลงทางขณะทำการควบคุม นอกจากนี้ยังมีความน่าจะเป็นที่อาจเกิดความผิดพลาดได้มากขึ้นตามระดับความซับซ้อนในการปฏิบัติงาน ซึ่งอาจก่อให้เกิดความเสียหายขึ้นกับอากาศยานได้ ดังนั้นจึงมีความพยายามในการพัฒนาระบบช่วยควบคุมการบินสำหรับอากาศยานไร้คนขับ ขึ้น ดังจะเห็นได้จากงานวิจัยจำนวนมากที่พยายามชี้ให้เห็นถึงปัญหาในการใช้งาน UAV และเสนอแนะแนวทางหรือวิธีการแก้ปัญหาดังกล่าวในรูปแบบที่แตกต่างกันออกไป ตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ Nelson et al. (2006) ซึ่งได้ทำการศึกษาและพัฒนาระบบช่วยควบคุมอากาศยานไร้คนขับ โดยประยุกต์ใช้วิธี Vector Force Field (Nattharith, 2011) ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมอย่างสูงในกลุ่มของงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ (Mobile robot navigation) โดยนำเอาวิธีการดังกล่าวมาใช้ควบคุมการเคลื่อนที่ของอากาศยานเพื่อให้สามารถติดตามและเคลื่อนที่เข้าหาเป้าหมายย่อย (Waypoints) ที่ผู้ใช้งานกำหนดไว้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในขณะที่ Helble and Cameron (2007) ได้พัฒนาระบบประมวลผลภาพสำหรับการติดตามเป้าหมายย่อยและเป้าหมายภาคพื้นดิน เพื่อใช้ควบคุมการทำงานของอากาศยานไร้คนขับให้สามารถเคลื่อนที่เข้าหาเป้าหมายที่กำหนดได้อย่างแม่นยำ Hoffmann et al. (2004) ได้พัฒนาระบบควบคุมอากาศยานไร้คนขับเพื่อศึกษาการทำงานของอากาศยานหลายลำพร้อมกันภายใต้สถานการณ์จริง โดยงานวิจัยดังกล่าวได้มีการออกแบบโครงสร้างของอากาศยานขึ้นเอง เพื่อให้สามารถรองรับจำนวนอุปกรณ์และน้ำหนักของชุดคอมพิวเตอร์ประสิทธิภาพสูงสำหรับการใช้ในการคำนวณข้อมูล ณ เวลาจริง (Real-time) เพื่อสั่งงานให้อากาศยานทุกลำเคลื่อนที่เข้าสู่เป้าหมายที่กำหนดไว้ได้อย่างถูกต้องและมีประสิทธิภาพ

นอกจากนี้ Shim et al. (2005) ยังได้ศึกษาและพัฒนาวิธีการหลบหลีกสิ่งกีดขวาง (Obstacle avoidance) สำหรับใช้งานบนอากาศยานไร้คนขับ เพื่อควบคุมให้อากาศยานสามารถเคลื่อนที่เข้าสู่จุดหมายได้อย่างปลอดภัย รวมทั้งได้พัฒนาวิธีการวางแผนเส้นทางการเคลื่อนที่ (Path planning) ของอากาศยานไร้คนขับสำหรับใช้งานภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีลักษณะเป็นเขตชุมชนหรือภายในเมือง ซึ่งจะสอดคล้องกับงานวิจัยของ Doherty et al. (2000) ที่ได้ทำการพัฒนาระบบสำหรับช่วยให้อากาศยานไร้คนขับสามารถเคลื่อนที่ได้แบบอัตโนมัติ โดยมีการนำอากาศยานเหล่านั้นไปใช้ในการตรวจสอบเครือข่ายการจราจรภายในพื้นที่ชุมชน ซึ่งระบบนี้จะช่วยให้อากาศยานไร้คนขับสามารถเคลื่อนที่ไปมาได้ภายในสภาพแวดล้อมดังกล่าว เพื่อตรวจสอบสภาพการจราจร รวมทั้งยังสามารถระบุประเภทและพฤติกรรมของยานพาหนะเหล่านั้น เพื่อรายงานสภาพการจราจรให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องรับทราบต่อไป

ในส่วน ของ Amidi et al. (1998) ได้ทำการวิจัยและประสบความสำเร็จในการพัฒนาระบบควบคุมการบินขึ้น – ลงของอากาศยานไร้คนขับแบบอัตโนมัติ รวมทั้งได้ศึกษาและพัฒนาาระบบสำหรับควบคุมอากาศยานให้สามารถเคลื่อนที่ไปตามเส้นทางที่กำหนดได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในขณะที่ Oyekan et al. (2010) ได้นำเอาสถาปัตยกรรมการควบคุมเชิงพฤติกรรม (Behaviour based control architecture) มาประยุกต์ใช้ในการควบคุมการทำงานของอากาศยานไร้คนขับสำหรับงานสำรวจตรวจตราและเฝ้าระวัง โดยทำการแบ่งหน้าที่การทำงานของระบบออกเป็นพฤติกรรมย่อยๆ หลากหลายพฤติกรรม อาทิเช่น พฤติกรรมการเคลื่อนที่ขึ้น – ลง พฤติกรรมการเคลื่อนที่เข้าสู่เป้าหมายที่กำหนด พฤติกรรมการหลบหลีกสิ่งกีดขวาง เป็นต้น ซึ่งระบบจะนำเอาพฤติกรรมเหล่านั้นมาใช้ควบคุมให้อากาศยานไร้คนขับสามารถทำงานตามที่กำหนดไว้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

นอกจากการใช้งานภายนอกอาคารแล้วอากาศยานไร้คนขับยังสามารถนำมาประยุกต์ใช้งานภายในอาคารได้เช่นเดียวกัน ซึ่งโดยมากมักพบการใช้งานอากาศยานขนาดเล็กในงานสำรวจตรวจตราบุคคลหรือสิ่งของที่สนใจภายในอาคาร อย่างไรก็ตามการใช้งานอากาศยานไร้คนขับภายในอาคารมักประสบปัญหาการขาดหายของสัญญาณ GPS (Global Positioning

System) ซึ่งใช้ในการระบุตำแหน่งของอากาศยาน ดังนั้นจึงมีการศึกษาและพัฒนาวิธีการระบุตำแหน่ง (Localization) ของอากาศยานขึ้นสำหรับการใช้งานภายในอาคาร โดยอาจใช้วิธีการสร้างจุดขึ้นสำหรับใช้อ้างอิงตำแหน่ง (Achtelik et al., 2009) หรือการใช้วิธีการประมวลผลภาพในการกำหนดกรอบอ้างอิงเพื่อระบุตำแหน่งและทิศทางของอากาศยาน รวมทั้งการใช้ระบบประมวลผลภาพในการสำรวจ ค้นหา ควบคุมการเคลื่อนที่ หลบหลีกสิ่งกีดขวาง หรือติดตามเป้าหมาย ซึ่งสามารถศึกษาเพิ่มเติมได้จากผลงานของ Altug et al. (2002) Jian and Dawson (2006) Rock et al. (1998) Saripalli et al. (2002) และ Zuffery and Floreano (2006)

3. สถาปัตยกรรมการควบคุมการเคลื่อนที่สำหรับระบบที่นำเสนอ

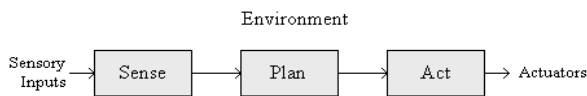
ในงานวิจัยนี้มีการนำสถาปัตยกรรมการควบคุมเชิงพฤติกรรมมาประยุกต์ใช้ โดยสถาปัตยกรรมดังกล่าวเป็นหนึ่งในรูปแบบของสถาปัตยกรรมการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ (Mobile Robot Architecture) ดังนั้นในหัวข้อนี้จะเป็นการกล่าวถึงสถาปัตยกรรมการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์โดยมีรายละเอียดเป็นดังนี้

3.1 สถาปัตยกรรมการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

สถาปัตยกรรมการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์คือกระบวนการรับข้อมูลของสภาพแวดล้อมบริเวณที่หุ่นยนต์กำลังปฏิบัติงานอยู่เข้ามาประมวลผล เพื่อตัดสินใจว่าจะให้หุ่นยนต์ทำการเคลื่อนที่ต่อไปอย่างไร โดยสามารถแบ่งออกได้เป็น 3 รูปแบบ คือสถาปัตยกรรมแบบ Deliberative แบบ Reactive และแบบ Hybrid (Nattharith, 2011)

สถาปัตยกรรมแบบ Deliberative ถูกนำมาใช้ตั้งแต่ยุคแรกของการวิจัยและพัฒนาทางด้านหุ่นยนต์เคลื่อนที่ โดยสถาปัตยกรรมรูปแบบนี้มุ่งเน้นที่จะสร้างโมเดลจำลองของสภาพแวดล้อมบริเวณที่หุ่นยนต์ทำงาน ซึ่งโมเดลดังกล่าวจะถูกสร้างขึ้นจากข้อมูลภายในที่หุ่นยนต์มีอยู่ และข้อมูลภายนอกที่หุ่นยนต์รับเข้ามาจากเซนเซอร์ (Sense) เมื่อได้โมเดลจำลองแล้วระบบจะนำไปใช้ในการวางแผนเส้นทางและตัดสินใจเลือกการกระทำ (Plan) เช่น เคลื่อนที่เข้าสู่จุดหมาย หรือหลบหลีกสิ่งกีดขวาง โดยเมื่อตัดสินใจเลือกการกระทำแล้วระบบจะสั่งให้

หุ่นยนต์ทำการเคลื่อนที่ต่อไป (Act) รูปที่ 1 แสดงแผนผังการทำงานของสถาปัตยกรรมแบบ Deliberative

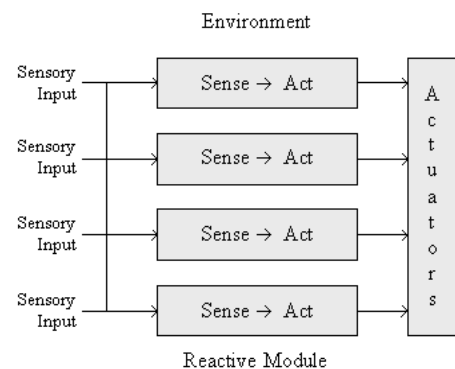


รูปที่ 1 สถาปัตยกรรมการควบคุมการเคลื่อนที่แบบ Deliberative
(Nattharith, 2016)

ในการวางแผนเส้นทางและตัดสินใจเลือกการกระทำให้หุ่นยนต์นั้น ระบบจำเป็นต้องมีโมเดลของสภาพแวดล้อมที่มีความถูกต้องแม่นยำสูงและมีความทันสมัยตลอดเวลา ทั้งนี้เนื่องจากหุ่นยนต์จำเป็นต้องคาดเดาเหตุการณ์ที่กำลังจะเกิดขึ้นเพื่อใช้เป็นข้อมูลในการวางแผนเส้นทางและเลือกการกระทำ ในกรณีที่ระบบมีโมเดลที่ถูกต้องและทันสมัย และมีเวลามากพอที่จะวางแผนและตัดสินใจเลือกการกระทำ หุ่นยนต์จะสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ แต่ในโลกแห่งความเป็นจริง สภาพแวดล้อมบริเวณที่หุ่นยนต์ทำงานมักจะมีการเปลี่ยนแปลงอยู่เสมอ อีกทั้งหุ่นยนต์เองก็มีการเคลื่อนที่อยู่ตลอดเวลา ทำให้ระบบไม่สามารถที่จะปรับปรุงโมเดลของสภาพแวดล้อมได้ทันต่อการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว ซึ่งจะส่งผลให้ระบบไม่สามารถวางแผนเส้นทางและเลือกการกระทำที่เหมาะสมเพื่อตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงนั้นๆ ได้ จึงมักทำให้เกิดความผิดพลาดจากการใช้งานสถาปัตยกรรมรูปแบบนี้ ยกตัวอย่างเช่น เกิดการชนกับสิ่งกีดขวางที่เคลื่อนตัวเข้ามาขวางหรือถูกนำมาวางขวางทิศทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์เนื่องจากหุ่นยนต์ไม่สามารถปรับปรุงโมเดลได้ทันต่อการเข้ามาของสิ่งกีดขวางนั้น จึงไม่สามารถออกแบบเส้นทางหลบหลีกได้ นอกจากนั้นเนื่องจากสถาปัตยกรรมแบบ Deliberative มีการดำเนินงานในลักษณะที่ต่อเนื่องกันเป็นลำดับ (Sense – Plan – Act) หากมีโมเดลใดโมเดลหนึ่งเกิดความเสียหายก็จะทำให้ทั้งระบบหยุดทำงานและส่งผลให้หุ่นยนต์ไม่สามารถปฏิบัติงานต่อไปได้ ด้วยเหตุผลดังที่กล่าวมาข้างต้น สถาปัตยกรรมแบบ Deliberative จึงไม่นิยมนำมาใช้ในการควบคุมหุ่นยนต์เคลื่อนที่ที่ปฏิบัติงานภายในบริเวณที่มีการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมตลอดเวลา (Mataric, 2007)

สำหรับสถาปัตยกรรมการควบคุมหุ่นยนต์เคลื่อนที่แบบ Reactive หรืออาจเรียกอีกอย่างว่าสถาปัตยกรรมแบบ

Behaviour based นั้นจะประกอบด้วยโมดูล Sense – Act หลากหลายโมดูลดังแสดงในรูปที่ 2 โดยแต่ละโมดูลจะทำการรับข้อมูลของสภาพแวดล้อมเพื่อทำการตอบสนองทันที เช่น สั่งให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่หลบหลีกสิ่งกีดขวางที่ตรวจพบด้านหน้า ซึ่งจะเห็นได้ว่าในสถาปัตยกรรมรูปแบบนี้ หุ่นยนต์จะไม่มี การคิดหรือวางแผนการทำงานเหมือนสถาปัตยกรรมแบบ Deliberative ทำให้หุ่นยนต์สามารถปฏิบัติงานได้อย่างรวดเร็ว แม้ว่า จะอยู่ในสภาพแวดล้อมที่มีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลา



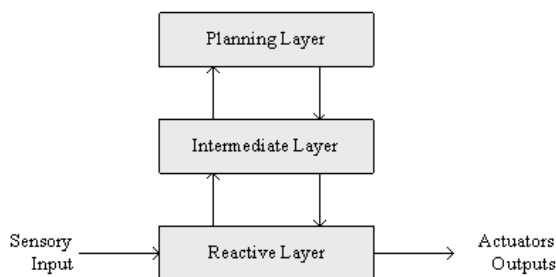
รูปที่ 2 สถาปัตยกรรมการควบคุมการเคลื่อนที่แบบ Reactive
(Nattharith, 2016)

สถาปัตยกรรมแบบ Reactive นี้แต่ละโมดูลจะเป็นอิสระต่อกันและจะทำงานไปพร้อมๆ กัน มิได้ทำงานต่อเนื่องกันเป็นลำดับเหมือนสถาปัตยกรรมแบบ Deliberative ดังนั้นหากมีโมดูลใดโมดูลหนึ่งเกิดความเสียหาย โมดูลอื่นๆ ที่เหลืออยู่จะยังสามารถทำงานต่อไปได้ จึงไม่ส่งผลให้ทั้งระบบหยุดทำงานและหุ่นยนต์จะยังคงปฏิบัติงานต่อไป

แม้ว่าสถาปัตยกรรมแบบ Reactive จะสามารถทำงานได้อย่างรวดเร็ว แต่ก็มีข้อจำกัดตรงที่ไม่มีการสร้างโมเดลจำลองของสภาพแวดล้อมเพื่อใช้ในการวางแผนการทำงาน ดังนั้นสถาปัตยกรรมนี้จึงไม่เหมาะสมที่จะใช้ในงานที่ต้องการโมเดลของสภาพแวดล้อมบริเวณที่หุ่นยนต์ทำงานอยู่เพื่อใช้ในการวางแผนและตัดสินใจเลือกการกระทำ เช่น บริเวณพื้นที่ปฏิบัติงานที่มีความสลับซับซ้อนมาก

ในส่วนของสถาปัตยกรรมแบบ Hybrid หรือแบบลูกผสมนั้น จะรวมเอาความสามารถหลักของสถาปัตยกรรมทั้งสองรูปแบบข้างต้นเข้าด้วยกัน นั่นคือ การวางแผนการทำงานและความรวดเร็วในการการตอบสนอง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการ

ทำงานของหุ่นยนต์ อย่างไรก็ตามการรวมเอาจุดเด่นของสองสถาปัตยกรรมข้างต้นเข้าด้วยกันนั้นเป็นงานที่ค่อนข้างท้าทายเนื่องจากโมดูลต่างๆ ของระบบ Reactive นั้นต้องการที่จะตอบสนองการทำงานทันทีโดยใช้ข้อมูลที่ได้รับมาจากเซนเซอร์ แต่ระบบ Deliberative นั้นจะมีการวางแผนโดยใช้ทั้งข้อมูลภายในระบบเองและข้อมูลที่ได้รับมาจากเซนเซอร์ ดังนั้นในสถาปัตยกรรมรูปแบบนี้จึงจำเป็นต้องมีตัวกลาง (Intermediate layer) เพื่อคอยจัดการกับการทำงานของทั้งสองระบบให้สอดคล้องกันดังแสดงในรูปที่ 3

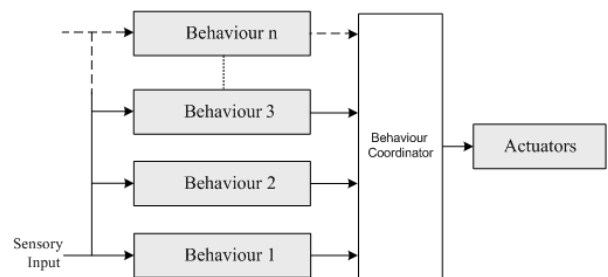


รูปที่ 3 สถาปัตยกรรมการควบคุมการเคลื่อนที่แบบ Hybrid (Nattharith, 2016)

เมื่อใดก็ตามที่หุ่นยนต์ประสบเหตุการณ์ที่ไม่ได้ถูกคาดการณ์หรือวางแผนไว้โดยระบบ Deliberative (หรือ Planning layer ในรูปที่ 3) ระบบ Reactive จะเริ่มตอบสนองต่อเหตุการณ์นั้นๆ ทันทีโดยไม่สนใจว่าระบบ Deliberative จะมีการวางแผนเส้นทางไว้อย่างไร ยกตัวอย่างเช่นในกรณีที่มีสิ่งกีดขวางเคลื่อนตัวเข้ามาขวางหรือถูกนำมาวางขวางทิศทางการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ระบบ Deliberative จะไม่สามารถปรับปรุงโมเดลให้ทันสมัยเพื่อออกแบบเส้นทางหลบหลีกได้ทัน อย่างไรก็ตามระบบ Reactive จะเข้ามาทำหน้าที่แทนโดยการสั่งให้หุ่นยนต์ทำการหลบหลีกสิ่งกีดขวางดังกล่าวทันทีโดยไม่ต้องรอการออกแบบเส้นทางใหม่จากระบบ Deliberative ในทางกลับกันเมื่อหุ่นยนต์ต้องการเคลื่อนที่จากตำแหน่งปัจจุบันไปสู่เป้าหมายใหม่ซึ่งอยู่อีกสถานที่หนึ่ง ระบบ Deliberative จะคอยชี้แนะให้ระบบ Reactive ทำงานอย่างเหมาะสมและมีประสิทธิภาพโดยการออกแบบเส้นทางที่สั้นและปลอดภัยที่สุดให้กับระบบ Reactive เพื่อใช้ในการเคลื่อนที่หุ่นยนต์ไปสู่จุดหมายปลายทางต่อไป

3.2 การควบคุมการเคลื่อนที่โดยสถาปัตยกรรมการควบคุมเชิงพฤติกรรม

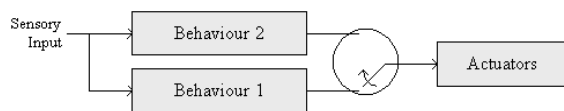
การควบคุมการเคลื่อนที่โดยสถาปัตยกรรมการควบคุมเชิงพฤติกรรมหรือแบบ Behaviour-based นั้น เป็นวิธีการออกแบบระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์แบบอัตโนมัติที่ลอกเลียนแบบมาจากพฤติกรรมของสัตว์ ในระบบ Behaviour-Based นั้นจะประกอบไปด้วยชุดของพฤติกรรม (Behaviours) ที่จะทำงานร่วมกันเพื่อควบคุมระบบที่มีความซับซ้อน โดยแต่ละพฤติกรรมจะทำงานเป็นอิสระต่อกันและจะรับข้อมูลเข้ามาจากอุปกรณ์ตรวจวัด (Sensory input) แล้วทำการตอบสนองข้อมูลเหล่านั้นโดยการแปลงเป็นคำสั่งที่จะใช้ในการควบคุมระบบขับเคลื่อนของหุ่นยนต์ (Actuators) (Nattharith & Bicker, 2009) ซึ่งก็คือมอเตอร์หรือล้อของหุ่นยนต์นั่นเอง รูปที่ 4 แสดงแผนภาพของสถาปัตยกรรมการควบคุมเชิงพฤติกรรม



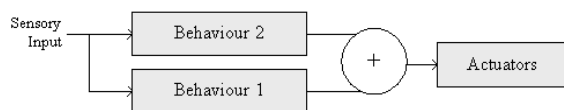
รูปที่ 4 สถาปัตยกรรมการควบคุมเชิงพฤติกรรมและการทำงานของกลไกการจัดการกับพฤติกรรม (Nattharith, 2016)

อย่างไรก็ตามด้วยความที่แต่ละพฤติกรรมทำงานเป็นอิสระต่อกัน ในบางโอกาสอาจมีเหตุการณ์ที่มีพฤติกรรมมากกว่าหนึ่งพฤติกรรมที่ต้องการสั่งงานหรือควบคุมหุ่นยนต์เกิดขึ้นพร้อมกันหรืออาจเกิดความขัดแย้งในการขอใช้ทรัพยากรในการควบคุมหุ่นยนต์ ดังนั้นระบบจึงต้องมีกลไกพิเศษที่คอยทำหน้าที่จัดการกับพฤติกรรมต่างๆ เหล่านั้นโดยตัดสินใจว่าพฤติกรรมใดจะได้ควบคุมหุ่นยนต์ กลไกดังกล่าวนี้เรียกว่า กลไกการจัดการกับพฤติกรรม (Behaviour coordinator หรือ Action-selection mechanism) ดังนั้นหลังจากที่แต่ละพฤติกรรมสร้างคำสั่งในการควบคุมหุ่นยนต์เสร็จเรียบร้อยแล้ว ทุกพฤติกรรมจะถูกดำเนินการต่อโดยกลไกการจัดการกับพฤติกรรม เพื่อสร้างเป็นคำสั่งสุดท้ายสำหรับใช้ควบคุมให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ต่อไป (พิจารณารูปที่ 4)

กลไกการจัดการกับพฤติกรรมของหุ่นยนต์โดยทั่วไปนั้นสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทหลักๆ คือ กลไกแบบเลือกพฤติกรรม (Arbitration mechanism) กับกลไกแบบรวมพฤติกรรม (Fusion mechanism) ดังแสดงในรูปที่ 5 ก. และ ข. ตามลำดับ ตัวอย่างของระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ที่ใช้วิธีการเลือกพฤติกรรมได้แก่ การควบคุมหุ่นยนต์แบบ Subsumption (Brooks, 1986) ซึ่งนำเสนอโดยศาสตราจารย์ Rodney Brooks แห่งสถาบันเทคโนโลยีแห่ง Massachusetts (MIT) ส่วนตัวอย่างของระบบที่ใช้วิธีการรวมพฤติกรรมได้แก่ การควบคุมหุ่นยนต์โดยวิธี Motor Schema (Arkin, 1989) ซึ่งคิดค้นโดยศาสตราจารย์ Ronald Arkin แห่งสถาบันเทคโนโลยีแห่ง Georgia



(ก) กลไกแบบเลือกพฤติกรรม



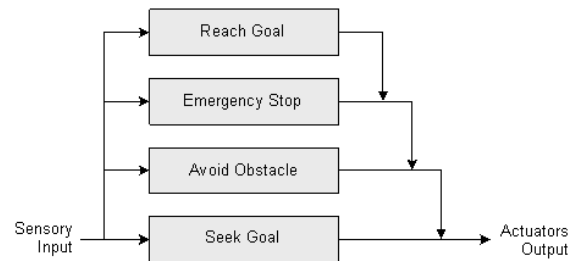
(ข) กลไกแบบรวมพฤติกรรม

รูปที่ 5 ตัวอย่างกลไกการจัดการกับแต่ละพฤติกรรมของหุ่นยนต์ (Nattharith, 2016)

สถาปัตยกรรมการควบคุมแบบ Subsumption ถูกพัฒนาขึ้นโดยศาสตราจารย์ Rodney Brooks โดยที่ Brooks ได้แบ่งระบบที่มีความซับซ้อนออกเป็นระบบย่อยๆ เรียกว่า พฤติกรรม (Behaviour) โดยแต่ละพฤติกรรมจะถูกจัดเรียงเป็นชั้นแบบขนานตามลำดับความสำคัญ เรียกว่า layer ซึ่งหมายความว่าในขณะที่ระบบทำงานอยู่นั้น ทุกพฤติกรรมในแต่ละ layer จะทำงานพร้อมกันและทำงานเป็นอิสระต่อกันนั่นเอง

รูปที่ 6 แสดงตัวอย่างของสถาปัตยกรรมการควบคุมแบบ Subsumption ที่มี 4 layer โดยแต่ละ layer จะประกอบด้วยหนึ่งพฤติกรรม นั่นคือ พฤติกรรมการค้นหาเป้าหมาย (Seek Goal) พฤติกรรมการหลบหลีกสิ่งกีดขวาง (Avoid Obstacle) พฤติกรรมการหยุดฉุกเฉิน (Emergency Stop) และพฤติกรรม

การบรรลุเป้าหมาย (Reach Goal) โดยแต่ละพฤติกรรมจะถูกจัดเรียงเป็นชั้นๆ ตามลำดับความสำคัญ นั่นคือ พฤติกรรมที่มีลำดับความสำคัญมากกว่าจะมีสิทธิ์ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ก่อน

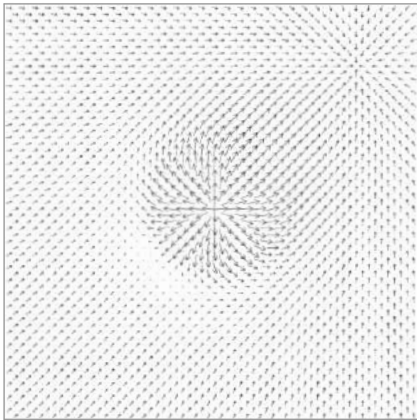


รูปที่ 6 ตัวอย่างการควบคุมหุ่นยนต์โดยสถาปัตยกรรมแบบ Subsumption (Nattharith, 2016)

เมื่อระบบเริ่มทำงาน พฤติกรรม Seek Goal จะพยายามควบคุมให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่เข้าหาเป้าหมาย อย่างไรก็ตามหากหุ่นยนต์ตรวจพบว่ามีวัตถุมาขวางจะทำให้พฤติกรรม Avoid Obstacle ทำงาน ซึ่งจะออกคำสั่งให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่หลบสิ่งกีดขวางนั้น ในขณะเดียวกันพฤติกรรม Avoid Obstacle ซึ่งมีลำดับความสำคัญที่สูงกว่าก็จะไปกดไม่ให้คำสั่งจากพฤติกรรม Seek Goal มีผลต่อการควบคุมหุ่นยนต์ การกดนี้เรียกว่า subsume ซึ่งเป็นที่มาของชื่อของสถาปัตยกรรมนี้ (Mataric, 2007) ในกรณีที่ Avoid Obstacle ไม่สามารถที่จะสั่งให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่หลบสิ่งกีดขวางนั้นได้และมีแนวโน้มสูงที่หุ่นยนต์จะชนสิ่งกีดขวางนั้น พฤติกรรม Emergency Stop จะทำงานทันทีเพื่อสั่งให้หุ่นยนต์หยุดเคลื่อนที่ก่อนที่จะเกิดการชนและเช่นเดียวกันพฤติกรรม Emergency Stop นี้ก็จะกดไม่ให้คำสั่งจากพฤติกรรม Avoid Obstacle และ Seek Goal มีผลต่อการควบคุมหุ่นยนต์ สำหรับ layer บนสุดนั้นจะเป็นพฤติกรรม Reach Goal ซึ่งจะทำงานเมื่อหุ่นยนต์นั้นเคลื่อนที่ไปจนถึงจุดหมายปลายทางแล้ว และจะทำให้คำสั่งจากพฤติกรรมของ layer ด้านล่างซึ่งมีลำดับความสำคัญต่ำกว่าไม่มีผลต่อการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์

สำหรับสถาปัตยกรรมการควบคุมเชิงพฤติกรรมแบบ Motor Schema นั้น ถูกพัฒนาขึ้นโดยศาสตราจารย์ Ronald Arkin โดยการควบคุมแบบนี้จะเป็นการคำนวณหาผลรวมของพฤติกรรมต่างๆ ที่ถูกสร้างขึ้นจากเวกเตอร์ของแรงที่กระทำต่อ

หุ่นยนต์ เพื่อสร้างเป็นพฤติกรรมลัพท์ (หรือแรงลัพท์) ที่ใช้ควบคุมให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไป

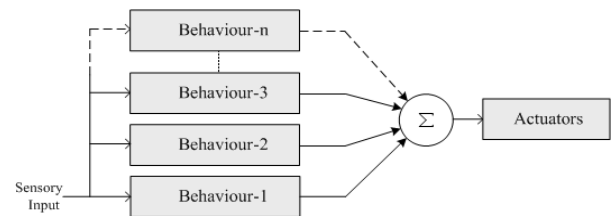


รูปที่ 7 ทฤษฎี Potential Field Method – แรงดึงดูดจะดูดอนุภาคเข้าหาเป้าหมายซึ่งตั้งอยู่ทางด้านบนขวาของรูป ในขณะที่แรงผลักรวมจากอนุภาคออกจากสิ่งกีดขวางซึ่งตั้งอยู่ตรงกลางของรูป (Nattharith, 2011)

วิธี Motor Schema นี้มีพื้นฐานมาจากวิธี Potential Field Method ที่ถูกคิดค้นโดย Osama Khatib แห่งมหาวิทยาลัย Stanford (Khatib, 1986) โดยทั้งสองวิธีนี้จะมีผลคล้ายคลึงกันตรงที่เป็นการคำนวณหาผลรวมของแรงที่กระทำต่อหุ่นยนต์เหมือนกัน สำหรับวิธี Potential Field Method นั้นได้รับความนิยมเป็นอย่างมากเนื่องจากมีขั้นตอนการทำงานที่ง่ายและสามารถปรับเปลี่ยนไปใช้งานกับหุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้หลากหลายรูปแบบ รวมทั้งยังสามารถนำไปใช้งานกับหุ่นยนต์แขนกลได้อีกด้วย หลักการทำงานของทฤษฎีนี้แสดงดังรูปที่ 7 โดยสมมติให้หุ่นยนต์เป็นอนุภาคเล็กๆ อนุภาคหนึ่งซึ่งจะถูกดึงดูดโดยเป้าหมาย (ซึ่งการดึงดูดดังกล่าวอาจเรียกว่าเป็นพฤติกรรมเคลื่อนที่เข้าสู่เป้าหมายของหุ่นยนต์ (Go to Target)) แต่จะถูกผลักรวมโดยวัตถุกีดขวาง (หรือพฤติกรรมหลบหลีกสิ่งกีดขวาง (Avoid Obstacle)) ดังนั้นเมื่อหุ่นยนต์เริ่มทำงาน หุ่นยนต์จะเคลื่อนที่ไปได้เองตามแรงดึงดูดเข้าหาเป้าหมายโดยจะไม่มีการชนเกิดขึ้นเนื่องจากจะมีแรงอีกชุดหนึ่งคอยผลักหุ่นยนต์ให้ออกห่างจากสิ่งกีดขวาง แรงดึงดูดดังกล่าวจะหมดลง (มีค่าเป็นศูนย์) เมื่อหุ่นยนต์เคลื่อนที่เข้าสู่เป้าหมายเป็นที่เรียบร้อยแล้ว

สำหรับการควบคุมหุ่นยนต์โดยวิธี Motor Schema นั้นมีความแตกต่างจากวิธี Potential Field Method ตรงที่ไม่ได้

จำกัดอยู่แค่การสร้างพฤติกรรม Go to Target และพฤติกรรม Avoid Obstacle เท่านั้น แต่จะสามารถเพิ่มพฤติกรรมให้กับหุ่นยนต์ได้อีกหลากหลายรูปแบบขึ้นอยู่กับจุดมุ่งหมายของการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ยกตัวอย่างเช่น พฤติกรรมการไต่กำแพง (Wall Follow) พฤติกรรมเคลื่อนที่ไปยังที่ว่าง (Wander) เป็นต้น โดยที่ทุกพฤติกรรมจะทำงานพร้อมกันและเป็นอิสระต่อกัน โดยจะสร้างคำสั่งในรูปแบบของเวกเตอร์ของแรงที่กระทำต่อหุ่นยนต์ จากนั้นทุกคำสั่งจะถูกนำมารวมกันโดยวิธีการรวมเวกเตอร์ (Vector Summation) เพื่อสร้างเป็นพฤติกรรมลัพท์ (หรือเวกเตอร์ลัพท์) สำหรับใช้ควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ต่อไป รูปที่ 8 แสดงตัวอย่างการควบคุมหุ่นยนต์โดยสถาปัตยกรรมการควบคุมแบบ Motor Schema



รูปที่ 8 การควบคุมหุ่นยนต์โดยสถาปัตยกรรมแบบ Motor Schema (Nattharith, 2016)

กลไกการจัดการกับพฤติกรรมของหุ่นยนต์แบบเลือกพฤติกรรม (หรือ Arbitration mechanism ที่ใช้ในการควบคุมแบบ Subsumption) มีข้อจำกัดหลักอยู่ 2 ประการ นั่นคือระบบไม่มีเสถียรภาพ (Instability) และพฤติกรรมบางพฤติกรรมไม่เคยถูกใช้งานเลย (Starvation) (Nattharith & Guzel, 2016) สาเหตุของปัญหาดังกล่าวเกิดขึ้นเนื่องจากในขณะที่หุ่นยนต์ทำงานอยู่นั้นระบบมีการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรม การควบคุมหุ่นยนต์แบบกลับไปกลับมาอยู่ตลอด ยกตัวอย่างเช่น ในขณะที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่ไปข้างหน้าด้วยพฤติกรรม Seek Goal (หรือ Go to Target) เมื่อหุ่นยนต์ตรวจพบวัตถุกีดขวางด้านหน้า ระบบจะกำหนดให้หุ่นยนต์ทำการหลบหลีกวัตถุดังกล่าวด้วยพฤติกรรม Avoid Obstacle และทันทีที่หุ่นยนต์เคลื่อนที่หลบหลีกไปในทิศทางที่ตรวจไม่พบวัตถุกีดขวางแล้ว หุ่นยนต์ก็จะกลับมาทำพฤติกรรม Seek Goal อีกครั้ง ซึ่งอาจส่งผลให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่กลับมาในทิศทางเดิมที่ถูกขวางโดยวัตถุเดิม ทำให้หุ่นยนต์ต้องทำการหลบหลีกใหม่อีกครั้ง เหตุการณ์ดังกล่าวจะส่งผลให้ระบบกำหนดพฤติกรรมให้

หุ่นยนต์กลับไปกลับมาระหว่างพฤติกรรม Seek Goal กับพฤติกรรม Avoid Obstacle ทำให้เส้นทางการเคลื่อนที่ไม่เรียบเนื่องจากหุ่นยนต์เคลื่อนที่แกว่งไปมา (Non-smooth trajectory) อีกทั้งยังส่งผลให้พฤติกรรมอื่นๆ อาจไม่มีโอกาสได้ทำงานเลย ในขณะที่ระบบที่ใช้กลไกการจัดการกับพฤติกรรมของหุ่นยนต์แบบรวมพฤติกรรม (หรือ Fusion mechanism ที่ใช้ในการควบคุมแบบ Motor Schema) จะไม่เกิดเหตุการณ์ในลักษณะดังกล่าว เนื่องจากระบบนี้ได้รวมเอาทุกพฤติกรรมเข้าด้วยกันเพื่อกำหนดเป็นพฤติกรรมผลลัพธ์ให้กับหุ่นยนต์ ทำให้หุ่นยนต์สามารถเคลื่อนที่เข้าสู่เป้าหมายได้โดยไม่มีการชนเกิดขึ้นเนื่องจากหุ่นยนต์จะทำการหลบหลีกสิ่งกีดขวางไปด้วยพร้อมกัน การควบคุมดังกล่าวส่งผลให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ได้เร็วกว่าเนื่องจากไม่มีการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรมกลับไปกลับมา

อีกตัวอย่างที่ชี้ให้เห็นถึงข้อจำกัดของกลไกการจัดการแบบเลือกพฤติกรรมก็คือการทำงานของกลไกประเภทนี้จะมีพฤติกรรมเพียงพฤติกรรมเดียวเท่านั้นที่ทำหน้าที่อยู่ ดังนั้นระบบอาจจะประสบเหตุการณ์ที่สามารถควบคุมหุ่นยนต์ให้หลบหลีกสิ่งกีดขวางได้สำเร็จ แต่เป็นการหลบหลีกออกนอกเส้นทางที่จะนำไปสู่เป้าหมาย ทั้งนี้เนื่องจากในขณะที่หุ่นยนต์กำลังพยายามหลบหลีกสิ่งกีดขวางด้วยพฤติกรรม Avoid Obstacle อยู่ นั้น ระบบได้หยุดใช้งานพฤติกรรม Seek Goal ไปด้วย ทำให้หุ่นยนต์ไม่สนใจว่าจะต้องเคลื่อนที่สู่เป้าหมาย แต่จะตั้งหน้าตั้งตาหลบหลีกสิ่งกีดขวางเพียงอย่างเดียว หุ่นยนต์จะไม่สนใจว่าจะต้องหลบหลีกไปในทิศทางไหนขอเพียงแค่หลบให้พ้นเท่านั้น การหลบหลีกดังกล่าวอาจทำให้หุ่นยนต์เคลื่อนที่ห่างไกลออกไปจากเป้าหมายและส่งผลให้หุ่นยนต์ไม่สามารถบรรลุเป้าหมายได้ในที่สุด อย่างไรก็ตามเหตุการณ์ดังกล่าวจะไม่เกิดขึ้นกับระบบที่ใช้กลไกการจัดการแบบรวมพฤติกรรม เนื่องจากหุ่นยนต์จะถูกพฤติกรรมผลลัพธ์ควบคุมให้เคลื่อนที่หลบหลีกสิ่งกีดขวางไปในทิศทางที่อยู่ภายในเส้นทางการเคลื่อนที่สู่เป้าหมาย ทั้งนี้เนื่องมาจากทุกพฤติกรรมที่มีผลต่อการควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ถูกรวมไว้ในคำสั่งสุดท้ายหรือพฤติกรรมผลลัพธ์นั่นเอง

4. การพัฒนาระบบควบคุมอากาศยานไร้คนขับ

ดังที่กล่าวถึงข้อได้เปรียบของการใช้งานกลไกการจัดการแบบรวมพฤติกรรมหรือแบบ Fusion mechanism ในการ

ควบคุมการเคลื่อนที่ของหุ่นยนต์ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำเอากลไกการจัดการกับพฤติกรรมรูปแบบดังกล่าวมาประยุกต์ใช้งานร่วมกับระบบควบคุมอากาศยานไร้คนขับ โดยเลือกใช้วิธีควบคุมแบบ Motor Schema ในการพัฒนาระบบ โดยมีรายละเอียดดังนี้

4.1 การออกแบบพฤติกรรมสำหรับระบบควบคุมที่นำเสนอ

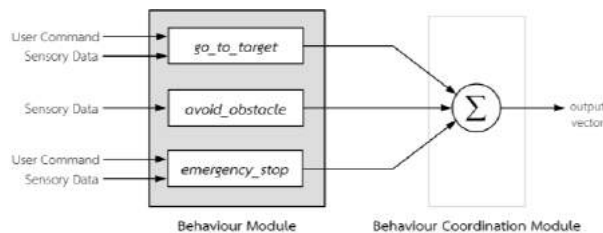
การพัฒนาระบบควบคุมการเคลื่อนที่ของอากาศยานไร้คนขับโดยวิธี Motor Schema ในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบให้ระบบมีพฤติกรรมสำหรับควบคุมการเคลื่อนที่ของอากาศยานทั้งหมด 3 พฤติกรรม คือ พฤติกรรมเคลื่อนที่ไป (หรือพฤติกรรม go_to_target) พฤติกรรมหลบหลีกสิ่งกีดขวาง (หรือพฤติกรรม avoid_obstacle) และพฤติกรรมหยุดฉุกเฉิน (หรือพฤติกรรม emergency_stop) แต่ละพฤติกรรมจะรับข้อมูลจากอุปกรณ์ตรวจวัดประเภทต่างๆ (Sensory data) อาทิเช่น ข้อมูลตำแหน่งจากระบบ GPS หรือข้อมูลระยะห่างของสิ่งกีดขวางจากเซนเซอร์อัลตราโซนิกมาใช้ในการสร้างพฤติกรรม โดยมีรายละเอียดเป็นดังนี้

พฤติกรรม go_to_target จะทำหน้าที่พาอากาศยานให้เคลื่อนที่เข้าหาจุดหมาย โดยพฤติกรรมนี้จะเป็นพฤติกรรมที่ถูกกำหนดโดยผู้ควบคุมอากาศยาน และใช้ข้อมูลตำแหน่งปัจจุบันของอากาศยานในการสร้างพฤติกรรม ผลลัพธ์ที่ได้จากพฤติกรรมนี้คือเวกเตอร์ที่ชี้ไปทางพิคัดเป้าหมาย (อาจมองเป็นลักษณะของแรงที่กระทำต่ออากาศยานเพื่อดึงอากาศยานให้เคลื่อนที่เข้าสู่จุดหมาย) โดยขนาดของเวกเตอร์ดังกล่าวจะขึ้นอยู่กับค่าการบังคับของผู้ควบคุมอากาศยาน

พฤติกรรม avoid_obstacle มีหน้าที่ป้องกันไม่ให้อากาศยานเคลื่อนที่ชนกับสิ่งกีดขวาง โดยจะรับข้อมูลตำแหน่งของสิ่งกีดขวางมาจากเซนเซอร์อัลตราโซนิก ผลลัพธ์ที่ได้จากพฤติกรรมนี้คือเวกเตอร์ที่ผลักอากาศยานให้ออกห่างจากสิ่งกีดขวาง โดยระบบจะเริ่มสร้างเวกเตอร์ดังกล่าวเมื่อตรวจพบสิ่งกีดขวางที่ระยะห่างจากอากาศยานต่ำกว่า 2 เมตร ซึ่งขนาดของเวกเตอร์ดังกล่าวจะแปรผกผันกับระยะห่างระหว่างอากาศยานกับสิ่งกีดขวาง

พฤติกรรม emergency_stop จะรับข้อมูลตำแหน่งของกำแพงหรือสิ่งกีดขวางมาจากเซนเซอร์อัลตราโซนิก และจะ

สร้างเวกเตอร์ที่มีขนาดใกล้เคียงกับเวกเตอร์ของแรงลัพธ์ที่เกิดจากพฤติกรรม `go_to_target` และ `avoid_obstacle` แต่จะมีทิศทางตรงข้ามกันเพื่อยุติการเคลื่อนที่ของอากาศยาน (เนื่องจากผลรวมของเวกเตอร์มีค่าประมาณศูนย์) โดยระบบจะสร้างพฤติกรรมนี้เมื่อตรวจพบสิ่งกีดขวางในทิศทางการเคลื่อนที่ของอากาศยานที่ระยะห่างต่ำกว่า 0.75 เมตร ซึ่งเป็นระยะวิกฤตที่มีความเสี่ยงสูงที่จะเกิดจากการชนขึ้น



รูปที่ 9 สถาปัตยกรรมการควบคุมเชิงพฤติกรรมที่นำเสนอ

เมื่อพฤติกรรมทั้งหมดถูกสร้างขึ้นครบแล้ว ทุกพฤติกรรมจะถูกนำมารวมกัน (Vector summation) เพื่อสร้างเป็นเวกเตอร์ลัพธ์เพียงเวกเตอร์เดียวสำหรับนำทางให้อากาศยานเคลื่อนที่ไปสู่เป้าหมาย โดยระบบจะทำงานซ้ำเดิมในรอบการทำงานถัดไปจนกว่าอากาศยานจะเคลื่อนที่ไปถึงจุดหมายปลายทางเป็นที่เรียบร้อย รูปที่ 9 แสดงแผนภาพของสถาปัตยกรรมการควบคุมเชิงพฤติกรรมที่นำเสนอ ในขณะที่สมการที่ 1 – 3 แสดงการคำนวณเวกเตอร์ของพฤติกรรมลัพธ์สำหรับใช้ควบคุมการทำงานของอากาศยาน

$$\Delta_x = \Delta_x G + \Delta_x O + \Delta_x E \quad (1)$$

$$\Delta_y = \Delta_y G + \Delta_y O + \Delta_y E \quad (2)$$

$$R = \Delta_x + \Delta_y \quad (3)$$

โดยที่

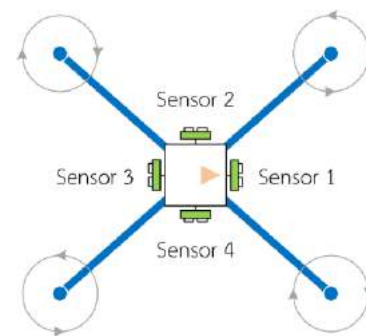
$\Delta_x G$ และ $\Delta_y G$ คือ แรงที่เกิดจากพฤติกรรม `go_to_target` ในแนวแกน X และแนวแกน Y ตามลำดับ

$\Delta_x O$ และ $\Delta_y O$ คือ แรงที่เกิดจากพฤติกรรม `avoid_obstacle` ในแนวแกน X และแนวแกน Y ตามลำดับ

$\Delta_x E$ และ $\Delta_y E$ คือ แรงที่เกิดจากพฤติกรรม `emergency_stop` ในแนวแกน X และแนวแกน Y ตามลำดับ

R คือ เวกเตอร์ลัพธ์ที่เกิดจากรวมพฤติกรรมเคลื่อนที่ทุกพฤติกรรมเข้าด้วยกัน

รูปที่ 10 แสดงลักษณะการติดตั้งชุดเซนเซอร์อัลตราโซนิกซึ่งใช้เป็นอุปกรณ์หลักในการตรวจจับสิ่งกีดขวางในระบบควบคุมที่พัฒนาขึ้น ภายในชุดประกอบด้วยเซนเซอร์อัลตราโซนิกจำนวน 4 ตัว (Sensor 1 – Sensor 4) โดยเซนเซอร์แต่ละตัวจะถูกติดตั้งที่แต่ละด้านของอากาศยานเพื่อให้ครอบคลุมทิศทางการเคลื่อนที่ทั้งหมด การทำงานของเซนเซอร์ถูกออกแบบให้ทำการตรวจจับสิ่งกีดขวางเป็นลำดับ กล่าวคือระบบจะสั่งการให้เซนเซอร์ 1 เริ่มทำงานก่อน จากนั้นจึงสั่งให้เซนเซอร์ 3 ทำงาน ตามมาด้วยเซนเซอร์ 2 และเซนเซอร์ 4 ตามลำดับ โดยการสั่งให้ชุดเซนเซอร์ทำงานวนไปในลักษณะดังกล่าวมีจุดประสงค์เพื่อลดความเสี่ยงในการเกิด Cross talk (Meng et al., 2009) ซึ่งอาจเกิดขึ้นได้ในการที่มีการนำเซนเซอร์อัลตราโซนิกหลายตัวมาใช้งานร่วมกัน



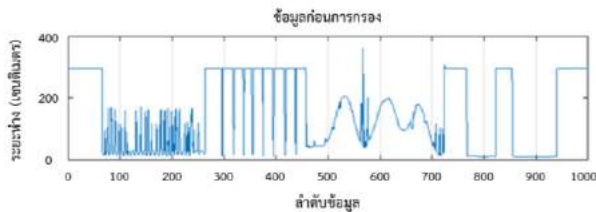
รูปที่ 10 การติดตั้งชุดเซนเซอร์อัลตราโซนิกบนอากาศยาน

จากรายละเอียดที่กล่าวมาจะเห็นได้ว่า ข้อมูลที่ได้รับมาจากชุดเซนเซอร์อัลตราโซนิกซึ่งใช้ในการสร้างพฤติกรรมของระบบจะมีผลอย่างมากต่อความถูกต้องในการทำงานของอากาศยาน อย่างไรก็ตามในการใช้งานเซนเซอร์อาจเกิดความผิดพลาดได้ในช่วงเวลา ตัวอย่างเช่น เซนเซอร์อาจให้ข้อมูลระยะห่างที่แตกต่างจากค่าปกติค่อนข้างมาก ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของข้อมูลกลับไปมาอย่างรวดเร็ว หากระบบนำข้อมูลดังกล่าวไปใช้จะส่งผลให้อากาศยานกระตุกหรือเคลื่อนที่ไม่ราบรื่นได้ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงนำเสนอขั้นตอนการกรองสัญญาณข้อมูลที่มีการเปลี่ยนแปลงสูงเพื่อทำให้ข้อมูลมีความถูกต้องน่าเชื่อถือโดยมีรายละเอียดเป็นดังนี้

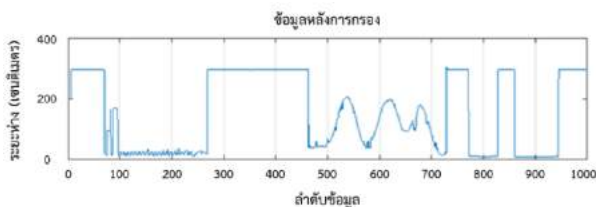
4.2 การกรองสัญญาณข้อมูลที่มีการเปลี่ยนแปลงสูง

ข้อมูลที่มีการเปลี่ยนแปลงสูงเป็นข้อมูลที่มีการกลับไปมาในช่วงเวลาที่ติดกันและมีการเปลี่ยนแปลงค่าของข้อมูลที่สูงเกิน

กว่าค่าที่ยอมรับได้ในเวลานั้นๆ หากนำข้อมูลมาสร้างเป็นเส้นกราฟจะมีลักษณะเป็นยอดแหลมหรือเป็นแท่งขนาดเล็กดังแสดงในรูปที่ 11 ซึ่งเป็นข้อมูลของระยะห่างจากสิ่งกีดขวางที่เซนเซอร์อัลตราโซนิกวัดได้ โดยข้อมูลที่มีการเปลี่ยนแปลงสูงนี้อาจเกิดจากการทำงานที่ผิดพลาดของระบบหรืออุปกรณ์วัดค่า จึงจำเป็นต้องทำการกรองข้อมูลเหล่านี้ออกเพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความถูกต้องก่อนที่จะนำไปประมวลผลในลำดับต่อไป



รูปที่ 11 ตัวอย่างของข้อมูลที่มีการเปลี่ยนแปลงสูง



รูปที่ 12 ผลลัพธ์ของการกรองข้อมูลที่มีการเปลี่ยนแปลงสูง

การกรองข้อมูลลักษณะดังกล่าวจะนำข้อมูลที่ตรวจวัดได้ (ข้อมูลเอาต์พุต) มาเก็บไว้ในคิว (Queue) ซึ่งจะมีจำนวนข้อมูลเท่ากับค่าที่ยอมรับได้ว่าไม่เป็นการเปลี่ยนแปลงกลับไปมาอย่างรวดเร็ว เพื่อให้สามารถนำข้อมูลในคิวไปเปรียบเทียบกับข้อมูลที่เข้ามาใหม่ (ข้อมูลอินพุต) โดยสามารถเขียนขั้นตอนการทำงานดังกล่าวเป็นรหัสเทียม (Pseudo Code) ได้ดังนี้ (Ray et al., 2015)

```
IF ( |(x(k) - y(k-1))| > M and c < n ) {
    c = c + 1
```

```
    y(k) = y(k-1) }
```

```
ELSE {
```

```
    c = 0
```

```
    y(k) = x(k) }
```

โดยที่

$x(k)$ เป็นข้อมูลอินพุตที่เวลา k

$y(k)$ ข้อมูลเอาต์พุตที่เวลา k

M เป็นขนาดการเปลี่ยนแปลงที่ยอมรับได้

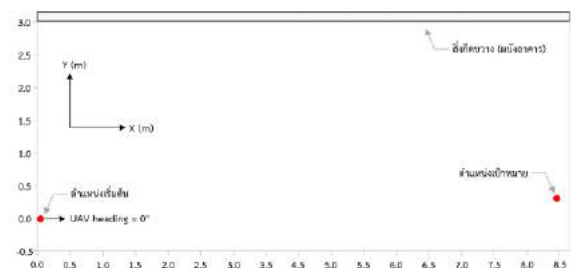
n เป็นจำนวนข้อมูลที่มีการเปลี่ยนแปลงสูงที่ยอมรับได้

c เป็นตัวนับจำนวนครั้งที่อินพุตมีความเปลี่ยนแปลงสูง

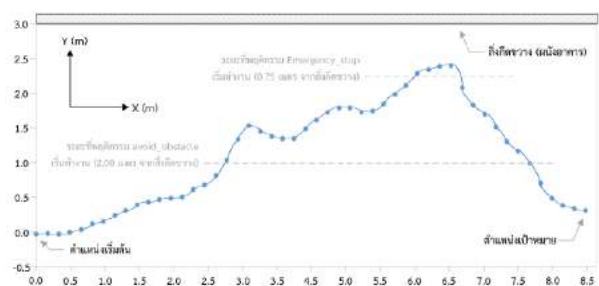
ภายหลังการกรองจะได้ข้อมูลที่ไม่มีการเปลี่ยนแปลงกลับไปมาอย่างรวดเร็วและมีความถูกต้องมากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 12

5 การทดสอบประสิทธิภาพของระบบควบคุมที่นำเสนอ

การทดสอบการทำงานของระบบที่นำเสนอถูกดำเนินการโดยแบ่งการทดลองออกเป็น 3 การทดลอง การทดลองแรกเป็นการทดลองในสถานที่โล่งที่มีสิ่งกีดขวางเพียงด้านเดียวตลอดการเคลื่อนที่ของอากาศยาน ดังแสดงในรูปที่ 13 ทั้งนี้เพื่อต้องการทดสอบการทำงานของพฤติกรรม `go_to_target` พฤติกรรม `avoid_obstacle` และพฤติกรรม `emergency_stop` ที่พัฒนาขึ้นสำหรับใช้ควบคุมการเคลื่อนที่ของอากาศยาน การดำเนินการทดสอบเริ่มต้นโดยสั่งการให้อากาศยานเคลื่อนที่ไปในทิศทางตามแนวแกน X จากนั้นให้ผู้ควบคุมพยายามบังคับให้อากาศยานบินเข้าหาสิ่งกีดขวางซึ่งอยู่ทางด้านซ้ายของทิศทางการเคลื่อนที่ (แนวแกน +Y) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถควบคุมให้อากาศยานเคลื่อนที่เข้าสู่จุดหมายที่กำหนดได้สำเร็จอย่างปลอดภัย ดังแสดงในรูปที่ 14 โดยมีรายละเอียดการทำงานของระบบเป็นดังนี้

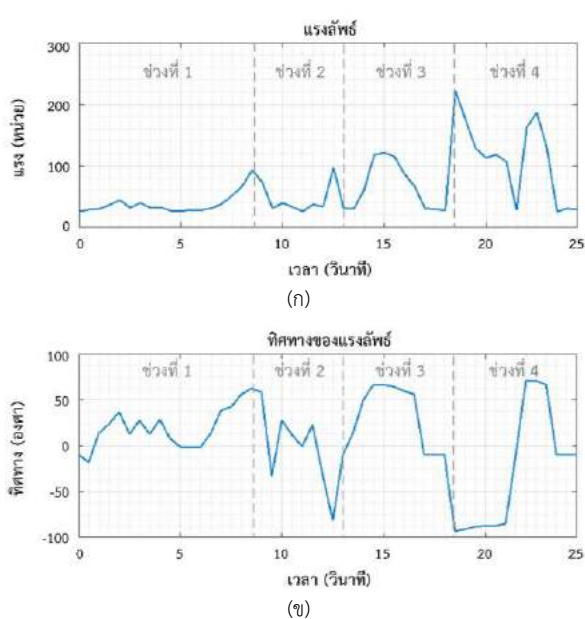


รูปที่ 13 รูปแบบของสถานการณ์ในการดำเนินการทดลองที่ 1



รูปที่ 14 เส้นทางเคลื่อนที่ของอากาศยานในการทดลองที่ 1

การทำงานในช่วงที่ 1 เริ่มต้นโดยควบคุมให้อากาศยานอยู่ห่างจากสิ่งกีดขวางเป็นระยะทาง 3 เมตร แล้วจึงเคลื่อนที่ไปข้างหน้าอย่างช้าๆ ในทิศทางคงที่ (อากาศยานทำมุมประมาณ 0° กับแกน X) จากนั้นผู้ควบคุมสั่งการให้อากาศยานเคลื่อนที่เข้าหาสิ่งกีดขวางซึ่งอยู่ทางด้านซ้าย (แนวแกน +Y) โดยประสงค์ให้การเคลื่อนที่ของอากาศยานมีระยะห่างจากสิ่งกีดขวางมากกว่า 2 เมตร ซึ่งในระยะดังกล่าว พฤติกรรม `go_to_target` ซึ่งถูกกำหนดโดยผู้ควบคุมอากาศยานจะทำงานเพียงพฤติกรรมเดียว ส่งผลให้อากาศยานสามารถเคลื่อนที่ไปตามที่ผู้ควบคุมกำหนดได้อย่างถูกต้อง รูปที่ 15 ก. และ ข. แสดงผลรวมและทิศทางของแรงลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากทำงานของระบบ (พิจารณาช่วงที่ 1 ซึ่งเป็นช่วงเวลาที่พฤติกรรม `go_to_target` ทำงาน ในขณะที่พฤติกรรมอื่นยังไม่เริ่มทำงาน)



รูปที่ 15 ก. แรงลัพธ์ และ ข. ทิศทางของแรงลัพธ์ที่กระทำต่ออากาศยานขณะทำการทดลองที่ 1

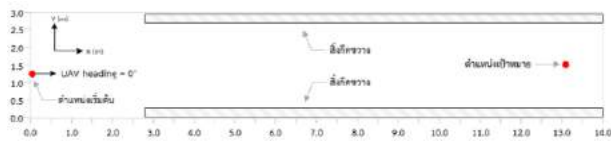
ในช่วงที่ 2 ผู้ควบคุมยังคงสั่งการให้อากาศยานเคลื่อนที่ไปทางด้านซ้ายจนกระทั่งระบบตรวจพบสิ่งกีดขวางในระยะห่างต่ำกว่า 2 เมตร ที่ระยะห่างนี้พฤติกรรม `avoid_obstacle` จะเริ่มทำงาน โดยจะสร้างแรงผลักซึ่งจะมีค่ามากขึ้นเมื่อระยะห่างระหว่างอากาศยานกับสิ่งกีดขวางมีค่าลดลง ส่งผลให้อากาศยานเริ่มบินเข้าหาสิ่งกีดขวางได้ช้าลง เนื่องจากแรงผลักที่เกิดจากพฤติกรรม `avoid_obstacle` จะมีค่ามากขึ้นเรื่อยๆ และมีทิศทางตรงข้ามกับแรงดึงดูดที่เกิดจากการบังคับอากาศยาน

(พฤติกรรม `go_to_target`) ส่งผลให้เกิดแรงลัพธ์ขึ้นในทิศทางที่นำพาอากาศยานออกจากสิ่งกีดขวาง โดยแรงลัพธ์จะมีค่าน้อยลงและมีทิศทางพุ่งออกจากสิ่งกีดขวาง (พิจารณารูปที่ 15 ที่ช่วงเวลาประมาณวินาทีที่ 8 – 9) จากนั้นเมื่อระยะห่างจากสิ่งกีดขวางเพิ่มขึ้น (แรงผลักลดลง) แรงดึงดูดที่เกิดจากพฤติกรรม `go_to_target` จะกลับมามีค่ามากกว่าแรงผลักที่เกิดจากพฤติกรรม `avoid_obstacle` อีกครั้ง ส่งผลให้แรงลัพธ์มีค่าสูงขึ้นและมีทิศทางพุ่งเข้าหาสิ่งกีดขวาง ทำให้อากาศยานเคลื่อนที่เข้าหาสิ่งกีดขวางอีกครั้ง โดยแรงลัพธ์และทิศทางของแรงจะมีค่าเปลี่ยนแปลงไปมาในขณะที่ทำงานในช่วงที่ 2 (พิจารณารูปที่ 15 ที่ช่วงเวลาประมาณวินาทีที่ 9 – 13) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าระบบมีการตอบสนองต่อการตรวจพบสิ่งกีดขวางได้ถูกต้องตามที่ออกแบบไว้

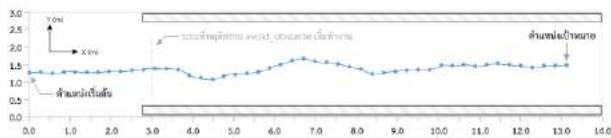
หลังจากนั้นผู้ควบคุมทำการเพิ่มแรงเพื่อบังคับให้อากาศยานเคลื่อนที่เข้าหาสิ่งกีดขวางมากขึ้น (เพิ่มแรงให้พฤติกรรม `go_to_target`) โดยบังคับให้อากาศยานบินอยู่ที่ระยะห่างจากสิ่งกีดขวางต่ำกว่า 0.75 เมตร เพื่อให้อากาศยานเข้าสู่ระยะวิกฤต (ช่วงที่ 3) ส่งผลให้พฤติกรรม `emergency_stop` เริ่มทำงาน โดยระบบจะสร้างแรงจากสถานการณ์วิกฤตขึ้นทำให้ผู้ควบคุมไม่สามารถควบคุมอากาศยานให้เข้าใกล้มากขึ้นได้อีก (พิจารณารูปที่ 15 ประมาณวินาทีที่ 15 – 16) จากนั้นผู้ควบคุมจึงทำการเปลี่ยนแรงควบคุมให้ลดน้อยลงในทันที ส่งผลให้แรงที่เกิดจากสถานการณ์วิกฤตหมดลง (ช่วงที่ 4) ในขณะที่แรงผลักซึ่งเกิดจากพฤติกรรม `avoid_obstacle` จะมีค่าสูงกว่าแรงบังคับจากผู้ควบคุมอากาศยานมาก ส่งผลให้อากาศยานเคลื่อนที่ออกจากระยะวิกฤตเข้าสู่ระยะห่างที่ปลอดภัย จากนั้นผู้ควบคุมจึงสามารถกลับเข้าควบคุมอากาศยานได้อีกครั้ง โดยทำการควบคุมให้อากาศยานเคลื่อนที่ต่อเพื่อเข้าสู่จุดหมายปลายทางที่กำหนดไว้ได้สำเร็จอย่างปลอดภัย

การทดลองที่ 2 เป็นการทดสอบการทำงานของระบบโดยจำลองสถานการณ์ให้มีสิ่งกีดขวางขนานทั้งสองด้านของการเคลื่อนที่ ในลักษณะของช่องทางแคบๆ หรือโถงอาคาร โดยกำหนดให้มีความกว้างประมาณ 2.5 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 16 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถควบคุมให้อากาศยานเคลื่อนที่ผ่านช่องทางทดสอบเพื่อเข้าสู่จุดหมายที่กำหนดได้สำเร็จ โดยมีเส้นทางการเคลื่อนที่อยู่ภายในบริเวณกึ่งกลางของ

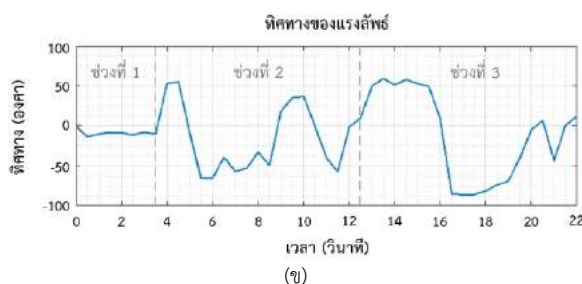
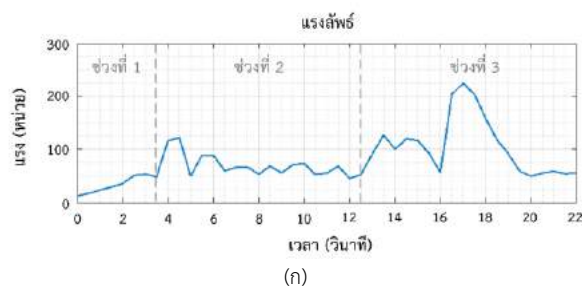
ช่องแคบดังแสดงในรูปที่ 17 โดยมีรายละเอียดการทำงานเป็นดังนี้



รูปที่ 16 รูปแบบของสถานการณ์ในการดำเนินการทดลองที่ 2



รูปที่ 17 เส้นทางเคลื่อนที่ของอากาศยานในการทดลองที่ 2

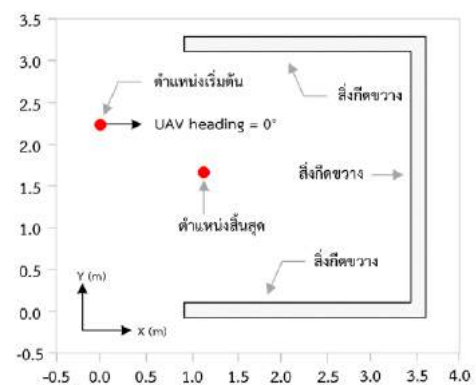


รูปที่ 18 ก. แรงลัพธ์ และ ข. ทิศทางของแรงลัพธ์ที่กระทำต่ออากาศยานขณะทำการทดลองที่ 2

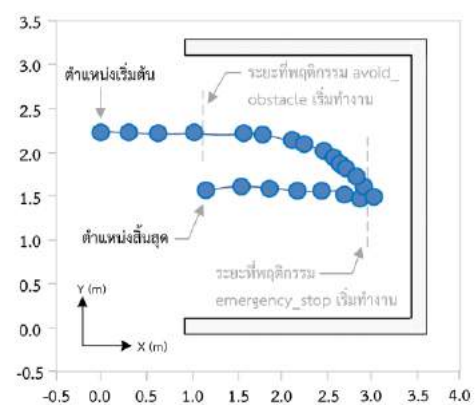
การทดลองเริ่มต้นโดยให้อากาศยานเคลื่อนที่อยู่บริเวณด้านหน้าของช่องทางทดสอบ (ช่วงที่ 1) จากนั้นผู้ควบคุมสั่งการให้อากาศยานเคลื่อนที่ไปข้างหน้าช้าๆ จนกระทั่งเคลื่อนเข้าไปในช่องแคบ (ช่วงที่ 2) ในบริเวณดังกล่าวพฤติกรรม `avoid_obstacle` จะเริ่มทำงาน โดยแรงผลักจะเกิดขึ้นทั้งสองทิศทางเนื่องจากระบบสามารถตรวจจับสิ่งกีดขวางได้ทั้งบริเวณด้านซ้ายและด้านขวาของอากาศยาน ซึ่งแรงผลักทั้งสองแรงดังกล่าวจะมีขนาดใกล้เคียงกันและมีทิศทางตรงข้ามกัน ผลรวมของแรงผลักจึงหักล้างกันจนทำให้แรงลัพธ์ที่กระทำต่ออากาศยานมีผลมาจากพฤติกรรม `go_to_target` เป็นหลัก

ส่งผลให้อากาศยานสามารถเคลื่อนที่และรักษาเส้นทางการบินให้อยู่ในบริเวณแนวกึ่งกลางของช่องทางทดสอบได้ รูปที่ 18 ก. และ ข. แสดงผลรวมและทิศทางของแรงลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากการทดสอบการเคลื่อนที่ไปของอากาศยาน

ในช่วงที่ 3 ของการทดสอบ ผู้ควบคุมสั่งการให้อากาศยานเคลื่อนที่เข้าใกล้สิ่งกีดขวางทางด้านซ้าย (แนวแกน +Y) ส่งผลให้อากาศยานเข้าใกล้สิ่งกีดขวางมากขึ้น หลังจากนั้นผู้ควบคุมจึงสั่งการให้แรงบังคับนั้นลดลงอย่างรวดเร็ว ทำให้อากาศยานกลับมารักษาเส้นทางการบินในแนวกึ่งกลางดังเดิม เนื่องจากแรงผลักที่เกิดจากสิ่งกีดขวางด้านซ้ายมีค่าสูงมากจึงทำให้เกิดแรงลัพธ์ในทิศทางที่นำพาให้อากาศยานเคลื่อนที่ห่างจากสิ่งกีดขวางดังกล่าวได้อย่างปลอดภัย จากนั้นจึงเคลื่อนที่ต่อไปจนถึงจุดหมายปลายทางที่กำหนดไว้



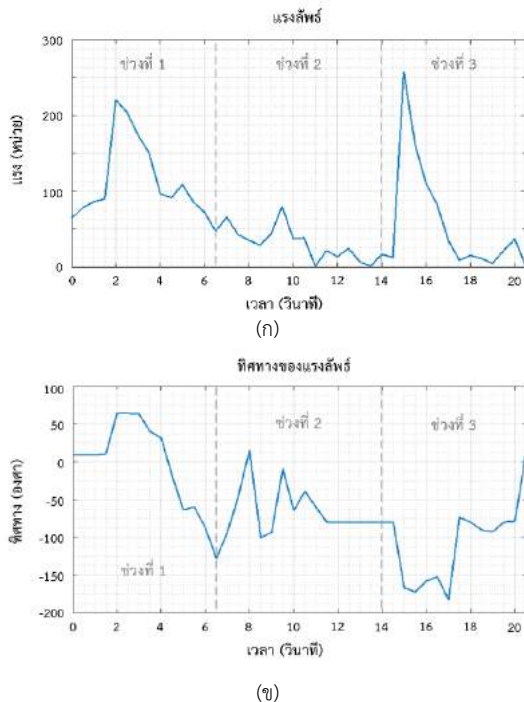
รูปที่ 19 รูปแบบของสถานการณ์ในการดำเนินการทดลองที่ 3



รูปที่ 20 เส้นทางเคลื่อนที่ของอากาศยานในการทดลองที่ 3

สำหรับการทดลองที่ 3 เป็นการควบคุมอากาศยานให้เคลื่อนที่เข้าหาสิ่งกีดขวางที่มีลักษณะเป็นช่องปิดทางด้านหน้า (U-shape) โดยกำหนดให้ช่องปิดมีความกว้าง 3 เมตร และมี

ความลึกประมาณ 2.75 เมตร ดังแสดงในรูปที่ 19 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบสามารถควบคุมให้อากาศยานเคลื่อนที่ออกจากช่องปิดได้สำเร็จโดยไม่เกิดการชนกับสิ่งกีดขวางรอบตัว และมีเส้นทางการเคลื่อนที่ดังแสดงในรูปที่ 20 โดยมีรายละเอียดการทำงานเป็นดังนี้



รูปที่ 21 ก. แรงลัพธ์ และ ข. ทิศทางของแรงลัพธ์ที่กระทำต่ออากาศยาน ขณะทำการทดลองที่ 3

การทดสอบเริ่มจากควบคุมให้อากาศยานเคลื่อนที่อยู่ห่างจากช่องปิดเป็นระยะทางประมาณ 1 เมตร โดยหันด้านหน้าอากาศยานเข้าหาช่องปิด (แนวแกน +X) จากนั้นผู้ควบคุมทำการสั่งการให้อากาศยานเคลื่อนที่เข้าหาช่องปิดอย่างช้าๆ (ช่วงที่ 1) เมื่อเข้าใกล้สิ่งกีดขวางในระยะต่ำกว่า 2 เมตร (สิ่งกีดขวางด้านซ้ายของอากาศยาน) พฤติกรรม `avoid_obstacle` จะสร้างแรงผลักอากาศยานออกจากสิ่งกีดขวางดังกล่าว ส่งผลให้อากาศยานรักษาดำแหน่งการเคลื่อนที่ให้อยู่บริเวณแนวกึ่งกลางช่องปิดและเคลื่อนที่ต่อไปข้างหน้าได้ อย่างไรก็ตามความเร็วในการเคลื่อนที่ไปข้างหน้าจะมีค่าลดลง เนื่องจากเกิดแรงผลักอีกชุดหนึ่งจากสิ่งกีดขวางที่อยู่ด้านหน้ากระทำต่ออากาศยาน โดยแรงผลัสดังกล่าวจะมีทิศทางตรงข้ามกับแรงควบคุมการเคลื่อนที่ไปข้างหน้า ส่งผลให้เกิดการหักล้างกันของแรง ทำให้แรงลัพธ์มีค่าลดลงจนเข้าใกล้ศูนย์ สถานการณ์ดังกล่าวทำให้อากาศยาน

เคลื่อนที่ได้ช้าลงจนหยุดการเคลื่อนที่ในที่สุด รูปที่ 21 ก. และ ข. แสดงผลรวมและทิศทางของแรงลัพธ์ที่เกิดขึ้นจากการทดสอบการเคลื่อนที่ของอากาศยานภายในบริเวณช่องปิด

เมื่ออากาศยานหยุดการเคลื่อนที่ ผู้ควบคุมทำการเพิ่มแรงควบคุมในทิศทางไปข้างหน้า (พฤติกรรม `go_to_target`) เพื่อสั่งการให้อากาศยานเคลื่อนที่ต่อไป (แนวแกน +X) ส่งผลให้อากาศยานเคลื่อนที่ไปข้างหน้าจนถึงระยะวิกฤติ จากนั้นระบบจะควบคุมให้อากาศยานไม่สามารถเคลื่อนที่ต่อไปได้อีก ทั้งนี้เนื่องจากพฤติกรรม `emergency_stop` ได้เริ่มทำงาน ส่งผลให้ผู้ควบคุมไม่สามารถควบคุมอากาศยานให้เคลื่อนที่เข้าใกล้สิ่งกีดขวางด้านหน้าได้มากขึ้นอีก ในช่วงที่ 3 ของการทดสอบผู้ควบคุมทำการเปลี่ยนแรงควบคุมให้ลดน้อยลงในทันที ทำให้แรงที่เกิดจากสถานการณ์วิกฤติหมดลง ในขณะที่แรงผลักซึ่งเกิดจากพฤติกรรมหลบหลีกสิ่งกีดขวางจะมีค่ามากกว่าแรงดึงดูดส่งผลให้อากาศยานเคลื่อนที่ถอยหลังออกจากระยะวิกฤติ จากนั้นผู้ควบคุมจึงสามารถควบคุมให้อากาศยานเคลื่อนที่ออกจากช่องปิดได้อย่างปลอดภัย

จากผลการทดลองทั้ง 3 การทดลองแสดงให้เห็นว่าแรงลัพธ์ที่เกิดขึ้นจะมีขนาดและทิศทางสอดคล้องกับเส้นทางการเคลื่อนที่ของอากาศยาน และอากาศยานมีการตอบสนองต่อแรงจากการออกแบบระบบควบคุมตามทฤษฎี Motor Schema ได้อย่างถูกต้อง โดยแรงผลักรอกจากสิ่งกีดขวางสามารถช่วยชะลอการเคลื่อนที่เข้าหาสิ่งกีดขวางได้ ในขณะที่แรงที่เกิดขึ้นในสถานการณ์วิกฤติสามารถยกเลิกคำสั่งควบคุมที่อาจทำให้อากาศยานเคลื่อนที่ชนกับสิ่งกีดขวางได้ ส่งผลให้ระบบสามารถควบคุมการทำงานของอากาศยานได้อย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพ

6. บทสรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนากระบวนการควบคุมอากาศยานไร้คนขับโดยนำสถาปัตยกรรมการควบคุมเชิงพฤติกรรมมาประยุกต์ใช้งาน ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถช่วยชะลอความเร็วของอากาศยานลงโดยอัตโนมัติหากมีการเคลื่อนที่เข้าใกล้สิ่งกีดขวาง โดยความเร็วของอากาศยานจะสัมพันธ์กับระยะห่างจากสิ่งกีดขวางในทิศทางที่อากาศยานเคลื่อนที่ไป ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าระบบมีการตอบสนองต่อแรงควบคุมจากการ

บังคับอากาศยานได้อย่างถูกต้อง โดยเมื่อตรวจพบสิ่งกีดขวางในระยะห่างต่ำกว่า 2 เมตร ระบบจะสร้างแรงผลักดันเพื่อนำทางให้อากาศยานเคลื่อนที่ออกจากสิ่งกีดขวาง ส่งผลให้อากาศยานไม่ตอบสนองต่อการบังคับของผู้ควบคุมอากาศยานเหมือนในสถานการณ์ปกติ โดยอากาศยานจะยังเคลื่อนที่ไปในทิศทางที่ผู้ควบคุมกำหนดแต่จะเป็นการเคลื่อนที่ที่ช้าลง และเมื่อเคลื่อนที่เข้าไปในบริเวณที่ตรวจพบสิ่งกีดขวางในระยะห่างที่ต่ำกว่า 0.75 เมตร ระบบจะเข้าควบคุมการเคลื่อนที่ของอากาศยานทั้งหมดโดยจะทำการยกเลิกคำสั่งจากผู้ควบคุมอากาศยานเนื่องจากมีความเสี่ยงสูงที่อากาศยานจะเคลื่อนที่ชนกับสิ่งกีดขวางหากมีการเคลื่อนที่ต่อไป หลังจากนั้นระบบจะทำการรักษาระยะห่างของอากาศยานกับสิ่งกีดขวาง และจะนำทางให้อากาศยานเคลื่อนที่ออกจากบริเวณที่มีสิ่งกีดขวางดังกล่าวโดยอัตโนมัติ ส่งผลให้อากาศยานสามารถปฏิบัติงานได้สำเร็จอย่างปลอดภัยและมีประสิทธิภาพ

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์ในการสนับสนุนการวิจัย และขอขอบคุณนายอภิสิทธิ์ เพ็ชรเจริญ นิสิตภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร สำหรับความช่วยเหลือในการดำเนินการทดลอง

8. เอกสารอ้างอิง

- Achtelik, M., Bachrach, R., He, R., Prentice, S., & Roy, N. (2009). *Autonomous Navigation and Exploration of a Quadrotor Helicopter in GPS-denied Indoor Environments*. Association for Unmanned Vehicle Systems International.
- Altug, E., Ostrowki, J. P., & Mahony, R. (2002). Control of a Quadrotor Helicopter using Visual Feedback. *Proceedings of the 2002 IEEE International Conference on Robotics and Automation* (pp. 72-77). Washington, DC, USA.
- Amidi, O., Kanade, T., & Miller, R. (1998). Vision-base autonomous helicopter research at Carnegie mellon robotics institute 1991-1997. *Proceedings of American Helicopter Society International Conference* (pp. T7-3-1 - T7-3-12) Hali, Japan.
- Arkin, R. C. (1989). Motor Schema-based Mobile Robot Navigation. *International Journal of Robotics Research*, 1989, 92-112.
- Brooks, R. A. (1986). A Robust Layered Control System for a Mobile Robot. *IEEE Journal of Robotics and Automation*, RA-2(1), 14-23.
- Doherty, P., Granlund, G., Kuchcinske, K., Sandewall, E., Nordberg, K., Skarman, E., & Wiklund, J. (2000). The WITAS Unmanned Aerial Vehicle Project, ECAI 2000. *Proceedings of the 14th European Conference on Artificial Intelligence* (pp. 747-755). Berlin, Germany.
- Helble, H., & Cameron, S. (2007). OATS: Oxford Aerial Tracking System. *Robotics and Autonomous Systems*, 55(9), 661-666.
- Hoffmann, G., Rajnarayan, D. G., Waslander, S. L., Dostal, D., Jang, J. S., & Tomlin, C. J. (2004). The Stanford Testbed of Autonomous Rotorcraft for MultiAgent Control (STARMAC). *Proceedings of the IEEE Digital Avionics Systems Conference* (pp. 12.E.4-1 - 12.E.4-10). Salt Lake City, UT, USA.
- Jian, C., & Dawson, D. M. (2006). UAV Tracking with a Monocular Camera. *Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control*.
- Khatib, O. (1986). Real-Time Obstacle Avoidance for Manipulators and Mobile Robots. *The International Journal of Robotics Research*, 5(1), 90-98.
- Mataric, M. J. (2007). *The Robotics Primer*. MIT Press.
- Meng, Q.-H., Lan, S.-Y., Yao, Z.-J., & Li, G. W. (2009). Real-Time Noncrossstalk Sonar System by Short Optimized Pulse-Position Modulation Sequences. *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, 10, 3442-3449.
- Nattharith, P. (2011). Introduction to Autonomous Mobile Robot. *Naresuan University Engineering Journal*, 6(2), 31-41.
- Nattharith, P. (2016). Motor Schema-based Control of Mobile Robot Navigation. *International Journal of Robotics and Automation*, 31(4), 310-320.
- Nattharith, P., & Bicker, R. (2009). Mobile Robot Navigation using a Behavioural Strategy. *Proceedings of the 11th IASTED International Conference on Control and Application*, (pp. 143-148) Cambridge, UK.

- Nattharith, P., & Guzel, M. S. (2016). Machine Vision and Fuzzy Logic-based Navigation Control of a Goal-Oriented Mobile Robot. *Adaptive Behavior*, 24(3), 168-180.
- Nelson, D. R., Barder, D. B., McLain, T. W., & Beard, R. W. (2006). Vector field path following for small unmanned air vehicle. *Proceedings of the American Control Conference* (pp. 5788-5794). Minneapolis, MN, USA.
- Oyekan, J., & Hu, H. (2009). Toward Autonomous Patrol Behaviours for UAV. *UK EPSRC Workshop on Human Adaptive Mechatronics, 2009*, 15-16.
- Oyekan, J., Lu, B., Li, B., Gu, D., & Hu, H. (2010). A Behavior Based Control System for Surveillance UAVs. In *Robot Intelligence: An Advanced Knowledge Processing Approach* (pp. 209-228). Springer.
- Rey, H. G., Pedreira, C., & Quiroga, R. Q. (2015). Past, Present and Future of Spike Sorting Techniques. *Brain Research Bulletin*, 2015, 106-117.
- Rock, S. M., Frew, E. W., Jones, H., LeMaster, E. A., & Woodley, B. R. (1998). Combined CDGPS and vision-based control of a small autonomous helicopter. *Proceedings of the American Control Conference* (pp. 694-698). Philadelphia, PA, USA.
- Saripalli, S., Montgomery, J. F., & Sukhatme, G. S. (2002). Vision-based autonomous landing of an unmanned aerial vehicle. *Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and Automation* (pp. 2799-2804). Washington, DC, USA.
- Shim, D. H., Chung, H., Sastry, S., & Kim, H. J. (2005). Autonomous Exploration in Unknown Urban Environments for Unmanned Aerial Vehicles. *Proceedings of American Institute of Aeronautics and Astronautics Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit* (pp. 1-8).
- Zuffery, J. C., & Floreano, D. (2006). Fly-Inspired Visual Steering of an Ultralight Indoor Aircraft. *IEEE Transaction on Robotics*, 22(1), 137-146.

แอปพลิเคชันทดลองสวมใส่เครื่องประดับบนสมาร์ตโฟนด้วยเทคโนโลยีความจริงเสริม Virtual Try-on Experience Mobile Application with Augmented Technology for Jewelry Business

สมลักษณ์ วรรณฤมล กีเยลาโรว่า*¹, พนมขวัญ ริยะมงคล², รัฐภูมิ วรานุสาสน์², ปิยะรัชช ธรรมวัฒนกุล²,
พงศกร ศิริค้ำน้อย², สุนิษา แสนศรี¹

Somlak Wannarumon Kielarova*¹, Panomkhawn Riyamongkol², Rattapoom Waranusast²,
Piyarach Tamwattanakul², Pongsakorn Sirikamnoi², Sunisa Sansri¹

¹iD3 หน่วยวิจัย ด้านการออกแบบ การตัดสินใจ และการพัฒนาทางอุตสาหกรรม

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

²หน่วยวิจัยด้านเทคโนโลยีที่ศูนย์สารสนเทศคอมพิวเตอร์ และการโต้ตอบกับมนุษย์

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

¹iD3 Research Center for Industrial Design, Decision and Development

Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Naresuan University

²Computer Vision and Human Interaction Technologies Laboratory: Vision Lab

Department of Engineering Program in Electrical and Computer Engineering, Faculty of Engineering, Naresuan University

*Corresponding author e-mail: somlakw@nu.ac.th

(Received: 26 September 2020, Revised: 22 March 2021, Accepted: 31 March 2021)

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการพัฒนาแอปพลิเคชันทดลองสวมใส่เครื่องประดับบนสมาร์ตโฟนด้วยเทคโนโลยีความจริงเสริม (Augmented Reality) เพื่อให้ลูกค้าของผู้ประกอบการธุรกิจเครื่องประดับทางออนไลน์ทดลองสวมใส่เครื่องประดับได้เสมือนจริง เพิ่มโอกาสในการขายสินค้า ระบบที่พัฒนาขึ้นใช้เทคโนโลยีความจริงเสริมแบบไม่ใช้ตัวระบุตำแหน่ง (Marker) และประยุกต์ใช้เทคนิคการรู้จำในการตรวจจับมือของผู้ใช้งาน และนำข้อมูลที่สำคัญไปจัดทำโมเดลชิ้นงานเครื่องประดับแบบสามมิติ ผ่านการเรนเดอร์ผิวของโมเดลให้มีความสมจริง และสามารถปรับเปลี่ยนแบบและขนาดได้ตามความต้องการของลูกค้า ซึ่งวิธีการนี้ทำให้มีต้นทุนการผลิตต่ำกว่ารูปแบบเดิม ความถูกต้องแม่นยำของการวางโมเดลสามมิติของแหวนบนตำแหน่งของนิ้วมือเท่ากับร้อยละ 94.17 โดยเฉลี่ย ความถูกต้องแม่นยำในเรื่องของการวางโมเดลสามมิติของกำไลบนตำแหน่งของข้อมือ ร้อยละ 100 จากการทดสอบการใช้งานกับกลุ่มเป้าหมายประกอบด้วยผู้ประกอบการจำหน่ายเครื่องประดับและลูกค้าผู้ซื้อ พบว่า มีความพึงพอใจมากที่สุดในเรื่องของการง่ายในการใช้งาน และสร้างความมั่นใจในการตัดสินใจซื้อสินค้า และมีความพึงพอใจมากในเรื่องของความสมจริงในการทดลองสวมใส่

คำสำคัญ: คอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบ, การออกแบบเครื่องประดับ, เทคโนโลยีความจริงเสริม, การทดลองสวมใส่, การซื้อทางออนไลน์

Abstract

This paper proposes the development of virtual try-on experience mobile application, by using augmented reality technology, for online jewelry customers virtually trying-on jewelry products to increase opportunity to sale products. The proposed system is developed using marker less technique. It applies the recognition technique to detect user's hand. The three-dimensional (3D) model of the jewelry product with realistic rendering is modeled in which could be changed its details and size according to customer's requirement. This method can reduce the production costs of the conventional process. The accuracy of the position of 3D ring model on finger is approximately 94.17% and 100% for the case of bangle. From testing with jewelry entrepreneurs and customers, the results reveal that the use of the proposed try-on experience mobile application in terms of ease-of-use and increasing confidence in making purchasing decisions are highest appreciated, while the realistic look issue is highly satisfied.

Keywords: Computer-Aided Design, Jewelry Design, Augmented Reality, Try-On Experience, Online Shopping.

1. บทนำ

บทความนี้ได้นำเทคโนโลยีเออาร์ Augmented Reality Technology (AR) หรือภาษาไทยใช้คำว่า ความจริงเสริม เป็นการผนวกโลกแห่งความจริงและโลกดิจิทัลเข้าด้วยกันบนเทคโนโลยีเสมือนจริง เทคโนโลยี AR ถูกนำมาประยุกต์ใช้ เพื่อใช้สร้างความดึงดูดใจ และเพิ่มมุมมองที่น่าสนใจแก่สินค้าเครื่องประดับได้เป็นอย่างดี สามารถช่วยในการตลาดและการขายสินค้า สามารถช่วยสร้างความแตกต่าง เพื่อความได้เปรียบในการแข่งขัน เนื่องจากการมีปฏิสัมพันธ์ของลูกค้าที่มีต่อสินค้าผ่านเทคโนโลยีนี้ ทำให้ลูกค้ารู้สึกมีส่วนร่วมกับแบรนด์และสามารถสร้างการสื่อสารสองทางระหว่างลูกค้าและแบรนด์หรือผู้ประกอบการได้ และสามารถประยุกต์ใช้เทคโนโลยีนี้สร้างการตลาดแบบส่วนบุคคล (Personalized marketing) กับลูกค้าได้ โดยเฉพาะธุรกิจค้าปลีกด้านแฟชั่นซึ่งลูกค้าของธุรกิจเน้นความเป็นปัจเจกและความแตกต่างสูงกว่าธุรกิจค้าปลีกอื่น

เทคโนโลยี AR ถูกนำมาใช้ในการพัฒนาแอปพลิเคชันทดลองสวมใส่แบบเสมือนจริง ที่ใช้งานบนสมาร์ตโฟน ทำงานร่วมกับกล้องด้านหลังของสมาร์ตโฟน โดยลูกค้าสามารถทดลองสวมใส่ผลิตภัณฑ์เครื่องประดับแหวนและกำไลแบบเสมือนจริง โดยที่ยังไม่ได้ผลิตสินค้าออกมา ในการทดลองสวมใส่ สามารถใช้เพียงโมเดลสามมิติ ผ่านการเรนเดอร์ผิวให้มีความสมจริง

ในปัจจุบัน พฤติกรรมการซื้อสินค้าเครื่องประดับของผู้บริโภคได้เปลี่ยนไป มีความนิยมในการซื้อสินค้าเครื่องประดับ

ทางออนไลน์สูงขึ้น ประกอบกับการเกิดสถานการณ์โควิด (COVID-19) ส่งผลให้ผู้ประกอบการธุรกิจเครื่องประดับปรับเปลี่ยนกลยุทธ์มาทำการตลาดและจำหน่ายสินค้าทางออนไลน์สูงขึ้น ดังนั้นการพัฒนาแอปพลิเคชันนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อสามารถรองรับและสนับสนุนการเปลี่ยนแปลงพฤติกรรม การซื้อขายสินค้าเครื่องประดับในยุคดิจิทัล และเพื่อการพัฒนาเครื่องมือที่ช่วยในการทดลองสวมใส่เครื่องประดับทางออนไลน์ ที่สร้างความมั่นใจให้กับผู้ซื้อ และเพิ่มโอกาสในการจำหน่ายสินค้าเครื่องประดับได้มากขึ้น อีกทั้งในอนาคต ยังสามารถเก็บข้อมูลของลูกค้าหรือผู้ซื้อจากการทดลองสวมใส่เพื่อนำมาใช้ในการวิเคราะห์ตลาดและสินค้า

ในส่วนต่อไปของบทความนี้ ประกอบด้วย หัวข้อที่ 2 กล่าวถึงงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง หัวข้อที่ 3 อธิบายถึงกรอบแนวคิดในการพัฒนาแอปพลิเคชันทดลองสวมใส่เครื่องประดับบนสมาร์ตโฟน หัวข้อที่ 4 นำเสนอผลการดำเนินงานวิจัยและวิเคราะห์ผลจากการดำเนินงาน และหัวข้อสุดท้าย หัวข้อที่ 5 ได้สรุปผลการดำเนินงานและประเด็นที่น่าสนใจสำหรับแนวทางการดำเนินงานวิจัยต่อไปในอนาคต

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ความจริงเสริม (Augmented Reality: AR)

เทคโนโลยีความจริงเสริม (Augmented Reality: AR) เป็นเทคโนโลยีทางคอมพิวเตอร์ที่ทำให้เกิดการผสมแบบเวลาจริง

(Real-time) ระหว่างเนื้อหาที่สร้างขึ้นด้วยคอมพิวเตอร์ (Computer-generated Content) เช่น ภาพคอมพิวเตอร์กราฟิก หรือเสียงประกอบ เข้ากับเนื้อหาในโลกจริง เช่น ภาพจากวิดีโอ เป็นต้น และในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาเทคโนโลยีด้านอุปกรณ์เคลื่อนที่ มีการพัฒนาขึ้นมากทั้งในด้านประสิทธิภาพของการคำนวณที่มากขึ้น กล้องถ่ายภาพที่มีความละเอียดมากขึ้น เซ็นเซอร์ที่มีความแม่นยำขึ้น และราคาของอุปกรณ์ที่ถูกลง ทำให้มีการประยุกต์ความจริงเสริมบนอุปกรณ์เคลื่อนที่ หรือที่เรียกว่าความจริงเสริมบนอุปกรณ์เคลื่อนที่ (Mobile Augmented Reality: MAR) เทคโนโลยีดังกล่าวมีบทบาทมากขึ้นทั้งในแวดวงวิชาการด้านงานวิจัยและแวดวงอุตสาหกรรมและธุรกิจ (Chatzopoulos et al., 2017)

เทคโนโลยี AR ถูกใช้อย่างแพร่หลายในงานหลายด้าน เช่น การแพทย์มีการใช้เทคโนโลยีนี้ในการแสดงข้อมูลภาพทางการแพทย์ของผู้ป่วยซ้อนทับไปกับภาพผู้ป่วยจริงเพื่อใช้ในการวางแผนการผ่าตัด (Bajura et al., 1992; Wen et al., 2014) หรือการใช้ในการฝึกฝนบุคลากรทางการแพทย์และสาธารณสุข (Farrington et al., 1999; Pretto et al., 2009) การทหารใช้ในการเสริมข้อมูลในการรบ (Foxlin et al., 2004; Gans et al., 2015) และการฝึก (Yohan et al., 2000; Livingston et al., 2005) ทางอุตสาหกรรมใช้ช่วยเสริมและฝึกการประกอบและบำรุงรักษาในกระบวนการผลิต (Billinghurst et al., 2008; Henderson & Feiner, 2011; Webel et al., 2013) การศึกษาใช้ในการเสริมทักษะสำหรับนักเรียน (Billinghurst & Duenser, 2012; Chen et al., 2017) และใช้ในการให้ข้อมูลประกอบในพิพิธภัณฑ์ (Klopper et al., 2015; Nakamura & Miyashita, 2010) หรือเกมและความบันเทิง (Piekarski & Thomas, 2012; Hakkarainen & Woodward, 2005; Cavallaro et al., 2011) เป็นต้น

เทคโนโลยีความจริงเสริมนี้มีผลต่อธุรกิจค้าปลีกอย่างมาก เพราะเทคโนโลยีดังกล่าวสามารถใช้เพื่อให้ผู้ประกอบการได้เปรียบคู่แข่งเนื่องจากการมีปฏิสัมพันธ์ของลูกค้าที่มีต่อสินค้าผ่านเทคโนโลยีนี้ทำให้ลูกค้ารู้สึกมีส่วนร่วมกับแบรนด์และสามารถสร้างการสื่อสารสองทางระหว่างลูกค้าและแบรนด์ได้ (Varadarajan et al., 2010) ดังนั้นธุรกิจค้าปลีกจะได้ประโยชน์จากเทคโนโลยี AR นี้ และสามารถประยุกต์ใช้เทคโนโลยีนี้สร้างการตลาดแบบส่วนบุคคล (Personalized Marketing) กับ

ลูกค้าได้ โดยเฉพาะธุรกิจค้าปลีกด้านแฟชั่นซึ่งลูกค้าของธุรกิจเน้นความเป็นปัจเจกและความแตกต่างสูงกว่าธุรกิจค้าปลีกอื่น ตัวอย่างธุรกิจค้าปลีกด้านแฟชั่นที่ใช้เทคโนโลยีความจริงเสริมในการส่งเสริมการขาย เช่น เบอร์เบอรี (Burberry) พัฒนาร้านค้าสาขานรีเจนต์ (Regent Street) ในลอนดอนโดยใช้เทคโนโลยีมัลติมีเดียและความจริงเสริม ลูกค้าที่ลองชุดซึ่งติดชิพ RFID (Radio Frequency Identification) หน้า “กระจกวิเศษ” ซึ่งเป็นจอภาพแสดงผลภาพใน “กระจกวิเศษ” จะเปลี่ยนภาพฉากหลังเป็นภาพลูกค้าบนเวทีแฟชั่นโชว์หรือแสดงข้อมูลของสินค้าได้ (Dacre & Urwin, 2018)

เทคโนโลยีความจริงเสริม แบ่งออกได้เป็น 2 ประเภทหลักๆ ได้แก่ แบบที่ใช้ภาพสัญลักษณ์ (Image-Based AR) และแบบที่ใช้ระบบพิกัดในการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อสร้างข้อมูลบนโลกเสมือนจริง (Location-Based) ซึ่งภาพสัญลักษณ์ที่ใช้ จะเรียกว่า ตัวระบุตำแหน่ง หรือ Marker โดยใช้กล้องในการรับภาพ เมื่อโปรแกรมที่กำลังใช้งานอยู่ประมวลผลรูปภาพเจอสัญลักษณ์ที่กำหนดไว้ก่อนแล้ว ก็จะทำการแสดงข้อมูลภาพแบบสามมิติ ที่ถูกระบุไว้ในโปรแกรมให้เห็นบนตัวระบุตำแหน่ง และสามารถที่จะหมุนดูภาพที่ปรากฏได้ทุกทิศทาง หรือ 360 องศา

สำหรับการประยุกต์ใช้งานเทคโนโลยีความจริงเสริม จะมีส่วนประกอบที่สำคัญ 4 ส่วน ดังต่อไปนี้

1) ตัวระบุตำแหน่ง หรือ Marker

ตัวระบุตำแหน่ง จะถูกใช้ในการระบุตำแหน่งของแบบจำลอง ระบุความสัมพันธ์จากตำแหน่งของตัวระบุตำแหน่ง และขนาดของตัวระบุตำแหน่ง

2) ตัวตรวจจับข้อมูล หรือ Eye

ตัวตรวจจับข้อมูล ในที่นี้ ได้แก่ กล้องบนโทรศัพท์มือถือหรือบนแท็บเล็ต กล้องวิดีโอ และกล้องเว็บแคม กล้องเหล่านี้จะใช้ในการอ่านข้อมูลตำแหน่งหรือทิศทางการทำมุมของตัวระบุตำแหน่งที่มองเห็นกับตัวกล้อง จากนั้นจะส่งข้อมูลเหล่านั้นให้กับตัวโปรแกรม

3) ตัวโปรแกรมเทคโนโลยีความจริงเสริม (AR Engine)

ตัวโปรแกรมจะเป็นตัวนำข้อมูลที่ได้จากตัวระบุตำแหน่ง ที่ถูกส่งมาจากตัวตรวจจับข้อมูล มาทำการประมวลผล จากนั้นจะทำการสร้างผลลัพธ์ผ่านโปรแกรมหรือส่วนประมวลผล และนำข้อมูลเหล่านั้นไปแสดงผลเป็นภาพ

4) จอแสดงผล (Display)

ข้อมูลที่โปรแกรมทำการประมวลผลออกมาเป็นภาพหรือวิดีโอเหล่านั้น จะถูกนำออกมาแสดงผ่านหน้าจอแสดงผล

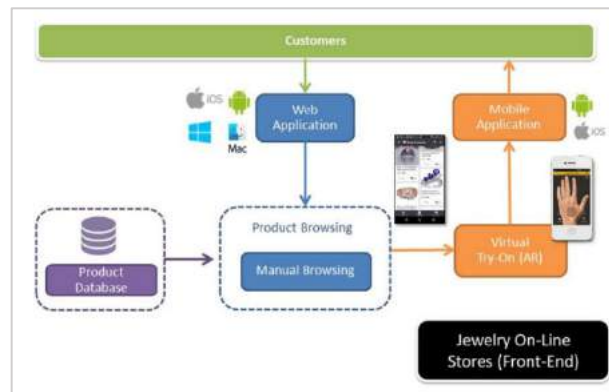
ในปัจจุบันนักวิจัยพยายามที่จะพัฒนา AR ในลักษณะที่เป็น Markerless หรือลักษณะที่ไม่ใช้ตัวระบุตำแหน่ง เพื่อลดขั้นตอนการใช้งานสำหรับผู้ใช้งาน และใช้งานได้ง่ายขึ้นแต่กระบวนการพัฒนา AR ประเภทนี้ จะมีความซับซ้อนและยากกว่าแบบใช้ตัวระบุตำแหน่ง เช่น งานวิจัยของ Yusuke et al. (2016) ในการศึกษาได้นำเสนอระบบ Augmented Reality (AR) ที่จะใช้สำหรับการบำรุงรักษาอาคารกลางแจ้ง แบบ Markerless โดยพิจารณาถึงความคล่องตัวของผู้ใช้และระยะทางสัมพันธ์กับเป้าหมายซึ่งเป็นสิ่งปลูกสร้างในลักษณะวัตถุเสมือนจริงแบบสามมิติ (Yusuke et al., 2016; Chien et al., 2016) และงานวิจัยของ Faten et al. (2016) ที่พัฒนาวิธีการในการ Tracking แบบ Markerless โดยใช้ Classifier ที่แตกต่างกัน (Khalifa et al., 2016)

3. กรอบแนวคิดของงานวิจัย

ในการพัฒนาแอปพลิเคชันทดลองสวมใส่บนสมาร์ตโฟน ได้กำหนดขอบเขตการพัฒนา เพื่อใช้ในการทดลองสวมใส่สำหรับผลิตภัณฑ์แหวนและกำไลข้อมือ ซึ่งใช้อัลกอริทึมในการรู้จำวัตถุในลักษณะเดียวกัน ในที่นี้ คือนิ้วมือและข้อมือ ผ่านภาพที่ได้จากกล้องด้านหลังของสมาร์ตโฟน และแสดงผลความจริงเสริมบนจอภาพของสมาร์ตโฟน โดยอัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นนี้ จะไม่สามารถใช้ได้กับผลิตภัณฑ์ประเภทอื่นๆ เช่น ต่างหู เข็มกลัด หรือสร้อยคอได้ เนื่องจากจำเป็นต้องใช้อัลกอริทึมในการรู้จำวัตถุที่ต่างกัน ในกรณีนี้คือ ใบหน้า ใบหู และส่วนของลำคอ ซึ่งจะประมวลผลผ่านภาพที่ได้จากกล้องด้านหน้าของสมาร์ตโฟน

กรอบแนวคิดของงานวิจัยในการพัฒนาแอปพลิเคชันทดลองสวมใส่บนสมาร์ตโฟน ดังแสดงในรูปที่ 1 ซึ่งประกอบด้วยฐานข้อมูลของผลิตภัณฑ์ ระบบจัดการข้อมูลและโมเดลสามมิติของผลิตภัณฑ์เครื่องประดับที่พัฒนาในรูปแบบเว็บแอปพลิเคชันและเครื่องมือในการทดลองสวมใส่เครื่องประดับที่พัฒนาในรูปแบบแอปพลิเคชันบนสมาร์ตโฟน ผู้ประกอบการอัปโหลดข้อมูลรวมทั้งโมเดลสามมิติของผลิตภัณฑ์เครื่องประดับเข้าไปในฐานข้อมูลผ่านเว็บแอปพลิเคชัน ข้อมูลและโมเดลสามมิติของ

ผลิตภัณฑ์เครื่องประดับถูกส่งไปบนแอปพลิเคชันบนสมาร์ตโฟน และลูกค้าสามารถเลือกผลิตภัณฑ์เครื่องประดับ ที่ต้องการสวมใส่ได้



รูปที่ 1 แสดงกรอบแนวคิดของงานวิจัย

ขั้นตอนดำเนินงานวิจัย มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- 1) ลงพื้นที่สอบถามผู้ประกอบการและเก็บรวบรวมข้อมูลในสถานประกอบการ
- 2) ศึกษาและวิเคราะห์ข้อมูลการดำเนินกิจกรรมต่างๆ เพื่อกำหนดแนวทางในการพัฒนารูปแบบของระบบฐานข้อมูล, เว็บแอปพลิเคชันที่ใช้ในการจัดการข้อมูลและโมเดลสามมิติของผลิตภัณฑ์เครื่องประดับ และแอปพลิเคชันบนสมาร์ตโฟนสำหรับการทดลองสวมใส่เครื่องประดับ
- 3) ออกแบบระบบฐานข้อมูลของของลูกค้า และฐานข้อมูลของผลิตภัณฑ์เครื่องประดับ
- 4) ออกแบบ UX/UI ของเว็บแอปพลิเคชันระบบจัดการข้อมูลและโมเดลสามมิติของผลิตภัณฑ์เครื่องประดับ และแอปพลิเคชันบนสมาร์ตโฟนทดลองสวมใส่เครื่องประดับ
- 5) พัฒนาระบบฐานข้อมูลของลูกค้า และพัฒนาระบบฐานข้อมูลของผลิตภัณฑ์เครื่องประดับ
- 6) พัฒนาเว็บแอปพลิเคชันระบบจัดการข้อมูลและโมเดลสามมิติของผลิตภัณฑ์เครื่องประดับ
- 7) พัฒนาแอปพลิเคชันบนสมาร์ตโฟนที่สามารถทดลองสวมใส่เครื่องประดับแบบด้วยความจริงเสริม
- 8) พัฒนา API เพื่อเชื่อมต่อฐานข้อมูล เว็บแอปพลิเคชัน และแอปพลิเคชันบนสมาร์ตโฟน เข้าด้วยกัน
- 9) ทดสอบการใช้งาน และนำผลการทดสอบมาทำการปรับปรุงแก้ไข

10) วิเคราะห์ วิจัย และสรุปผลการดำเนินงานวิจัย

4. ผลการดำเนินงานวิจัย

ในหัวข้อนี้ กล่าวถึงผลจากการดำเนินงานวิจัยและวิเคราะห์ผลการดำเนินงาน โดยเน้นที่การพัฒนาแอปพลิเคชันสำหรับโทรศัพท์ที่สามารถทดลองสวมใส่เครื่องประดับด้วยความจริงเสริม ซึ่งเป็นจุดเด่นของงานวิจัยนี้

4.1 การพัฒนาแอปพลิเคชันบนสมาร์ทโฟนที่ใช้ทดลองสวมใส่เครื่องประดับด้วยความจริงเสริม

หลักการทำงานของแอปพลิเคชันทดลองสวมใส่เครื่องประดับด้วยสมาร์ทโฟน คือ การนำภาพจากกล้องด้านหลังของสมาร์ทโฟน ในกรณีนี้ คือ ภาพมือของผู้ใช้งาน มาผนวกกับวัตถุในโลกเสมือนที่สร้างขึ้น ในงานวิจัยนี้ได้แก่ แหวน และกำไลข้อมือ ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นในลักษณะของการสวมใส่เครื่องประดับแหวนบนนิ้วมือแบบเสมือนจริง ซึ่งผู้ใช้งานสามารถกำหนดเลือกนิ้วที่ต้องการสวมใส่ได้ และสามารถเลื่อนตำแหน่งของแหวนตามแนวแกนของนิ้วได้ เสมือนกับการสวมใส่แหวนในโลกความจริง และเช่นเดียวกันสำหรับการทดลองสวมใส่กำไลแบบเสมือนจริง ซึ่งผู้ใช้งานสามารถเลื่อนตำแหน่งของกำไลตามแนวแกนของข้อมือและแขนได้ เสมือนกับการสวมใส่กำไลในโลกความจริง หลักการทำงานของแอปพลิเคชัน ทดลองสวมใส่เครื่องประดับด้วยสมาร์ทโฟน แสดงดังในรูปที่ 2 การพัฒนาฟังก์ชันต่างๆบนแอปพลิเคชันทดลองสวมใส่เครื่องประดับด้วยสมาร์ทโฟนได้มาจากการสอบถามความต้องการจากผู้ประกอบการและลูกค้าผู้ใช้งาน เพื่อเพิ่มความสะดวกในการใช้งานและสามารถใช้งานได้สะดวกด้วยมือข้างเดียว



รูปที่ 2 แสดงหลักการทำงานของ Virtual Try-on Experience Mobile Application

ขั้นตอนในการพัฒนาแอปพลิเคชันบนสมาร์ทโฟนที่สามารถทดลองสวมใส่เครื่องประดับด้วยความจริงเสริม มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

- 1) เขียนโปรแกรมเพื่อดาวน์โหลดโมเดลสามมิติจากเซิร์ฟเวอร์ โดยใช้โปรแกรม Unity
- 2) เขียนโปรแกรมเพื่ออ่านไฟล์ข้อมูลของโมเดลสามมิติของเครื่องประดับ ที่ประกอบด้วย เมช (Mesh) และ วัสดุที่ใช้ในการผลิตเครื่องประดับ
- 3) ทำการฝึกการเรียนรู้โมเดลสามมิติของมือและข้อมือ โดยใช้ฟังก์ชัน Model target generator ของซอฟต์แวร์ Vuforia เพื่อให้โมเดลทดลองสวมใส่เครื่องประดับด้วยความจริงเสริม เข้าใจรูปร่าง ลักษณะ และองค์ประกอบของวัตถุ ในที่นี้คือ มือและข้อมือ
- 4) นำข้อมูลที่ได้ออกจากการฝึกการเรียนรู้ในข้อ 3) มา นำเข้า (Import) ไปในโปรแกรม Unity
- 5) ใช้ API ของ Vuforia Model Tracking ในการตรวจจับมือ โดยสามารถแยกเป็นมือซ้ายและมือขวา ซึ่งทำการพัฒนา UI ให้สามารถเลือกมือซ้ายหรือมือขวาในการทดลองสวมใส่ได้ ดังแสดงในรูปที่ 3

6) เขียนโปรแกรม เพื่อสร้างฟังก์ชันการใช้งานบนหน้าจอของแอปพลิเคชันสำหรับโทรศัพท์มือถือเครื่องประดับด้วยความจริงเสริม ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยมีรายละเอียด ดังนี้

ปุ่มที่ 1 คือ ฟังก์ชันที่ใช้สำหรับปรับสเกลขนาด ย่อ-ขยาย โมเดลวัตถุในโลกเสมือน ซึ่งในที่นี้คือโมเดลสามมิติของแหวนหรือกำไล

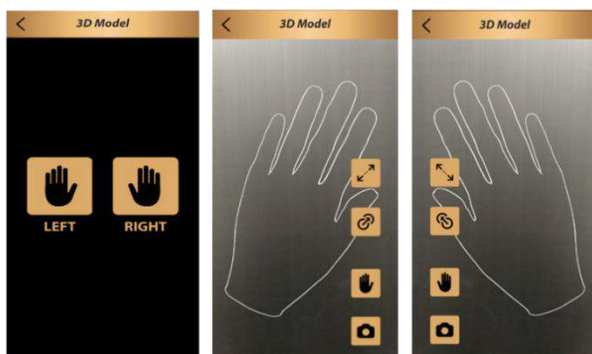
ปุ่มที่ 2 คือ ฟังก์ชันที่ใช้สำหรับเลื่อนปรับตำแหน่งของโมเดลสามมิติของแหวนหรือกำไล โดยสามารถเลื่อน ขึ้น-ลง ไปตามแกนนิ้วหรือข้อมือ

ปุ่มที่ 3 คือ ฟังก์ชันในการเลือกเปลี่ยนมือข้างซ้าย-ขวา

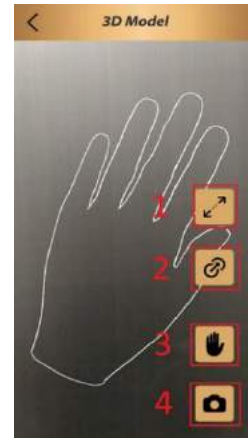
ปุ่มที่ 4 คือ ฟังก์ชันกดแคปเจอร์สกรีน และแชร์รูปภาพไปยัง Social Media ได้ ดังแสดงในรูปที่ 5

7) เขียนโปรแกรมให้โมเดลสามมิติของเครื่องประดับแหวนไปปรากฏแสดงในตำแหน่งที่ต้องการบนมือที่ฟังก์ชัน Vuforia model tracking ตรวจจับได้ ดังแสดงในรูปที่ 6 (ก) สามารถทดลองปรับเปลี่ยนขนาดของแหวนได้ แสดงในรูปที่ 6 (ข) และสามารถปรับเปลี่ยนตำแหน่งหรือนิ้วที่สวมแหวนได้ ดังแสดงในรูปที่ 6 (ค)

8) ด้วยหลักการเดียวกับการพัฒนาโมดูลทดลองสวมใส่เครื่องประดับแหวน สำหรับการพัฒนาโมดูลทดลองสวมใส่เครื่องประดับกำไล เขียนโปรแกรมให้โมเดลสามมิติของกำไลไปปรากฏแสดงในตำแหน่งที่ต้องการบนข้อมือที่ Vuforia model tracking ตรวจจับได้ ดังแสดงในรูปที่ 7 (ก) สามารถทดลองปรับเปลี่ยนขนาดของกำไลได้ แสดงในรูปที่ 7 (ข) และสามารถปรับเปลี่ยนตำแหน่งของกำไลได้ ดังแสดงในรูปที่ 7 (ค)



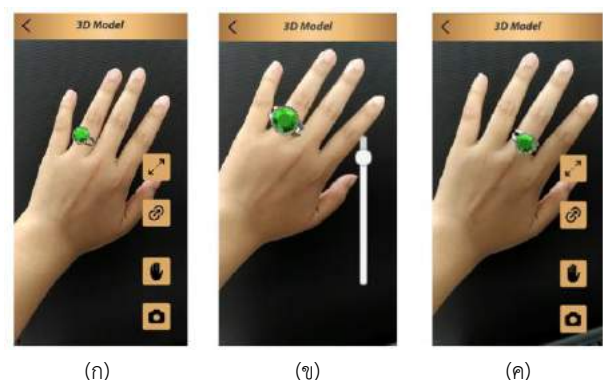
รูปที่ 3 แสดง UI ให้ผู้ใช้งานเลือกข้างมือที่ต้องการทดลองสวมใส่ และการตรวจจับมือโดยแยกเป็นมือซ้ายและมือขวา



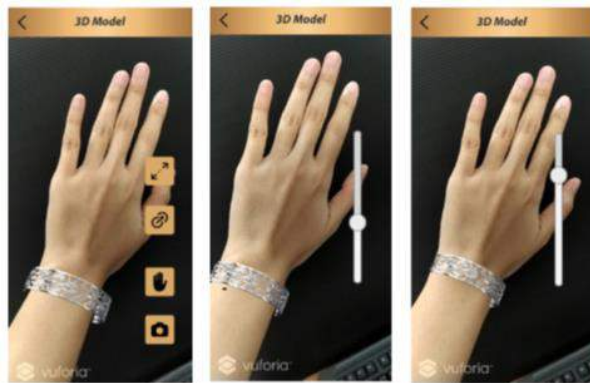
รูปที่ 4 แสดงฟังก์ชันการใช้งานบนหน้าจอแอปพลิเคชันทดลองสวมใส่เครื่องประดับด้วยโทรศัพท์มือถือ



รูปที่ 5 แสดงตัวอย่างการใช้งานฟังก์ชันกดแคปเจอร์สกรีนและสามารถแชร์รูปภาพไปยัง Social Networks



รูปที่ 6 แสดงการใช้งานแอปพลิเคชันบนโทรศัพท์มือถือที่พัฒนาขึ้นเพื่อทดลองสวมใส่เครื่องประดับแหวน



(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 7 แสดงการใช้งานแอปพลิเคชันบนสมาร์ทโฟนที่พัฒนาขึ้นเพื่อทดลองสวมใส่เครื่องประดับกำไลข้อมือ

4.2 การทดสอบการใช้งานแอปพลิเคชันบนสมาร์ทโฟนที่สามารถทดลองสวมใส่เครื่องประดับด้วยความจริงเสริม

ในการทดสอบการใช้งานแอปพลิเคชันทดลองสวมใส่เครื่องประดับบนสมาร์ทโฟน แบ่งการทดสอบเป็น 3 หัวข้อดังต่อไปนี้

1. การทดสอบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมในการรับรู้มือและข้อมือ

คณะผู้วิจัยทำการทดสอบความสามารถในการตรวจจับมือและข้อมือบนพื้นสีขาว พื้นสีดำ และพื้นสีน้ำตาล โดยจัดให้มีการทดสอบในสภาพแวดล้อมเดียวกัน ทำการทดสอบบนแต่ละพื้นสี จำนวน 30 ครั้ง โดยจับเวลาที่อัลกอริทึมสามารถตรวจจับมือได้ มีหน่วยเป็น วินาที โดยมีผลการทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 1

2. การนำภาพมือและข้อมือของผู้ใช้งานจากกล้องด้านหลังของสมาร์ทโฟน มาผนวกกับวัตถุในโลกเสมือนที่สร้างขึ้น คือโมเดลสามมิติของแหวนและกำไลข้อมือ ผลลัพธ์ที่ได้ คือการสวมใส่เครื่องประดับแหวนบนนิ้วมือแบบเสมือนจริง และสวมใส่กำไลบนข้อมือแบบเสมือนจริง แบ่งการทดสอบเป็น 2 ส่วนดังนี้

ส่วนที่ 1 การทดสอบความถูกต้องของการวางโมเดลสามมิติของแหวนบนนิ้วมือแต่ละนิ้วบนภาพมือของผู้ใช้งานจากกล้องด้านหลังของสมาร์ทโฟน (นิ้วชี้, นิ้วกลาง, นิ้วนาง และนิ้วก้อย ไม่รวมนิ้วโป้ง เพราะมีลักษณะของนิ้วและการสวมใส่แหวนที่แตกต่างไป) และทดสอบการวางโมเดลสามมิติของกำไลบนข้อมือ

ส่วนที่ 2 การทดสอบความถูกต้องในการเลื่อนโมเดลสามมิติของแหวนตามแกนนิ้วแต่ละนิ้ว และการเลื่อนโมเดลสามมิติของกำไลข้อมือ

ส่วนที่ 1 และส่วนที่ 2 ทำการทดสอบในคราวเดียวกัน คือระบุตำแหน่งของโมเดลสามมิติของแหวนและกำไลข้อมือและเลื่อนไปตามแกน จำนวน 30 ครั้ง ได้ผลการทดสอบ ดังแสดงในตารางที่ 2

3. การประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งาน โดยมีค่าคะแนนในหัวข้อที่ประเมิน 1 ถึง 5 โดยทำการสอบถามผู้ประกอบการธุรกิจเครื่องประดับ จำนวน 3 ราย และลูกค้ากลุ่มเป้าหมายจำนวน 10 ราย

แปรผลโดยใช้เกณฑ์ของ Best (1981) รายละเอียดดังนี้
ค่าเฉลี่ย 4.21 - 5.00 หมายถึง พึงพอใจมากที่สุด
ค่าเฉลี่ย 3.41 - 4.20 หมายถึง พึงพอใจมาก
ค่าเฉลี่ย 2.61 - 3.40 หมายถึง พึงพอใจปานกลาง
ค่าเฉลี่ย 1.81 - 2.60 หมายถึง พึงพอใจน้อย
ค่าเฉลี่ย 1.00 - 1.80 หมายถึง พึงพอใจน้อยที่สุด

ผู้ประกอบการ จำนวน 3 ราย ทำการทดสอบการใช้งานและประเมินความพึงพอใจในการใช้งาน ได้ผลลัพธ์จากการทดสอบ ดังนี้

- ความง่ายในการใช้งาน ได้ผลการประเมิน พึงพอใจมากที่สุด (ค่าเฉลี่ยจากการประเมิน 4.67)
- ความสมจริงในการทดลองสวมใส่ ได้ผลการประเมิน พึงพอใจมาก (ค่าเฉลี่ยจากการประเมิน 3.66)
- มีประโยชน์ในการสนับสนุนการขายสินค้า ได้ผลการประเมิน พึงพอใจมากที่สุด (ค่าเฉลี่ยจากการประเมิน 4.33)

ลูกค้ากลุ่มเป้าหมาย จำนวน 10 ราย ทำการทดสอบการใช้งานและประเมินความพึงพอใจในการใช้งาน ได้ผลลัพธ์จากการทดสอบ ดังนี้

- ความง่ายในการใช้งาน พึงพอใจมาก (ค่าเฉลี่ยจากการประเมิน 4.20)
- ความสมจริงในการทดลองสวมใส่ พึงพอใจมาก (ค่าเฉลี่ยจากการประเมิน 3.70)
- ช่วยสนับสนุนในการตัดสินใจซื้อสินค้า พึงพอใจมากที่สุด (ค่าเฉลี่ยจากการประเมิน 4.30)

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมในการรับรู้มือและข้อมือ

สีของพื้นหลัง	ค่าเฉลี่ยเวลาในการตรวจจับมือและข้อมือ (หน่วย เป็น วินาที)
พื้นสีขาว	0.53
พื้นสีดำ	0.75
พื้นสีน้ำตาล	1.13

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมในการนำภาพมือและข้อมือของผู้ใช้งานจากกล้องด้านหลังของสมาร์ทโฟน มาผนวกกับโมเดลสามมิติของแขนและกำไลข้อมือและเลื่อนไปตามแกน

นิ้ว	จำนวนครั้งที่ตำแหน่งถูกต้อง	คิดเป็นร้อยละ
นิ้วชี้	28	93.33 %
นิ้วกลาง	30	100.00 %
นิ้วนาง	29	96.67 %
นิ้วก้อย	26	86.67 %
ข้อมือ	30	100.00%

4.3 วิจารณ์ผลการดำเนินงาน

จากผลการทดสอบการใช้งานแอปพลิเคชันทดลองสวมใส่เครื่องประดับบนสมาร์ทโฟน พบว่า ความเปรียบต่าง (Contrast) ระหว่างสีของมือและข้อมือกับสีของพื้นหลัง ส่งผลต่อประสิทธิภาพการทำงานของอัลกอริทึมในการรับรู้มือและข้อมือ หากใช้สีพื้นหลังเป็นสีขาว อัลกอริทึมในการรับรู้มือและข้อมือจะมีประสิทธิภาพในการตรวจจับสูงกว่าใช้พื้นหลังสีดำและสีน้ำตาล สาเหตุเกิดจากค่าความเปรียบต่าง (Contrast) ระหว่างสีของมือและข้อมือกับสีของพื้นหลังที่สูงกว่า ทำให้สามารถตรวจจับมือและข้อมือได้ง่ายและใช้เวลาสั้นกว่า

อีกทั้ง พบว่า หากมีแสงเงาบริเวณ จะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการทำงานของอัลกอริทึมในการรับรู้มือและข้อมือ ทำให้การตรวจจับมือและข้อมือทำได้ยากขึ้น ดังนั้น การนำไปใช้งานควรพิจารณาในเรื่องสภาพแวดล้อมของแสงประกอบ ควรวางมือทาบบนพื้นหรือผนัง เพื่อหลีกเลี่ยงการเกิดเงาของมือ ซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการทำงานของอัลกอริทึมได้

ลักษณะรูปร่างของกรอบรูปของมือและข้อมือ ถูกพัฒนาโดยให้มีการวางมือในตำแหน่งที่เป็นธรรมชาติ อย่างไรก็ตาม ลักษณะของมือของผู้ใช้งานมีความแตกต่างหลากหลาย ส่งผล

ให้ อัลกอริทึมใช้เวลาในการตรวจจับมือของแต่ละคนแตกต่างกันไป หากลักษณะของมือของผู้ใช้งานใกล้เคียงกับกรอบรูปของมือ อัลกอริทึมจะใช้เวลาในการตรวจจับมือได้สั้นกว่าการตรวจจับมือของผู้ใช้งานที่มีลักษณะแตกต่างจากกรอบรูปของมือ ดังนั้น ในอนาคตจะมีการพัฒนาต่อยอดในการใช้เทคนิคปัญญาประดิษฐ์ (Artificial intelligence) เพิ่มเติม หรือการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine learning) เพื่อไม่ใช้กรอบรูปของมือเป็นส่วนหนึ่งของการตรวจจับมือ

สำหรับการทดสอบความถูกต้องของการวางโมเดลสามมิติของแขนบนนิ้วมือแต่ละนิ้ว (ยกเว้นนิ้วโป้ง) บนภาพมือของผู้ใช้งานจากกล้องด้านหลังของสมาร์ทโฟน และทดสอบการวางโมเดลสามมิติของกำไลบนข้อมือบนภาพข้อมือของผู้ใช้งานจากกล้องด้านหลังของสมาร์ทโฟน และการทดสอบความถูกต้องในการเลื่อนโมเดลสามมิติของแขนตามแกนนิ้วแต่ละนิ้ว และการเลื่อนโมเดลสามมิติของกำไลข้อมือ จะพบว่า อัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นมีความถูกต้องแม่นยำค่อนข้างสูงในเรื่องของการวางโมเดลสามมิติของแขน ร้อยละ 94.17 และของกำไลข้อมือ ร้อยละ 100 บนตำแหน่งแกนและพิกัดบนภาพมือและข้อมือของผู้ใช้งาน เนื่องจากหากผู้ใช้งานวางมือและข้อมือตามกรอบรูปของมือได้ถูกต้องแล้ว จะเป็นการกำหนดแกนและจุดพิกัดบน Coordinate บนจอสัมผัส (Touch screen) ของสมาร์ทโฟน เมื่อผู้ใช้งานกดสัมผัสระบุตำแหน่งนิ้วมือที่ต้องการบนจอสัมผัสของสมาร์ทโฟน โมเดลสามมิติของแขนจะปรากฏที่ตำแหน่งนั้นได้ถูกต้องแม่นยำ และสามารถเคลื่อนตามแกนของนิ้วมือได้ถูกต้องเช่นกัน ส่วนการกำหนดระบุตำแหน่งของโมเดลสามมิติของกำไล มีหลักการทำงานเช่นเดียวกัน

เมื่อพิจารณาการทดสอบความถูกต้องของการวางโมเดลสามมิติของแขนบนนิ้วมือแต่ละนิ้ว พบว่า การทดลองบนตำแหน่งนิ้วกลางมีความถูกต้องร้อยละ 100 เนื่องจากตำแหน่งของนิ้วกลางเป็นศูนย์กลางของโครงสร้างของมือ โมเดลสามมิติของแขนจะอยู่ในตำแหน่งศูนย์กลางของโครงสร้างของมือ และตั้งฉากกับการรับภาพของกล้อง จึงแสดงผลลัพธ์ที่ถูกต้อง

ส่วน นิ้วชี้ นิ้วนางและนิ้วก้อย ทำมุมองศาเอียงออกจากนิ้วกลางแตกต่างกันไป ส่งผลต่อองศาการวางโมเดลสามมิติของแขนบนภาพนิ้วดังกล่าว ทำให้ตำแหน่งและองศาของโมเดลสามมิติของแขนเกิดการคลาดเคลื่อนจากรูปแบบการสวมใส่ตามความเป็นจริง เนื่องจากอัลกอริทึมที่พัฒนาขึ้นมานี้ เป็นการ

ตรวจจับมือและข้อมือ ที่ยังไม่สามารถตรวจจับนิ้วมือได้โดยอิสระ จึงทำให้เกิดการคลาดเคลื่อนเมื่อใช้ในการสวมใส่แหวนบนนิ้วก้อยสูงกว่านิ้วอื่นๆ เพราะทำมุมมองจากแกนกลาง ที่มากกว่านิ้วอื่นๆ

จากผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งาน พบว่า แอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้น มีความง่ายในการใช้งานที่น่าพึงพอใจมากที่สุดและมาก ในฝั่งของผู้ประกอบการและลูกค้ากลุ่มเป้าหมายตามลำดับ เนื่องจากคณะผู้วิจัยพยายามลดขั้นตอนการใช้งานของระบบให้ได้มากที่สุด และออกแบบส่วนต่อประสานผู้ใช้ (User interface) ให้ผู้ใช้งานเข้าใจการทำงานได้โดยง่ายผ่านภาพกราฟิกไอคอน ซึ่งคณะผู้วิจัยจะศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องของการออกแบบส่วนต่อประสานผู้ใช้ โดยคำนึงถึงสัญญาณในการรับรู้ของผู้ใช้งาน เพื่อนำมาปรับปรุงเพิ่มเติมให้ใช้งานได้ง่ายมากขึ้น

ความสมจริงในการทดลองสวมใส่ เกิดจากการให้แสงและเงา (Rendering) ของโมเดลสามมิติของแหวนและกำไล เนื่องจากสินค้าอัญมณีและเครื่องประดับมีความแวววาว และสะท้อนแสง ที่มีความเฉพาะตัว ซึ่งมีความยากในการให้แสงและเงา ในส่วนนี้ คณะผู้วิจัยจะมีการปรับปรุงพัฒนาต่อไป

ผู้ประกอบการและลูกค้ากลุ่มเป้าหมาย ได้ทำการประเมินผลแอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้น มีความพึงพอใจมากที่สุด ในประเด็นเรื่องประโยชน์ในการสนับสนุนการขายสินค้าและช่วยในการตัดสินใจเลือกซื้อ หากได้ทดลองสวมใส่ทางออนไลน์ก่อนการซื้อ คณะผู้วิจัยจึงเล็งเห็นว่าแอปพลิเคชันดังกล่าวนี้ จะเป็นประโยชน์ต่อภาคธุรกิจและอุตสาหกรรมอัญมณีและเครื่องประดับ ซึ่งจะพัฒนาต่อยอดให้มีความง่ายในการใช้งาน และมีความสมจริงในการทดลองสวมใส่เครื่องประดับมากยิ่งขึ้นต่อไป

ส่วนการวิเคราะห์ในเรื่องพฤติกรรมของผู้ใช้งานในเชิงลึกจะอยู่ในขั้นตอนของการนำแอปพลิเคชันไปทดลองกับตลาดกลุ่มเป้าหมายในงานวิจัยต่อยอดเชิงพาณิชย์ต่อไป

5. สรุปผลการดำเนินงานวิจัย

บทความนี้ ได้นำเสนอการพัฒนาแอปพลิเคชันบนสมาร์ตโฟนเพื่อใช้ในการทดลองสวมใส่เครื่องประดับแหวนและกำไลข้อมือด้วยกล้องด้านหลังของสมาร์ตโฟน โดยใช้เทคโนโลยีความจริงเสริม (Augmented Reality) จุดเด่นของการพัฒนา

แอปพลิเคชันการทดลองสวมใส่เครื่องประดับด้วยความจริงเสริมนี้ คือ การพัฒนาในรูปแบบไม่ใช้ตัวระบุตำแหน่ง ซึ่งทำให้ผู้ใช้งานไม่จำเป็นต้องนำแผ่นกระดาษหรือวัสดุอื่นๆ มาสวมบนนิ้วหรือข้อมือ ที่ต้องการทดลองสวมใส่ เพื่อเป็นการระบุตำแหน่งให้อัลกอริทึมนำโมเดลสามมิติของแหวนหรือกำไลมาวางบนตำแหน่งที่ต้องการสวมใส่ เพื่อลดความยุ่งยากให้กับผู้ใช้งาน

อัลกอริทึมในการรับรู้มือและข้อมือมีประสิทธิภาพในการทำงานสูง สามารถตรวจจับมือและข้อมือได้อย่างรวดเร็วโดยใช้เวลาน้อยที่สุด คือ 0.53 วินาที โดยเฉลี่ย เมื่อใช้พื้นหลังเป็นสีขาว และมีความถูกต้องแม่นยำในเรื่องของการวางโมเดลสามมิติของแหวนบนตำแหน่งของนิ้วมือ ร้อยละ 94.17 โดยเฉลี่ย ส่วนความถูกต้องแม่นยำในเรื่องของการวางโมเดลสามมิติของกำไลบนตำแหน่งของข้อมือ ร้อยละ 100 จากการทดสอบการใช้งานกับกลุ่มเป้าหมาย ได้แก่ ผู้ประกอบการจำหน่ายเครื่องประดับและลูกค้าผู้ซื้อ พบว่า มีความพึงพอใจมากในเรื่องของความง่ายในการใช้งาน ความสมจริงในการทดลองสวมใส่ และเป็นเครื่องมือที่ช่วยสร้างความมั่นใจในการตัดสินใจซื้อสินค้า

การพัฒนาแอปพลิเคชันบนสมาร์ตโฟนเพื่อใช้ในการทดลองสวมใส่เครื่องประดับนี้ ได้รับความสนใจจากผู้ประกอบการธุรกิจเครื่องประดับและลูกค้าเป็นอย่างสูง เนื่องจากสามารถใช้เป็นเครื่องมือที่ช่วยให้การสนับสนุนขายสินค้าเครื่องประดับทางออนไลน์และช่วยในการตัดสินใจเลือกซื้อสินค้า

อย่างไรก็ตาม ในอนาคต คณะผู้วิจัยจะมีการพัฒนาอัลกอริทึมที่สามารถตรวจจับนิ้วมือได้ ซึ่งจะช่วยให้ตำแหน่งและการหมุนของโมเดลสามมิติของแหวนถูกต้องมากยิ่งขึ้น และพัฒนาการเรนเดอร์ให้แสงเงากับโมเดลสามมิติของเครื่องประดับมีความสมจริงมากยิ่งขึ้น อีกทั้ง จะมีการพัฒนาต่อยอดเพื่อรองรับการใช้งานทดลองสวมใส่กับเครื่องประดับประเภทอื่นๆ เช่น ต่างหู และสร้อยคอ เป็นต้น

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจาก สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) และสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) งบประมาณประจำปี 2562 รหัสโครงการวิจัย RDG62T0040 ขอขอบคุณ

ผู้ประกอบการที่เข้าร่วมโครงการวิจัยและให้การสนับสนุนทั้งทางตรงและทางอ้อม

7. เอกสารอ้างอิง

- Chatzopoulos, D., Bermejo, C., Huang, Z., & Hui P. (2017). Mobile Augmented Reality Survey: From Where We Are to Where We Go. *IEEE Access*, 5, 6917–6950.
- Foxlin, E., Altshuler, Y., Naimark, L., & Harrington, M. (2004). Flight Tracker: A Novel Optical/Inertial Tracker for Cockpit Enhanced Vision. *Third IEEE and ACM International Symposium on Mixed and Augmented Reality* (pp. 212–221). Arlington, VA, USA. <https://doi.org/10.1109/ISMAR.2004.32>
- Gans, E., Roberts, D., Bennett, M., Towles, H., Menozzi, A., Cook, J., & Sherrill, T. (2015). Augmented reality technology for day/night situational awareness for the dismounted Soldier. *International Society for Optics and Photonics*, 9470, 947004.
- Klopper, E., Perry, J., Squire, K., Jan, M.-F., & Steinkuehler, C. (2015). Mystery at the museum: a collaborative game for museum education. *Proceedings of the 2005 Conference on Computer Support for Collaborative Learning*. (pp. 316–320). Taipei, Taiwan. <https://doi.org/10.3115/1149293.1149334>
- Pretto, F., Manssour, I. H., Lopes, M. H. I., da Silva, E. R., & Pinho, M. S. (2009). Augmented reality environment for life support training. *Proceedings of the 2009 ACM symposium on Applied Computing - SAC* (pp. 836–841). Honolulu, Hawaii, USA. <https://doi.org/10.1145/1529282.1529460>
- Khalifa, F. A., Semaary, N. A., El-Sayed, H. M., & Hadhoud, M. M. (2016). Markerless Tracking for Augmented Reality Using Different Classifiers. Springer.
- Nakamura, H., & Miyashita H. (2010). *Control of augmented reality information volume by glabellar fader*. <https://dl.acm.org/doi/10.1145/1785455.1785475>
- Dacre, K., & Urwin, R. (2018). *Magic mirrors, 25 staircases and a giant 22ft screen - Burberry flagship store lands in Regent Street | London Evening Standard*. <https://www.standard.co.uk/news/london/magic-mirrors-25-staircases-and-a-giant-22ft-screen-burberry-flagship-store-lands-in-regent-street-8134688.html>
- Livingston, M. A., Rosenblum, L. J., Julier, S. J., Brown, D., Baillet, Y., Swan li, J. E., Gabbard, J. L., & Hix, D. (2005). *An Augmented Reality System for Military Operations in Urban Terrain*. <https://apps.dtic.mil/sti/citations/ADA499032>
- Bajura, M., Fuchs, H., Ohbuchi, R., Bajura, M., Fuchs, H., & Ohbuchi, R. (1992). Merging virtual objects with the real world. *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, 26(2), 203–210.
- Billinghurst, M., & Duenser, A. (2012). Augmented Reality in the Classroom. *Computer (Long Beach, Calif)*, 45(7), 56–63.
- Billinghurst, M., Hakkarainen, M., & Woodward, C. (2008). Augmented assembly using a mobile phone. *Proceedings of the 7th International Conference on Mobile and Ubiquitous Multimedia - MUM '08* (pp. 167–168). Cambridge, UK. <https://doi.org/10.1109/ISMAR.2008.4637349>
- Hakkarainen, M., & Woodward, C. (2005). SymBall: camera driven table tennis for mobile phones. In *ACM International Conference Proceeding Series*, 265, 391–392.
- Chen, P., Liu, X., Cheng, W., & Huang, R. (2017). A review of using Augmented Reality in Education from 2011 to 2016. *Innovations in smart learning*, 2017, 13–18.
- Farrington, P., Nembhard, H., Sturrock, D. T., Evans, G. W., & Standridge, C. R. (1999). A Tutorial On Simulation in Health Care: Applications and Issues. *Proceedings of the 1999 Winter Simulation Conference* (pp. 49–55). Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/324138.324149>
- Cavallaro, R., Cavallaro, R., Hybinette, M., & White, M. (2011). Augmenting live broadcast sports with 3D tracking information. *IEEE MultiMedia*, 18(4), 38.
- Varadarajan, R., Srinivasan, R., Vadakepatt, G. G., Yadav, M. S., Pavlou, P. A., Krishnamurthy, S., & Krause, T. (2010). Interactive technologies and retailing strategy: A review, conceptual framework and future research directions. *Journal of Interactive Marketing*, 24(2), 96–110.
- Wen, R., Tay, W.-L., Nguyen, B. P., Chng, C.-B., & Chui, C.-K. (2014). Hand gesture guided robot-assisted surgery based on a direct augmented reality interface. *Computer Methods and Programs in Biomedicine*, 116(2), 68–80.

Chien, S., Choo, S., Schnabel, M. A., Nakapan, W. M., Kim, J., Roudavski, S. (Eds.). (2016). Living Systems and Micro-Utopias: Towards Continuous Designing. *Proceedings of the 21st International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA 2016)* (pp. 918). The University of Melbourne, Australia. http://papers.cumincad.org/data/works/att/caadria2016_000.pdf

Henderson, S. J., & Feiner, S. K. (2011). Augmented reality in the psychomotor phase of a procedural task. *Proceedings of the 2011 10th IEEE International Symposium on Mixed and Augmented Reality* (pp. 191–200). Basel, Switzerland. <https://doi.org/10.1109/ISMAR.2011.6092386>

Yohan, S. J., Yohan, S. J., Julier, S., Baillot, Y., Lanzagorta, M., Brown, D., & Rosenblum, L. (2000). *Bars: Battlefield augmented reality system*. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.1.5064&rep=rep1&type=pdf>

Webel, S., Bockholt, U., Engelke, T., Gavish, N., Olbrich, M., & Preusche, C. (2013). An augmented reality training platform for assembly and maintenance skills. *Robotics and Autonomous Systems*, 61(4), 398–403.

Yusuke, S., Fukuda, T., Yabuki, N., Michikawa, T., & Motamedi, A. (2016). A Marker-less Augmented Reality System using Image Processing Techniques for Architecture and Urban Environment. *Proceedings of the 21st International Conference on Computer-Aided Architectural Design Research in Asia (CAADRIA 2016)* (pp. 713-722). Hong Kong. http://papers.cumincad.org/data/works/att/caadria2016_713.pdf

Piekarski, W., & Thomas, B. (2002). ARQuake: the outdoor augmented reality gaming system. *Communications of the ACM*, 45(1), 36-38.

8. ประวัติผู้เขียนบทความ



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สมลักษณ์ วรรณกุล
กิตติคุณสำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท สาขา Manufacturing Systems Engineering และระดับปริญญาเอก Doctor of Engineering สาขา Design and Manufacturing Engineering จาก สถาบัน Asian Institute of Technology หลังจากนั้น ได้รับทุนสนับสนุนเพื่อทำ Post doctoral research ในสาขา Jewelry Engineering ณ สถาบัน

Politecnico di Torino ประเทศอิตาลี เริ่มรับราชการเป็นอาจารย์ประจำสังกัดภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2540 โดยมีผลงานวิจัยทางด้าน การพัฒนาระบบออกแบบอัตโนมัติ (Generative Design), การออกแบบผลิตภัณฑ์ (Product Design), การออกแบบเชิงพารามิเตอร์ (Parametric Design) และ Artificial Intelligence for Product Design



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. พนมขวัญ รียมมงคล
สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมไฟฟ้า มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท Master of Science in Electrical and Computer Engineering และระดับปริญญาเอก Ph.D. in Electrical and Computer Engineering จาก University of Miami เริ่มรับราชการเป็นอาจารย์ประจำสังกัดภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2539 โดยมีผลงานวิจัยทางการประมวลผลภาพและปัญญาประดิษฐ์



นายรัฐภูมิ วรรณสาสน์ สำเร็จการศึกษาปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท Master of Engineering สาขา Computer Science จากสถาบัน Asian Institute of Technology ปัจจุบันเป็นอาจารย์ประจำสังกัดภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร มีผลงานวิจัยทางด้าน Computer Vision, Digital Image Processing, Artificial Intelligence และ Human-Computer Interaction



นายปิยะรัช ธรรมวัฒนกุล จบการศึกษาระดับปริญญาตรีวิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิทยาการคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ผลงานวิจัยที่ผ่านมาเน้นด้านการประมวลผลด้วยภาพและการพัฒนาแอปพลิเคชันด้านความจริงเสมือนและความจริงเสริม ปัจจุบันเป็นนักศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร



มหาวิทยาลัยนเรศวร

นายพงศกร ศิริคำน้อย จบการศึกษา
ปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขา
วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ปัจจุบันทำงานตำแหน่งนักวิชาการ
คอมพิวเตอร์ สังกัดสำนักหอสมุด



นางสาวสุนิษา แสนศรี จบการศึกษา
ปริญญาตรีวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขา
วิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต
สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการ มหาวิทยาลัย
นเรศวร ผลงานวิจัยที่ผ่านมาจะเน้นด้าน ระบบออกแบบอัตโนมัติ
(Generative Design) ปัจจุบันทำงานตำแหน่งนักวิจัย สังกัดคณะ
โลจิสติกส์และดิจิทัลซัพพลายเชน มหาวิทยาลัยนเรศวร

การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อค่าความห่างของสกรูในการยึดสปอยเลอร์
ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต
โดยใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ
A Study of Factors Affecting The Screw Spacing of Spoilers
in Hard Disk Drives for Productivity Increase
Using Multiple Regression Analysis

กิตติวัฒน์ สิริเกษมสุข^{1*}, ทศพล เกียรติเจริญผล¹, ฮานูฟ ไวยารูป¹, ทัดพล กุลวงศ์², ลักษิณี ตีรารัตน์³
Kittiwat Sirikasemsuk^{1*}, Tossapol Kiatcharoenpol¹, Hanoof Waiyaroop¹, Tadpon Kullawong², Laksiri Treeranurat³

¹ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง, กรุงเทพมหานคร 10520

²บริษัท ฟอร์ซฟูล คอร์ปอเรชั่น จำกัด, อ.เมือง จ.ปทุมธานี 12000

³สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110

¹Department of Industrial Engineering, School of Engineering, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok

²Forcefull Corporation Company Limited. Mueang District, Pathum Thani

³Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University, Hatyai, Songkhla

*Corresponding author e-mail: kittiwat.sirikasemsuk@gmail.com

(Received: 5 November 2020, Revised: 8 February 2021, Accepted: 15 February 2021)

บทคัดย่อ

อุปกรณ์สปอยเลอร์ (Spoiler) เป็นหนึ่งในหลายองค์ประกอบของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เพื่อช่วยลดความเร็วและแรงปะทะของอากาศที่เกิดขึ้นบริเวณแขนหัวอ่านเขียน (Actuator Arm) และหัวอ่านเขียน (Suspension Slider and Head) ปัญหาที่บริษัทผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์แห่งหนึ่ง พบว่า เครื่องจักรสปอยเลอร์ขึ้นสกรูเพื่อยึดชิ้นส่วนสปอยเลอร์ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ไม่แน่น ก่อให้เกิดของเสียขึ้น ซึ่งสามารถวัดได้โดยการใช้ค่าความห่างของสกรู (หรือค่าเอ็นโค้ดเดอร์ของการขัน) ในการยึดสปอยเลอร์ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยฉบับนี้เพื่อระบุและวิเคราะห์ปัจจัยที่มีผลต่อค่าเอ็นโค้ดเดอร์ของการขัน โดยวิธีการวิเคราะห์สมการถดถอยพหุคูณ ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับค่าเอ็นโค้ดเดอร์ของการขันจะถูกกำหนดขึ้น จากการรวบรวมข้อมูลเพื่อนำมาวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าเอ็นโค้ดเดอร์ของการขัน พบว่า มี 4 ปัจจัยหลักที่เป็นไปได้ว่าจะมีผลกระทบ ได้แก่ 1. ค่าแรงบิดใช้ขันสกรู (X_1), 2. ค่ามุมที่หมุนไปของหัวบิต (Bit) (X_2), 3. เวลาที่ใช้ในกระบวนการขันสกรู (X_3), และ 4. ค่าสูญญากาศที่ใช้หีบสกรูจากรางสกรู (X_4) จากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่า 1. ค่าแรงบิด (ภายใต้ค่าที่พิจารณาในการทดลองนี้) ไม่มีผลต่อค่าความห่างของสกรู, 2. เวลาที่มีผลต่อค่าความห่างของสกรูมากที่สุด เนื่องจากมีความสัมพันธ์กับตัวแปรตามอย่างมีนัยสำคัญ เพราะค่า F-Value มากกว่าปัจจัยอื่น, และ 3. ค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมได้ถูกระบุในงานวิจัยนี้ อนึ่งในงานวิจัยนี้ได้พิจารณาเกณฑ์การตัดสินใจเพื่อคัดเลือกตัวแบบที่เหมาะสมจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ

(R^2), และค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง (MS_{error}) นอกจากนี้ยังพิจารณาเพิ่มเรื่องค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAD) ของค่าความคลาดเคลื่อนด้วย

คำสำคัญ: ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์, สปอยเลอร์, ค่าความห่างของสกรู, ค่าเอ็นโค้ดเดอร์ของการขัน, การวิเคราะห์สมการถดถอยพหุคูณ

Abstract

A spoiler is a part of a hard disk drive that can reduce the airflow velocity and force at an actuator arm and its head. At a case study for a hard disk drive manufacturer, the main problem was that the spoiler was tightened too loosely in the hard disk drive by the spoiler installation machine, thereby gaining a defect. Its response could be measured by the screw spacing (also called ‘the screwdriver encoder’) for the spoiler installation in the hard disk drives. The purpose of this paper was to determine and analyze the factors affecting the screwdriver encoder by means of the multiple regression analysis. The mathematical model of the screwdriver encoder and its significant factors were suitably built. With data collected from the spoiler installation machine and its software, it was found that there were the following four potential factors which plausibly affected the screwdriver encoder: 1. the screw torque, 2. the bit angle, 3. the amount of time spent in tightening the screw, and 4. the vacuum level for picking the screw. From the ANOVA table, it was found that: 1. The screw torque (under the range of these experimental values) did not affect the screw spacing, 2. The amount of time had the largest effect on the screw spacing because its F-Value was more than the others, and 3. The optimal values for setting the spoiler installation machine were explored in this paper. Besides, this research considered the criteria for selection of the suitable model from the coefficient of determination (R^2) and the mean square error (MS_{error}). In addition, the mean absolute deviation (MAD) was simultaneously considered.

Keywords: Hard Disk Drive, Spoiler, Screw Spacing, Screwdriver Encoder, Multiple Regression Analysis

1. บทนำ

อุตสาหกรรมฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ในประเทศไทย เป็นฐานการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ขนาดใหญ่ ซึ่งถือเป็นอุตสาหกรรมที่มีศักยภาพสูงในด้านการสร้างมูลค่าเพิ่มให้แก่ประเทศ แต่จากสภาพอุตสาหกรรมในยุคปัจจุบัน ที่มีการแข่งขันสูงทั้งทางด้านราคาและคุณภาพ ประกอบกับต้นทุนต่าง ๆ ทั้งค่าขนส่ง ค่าสาธารณูปโภคและค่าแรงงานก็มีการปรับตัวสูงขึ้น ส่งผลกระทบให้ต้นทุนการดำเนินธุรกิจสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ทำให้องค์กรต้องมองหาหนทางในการลดต้นทุนการผลิตรวมถึงการ

เพิ่มประสิทธิภาพการผลิต (Productivity) เพื่อเพิ่มศักยภาพในการแข่งขันกับคู่แข่ง ดังนั้นจำเป็นต้องระมัดระวังเพื่อไม่ให้เกิดของเสียในกระบวนการผลิต เพราะการเกิดของเสียทำให้เกิดการสูญเสียทั้งเวลา วัตถุดิบ แรงงานและเครื่องจักรในการนำกลับมาผ่านกระบวนการผลิตใหม่ (Rework) ดังนั้นการให้ความสำคัญกับแนวคิดเรื่องคุณภาพ โดยการควบคุมกระบวนการผลิตให้เกิดของเสียให้น้อยที่สุด จึงถือเป็นกลยุทธ์อย่างหนึ่งที่สามารถได้เปรียบในการแข่งขันกับองค์กรอื่นๆ รวมทั้งยังสร้างกำไรอันสูงสุดแก่องค์กรอีกด้วย

บริษัทผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์แห่งหนึ่งในประเทศไทย เป็นโรงงานอุตสาหกรรมผลิตอุปกรณ์จัดเก็บข้อมูลประเภทฮาร์ดดิสก์ มีส่วนประกอบหลัก คือ หัวสำหรับอ่านเขียนบนดิสก์ข้อมูล (Slider Fabrication) ชุดหัวอ่านเขียนฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Head Gimbal Assembly) ชุดประกอบหัวอ่านและเขียนสำเร็จรูป (Head Stack Assembly) และฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ (Hard Disk Drive) ปัจจุบันกรณีศึกษาได้พัฒนาสายการผลิตให้อยู่ในรูปแบบกระบวนการผลิตแบบประกอบอัตโนมัติเพื่อเพิ่มความสามารถในการตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้า ในด้านต้นทุน คุณภาพ และความรวดเร็วในการส่งมอบให้ได้ทันตามความต้องการ จากปัจจัยต่าง ๆ ในกระบวนการผลิต เช่น การออกแบบเครื่องจักร ประสิทธิภาพของวัตถุดิบที่นำมาใช้ การตั้งค่าตัวแปรที่ใช้ในกระบวนการทำงานของเครื่องจักร อาจทำให้ชิ้นงานบางส่วนเกิดข้อบกพร่องจนไม่สามารถใช้งานได้ หรือส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานลดลง จึงจำเป็นต้องมีการควบคุมกระบวนการผลิตให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นและหาสาเหตุหลักของปัญหาที่ส่งผลให้ชิ้นงานเกิดข้อบกพร่อง เพื่อไม่ให้ผลิตภัณฑ์ที่อาจมีปัญหาผ่านไปถึงลูกค้า เมื่อพิจารณาเครื่องจักรของสายการผลิตแบบประกอบอัตโนมัติในภาพรวมแล้ว พบว่า มีข้อเสียเกิดขึ้นหลากหลายประเภท โดยที่เครื่องจักรสปอยเลอร์ (Spoiler Install) เกิดการทำงานผิดพลาดมากที่สุดในส่วนของกระบวนการขึ้นสกรู ดังนั้นข้อความแห่งปัญหาของงานวิจัย คือ เครื่องจักรสปอยเลอร์ (Spoiler Install) ขึ้นสกรูเพื่อยึดชิ้นส่วนสปอยเลอร์ (Spoiler) ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ไม่แน่น

วัตถุประสงค์ของงานวิจัย คือ เพื่อวิเคราะห์หาปัจจัยที่มีผลกระทบต่อค่าเอ็นโค้ดเดอร์ของการขึ้น (Screwdriver Encoder) และสร้างสมการถดถอยพหุคูณ (Multiple Regression) ในการระบุความสัมพันธ์ของแต่ละปัจจัยต่อค่าเอ็นโค้ดเดอร์ของการขึ้น (Screwdriver Encoder) รวมถึงการกำหนดระดับปัจจัยที่เหมาะสม

ขอบเขตของงานวิจัยนี้จะศึกษากระบวนการผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ของผลิตภัณฑ์ V ซึ่งมียอดขายสูงสุด และศึกษารายละเอียดเกี่ยวกับขั้นตอนการทำงานของเครื่องจักรสปอยเลอร์ (Spoiler Install) เท่านั้น โดยทำการเก็บข้อมูลในช่วง

เดือนสิงหาคม 2562 ในการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) จะใช้เกณฑ์ในการตัดสินใจที่ระดับนัยสำคัญที่ 0.10

อนึ่งการวิเคราะห์สมการถดถอยพหุคูณทั้งแบบเชิงเส้นตรงและโพลีโนเมียล จะถูกนำมาใช้เพื่ออธิบายความเชื่อมโยงระหว่างตัวแปรตามกับตัวแปรอิสระหลายตัว (ก่อให้เกิดความสัมพันธ์เชิงสาเหตุทางคณิตศาสตร์) และพยากรณ์ค่าของปัจจัยที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ค่าตัวแปรตามที่ต้องการ นำไปสู่การสร้างกลไกการเรียนรู้เพื่อตั้งค่าและควบคุมเครื่องจักรอย่างถูกต้องต่อไปในอนาคต

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 การทบทวนวรรณกรรมด้านฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์และการยึดสกรู

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์หรือจานบันทึกแบบแข็ง (Hard Disk Drive) เป็นหนึ่งในอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ที่ใช้สำหรับจัดเก็บข้อมูลมีทั้งแบบใช้ภายในและภายนอกเครื่องคอมพิวเตอร์ เป็นอุปกรณ์ที่มีความเร็วและความจุในการจัดเก็บข้อมูลได้สูงมาก ภายในฮาร์ดดิสก์จะประกอบด้วยจานโลหะที่เคลือบด้วยสารแม่เหล็กหรือเรียกว่า แผ่นจานฮาร์ดดิสก์ (Platter หรือ Disk) วางซ้อนกันหลายๆ ชั้นขึ้นอยู่กับความจุข้อมูล

ในปัจจุบันแผ่นจานฮาร์ดดิสก์ (Platter หรือ Disk) ถูกออกแบบให้หมุนด้วยความเร็วที่สูง เพื่อเพิ่มความเร็วในการส่งผ่านข้อมูลและความจุข้อมูลที่เพิ่มมากขึ้น การหมุนของจานแม่เหล็กด้วยความเร็วที่สูง จะสร้างการไหลของอากาศด้วยความเร็วสูงด้วย แขนหัวอ่านเขียนและจานแม่เหล็กเกิดการสั่นสะเทือน ส่งผลให้การส่งข้อมูลผิดพลาดได้

ในช่วงเริ่มต้นของการใช้สปอยเลอร์ (Spoiler) ได้มีงานวิจัยจำนวนมากที่ถูกตีพิมพ์เพื่อยืนยันถึงข้อดีของการใช้สปอยเลอร์ (Spoiler)

สปอยเลอร์ (Spoiler) นับว่าหนึ่งองค์ประกอบของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เพื่อช่วยลดความเร็วและแรงปะทะของอากาศที่เกิดขึ้นบริเวณแขนหัวอ่านเขียน (Actuator Arm) (Gupta, 2007)

Hirono et al. (2004) ได้ทำการทดลองถึงผลกระทบของความยาวและความหนาด้วยขนาดต่าง ๆ ของสปอยเลอร์ (Spoiler) ต่อการใช้พลังงานของหัวหมุนแผ่นจานฮาร์ดดิสก์ (Spindle Motor) โดยใช้เครื่องวัดความสั่นสะเทือนด้วยเลเซอร์

(Laser Doppler Vibrometer) พบว่า ถ้าความยาวและความหนาเพิ่มขึ้น การใช้พลังงานของหัวหมุนแผ่นจานฮาร์ดดิสก์ (Spindle Motor) จะเพิ่มขึ้นด้วย แต่กลับส่งผลดี คือ ทำให้อัตราการไหลของอากาศและการสั่นของหัวอ่านเขียน (Suspension Slider and Head) ลดลง สรุปคือ ทั้งความยาวและความหนาของสปอยเลอร์ (Spoiler) มีผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการใช้พลังงานของหัวหมุนแผ่นจานฮาร์ดดิสก์ (Spindle Motor) และการสั่นของหัวอ่านเขียน และเมื่อเร็ว ๆ นี้ Kankaew et al. (2015) ได้ใช้คอมพิวเตอร์จำลองการไหลของอากาศภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ขนาด 3.5 นิ้ว บนพื้นฐานของพลศาสตร์ของไหล (Computational Fluid Dynamics (CDF)) ภายใต้แบบจำลองความปั่นป่วนชนิด k-epsilon (k-epsilon Turbulence Model) โดยศึกษาอิทธิพลของความยาวของสปอยเลอร์ (Spoiler) ต่อความเร็วการไหลของอากาศ (Airflow Velocity) ผลการจำลองก็ได้ยืนยันว่า ความยาวของสปอยเลอร์ที่มาก ช่วยลดความเร็วเฉลี่ยของการไหลของอากาศ

ในงานวิจัยของ Ikegawa et al. (2006) ได้ศึกษาใช้กับไม่ใช่สปอยเลอร์ (Spoiler) เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Hirono et al. (2004) แต่ได้เพิ่มการศึกษาผลกระทบของการใช้ช่องบายพาส (Bypass) เพิ่มเติมขึ้น งานวิจัยนี้ได้ใช้พลศาสตร์ของไหล (CDF) ด้วยการจำลองการไหลแบบหมุนวนขนาดใหญ่ (Large Eddy Simulation (LES)) และวัดความเร็วของการไหลโดยวิธีภาพถ่ายของอนุภาพ (Particle Image Velocimetry (PIV)) การออกแบบการทดลองของเขาได้จำลองการไหลของอากาศโดยแบ่งเป็น 3 รูปแบบ คือ แบบที่ 1 ไม่ได้ใช้ช่องบายพาสและไม่ได้ใช้สปอยเลอร์, แบบที่ 2 มีช่องบายพาสแต่ไม่ได้ใช้สปอยเลอร์, และแบบที่ 3 มีช่องบายพาสและมีการใช้สปอยเลอร์ หมายเหตุ ช่องบายพาสจะเปี่ยงเบนกระแสอากาศออกไปขอบนอก (ซึ่งยังอยู่ภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์) และไหลวกย้อนกลับเข้ามาบริเวณรอบ ๆ แขนหัวอ่านเขียน (Actuator Arm) จากผลการทดลองของเขา จะเห็นว่า สปอยเลอร์จะช่วยลดความเร็วของกระแสอากาศ (Airflow Velocity) และเปี่ยงเบนเข้าสู่ช่องบายพาส มีผลให้การสั่นสะเทือนที่แขนหัวอ่านเขียน (Actuator Arm) ลดลงถึง 30%

Ikegawa et al. (2011) ยังได้จำลองการไหลของอากาศด้วย LES และ PIV และทำการทดลองจริง เพื่อเปรียบเทียบการ

กระจายการไหลของอากาศและความดันที่เกิดขึ้นบนหัวอ่านเขียน (Suspension Slider and Head) ระหว่างแผ่นจานฮาร์ดดิสก์ (Platter หรือ Disk) ในแต่ละชั้น ภายใต้การมีและไม่มีสปอยเลอร์ (Spoiler) พบว่า ค่าสูงสุด (Peak) ของแรงดันจะลดลงเมื่อมีสปอยเลอร์ (Spoiler) ที่สำคัญ Ikegawa et al. (2011) ยังพบปรากฏการณ์รูปแบบการไหลที่มีโครงสร้างหลายเหลี่ยม (Polygonal Airflow Structure) เกิดขึ้น ในแต่ละจุดสูงสุดของความดัน อนึ่ง Kubotera et al. (2012) จำลองการไหลแบบ LES บนพื้นฐานของ Dynamic Smagorinsky Model เพื่อศึกษาเพิ่มเติมและยืนยันปรากฏการณ์รูปแบบการไหลที่มีโครงสร้างหลายเหลี่ยมดังกล่าว ซึ่งมีทั้งสามเหลี่ยม, สี่เหลี่ยม, ห้าเหลี่ยม, และหกเหลี่ยม ภายใต้ความถี่ของความดันที่แตกต่างกัน และเกิดขึ้นซ้ำๆ ตลอดเวลา

Aruga et al. (2007) ทำการทดลองวัดค่าสัญญาณระบุตำแหน่งผิดพลาด (Position Error Signal (PES)) ซึ่งเป็นตัวระบุตำแหน่งหัวอ่านเขียนของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ หลังจากนั้นนำผลที่ได้ไปเปรียบเทียบกับผลจากการจำลองคอมพิวเตอร์ด้วยพลศาสตร์ของไหล (CDF) แบบ LES ได้ยืนยันว่า ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ที่หมุนด้วยความเร็วที่สูงขึ้น จะเกิดการรบกวนไปสู่การสั่นสะเทือนที่มากขึ้นด้วย และสามารถลดความรุนแรงลงได้ด้วยการเติมก๊าซฮีเลียม (Helium) ลงในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ที่สำคัญความผิดพลาดในการวางตำแหน่ง (Position Error) ของหัวอ่านเขียน (Suspension Slider and Head) จะลดลงเป็นอย่างมาก เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีไม่เติมก๊าซฮีเลียม (Helium)

Kil et al. (2012) ได้ต่อยอดงานวิจัยของ Aruga et al. (2007) เพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบคุณสมบัติของการไหลเชิงลึกภายใต้การเติมและไม่เติมก๊าซฮีเลียม (Helium) โดยเน้นศึกษาวัดค่าเฉลี่ยความเร็วของลม (Mean Velocity) และค่าความเข้มของการปั่นป่วน (Turbulence Intensity) ผ่านการจำลองด้วยคอมพิวเตอร์ ซึ่งทั้งสองงานวิจัยได้ศึกษาทั้งรัศมีของแผ่นจานฮาร์ดดิสก์ (Platter หรือ Disk) ทั้งด้านวงใน (Inner Position) และวงนอก (Outer Position) โดยที่งานวิจัยของ Aruga et al. (2007) ได้เน้นวัดที่แขนหัวอ่านเขียน (Actuator Arm) และหัว แขนงานวิจัยของ Kil et al. (2012) ได้เน้นวัดที่ระนาบกึ่งกลาง (Mid-plane) ระหว่างแผ่นจานฮาร์ดดิสก์ (Platter หรือ Disk) ทั้งสองแผ่น และได้เพิ่มระนาบที่อยู่สูงจาก

ระนาบกึ่งกลางขึ้นมาอีก 1.8 มิลลิเมตร ผลลัพธ์ที่ได้จากงานวิจัยของ Kil et al. (2012) สนับสนุนประโยชน์การบรรจุก๊าซฮีเลียมลงในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

ในก่อนหน้านี้ได้มีงานวิจัยจำนวนหนึ่ง เช่น Bouchard and Talke (1986) และ Aruga et al. (1984) ได้ศึกษาบรรจุและปิดผนึกก๊าซฮีเลียม (Helium) ลงในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ เพื่อลดปัญหาเรื่องความสูญเสียที่เกิดจากแรงลมต้าน (Windage Loss) เป็นหลัก คุณสมบัติของก๊าซฮีเลียม (Helium) คือ มีน้ำหนักน้อยเป็นอันดับสอง รองจากก๊าซไฮโดรเจน (Hydrogen) จะนำไปสู่แรงดันลม (Windage Pressure) ที่น้อย และความสูญเสียที่เกิดจากแรงลมต้าน (Windage Loss) ที่น้อย แต่ความหนืดไดนามิก (Dynamic Viscosity) จะมีค่ามากกว่าอากาศ (Schlichting & Gersten, 2016)

Suriyasuphapong and Rojanarowan (2014) ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อของเสียจากการโค้งงอ (Bending Defect) ของแผ่นจานฮาร์ดดิสก์ (Platter หรือ Disk) ด้วยเทคนิคซิกม่า (Six Sigma Technique) บนพื้นฐานของวิธีออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลเชิงเศษส่วน (Fractional Factorial Design) โดยมุ่งเน้นที่ปัจจัยของการตั้งค่าเครื่องจักร พร้อมทั้งสร้างสมการถดถอยโพลีโนเมียลดีกรีที่สอง (Second-order Polynomial Regression) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าโค้งงอกับตัวแปรที่เกี่ยวข้อง จนไปสู่การหาจุดที่เหมาะสมของการตั้งค่าปัจจัยที่เกี่ยวข้อง

ในอดีตนั้นแขนหัวอ่านเขียน (Actuator Arm) ทำงานร่วมกับสเต็ปมอเตอร์ (Stepping Motor) ในการหมุนแขนของหัวอ่านไปยังตำแหน่งที่ต้องการ โดยมีคอนโทรลเลอร์ ทำหน้าที่แปลคำสั่งที่มาจากคอมพิวเตอร์ จากนั้นก็เลื่อนหัวอ่านไปยังตำแหน่งที่ต้องการเพื่ออ่านหรือเขียนข้อมูลและใช้หัวอ่านในการอ่านข้อมูล ต่อมาสเต็ปมอเตอร์ (Stepping Motor) ได้ถูกแทนด้วยมอเตอร์ขดลวดเสียง (Voice Coil Motor (VCM)) ที่สามารถทำงานได้เร็ว และแม่นยำกว่า สเต็ปมอเตอร์ (Stepping Motor) (Ganssle, 2008) มอเตอร์ขดลวดเสียง (Voice Coil Motor (VCM)) เป็นขดลวดที่ทำหน้าที่บังคับให้แขนกลเคลื่อนที่ไปมา อย่างละเอียด ซึ่งอาศัยหลักการของการเหนี่ยวนำแม่เหล็ก (Electro Magnetic Induction) (Mueller, 2003)

ในงานวิจัยของ Mungtoklang et al. (2009) และ Rungpiputtanapong et al. (2012) ได้ศึกษาการสันสะท้อน (หรือความไม่สมดุล) จากความผิดพลาดเนื่องมาจากกระบวนการประกอบชุดจับยึดด้านบน (Top Clamp Assembly Process) ของฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เริ่มจากการวางงานบันทึกข้อมูลลงบนสปีนเดิลมอเตอร์ แล้ววางชุดจับยึดด้านบนพร้อมทั้งชั้นสกรูเพื่อจับยึด เมื่อวัดการสันสะท้อนออกมาในรูปมิลลิเมตร ไม่สมดุล หน่วยเป็นมิลลิกรัม เซนติเมตร

ในงานวิจัยของ Mungtoklang et al. (2009) จะสนใจสกรูที่ใช้ยึดรอบ ๆ สปีนเดิลมอเตอร์จำนวน 6 ตัว และพิจารณาถึงแรงบิดเป็นหลัก การขันสกรูถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม ซึ่งอยู่คนละฝั่งโดยแบ่งตามเส้นอ้างอิง กลุ่มแรกจะขันด้วยแรงบิดคงที่ 100% และกลุ่มที่สองจะเพิ่มแรงบิดของสกรูโดยบันทึกค่าของไม่สมดุลจากน้อยไปหามาก พบว่า แรงบิดของสกรูแต่ละตัวมีผลต่อจุดกึ่งกลางมวลของชุดแผ่นดิสก์ ซึ่งจุดกึ่งกลางมวลจะเคลื่อนตัวไปในทิศทางของสกรูตัวที่ได้รับแรงมากกว่าสกรูตัวอื่นๆ ซึ่งเป็นผลทำให้เกิดความไม่สมดุล

ในงานวิจัยของ Rungpiputtanapong et al. (2012) จะสนใจสกรูที่ใช้ยึดจุดศูนย์กลางสปีนเดิลมอเตอร์ หลังการทดลองพบว่า ปัจจัยที่ทำให้เกิดการสันสะท้อนของงานบันทึกข้อมูล ได้แก่ 1. ระยะการประกอบเยื้องศูนย์กลางของสปีนเดิลมอเตอร์กับชุดจับยึดด้านบน 2. ระยะความลึกการขันสกรู (ซึ่งมาจากแรงบิดที่ใช้ขันสกรู) และ 3. แกนหมุนเอียงของแกนหมุนของสปีนเดิลมอเตอร์ซึ่งอ้างอิงจากแกนปกติซึ่งแกนหมุนเอียงส่งผลกระทบต่อการสันสะท้อนมากที่สุด

เมื่อเร็ว ๆ นี้ Dabsomsri and Photong (2020) ได้ทำการทดลองเพื่อหาผลกระทบของปัจจัยที่เกี่ยวกับสัญญาณทางไฟฟ้า (ได้แก่ ค่ากระแสไฟฟ้า ค่าแรงดันไฟฟ้า ค่ากำลังไฟฟ้า) ต่อค่าแรงบิดของหุ่นยนต์ขันสกรูอัตโนมัติ (Automatic Screw Robot) ในการประกอบชิ้นส่วนโทรศัพท์มือถือ โดยแบ่งการทดลองเป็น 3 กรณี คือ 1. การขันสกรูปกติ (Normal Tightening) 2. การขันไม่ตรงตำแหน่ง (Screw Loose) และ 3. การขันแบบเกลียวสกรูเสียหาย (Screw Loose) จะได้ค่าสัญญาณทางไฟฟ้าในแต่ละกรณีออกมา พบว่า สัญญาณทางไฟฟ้าของไขควงไฟฟ้าในช่วงที่หุ่นยนต์ขันสกรูอัตโนมัติทำการ

ชั้นสกรูสามารถบอกลักษณะการขึ้นสกรูปกติได้ โดยที่ค่ากระแสไฟฟ้าจะมีความสัมพันธ์ที่เชื่อมโยงกับค่าแรงบิดมากกว่าค่าแรงดันไฟฟ้าและค่ากำลังไฟฟ้า และสมการการถดถอยเชิงเส้นตรงอย่างง่ายถูกสร้างขึ้นเพื่อแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงบิดและค่าแรงดันไฟฟ้า

จากการทบทวนวรรณกรรมจะเห็นว่า มีงานวิจัยที่เกี่ยวกับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์หลากหลายด้าน งานวิจัยฉบับนี้จะคล้ายกับงานวิจัยของ Suriyasuphapong and Rojanarowan (2014) ซึ่งเน้นติดตั้งแผ่นจานฮาร์ดดิสก์ (Platter หรือ Disk) และคล้ายกับงานวิจัยของ Mungtoklang et al. (2009), Rungpiputtanapong et al. (2012) และ Dabsomsri and Photong (2020) ซึ่งสนใจการยึดสกรู แต่งานวิจัยฉบับนี้เน้นติดตั้งชิ้นส่วนสปอยเลอร์ (Spoiler)

2.2 การทบทวนวรรณกรรมด้านการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ

การวิเคราะห์สมการถดถอยพหุคูณเชิงเส้นและสมการโพลิโนเมียลถูกนำไปใช้ในหลายสาขา (เช่น ทางด้านวิศวกรรมโยธา, วิศวกรรมการผลิตและวัสดุ, การออกแบบผลิตภัณฑ์ ฯลฯ) เพื่ออธิบายความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตามออกมาเป็นสมการทางคณิตศาสตร์

Utairumol and Chunumpan (2010) วิเคราะห์สมการถดถอยพหุคูณเชิงเส้นช่วยในการกำหนดราคาคาตลาดแทนที่ดินเพื่อการเวนคืนอสังหาริมทรัพย์ โดยมีปัจจัยเชิงคุณภาพที่สนใจเริ่มต้นจำนวน 6 ปัจจัย (ถูกแปลงมาเป็นเชิงปริมาณ) หลังจากการวิเคราะห์ภายใต้ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (Standard Error of Estimates) ที่น้อยสุดและค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ที่มากที่สุด พบว่า มีเพียง 3 ปัจจัย ได้แก่ 1. สภาพทำเลที่ตั้ง 2. ลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดิน และ 3. ความกว้างด้านที่ดินถนน ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) ถูกนำมาประยุกต์ใช้ด้วยการแสดงค่าที่เปลี่ยนแปลงไปตามราคาแต่ละแปลงตลอดแนวโครงการ

Prapaporn (2019) ได้ศึกษาความสัมพันธ์ปัจจัยที่มีผลต่อปริมาณวัสดุก่อสร้างสำหรับอาคารคอนกรีตเสริมเหล็ก และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองระหว่างการถดถอยพหุคูณเชิงเส้นและโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network) ในการกรองปัจจัยนั้นได้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์การ

ตัดสินใจ (R^2) และค่า P-value ของค่าสถิติเอฟ (F-test) ในส่วนของการเปรียบเทียบแบบจำลองได้ใช้ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Percent Error (MAPE)) ตัวแปรที่ส่งผลกระทบต่อปริมาณวัสดุก่อสร้าง ได้แก่ 1. พื้นที่ใช้สอยเฉลี่ยต่อชั้นของอาคาร และ 2. จำนวนชั้น

Thavorn et al. (2014) ได้ศึกษาปัจจัยที่ส่งผลต่อการใช้พลังงานไฟฟ้า (Energy Consumption) ของเครื่องกัดอัตโนมัติ (CNC Milling Machine) สำหรับอะลูมิเนียมผสมเกรด 6063 (Aluminum Alloy 6063) โดยมีปัจจัยที่ใช้ศึกษาอยู่สองชนิด คือ ความเร็วรอบ (Spindle Speed) และอัตราป้อน (Feed Rate) โดยใช้วิธีการออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล (Factorial Design) พบว่า ความเร็วรอบไม่มีผลต่อการใช้พลังงานไฟฟ้า หลังจากนั้นสมการเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Linear Regression) ได้ถูกสร้างขึ้นเพื่อใช้ทำนายการใช้พลังงานไฟฟ้า โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับค่าแล้ว (R^2 (adj)) ที่สูงในการยืนยันถึงความสัมพันธ์ดังกล่าว

ในการทดลองทางด้านวิศวกรรมศาสตร์ มีหลายงานวิจัยที่เกิดความสงสัยว่า ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต้นและตัวแปรตาม ซึ่งไม่ได้เป็นแบบเส้นตรงเสมอ เช่น ในปี ค.ศ. 2020 งานวิจัยของ Thakur et al. (2020) ได้ศึกษาอิทธิพลของระยะเวลาในการสปาร์คของอิเล็กโทรดกับชิ้นงาน (Pulse-on Time) ระยะเวลาปิดกระแสไฟฟ้า (Pulse-off Time) และระดับของกระแสไฟฟ้า (Current) ต่อความขรุขระหรือความหยาบผิว (Surface Roughness) บนไทเทเนียมอัลลอย 6246 (Titanium Alloy 6246) ด้วยกระบวนการอีดีเอ็ม (Electrical Discharge Machining (EDM)) ด้วยแท่งอิเล็กโทรดกราไฟต์ (Graphite Electrode) โดยมีไดอิเล็กทริกเป็นน้ำมัน (Oil Dielectric) มีสมการถดถอยที่สนใจทั้งหมด 4 แบบ คือ 1. สมการเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Linear Regression) 2. สมการเชิงเส้นประกอบด้วยสองอันตรกิริยา (Linear Regression with two Interactions) 3. สมการถดถอยพหุนามดีกรีที่สอง (Quadratic Regression) และ 4. สมการถดถอยพหุนามดีกรีที่สาม (Cubic Regression) จากการ

วิเคราะห์ทางสถิติ ความสัมพันธ์เป็นแบบสมการถดถอยพหุนาม
ดีกรีที่สองเหมาะสมที่สุด

ในปีเดียวกันนั้น Harhout et al. (2020) ได้วิเคราะห์ปัจจัย
ของกระบวนการกลึงเหล็ก AISI 1050 ต่อความหยาบผิว ด้วย
ระเบียบวิธีการวิจัยที่คล้ายกันกับของ Thakur et al. (2020)
แต่มีการพิจารณาสมการถดถอยดีกรีที่สองและสามแบบมีอันตร
กิริยา พบว่า สมการถดถอยพหุนามดีกรีที่สาม (Cubic
Regression) เป็นสมการที่ดีที่สุด เพื่อแสดงความสัมพันธ์ของ
ปัจจัยอิสระทั้ง 3 ตัว ได้แก่ อัตราป้อน (Feed Rate), ความลึก
ในการตัด (Depth of Cut) และความเร็วตัด (Cutting Speed)
กับค่าความหยาบผิว นำไปสู่การหาค่าที่เหมาะสมต่อไป

Chantasee (2017) ได้นำเทคนิคการออกแบบเซ็นทรัล
คอมโพสิตแบบเฟสเซ็นเตอร์ (Face-centered Central
Composite Design) ซึ่งเป็นหนึ่งในหลายวิธีหาค่าตอบสนอง
(Response Surface Method) มาช่วยหาค่าอัตราป้อนและ
ระยะป้อนลึกเพื่อให้ได้ค่าความหยาบผิวน้อยที่สุดในงานกัด
อะลูมิเนียมผสมเกรด 6061-T6 และได้สมการถดถอยพหุนาม
ดีกรีที่สอง (Quadratic Regression) เพื่อช่วยทำนายค่าความ
หยาบผิว

2.3 ทฤษฎีการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณและสถิติ

สมการถดถอยพหุคูณเชิงเส้นเมื่อพิจารณาตัวแปรอิสระ
หลายตัวสามารถแสดงได้ดังนี้ (Freund et al., 2006)

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i,1} + \beta_2 X_{i,2} + \dots + \beta_{p-1} X_{i,p-1} + \varepsilon_i$$

$$= \beta_0 + \sum_{j=1}^{p-1} \beta_j X_{i,j} + \varepsilon_i$$

และสามารถเขียนอยู่ในรูปของเมทริกซ์ (Matrix Approach)
ดังนี้

$$\begin{matrix} Y & = & X & \beta & + & \varepsilon \\ n \times 1 & & n \times p & p \times 1 & & n \times 1 \end{matrix}$$

ด้วยวิธีกำลังสองน้อยที่สุด ตัวประมาณค่าสัมประสิทธิ์การ
ถดถอย (Estimated Regression Coefficient) สามารถ
คำนวณหาได้ดังนี้ (Kutner et al., 2005)

$$\begin{matrix} b & = & (XX)^{-1} & (XY) \\ p \times 1 & & p \times p & p \times 1 \end{matrix}$$

โดยที่

$$\begin{aligned} Y_{n \times 1} &= \begin{bmatrix} Y_1 \\ Y_2 \\ \vdots \\ Y_n \end{bmatrix} \\ \beta_{p \times 1} &= \begin{bmatrix} \beta_0 \\ \beta_1 \\ \vdots \\ \beta_{p-1} \end{bmatrix} \\ \varepsilon_{n \times 1} &= \begin{bmatrix} \varepsilon_1 \\ \varepsilon_2 \\ \vdots \\ \varepsilon_n \end{bmatrix} \\ X_{n \times p} &= \begin{bmatrix} 1 & X_{1,1} & X_{1,2} & \dots & X_{1,p-1} \\ 1 & X_{2,1} & X_{2,2} & \dots & X_{2,p-1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & & \vdots \\ 1 & X_{n,1} & X_{n,2} & \dots & X_{n,p-1} \end{bmatrix} \\ b_{p \times 1} &= \begin{bmatrix} b_0 \\ b_1 \\ \vdots \\ b_{p-1} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

เมื่อ

i คือ ดรรชนีของชุดข้อมูล เมื่อ $i = 1, 2, \dots, n$

p คือ ดรรชนีของค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย เมื่อ

$p = 0, 1, 2, \dots$ โดยที่ $p - 1$ คือจำนวนตัวแปรอิสระ

y_i คือ ตัวแปรตามหรือตัวแปรตอบสนอง

$X_{i,1}, X_{i,2}, \dots, X_{i,p-1}$ คือ ตัวแปรอิสระ

$\beta_0, \beta_1, \beta_2, \dots, \beta_{p-1}$ คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยที่แท้จริง

$b_0, b_1, b_2, \dots, b_{p-1}$ คือ ตัวประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย

ε_i คือ ค่าความคลาดเคลื่อนข้อมูลชุดที่ i โดยที่ $\varepsilon_i \sim N(0, \sigma^2)$

Y คือ เวกเตอร์ของตัวแปรตามขนาด $n \times 1$

β คือ เวกเตอร์ของค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยที่แท้จริงขนาด
 $p \times 1$

X คือ เวกเตอร์ของค่าตัวแปรอิสระขนาด $n \times p$

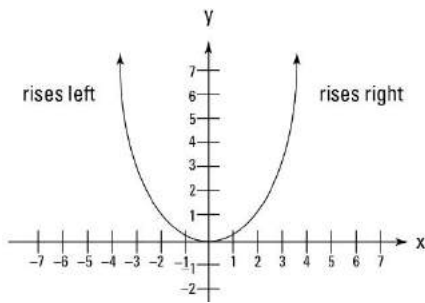
X คือ ทรานสโพสเมทริกซ์ของ X

$(XX)^{-1}$ คือ อินเวอร์สเมทริกซ์ของ XX

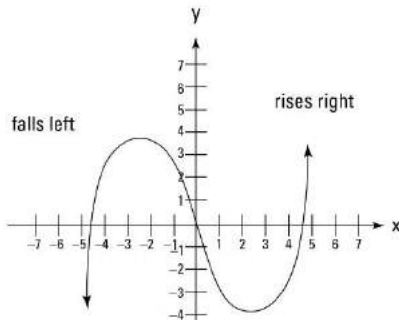
ε คือ เวกเตอร์ของค่าความคลาดเคลื่อนขนาด $n \times 1$

b คือ เวกเตอร์ของตัวประมาณค่าสัมประสิทธิ์การถดถอย
ขนาด $p \times 1$

หลาย ๆ ครั้งนักวิจัยอาจมีความสงสัยถึงความสัมพันธ์ของ
ข้อมูลอาจจะไม่ได้เป็นการถดถอยเชิงเส้นดีกรีที่หนึ่ง (Linear
Regression) อาจจะเป็นสมการถดถอยพหุนามดีกรีที่สอง
(Quadratic Regression) ดังรูปที่ 1 หรือสมการถดถอยพหุ
นามดีกรีที่สาม (Cubic Regression) ดังรูปที่ 2



รูปที่ 1 สมการถดถอยพหุนามดีกรีที่สอง (Rumsey, 2007)



รูปที่ 2 สมการถดถอยพหุนามดีกรีที่สาม (Rumsey, 2007)

สมการถดถอยพหุนามดีกรีที่สอง (Quadratic Regression) สามารถเขียนได้ ดังนี้

ตัวแปรอิสระหนึ่งตัว:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \beta_2 X_i^2 + \varepsilon_i$$

ตัวแปรอิสระสองตัว:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i,1} + \beta_2 X_{i,2} + \beta_3 X_{i,1}^2 + \beta_4 X_{i,2}^2 + \varepsilon_i$$

ตัวแปรอิสระสามตัว:

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i,1} + \beta_2 X_{i,2} + \beta_3 X_{i,3} + \beta_4 X_{i,1}^2 + \beta_5 X_{i,2}^2 + \beta_6 X_{i,3}^2 + \varepsilon_i$$

ตัวอย่างของสมการถดถอยพหุนามดีกรีที่สาม (Cubic Regression) เพื่อพิจารณาตัวแปรอิสระสามตัว สามารถเขียนสมการได้ดังนี้

$$y_i = \beta_0 + \beta_1 X_{i,1} + \beta_2 X_{i,2} + \beta_3 X_{i,3} + \beta_4 X_{i,1}^2 + \beta_5 X_{i,2}^2 + \beta_6 X_{i,3}^2 + \beta_7 X_{i,1}^3 + \beta_8 X_{i,2}^3 + \beta_9 X_{i,3}^3 + \varepsilon_i$$

จะสังเกตเห็นว่า ถ้ามีตัวแปรต้นเพิ่มมากขึ้นและดีกรีสูงขึ้น จะมีจำนวนพจน์ก็จะเพิ่มขึ้น ทำให้สมการถดถอยพหุนามมีความซับซ้อนเพิ่มขึ้น

Kutner et al. (2005) ได้กล่าวว่า สมการโพลิโนเมียลดีกรีที่สูงกว่าสาม (High-order Polynomial Model) มักไม่ถูกใช้ เนื่องจากการแปลผลค่าสัมประสิทธิ์จะยากและการประมาณค่า

สัมประสิทธิ์ในแต่ละพจน์มีค่าน้อย ยกเว้นจะมีหลักฐานบ่งบอกว่าชุดข้อมูลเป็นสมการโพลิโนเมียลดีกรีที่สูงกว่าสาม

ถึงแม้ว่าปัญหาที่มีความซับซ้อนอาจจะทำให้คิดว่าตัวแบบที่ได้ควรจะมีความซับซ้อนด้วย แต่ในความเป็นจริง จากการศึกษาหลาย ๆ งานพบว่า ตัวแบบที่มีความซับซ้อนน้อยยิ่งทำให้การทำนายมีความแม่นยำมากขึ้น (Armstrong, 2011; Zellner et al., 2001)

โดยทั่วไปเกณฑ์การพิจารณาเลือกรูปแบบของสมการถดถอยพหุนาม (Rumsey, 2007; Glantz et al., 2016; Montgomery & Runger, 2013) ที่นิยมใช้มีดังนี้

1. ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เป็นค่าสัดส่วนที่ตัวแปรอิสระสามารถอธิบายการเปลี่ยนแปลงของตัวแปรตาม ดังนั้นถ้าค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจมีค่ามาก แสดงว่าตัวแปรอิสระและตัวแปรตามที่มีความสัมพันธ์กันมาก ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) หาได้จากค่าผลบวกกำลังสองถดถอย (Regression Sum of Squares (SSR)) หารด้วยค่าผลบวกกำลังสองทั้งหมด (Total Sum of Squares (SST))

2. ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับค่าแล้ว (R^2 (adj)) ถูกนำมาใช้ เพื่อหลีกเลี่ยงค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) ที่เพิ่มขึ้นเนื่องจากการเพิ่มจำนวนตัวแปรอิสระ ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับค่าแล้ว (R^2 (adj)) หาได้จากค่ากำลังสองของการถดถอยเฉลี่ย (Regression Mean Square (MSR)) หารด้วยค่ากำลังสองทั้งหมดเฉลี่ย (Total Mean Square (MS_{total}))

3. ค่ากำลังสองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (MS_{error}) มาจากค่าผลบวกกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (Error Sum of Squares (SSE)) หารด้วยองศาเสรี เนื่องจากค่าผลบวกกำลังสองของความคลาดเคลื่อน (SSE) เป็นการวัดความแปรผันที่ไม่สามารถอธิบายได้ด้วยสมการถดถอย (หรือตัวแปรอิสระ) หากสมการถดถอยสามารถอธิบายค่าสังเกตได้ดี ค่าพยากรณ์ทุกค่าจะเท่ากับค่าสังเกต นั่นคือ $SSE = 0$ ดังนั้นสมการถดถอยที่มีค่ากำลังสองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (MS_{error}) น้อย ควรถูกเลือกมาเป็นตัวแทนข้อมูล เพราะสื่อถึงความแม่นยำของสมการถดถอย อนึ่ง ถ้าถดถอยที่สองของค่ากำลังสองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (MS_{error}) จะได้ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน

ของการถดถอย (Standard Error of Regression (S)) ซึ่งหลาย ๆ ครั้งจะใช้ค่านี้

นอกจากนี้ ยังมีเกณฑ์การพิจารณาซึ่งถูกใช้ในการคัดเลือกเทคนิคการพยากรณ์ (Wallace & Xia, 2014; Schniederjans et al., 2014; Gardiner & Reefke, 2019) และสามารถมาประยุกต์ใช้กับการคัดเลือกสมการถดถอยในเรื่องของความแม่นยำในการทำนาย คือ ค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Deviation (MAD)) หรือส่วนเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เฉลี่ย เพื่อใช้วัดการกระจายของข้อมูลที่ได้จากการเฉลี่ยค่าสัมบูรณ์ของผลต่างระหว่างค่าของข้อมูลกับค่ากลางของข้อมูลชุดนั้น ซึ่งค่ากลางอาจเป็นค่าเฉลี่ยเลขคณิตหรือมัธยฐานก็ได้ ค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAD) ของค่าความคลาดเคลื่อนหาได้จาก

$$MAD = \frac{\sum | \text{ค่าที่เกิดขึ้นจริง} - \text{ค่าที่พยากรณ์} |}{n}$$

แต่ค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAD) สามารถถูกแปลงให้อยู่ในรูปของเปอร์เซ็นต์ความผิดพลาดในการพยากรณ์ได้ เรียกว่า ค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Percentage Error (MAPE)) ซึ่งจัดว่าเป็นอีกดัชนีชี้วัดความแม่นยำที่นิยมใช้

วิธีการทดลองทีละปัจจัย (One Factor at a Time) คือ การทดสอบปัจจัยเพียง 1 ปัจจัยเท่านั้น ว่า มีผลต่อตัวแปรตอบสนองหรือไม่ ซึ่งจะเปลี่ยนค่าระดับของปัจจัยนั้นปัจจัยเดียว โดยไม่สนใจปัจจัยหรือตัวแปรอิสระอื่น ๆ (Montgomery, 2017)

ในทางปฏิบัตินั้น ข้อดีของวิธีการทดลองทีละปัจจัยที่ชัดเจนคือ ลดความซับซ้อนของการวิเคราะห์และแปลผล Wu and Hamada (2009) ได้กล่าวถึงข้อเสียของวิธีการทดลองทีละปัจจัย (OFAT) เมื่อไม่ได้ใช้วิธีการทดลองและวิเคราะห์อื่นเพิ่มเติม มีดังนี้ 1. จำนวนการทดลองจะมากกว่าการทดลองแบบแฟกทอเรียล (Factorial Design) เมื่อพิจารณาความแม่นยำที่เท่ากัน 2. ไม่สามารถประมาณค่าของอันตรกิริยา (Interaction) ได้ 3. ไม่สามารถหาจุดที่ดีที่สุดได้ (Optimal Setting)

งานวิจัยฉบับนี้ ผู้วิจัยได้ใช้การกรองปัจจัยเบื้องต้นด้วยวิธีการทดลองทีละปัจจัย (OFAT) หลังจากนั้นได้ใช้การวิเคราะห์สมการถดถอยพหุคูณ ทำให้ลดข้อเสียของวิธีการทดลองทีละปัจจัย (OFAT) ลง

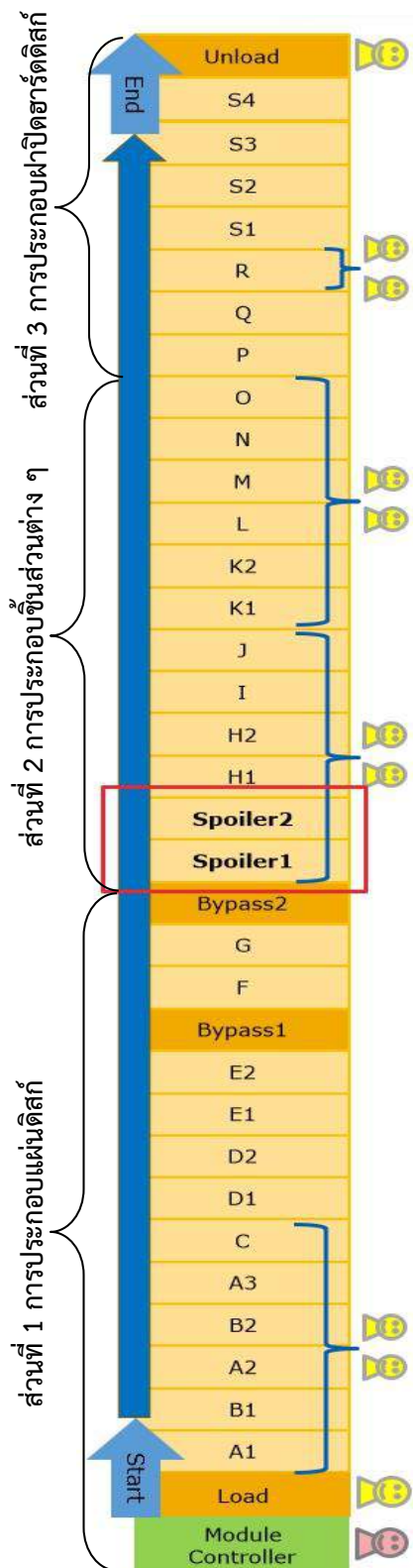
3. การศึกษาสภาพปัจจุบันและลักษณะของปัญหา

บริษัทธนศึกษาได้สร้างสายการผลิตแบบอัตโนมัติที่ใช้ประกอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ของผลิตภัณฑ์ V ซึ่งมีพนักงานทำหน้าที่ป้อนชิ้นส่วนที่ใช้ในการประกอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์จำนวน 11 คน โดยมีสถานีนงานทั้งหมด 32 สถานีนงาน (ดังรูปที่ 3) แบ่งการทำงานออกเป็น 3 ส่วน คือ

ส่วนที่ 1 การประกอบแผ่นดิสก์พร้อมทั้งทดสอบการทำงานของแผ่นดิสก์

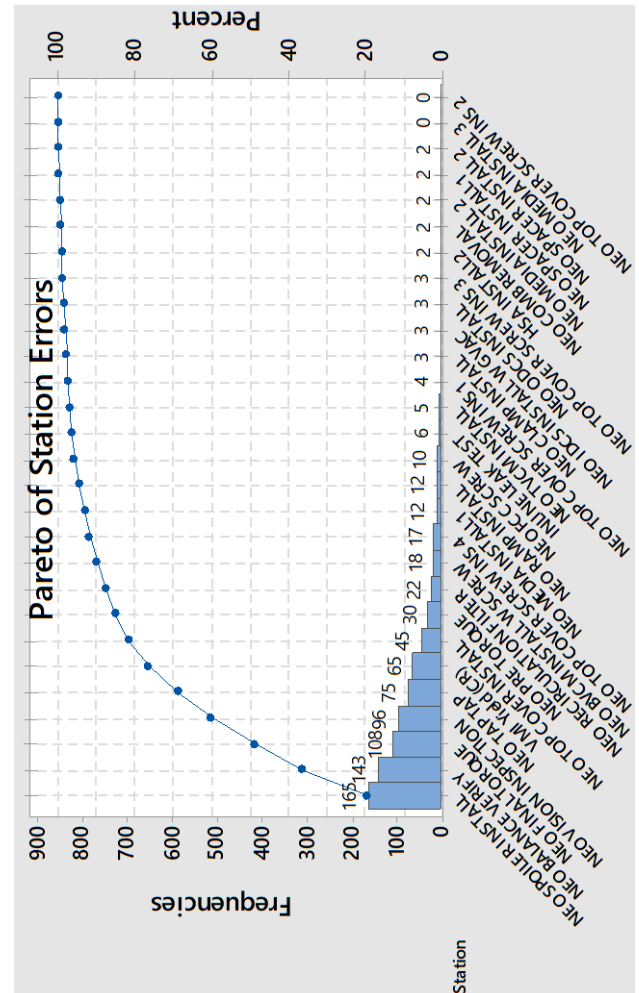
ส่วนที่ 2 การประกอบชิ้นส่วนต่าง ๆ ซึ่งเครื่องจักรสปอยเลอร์ (Spoiler Install) ที่ผู้วิจัยสนใจอยู่ในส่วนนี้ และ

ส่วนที่ 3 การประกอบฝาปิดฮาร์ดดิสก์



รูปที่ 3 สายการผลิตแบบอัตโนมัติที่ใช้ประกอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ของผลิตภัณฑ์ V

จากการวิเคราะห์ข้อมูลเครื่องจักรในสายการผลิตแบบประกอบอัตโนมัติของผลิตภัณฑ์ V ตั้งแต่วันที่ 5 สิงหาคม 2562 ถึงวันที่ 18 สิงหาคม 2562 ทั้งหมด 14 วัน พบจำนวนครั้งที่เครื่องจักรเกิดการทำงานที่ผิดพลาด ดังแสดงในรูปที่ 4

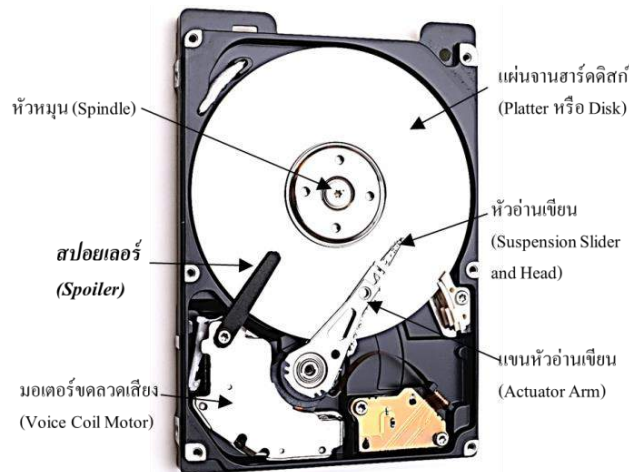


รูปที่ 4 แผนภูมิพาเรโตแสดงจำนวนครั้งที่ทำงานผิดพลาด

จากรูปที่ 4 แผนภูมิพาเรโตแสดงจำนวนครั้งที่เครื่องจักรของสายการผลิตแบบประกอบอัตโนมัติเกิดการทำงานผิดพลาด ซึ่งแกนแนวนอนแสดงชื่อเครื่องจักร แกนแนวตั้งแสดงจำนวนของเสียที่เกิดขึ้น จะเห็นได้ว่า เครื่องจักรสปอยเลอร์ (Spoiler Install) เกิดการทำงานผิดพลาดมากที่สุด ในกระบวนการขั้นสูง

เครื่องจักรสปอยเลอร์ (Spoiler Installation Machine) มีหน้าที่วางและขั้นสูงเพื่อยึดชิ้นส่วนสปอยเลอร์ (Spoiler) ใน

ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ซึ่งชิ้นส่วนสปอยเลอร์ (Spoiler) ดังรูปที่ 5 เป็นองค์ประกอบหนึ่งในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ของผลิตภัณฑ์ V มีหน้าที่ช่วยควบคุมกระแสลม โดยการลดความเร็วลมภายในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์



รูปที่ 5 ลักษณะและตำแหน่งของสปอยเลอร์ (Spoiler)

หมายเหตุ เครื่องจักรทำงานผิดพลาด หมายถึง ของเสียเกิดขึ้น ซึ่งไม่สอดคล้องกับข้อกำหนด และเป็นอุปสรรคต่อการปรับปรุงประสิทธิภาพ (Productivity)

เครื่องจักรสปอยเลอร์ (Spoiler Install) มีขั้นตอนการทำงาน ดังนี้

1. แขนหุ่นยนต์ (End Effector (1)) หยิบสปอยเลอร์ (Spoiler) จากถาด (Tray) และนำสปอยเลอร์ (Spoiler) ไปวางที่ตัวส่ง (Presenter)
2. ตัวส่ง (Presenter) เคลื่อนที่ในแนวแกน y เพื่อนำสปอยเลอร์ (Spoiler) ไปตำแหน่งที่แขนหุ่นยนต์ (End Effector (2)) จะมาหยิบสปอยเลอร์ (Spoiler)
3. แขนหุ่นยนต์ (End Effector (2)) หยิบสปอยเลอร์ (Spoiler) จากตัวส่ง (Presenter) และนำสปอยเลอร์ (Spoiler) ไปวางในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์
4. แขนหุ่นยนต์ (Screwdriver End Effector (3)) หยิบสกรูจากรางสกรูและทำการขันสกรูเพื่อให้สปอยเลอร์ (Spoiler) ยึดกับฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์

จากการศึกษากระบวนการผลิตของสายการผลิตแบบอัตโนมัติที่ใช้ประกอบฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ ผู้วิจัยพบว่า เครื่องจักร

ติดตั้งสปอยเลอร์ (Spoiler Installation Machine) มีปัญหาที่ทำให้เครื่องจักรเกิดการทำงานผิดพลาดในกระบวนการขันสกรู

ลักษณะของชิ้นงานที่เกิดจากการทำงานผิดพลาดในกระบวนการขันสกรู คือ การขันสกรูล้มเหลว (Screwdriver Fail) หรือสกรูสูงกว่าระดับที่กำหนด ดังรูปที่ 6 ซึ่งเกิดจากเครื่องจักรในส่วนของแขนหุ่นยนต์ที่ใช้ในการขันสกรู (Screwdriver End Effector) ขันสกรูไม่แน่น



รูปที่ 6 การขันสกรูล้มเหลว (Screwdriver Fail) หรือสกรูสูงกว่าระดับที่กำหนด

ข้อความแห่งปัญหาของงานวิจัย คือ เครื่องจักรสปอยเลอร์ (Spoiler Installation Machine) ขันสกรูเพื่อยึดชิ้นส่วนสปอยเลอร์ (Spoiler) ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ไม่แน่น ซึ่งสามารถวัดได้โดยใช้ค่าเอ็นโค้ดเดอร์ของการขัน (Screwdriver Encoder) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ป้อนกลับที่ใช้ตรวจจับระยะหรือตำแหน่งของสกรู

4. วิธีการดำเนินงานวิจัย

วิธีการดำเนินงานวิจัย (ดูรูปที่ 7) มีขั้นตอนดังนี้

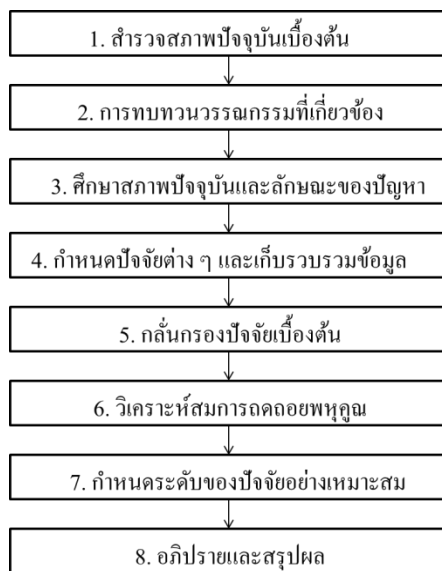
1. สำรวจสภาพปัจจุบันเบื้องต้นเพื่อกำหนดปัญหาและขอบเขต
2. การทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง
3. ศึกษาสภาพปัจจุบันและลักษณะของปัญหาอย่างละเอียด
4. กำหนดปัจจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง และเก็บรวบรวมข้อมูล
5. กลั่นกรองปัจจัยเบื้องต้น
6. วิเคราะห์สมการถดถอยพหุคูณ และตรวจสอบความถูกต้องของรูปแบบการทดลอง

7. กำหนดระดับของปัจจัยอย่างเหมาะสมเพื่อให้ได้ค่าความห่างของสกรูที่ต้องการ

8. อภิปรายและสรุปผล

หัวข้อก่อนหน้านี้ได้มีการกำหนดปัญหาของงานวิจัยวัตถุประสงค์ การทบทวนวรรณกรรม รวมถึงการศึกษาสภาพปัจจุบันไปแล้ว

หลังจากนี้ ผู้วิจัยได้กำหนดปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับค่าเอ็นโค้ดเดอร์ของการขัน (Screwdriver Encoder) รวบรวมข้อมูล การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยสมการถดถอย และสรุปผลการวิจัยตามลำดับ



รูปที่ 7 วิธีการดำเนินงานวิจัย

4.1 กำหนดปัจจัยและค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้อง

ตัวแปรตามหรือตัวแปรตอบสนอง ได้แก่ ค่าเอ็นโค้ดเดอร์ของการขัน (Screwdriver Encoder) ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ตรวจจับระยะหรือตำแหน่งของสกรู

ค่าเอ็นโค้ดเดอร์ของการขัน (Screwdriver Encoder) มาจากอุปกรณ์เอ็นโค้ดเดอร์ซึ่งเป็นเซ็นเซอร์สำหรับวัดระยะทางและวัดความเร็วจะอาศัยหลักการวัดระยะทางจากการหมุนรอบตัวเอง ถ้าระยะทางการหมุนรอบตัวเองมาก ทำให้ค่าความห่างของสกรู (ตามรูปที่ 6) จะลดลง

ค่าเอ็นโค้ดเดอร์ของการขัน มีค่าเป้าหมายอยู่ในช่วง 1 ± 0.55 มิลลิเมตร (mm) แต่ทางบริษัทต้องการให้เข้าถึงค่า $0.45 - 0.65$ มิลลิเมตร เพื่อให้การยึด Spoiler มีคุณภาพมากขึ้น

ตัวแปรอิสระหรือปัจจัยที่เกี่ยวข้อง ได้แก่

ตัวแปรที่ 1. ค่าแรงบิด (Torque) ค่าแรงบิดที่ใช้ขันสกรูโดยมีค่าอยู่ในช่วงระหว่าง 1.48 ถึง 1.50 ปอนด์ (lbs)

ตัวแปรที่ 2. ค่ามุม (Angle) ค่ามุมที่หมุนไปของหัวบิต (Bit) ที่ใช้ขันสกรู โดยไม่มีช่วงของค่าที่กำหนด

ตัวแปรที่ 3. เวลา (Time) เวลาที่ใช้ในกระบวนการขันสกรู โดยเริ่มจับเวลาตั้งแต่หัวบิต (Bit) หมุนจนกระทั่งหัวบิต (Bit) ขันสกรูสำเร็จ โดยมีค่าอยู่ในช่วง $\leq 4,000$ มิลลิวินาที (ms)

ตัวแปรที่ 4. ค่าสุญญากาศ (Vacuum) ค่าสุญญากาศที่ใช้หีบสกรูจากรางสกรู โดยมีค่าอยู่ในช่วง 8.4 ถึง 9.7 เมกะปาสคาล (MPa)

ตัวแปรที่ 5. ค่าตำแหน่งแกน Z (Screwdriver Z) ค่าตำแหน่งแกน Z ของแขนหุ่นยนต์ที่ใช้ในการขันสกรู (Screwdriver End Effector) โดยมีค่าเท่ากับ 240.93 มิลลิเมตร (mm)

ตัวแปรที่ 6. ค่าระยะการเคลื่อนที่ของตัวเตะสปอยเลอร์ (Kicker Encoder) ค่าอุปกรณ์ป้อนกลับที่วัดระยะการเคลื่อนที่ของตัวเตะที่ใช้เตะชิ้นส่วนสปอยเลอร์ (Spoiler) ให้อยู่ในตำแหน่งที่กำหนดก่อนการขันสกรู โดยมีค่าเท่ากับ 214.748 มิลลิเมตร (mm)

ตัวแปรที่ 7. ค่าตำแหน่งแกน X (X axis) ค่าตำแหน่งแกน X ของแขนหุ่นยนต์ที่ใช้ในการขันสกรู (Screwdriver End Effector) โดยมีค่าเท่ากับ 65.89 มิลลิเมตร (mm)

ตัวแปรอิสระต่าง ๆ มาจากการระดมความคิดเห็นของผู้ปฏิบัติงาน หัวหน้างาน และวิศวกรกระบวนการ รวมถึงทีมผู้วิจัย โดยส่วนใหญ่ตัวแปรอิสระที่ถูกเลือกมาพิจารณาจะสามารถตั้งโปรแกรมเพื่อเปลี่ยนค่าได้

ส่วนค่าของตัวแปรอิสระต่าง ๆ เป็นช่วงที่ถูกใช้งานจริง ณ ปัจจุบัน การปรับค่าเกิดขึ้นจากผู้ควบคุมเครื่องจักรเมื่อเห็นถึงความผิดพลาดกำลังจะเกิดขึ้น หรือเกิดขึ้นแล้ว และเกิดจากความคาดเคลื่อนของตัวเครื่องจักรเอง

ในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้สนใจตัวแปรที่ 1 ถึงตัวแปรที่ 4 ได้แก่

1. ค่าแรงบิดใช้ขันสกรู
2. ค่ามุมที่หมุนไปของหัวบิท (Bit)
3. เวลาที่ใช้ในกระบวนการขันสกรู และ
4. ค่าสูญญากาศที่ใช้หีบสกรูจากรางสกรู

ส่วนตัวแปรที่ 5 ถึงตัวแปรที่ 7 มีค่าของข้อมูลเป็นค่าคงที่ จึงไม่นำปัจจัยดังกล่าวมาศึกษา

4.2 การเก็บรวบรวมข้อมูล

ผู้วิจัยทำการเก็บรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับตัวแปรของเครื่องจักรสปอยเลอร์ (Spoiler Installation Machine) ที่ใช้ในกระบวนการขันสกรูจาก JSON File โดยแปลงไฟล์ดังกล่าวมาเป็นไฟล์เอกซ์เซล (Excel) เพื่อทำการวิเคราะห์หาสาเหตุหลักของปัญหาที่ทำให้เครื่องจักรเกิดการทำงานผิดพลาดในกระบวนการขันสกรู

ข้อมูลที่รวบรวมได้ตั้งแต่ช่วงวันที่ 8 กันยายน 2562 ถึงวันที่ 12 กันยายน 2562 ซึ่งใน 1 วันมีจำนวนชิ้นงาน 1,000 กว่าชิ้น โดยผู้วิจัยสุ่มค่าวันละ 100 ชิ้น เป็นระยะเวลา 5 วัน รวมข้อมูลที่นำไปวิเคราะห์ทั้งหมด 500 ข้อมูล สามารถแสดงตัวอย่างได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตัวอย่างข้อมูลตัวแปรที่ใช้ในกระบวนการขันสกรู

Product Code	Torque	Angle	Time	Vacuum	Screwdriver Encoder
WX11D690N497	1.490	4004.3	2954	8.688	0.615
WX31D89A0DAF	1.493	4132.2	2976	9.300	0.986
WX31D89A0EKC	1.496	4029.6	2954	9.188	0.924
WX31D89A00TS	1.492	4218.7	2991	9.263	1.029
WX31D89A0CLT	1.495	4015.8	2955	9.137	0.913
WX31D89A0C27	1.498	4161.4	2990	9.237	1.004
WX31D89A0AF7	1.496	4255.2	3017	9.212	1.042
WX31D89A0DAY	1.493	4148.1	2995	9.175	0.997
WX31D89A0DXA	1.491	4326.4	3037	9.212	1.071
WX31D89A0EJD	1.493	4068.4	2971	9.137	0.95
WX31D89A0AUR	1.495	4106.3	2982	9.7	0.965
WX31D89A00ZN	1.491	4293.5	3026	9.212	1.05
WX31D89A0CY6	1.491	4094	2965	9.2	0.932
WX31D89A0CLC	1.498	4176.7	2993	9.15	0.995
WX31D89A0E25	1.491	3995.3	2950	9.2	0.901
WX31D89A0ACP	1.493	4132.6	2982	9.237	0.971
WX31D89A0A5D	1.493	4197.9	2997	9.188	1.01
WX31D89A0C11	1.488	4114	2979	9.15	0.954
WX31D89A0A7L	1.496	4018.8	2961	9.2	0.92
WX31D89A0C75	1.494	3982.3	3230	9.15	1.126
WX31D89A0CUH	1.495	4107.7	2983	8.962	0.76
WX31D89A0A95	1.493	3968.2	2942	8.875	0.692
WX31D89A0D9D	1.492	4037.9	2961	9.137	0.725
WX31D89A0F4J	1.493	3996.4	2950	9.05	0.701
WX31D89A0E48	1.499	4084.6	2978	9	0.763
WX31D89A0F7C	1.495	4282.4	3022	9.075	0.869
WX21D690LU7C	1.496	4283.3	3027	8.988	0.858
WX31D89A0V82	1.495	4220.8	3001	9.125	0.794
WX21D690L8CU	1.496	4256.5	3019	9.125	0.831
WX21D690L4HZ	1.494	4228.1	3000	8.787	0.829
WX31D89A0AV7	1.493	4176.6	2988	8.787	0.768
WX21D690L13D	1.500	4086.5	2963	9.025	0.666
WX21D690LJZD	1.493	4297.0	3015	9.175	0.771
WX21D690L2XS	1.495	4368.7	3032	9.137	0.821
WX21D690LJF6	1.494	4161.2	2991	9.175	0.720
WX31D89A0F2Z	1.496	4067.1	2972	9.025	0.736
WX21D690LF80	1.493	4021.5	2949	8.838	0.701

อนึ่ง วิธีการสุ่มตัวอย่างแบบง่าย (Simple Random Sampling) ได้ถูกใช้ในการเก็บข้อมูล มีหลักการที่สำคัญ คือ ทุก ๆ ชิ้นงานใน 1 วันจะมีโอกาสถูกเลือกเท่ากันเพื่อตรวจสอบความผิดพลาดหรือข้อบกพร่อง โดยใช้โปรแกรมมินิแทบเวอร์ชั่น 17 (Minitab 17.0) สร้างและสุ่มหมายเลขชิ้นงานขึ้นมา

ตารางที่ 1 แสดงตัวอย่างของข้อมูลที่ถูกสุ่มและแปลงไฟล์ JSON File มาเป็นไฟล์เอกซ์เซล (Excel) ในคอลัมน์แรก จะบันทึกรหัสของผลิตภัณฑ์ คอลัมน์ถัด ๆ ไปจะเป็นค่าของตัวแปรอิสระทั้ง 4 ปัจจัย และค่าตัวแปรตาม (นั่นคือ ค่าเอ็นโค้ดเดอร์ของการขัน) เช่น ข้อมูลผลิตภัณฑ์รายการแรกที่ถูกสุ่มขึ้นมา มีรหัส WX11D690N497 โดยมีค่าแรงบิดที่ใช้ขันสกรู (Torque) 1.490 ปอนด์ ค่ามุมที่หมุนไปของหัวบิต (Bit) เท่ากับ 4004.3 รอบต่อนาที (rpm) เวลาที่ใช้ในกระบวนการขันสกรู 2954 มิลลิวินาที และ ค่าสัญญาณที่ใช้หีบสกรูจากรางสกรู 8.688 เมกะปาสคาล ทำให้ได้ค่าเอ็นโค้ดเดอร์ของการขันเท่ากับ 0.615 มิลลิเมตร

4.3 การกรองปัจจัยเบื้องต้นด้วยวิธีการทดลองที่ละปัจจัย

ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของตัวแปรอิสระทั้ง 4 ตัว เพื่อต้องการทราบความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับตัวแปรตาม ได้ผลดังรูปที่ 8 และสามารถวิเคราะห์การถดถอยเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Linear Regression) ได้ดังตารางที่ 2

ผลการวิเคราะห์การกรองปัจจัยเบื้องต้นระหว่างตัวแปรอิสระกับตัวแปรตาม จะเห็นว่าค่าแรงบิด (Torque) ไม่มีความสัมพันธ์กับค่าเอ็นโค้ดเดอร์ของการขัน (Screwdriver Encoder) เพราะมีค่า P-Value เท่ากับ 0.705 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ 0.10 และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) เท่ากับ 0.03% หมายความว่า สมการถดถอยที่ใช้ประมาณค่าไม่สามารถอธิบายความแปรปรวนของตัวแปรตามหรือค่าเอ็นโค้ดเดอร์ของการขัน (Screwdriver Encoder) ได้ ดังนั้นผู้วิจัยจึงตัดข้อมูลของค่าแรงบิด (Torque) ออกจากการวิเคราะห์ในขั้นตอนต่อไป เพื่อลดความซับซ้อนการวิเคราะห์

ตารางที่ 2 ผลการวิเคราะห์การกรองปัจจัยเบื้องต้น

ตัวแปร	รูปแบบสมการ	P-Value for Regression	ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2)
ค่าแรงบิด (Torque: X_1)	$Y = 2.44 - 1.12 X_1$	0.705	0.03%
ค่ามุม (Angle: X_2)	$Y = -2.309 + 0.000738 X_2$	0.000	28.15%
เวลา (Time: X_3)	$Y = -4.0088 + 0.001586 X_3$	0.000	83.27%
ค่าสัญญาณ (Vacuum: X_4)	$Y = -1.199 + 0.2163 X_4$	0.000	4.57%

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	1	0.0033	0.003314	0.14	0.705
Torque	1	0.0033	0.003314	0.14	0.705
Error	486	11.2029	0.023051		
Lack-of-Fit	10	0.0693	0.006929	0.30	0.982
Pure Error	476	11.1336	0.023390		
Total	487	11.2062			

ก) การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าแรงบิด (Torque)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	1	3.1550	3.15504	190.45	0.000
Angle	1	3.1550	3.15504	190.45	0.000
Error	486	8.0512	0.01657		
Lack-of-Fit	462	7.7859	0.01685	1.52	0.106
Pure Error	24	0.2653	0.01105		
Total	487	11.2062			

ข) การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่ามุม (Angle)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	1	9.3314	9.33136	2418.85	0.000
Time	1	9.3314	9.33136	2418.85	0.000
Error	486	1.8749	0.00386		
Lack-of-Fit	141	0.5421	0.00384	1.00	0.506
Pure Error	345	1.3328	0.00386		
Total	487	11.2062			

ค) การวิเคราะห์ความแปรปรวนของเวลา (Time)

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	1	0.5116	0.51157	23.25	0.000
Vacuum	1	0.5116	0.51157	23.25	0.000
Error	486	10.6947	0.02201		
Lack-of-Fit	60	2.1831	0.03638	1.82	0.000
Pure Error	426	8.5116	0.01998		
Total	487	11.2062			

ง) การวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าสัญญาณ (Vacuum)

รูปที่ 8 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบการทดลองที่ละปัจจัย (One Factor at a Time)

4.4 การวิเคราะห์สมการถดถอยพหุคูณ

จากการทบทวนวรรณกรรม พบว่า ความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับตัวแปรตามอาจไม่ได้เป็นการถดถอยเชิงเส้นตรงที่หนึ่ง (Linear Regression) ดังนั้นในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ตั้งสมมติฐานว่า ตัวแปรอิสระทั้งสามอาจมีความสัมพันธ์ต่อค่าเอ็นโค้ดเดอร์ของการขึ้นเป็นแบบสมการโพลีโนเมียลดีกรีที่สองหรือสามก็ได้

สมการถดถอยพหุคูณในงานวิจัยนี้จะแบ่งเป็น 5 รูปแบบ โดยมีที่มาจากงานวิจัยของ Thakur et al. (2020) และ Harhout et al. (2020) ดังนี้

รูปแบบที่ 1 คือ สมการเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Linear Regression)

รูปแบบที่ 2 คือ สมการเชิงเส้นประกอบด้วยสองอันตรกิริยา (Linear Regression with two Interactions)

รูปแบบที่ 3 คือ สมการเชิงเส้นประกอบด้วยสองและสามอันตรกิริยา (Linear Regression with Two and Three Interactions)

รูปแบบที่ 4 คือ สมการถดถอยพหุนามดีกรีที่สอง (Quadratic Regression)

รูปแบบที่ 5 คือ สมการถดถอยพหุนามดีกรีที่สาม (Cubic Regression)

จากการออกแบบการทดสอบรูปแบบของสมการถดถอยพหุคูณ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับตัวแปรตาม สามารถสรุปผลได้ดังตารางที่ 3

จากการทบทวนวรรณกรรม เกณฑ์การพิจารณาเลือกรูปแบบของสมการถดถอยพหุคูณ (Rumsey, 2007; Glantz et al., 2016; Montgomery & Runger, 2013) มีดังนี้

1. ดูจากค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับค่าแล้ว (R^2 (adj)) มีค่าสูงที่สุด
2. ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง (MS_{error}) จากตารางการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) มีค่าน้อยที่สุด
3. ดูค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละพจน์ โดยที่ค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละพจน์ไม่ควรถูกวิเคราะห์ว่ามีค่าเท่ากับศูนย์ (Sudasma-Na-Ayudhya and Luangpaiboon, 2008)
4. ค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Deviation (MAD)) ของค่าความคลาดเคลื่อน (Wallace & Xia, 2014; Schniederjans et al., 2014; Gardiner & Reefke, 2019)

ในงานวิจัยนี้ได้ใช้ตัววัดเรื่องค่าความคลาดเคลื่อนทั้งในเรื่องของค่ากำลังสองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย (MS_{error}) และ ค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAD) ของค่าความคลาดเคลื่อน เพื่อเลือกตัวแบบทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) ให้เหมาะสมยิ่งขึ้น

จากตารางที่ 3 จะเห็นได้ว่าทุกรูปแบบจะผ่านเกณฑ์ในเรื่องของค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับค่าแล้ว (R^2 (adj)) รวมถึงค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง (MS_{error}) ที่มีค่าใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 3 การทดสอบรูปแบบของสมการถดถอยพหุคูณ

รูปแบบที่	ชื่อรูปแบบ	รูปแบบสมการถดถอยพหุคูณ	สัมประสิทธิ์การ ตัดสินใจ (R^2)	R^2 (adj)	MS_{error}	MAD
1.	Simple Linear Regression	$Y = -4.554 + 0.000126 X_2$ $+ 0.001495 X_3 + 0.0322 X_4$	84.00%	83.90%	0.00370	0.038554606
2.	Linear Regression with Two Interactions	$Y = -0.48 + 0.00018 X_2 - 0.00106 X_3 -$ $0.030 X_4 + 0.000000 X_2 X_3$ $- 0.000094 X_2 X_4 + 0.000152 X_3 X_4$	84.04%	83.84%	0.00372	3.364689586
3.	Linear Regression with Two and Three Interactions	$Y = 324 - 0.0753 X_2 - 0.111 X_3 -$ $35.4 X_4 + 0.000026 X_2 X_3$ $+ 0.00813 X_2 X_4 + 0.0121 X_3 X_4 -$ $0.000003 X_2 X_3 X_4$	84.07%	83.84%	0.00372	23.40242467
4.	Quadratic Regression	$Y = 20.80 - 0.00325 X_2 + 0.000000 X_2^2$ $- 0.00187 X_3 + 0.000001 X_3^2 - 2.87 X_4$ $+ 0.1609 X_4^2$	84.40%	84.21%	0.00363	2.866268885
5.	Cubic Regression	$Y = 46 - 0.054 X_2 + 0.000013 X_2^2 -$ $0.000000 X_2^3 + 0.0503 X_3 -$ $0.000016 X_3^2 + 0.000000 X_3^3 - 6.0 X_4$ $+ 0.51 X_4^2 - 0.013 X_4^3$	84.42%	84.13%	0.00365	30.40288116

ในที่นี้ใช้ข้อมูล 5 วันเดิม ซึ่งมีจำนวนข้อมูล 500 ข้อมูล เพื่อคำนวณหาค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAD) เพื่อช่วยวัดความแม่นยำของรูปแบบสมการถดถอย พบว่า รูปแบบที่ 1 สมการเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Linear Regression) มีค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAD) ต่ำที่สุด (MAD = 0.038554606), มีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับค่าแล้ว (R^2 (adj)) ที่สูง, ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง (MS_{error}) มีค่าไม่สูง, และค่าสัมประสิทธิ์ของแต่ละพจน์มีค่าไม่เท่ากับศูนย์

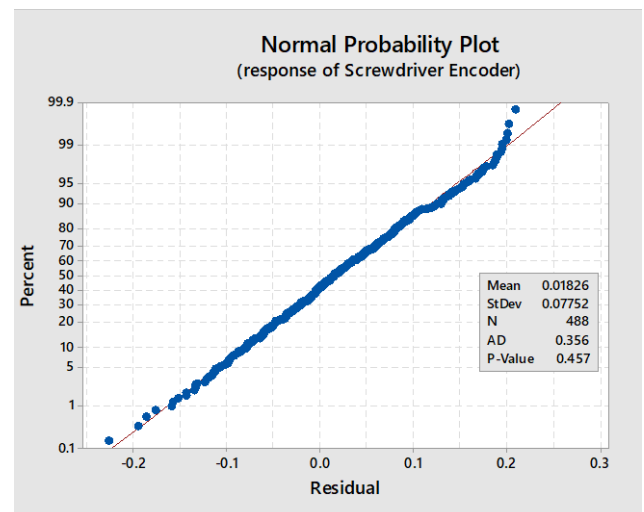
การตรวจสอบค่าเศษเหลือ (Residual) ต้องมีการแจกแจงแบบปกติ เพื่อยืนยันว่าข้อมูลมีความถูกต้องและเชื่อถือได้ โดยตั้งสมมติฐานว่า

H_0 : ค่าเศษเหลือมีการแจกแจงแบบปกติ

H_1 : ค่าเศษเหลือไม่มีการแจกแจงแบบปกติ

ผลจากการตรวจสอบสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 9 พบว่า ค่า P-value มีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.10 จึงไม่สามารถ

ปฏิเสธสมมติฐานหลักได้ ดังนั้นค่าเศษเหลือมีการกระจายตัวแบบปกติ



รูปที่ 9 การแจกแจงแบบปกติของค่าเศษเหลือ

ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกรูปแบบที่ 1 สมการเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Linear Regression) ให้เป็นสมการที่ดีที่สุด โดยมีความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร ดังนี้

$$Y = -4.554 + 0.000126 X_2 + 0.001495 X_3 + 0.0322 X_4$$

ซึ่งสามารถดูผลของการวิเคราะห์สมการถดถอยพหุคูณของรูปแบบที่ 1 สมการเชิงเส้นอย่างง่าย ได้ดังรูปที่ 10

Analysis of Variance

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Regression	3	9.4135	3.13784	847.15	0.000
Angle	1	0.0684	0.06844	18.48	0.000
Time	1	6.0374	6.03736	1629.97	0.000
Vacuum	1	0.0109	0.01087	2.93	0.087
Error	484	1.7927	0.00370		
Total	487	11.2062			

Model Summary

S	R-sq	R-sq(adj)	R-sq(pred)
0.0608603	84.00%	83.90%	83.77%

Coefficients

Term	Coef	SE Coef	T-Value	P-Value	VIF
Constant	-4.554	0.188	-24.16	0.000	
Angle	0.000126	0.000029	4.30	0.000	1.35
Time	0.001495	0.000037	40.37	0.000	1.37
Vacuum	0.0322	0.0188	1.71	0.087	1.04

รูปที่ 10 ผลการวิเคราะห์สมการถดถอยพหุคูณของรูปแบบที่ 1

ผลการวิเคราะห์สมการถดถอยพหุคูณของรูปแบบที่ 1 เมื่อใช้ค่าระดับนัยสำคัญที่ 0.10 พบว่า ปัจจัยทั้งสามปัจจัย คือ ค่ามุมที่หมุนไปของหัวบิต (Bit), เวลาที่ใช้ในกระบวนการขันสกรู, และค่าสัญญาณที่ใช้หีบสกรูจากรางสกรูที่ผลต่อค่าเอ็นโค้ดเดอร์ของการขัน แต่ค่าสัญญาณจะส่งผลกระทบน้อยกว่าปัจจัยทั้งสอง และถ้าเปลี่ยนไปใช้ค่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ค่าสัญญาณที่ใช้หีบสกรูจากรางสกรูจะไม่มีผลต่อค่าเอ็นโค้ดเดอร์ของการขัน อย่างไรก็ตามต้องระวังเรื่องของค่าสัญญาณที่มีค่าน้อยเกินไป อาจจะทำให้สกรูหลุดออกจากการขัน ทำให้ไขควงอัตโนมัติขันฟรีได้ ในทางตรงกันข้ามค่าสัญญาณที่มีค่ามากเกินไป อาจทำให้ตัวสกรูได้รับความเสียหาย

ค่าสัมประสิทธิ์ของตัวแปร X_2 และ X_3 มีค่าเป็นบวกหมายความว่า ค่ามุมที่หมุนไปของหัวบิต (Bit) และเวลาที่ใช้ในกระบวนการขันสกรูยิ่งเพิ่มมากขึ้น จะทำให้ค่าเอ็นโค้ดเดอร์ของ

การขัน (Screwdriver Encoder) หรือระยะการหมุนรอบตัวเองเพิ่มมากขึ้นด้วย ส่งผลทำให้ค่าความห่างของสกรูจะลดลง ซึ่งเป็นไปตามหลักการของการขันสกรูโดยทั่วไป แต่ต้องไม่มากเกินไปเพราะอาจจะทำให้เกลียวของสกรูได้รับเสียหายและขันไม่แน่น

4.5 การวิเคราะห์หาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสม

การวิเคราะห์หาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมด้วยโปรแกรมมินิแทบเวอร์ชัน 17 (Minitab 17.0) ของรูปแบบที่ 1 สมการเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Linear Regression) ซึ่งมีค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAD) น้อยสุดอันดับที่ 1 ให้ผลดังนี้

ค่ามุม (X_2) ที่เหมาะสมเท่ากับ 3922.6 รอบ,

เวลา (X_3) ที่ใช้ในการขันสกรูที่เหมาะสมเท่ากับ 2928

มิลลิวินาทีและ

ค่าสัญญาณ (X_4) ที่ใช้ในการหีบสกรูจากรางสกรูที่เหมาะสมเท่ากับ 8.6 เมกะปาสคาล

เมื่อนำค่าที่เหมาะสมของแต่ละปัจจัยไปแทนในรูปแบบที่ 1 สมการเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Linear Regression) จะได้ค่า Y (Screwdriver Encoder) เท่ากับ 0.5945276 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นค่าที่ยังอยู่ในช่วงที่กำหนด

5. สรุปผลการวิจัย

การผลิตของเสียเป็นหนึ่งในความสูญเสียและจัดว่าเป็นอุปสรรคในการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต องค์การทุกองค์กรจำเป็นต้องมีระบบการปฏิบัติการหรือการดำเนินงานที่มีประสิทธิภาพเพื่อป้องกันของเสียและเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต (รวมถึงการลดต้นทุน) ในปัจจุบันภาพรวมนั้น ฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์มีความต้องการจากลูกค้าเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องและคู่แข่งมีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ไม่หยุดยั้ง ในงานวิจัยฉบับนี้ได้ศึกษาบริษัทผลิตฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์แห่งหนึ่งในประเทศไทย หลังจากสำรวจปัญหาทางด้านคุณภาพ แผนภูมิพาเรโต (Pareto Chart) ได้ถูกใช้เพื่อจัดเรียงลำดับความสำคัญของปัญหาด้วยความถี่ของการเกิด ปัญหาที่เร่งด่วนอันดับหนึ่ง คือ เครื่องจักรสปอยเลอร์ (Spoiler) ขันสกรูเพื่อยึดชิ้นส่วนสปอยเลอร์ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ไม่แน่น ก่อให้เกิดของเสียขึ้นจำนวนมาก

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาสาเหตุหลักของปัญหาที่ทำให้เครื่องจักรสปอยเลอร์ (Spoiler Install) เกิดการทำงานผิดพลาดในกระบวนการขึ้นสกรู ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรอิสระกับตัวแปรตาม

จากปัญหาเครื่องจักรสปอยเลอร์ (Spoiler Installation Machine) ขึ้นสกรูเพื่อยึดชิ้นส่วนสปอยเลอร์ (Spoiler) ในฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ไม่แน่น โดยผู้วิจัยได้เริ่มทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อกรองปัจจัยเบื้องต้นของตัวแปรอิสระทั้ง 4 ตัว ได้แก่ ค่าแรงบิดใช้ขันสกรู (Torque), ค่ามุม (Angle), เวลา (Time) และค่าสุญญากาศ (Vacuum)

ผลสรุปที่สำคัญของงานวิจัย มีดังนี้

1. ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า ค่าแรงบิดใช้ขันสกรู (Torque) ที่ถูกใช้ในช่วงระหว่าง 1.48 ถึง 1.50 ปอนด์ (ถือว่าเป็นช่วงแคบ ๆ ที่บริษัทกรณีศึกษาได้ใช้ค่าในช่วงนี้) ไม่มีความสัมพันธ์กับค่าเอ็นโค้ดเดอร์ของการขัน (Screwdriver Encoder) ผู้วิจัยจึงตัดข้อมูลของค่าแรงบิด (Torque) ออกจากการวิเคราะห์ในขั้นตอนการวิเคราะห์สมการถดถอยพหุคูณ ผลที่สำคัญถัดมาคือ เวลา (Time) มีผลต่อค่าเอ็นโค้ดเดอร์ของการขัน (Screwdriver Encoder) อย่างมีนัยสำคัญและมากกว่าตัวแปรอื่น เพราะมีค่า F-Value มากที่สุด

2. ในงานวิจัยฉบับนี้ เลือกรูปแบบที่ 1 สมการเชิงเส้นอย่างง่าย ให้เป็นตัวแทนทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมที่สุด ภายใต้ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง (MS_{error}) และค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAD) น้อยที่สุด และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) มีค่าสูงที่สุด นอกจากนี้ งานวิจัยฉบับนี้ยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kutner et al. (2005), Armstrong (2011) และ Zellner et al. (2001) คือ ตัวแบบไม่จำเป็นต้องมีความซับซ้อนมาก เพียงแค่สมการถดถอยอย่างง่ายก็สามารถเป็นตัวแทนของข้อมูล เพราะสามารถทำนายได้แม่นยำมากกว่า

3. ถ้าพิจารณาเพียงแค่ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง (MS_{error}) ค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับค่าแล้ว (R^2 (adj)) อาจจะสรุปว่า สมการถดถอยทั้ง 5 รูปแบบอาจจะเป็นตัวแทนของความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปรต่าง ๆ ได้ แต่เมื่อพิจารณาค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAD) มาพิจารณาเพิ่มเติม พบว่า มีเพียงสมการรูปแบบ

ที่ 1 (สมการเชิงเส้นอย่างง่าย (Simple Linear Regression)) เท่านั้นที่ให้ค่าความแม่นยำในการทำนายต่ำที่สุด โดยที่รูปแบบที่ 3 คือ สมการเชิงเส้นประกอบด้วยสองและสามอันตรกิริยา (Linear Regression with two and three Interactions) และรูปแบบที่ 5 คือ สมการถดถอยพหุนามดีกรีที่สาม (Cubic Regression) ไม่ควรที่จะถูกเลือก เพราะมีค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAD) ที่มาก

งานวิจัยฉบับนี้ จึงสนับสนุนให้งานวิจัยต่าง ๆ ได้เพิ่มเกณฑ์การวัดค่าเบี่ยงเบนสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAD) หรือค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAPE) มาประกอบการตัดสินใจ และคัดเลือกสมการถดถอย ควบคู่กับค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจ (R^2) และค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจที่ปรับค่าแล้ว (R^2 (adj)) ซึ่งจะสอดคล้องกับงานวิจัยของ Prapaporn (2019), Wallace and Xia (2014), Schniederjans et al. (2014), Gardiner and Reefke (2019)

เมื่อพิจารณาค่าแรงบิดใช้ขันสกรู (Torque) ซึ่งดูเหมือนว่าจะแตกต่างจากงานวิจัยของ Mungtoklang et al. (2009), Rungpiputtanapong et al. (2012), Dabsomsri and Photong (2020) ซึ่งให้ความสำคัญกับค่าแรงบิด (Torque) ว่ามีผลต่อการขันสกรู ดังนั้นผู้วิจัยจึงเชื่อว่า ถ้ามีการทดลองเพิ่มเติม โดยเปลี่ยนค่าแรงบิดใช้ขันสกรู (Torque) ไปเป็นช่วงอื่น ค่าแรงบิดใช้ขันสกรู (Torque) น่าจะมีผลต่อค่าเอ็นโค้ดเดอร์ของการขัน

อนึ่ง ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์ระดับปัจจัยที่เหมาะสมไม่สามารถทำการทดลองกับเครื่องจักรจริงได้ เนื่องจากสายการผลิตที่ทำการศึกษาเป็นสายการผลิตแบบประกอบอัตโนมัติ จึงไม่สามารถหยุดการทำงานของเครื่องจักรได้ทันที ซึ่งจะทำให้การทดลองได้ก็ต่อเมื่อมีการซ่อมบำรุงสายการผลิตเท่านั้น เพราะสายการผลิตนี้เป็นสายการผลิตแบบทำงานตามลำดับขั้นตอนและทำงานแบบต่อเนื่อง แต่สามารถนำสมการที่ได้จากการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณไปประยุกต์ใช้ในการทำวิธีการเรียนรู้ด้วยตัวเองของคอมพิวเตอร์หรือแมชชีนเลิร์นนิง (Machine Learning) ได้ เพื่อที่จะสามารถทำการตรวจจับความผิดปกติในการทำงานของเครื่องจักรและป้องกันการเกิดของเสีย

เมื่อพิจารณาถึงข้อดีและข้อเสียของระเบียบวิธีวิจัย ผู้วิจัยเลือกที่จะไม่ใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล (Factorial Design) แต่หันไปใช้การวิเคราะห์สมการถดถอยพหุคูณ โดยผ่านการกรองปัจจัยเบื้องต้นด้วยวิธีการทดลองทีละปัจจัย (One Factor at a Time (OFAT)) เนื่องจากว่า การกรองปัจจัยเบื้องต้นด้วยวิธีการทดลองทีละปัจจัย (OFAT) มีข้อดี คือ ลดปัจจัยที่ต้องพิจารณาลงก่อน เพื่อลดความซับซ้อนของการวิเคราะห์และแปลผลในส่วนถัดไป และในส่วนของการวิเคราะห์ความแปรปรวน ความแปรปรวนอันเนื่องมาจากปัจจัยที่ไม่ส่งผลกระทบดังกล่าว จะถูกรวมในความแปรปรวนเนื่องมาจากความผิดพลาด (Source of Error) ทำให้ค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง (MS_{error}) จะสูงกว่ากรณีที่ใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียล (Factorial Design) แบบไม่กรองปัจจัยก่อน เมื่อคำนวณค่าสถิติเอฟ (F-test) ของปัจจัยหลัก (Main Effect) ทำให้การสรุปผลว่า ปัจจัยหลักอื่น ๆ นั้นส่งผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนองยากขึ้นด้วย นั่นคือถ้าผลสรุปว่า ปัจจัยหลักนั้นส่งผลกระทบต่อตัวแปรตอบสนองจะเป็นผลการวิเคราะห์ที่หนักแน่นขึ้น จึงจัดเป็นหนึ่งในข้อดีเมื่อกรองปัจจัยเบื้องต้นด้วยวิธีการทดลองทีละปัจจัยก่อน (OFAT) นอกจากนี้ในส่วนของการเก็บผลการทดลอง ปัจจัยหรือตัวแปรอิสระใดที่ไม่ส่งผลต่อตัวแปรตอบสนอง (หรือตัวแปรตาม) ก็จะไม่ถูกควบคุม สามารถใช้ค่าดั้งเดิมได้ (คือ ไม่ต้องถูกตั้งค่าที่ระดับต่าง ๆ เพื่อทำการทดลอง) ทำให้ประหยัดเวลาและต้นทุนการทดลอง

ข้อเสียของระเบียบวิธีวิจัยดังกล่าว คือ อันตรกิริยา (Interaction) ระหว่างปัจจัยที่ถูกกรองออกไปตั้งแต่แรกกับปัจจัยหลักอื่น ๆ จะไม่ถูกพิจารณา สิ่งนี้คือข้อจำกัดของงานวิจัยฉบับนี้

ในงานวิจัยฉบับนี้ ด้วยพฤติกรรมของข้อมูลที่เกี่ยวข้องมาได้นั้น (ดังในตารางที่ 1) จะเห็นว่าแต่ละปัจจัยมีระดับที่หลากหลายไม่คงที่ และจำนวนซ้ำในทรีตเมนต์คอมบิเนชัน (Treatment Combination) ไม่เท่ากัน (ก่อให้เกิดการทดลองแบบไม่สมดุลขึ้น (Unbalanced Design)) จึงไม่เหมาะสมถ้าจะใช้การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลแบบผลกระทบคงที่ (Fixed-effect-model Factorial Design) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้การวิเคราะห์สมการถดถอยพหุคูณ

หมายเหตุ การออกแบบการทดลองแบบแฟกทอเรียลแบบผลกระทบคงที่ (Fixed-effect-model Factorial Design) จะพิจารณาทุก ๆ ปัจจัย (หรือตัวแปรอิสระ) พร้อมกันในการทำการทดลองและวิเคราะห์ผล โดยที่จำนวนระดับของแต่ละปัจจัยจะถูกกำหนดไว้โดยมีช่วงความห่างที่เท่า ๆ กัน และมีจำนวนของระดับของแต่ละปัจจัยที่แน่นอน จึงไม่เหมาะกับการนำมาใช้ในงานวิจัยฉบับนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- Armstrong, J. S. (2011). *Illusions in regression analysis*. <http://dx.doi.org/10.2139/ssrn.1969740>
- Aruga, K., Hasegawa, S., & Mizhoshita, Y. (1984). *Design and evaluation of helium sealed large capacity hard disk drives*. Fujitsu Internal Document.
- Aruga, K., Suwa, M., Shimizu, K., & Watanabe, T. (2007). A study on positioning error caused by flow induced vibration using helium-filled hard disk drives. *IEEE Transactions on Magnetics*, 43(9), 3750-3755. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2007.902983>
- Bouchard, G., & Talke, F. E. (1986). Non-repeatable flutter of magnetic recording disks. *IEEE Transactions on magnetics*, 22(5), 1019-1021. <https://doi.org/10.1109/TMAG.1986.1064437>
- Chantasee S. (2017). The effects of machining parameters on milling of 6061-T6 aluminum alloy. *Naresuan University Journal: Science and Technology*, 25(1) , 138-149. <http://www.journal.nu.ac.th/NUJST/article/view/1683>
- Dabsomsri, K., & Photong C. (2020). The study of abnormal screwing and torque measurement technique of automatic screw tightening robot using electrical signal analysis. *The Journal of Industrial Technology*, 16(1), 62-77. <https://doi.org/10.14416/10j.ind.tech.005.03.2020>
- Freund, R. J., Wilson, W. J., & Sa, P. (2006). *Regression analysis* (2nd ed.). Elsevier Inc.
- Ganssle, J. (Ed.). (2008). *Embedded systems: world class designs*. Elsevier Inc.
- Gardiner, D., & Reefke, H. (2019). *Operations management for business excellence: building sustainable supply chains*. Routledge.

- Glantz, S. A., Slinker, B. K., & Neilands T. B. (2016). *Primer of applied regression & analysis of variance* (3rd ed.). McGraw-Hill, Inc.
- Gupta, V. (2007). *Air bearing slider dynamics and stability in hard disk drives*. University of California, Berkeley.
- Harhout, R., Gaceb, M., Haddad, S., Aguib, S., Bloul, B., & Guebli, A. (2020). Predictive modelling and optimisation of surface roughness in turning of AISI 1050 steel using polynomial regression. *Manufacturing Technology*, 20(5), 591-602. <https://doi.org/10.21062/mft.2020.094>
- Hirono, Y., Arisaka, T., Nishijima, N., Shimizu, T., Nakamura, S., & Masuda, H. (2004). Flow-induced vibration reduction in HDD by using a spoiler. *IEEE transactions on magnetics*, 40(4), 3168-3170. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2004.829176>
- Ikegawa, M., Hirono, Y., Mukai, H., & Kaiho, M. (2006). Decreasing airflow velocity in hard disk drives with a spoiler and bypass. *IEEE transactions on magnetics*, 42(10), 2594-2596. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2006.878642>
- Ikegawa, M., Mukai, H., Sugii, T., & Watanabe, M. (2011, November 11-17). Investigation of polygonal airflow structure in hard disk drives with and without spoiler by using fluid simulations and measurements. *Proceedings of the ASME 2011 International Mechanical Engineering Congress and Exposition*. Denver, Colorado, United States. <https://asmedigitalcollection.asme.org/IMECE/proceedings-abstract/IMECE2011/54938/1071/358603>
- Kankaew, W., Tangchaichit, K., & Suriyawanakul, J. (2015). Decreasing airflow velocity in high speed hard disk drive by using spoiler. *Advanced Materials Research*, 1061-1062, 862-865. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.1061-1062.862>
- Kil, S. W., Humphrey, J. A., & Haj-Hariri, H. (2012). Numerical study of the flow-structure interactions in an air-or helium-filled simulated hard disk drive. *Microsystem technologies*, 18(1), 57-75. <https://doi.org/10.1007/s00542-011-1375-y>
- Kubotera, H., Kong, D. W., Song, Y., Tokumiya, T., & Kim, C. S. (2012). Computational fluid dynamics and experimental visualization of time-variable air flow pattern inside hard disk drives. *IEEE transactions on magnetics*, 48(8), 2395-2398. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2012.2194299>
- Kutner, M. H., Nachtsheim, C. J., Neter, J., & Li, W. (2005). *Applied linear statistical models* (4th ed.). McGraw-Hill Irwin.
- Montgomery, D. C., & Runger, G. C. (2013). *Applied statistics and probability for engineers* (6th ed.). Wiley.
- Montgomery, D. C. (2017). *Design and analysis of experiments* (9th ed.). John Wiley & Sons.
- Mueller, S. (2003). *Upgrading and repairing PCs*. Que Publishing.
- Mungtoklang, S., Pinsopon, U., & Singnam, P. (2009). The study on rotating unbalance in hard disk drive due to screw tightening using the finite element method. *Engineering Journal Chiang Mai University*, 16(2), 21-27. http://researchs.eng.cmu.ac.th/UserFiles/File/Journal/16_2/3Samart.pdf
- Prapaporn, W. (2019). An analysis on material quantity relationship of reinforced concrete buildings between Multiple Linear Regression and Artificial Neural Network. *Naresuan University Engineering Journal (NUEL)*, 14(1), 84-102. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/nuej/article/view/141406/137926>
- Rumsey, D. J. (2007). *Intermediate statistics for dummies*. John Wiley & Sons.
- Rungpiputtanapong, S., Chutima, S., & Tuchinda, A. (2012). The study of production factors of top clamp assembly affecting vibration of hard disc drives using finite element analysis. *Nakhon Phanom University Journal*, 2(1), 13-20. <https://doi.org/10.14416/10j.ind.tech.005.03.2020>
- Schlichting, H., & Gersten, K. (2016). *Boundary-layer theory* (9th ed.). Springer-verlag Berlin Heidelberg.
- Schniederjans, M. J., Schniederjans, D. G., & Starkey, C. M. (2014). *Business analytics principles, concepts, and applications: what, why, and how*. Pearson Education.
- Sudasna-Na-Ayudhya, P., & Luangpaiboon, P. (2008). *Design and analysis of experiment*. Top Publishing.
- Suriyasuphapong, S., & Rojanarowan, N. (2014). The use of the six sigma approach to minimize the defective rate from bending defects in hard disk drive media disks. *Advanced Materials Research*, 974, 298-304. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/amr.974.298>

Thakur, A., Rao, P. S., & Khan, M. Y. (2020). Study and optimization of surface roughness parameter during electrical discharge machining of titanium alloy (Ti-6246). *Materials Today: Proceedings*. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.10.785>

Thavorn, E., Pudwong, S., & Khammuang, K. (2014). A study of factors affecting on energy consumption in CNC milling machine of aluminum alloy 6063. *Naresuan University Engineering Journal (NUEL)*, 9(2), 33-37. <https://doi.org/10.14456/nuej.2014.3>

Utainarumol, S., & Chunumpan, W. (2010). Geographic information system (GIS) application for determining land acquisition valuation: a case study of expropriation by department of rural roads. *Naresuan University Engineering Journal (NUEL)*, 5(1), 43-50. <https://doi.org/10.14456/nuej.2010.10>

Naresuan University Engineering Journal (NUEL), 5(1), 43-50. <https://doi.org/10.14456/nuej.2010.10>

Wallace, W. L., & Xia, Y. L. (2014). *Delivering customer value through procurement and strategic sourcing: a professional guide to creating a sustainable supply network*. Pearson Education.

Wu, C. J., & Hamada, M. S. (2009). *Experiments: planning, analysis, and optimization* (2nd ed.). John Wiley & Sons.

Zellner, A., Keuzenkamp, H. A., & McAleer, M. (Eds.). (2001). *Simplicity, inference and modelling: keeping it sophisticatedly simple*. Cambridge University Press.

7. ประวัติผู้เขียน

ผศ.ดร. กิตติวัฒน์ สิริเกษมสุข



อาจารย์ประจำที่ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง งานสอน ได้แก่ การจัดการโซ่อุปทาน สถิติวิศวกรรม การวางแผนและควบคุมการผลิต การศึกษาการทำงาน เป็นต้น งานวิจัยที่สนใจพิเศษ คือ บูลวิปเอฟเฟคในห่วงโซ่อุปทาน และการออกแบบการทดลองด้านวิศวกรรม



รศ.ดร.ทศพล เกียรติเจริญผล

อาจารย์ประจำที่ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง งานวิจัยที่สนใจพิเศษ คือ โครงข่ายประสาทเทียม, การผลิตแบบลีน, วิศวกรรมคุณภาพ อีเมลติดต่อ คือ tossapol_k@yahoo.com



นางสาว อนุพ ไวยรูป

สำเร็จการศึกษาวิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เมื่อปี พ.ศ. 2563 ปัจจุบันทำงานเป็นวิศวกรฝ่ายการผลิตที่บริษัททางด้านอิเล็กทรอนิกส์และเคมีคอนดักเตอร์แห่งหนึ่ง



ดร.ทัตพล กุลวงศ์

ตำแหน่งที่ปรึกษาและวิทยากรอิสระ สังกัดบริษัท ฟอซพล คอร์ปอเรชั่น จำกัด งานวิจัยที่สนใจพิเศษ คือ วิศวกรรมความน่าเชื่อถือ และการซ่อมบำรุงรักษา อีเมลติดต่อ คือ tadponk@yahoo.com



อาจารย์ ลักสิริ ดรรชนีรัตน์

อาจารย์ประจำที่สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ และการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา งานวิจัยที่สนใจพิเศษ คือ การจัดการห่วงโซ่อุปทานอย่างยั่งยืน, การผลิตแบบลีน อีเมลติดต่อ คือ giffindor@yahoo.com