

NUEJ

NARESUAN

UNIVERSITY ENGINEERING JOURNAL

January - June 2020 Vol.15, No.1
ISSN : 2651-1568



กองบรรณาธิการวิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยนเรศวร

ที่ปรึกษา		
ศาสตราจารย์ ดร.สมชาย	วงศ์วิเศษ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ	แย้มเม่น	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.ศรินทร์ทิพย์	แทนธานี	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.อุรุยา	วีสกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
บรรณาธิการ		
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธนต์ย์	พุทพณม	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภูพงษ์	พงษ์เจริญ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองบรรณาธิการ		
รองศาสตราจารย์ ดร.สุวิทย์	กิริะวิทยา	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ดร.พิสุทธิ์	อภิขยกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ดร.ศลิษา	วีรพันธุ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยบรรณาธิการ		
ดร.จิรวดี	ผลประเสริฐ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ดร.สุรพล	เจริญสุข	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
กองบรรณาธิการ		
ศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์	จำนงไทย	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.ไพศาล	มณีสว่าง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ศาสตราจารย์ ดร.จันทพร	ผลากรกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ศาสตราจารย์ ดร.ประดิษฐ์	เทอดทูล	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

กองบรรณาธิการ		
ศาสตราจารย์ ดร.อินันท์	ธนชยานนท์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ศาสตราจารย์ ดร.พวงรัตน์	ขจิตวิษยานุกูล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ศาสตราจารย์ ดร.อิสระชัย	งามหุ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
Professor Christian	Hicks	Deputy Director, Professor of Operations Management Newcastle University United Kingdom,
รองศาสตราจารย์ ดร.กำชัย	นัยธิติกุล	สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และทรัพยากร มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
รองศาสตราจารย์ ดร.กุลยา	กนกจารุวิจิตร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
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.มัทนี	สงวนเสริมศรี	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.ยศชนัน	วงศ์สวัสดิ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.ลัญฉกร	วุฒิสัทติกุลกิจ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ ดร.วัชรินทร์	โพธิ์เงิน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.วัสสนัย	วรรณจรรย์ยา	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.วิระสิทธิ์	อิมถวิล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.สงวน	ปัทมธรรมกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.สถาพร	โกคา	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
รองศาสตราจารย์ ดร.สมบัติ	ชื่นชุกกลีน	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.สมร	หิรัญประดิษฐกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ	แย้มเม่น	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.ธันยดา	พรรณเชษฐ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชัย	ฤตวิรุฬห์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
Assoc.Prof.Dr. Vo Ngoc	Dieu	Ho Chi Minh City University of Technology Vietnam
รองศาสตราจารย์ ดร.พนัส	นัถฤทธิ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

กองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ เมธี	บุญพิเชฐวงศ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.แก้กัณยา	สุดประเสริฐ	คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พนมขวัญ	ริยะมงคล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปาจริย์	ทองสนิท	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภวรรณ	พลพิทักษ์ชัย	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมลักษณ์	วรรณกุล กิเยลาโรว่า	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร.สสิกรณณ์	เหลื่องวิชขเจริญ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ดร.นฤมล	สีพลไกร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ดร.ธณิกานต์	ธงชัย	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
Dr. Sasidharan	Sreedharan	University of Hawaii USA
Dr. Ivan	Lee	School of Information Technology and Mathematical Sciences University of South Australia

สารบัญ

Research Articles

Effect of Dye and NaCl Concentrations on Methylene Blue Dye Removal by Electrocoagulation Dang Trung Tri Trinh, Wilawan Khanitchaidecha, Thotsaphon Threrujirapapong, Auppatham Nakaruk.....	1
การวิเคราะห์ปัจจัยและการจัดเส้นทางสำหรับการเดินรถสาธารณะในจังหวัดอุบลราชธานี Analysis of Criteria and Public Transportation Routing in Ubonratchathani Province ชาญณรงค์ ภูวงควาริน, กสิณ รังสิกรรพุม Channarong Puchongkawarin, Kasin Ransikarbum	6
การศึกษาการปรับจูนสายอากาศโมโนโพลรูปทรงเรขาคณิตพื้นฐานที่ป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วมสำหรับการประยุกต์ใช้งานกับ แถบความถี่กว้างยิ่งยวด A Study of Tuning the CPW Fed Basic Geometric Monopole Antenna for UWB Applications วัชรพล นาคทอง, อำนวย เรืองวาริ, ธัชชัย พุ่มพวง Watcharaphon Nakton, Amnoiy Ruengwaree, Tajchai Pumpoung.....	17
การประยุกต์ใช้วิธีเชิงพันธุกรรมสำหรับการจัดตารางการผลิตระบบการผลิตแบบไหลเลื่อนผสม A Genetic Algorithm for Hybrid Flow Shop Scheduling สัจจิตา ทองเกิด, ชุศักดิ์ พรสิงห์ Sunjita Thongkerd, Choosak Pornsing.....	33
การตรวจจับและแจ้งเตือนอัตโนมัติของการล้มในห้องน้ำโดยเซนเซอร์อินฟราเรด Automatic Detection and Alert of Fall in a Restroom by Infrared Sensor กรกนก สาระนัน, นันทิยา ชัยบุตร Kornkanok Saranan, Nuntiya Chaiyabut.....	45
การประเมินความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการเบรก คุณสมบัติผ้าเบรก และตัวแปรในกระบวนการอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อน ด้วยเทคนิค การกระจายหน้าที่เชิงคุณภาพ Evaluation of Relationship Between Brake Performances, Properties of Brake Pad and Hot-Pressing Process Parameters by QFD Technique อนูธิดา มากมี, ประจวบ กล่อมจิตร Anutida Makmee, Prachuab Klomjit.....	54

สารบัญ

Research Articles

การประยุกต์ใช้เทคนิคการจำลองสถานการณ์แบบมอนติคาร์โลเพื่อจัดการอะไหล่สำหรับการบำรุงรักษาในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม
An Application of Monte Carlo Simulation Techniques to Spare Parts Managing Maintenance in Petroleum Industry

สุวรรณา พลภักดิ์, นิภาส ลีนะธรรม

Suwanna Ponpakdee, Nipas Leenatham.....66

Characterization of Native and Oxidized Cassava Starch Prepared Using a Solution Plasma Process

Nattha Klanarong, Samorn Hirunpraditkoon, Nagahiro Saito, Isarawut Prasertsung.....81

Review Articles

อดีต ปัจจุบัน และอนาคตของปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่พิจารณาประเด็นด้านสิ่งแวดล้อม
Green Vehicle Routing Problem: Past, Present and Future

ธนัชร สมใส, ภูพงษ์ พงษ์เจริญ

Thanatporn Somsai, Pupong Pongcharoen.....89

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 963951
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 ทั้งนี้วิศวกรรมสารรับตีพิมพ์ต้นฉบับผลงานทั้งในรูปแบบภาษาอังกฤษและภาษาไทย

นโยบาย

วิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยนเรศวร เป็นวารสารที่มีกระบวนการพิจารณาบทความประเภท Double-blind peer review จากผู้ทรงคุณวุฒิ 3 ท่าน เพื่อคัดสรรบทความที่มีคุณภาพลงตีพิมพ์ในวารสาร โดยมีกำหนดการออกเผยแพร่ปีละ 2 ฉบับ คือ ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม - มิถุนายน และฉบับ 2 เดือนกรกฎาคม - ธันวาคม สำหรับเงื่อนไขในการพิจารณาบทความ ทางกองบรรณาธิการของวารสารฯ จะพิจารณาเฉพาะผลงานที่ไม่เคยเสนอหรือกำลังเสนอเพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิชาการใดมาก่อน หากงานวิจัยใดมีความเกี่ยวข้องกับมนุษย์หรือสัตว์ทดลอง วารสารฯ จะรับพิจารณาเฉพาะบทความที่มีหลักฐานยืนยันว่าโครงการวิจัยดังกล่าวได้ผ่านการรับรองเชิงจริยธรรมจากคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์หรือสัตว์ทดลองแล้วเท่านั้น สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับมนุษย์ เจ้าของผลงานนิพนธ์ต้องแสดงให้เห็นว่าผู้เข้าร่วมการทดลองได้รับทราบข้อมูลและตัดสินใจเข้าร่วมการทดลองด้วยความสมัครใจ ทั้งนี้การอนุมัติให้ลงตีพิมพ์ขึ้นอยู่กับผลการพิจารณาจากกองบรรณาธิการวิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยนเรศวร ซึ่งถือเป็นขั้นสุดท้าย

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 0-5596-3951 โทรสาร 0-5596-4000
E-mail: nuej@nu.ac.th

Editor's Note

This is my first issue as Co-editor of this journal and I feel honored to be a part of this wonderful publication. Our journal has been approved to be in the first tier of the Thai-Journal Citation Index (TCI 1) since 2015 and recently it was approved for inclusion at that level for another five years. Our gratitude goes to all authors for their high quality work, and also to reviewers and other contributors who help make the journal successful. Looking to the future, we have set a goal to keep continuously improving. In a post-Coronavirus world, we would like to encourage all researchers to keep creating and inventing new knowledge and technologies to help our country--and the world--recover and thrive.

Asst. Prof. Dr.Sutanit Puttapanom

Editor

Naresuan University Engineering Journal

บทบรรณาธิการ

วิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยนเรศวร ได้จัดพิมพ์ขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่ผลงานวิชาการ ผลงานวิจัย และความก้าวหน้าใหม่ที่เกี่ยวข้องกับศาสตร์ทางวิศวกรรม โดยบทความทุกเรื่องได้ผ่านการพิจารณา กลั่นกรองจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้องจากหลายสถาบันการศึกษา ซึ่งวารสารปีที่ ๑๕ ฉบับที่ ๑ (มกราคม-มิถุนายน ๒๕๖๓) นี้ ได้รวบรวมบทความไว้อย่างน่าสนใจจำนวน ๙ ฉบับ ซึ่งมีหัวข้อโดยย่อ ดังนี้ Effect of Dye and NaCl Concentrations on Methylene Blue Dye การจัดเส้นทางสำหรับการเดินรถสาธารณะ การปรับปรุงสายอากาศโมโนโพลรูปทรงเรขาคณิตด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วม การจัดตารางการผลิตระบบการผลิตแบบไหลเลื่อนผสม เซนเซอร์ตรวจจับและแจ้งเตือนการล้นล้นอัตโนมัติ การประเมินความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพด้วยเทคนิคการกระจายหน้าที่เชิงคุณภาพ การจำลองสถานการณ์แบบมอนติคาร์โลในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม Characterization of native and oxidized cassava starch อดีต ปัจจุบันและอนาคตของปัญหา การจัดเส้นทางยานพาหนะที่พิจารณาประเด็นด้านสิ่งแวดล้อม

กองบรรณาธิการวารสารหวังเป็นอย่างยิ่งว่า วารสารฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้อ่านทั้งในทางวิชาการ และวิชาชีพต่อไป จึงขอขอบคุณคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิและทีมงานทุกฝ่าย ที่มีส่วนร่วมในการพัฒนาคุณภาพ และมาตรฐานของวารสารฯ ฉบับนี้ สุดท้ายนี้ขอขอบคุณผู้เขียนบทความ สมาชิกวารสารและผู้อ่านทุกท่าน ที่ได้ สนับสนุนและติดตามมาอย่างต่อเนื่อง และยินดีรับข้อเสนอแนะเพื่อการปรับปรุงวารสารให้มีคุณภาพยิ่งขึ้นต่อไป

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภูพงษ์ พงษ์เจริญ

บรรณาธิการ

วิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยนเรศวร

Editorial announcement

To improve the quality of the Naresuan University Engineering Journal (NUEJ), the editorial team has updated and revised the Journal Website, Manuscript Template, and Online Submission Form. The preferred language for both manuscript and submission is English. Manuscripts in Thai are acceptable but not encouraged. All submission processes can be done online. Starting July 1st, 2020, to be considered for acceptance, submitted manuscripts must follow the format of the Manuscript Template provided on the Journal Website.

ประกาศจากกองบรรณาธิการ

เนื่องจาก วิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยนเรศวร (Naresuan University Engineering Journal, NUEJ) มีความประสงค์จะพัฒนาคุณภาพของวารสารเพื่อก้าวเข้าสู่ระดับสากล และเตรียมความพร้อมเพื่อเข้ารับการประเมินฐานข้อมูลอาเซียน ASEAN Citation Index (ACI) ในการนี้จึงได้ดำเนินการปรับปรุงเนื้อหาในเว็บไซต์ รูปแบบการเขียนบทความเพื่อลงตีพิมพ์ แบบฟอร์มที่ใช้ในการส่งบทความ และบทความภาษาอังกฤษจะถูกเลือกพิจารณาก่อนบทความภาษาไทย การส่งบทความสามารถจัดส่งแบบออนไลน์

ตั้งแต่ 1 กรกฎาคม พ.ศ. 2563 เป็นต้นไป บทความที่ส่งให้กับทางกองบรรณาธิการจะต้องใช้รูปแบบการเขียนบทความเพื่อลงตีพิมพ์ซึ่งแสดงอยู่ในเว็บไซต์ของวารสารนี้เท่านั้น

Effect of Dye and NaCl Concentrations on Methylene Blue Dye Removal by Electrocoagulation

Dang Trung Tri Trinh^{1, 2}, Wilawan Khanitchaidecha^{1, 2*}, Thotsaphon Threrujirapapong³, Auppatham Nakaruk^{2, 4}

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

²Centre of Excellence for Innovation and Technology for Water Treatment, Faculty of Engineering, Naresuan University

³Department of Materials and Production Technology Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

⁴Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Naresuan University

*Corresponding author e-mail: wilawank1@gmail.com

(Received: 21 February 2020, Revised: 18 March 2020, Accepted: 1 June 2020)

Abstract

This study investigated the influence of two significant operating factors of dye and NaCl concentrations on dye removal efficiency by electrocoagulation (EC) process. The methylene blue (MB) was represented dye molecule containing in the wastewater, whereas the NaCl was playing a role as electrical conductivity for promoting chemical reactions. The initial concentrations of MB and NaCl were varied from 3 to 60 mg/L and 0.10 to 1.00 g/L respectively to find the best condition for dye removal. The results revealed that the maximal dye removal of 91% was observed at MB concentration of 45 mg/L and NaCl of 0.50 g/L. The higher dye concentration (i.e., 60 mg/L) and lower dye concentration (i.e., 3, 15 and 30 mg/L) were affected on decreasing the dye removal. Similarly, the higher NaCl concentration (i.e., 0.75 and 1.00 g/L) and lower NaCl concentration (i.e., 0.10 and 0.25 g/L) had negative impacts on dye removal. Furthermore, the actual batik wastewater was preliminary treated by EC process; the COD was decreased from 3720 mg/L in the initial concentration to 320 mg/L after 60 min. In addition, the dye removal by EC process can be enhanced by controlling other parameters such as submerged surface area, applied current density and pH which will be further studied prior to imply as treatment process for textile industry.

Keywords: Electrocoagulation process, dye wastewater, NaCl concentration.

1. INTRODUCTION

At the present, the removal of dye molecule from textile wastewater has been considered as one of the major issues which received the increasing attention from global viewpoints (de Carvalho et al., 2005). The wastewater containing high dye concentration is widely produced from many industries such as textile, leather, paper, printing and photographs. Among those industries, the textile industry consumed a considerable quantity of dyes and generated the wastewater containing high color, suspended particles, high chemical oxygen demand (COD) and pH (Mahmoud et al., 2013; Mollah et al., 2004). In addition, approximately 15% of dye was lost during dyeing process and discharged as contaminated water into aqueous environment (Daneshvar et al., 2006). The existence of dye in the aqueous environment can cause aesthetical trouble (even at low concentration of 1 mg/L) (Mohammed et al., 2014), reduction of photosynthesis and gas solubility. Furthermore, a natural biochemical process can change dye molecule to other dangerous by-products which were toxic, carcinogenic or even destroy aquatic species (Mohammed et al., 2014; Daneshvar et al., 2003).

Several technologies have been used for dye wastewater treatment including biological process (e.g., activated sludge, sequencing batch reactor; SBR, bio-filter), chemical oxidation (e.g., fenton/like-fenton, hypochlorite), electrochemical oxidation (e.g., O₃/UV, O₃/H₂O₂, O₃/UV/H₂O₂, H₂O₂/UV), photodegradation (e.g., TiO₂/UV, photo-fenton), adsorption (e.g., activated carbon), membrane filtration (e.g., microfiltration, ultrafiltration, nanofiltration) and chemical coagulation/flocculation (e.g., aluminium, iron or calcium salts) (Zidane et al., 2008). Although the biological process was considered as a low cost technique, most of dye molecules are toxic and resistant to bacterial growth at high concentration (Daneshvar et al., 2006; Raghu & Basha, 2007). Meanwhile, the chemical and photo oxidation process was required a lot of chemical addition, which may cause further environmental problems (Yari et al., 2013). The other advanced technologies were limited on high operating cost (Mountassir et al., 2015), which was the most concerning parameter for actual wastewater treatment application.

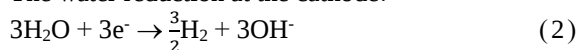
The electrocoagulation (EC) method has been developed as a promising technology in removing very

polluted wastewater in recent years. The spent coolant with initial COD of 122 g/L was pre-treated by modified EC reactor using Al electrode; the 65% of COD removal was achieved (Pantorlawn et al., 2018). The tannery wastewater was also treated by a combined system of EC and biological fungal; the efficient COD and Cr^{6+} removals were 96% and 97% respectively (Deveci et al., 2019). The principle of this technology is based on the electrochemical dissolution of metal electrode into wastewater that improves the efficiency of coagulation, adsorption and precipitation of pollutants by using a direct current source (Bani-Melhem & Smith, 2012). Iron and aluminium are two typical types of electrodes which have been widely used in EC systems. The aluminium electrode has been demonstrated to be cheap and effective material for the EC process (Thirugnanasambandham et al., 2015). The main reactions at aluminium electrode occurs as follows: Dalvand et al. (2011).

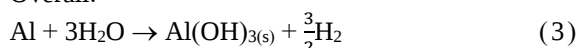
The aluminium oxidation at the anode:



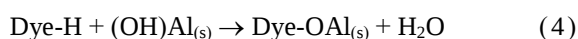
The water reduction at the cathode:



Overall:



These reactions produce monomeric and polymeric species of aluminium hydroxide (i.e., $\text{Al}(\text{OH})_3$) that remove pollutants by complexation and electrostatic attraction. In complexation, pollutants such as dye act as ligand to bind hydrous aluminium by the following reaction:



Meanwhile, the positive and negative charge iron/aluminium oxide particles attract the opposite charge species in electrostatic attraction (Golder et al., 2005). Besides the efficiency, this technique was also known well by its easy operation, simple equipment and small amount of sludge generation (Bayramoglu et al., 2007). However, an electrical conductivity in the wastewater was a significantly factor for effective dye removal. Similarly, dye molecule structure and its concentration were concerning factors. The aim of this study was that a methylene blue (MB) which is positive charge blue dye was removed by EC process using aluminium electrode. The experiments were set to investigate the effect of initial dye and NaCl (related to electrical conductivity) concentrations. Later, the actual dye wastewater from a batik company was preliminary tested.

2. MATERIAL AND METHODS

2.1 Electrocoagulation (EC) reactor

The experimental set up used in this study consists of a 200 ml acrylic reactor. The four electrodes of aluminium were connected in a bipolar mode with dimensions of 10 cm (length) x 4.5 cm (width) x 0.01 cm (thick), and were placed at a distance of 1.5 cm from the bottom of reactor. The submerged surface area was approximately 160 cm^2 . The electrodes were connected to direct current power supply (DeltaPSU, PMT-5V350W1AM) with 5 V as maximal tension and 60 A as maximal intensity. The schematic of EC reactor is presented in Figure 1

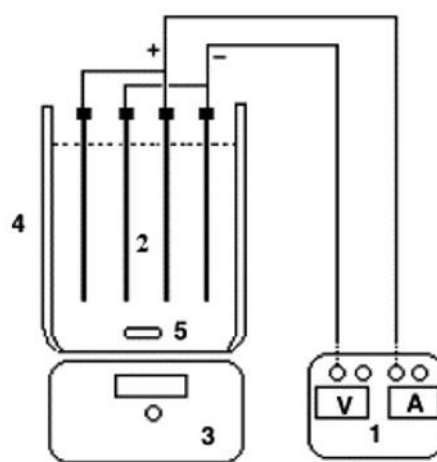


Figure 1 Schematic of electrocoagulation reactor; (1) power supply, (2) aluminium electrodes (1 cm of interelectrode distance), (3) magnetic stirrer, (4) acrylic reactor and (5) magnetic bar

2.2 Preparation of dye wastewater

Synthetic wastewater was prepared by mixing an appropriate amount of methylene blue (MB) into deionized water. The MB was purchased from Ajax Finechem Pty Ltd as purified agent. The chemical structure of the hydrolyzed form of this dye is present in Figure 2.

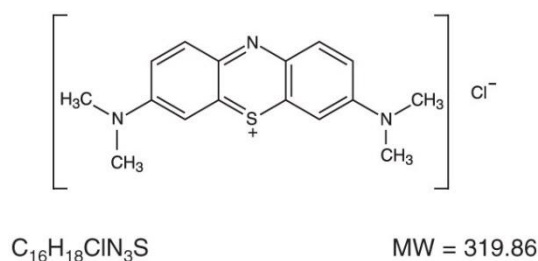


Figure 2 Chemical structure of methylene blue

2.3 Experiments

The experimental EC reactor was conducted with 200 mL of MB solution and stirred at 200 rpm. All experiments were carried out at room temperature (~25 °C). The sample was collected every 10 minutes and then centrifuged at 5,000 rpm for 10 min. Subsequently, the collected sample was measured the absorbance spectra (Abs) at a wavelength of 664 nm by UV-6100 Double Beam spectrophotometer (Shanghai Mapada Instruments Co., Ltd). The percentage of MB removal was determined according to the following equation:

$$\text{Dye removal (\%)} = \frac{\text{Abs}_0 - \text{Abs}_t}{\text{Abs}_0} \times 100 \quad (5)$$

Where Abs_0 = Initial absorbance intensity.
 Abs_t = Absorbance intensity at time t.

When the batik wastewater was tested by EC process, the COD value was measured in accordance with the standard method for the examination of water and wastewater (American Public Health Association, 1995). The COD removal efficiency was calculated in the below equation:

$$\text{COD removal (\%)} = \frac{\text{COD}_0 - \text{COD}_t}{\text{COD}_0} \times 100 \quad (6)$$

Where COD_0 = Initial COD concentration.
 COD_t = COD concentration at time t.

In the experiment 1, the MB concentration was varied from 3 to 60 mg/L, while the NaCl were controlled at 0.5 g/L. In the experiment 2, the NaCl concentration was varied from 0.10 to 1.00 g/L, whereas the MB concentration was kept at the best condition from the experiment 1. In the last experiment, the actual batik wastewater was tested for 60 min, as summarized in Table 1. The MB and batik wastewater were treated by EC process without pH adjustment; the initial pH was in the range of 8-9. The applied current density was constant at 20 mA/cm² for all experiments.

Table 1 Various experimental parameters in this study

Experiment	Wastewater source and concentration	NaCl concentration	Time
1	MB 3, 15, 30, 45 and 60 mg/L	0.50 g/L	10, 20, 30, 40, 50 and 60 min
2	MB 45 mg/L	0.10, 0.25, 0.50, 0.75 and 1.00 g/L	60 min
3	Batik wastewater	0.50 g/L	60 min

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Effect of initial MB concentration

The experiment was carried out for five different MB concentrations of 3, 15, 30, 45 and 60 mg/L for 60 min. The NaCl and current density were constant of 0.5 g/L

(conductivity was ~ 1 mS/cm) and 20 mA/cm². Figure 3 shows that the dye removal by EC process was increased gradually by electrolysis times. At the lowest MB concentration of 3 mg/L, the dye removal achieved 31% at 10 min and approximately 75% at 60 min.

At increasing MB concentrations, the maximal dye removal was increased to 84%, 89% and 91% at 60 min for MB concentration of 15, 30 and 45 mg/L respectively. However, the maximal dye removal was dropped to 83% at the highest MB concentration of 60 mg/L. This is because the amounts of coagulant ($\text{Al}(\text{OH})_3$) were constant at the fixed current density. The produced coagulant adsorbed the MB molecule until the maximal adsorption capacity was reached. Later, the produced coagulant was insufficient to adsorb MB molecule at the very high concentration, resulting in the decrease in dye removal finally (Mahmoud et al., 2013). According to this experiment, the effective dye removal by EC process could not achieve at the low MB concentration, therefore the EC process was an appropriate treatment process for high pollutants concentration. The best dye removal efficiency was observed at the MB concentration of 45 mg/L, therefore this concentration value was used as a controlled factor in the next experiment.

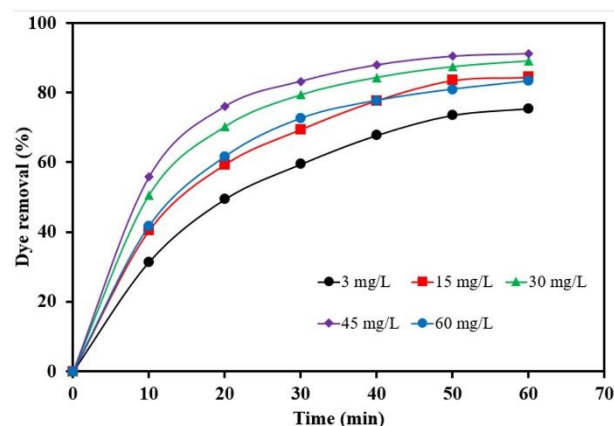


Figure 3 Effect of initial MB concentration on the removal efficiency (NaCl 0.5 g/L)

3.2 Effect of NaCl concentration

The experiment was carried out for five different NaCl concentrations of 0.10, 0.25, 0.50, 0.75 and 1.00 g/L, which referred to different electrical conductivity. The initial MB and current density were controlled at 45 mg/L and 20 mA/cm². As shown in Figure 4, the dye removal was increased by electrolysis times and NaCl concentrations. The maximal dye removal was observed at 60 min; the dye removal was 83%, 89% and 91% for NaCl 0.10, 0.25 and 0.50 g/L respectively. However, the excessive NaCl of 0.75 and 1.00 g/L caused a reduction of dye removal to 87% and 81%. The explanation was that the excessive NaCl and electrical conductivity caused the overconsumption of aluminium electrodes, and resulted in the irregular dissolution (Calvo et al., 2003). Furthermore, the high NaCl and electrical

conductivity caused the increase in electron transportation rate in the MB solution, resulting in the decreasing reaction time and subsequently the decreasing dye removal. According to this experiment, the optimal NaCl was 0.5 g/L for effective MB dye removal.

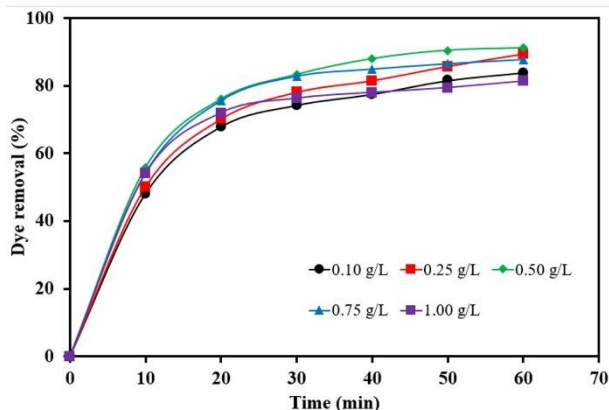


Figure 4 Effect of NaCl concentration on the removal efficiency (MB 45 mg/L)

The actual batik wastewater was preliminary treated by EC process. The appearance wastewater was dark blue and chemical smell. The wastewater with initial COD of 3,720 mg/L was tested under NaCl of 0.5 g/L, and the results are shown in Figure 5. The COD removal was 67% at 10 min and reached 91% at 60 min. The final COD was decreased to only 320 mg/L. The comparison of batik wastewater before and after treatment is shown in Figure 6. It can be seen that the excellent removal efficiency was also found in the actual wastewater, even though the pollutants concentration was higher rather than the synthetic MB solution. This is because the particular characteristic of batik wastewater such as conductivity, pH, ions and biodegradable compounds effected on enhancing the EC process. The further study on effect of other operating factors on enhancing the EC process is necessary and clarified before applying this technology to dye and textile industry.

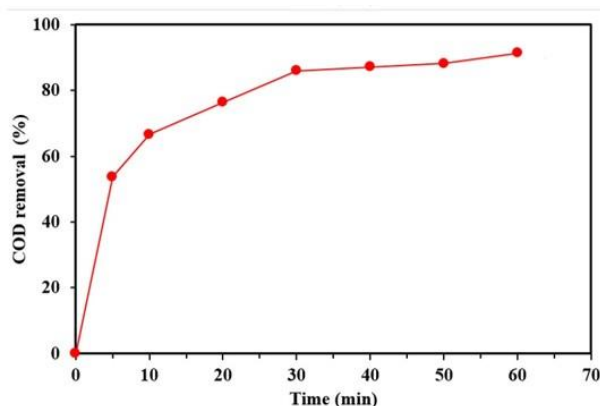


Figure 5 Actual batik wastewater treatment by EC process; (a) effluent COD and (b) COD removal efficiency (NaCl 0.5 g/L)

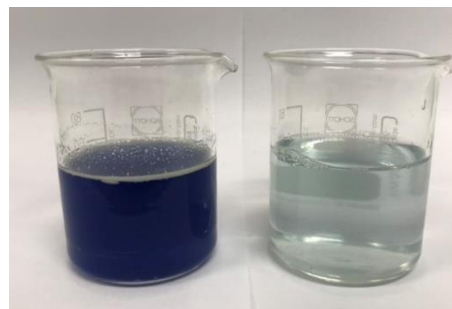


Figure 6 Actual batik wastewater treatment before and after treatment by EC process (NaCl 0.50 g/L, time 60 min)

4. CONCLUSION

The EC process was a potential treatment process for dye removal. The maximal dye removal of 91% was observed at the optimal concentration of MB and NaCl, which were 45 mg/L and 0.5 g/L respectively. The excessive and insufficient MB and NaCl could cause the decreasing dye removal. When the actual batik wastewater containing initial COD of 3,720 mg/L was tested, the COD removal reached 91% at 60 min and the final COD was only 320 mg/L.

5. REFERENCES

- de Carvalho, H. P., Huang, J., Zhao, M., Liu, G., Dong, L., & Liu, X. (2015). Improvement of methylene blue removal by electrocoagulation/ banana peel adsorption coupling in a batch system. *Alexandria Engineering Journal*, 54(3), 777-786.
- Mahmoud, M. S., Farah, J. Y., & Farrag, T. E. (2013). Enhanced removal of methylene blue by electrocoagulation using iron electrodes. *Egyptian Journal of Petroleum*, 22(1), 211-216.
- Mollah, M. Y. A., Pathak, S. R., Patil, P. K., Vayuvegula, M., Agrawal, T. S., Gomes, J. A. G., Kesmez, M., & Cocke, D. L. (2004). Treatment of orange II azo- dye by electrocoagulation (EC) technique in a continuous flow cell using sacrificial iron electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, 109(1), 165-171.
- Daneshvar, N., Oladegaragoze, A., & Djafarzadeh, N. (2006). Decolorization of basic dye solutions by electrocoagulation: An investigation of the effect of operational parameters. *Journal of Hazardous Materials*, 129(1), 116-122.
- Mohammed, G. R., Zewail, T. M., & El-Tawail, Y. A. (2014). Investigation of color removal from methylene blue containing solutions by electrocoagulation/ flotation in a batch- agitated electrochemical reactor. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 33(2), 369-377.
- Daneshvar, N., Ashassi-Sorkhabi, H., & Tizpar, A. (2003). Decolorization of orange II by electrocoagulation method. *Separation and Purification Technology*, 31(2), 153-162.
- Zidane, F., Drogui, P., Lekhlif, B., Bensaid, J., Blais, J., Belcadi, S., & Kacemi, K.E. (2008). Decolourization of dye-containing effluent using mineral coagulants produced by electrocoagulation. *Journal of Hazardous Materials*, 155(1), 153-163.

- Raghu, S., & Basha, C. A. (2007). Chemical or electrochemical techniques, followed by ion exchange, for recycle of textile dye wastewater. *Journal of Hazardous Materials*, 149(2), 324-330.
- Yari, A. R., Alizadeh, M., Hashemi, S., & Biglari, H. (2013). Efficiency of Electrocoagulation for Removal of Reactive Yellow 14 from Aqueous Environments. *Archives of Hygiene Sciences*, 2(1), 7-15.
- Mountassir, Y., Benyaich, A., Berçot, P., & Rezzazi, M. (2015). Potential use of clay in electrocoagulation process of textile wastewater: Treatment performance and flocs characterization. *Journal of Environmental Chemical Engineering Part A*, 3(4), 2900-2908.
- Pantorlawn, W., Threrujirapapong, T., Khanitchaidecha, W., Channei, D., & Nakaruk, A. (2018). Electrocoagulation for spent coolant from machinery industry. *Journal of Water Reuse and Desalination*, 8(4), 497-506.
- Deveci, E. Ü., Akarsu, C., Gönen, Ç., & Özay Y. (2019). Enhancing treatability of tannery wastewater by integrated process of electrocoagulation and fungal via using RSM in an economic perspective. *Process Biochemistry*, 84, 124-133.
- Bani-Melhem, K., & Smith, E. (2012). Grey water treatment by a continuous process of an electrocoagulation unit and a submerged membrane bioreactor system. *Chemical Engineering Journal*, 198-199, 201-210.
- Thirugnanasambandham, K. , Sivakumar, V. , & Maran, J. P. (2015) . Optimization of process parameters in electrocoagulation treating chicken industry wastewater to recover hydrogen gas with pollutant reduction. *Renewable Energy*, 80, 101-108.
- Dalvand, A. , Gholami, M. , Joneidi, A. , & Mahmoodi, N. M. (2011). Dye removal, energy consumption and operating cost of electrocoagulation of textile wastewater as a clean process. *CLEAN – Soil, Air, Water*, 39(7), 665-672.
- Golder, A. K., Hridaya, N., Samanta, A. N., & Ray, S. (2005). Electrocoagulation of methylene blue and eosin yellowish using mild steel electrodes. *Journal of Hazardous Materials*, 127(1), 134-140.
- Bayramoglu, M., Eyvaz, M., & Kobya, M. (2007). Treatment of the textile wastewater by electrocoagulation: Economical evaluation. *Chemical Engineering Journal*, 128(2), 155-161.
- American Public Health Association (1995). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (19th ed.). Springfield.
- Calvo, L. S., Leclerc, J., Tanguy, G., Cames, M. C., Paternotte, G., Valentin, G., Rostam, A., & Lapique, F. (2003). An electrocoagulation unit for the purification of soluble oil wastes of high COD. *Environmental Progress*, 22(1), 57-65.

การวิเคราะห์ปัจจัยและการจัดเส้นทางสำหรับการเดินรถสาธารณะในจังหวัดอุบลราชธานี Analysis of Criteria and Public Transportation Routing in Ubonratchathani Province

ชาญณรงค์ ภูชงควาริน¹, กสิณ รังสิกรรพุม^{2*}
Channarong Puchongkawarin¹, Kasin Ransikarbum^{2*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

²ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

¹Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Ubonratchathani University

²Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Ubonratchathani University

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

(Received: 2 March 2019, Revised: 15 January 2020, Accepted: 4 February 2020)

บทคัดย่อ

จังหวัดอุบลราชธานีมีการใช้รถสองแถวในการขนส่งสาธารณะ และมีแนวความคิดในการใช้รถโดยสารประจำทางไฟฟ้ามาเป็นทางเลือกในการขนส่งสาธารณะของจังหวัดด้วย ดังนั้นงานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการให้บริการของระบบขนส่งสาธารณะซึ่งมีหลากหลายรูปแบบ โดยทำการศึกษาสองประเด็นหลัก ๆ สำหรับกรณีศึกษาของจังหวัดอุบลราชธานี คือ 1) ศึกษาความพึงพอใจของการใช้รถโดยสารสาธารณะจากผู้โดยสารในปัจจุบันโดยใช้แบบสอบถามโดยวิเคราะห์กลุ่มตัวอย่างผู้โดยสารในจังหวัดอุบลราชธานีจำนวน 230 ตัวอย่าง จากนั้นทำการวิเคราะห์ผลด้วยเทคนิควิธีการวิจัยแบบผสม โดยพบว่ากลุ่มตัวอย่างผู้โดยสารต้องการให้พัฒนามากที่สุดคือเรื่องเวลาเดินทางที่แน่นอนสำหรับรถโดยสารสาธารณะปัจจุบัน (28.10%) 2) ทำการวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อปัจจัยด้าน การขนส่งรถโดยสารสาธารณะ และทางเลือกที่ดีที่สุดสำหรับรถโดยสารสาธารณะแต่ละแบบโดยใช้เทคนิคกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์สำหรับกลุ่มตัวอย่างเฉพาะ โดยพบว่าทางเลือกโดยรถโดยสารประจำทางไฟฟ้าเป็นหนึ่งในทางเลือกที่เป็นไปได้ด้วยค่าถ่วงน้ำหนัก 0.23 และ 3) ศึกษาการจัดเส้นทางเดินรถโดยสารสาธารณะโดยใช้เทคนิคการหาคำตอบที่ดีที่สุด ภายใต้เวลาที่จำกัดเมื่อจุดเริ่มต้นกับจุดสิ้นสุดไม่ใช่จุดเดียวกัน โดยประยุกต์ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของปัญหาการเดินทางของคนขาย ผลการศึกษาพบว่าเทคนิคนี้สามารถใช้จัดเส้นทางสำหรับรถโดยสารประจำทางไฟฟ้าของจังหวัดอุบลราชธานีเพื่อเป็นแนวทางเชิงนโยบายให้กับผู้เกี่ยวข้องต่อไป โดยระบบที่พัฒนาขึ้นจากเครื่องมือต่าง ๆ ข้างต้น สามารถนำไปใช้ในการตัดสินใจและในการวิเคราะห์การจัดเส้นทางเดินรถสาธารณะสำหรับเส้นทางอื่นๆ ในจังหวัดอุบลราชธานีเอง และสำหรับจังหวัดอื่นๆ เช่นกัน

คำสำคัญ: ระบบช่วยตัดสินใจ วิธีการวิจัยแบบผสม กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ ปัญหาการเดินทางของคนขาย การจัดเส้นทางเดินรถ

Abstract

Ubonratchathani province is currently using a minibus as one of the services and plans to adopt an electric bus for the future public transportation. Thus, this research aims to analyze the public transportation in Ubonratchathani province as a case study by focusing on three key aspects 1) An analysis of satisfaction levels for commuters using the current public transportation and related transportation decisions using questionnaires. The sample data were collected from 230 passengers and analyzed using mixed methods research. The main concern from a logistical aspect accounting for 28.10% is related to the certain arrival and departure time schedule of the minibus. 2) An analysis of logistical factors and alternatives using Analytic Hierarchy Process (AHP) approach for the selected focus group. We found that the electric bus is the best alternative that could be further used with weighted score of 0.23. 3) An analysis of the optimal public transportation routes using mathematical optimization. We used the surveyed data related to preferred locations for the transit to analyze the shortest path/ route using the so-called Traveling Salesman Problem (TSP) under limited travel time, in which the starting and ending points

were not necessarily the same. We then suggest future routes for possible future routes for an electric bus in Ubonratchathani province. The developed system based on the above tools can be used to aid decision makings and analyze other public transportation routings not only for Ubonratchathani province, but also for other provinces as well.

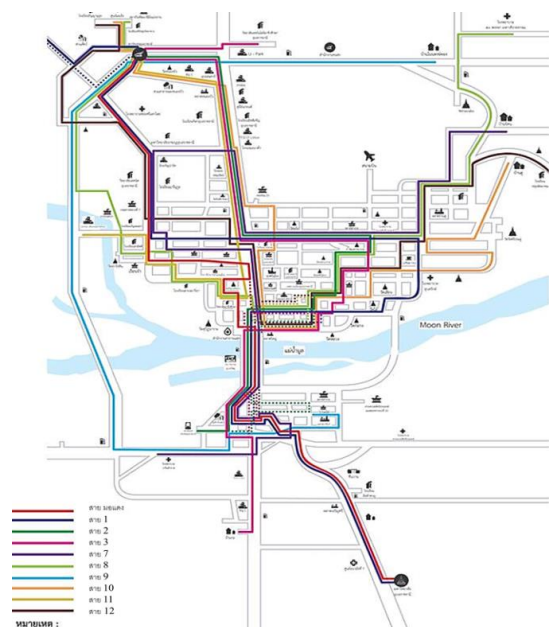
Keywords: Decision support system, Mixed methods research, Analytic hierarchy process, Travelling salesman problem, Transportation routing

1. บทนำและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

การให้บริการของระบบรถโดยสารสาธารณะในปัจจุบันมีหลากหลายรูปแบบ โดยการเลือกกระบวนรถโดยสารสาธารณะให้เหมาะกับแต่ละชุมชนยังมีส่วนส่งเสริมการใช้รถสาธารณะให้มากขึ้นด้วย ทั้งนี้การจัดการรถโดยสารสาธารณะเป็นการจัดการการขนส่งรูปแบบหนึ่งในระบบการจัดการโลจิสติกส์ที่มีความหลากหลายทั้งเรื่องของประเภทรูปแบบพาหนะที่ใช้รูปแบบการให้บริการ (Office of Transport and Traffic Policy and Planning, 2016; Piriawat, 2014; Department of Land Transport, 2011; Department of Land Transport Planning Division, 2018; Douglas et al., 2004) โดยจังหวัดอุบลราชธานีเองถือเป็นเมืองที่มีความเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วในหลายๆ ด้าน รวมถึงเป็นศูนย์กลางทางระบบโลจิสติกส์ (OSM, 2020; Energy Time Online, 2018) โดยทางจังหวัดอุบลราชธานีมีแผนในการพัฒนาจังหวัดภายใต้โครงการพัฒนาเมืองอัจฉริยะ (Smart City) ซึ่งเป็นโครงการนำร่องที่กำลังใช้ในจังหวัดขอนแก่นและในหลายๆ จังหวัด เพื่อมาช่วยจัดการแก้ปัญหาทางด้านการขนส่งอย่างมีประสิทธิภาพและคล่องตัว สืบเนื่องมาจากการสนับสนุนของกระทรวงพลังงานซึ่งมีนโยบายที่จะส่งเสริมให้การพัฒนาเมืองอัจฉริยะ 4 ด้านนั้นคือด้านพลังงานและสาธารณูปโภคพื้นฐานด้วยระบบไฟฟ้า; ด้านผังเมืองและการขนส่งให้สามารถให้บริการระบบขนส่งมวลชนภายในเมืองของตนเองด้วยพลังงานสะอาด; ด้านชุมชนเมืองสิ่งแวดล้อม และการท่องเที่ยว; และด้านการบริหารจัดการเมืองโดยใช้เทคโนโลยีดิจิทัลมาช่วย (TSC Media, 2018; Ponlakthong, 2012; Apipratyasakul, 2004; Athikhomratanakul, 2008; Thansettakij, 2019; Guideubon, 2018) โดยเมื่อศึกษาบริเวณที่ตั้งของมหาวิทยาลัยอุบลราชธานีและบริเวณเขตตัวเมืองโดยรอบพบว่าในปัจจุบันมีการใช้ระบบรถโดยสารสาธารณะโดยหนึ่งในนั้นคือรถสองแถวเอกชนในส่วนเชื่อมต่อบริเวณอุบลราชธานี-วารินชำราบ เพื่อรองรับความต้องการของผู้โดยสาร ดังแสดงในรูปที่ 1

สำหรับรถยนต์ไฟฟ้า (Electric Vehicle) รวมถึงรถโดยสารประจำทางไฟฟ้า (Electric Bus) เอง มีข้อดี เช่นเรื่อง

ของการลดมลภาวะทั้งทางอากาศและทางเสียง ช่วยในการแก้ปัญหาจราจรและปัญหาราคาน้ำมันที่สูงขึ้น รวมถึงมีความสะดวกและมีประสิทธิภาพในการเป็นทางเลือกในการใช้เป็นพาหนะเชื่อมต่อกับจุดขนส่งใหญ่ๆ ต่อไป ซึ่งมีการรายงานการใช้งานในหลายๆ ประเทศ โดยพื้นที่กลุ่มตลาดหลักของรถไฟฟ้าที่มากที่สุดคือ จีน อเมริกา นอร์เวย์ อังกฤษ ฝรั่งเศส และญี่ปุ่น ตามลำดับ (Global EV Outlook, 2017) สำหรับประเทศไทยเอง แม้จะได้เริ่มมีการใช้งานรถยนต์ไฟฟ้าบ้าง แต่ยังจำกัดเฉพาะในระดับองค์กร หรือเป็นแนวทางการวิจัยเพื่อหาแนวทางในการพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานต่างๆ ซึ่งมีหน่วยงานต่างๆ ให้ความสนใจ เช่นการไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) การปิโตรเลียมแห่งประเทศไทย (ปตท.) (Ministry of Energy, 2015; Peeratanon & Nuthavorn, 2015; Wang, 1986)



รูปที่ 1 แสดงเส้นทางการเดินรถสองแถวในเขตตัวเมืองอุบลราชธานี-วารินชำราบ (ปรับใช้จาก VeryUBON, 2018)

ทั้งนี้ม้งงานวิจัยต่างๆ ที่ศึกษาโดยใช้เครื่องมือทางด้านการพัฒนาระบบช่วยในการตัดสินใจ (Decision Support System

– DSS) การใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytic Hierarchy Process – AHP) ปัญหาการเดินทางของคนขาย (Travelling Salesman Problem – TSP) และการจัดเส้นทางการเดินทาง ซึ่งได้มีการใช้ในงานวิจัยนี้ยกตัวอย่างเช่น Cioca and Filip (2015) ได้แนะนำว่าการประยุกต์ใช้ระบบ DSS เป็นการใช้ระบบข้อมูลเพื่อสนับสนุนกิจกรรมต่างๆ ทางด้านธุรกิจ และการตัดสินใจในระดับองค์กร โดยระบบ DSS บางส่วนอาจอยู่ในรูปแบบของการใช้การพัฒนาเว็บไซต์ประกอบ Aqel (2019)

ในส่วนของการวิจัยที่ใช้ AHP มีหลากหลายการใช้งาน (Ransikarbum, 2017) เช่นการวิเคราะห์ปัญหาทางด้านการผลิตแบบเทคนิค 3D printing (Ransikarbum & Kim, 2017) การวิเคราะห์โลจิสติกส์เพื่อการท่องเที่ยว (Ransikarbum, 2018) และการวิเคราะห์การกำจัดขยะติดเชื้อ (Suksi et al., 2018) เป็นต้น นอกจากนี้ Ransikarbum and Mason (2016a; 2016b) ทำการศึกษาปัญหาการจัดการเส้นทาง (Routing) โดยประยุกต์ปัญหาในช่วงการเกิดภัยพิบัติ เป็นต้น อย่างไรก็ตามงานวิจัยที่ทำการศึกษเกี่ยวกับปัญหาการจัดการเส้นทางการเดินทางสาธารณะ โดยวิเคราะห์ร่วมกับเครื่องมือการทำการตัดสินใจแบบหลายปัจจัย ยังมีอยู่จำกัด ซึ่งควรมีการบูรณาการเครื่องมือต่างๆ เข้าด้วยกันในการวิเคราะห์ปัญหาอย่างเป็นระบบ (Vaidya & Kumar, 2006; Ho, 2008) โดยทำการวิเคราะห์ปัจจัยและรูปแบบการจัดเส้นทางสำหรับการเดินทางสาธารณะอย่างเป็นระบบ เพื่อเป็นแนวทางในการต่อยอดการพัฒนากระบวนการช่วยในการตัดสินใจ สำหรับผู้วิเคราะห์นโยบายในการเปิดเส้นทางใหม่สำหรับการเดินทางสาธารณะ โดยคำนึงถึงความต้องการด้านเวลาและเส้นทางของผู้ใช้บริการจริง

1. วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

1. เพื่อวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการใช้บริการการเดินทางสาธารณะและทางเลือกที่ดีที่สุดสำหรับรถโดยสารสาธารณะแต่ละแบบโดยใช้เทคนิคกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (AHP)

2. เพื่อวิเคราะห์โลจิสติกส์ในส่วนของปัญหาการจัดการเส้นทางโดยสารสาธารณะโดยใช้เทคนิคการหาคำตอบที่ดีที่สุด ภายใต้เวลาที่จำกัดเมื่อจุดเริ่มต้นกับจุดสิ้นสุดไม่ซ้ำจุดเดียวกัน จากแบบจำลองปัญหาการเดินทางของคนขาย (TSP)

2. วิธีดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์ปัจจัยและรูปแบบการจัดเส้นทางสำหรับการเดินทางสาธารณะอย่างเป็นระบบ โดยใช้เครื่องมือหลักในการวิเคราะห์ปัญหาการจัดการเส้นทางการเดินทางสาธารณะในจังหวัดอุบลราชธานีโดยเริ่มจากการศึกษาความพึงพอใจของการใช้รถโดยสารสาธารณะจากผู้โดยสารในปัจจุบัน

โดยพัฒนาแบบสอบถามและการวิเคราะห์ผลด้วยเทคนิควิธีการวิจัยแบบผสม จากนั้นทำการวิเคราะห์ปัจจัยด้วยกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (AHP) และนำผลที่ได้มาสร้างเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของปัญหาการเดินทางของคนขาย เพื่อแนะนำเส้นทางการเดินทางที่เหมาะสม ซึ่งอธิบายได้ดังนี้

2.1 การวิเคราะห์การวิจัยแบบผสม (Mixed Methods Research)

งานวิจัยนี้ใช้การวิเคราะห์ข้อมูลด้วยวิธีการวิจัยแบบผสม (Mixed Methods Research) ซึ่งเป็นการเก็บและวิเคราะห์ข้อมูลทั้งแบบเชิงปริมาณ (Quantitative) และเชิงคุณภาพ (Qualitative) ทั้งนี้วิธีการวิจัยแบบผสมใช้หลักการการผสมผสานการวิเคราะห์ของข้อมูล โดยอาจผสมผสานในช่วงที่มีการเก็บข้อมูล (Data Collection) และ/หรือ ช่วงที่มีการวิเคราะห์ข้อมูล (Data Analysis) โดยตัวอย่างการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณ (Quantitative Analysis) เช่นการวิเคราะห์สถิติเชิงบรรยาย การวิเคราะห์สหสัมพันธ์ และการวิเคราะห์สมการถดถอย เป็นต้น ในขณะที่ตัวอย่างการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงคุณภาพ (Qualitative Analysis) เช่นการสัมภาษณ์ การวิเคราะห์กลุ่มตัวอย่างเฉพาะ (Focus Group) และการใช้คำถามปลายเปิด เป็นต้น โดยในงานวิจัยนี้ใช้การวิเคราะห์ผลสถิติเชิงบรรยาย และการวิเคราะห์กลุ่มตัวอย่างเฉพาะร่วมกับการวิเคราะห์คำถามปลายเปิด ทั้งนี้รูปแบบในการทำการวิจัยแบบผสมแบ่งได้เป็นสองประเภทหลัก คือ 1) แบบสังเคราะห์ข้อมูลเป็นลำดับ (Sequential Diagram) เช่นการทำการวิเคราะห์แบบที่เก็บและวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณแล้วนำข้อมูลที่ได้มาสังเคราะห์เพื่อเก็บและวิเคราะห์ข้อมูลเชิงคุณภาพต่อยอด (Quan -> Qual) หรือแบบตรงกันข้ามที่ทำเชิงคุณภาพก่อนแล้วค่อยวิเคราะห์เชิงปริมาณ (Qual -> Quan) และ 2) แบบสังเคราะห์ข้อมูลพร้อมกัน (Concurrent Diagram) ในลักษณะที่เก็บและวิเคราะห์ข้อมูลแบบเชิงคุณภาพและเชิงปริมาณพร้อมกัน (Quan + Qual) ดังในงานวิจัยนี้ (Terrell, 2012; Gay et al., 2012)

ทั้งนี้ในงานวิจัยนี้ได้ใช้แบบสอบถามสำหรับเก็บข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่างผู้โดยสารรถสองแถวสาธารณะ โดยคำนวณกลุ่มตัวอย่างของผู้บริโภคตามสูตรการคำนวณขนาดตัวอย่างของ Ahmad and Halim (2017) ได้เท่ากับอย่างน้อย 196 ตัวอย่าง ดังแสดงในสมการที่ (1) และในการเก็บข้อมูลจริงได้ทำการเก็บทั้งสิ้น 230 ตัวอย่าง ซึ่งมากกว่าที่วางแผนไว้ โดยเลือกกลุ่มตัวอย่างผู้ให้บริการจริงในเวลาที่หลากหลายจากเส้นทางตัวอย่างสองเส้นทางที่เชื่อมกับมหาวิทยาลัยอุบลราชธานี นั่นคือ สายมอแดง และสาย 1 จากทั้งหมด 10 เส้นทาง โดยเส้นทางสองเส้นทางนี้มีการใช้บริการที่แออัดจากทั้งนักศึกษา คนทำงาน และผู้ให้บริการอื่นๆ โดยแบบสอบถามเป็นคำถาม

ปลายปิด (Closed-ended Form) 11 ข้อ (ข้อ 1-11) และคำถามปลายเปิด 3 ข้อ (รวมทั้งหมด 14 คำถาม) ซึ่งแบบสอบถามปลายปิดมีสามส่วนหลักคือส่วนที่ 1 ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับสถานภาพ (ข้อ 1-5) ส่วนที่ 2 ข้อมูลด้านพฤติกรรมการใช้รถโดยสารสองแถว (ข้อ 6-10) และส่วนที่ 3 ข้อมูลที่เป็นการวัดระดับความพึงพอใจของผู้โดยสารต่อปัจจัยต่างๆในการใช้บริการรถโดยสารสองแถว รวม 11 หัวข้อย่อย โดยคำถามเป็นแบบมาตรวัดของลิเคิร์ต (Linkert Scale) โดยมี 5 ระดับ คือมากที่สุด มาก ปานกลาง น้อย และน้อยที่สุด (ข้อ 11) นอกจากนี้สำหรับ แบบสอบถามแบบปลายเปิด (Open-ended Form) มีลักษณะที่การแสดงความคิดเห็นทำได้อย่างอิสระซึ่งประกอบด้วยคำถามจำนวน 3 ข้อ (ข้อ 12 – 14) โดยในแบบสอบถามเป็นคำถามปลายเปิดเกี่ยวกับปัญหาและข้อเสนอแนะเกี่ยวกับปัจจัยการใช้บริการรถโดยสารสองแถวในปัจจุบัน สถานที่ที่ต้องการให้ครอบคลุม รวมถึงข้อเสนอแนะอื่นๆ โดยผู้ทำวิจัยได้ทำการวิเคราะห์ความน่าเชื่อถือของแบบสอบถามจากการปรึกษาผู้เชี่ยวชาญ และทำการหาความเชื่อมั่นแบบครอนบาช (Cronbach's Alpha) (Eisinga et al., 2013) ดังแสดงในสมการที่ (2) ซึ่งพบว่าอยู่ที่ค่า 0.88 แสดงว่าแบบสอบถามที่พัฒนาขึ้นมีความน่าเชื่อถือ (Validity and Reliability) สูงมาก

$$N = \frac{P(1-P)Z^2}{d^2} \quad (1)$$

โดยที่ N คือจำนวนกลุ่มตัวอย่างที่ต้องการ; P คือสัดส่วนของประชากรที่ต้องการสุ่ม; Z คือค่าการกระจายแบบปกติมาตรฐานที่ 0.05; d คือค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดที่ยอมรับได้

$$\alpha = \frac{K}{K-1} \left(1 - \frac{\sum s_i^2}{s_t^2} \right) \quad (2)$$

โดยที่ α แทนค่าความเชื่อมั่น; K แทนจำนวนข้อคำถามที่วัดผล; s_i^2 แทนผลรวมความแปรปรวนแต่ละข้อ; s_t^2 แทนความแปรปรวนของคะแนนรวม

2.2 กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (AHP)

กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (AHP) ถูกพัฒนาโดย Saaty (1990) โดยเป็นเครื่องมือหนึ่งทางการวิเคราะห์การตัดสินใจแบบหลายปัจจัย (Multi Criteria Decision Analysis – MCDA) (Ransikarbum, 2017) ซึ่งใช้หลักการวิเคราะห์ที่มีพื้นฐานจากการใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ร่วมกับหลักการทางจิตวิทยาเข้าด้วยกัน โดยการวิเคราะห์ด้วย AHP ใช้หลักการการเปรียบเทียบเป็นคู่ๆ (Pairwise Comparison) ของสิ่งที่สนใจ แล้วนำผลที่ได้มาวิเคราะห์เป็นค่าถ่วงน้ำหนัก

(Relative Weight) สำหรับปัจจัยและ/หรือสำหรับทางเลือก โดย AHP สามารถแบ่งเป็นขั้นตอนหลักๆ ได้ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 : สร้างตารางเมตริกซ์จากการเปรียบเทียบเป็นคู่ๆ สำหรับปัจจัย และสำหรับทางเลือกที่มีเมื่อเทียบกับแต่ละปัจจัย ดังแสดงในสมการที่ (3) โดยที่สเกล 1-9 เป็นสเกลที่นิยมใช้ในการนำมาเปรียบเทียบที่ละคู่ โดยที่ 9 หมายถึง ‘สำคัญกว่ามากๆ ที่สุด/ชอบมากกว่ามากๆ ที่สุด’ ในขณะที่ 1 หมายถึง ‘สำคัญเท่าๆ กัน/ชอบเท่าๆ กัน’ และมีตัวเลขระหว่าง 1-9 ซึ่งแสดงความหมายที่ลดหลั่นกันไปตามระดับความสำคัญ

$$A = \begin{bmatrix} 1 & a_{12} & \dots & a_{1n} \\ a_{21} & 1 & \dots & a_{2n} \\ \dots & a_{ji} = 1/a_{ij} & \dots & 1 \\ a_{n1} & \dots & \dots & 1 \end{bmatrix} \quad (3)$$

โดยที่ a_{ij} คือการเปรียบเทียบของทางเลือก i เมื่อเทียบกับปัจจัย j

ขั้นตอนที่ 2 : สร้างตารางเมตริกซ์ที่ได้ทำการนอร์มัลไลเซชัน (Normalization) แล้ว

ขั้นตอนที่ 3 : คำนวณเวกเตอร์ลำดับความสำคัญ (Priority Vector หรือ p) หรือเวกเตอร์ไอเกน (Eigen Vector) โดยใช้เป็นค่าถ่วงน้ำหนักสำหรับปัจจัย และสำหรับทางเลือกต่างๆ เมื่อเทียบกับปัจจัยใดๆ ดังแสดงในสมการที่ (4)

ขั้นตอนที่ 4 : คำนวณค่าสูงสุดจากเวกเตอร์ไอเกนที่ได้จากขั้นตอนที่ 3 เรียกว่า $\lambda_{\max}$

$$A \cdot p = \lambda_{\max} \cdot p \quad (4)$$

ขั้นตอนที่ 5 : คำนวณค่าดัชนีความสอดคล้อง (Consistency Index - CI) ดังแสดงในสมการที่ (5)

ขั้นตอนที่ 6 : เลือกค่าที่เหมาะสมจากตารางดัชนีความสอดคล้องแบบสุ่ม (Random-consistency Index – RI) เมื่อเทียบกับขนาดของเมตริกซ์นั้นๆ

ขั้นตอนที่ 7 : ประเมินอัตราส่วนความสม่ำเสมอ (Consistency Ratio - CR) ของเมตริกซ์ สมการที่ (6)

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} \quad (5)$$

$$CR = \frac{CI}{RI} \quad (6)$$

โดยที่ n คือขนาดของเมตริกซ์หรือจำนวนปัจจัย

ขั้นตอนที่ 8 : ประเมินการจัดอันดับ (Ranking) ของแต่ละทางเลือก ตามสมการที่ (7) โดยที่ I_{ij} คือ Local Score ของแต่ละทางเลือก i เมื่อเทียบกับปัจจัย j ; w_j คือค่าถ่วงน้ำหนักของปัจจัย j ; และ g_i คือ Global Score ของทางเลือก i ใดๆ ที่สนใจ

$$g_i = \sum_j w_j I_{ij} \quad (7)$$

ทั้งนี้ ในงานวิจัยนี้ใช้เครื่องมือ AHP ในการวิเคราะห์ปัจจัยและทางเลือกในการเดินทางด้วยรถโดยสารสาธารณะที่มีอยู่ในปัจจุบัน

2.3 การหาคำตอบที่ดีที่สุดด้วยแบบจำลองปัญหาการเดินทางของคนขาย (TSP)

เครื่องมือต่อมาเป็นการใช้ผลการวิเคราะห์ปัจจัยและสถานที่จากแบบสอบถามส่วนแรก รวมถึงข้อมูลระยะทางในการเดินทาง เพื่อทำการวิเคราะห์เส้นทางการเดินทางโดยสาธารณะ โดยประยุกต์ใช้แบบจำลอง TSP ทั้งนี้เดิมทีแล้วปัญหา TSP คือปัญหาการเดินทางสำหรับคนขายของ (Salesman) ที่ต้องการไปให้ครบทุกเมืองโดยไม่ซ้ำกันจนครบแล้วกลับมาถึงเมืองเริ่มต้น โดยต้องการให้ระยะทางเดินทางน้อยที่สุด ซึ่งอธิบายได้ดังนี้

เซต (Sets)

เซต i : สถานที่เริ่มต้น $i; i = 1, \dots, n$

เซต j : สถานที่ปลายทาง $j; j = 1, \dots, n$

พารามิเตอร์ (Parameters)

d_{ij} คือระยะทางในการเดินทางจากสถานที่ i ไปสถานที่ j

n คือจำนวนสถานที่ทั้งหมดในเส้นทาง

ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variables)

X_{ij} คือตัวแปรแบบ 0-1 (Binary) สำหรับสถานที่ที่เดินทางไป (ค่า 1) หรือสถานที่ที่ไม่เดินทางไป (ค่า 0)

U_i คือตัวแปรช่วย (Auxiliary Variables) สำหรับสถานที่เริ่มต้น i ใช้กับสมการข้อจำกัดป้องกันการเดินทางย่อย (Subtour)

U_j คือตัวแปรช่วย (Auxiliary Variables) สำหรับสถานที่ปลายทาง j ใช้กับสมการข้อจำกัดป้องกันการเดินทางย่อย (Subtour)

ฟังก์ชันเป้าหมาย (Objective Function)

$$\text{Minimize } Z = \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n d_{ij} X_{ij} \quad (8)$$

สมการข้อจำกัด (Constraints)

$$\sum_{j=1}^n X_{ij} = 1 \quad ; \forall i=1, \dots, n \quad (9)$$

$$\sum_{i=1}^n X_{ij} = 1 \quad ; \forall j=1, \dots, n \quad (10)$$

$$U_i - U_j + nX_{ij} \leq n-1 \quad ; \forall i=2, \dots, n \quad (11)$$

$$; \forall j=2, \dots, n; i \neq j$$

$$X_{ij} \in \{0,1\} \quad ; \forall i, j \quad (12)$$

$$U_j \geq 0 \quad ; \forall j \quad (13)$$

โดยสมการที่ (8) แสดงฟังก์ชันเป้าหมายคือระยะทางทั้งหมดในการเดินทางที่น้อยที่สุด สมการข้อจำกัดที่ (9) และ (10) คือข้อจำกัดว่าการเดินทางออกจากสถานที่ i ใดๆ ต้องมีค่าเท่ากับ 1 ออกจากสถานที่ใดๆ ได้เพียงหนึ่งครั้ง และข้อจำกัดว่าการเดินทางเข้าสถานที่ j ใดๆ ได้เพียงหนึ่งครั้งเช่นกัน ตามลำดับ นอกจากนี้ สมการข้อจำกัดที่ (11) เป็นการป้องกันการเดินทางย่อย (subtour) ซึ่งหมายถึงการเดินทางที่เริ่มต้นจากสถานที่ใดๆ แล้วเดินทางไม่ครบทุกเมืองที่ต้องการ แล้วกลับไปทำซ้ำทำให้เกิดการเดินทางย่อยขึ้น ส่วนสมการและสมการข้อจำกัดที่ (12)-(13) แสดงข้อจำกัดเกี่ยวกับตัวแปรตัดสินใจ

ทั้งนี้ปัญหาในงานวิจัยนี้เป็นการวิเคราะห์เส้นทางการเดินทางโดยสาธารณะภายใต้เวลาที่จำกัด โดยจุดเริ่มต้นกับจุดสิ้นสุดไม่ใช่จุดเดียวกันในลักษณะเดียวกันกับปัญหาวิถีแฮมิลตัน (Hamiltonian Path) (Rahman & Kaykobad, 2005) ในลักษณะที่ต้องการหาเส้นทางที่สั้นที่สุด (Shortest Path) ซึ่งสามารถแก้ปัญหา TSP ดังเดิม (จุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดเดียวกัน) ได้ โดยการสร้างสถานที่ปลอม (Dummy Node) ขึ้นมา โดยกำหนดให้สถานที่ปลอมมีการเชื่อมต่อกับจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดโดยที่กำหนดระยะทางที่เชื่อมต่อระหว่างสถานที่ปลอมกับจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดเป็น 0 ในขณะที่กำหนดระยะทางที่เชื่อมต่อระหว่างสถานที่ปลอมกับสถานที่อื่นๆ ที่ไม่ใช่จุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดเป็นค่า M โดยที่ M เป็นตัวเลขที่สูงมากพอ (Arbitrarily Large Number)

3. ผลการวิจัยและการวิจารณ์ผล

3.1 ผลการวิเคราะห์การวิจัยแบบผสม

ผลการเก็บข้อมูลและวิเคราะห์กลุ่มตัวอย่างของผู้โดยสารที่ตอบแบบสอบถาม จำนวน 230 ตัวอย่างในช่วงเดือน มกราคม – พฤษภาคม 2561 โดยทำการเก็บข้อมูลกลุ่มผู้โดยสารที่เช่ารถโดยสารสาธารณะสำหรับรถสองแถวสายมอแดง และสาย 1 ในจังหวัดอุบลราชธานีโดยสรุปผลได้ดังนี้

3.1.1 ผลวิเคราะห์แบบสอบถามส่วนที่ 1 (ข้อมูลทั่วไปเกี่ยวกับสถานภาพ)

- ผู้โดยสารเป็นเพศชาย 34% และเพศหญิง 66%
- ผู้โดยสารมีอายุระหว่าง 20-29 ปี คิดเป็นร้อยละ 70.48 อายุต่ำกว่า 19 ปี คิดเป็นร้อยละ 19.05 อายุระหว่าง 30-39 ปี คิดเป็นร้อยละ 4.29 อายุระหว่าง 50-59 ปี และมากกว่า 60 ปี คิดเป็นร้อยละ 2.38 และอายุระหว่าง 40-49 ปี คิดเป็นร้อยละ 1.43 ตามลำดับ
- ผู้โดยสารมีการศึกษาที่ระดับปริญญาตรี คิดเป็นร้อยละ 61.24 ระดับมัธยมศึกษาตอนต้น คิดเป็นร้อยละ 15.31 ระดับมัธยมศึกษาตอนปลาย คิดเป็นร้อยละ 12.92

ระดับสูงกว่าปริญญาตรี คิดเป็นร้อยละ 6.70 และระดับต่ำกว่ามัธยมศึกษาร้อยละ 3.83 ตามลำดับ

- ผู้โดยสารที่ประกอบอาชีพนักเรียน/นักศึกษา ร้อยละ 80.95 อาชีพข้าราชการ/รัฐวิสาหกิจร้อยละ 6.19 อาชีพธุรกิจส่วนตัวร้อยละ 4.29 อาชีพพนักงานเอกชนร้อยละ 3.81 อื่นๆ ร้อยละ 3.33 และอาชีพรับจ้างทั่วไป คิดเป็นร้อยละ 1.43 ตามลำดับ
- ผู้โดยสารมีรายได้ต่อเดือนต่ำกว่า 10,000 บาท ร้อยละ 75.85 รายได้ 10,001-20,000 ร้อยละ 18.84 รายได้ 20,001-30,000 กับ 30,001-40,000 ร้อยละ 19.3 เท่ากัน และมากกว่า 40,000 คิดเป็นร้อยละ 1.45 ตามลำดับ

3.1.2 ผลวิเคราะห์แบบสอบถามส่วนที่ 2 (ข้อมูลด้านพฤติกรรมการใช้รถโดยสารสองแถว)

- ผู้โดยสารมีวัตถุประสงค์ในการเดินทางที่จะกลับบ้านร้อยละ 30.12 ไปเรียนหนังสือร้อยละ 21.45 ไปท่องเที่ยวร้อยละ 12.29 ไปห้างสรรพสินค้าร้อยละ 12.05 ไปตลาดร้อยละ 9.40 ไปทำงานร้อยละ 6.51 ไปโรงพยาบาลร้อยละ 5.30 และอื่นๆ ร้อยละ 2.89 ตามลำดับ
- ผู้โดยสารใช้บริการด้วยความถี่ 1-3 ครั้งต่อสัปดาห์ ร้อยละ 60 อื่นๆ (เช่น ความถี่ 1-2 ครั้งต่อเดือน) ร้อยละ 24 ความถี่ 4-5 ครั้งต่อสัปดาห์ร้อยละ 8 ความถี่มากกว่า 10 ครั้งต่อสัปดาห์ร้อยละ 6 และความถี่ 6-10 ครั้งต่อสัปดาห์ร้อยละ 2 ตามลำดับ
- ผู้โดยสารเดินทางในช่วงวันหยุด (เสาร์-อาทิตย์) ร้อยละ 47.16 วันศุกร์ร้อยละ 22.34 วันธรรมดา (อังคาร-พฤหัสบดี) ร้อยละ 21.63 และวันจันทร์ร้อยละ 8.87
- ผู้โดยสารเดินทางในช่วงสาย (09.00-12.00น.) ร้อยละ 31.64 ช่วงค่ำ (16.00-19.00 น.) ร้อยละ 26.17 ช่วงเช้า (05.00-09.00น.) ร้อยละ 21.09 ช่วงบ่าย (12.00-16.00น.) ร้อยละ 19.53 และอื่นๆ ร้อยละ 1.56 ตามลำดับ
- ผู้โดยสารจ่ายราคาโดยสารถปัจจุบันคือ 10 บาทร้อยละ 91 จ่ายราคา 5 บาทร้อยละ 5.7 จ่ายราคา 20 บาทร้อยละ 2.4 และอื่นๆ ร้อยละ 0.5

3.1.3 ผลวิเคราะห์แบบสอบถามส่วนที่ 3

ข้อมูลความพึงพอใจของผู้โดยสารต่อปัจจัยต่างๆในการใช้บริการรถโดยสารสองแถว แสดงในตารางที่ 1 โดยสามประเด็นหลักที่พอใจมากที่สุดคือด้านราคาที่เหมาะสมในการใช้บริการ ด้านเส้นทางรถโดยสารผ่านเส้นทางในจุดที่ต้องการจะไป และด้านพนักงานขับรถมีมารยาทในการขับรถหยุด-รับส่งโดยสารตามป้าย ในขณะที่สามประเด็นหลักที่พอใจน้อยที่สุดคือด้าน

ความรวดเร็วสะดวกสบาย ด้านปริมาณที่นั่ง และด้านที่นั่งเหมาะสมสำหรับพระสงฆ์ เด็กและสตรีมีครรภ์

ตารางที่ 1 แสดงความพึงพอใจต่อปัจจัยโลจิสติกส์เกี่ยวกับการเดินทางด้วยรถโดยสารสาธารณะ

ความพึงพอใจในการได้รับบริการจากต้นทางสู่ปลายทาง แยกตามประเด็นปัจจัยย่อย		ค่าเฉลี่ย
1	รถโดยสารผ่านเส้นทางในจุดที่ผู้โดยสารต้องการ	4.08
2	พนักงานขับรถมีมารยาทในการขับและให้บริการ	3.64
3	พนักงานขับรถหยุดรับ-ส่งโดยสารตามป้ายที่กำหนด	3.78
4	การใช้รถโดยสารมีความรวดเร็วสะดวกสบายทันเวลา	3.23
5	การใช้รถโดยสารประจำทางมีความปลอดภัย	3.45
6	ราคาเหมาะสมในการใช้บริการ	4.23
7	การรักษาสิ่งแวดล้อมและไม่ก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศบนท้องถนน	3.53
8	ความสะดวกต่อการชำระค่าโดยสาร	3.77
9	สภาพรถโดยสารเหมาะสมกับการนำมาให้บริการ	3.52
10	ที่นั่งเหมาะสมสำหรับพระสงฆ์ เด็กและสตรีมีครรภ์	3.02
11	ปริมาณที่นั่งมีความเหมาะสมกับจำนวนผู้โดยสาร	3.21
ค่าเฉลี่ยรวม		3.59

3.1.4 ผลวิเคราะห์แบบสอบถามปลายเปิด

ในส่วนข้อเสนอแนะจากคำถามปลายเปิดพบว่ามีปัญหาที่เจอและข้อเสนอแนะในการปรับปรุงระบบการบริการจากต้นทางสู่ปลายทาง (โลจิสติกส์) เพื่อการขนส่งและการบริการโดยสามารถวิเคราะห์ได้เป็น 8 ประเภหลักๆ (Clusters) ดังตารางที่ 2 ซึ่งปัญหาที่ผู้โดยสารอยากให้ทำการปรับปรุงมากที่สุดตามหลักการพาเรโต (80/20) คือเรื่องของเวลาเดินทางที่แน่นอน เรื่องความปลอดภัยของผู้โดยสาร เรื่องสภาพรถ เรื่องที่นั่งผู้โดยสาร และเรื่องพฤติกรรมของคนขับ ตามลำดับ

ตารางที่ 2 แสดง cluster ข้อเสนอแนะการปรับปรุง

Cluster	หัวข้อ (Theme) ข้อเสนอแนะ	%
1	สภาพรถ เช่นอยากให้ติดแอร์มลภาวะของควันรถ	15.75
2	การรับผู้โดยสาร เช่นรับมากเกินไปทำให้ผู้โดยสารต้องยืนด้านท้ายของรถ	0.68
3	เวลาเดินทางที่แน่นอน เช่นตารางการเดินทางและช่วงเวลาเดินทาง	28.10
4	ที่นั่งผู้โดยสาร เช่นจำนวนที่นั่งผู้โดยสาร ที่นั่งสำหรับพระสงฆ์	11.64
5	พฤติกรรมคนขับ เช่นการจอดรถให้ตรงจุด ขับรถเร็วเกินกำหนด	10.27
6	พื้นที่บนรถ เช่นไม่มีที่ว่างสำหรับวางของ	2.74

7	ความปลอดภัยของผู้โดยสาร	22.60
8	อื่นๆ	8.22

นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์สถานที่ที่ต้องการให้การเดินรถโดยสารครอบคลุมเพิ่มเติม พบว่า 10 อันดับแรกคือ ห้างเซ็นทรัลพลาซาอุบลราชธานี (31.1%) หมู่บ้านต่างๆ (28.9%) อื่นๆ (11.1%) สนามบินนานาชาติอุบลราชธานี (4.4%) โลตัส อำเภวารินชำราบ (4.4%) สถานีรถไฟอุบลราชธานี (2.2%) ศาลากลางใหม่ (2.2%) ห้วยวังนอง (2.2%) ห้างสุณีย์ (2.2%) และโรงพยาบาลอุบลรักษ์ (2.2%) ตามลำดับ

3.2 ผลการวิเคราะห์ปัจจัยด้วย AHP

ผลการเก็บข้อมูลของกลุ่มเฉพาะ (Focus Group) จำนวน 30 คนตามทฤษฎีลิ้มรสส่วนกลางในการกระจายแบบปกติ โดยทำการสุ่มตัวอย่างนักศึกษาระดับปริญญาตรีที่เคยใช้บริการรถสองแถวแล้วหาค่าเฉลี่ยทางเรขาคณิต สำหรับค่าน้ำหนักความสำคัญของปัจจัยด้วยวิธีการวิเคราะห์ด้วย AHP สามารถสรุปปัจจัยหลัก 5 ปัจจัย (ราคา มลภาวะ เวลา ความปลอดภัย และการบริการ) โดยมีทางเลือก 6 ทางเลือกด้วยกันซึ่งรวมรถสองแถวในปัจจุบันและทางเลือกที่มีการใช้งานจริงในพื้นที่จังหวัดอุบลราชธานีคือรถแท็กซี่และรถตู้ รวมถึงทางเลือกที่มีการใช้ในพื้นที่ หรือที่มีโอกาสนำมาใช้ในอนาคต คือรถจักรยานยนต์รับจ้าง รถเวียนรับส่ง (Shuttle Bus) ทัวไป และรถโดยสารประจำทางไฟฟ้า ดังแสดงในตารางที่ 3 โดยทำการบันทึกข้อมูลของผู้ทำการตัดสินใจแต่ละคนโดยใช้โปรแกรม Expert Choice (Expert Choice, 2019) สำหรับการวิเคราะห์ AHP ซึ่งจะทำให้การสังเคราะห์ข้อมูลค่าน้ำหนักตามสมการที่ (3)-(7) ข้างต้น และใช้การวิเคราะห์การทำการตัดสินใจแบบกลุ่ม

ตารางที่ 3 แสดง Local Weight ของทุกทางเลือกเทียบกับปัจจัยใดๆ

ปัจจัยราคา	ทางเลือก	น้ำหนัก
1	รถสองแถว	0.201
2	รถเวียนรับส่งปกติ	0.184
3	รถโดยสารประจำทางไฟฟ้า	0.180
4	รถตู้	0.159
5	รถแท็กซี่	0.149
6	รถจักรยานยนต์	0.127
ปัจจัยมลภาวะ	ทางเลือก	น้ำหนัก
1	รถสองแถว	0.152
2	รถเวียนรับส่งปกติ	0.207
3	รถโดยสารประจำทางไฟฟ้า	0.324
4	รถตู้	0.112
5	รถแท็กซี่	0.105
6	รถจักรยานยนต์	0.100
ปัจจัยเวลา	ทางเลือก	น้ำหนัก

ปัจจัยราคา	ทางเลือก	น้ำหนัก
1	รถสองแถว	0.068
2	รถเวียนรับส่งปกติ	0.137
3	รถโดยสารประจำทางไฟฟ้า	0.136
4	รถตู้	0.172
5	รถแท็กซี่	0.318
6	รถจักรยานยนต์	0.169
ปัจจัยปลอดภัย	ทางเลือก	น้ำหนัก
1	รถสองแถว	0.077
2	รถเวียนรับส่งปกติ	0.258
3	รถโดยสารประจำทางไฟฟ้า	0.277
4	รถตู้	0.113
5	รถแท็กซี่	0.204
6	รถจักรยานยนต์	0.071
ปัจจัยบริการ	ทางเลือก	น้ำหนัก
1	รถสองแถว	0.056
2	รถเวียนรับส่งปกติ	0.218
3	รถโดยสารประจำทางไฟฟ้า	0.235
4	รถตู้	0.172
5	รถแท็กซี่	0.268
6	รถจักรยานยนต์	0.051

ทั้งนี้ผลการวิเคราะห์ค่าน้ำหนักของปัจจัยด้วยวิธีการ AHP พบว่ากลุ่มเฉพาะ ให้ค่าน้ำหนักของปัจจัยเป็นด้านราคา (0.246) ด้านมลภาวะ (0.223) ด้านเวลา (0.204) ด้านความปลอดภัย (0.177) และด้านบริการ (0.150) ตามลำดับ ซึ่งหากทำการวิเคราะห์ค่าถ่วงน้ำหนักของทางเลือกทั้งหมด เมื่อเทียบกับปัจจัยใดๆ ได้ค่าน้ำหนักดังแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งพบว่าทางเลือกรถสองแถวที่ดีที่สุดด้านปัจจัยราคา ทางเลือกรถโดยสารประจำทางไฟฟ้าดีที่สุดด้านปัจจัยมลภาวะ ทางเลือกรถแท็กซี่ดีที่สุดด้านปัจจัยเวลา ทางเลือกรถโดยสารประจำทางไฟฟ้าดีที่สุดด้านปัจจัยความปลอดภัย และทางเลือกรถโดยสารประจำทางไฟฟ้าดีที่สุดด้านปัจจัยการบริการ ทั้งนี้ค่า CR ที่คำนวณสำหรับเมตริกซ์การตัดสินใจใดๆ พบว่ามีค่าน้อยกว่า 10% ซึ่งแสดงว่าการให้ข้อมูลในการตัดสินใจมีความสอดคล้อง

นอกจากนี้ ผลการวิเคราะห์ด้วยสมการที่ (6) เพื่อคำนวณหา Global Score ในการประเมินการจัดอันดับ พบว่าทางเลือกรถโดยสารประจำทางไฟฟ้า (0.23) มีค่าสูงที่สุด โดยคำนวณ $0.23 = (0.246)(0.180) + (0.213)(0.324) + (0.214)(0.136) + (0.177)(0.277) + (0.150)(0.235)$ โดยสามารถคำนวณค่า Global Score สำหรับทางเลือกอื่นๆ ได้ในทำนองเดียวกัน นั่นคือรถแท็กซี่ (0.20) รถเวียนรับส่ง (Shuttle Bus) ปกติ (0.20) รถตู้ (0.15) รถสองแถว (0.12) และทางเลือกรถจักรยานยนต์รับจ้าง (0.11) ตามลำดับ

3.3 ผลการวิเคราะห์เส้นทางที่ดีที่สุดด้วย TSP

ในส่วนที่สามของงานวิจัยเป็นการใช้ผลจากส่วนแรกซึ่งเป็นการวิเคราะห์แบบสอบถาม โดยเลือกสถานที่ที่ผู้โดยสารต้องการให้ครอบคลุมเพิ่มเติม และใช้ผลที่ได้จากส่วนที่สองในการวิเคราะห์ AHP โดยใช้ทางเลือกโดยสรุปลงในการนำมาจัดเส้นทาง ทั้งนี้ในเบื้องต้นจากการปรึกษาผู้เชี่ยวชาญของบริษัทอุบลราชธานีพัฒนาเมือง UBCD (Korat Newspaper, 2019) ถึงแผนการเดินทางโดยสารประจำทางไฟฟ้า ที่จะนำมาใช้ในอนาคต มีการคาดว่าเส้นทางควรเชื่อมต่อระหว่าง Code 1: สนามบิน และ Code 7: บขส. อุบลราชธานี โดยควรผ่าน Code 2: จวนผู้ว่าราชการจังหวัด Code 3: อุบลพลาซ่า Code 4: โรงเรียนกีฬาจังหวัดอุบลราชธานี Code 5: ศูนย์ท้าวเวร และ Code 6: บิ๊กซีอุบลราชธานี ดังนั้นผู้ทำวิจัยได้ทำการเก็บข้อมูลระยะทางในหน่วยกิโลเมตร และสร้างเมตริกซ์จุดเริ่มต้นกับจุดปลายทางของรถโดยสารประจำทางไฟฟ้า (Origin-Destination Matrix, O-D) ได้ ดังแสดงในตารางที่ 4

จากนั้นทำการเพิ่มสถานที่อีก 4 แห่งจากการอ้างอิงโดยผลจากแบบสอบถาม นั่นคือ Code 8: เซ็นทรัลพลาซ่าอุบลราชธานี Code 9: โลตัสวารินชำราบ Code 10: สถานีรถไฟอุบลราชธานี และ Code 11: ศาลากลางใหม่ และทำการสร้างเมตริกซ์ O-D เพิ่มเติม ดังแสดงในตารางที่ 5 ทั้งนี้มีการใส่สถานที่ปลอม (Du) เพิ่มเข้ามาสำหรับการวิเคราะห์แต่ละครั้ง โดยตั้งระยะทางระหว่าง Du กับจุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดเป็น 0 ในขณะที่กำหนดระยะทางที่เชื่อมต่อระหว่าง Du กับ

สถานที่อื่นๆ ที่ไม่ใช่จุดเริ่มต้นและจุดสิ้นสุดเป็น M โดยที่ M เป็นตัวเลขที่สูงมากพอ เช่น 1000 ดังที่ได้อธิบายข้างต้น โดยผลการวิเคราะห์เส้นทางด้วยโปรแกรม Excel solver ทั้งก่อนเพิ่มสถานที่จากแบบสอบถาม (Codes 1-7) และหลังเพิ่ม (Codes 1-11) แสดงในตารางที่ 6 โดยระยะทางรวมอยู่ที่ 11.55 และ 41.10 กิโลเมตร ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นการเริ่มเดินทางที่สนามบินและไปสิ้นสุดที่บริษัทขนส่งจำกัด (บขส.) อุบลราชธานี

นั่นคือแนะนำการจัดเส้นทางสำหรับกรณีเส้นทางเดินทางของรถโดยสารประจำทางไฟฟ้าปกติ (Codes 1-7) คือออกจาก

สนามบินอุบล -> อุบลพลาซ่า -> จวนผู้ว่าราชการจังหวัด -> โรงเรียนกีฬาจังหวัด -> ศูนย์ท้าวเวร -> บิ๊กซีอุบลราชธานี -> บขส. อุบลราชธานี ในขณะที่เส้นทางเมื่อเพิ่มสถานที่ (Codes 1-11) คือออกจากสนามบินอุบล -> อุบลพลาซ่า -> สถานีรถไฟอุบลราชธานี -> โลตัสวารินชำราบ -> จวนผู้ว่าราชการ

จังหวัด -> เซ็นทรัลพลาซ่าอุบลราชธานี -> โรงเรียนกีฬาจังหวัด -> ศูนย์ท้าวเวร -> บิ๊กซีอุบลราชธานี -> ศาลากลางใหม่ -> บขส. อุบลราชธานี ตามลำดับ

ตารางที่ 4 แสดง O-D matrix ของรถโดยสารประจำทางไฟฟ้า (Codes สถานที่ 1-7)

	1	2	3	4	5	6	7	Du
1	0	12.4	3.1	14.0	4.5	11.5	7.7	0
2	12.4	0	1.3	3.7	4.2	6.3	7.5	M
3	3.0	1.3	0	2.6	3.1	8.8	6.4	M
4	14.0	3.8	2.6	0	0.71	2.8	4.1	M
5	4.5	4.2	3.1	0.71	0	2	3.5	M
6	11.5	8.4	8.0	2.9	2	0	0.8	M
7	7.7	7.6	6.3	3.3	2.7	0.8	0	M
Du	0	M	M	M	M	M	M	0

ตารางที่ 5 แสดง O-D matrix ของรถโดยสารประจำทางไฟฟ้า (Codes สถานที่ 1-11)

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	Du
1	0	12.4	3.1	14.0	4.5	11.5	7.7	7.5	9.6	7.2	15	0
2	12.4	0	1.3	3.7	4.2	6.3	7.5	5.2	7.3	4.9	12.7	M
3	3.0	1.3	0	2.6	3.1	8.8	6.4	4.1	6.3	3.8	11.6	M
4	14.0	3.8	2.6	0	0.71	2.8	4.1	11.4	13.6	11.1	9	M
5	4.5	4.2	3.1	0.71	0	2	3.5	12.2	14.4	11.9	8.4	M
6	11.5	8.4	8.0	2.9	2	0	0.8	15.7	17.9	14.9	6.2	M
7	7.7	7.6	6.3	3.3	2.7	0.8	0	13.9	19.7	16.7	4.3	M
8	7.5	5.2	4.1	4.9	5.5	8.1	10	0	13.1	8.9	6.2	M
9	9.6	7.3	6.3	8.8	12.5	11.4	12.6	13.1	0	3.6	15	M
10	7.2	4.9	3.8	11.1	11.9	14.9	16.7	8.9	3.6	0	12.8	M
11	15	12.7	11.6	9	8.4	6.2	4.3	6.2	15	12.8	0	M
Du	0	M	M	M	M	M	M	M	M	M	M	0

ตารางที่ 6 แสดงผลการวิเคราะห์จัดเส้นทางเดินรถโดยสาร

Cases	ระยะทางรวม (กิโลเมตร)	เส้นทาง
1-7	11.55	1-3-2-4-5-6-7
1-11	41.10	1-3-10-9-2-8-4-5-6-11-7

หมายเหตุ: Code 1: คือจุดเริ่มต้นสนามบินนานาชาติอุบลราชธานี Code 7: คือจุดปลายทาง บขสอุบลราชธานี.

4. สรุปผลและแนวทางการวิจัยในอนาคต

งานวิจัยนี้เป็นการสังเคราะห์ปัจจัยและการวิเคราะห์เส้นทางสำหรับการเดินรถโดยสารสาธารณะอย่างบูรณาการ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาต่อเป็นระบบช่วยตัดสินใจสำหรับปัญหาการจัดเส้นทางเดินรถโดยสารสาธารณะโดยใช้กรณีศึกษาของจังหวัดอุบลราชธานี โดยเริ่มจากการวิเคราะห์ความพึงพอใจของการใช้รถโดยสารสาธารณะจากผู้โดยสารในปัจจุบันจากแบบสอบถามและการวิเคราะห์ผลด้วยเทคนิควิธีการวิจัยแบบผสม จากนั้นทำการวิเคราะห์ปัจจัยด้วยกระบวนการลำดับขั้นเชิงวิเคราะห์ (AHP) และนำผลที่ได้มาสร้างเป็นแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของปัญหาการเดินทางของคนขาย เพื่อเป็นประโยชน์สำหรับผู้วิเคราะห์นโยบายในการเปิดเส้นทางใหม่สำหรับการเดินรถสาธารณะ โดยคำนึงถึงความต้องการด้านเวลาและเส้นทางของผู้ใช้บริการจริง อย่างเป็นระบบ โดยผลการวิเคราะห์ความพึงพอใจของผู้ใช้บริการต่อระบบโลจิสติกส์และการขนส่งผู้โดยสารในการเดินทางด้วยรถ

โดยสารสาธารณะประเภทรถสองแถวในปัจจุบันโดยใช้แบบสอบถาม

โดยผลการวิเคราะห์พบว่าผู้โดยสารที่ใช้รถโดยสารสาธารณะในจังหวัดอุบลราชธานีส่วนใหญ่ มีความพึงพอใจต่อปัจจัยต่างๆ มากและน้อยต่างกันไป โดยเมื่อพิจารณาเป็นรายปัจจัยจากความพอใจมากไปน้อย พบว่าผู้โดยสารมีความพึงพอใจในด้านราคาที่เหมาะสมในการใช้บริการมากที่สุดและที่น้อยที่สุดคือที่นั่งเหมาะสมสำหรับพระสงฆ์ เด็กและสตรีมีครรภ์ โดยการวิเคราะห์คำถามปลายเปิดพบว่าข้อเสนอแนะในการพัฒนาและปรับปรุงตามหลักพาเรโต คือเรื่องของเวลาเดินทางที่แน่นอน เรื่องความปลอดภัยของผู้โดยสาร เรื่องสภาพรถ เรื่องที่นั่งผู้โดยสาร และเรื่องพฤติกรรมของคนขับรถ

สำหรับการวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อโลจิสติกส์ด้านการขนส่งรถโดยสารสาธารณะ และทางเลือกที่ดีที่สุดสำหรับรถโดยสารสาธารณะแต่ละแบบโดยใช้เทคนิคกระบวนการลำดับขั้นเชิงวิเคราะห์ (AHP) โดยการทำการวิเคราะห์กลุ่มตัวอย่างเฉพาะพบว่าค่าน้ำหนักของปัจจัยต่างๆ ห้ากลุ่มหลักคือด้านราคา (0.246) ด้านมลภาวะ (0.223) ด้านเวลา (0.204) ด้านความปลอดภัย (0.177) และด้านบริการ (0.150) ตามลำดับ โดยที่ผลการจัดอันดับ (Ranking) พบว่าทางเลือกรถโดยสารประจำทางไฟฟ้ามีค่าสูงที่สุด ซึ่งอาจเป็นทางเลือกที่จะนำมาใช้ได้ในอนาคต เนื่องจากตอบโจทย์เรื่องของปัญหาต่างๆ ที่ได้จากแบบสอบถามข้างต้น นอกจากนี้ผลการจัดเส้นทางเพื่อเสนอแนะเชิงนโยบายโดยใช้เทคนิคการหาคำตอบที่ดีที่สุด

ภายใต้เวลาที่จำกัด เมื่อจุดเริ่มต้นคือสนามบินอุบลราชธานี กับจุดสิ้นสุดคือ บขส. อุบลราชธานีไม่ใช่จุดเดียวกัน จากการใช้แบบจำลองปัญหาการเดินทางของคนขาย (TSP) แสดงการจัดเส้นทางโดยเส้นทางสำหรับ 7 สถานีที่รวมอยู่ที่ 11.6 กิโลเมตร และเส้นทางสำหรับ 11 สถานีที่รวมอยู่ที่ 41.1 กิโลเมตร

ทั้งนี้แนะนำงานวิจัยที่อาจต่อยอดในอนาคตโดยอาจเพิ่มปัจจัยย่อยต่างๆ รวมถึงช่วงเวลาที่ต่างกันในการเก็บข้อมูลสำหรับแบบสอบถาม นอกจากนี้ในการวิเคราะห์ AHP ผู้สนใจอาจวิเคราะห์กลุ่มผู้ทำการตัดสินใจที่ต่างกัน ซึ่งค่าถ่วงน้ำหนักของปัจจัยไม่จำเป็นต้องเหมือนกัน เพื่อแยกทางเลือกที่ดีที่สุดที่อาจต่างกัน สำหรับแต่ละกลุ่มผู้โดยสารเป็นต้น ส่วนการวิเคราะห์การจัดเส้นทาง เป็นที่คาดการณ์ว่าจะมีการใช้งานทั้งรถโดยสารประจำทางไฟฟ้าที่มีแผนจะนำมาใช้ในอนาคตและรถโดยสารสองแถวที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ร่วมกัน ซึ่งแน่นอนกว่าการจัดเส้นทางทั้งรถโดยสารประจำทางไฟฟ้าร่วมกับรถสองแถวสาธารณะ เป็นสิ่งสำคัญเพื่อให้การจัดเส้นทางเกิดประโยชน์สูงสุด

5. เอกสารอ้างอิง

- Ahmad, H., & Halim, H. (2017). Determining Sample Size for Research Activities. *Selangor Business Review*, 2(1), 20-34.
- Apipratyasakul, K. (2004). *Logistics for production and operation management Bangkok*. Focus Media and Publishing Company.
- Aqel, M. J. (2019). Decision Support Systems Classification in Industry. *Periodicals of Engineering and Natural Sciences*, 7(2), 774-785.
- Athikhomratanakul, P. (2008). *Logistics Management*. <http://pongchai.blogspot.com>
- Department of Land Transport Planning Division. (2018). *Transport Statistics Group*. <https://web.dlt.go.th/statistics>
- Department of Land Transport. (2011). *Department of Land Transport Direction*. <http://www.dlt.go.th>
- Douglas, M. L., James, R. S., & Lisa, M. E. (2004). *Supply Chain and Logistics Management*. Top McClure-Hill Publishing.
- Eisinga, R., Te Grotenhuis, M., & Pelzer, B. (2013). The reliability of a two-item scale: Pearson, Cronbach, or Spearman-Brown?. *International journal of public health*, 58(4), 637-642.
- Energy Time Online. (2018). *Smart City in Energy 4.0*. <http://energytimeonline.com>
- Expert Choice. (2019). *Decision Making Leadership*. <https://www.expertchoice.com/>
- Gay, L. R., Mills, G. E., & Airasian, P. W. (2012). *Educational Research: Competencies for Analysis and Applications* (8th ed.). Prentice Hall.
- Global EV Outlook. (2017). *Two million and counting*. International Energy Agency. <https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/GlobalEVOutlook2017.pdf>
- Guideubon. (2018). *Mini-bus information from Ubonratchathani province*. <http://guideubon.com/2.0/191/840>
- Ho, W. (2008). Integrated analytic hierarchy process and its applications- A literature review. *European Journal of Operational Research*, 186, 211-228.
- Korat Newspaper. (2019). *North-East People 9 Private Ubon, set up a city development company Determine the direction of self-growth. Year 43, No. 2494*. <http://koratdaily.com/blog.php?id=7615>
- Ministry of Energy. (2015). *Study preparation project for future use of electric vehicles for Thailand*. Energy Policy and Planning Office, Ministry of Energy.
- Office of Transport and Traffic Policy and Planning. (2016). *Strategic plan*. <http://www.otp.go.th>
- OSM. (2020). *Lower Northeastern Province Development Plan*. <http://www.osmnortheast-s1.moi.go.th>
- Peeratanon, N., & Nuthavorn, W. (2015). *Electric bus without pollution*. <http://www.dede.go.th>
- Piriyawat, S. (2014). *Public transportation*. <http://www.surames.com>
- Ponlakthong, N. (2012). *Research report of vehicle safety standards in bus systems: standardization, enforcement and inspection*. Office of Health Promotion.
- Rahman, M. S., & Kaykobad, M. (2005). On Hamiltonian cycles and Hamiltonian paths. *Information Processing Letters*, 94(1), 37-41.
- Ransikarbum, K. (2017). *Course documentation Multi-Criteria Decision Making*. Faculty of Engineering Department of Industrial Engineering Ubon Ratchathani University.
- Ransikarbum, K. (2018). *Study of factors and routing analysis for tourism logistics for Ubon Ratchathani Province* [Poster presentation]. Ubon Ratchathani, Thailand.
- Ransikarbum, K., & Kim, N. (2017, December). *Multi-criteria selection problem of part orientation in 3D fused deposition modeling based on analytic hierarchy process model: A case study* [Paper presentation]. In Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM), Singapore.
- Ransikarbum, K., & Mason, S. J. (2016a). 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. (2016b). Goal programming-based post-disaster decision making for integrated relief distribution and early-stage network restoration. *International Journal of Production Economics*, 182, 324-341.

- Saaty, T. L. (1990). How to make a decision: the analytic hierarchy process. *European journal of operational research*, 48(1), 9-26.
- Suksi, S., Ransikarbum, K., & Sinthuchao, S. (2018). *Applications of Analytic Hierarchy Process for selecting the infectious waste incinerator of Surin Provincial Community Hospital* [Poster presentation]. Ubon Ratchathani, Thailand. [29]
- Cioca, M., & Filip, F. (2015). Decision Support Systems—A Bibliography 1947–2007. *Database*, 15(4), 10-14.
- Terrell, S. R. (2012). Mixed-methods research methodologies. *The qualitative report*, 17(1), 254-280.
- Thansettakij. (2019). *Ubon developed the city" to raise the economic level! Molding a large employment center in the lower northeast*. <http://www.thansettakij.com>
- TSC Media. (2018). *Intelligent City Design Support Project*. <http://www.thailandsmartcities.com>
- Vaidya, O. S., & Kumar, S. (2006). Analytic hierarchy process: An overview of applications. *European Journal of Operational Research*, 169, 1-29.
- VeryUBON. (2018). *Mini- bus map of Ubonratchathani*. <http://www.veryubon.com>
- Wang, I. J. (1986). *Delivery of public services in Asian countries: Cases in development administration*. Thammasart University.

6. ประวัตินักวิจัย



Dr. Channarong Puchongkawarin received his Ph.D. in Chemical Engineering from Imperial College London, UK. He is a lecturer at the Department of Chemical Engineering, Ubon Ratchathani University, Thailand. His research interest includes chemical process modeling & optimization, wastewater treatment, waste management and life cycle assessment.



Dr. Kasin Ransikarbum received the B.Eng., M.S., and Ph.D. degrees in Industrial Engineering from King Mongkut's University of Technology Thonburi (KMUTT); Pennsylvania State University (PSU), USA; and Clemson University, USA, respectively. He was also pursuing a postdoctoral researcher at Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST), Republic of Korea. Currently, he works at the Industrial Engineering Department, Ubonratchathani University, Thailand. His research interest includes logistics and supply chain modeling, humanitarian logistics, and additive manufacturing.

การศึกษาการปรับสายอากาศโมโนโพลรูปทรงเรขาคณิตพื้นฐานที่ป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วม
สำหรับการประยุกต์ใช้งานกับแถบความถี่กว้างยิ่งยวด

A Study of Tuning the CPW Fed Basic Geometric Monopole Antenna for UWB
Applications

วัชรพล นาคทอง¹, อำนวย เรืองวารี^{1*}, ธีชัย พุ่มพวง²

Watcharaphon Nakton¹, Amnoiy Ruengwaree^{1*}, Tajchai Pumpoung²

¹สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

²สาขาวิศวกรรมโทรคมนาคม คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

¹Department of Electronics Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

²Department of Telecommunications Engineering, Rajamangala University of Technology Isan

*Corresponding author e-mail: amnoiy.r@en.rmutt.ac.th

(Received: 5 October 2019, Revised: 4 December 2019, Accepted: 28 February 2020)

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการศึกษาโครงสร้างสายอากาศโมโนโพลรูปทรงเรขาคณิตพื้นฐาน 3 แบบ คือ สี่เหลี่ยมผืนผ้า วงกลม และ สามเหลี่ยม ป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วมสำหรับการประยุกต์ใช้งานในแถบความถี่กว้างยิ่งยวดตามมาตรฐาน IEEE 802.15.3a ซึ่งอยู่ในช่วงความถี่ 3.1-10.6 GHz ด้วยเทคนิคการเจาะบนระนาบกราวด์ สายอากาศทุกแบบจากการออกแบบในบทความฉบับนี้มีขนาดโดยรวม 34×34 มม.² ถูกสร้างจากแผ่นวงจรพิมพ์ บอร์ดมาตรฐานรองชนิด FR-4 ที่มีความหนา 0.764 มม. โดยการวิเคราะห์และออกแบบสายอากาศอาศัยการจำลองแบบทางสนามแม่เหล็กไฟฟ้าด้วยโปรแกรม CST เพื่อวิเคราะห์หาโครงสร้างสายอากาศที่ดีที่สุดเพื่อนำไปสร้างสายอากาศต้นแบบ ซึ่งจากการทดสอบพบว่าโครงสร้างสายอากาศที่ตอบสนองต่อช่วงความถี่ที่ใช้งานได้ดีที่สุด คือ สายอากาศโมโนโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า ครอบคลุมช่วงความถี่ตั้งแต่ความถี่ 2.97-12.26 GHz มีค่าอัตราส่วนแบนด์วิดท์ 4.53:1 มีแบบรูปการแผ่พลังงานแบบรอบทิศทาง มีค่าอัตราขยายเฉลี่ยตลอดช่วงความถี่ที่ใช้งาน 3.07 dBi และมีประสิทธิภาพของสายอากาศมากกว่าร้อยละ 99.63

คำสำคัญ: สายอากาศโมโนโพล, ท่อนำคลื่นระนาบร่วม, สายอากาศแบบเจาะร่อง, ความถี่กว้างยิ่งยวด

Abstract

This paper proposed the study of the tuning of 3 basic geometric structures of monopole antenna: rectangular, circular, and triangular shape. The coplanar waveguide fed input signals to these antennas for ultra-wideband (UWB) applications as the IEEE 802.15.3a standard, which covers the frequency band of 3.1-10.6 GHz. The frequency bandwidth enhancement technique exploited in this work which is the slotted on the ground plane. All types of designed antennas have an overall size of 34×34 mm². The fabricated antenna structures were on the FR-4 printed circuit board (PCB), whose thickness is 0.764 mm. The antennas are analyzed and designed by using the electromagnetic field simulation CST program to optimize to the best structure for antenna fabrication. In the measurement process, the results showed that the best response, $S_{11} < -10$ dB, cover the frequency band of 2.97-

12.26 GHz, was obtained from the rectangular monopole. The bandwidth ratio was 4.13:1. The radiation pattern was omnidirectional. The average gain over the frequency band was 3.07 dBi, and the antenna efficiency was over 99.63%.

Keywords: Monopole antenna, Co-planar waveguide, Slotted antenna, Ultra-wideband

1. บทนำ

ปัจจุบันในระบบสื่อสารแบบไร้สายในแถบความถี่กว้างยิ่งยวด (Ultra-Wideband: UWB) ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.3a ที่ถูกกำหนดโดยคณะกรรมการกลางกำกับดูแลกิจการสื่อสาร (Federal Communications Commission: FCC) สามารถรองรับการใช้งานได้ 2 ช่วงความถี่ คือ ช่วงความถี่ใช้งานต่ำ 960 MHz และช่วงความถี่สูง 3.1-10.6 GHz ที่มีแบนด์วิดท์กว้าง 7.5 GHz และจะมีแบนด์วิดท์ในแต่ละสัดส่วนของการส่งสัญญาณมากกว่าร้อยละ 20 หรือมีการใช้แถบความถี่มากกว่า 500MHz ใช้พลังงานต่ำระยะใกล้และค่าความสัมพันธ์ของเวลาหน่วงกลุ่ม (group delay time) มีค่าการหน่วงเวลาไม่เกิน ± 2 ns (Bustamante et al., 2017; US Federal Communications Commission, 2002; Coase, 2013) ซึ่งปัจจุบันเทคโนโลยีแถบความถี่กว้างยิ่งยวดมีบทบาทเป็นอย่างมากต่อการประยุกต์ใช้งานด้านการรับส่งข้อมูลที่ต้องการความเร็วสูงและการส่งข้อมูลข่าวสารเป็นจำนวนมาก เช่น ใช้สื่อสารโครงข่ายไร้สายบนร่างกายมนุษย์เพื่อหาความผิดปกติทางร่างกายหรือตรวจสอบโรคต่าง ๆ ภายในร่างกายหรือทางการแพทย์นำไปใช้งานในด้านเครื่องมือที่ต้องการความแม่นยำในการผ่าตัด ในด้านของอาคารสำนักงานจะถูกใช้งานด้านการสื่อสารความเร็วสูงเชื่อมต่ออุปกรณ์ประเภทโน้ตบุ๊ก โปรเจคเตอร์ ปริ้นเตอร์ กล้องถ่ายรูปหรือกล้องถ่ายวิดีโอจอแสดงผลภาพ ระบบเครื่องเสียง หรือระบบควบคุมอัตโนมัติต่าง ๆ ในตัวอาคาร และในด้านการค้นหาตำแหน่งของวัตถุที่เคลื่อนที่ด้วยความแม่นยำสูงถึงระดับเซนติเมตร เป็นต้น จากประโยชน์ที่ได้กล่าวมานั้น ในการรับส่งสัญญาณข้อมูลแบบไร้สายสายอากาศจึงถือเป็นอุปกรณ์ที่สำคัญ ทำหน้าที่ให้กับระบบสื่อสารแบบไร้สายสามารถส่งข้อมูลได้ถูกต้องตามที่ต้องการ จึงได้นักวิจัยหลายคนที่ยพยายาม คิดค้นและพัฒนาสายอากาศในแถบความถี่กว้างยิ่งยวดให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น โดยส่วนใหญ่จะพัฒนาด้านโครงสร้างสายอากาศเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและคุณลักษณะต่าง ๆ ของสายอากาศ เช่น การเพิ่มอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ให้กว้างมากยิ่งขึ้นหรือการเพิ่มประสิทธิภาพของสายอากาศ

ให้สามารถใช้งานเฉพาะย่านความถี่ที่ต้องการ ด้วยเทคนิคต่าง ๆ เช่น การเจาะรูหรือเจาะผิวทองแดงที่ตัวแผ่พลังงาน (radiator) และระนาบกราวด์ทั้งสองด้าน (Chang et al., 2005; Jan et al., 2006; Song et al., 2007) หรือเพิ่มสลับปรับที่ตัวแผ่พลังงานระนาบกราวด์ (Song et al., 2007; Naktong & Ruengwaree, 2011; Kaewchan & Ruengwaree, 2011; Moeikham & Akkaraekthalin, 2011; Naji, 2013; Ruengwaree et al., 2013; Vyas & Singhal, 2014; Jalali & Sedghi, 2014; Bhaskar et al., 2016) การปรับเปลี่ยนตัวแผ่พลังงานในรูปทรงเลขาคณิตต่าง ๆ ร่วมกับการเจาะผิวทองแดงของระนาบกราวด์แบบรูปบันได (Naktong et al., 2016; Naktong et al., 2016; Thongbor et al., 2016) ดังที่กล่าวมา ซึ่งเทคนิคดังกล่าวจะส่งผลให้โครงสร้างสายอากาศสามารถมีค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์กว้างขึ้นทำให้รองรับการประยุกต์ใช้งานย่านความถี่แถบกว้างยิ่งยวด ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.3a แต่เมื่อค้นคว้าเพิ่มเติมพบว่ายังมีจุดด้อยคือ มีจุดปรับมีจำนวนมากซึ่งส่งผลให้โครงสร้างของสายอากาศเกิดความซับซ้อนยากต่อการนำไปสร้างจริง (Chang et al., 2005; Jan et al., 2006; Song et al., 2007; Naktong & Ruengwaree, 2011; Kaewchan & Ruengwaree, 2011; Moeikham & Akkaraekthalin, 2011; Naji, 2013; Ruengwaree et al., 2013; Vyas & Singhal, 2014; Jalali & Sedghi, 2014; Bhaskar et al., 2016; Naktong et al., 2016; Naktong et al., 2016; Thongbor et al., 2016; Naidu & Malhotra, 2016; Edalati et al., 2017; Bikram et al., 2017; Madanan et al., 2018)

จากปัญหาที่กล่าวไปในข้างต้นงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดเพื่อศึกษาและพัฒนาโครงสร้างสายอากาศสำหรับประยุกต์ใช้ในแถบความถี่กว้างยิ่งยวด ที่มีการลดขั้นตอนการปรับโครงสร้างที่ซับซ้อนด้วยการเลือกใช้รูปร่างตัวแผ่พลังงานของสายอากาศโมโนโพล จากรูปทรงเรขาคณิตพื้นฐานได้แก่ รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า รูปสามเหลี่ยม และรูปวงกลม จากงานวิจัยที่ (Naktong et al., 2016) ได้ทำการศึกษาเทคนิคการปรับโครงสร้างสายอากาศ 2

ส่วนคือ ในส่วนแรกทำการปรับโครงสร้างของตัวแผ่พลังงาน และ ส่วนที่สองทำการปรับที่บริเวณระนาบกราวด์ด้วยการเจาะ ผิวดวงแดงทั้งสองด้านแบบ 2 ชั้น ส่งผลทำให้เกิดสายอากาศที่ ผ่านการปรับสามารถรองรับการประยุกต์ใช้งานที่ความถี่ครอบคลุม ย่านความถี่ UWB ทั้งหมดที่ต้องการ แต่พบข้อเสียคือมีความ ซับซ้อนของโครงสร้างดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงเกิดแนวคิดว่าเสนอ การลดความซับซ้อนของการปรับโครงสร้างด้วยการปรับเจาะ ผิวดวงแดงเพียง 1 ครั้งเท่านั้นเพื่อให้สายอากาศมีค่าอิมพีแดนซ์ แบบดิวิตีที่รองรับการใช้งานครอบคลุมย่านความถี่ UWB ได้ เช่นเดียวกัน การเจาะผิวดวงแดงเพียงครั้งเดียวมีข้อดีคือทำให้ เกิดความซับซ้อนทางโครงสร้างสายอากาศน้อยลง หัวใจสำคัญ ของงานวิจัยนี้เน้นการปรับโครงสร้างแบบง่าย ด้วยการป้อน สัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม (Coplanar Waveguide: CPW) เพื่อให้โครงสร้างสายอากาศอยู่ในระนาบเดียวกันตัวป้อน สัญญาณ จึงเลือกโครงสร้างสายอากาศโมโนโพล (Naktong et al., 2016; Naktong et al., 2016; Thongbor et al., 2016) ที่มี แบบรูปการแผ่พลังงานลักษณะเป็นรอบทิศทาง (omnidirectional) หรือส่งรับสัญญาณได้ทุกทิศทาง โดยมีค่า อัตราขยายสูงสุดสูงไม่ต่ำกว่า 3.28 dBi ที่ค่าความกว้างลำคลื่นครึ่ง กำลัง (Half Power Beam Width: HPBW) เท่ากับ 80° (Balanis, 2005) และสามารถตอบสนองต่อการประยุกต์ใช้งานกับแถบ ความถี่กว้างยิ่งยวดได้เป็นอย่างดี เทคนิคการเจาะผิวดวงแดงบน ระนาบกราวด์ทั้งสองด้าน (Naktong et al., 2016; Naktong et al., 2016; Thongbor et al., 2016; Naidu & Malhotra, 2016; Edalati et al., 2017; Bikram et al., 2017; Madanan et al., 2018) ถูกนำมาใช้ สำหรับการวิเคราะห์ผลของค่าอิมพีแดนซ์ แบบดิวิตีที่ว่ามีการครอบคลุมแถบความถี่ UWB ใช้ค่าสัมประสิทธิ์ การสะท้อนกลับ $|S_{11}|$ (dB) มาประกอบการวิเคราะห์เนื่องจากผล ของค่า $|S_{11}|$ (dB) เมื่อทำการแปลงผลกลับจะส่งผลต่อค่า อิมพีแดนซ์แบบดิวิตีโดยตรง (Balanis, 2005) งานวิจัยนี้ใช้การ จำลองแบบมาช่วยสำหรับการปรับโครงสร้างสายอากาศโดยเลือกใช้ โปรแกรม Computer Simulation Technology (CST)

โครงสร้างสายอากาศที่นำเสนอถูกออกแบบบนแผ่นวงจรพิมพ์ ที่มีวัสดุฐานรองชนิด FR4 ที่มีคุณสมบัติในด้านของค่าความ นำกระแสไฟฟ้าคงที่ เหมาะกับการใช้งานในย่านความถี่สูงได้เป็น อย่างดี (Naktong & Ruengwaree, 2011; Kaewchan & Ruengwaree, 2011; Moeikham & Akkaraekthalin, 2011)

สำหรับขั้นตอนในนำเสนอการวิจัยนี้ประกอบไปด้วยการศึกษา พัฒนาโครงสร้างสายอากาศในส่วนที่ 2 การออกแบบและผลการ จำลองส่วนที่ 3 การสร้างและทดสอบนำมาเปรียบเทียบผล สายอากาศกับงานวิจัยที่ผ่านมาส่วนที่ 4 และการสรุปผลส่วน สุดท้ายจะถูกนำเสนอในส่วนที่ 5

2. การศึกษาพัฒนาโครงสร้างสายอากาศ

การศึกษาพัฒนาโครงสร้างสายอากาศสำหรับรองรับการใ้ งานแถบความถี่กว้างยิ่งที่มีการปรับเน้นความไม่ซับซ้อนเริ่มด้วย การเลือกรูปร่างของตัวแผ่พลังงานของสายอากาศ บทความวิจัยนี้ จึงนำเสนอรูปทรงเรขาคณิตพื้นฐาน 3 รูปแบบได้แก่ รูป สี่เหลี่ยมผืนผ้า รูปวงกลม และรูปสามเหลี่ยม (Naktong et al., 2016) โดยการคำนวณพารามิเตอร์ต่าง ๆ ของสายอากาศแบ่ง ขั้นตอนออกได้เป็น 5 ขั้นตอน คือ

2.1 การกำหนดขนาดของสายอากาศโดยรวม

ขนาดของสายอากาศโดยรวมเบื้องต้นจะถูกพิจารณาและถูก กำหนดเป็นอันดับแรก เพื่อใช้ในการกำหนดและคำนวณหา พารามิเตอร์อื่น ๆ ของสายอากาศในลำดับถัดไป ขนาดสายอากาศ โดยรวมสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) - (4) (Balanis, 2005; Prasanna & Sridevi, 2014) โดยพิจารณาจากพารามิเตอร์ ต่าง ๆ ของสายอากาศดังแสดงในรูปที่ 1 ในรูปที่ 1 เป็นโครงสร้าง ของสายอากาศโมโนโพลรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าป้อนด้วยท่อนำ คลื่นระนาบร่วม โดยในการคำนวณเบื้องต้นนั้นจะพิจารณาช่วง ความถี่ต่ำของระบบ UWB (3.1 GHz) ก่อนเนื่องจากจะส่งผลต่อ ระยะความยาวคลื่น (λ) ที่มากที่สุดเมื่อ

$$W_1 = \frac{0.57c}{f_r} \sqrt{\frac{2}{\epsilon_r + 1}} \quad (\text{มม.}) \quad (1)$$

$$\epsilon_{\text{eff}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} (1 + 0.3h) \quad (\text{มม.}) \quad (2)$$

$$\Delta L = 0.412h \frac{(\epsilon_{\text{eff}} + 0.3) \left(\frac{W_1}{h} + 0.264 \right)}{(\epsilon_{\text{eff}} - 0.258) \left(\frac{W_1}{h} + 0.8 \right)} \quad (\text{มม.}) \quad (3)$$

$$L_1 = \frac{0.63\lambda}{\sqrt{\epsilon_{\text{eff}}}} - 2\Delta L \quad (\text{มม.}) \quad (4)$$

โดยที่

C คือ ความเร็วแสง ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$)

f_r คือ ความถี่เรโซแนนซ์ (3.1 GHz)

h คือ ความหนาของวัสดุฐานรอง FR4 (0.764 มม.)

W_1 คือ ความกว้างของแผ่นสายอากาศ (34 มม.)

L_1 คือ ความยาวของแผ่นสายอากาศ (34 มม.)

λ คือ ความยาวคลื่น (96.77 มม.)

ϵ_r คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กทริก (4.3)

ϵ_{eff} คือ ค่าคงตัวไดอิเล็กทริกประสิทธิผล (3.26)

ΔL คือ ความยาวการกระจายคลื่นในแนวเส้นสนามไฟฟ้า (0.37 มม.)

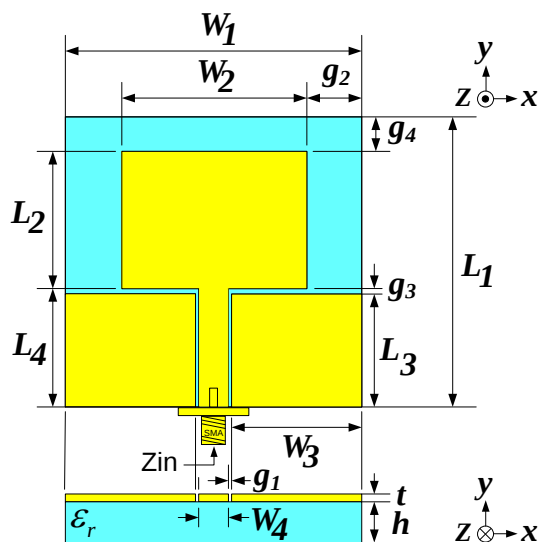
t คือ ความหนาของแผ่นทองแดง (0.017 มม.)

g_1 คือ ความกว้างระหว่างสายนำสัญญาณถึงระนาบกราวด์

g_2 คือ ความกว้างระหว่างตัวแผ่นพลังงานถึงแผ่นฐานรอง FR4

g_3 คือ ความยาวระหว่างตัวแผ่นพลังงานถึงระนาบกราวด์

g_4 คือ ความยาวระหว่างตัวแผ่นพลังงานถึงแผ่นฐานรอง FR4



รูปที่ 1 โครงสร้างสายอากาศโมโนโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าป้อนด้วยท่อนำคลื่น
ระนาบร่วม

2.2 การกำหนดขนาดของตัวแผ่นพลังงานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

หากพิจารณาจากโครงสร้างของสายอากาศโมโนโพลรูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้าป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วมแสดงดังรูปที่ 1 สามารถคำนวณหาความกว้างและความยาวของตัวแผ่นพลังงานได้จากสมการที่ (5) และ (6) (Balanis, 2005) คือ

$$W_2 = 0.35\lambda \left[\frac{\epsilon_r + 1}{2} \right]^{-1/2} \quad (\text{มม.}) \quad (5)$$

$$L_2 = \frac{0.35\lambda}{\sqrt{\epsilon_r}} - 2\Delta L \quad (\text{มม.}) \quad (6)$$

โดยที่

W_2 คือ ความกว้างของตัวแผ่นพลังงาน

L_2 คือ ความยาวของตัวแผ่นพลังงาน

ซึ่งในส่วนการป้อนสัญญาณด้านอินพุต (Z_{in}) เข้าที่หัวเชื่อมต่อ SMA แสดงดังรูปที่ 1 ให้กับตัวสายอากาศ สำหรับงานวิจัยนี้ใช้วิธีการป้อนสัญญาณแบบท่อนำคลื่นระนาบร่วม ลักษณะของสายนำสัญญาณรูปแบบนี้ตัวนำสัญญาณกับระนาบกราวด์จะอยู่ในระนาบเดียวกันโดยจะมีระนาบกราวด์วางร่วมกันอยู่ทั้งสองข้างตัวนำสัญญาณดังแสดงในรูปที่ 1 โดยอ้างอิงค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการคำนวณตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้จากการออกแบบสายอากาศเบื้องต้น

ขนาดความกว้าง		ขนาดความยาว	
ตัวแปร	ขนาด (มม.)	ตัวแปร	ขนาด (มม.)
W_1	34.00	L_1	34.00
W_2	21.00	L_2	16.00
W_3	3.10	L_3	13.40
W_4	15.15	L_4	12.00
g_1	0.30	g_3	1.40
g_2	6.50	g_4	4.60

ค่าพารามิเตอร์จากตารางที่ 1 ส่วนที่เหลือสามารถคำนวณได้ดังสมการต่อไปนี้

$$W_3 = \frac{0.057 \times c}{f_r \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (\text{มม.}) \quad (7)$$

$$L_3 = \frac{0.25 \times c}{f_r \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (\text{มม.}) \quad (8)$$

$$W_4 = \frac{0.283 \times c}{f_r \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (\text{มม.}) \quad (9)$$

$$L_4 = \frac{0.224 \times c}{f_r \sqrt{\epsilon_{eff}}} \quad (\text{มม.}) \quad (10)$$

โดยที่

W_3 คือ ความกว้างของสายนำสัญญาณ

L_3 คือ ความยาวของสายนำสัญญาณ

W_4 คือ ความกว้างของระนาบกราวด์ร่วม

L_4 คือ ความยาวของระนาบกราวด์ร่วม

2.3 การกำหนดขนาดของตัวแผ่พลังงานรูปวงกลม

การคำนวณค่ารัศมีของสายอากาศรูปวงกลมนั้นสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (10) และ (11) (Balanis, 2005) เมื่อ

$$F = \frac{8.791 \times 10^9}{f_r \sqrt{\epsilon_r}} \quad (10)$$

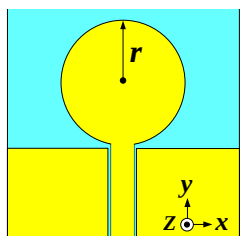
$$r = \frac{F}{\left\{ 1 + \frac{2h}{\pi \epsilon_r F} \left[\ln \left(\frac{\pi F}{2h} \right) + 1.7726 \right] \right\}^{1/2}} \quad (\text{มม.}) \quad (11)$$

โดยที่

F คือ รัศมีประสิทธิผลของตัวแผ่พลังงานแบบวงกลม (13.68)

r คือ รัศมีของตัวแผ่พลังงานแบบวงกลม (12.32 มม.)

เพื่อให้เห็นภาพที่ชัดเจนค่าพารามิเตอร์จากสมการที่ (10)-(11) สามารถแสดงดังโครงสร้างในรูปที่ 2



รูปที่ 2 โครงสร้างสายอากาศโมโนโพลรูปวงกลมป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วม

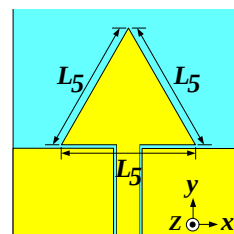
2.4 การกำหนดขนาดของตัวแผ่พลังงานรูปสามเหลี่ยม

งานวิจัยนี้เลือกสายอากาศรูปสามเหลี่ยมเป็นลักษณะสามด้านเท่า การคำนวณหาขนาดความยาวแต่ละด้านของสายอากาศใช้สมการที่ (12) (Vishwakarma et al., 2006; Sharma et al., 2008) และโครงสร้างสายอากาศแสดงดังรูปที่ 3

$$L_5 = \frac{2c}{3f_r \sqrt{\epsilon_r}} \quad (\text{มม.}) \quad (12)$$

โดยที่

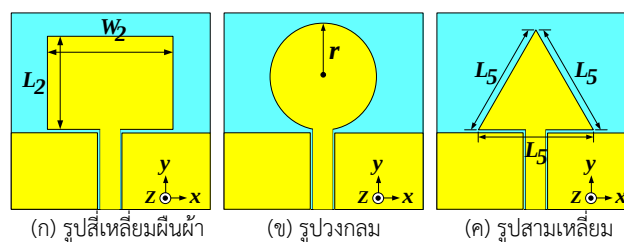
L_5 คือ ความยาวในหนึ่งด้านของสายอากาศรูปสามเหลี่ยม (31.11 มม.)



รูปที่ 3 โครงสร้างสายอากาศโมโนโพลรูปสามเหลี่ยมป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วม

2.5 การเปรียบเทียบคุณสมบัติจากการจำลองแบบ

พารามิเตอร์ต่าง ๆ ในตารางที่ 1 เป็นค่าที่ได้จากการคำนวณโครงสร้างของสายอากาศโมโนโพลที่มีตัวแผ่พลังงานเป็นรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ป้อนสัญญาณด้านเข้าด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วมสำหรับขนาดพารามิเตอร์ของตัวแผ่พลังงานแบบสามเหลี่ยมและวงกลมแสดงค่าได้ดังรูปที่ 2 และ 3 แต่ยังใช้พารามิเตอร์ในส่วนระนาบกราวด์เช่นเดียวกันกับในรูปที่ 1 สำหรับการปรับโครงสร้างสายอากาศของทั้ง 3 รูปแบบจะอธิบายให้ชัดเจนในส่วนต่อไป

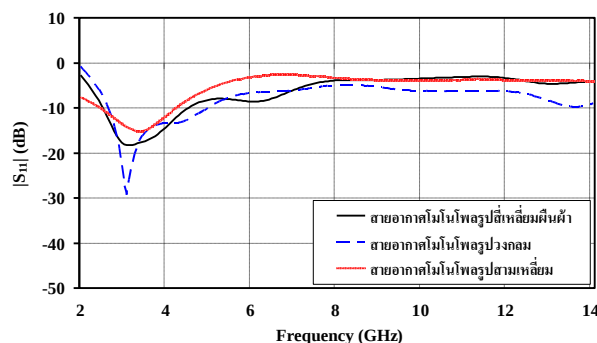


(ก) รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า (ข) รูปวงกลม (ค) รูปสามเหลี่ยม

รูปที่ 4 การเปรียบเทียบโครงสร้างสายอากาศโมโนโพลทั้ง 3 รูปแบบเริ่มต้น

เพื่อให้เห็นภาพรวมการออกแบบสายอากาศตามหัวข้อ 2.1 – 2.4 จึงทำการสรุปรวมลักษณะของโครงสร้างสายอากาศโมโนโพลป้อนด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วมพื้นฐานทั้ง 3 รูปแบบไว้ในรูปภาพเดียวกันดังแสดงในรูปที่ 4 และนำโครงสร้างของสายอากาศพร้อมพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่ได้ทั้งหมดมาวิเคราะห์ผลด้วยการการจำลอง

แบบโดยใช้โปรแกรม CST จากผลการจำลองแบบพบว่า สายอากาศทั้ง 3 รูปแบบที่ได้นำเสนอมาก่อนหัวข้อย่อก่อนหน้า นี้มีค่า $|S_{11}|$ (dB) ต่ำกว่า -10 dB ในช่วงบริเวณความถี่ 3.1 GHz ตามที่ได้ทำการออกแบบไว้ในขั้นตอน ผลการตอบสนองดังกล่าวดังแสดงรูปที่ 5



รูปที่ 5 ผลการจำลองแบบของค่า $|S_{11}|$ (dB) ที่ได้จากสายอากาศโมโนโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า วงกลมและสามเหลี่ยมก่อนการปรับโครงสร้าง

จากรูปที่ 5 สังเกตได้ว่า สายอากาศโมโนโพลรูปวงกลมมีการตอบสนองกับความถี่ 3.1 GHz มากที่สุด รองลงมาคือรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า และรูปสามเหลี่ยมตามลำดับ ดังแสดงผลคุณสมบัติจากการจำลองแบบของค่าพารามิเตอร์ ๆ ของสายอากาศทั้ง 3 รูปแบบจากรูปที่ 5 ได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติจากการจำลองของค่าพารามิเตอร์ ๆ ของสายอากาศทั้ง 3 รูปแบบ

สายอากาศ	สี่เหลี่ยมผืนผ้า	วงกลม	สามเหลี่ยม
ขนาดของตัวแผ่พลังงาน	$W_2 = 21$ มม. $L_2 = 16$ มม.	$r = 12.32$ มม.	$L_5 = 31.11$ มม.
$ S_{11} $ (dB)	-18.16	-28.97	-14.89
VSWR	1.24:1	1.09:1	1.48:1
Gain (dBi)	3.14	3.78	2.95
BW (GHz)	1.96	2.37	2.16
Z_{Ant} (Ω)	43.91+1.35	53.62+j6.26	40.22+j20.66

3. การออกแบบและการจำลองแบบของสายอากาศโมโนโพลต้นแบบ

การออกแบบโครงสร้างสายอากาศต้นแบบเริ่มต้นจากการนำค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศโมโนโพลรูปเรขาคณิตพื้นฐานทั้ง 3 รูปแบบแสดงดังรูปที่ 4 มาปรับเปลี่ยนโครงสร้างเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพทำให้สายอากาศสามารถรองรับการใช้งานในแถบ

ความถี่กว้างยิ่งยวดได้ กล่าวคือขั้นตอนแรกทำการวิเคราะห์ค่า $|S_{11}|$ (dB) ของสายอากาศทั้ง 3 รูปแบบแสดงดังรูปที่ 5 จากรูปพบว่าที่ย่านความถี่ 3.1 GHz นั้น $|S_{11}|$ (dB) มีค่าต่ำกว่า -10 dB แต่เมื่อพิจารณาที่ย่านความถี่สูงคือที่ความถี่ 4.5 - 10.6 GHz ค่า $|S_{11}|$ (dB) มีค่าสูงกว่า -10 dB ตลอดย่านความถี่ UWB ซึ่งไม่สามารถนำสายอากาศไปใช้งานในย่านความถี่สูงได้ดังนั้น เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวผู้วิจัยทำการประยุกต์ใช้เทคนิคการเซาะพื้นผิวทองแดงบนระนาบกราวด์ทั้งสองด้าน (Naktong et al., 2016; Naktong et al., 2016; Thongbor et al., 2016; Naidu & Malhotra, 2016; Edalati et al., 2017; Bikram et al., 2017; Madanan et al., 2018) ของสายอากาศ ร่วมกับการพิจารณาผลตอบสนองของสายอากาศต่อความถี่กลางของช่วงความถี่ 4.5 - 10.6 GHz (7.5 GHz) ด้วยการวิเคราะห์และคำนวณค่าพารามิเตอร์ของสายอากาศใหม่อีกครั้งด้วยสมการที่ (13-14) (Naidu & Malhotra, 2016; Matin & Sayeed, 2010; Mahmoud & Hamad, 2016)

$$R_m \begin{cases} 45 \left(\frac{\lambda}{W_4} \right)^2 & W_1 \ll \lambda \\ 60 \left(\frac{\lambda}{W_4} \right)^2 & W_1 \gg \lambda \end{cases} \quad (\Omega) \quad (13)$$

$$L_6 = \frac{L_4}{32\pi} \cos^{-1} \left(\frac{Z_o}{R_m} \right) \quad (\text{มม.}) \quad (14)$$

โดยที่

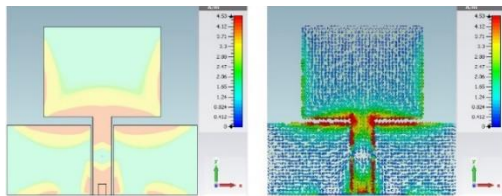
L_6 คือ ความยาวของร่องระนาบกราวด์ (มม.)

R_m คือ ค่าความต้านทานอินพุต (Ω)

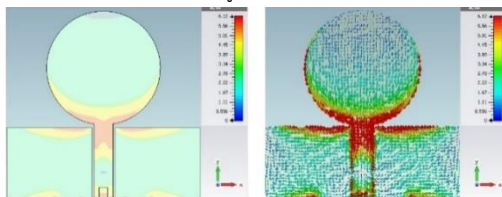
Z_o คือ ค่าอิมพีแดนซ์เฮอร์ตซ์พุด (50Ω)

สำหรับการประยุกต์ใช้เทคนิคการเซาะพื้นผิวทองแดงบนระนาบกราวด์สิ่งสำคัญคือการหาตำแหน่งที่เหมาะสมในการเซาะผิวทองแดง กล่าวคือทำการจำลองแบบหาค่าความหนาแน่นและรูปแบบทิศทางของกระแสบนพื้นผิวทองแดงของตัวสายอากาศเพื่อใช้ประกอบการวิเคราะห์หาตำแหน่งการเซาะพื้นผิวทองแดงที่ส่งผลตอบสนองกับความถี่ที่ต้องการมากที่สุด จากผลจำลองแบบสายอากาศทั้งสามรูปแบบที่ความถี่ 5.5 6.5 7.5 8.5 และ 9.5 GHz พบว่าผลจากการจำลองแบบมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกันคือค่าความหนาแน่นและทิศทางของกระแสที่ปรากฏจะมาก

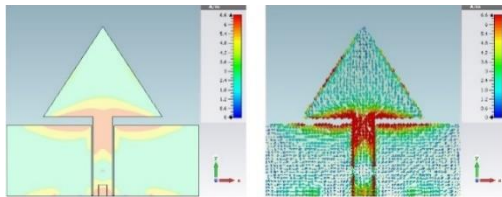
บริเวณเดียวกันคือ บริเวณด้านล่างของตัวแผ่นพลังงานที่เป็นจุดเชื่อมต่อกับสายนำสัญญาณสำหรับป้อนสัญญาณและบริเวณด้านบนแผ่นระนาบกราวด์ทั้งสองด้าน ดังรูปที่ 6 (บริเวณพื้นที่สีแดง) แสดงความหนาแน่นและทิศทางการกระจายที่ได้จากการจำลองแบบที่ความถี่ 7.5 GHz สรุปได้ว่าการปรับโครงสร้างสายอากาศด้วยการเจาะรูบริเวณดังกล่าวจึงส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติที่สำคัญของสายอากาศ (Ruengwaree et al., 2013; Vyas & Singhal, 2014; Jalali & Sedghi, 2014; Bhaskar et al., 2016; Naktong et al., 2016; Naktong et al., 2016; Thongbor et al., 2016) เช่นค่าแบนวิidth อิมพีแดนซ์และอัตราขยาย เป็นต้น มากที่สุด



(ก) ผลการจำลองแบบความหนาแน่นและทิศทางการกระจายของสายอากาศ ไมโครสตรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า



(ข) ผลการจำลองแบบความหนาแน่นและทิศทางการกระจายของสายอากาศ ไมโครสตรูปวงกลม



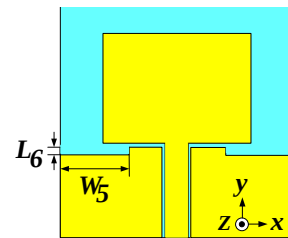
(ค) ผลการจำลองแบบความหนาแน่นและทิศทางการกระจายของสายอากาศ ไมโครสตรูปสามเหลี่ยม

รูปที่ 6 การเปรียบเทียบผลจำลองแบบความหนาแน่นและทิศทางการกระจายของการเจาะพื้นผิวทองแดงของระนาบกราวด์ที่ความถี่ 7.5 GHz

จากการศึกษา คำนวณและวิเคราะห์ผลการจำลองแบบของความหนาแน่นและทิศทางการกระจายของสายอากาศทั้ง 3 รูปแบบและได้ทำการเจาะพื้นผิวทองแดงบริเวณที่กล่าวมา ผลลัพธ์ที่ได้จากการปรับโครงสร้างดังกล่าวได้นำเสนอในหัวข้อถัดไป

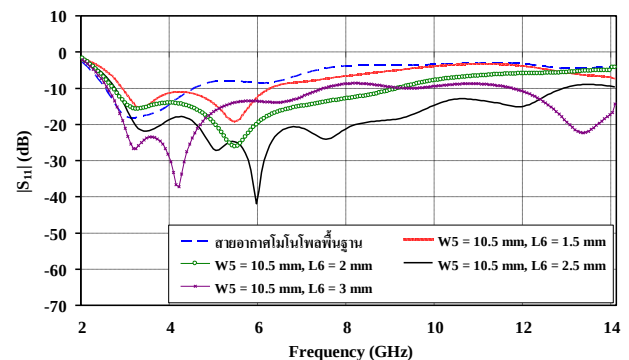
3.1 ผลจากการเจาะพื้นผิวทองแดงของระนาบกราวด์ทั้งสองด้านของสายอากาศที่มีตัวแผ่นพลังงานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

ผลการจำลองแบบของสายอากาศที่มีตัวแผ่นพลังงานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่มีการเจาะพื้นผิวทองแดงบริเวณระนาบกราวด์ทั้งสองด้านแสดงดังรูปที่ 7 จากรูปที่ 7 พบว่าการปรับเจาะโครงสร้างสายอากาศส่งผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงค่า $|S_{11}|$ (dB) พารามิเตอร์ทางกายภาพที่พิจารณาในการเจาะพื้นผิวทองแดงบริเวณระนาบกราวด์ประกอบด้วยพารามิเตอร์ 2 ตัวคือขนาด W_5 และ L_6 เหตุที่ทำการปรับพารามิเตอร์เพียง 2 ตัวเพื่อความไม่ซับซ้อนของโครงสร้างสายอากาศ ตำแหน่งของพารามิเตอร์แสดงดังรูปที่ 7 การปรับขนาด W_5 จะกำหนดค่าคงที่ไว้เท่ากับ 10.5 มม. แต่ทำการปรับขนาด L_6 ตั้งแต่ 1.5 2.0 2.5 และ 3.0 มม. ค่าที่เลือกปรับดังกล่าวเป็นค่าที่ได้ประมาณค่าจากการคำนวณตามสมการ (14) มาในเบื้องต้น



รูปที่ 7 โครงสร้างของสายอากาศไมโครสตรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า

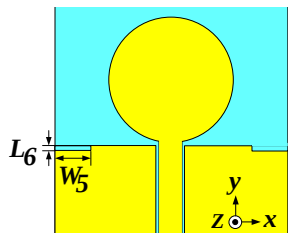
นำผลการจำลองแบบการปรับโครงสร้างของสายอากาศตามรูปที่ 7 มาเปรียบเทียบกับผลแสดงดังรูปที่ 8 พบว่าขนาด W_5 มีขนาดเท่ากับ 10.5 มม. ส่วน L_6 ที่ขนาดเท่ากับ 2.5 มม. ส่งผลต่อค่า $|S_{11}|$ (dB) ทำให้สายอากาศตอบสนองช่วงความถี่ที่ดีที่สุดและครอบคลุมความถี่ที่ใช้งานมากที่สุด มีอัตราส่วนแบนด์วิidth อยู่ที่ 4.58:1 (2.81-12.86 GHz)



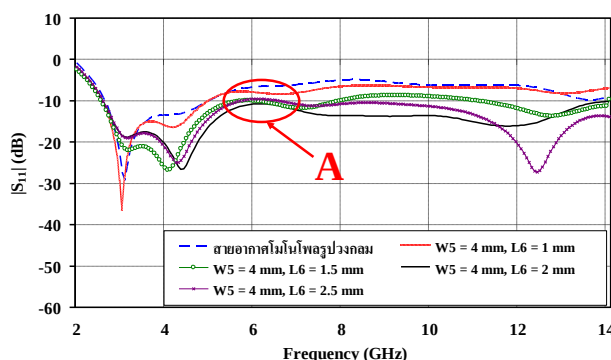
รูปที่ 8 ผลการจำลองแบบค่า $|S_{11}|$ (dB) ของสายอากาศที่มีตัวแผ่พลังงานรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ได้จากการปรับ W_5 และ L_6

3.2 ผลจากการเจาะผิวทองแดงของระนาบกราวด์ทั้งสองด้านของสายอากาศที่มีตัวแผ่พลังงานรูปวงกลม

รูปแบบโครงสร้างสายอากาศรูปแบบที่สองคือสายอากาศโมโนโพลรูปวงกลมที่มีการปรับบริเวณระนาบกราวด์แสดงดังรูปที่ 9 กรณีนี้ได้กำหนดค่าคงที่ให้กับ W_5 เท่ากับ 4 มม. แล้วเลือกปรับขนาด L_6 ตั้งแต่ 1.5 2.0 2.5 และ 3.0 มม. เช่นเดียวกับกรณีแรกจากการจำลองแบบพบว่าที่ขนาด W_5 เท่ากับ 4 มม. และขนาด L_6 เท่ากับ 2 มม. นั้นทำให้ค่า $|S_{11}|$ (dB) ครอบคลุมย่านความถี่ที่ใช้งานมากที่สุดและมีอัตราส่วนแบนด์วิดท์อยู่ที่ 5.30:1 (2.61-13.82GHz) ซึ่งครอบคลุมตามมาตรฐาน IEEE 802.15.3a (3.1-10.6 GHz) ผลการจำลองแบบที่ได้จากการปรับโครงสร้างสายอากาศแสดงดังรูปที่ 10 แต่มีข้อสังเกตในช่วงความถี่ 6.25 GHz นั้น $|S_{11}|$ (dB) ที่ต่ำกว่า -10 dB ค่อนข้างเข้าใกล้เส้น -10 dB มาก ดังแสดงที่จุด A เมื่อนำไปสร้างจริงนั้นจะต้องคำนึงถึงอุปกรณ์ที่ต่อร่วมกับตัวสายอากาศที่ส่งผลต่อการผิดเพี้ยนของ $|S_{11}|$ (dB) ที่เพิ่มมากขึ้น (Naktong et al., 2016; Naktong et al., 2016; Thongbor et al., 2016)

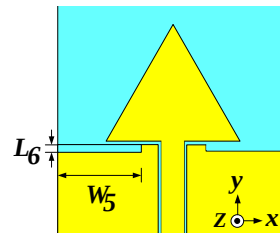


รูปที่ 9 โครงสร้างของสายอากาศโมโนโพลรูปวงกลม

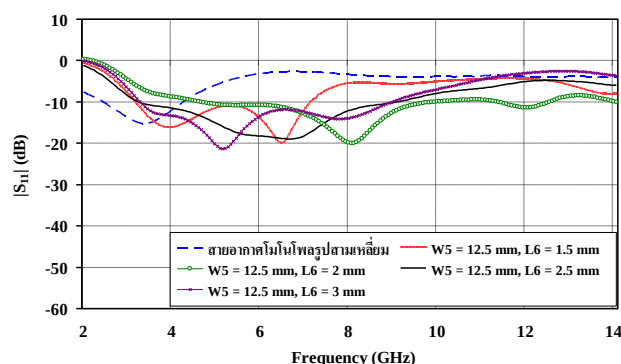


รูปที่ 10 ค่า $|S_{11}|$ (dB) ของสายอากาศที่มีตัวแผ่พลังงานรูปวงกลมเมื่อปรับ W_5 และ L_6

3.3 ผลจากการเจาะพื้นผิวทองแดงของระนาบกราวด์ทั้งสองด้านของสายอากาศที่มีตัวแผ่พลังงานรูปสามเหลี่ยม



รูปที่ 11 โครงสร้างของสายอากาศโมโนโพลรูปสามเหลี่ยม

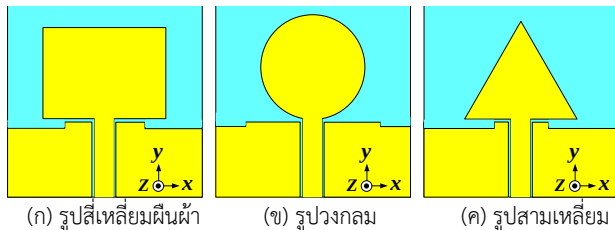


รูปที่ 12 ค่า $|S_{11}|$ (dB) ของสายอากาศที่มีตัวแผ่พลังงานรูปสามเหลี่ยมเมื่อปรับ W_5 และ L_6

โครงสร้างสายอากาศแบบสุดท้ายเป็นโครงสร้างสายอากาศโมโนโพลรูปสามเหลี่ยมแสดงดังรูปที่ 11 โดยกำหนดขนาด W_5 เท่ากับ 12.5 มม. และทำการเลือกปรับขนาด L_6 ตั้งแต่ 1.5 2.0 2.5 และ 3.0 มม. เช่นเดียวกับกรณีแรก จากผลการจำลองแบบแสดงดังรูปที่ 12 พบว่าการปรับโครงสร้างด้วยการเจาะพื้นผิวทองแดงที่ขนาด W_5 เท่ากับ 12.5 มม. และขนาด L_6 เท่ากับ 2.5 มม. ส่งผลให้ค่าของ $|S_{11}|$ (dB) ตอบสนองช่วงความถี่ใช้งานได้ดีที่สุด โดยครอบคลุมความถี่ที่ใช้งานมากที่สุดและมีอัตราส่วนแบนด์วิดท์อยู่ที่ 2.41:1 (3.58 - 8.63 GHz) แต่ยังไม่ครอบคลุมตามย่านความถี่ UWB

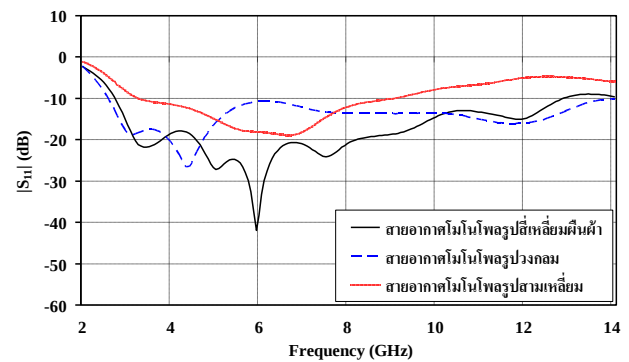
3.4 เปรียบเทียบผลคุณสมบัติจากการจำลองแบบด้วยการเจาะพื้นผิวทองแดงของระนาบกราวด์ทั้งสองด้านของโครงสร้างสายอากาศทั้ง 3 แบบ

การเปรียบเทียบโครงสร้างสายอากาศโมโนโพลทั้ง 3 รูปแบบที่มีการเซาะพื้นผิวทองแดงของระนาบกราวด์แสดงดังรูปที่ 13 ซึ่งผลจากการปรับเปลี่ยนพบว่า การเซาะร่องที่ระนาบกราวด์ของสายอากาศสามารถเพิ่มค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ให้กว้างมากขึ้นตามข้อสันนิษฐานที่ตั้งไว้ก่อนหน้านี้จริง



รูปที่ 13 การเปรียบเทียบโครงสร้างสายอากาศโมโนโพลทั้ง 3 รูปแบบเมื่อมีการเซาะพื้นผิวทองแดงของระนาบกราวด์

ผลสรุปจากการเปรียบเทียบผลการจำลองแบบจากโครงสร้างทั้ง 3 พบว่าโครงสร้างสายอากาศโมโนโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าเหมาะสมต่อการใช้งานในย่านความถี่ UWB มากที่สุด รองลงมาคือ โครงสร้างสายอากาศโมโนโพลรูปวงกลม ถึงแม้ว่าสายอากาศโมโนโพลรูปวงกลมมีแบนด์วิดท์ใช้งานกว้างกว่าแบบสี่เหลี่ยมเพียงเล็กน้อย แต่ข้อด้อยที่พบคือค่า $|S_{11}|$ (dB) ของสายอากาศโมโนโพลรูปวงกลม ประมาณช่วงความถี่ 5 – 7 GHz มีค่าใกล้เคียง -10 dB ในขณะที่รูปทรงสี่เหลี่ยมผืนผ้า นั้นมีค่าต่ำกว่า -20 dB ในช่วงความถี่ดังกล่าวหรือประมาณ -15 dB เกือบตลอดทั้งแถบความถี่ที่ใช้งานตามมาตรฐาน IEEE 802.15.3a สำหรับโครงสร้างสายอากาศโมโนโพลรูปสามเหลี่ยมด้านเท่า นั้นค่า $|S_{11}|$ (dB) สังเกตได้ชัดเจนสายอากาศโครงสร้างกรณีนี้ยังไม่ครอบคลุมรองรับการใช้งานตามมาตรฐาน IEEE 802.15.3a ผลการเปรียบเทียบผลการจำลองแบบทั้ง 3 กรณีสามารถแสดงได้ดังรูปที่ 14 และผลสรุปรายละเอียดต่าง ๆ เพิ่มเติมของผลการจำลองแบบที่ของโครงสร้างสายอากาศโมโนโพลทั้ง 3 แบบ แสดงดังตารางที่ 3

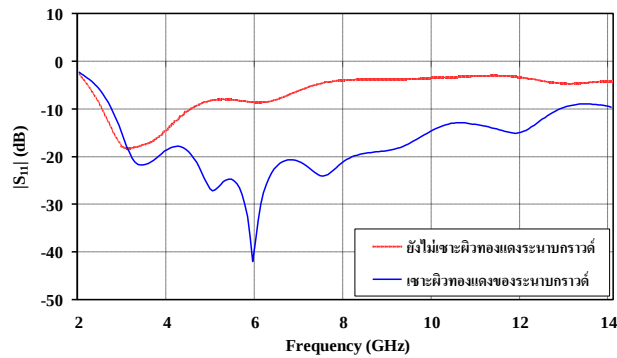


รูปที่ 14 ผลการจำลองแบบค่า $|S_{11}|$ (dB) ของสายอากาศโมโนโพลทั้ง 3 รูปแบบเมื่อมีการเซาะพื้นผิวทองแดงของระนาบกราวด์

ตารางที่ 3 รายละเอียดผลการจำลองแบบที่ได้จากโครงสร้างสายอากาศโมโนโพลทั้ง 3 รูปแบบเมื่อมีการเซาะพื้นผิวทองแดงของระนาบกราวด์

โครงสร้างสายอากาศโมโนโพลทั้ง 3 แบบ	ขนาด		f_c (GHz)	BW (GHz)	BW อัตราส่วน
	W_5 (มม.)	L_6 (มม.)			
รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า	10.5	2.5	7.84	2.81-12.86	4.58:1
รูปวงกลม	4.0	2.0	8.22	2.61-13.82	5.30:1
รูปสามเหลี่ยม	12.5	2.5	6.11	3.58-8.63	2.41:1

จากนั้นทำการเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองแบบของสายอากาศโมโนโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ยังไม่ได้เซาะและเซาะพื้นผิวทองแดงที่ระนาบกราวด์แสดงดังในรูปที่ 15 จากรูปสังเกตได้ว่าการเซาะพื้นผิวทองแดงที่ระนาบกราวด์จะส่งผลโดยตรงกับการขยายแบนด์วิดท์ของสายอากาศคือได้ค่า $|S_{11}|$ (dB) มีค่าต่ำกว่า -10 dB ครอบคลุมตลอดย่านความถี่ 2.81 - 12.86 GHz ซึ่งทำให้สายอากาศดังกล่าวรองรับการใช้งานตลอดย่านความถี่ UWB การเปรียบเทียบค่าอิมพีแดนซ์ของสายอากาศโมโนโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าทั้ง 2 กรณีแสดงดังตารางที่ 4 จากตารางที่ 4 สังเกตได้ว่าการเซาะพื้นผิวทองแดงที่ระนาบกราวด์ส่งผลให้ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศในส่วนค่าจำนวนจินตภาพ ตลอดช่วงความถี่ที่ใช้งานมีค่าใกล้เคียง 0 มากกว่ากรณีไม่เซาะพื้นผิวทองแดง ทำให้เกิดการแมตช์อิมพีแดนซ์ที่ดีกว่า สำหรับค่าจำนวนจริงของอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศมีค่าใกล้เคียงกันกับ Z_0 (50 Ω) มากเช่นเดียวกัน (Naktong et al., 2016; Naktong et al., 2016; Thongbor et al., 2016) ความสัมพันธ์ของค่า $|S_{11}|$ (dB) สามารถคำนวณย้อนกลับเป็นค่าอิมพีแดนซ์แบนด์วิดท์ได้ดังสมการที่ 15-18



รูปที่ 15 การเปรียบเทียบผลการจำลองแบบ $|S_{11}|$ (dB) ของสายอากาศโมโนโพลรูบี่เหลี่ยมที่ยังไม่เจาะและเจาะพื้นผิวทองแดงที่ระนาบกราวด์

$$\Gamma_L = \frac{Z_L - Z_o}{Z_L + Z_o} \quad (15)$$

$$\Gamma l = \Gamma_L e^{-2j\beta l} ; \beta l = (2\pi / \lambda)l \quad (16)$$

$$RL = -20 \log |\Gamma| \quad (\text{dB}) \quad (17)$$

$$Z_{in} = Z_o \frac{Z_L + jZ_o \tan(\beta l)}{Z_o + jZ_L \tan(\beta l)} \quad (\Omega) \quad (18)$$

โดยที่

Γ_L คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนของสายอากาศ

Γl คือ สัมประสิทธิ์การสะท้อนสายนำสัญญาณที่ไม่มี

สูญเสีย

l คือ ความยาวสายอากาศ

Z_L คือ อิมพีแดนซ์ของสายอากาศ (Ω)

Z_o คือ ค่าอิมพีแดนซ์เอาต์พุต (50 Ω)

Z_{in} คือ อิมพีแดนซ์อินพุต (Ω)

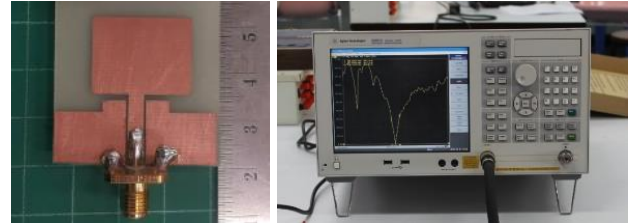
RL คือ การสูญเสียย้อนกลับ (dB)

ตารางที่ 4 การเปรียบเทียบคุณสมบัติค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ของสายอากาศ

f_c	ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์ก่อน การเจาะรู (Ω)	ค่าอินพุตอิมพีแดนซ์หลัง การเจาะรู (Ω)
3 GHz	43.19 + j1.35	57.34 + j0.89
4 GHz	45.85 - j29.42	62.72 - j2.13
5 GHz	32.05 + j28.64	48.09 - j1.65
6 GHz	95.93 - j30.74	43.68 - j8.69
7 GHz	72.47 - j66.11	48.09 - j1.65

8 GHz	13.61 - j23.50	39.91 - j2.81
9 GHz	15.34 - j54.22	45.31 - j9.91
10 GHz	20.14 - j49.08	60.16 - j17.99

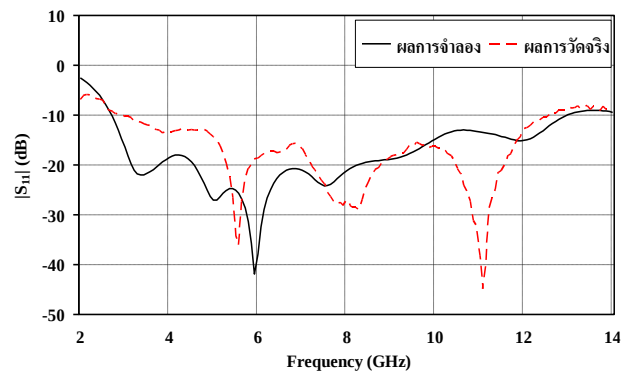
4. การสร้างและผลการทดสอบ



(ก) สายอากาศโมโนโพล

(ข) เครื่องวิเคราะห์โครงข่าย

รูปที่ 16 สายอากาศโมโนโพลรูบี่เหลี่ยมที่มีการเจาะพื้นผิวทองแดงที่ระนาบกราวด์และเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย



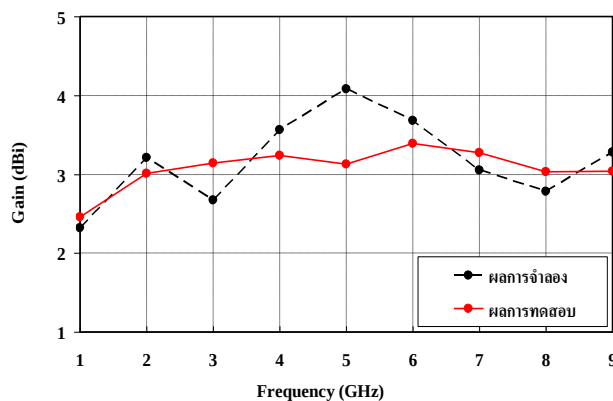
รูปที่ 17 การเปรียบเทียบผลการจำลองแบบและผลการทดสอบ $|S_{11}|$ (dB) ของสายอากาศโมโนโพลรูบี่เหลี่ยมต้นแบบที่ได้นำเสนอ

จากการคำนวณวิเคราะห์โครงสร้างและการออกแบบสายอากาศด้วยโปรแกรมการจำลองแบบจนได้ค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดของสายอากาศโมโนโพลรูบี่เหลี่ยมผืนผ้าที่ป้อนสัญญาณด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วมด้วยเทคนิคการเจาะพื้นผิวทองแดงที่ระนาบกราวด์ดังรูปที่ 7 และนำพารามิเตอร์ที่ได้ดังกล่าวมาประกอบประกอบสร้างสายอากาศจริงแสดงดังรูปที่ 16 (ก) และทำการทดสอบสายอากาศดังกล่าวด้วยเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) รุ่น E5071C แสดงดังรูปที่ 16 (ข) เพื่อวัดหาค่าคุณสมบัติต่าง ๆ มาเปรียบเทียบกับผลการจำลองแบบที่ได้ในส่วนก่อนหน้านี้นี้ คุณสมบัติที่ทดสอบคือ $|S_{11}|$ (dB) ดังแสดงในรูปที่ 17 อัตราขยาย (Gain) ดังแสดงรูปที่ 18 การวัดค่าความสัมพันธ์ของเวลาหน่วงกลุ่ม ดังแสดงในรูปที่ 19 และผลการจำลองแบบกับการทดสอบผลในรูปที่ 20 ผลจากการทดสอบจริง

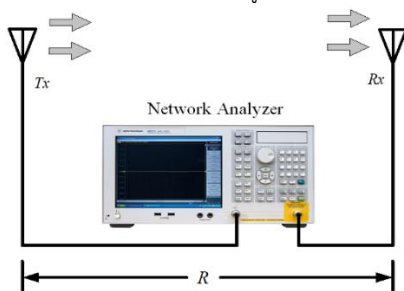
พบว่าสายอากาศโมโนโพลรูปลี่เหลี่ยมที่มีการเซาะพื้นผิวที่ระนาบกราวด์มีอัตราส่วนแบนด์วิดท์ 4.13: 1 (2.97-12.26 GHz) มีอัตราขยายเฉลี่ยตลอดช่วงความถี่ (3-11 GHz) ที่เมื่อทำการเปรียบเทียบระหว่างผลการจำลองแบบและผลการทดสอบมีค่าใกล้เคียงคือมีค่าเท่ากับ 3.07 dBi ผลการเปรียบเทียบค่าคุณสมบัติอื่น ๆ ของสายอากาศระหว่างผลการจำลองแบบและผลการทดสอบจริงแสดงได้ดังตารางที่ 5 จากตารางพบว่าค่าทั้งสองมีค่าที่ใกล้เคียงกัน

ตารางที่ 5 การเปรียบเทียบผลการจำลองแบบและการทดสอบของสายอากาศโมโนโพลรูปลี่เหลี่ยมที่ได้นำเสนอ

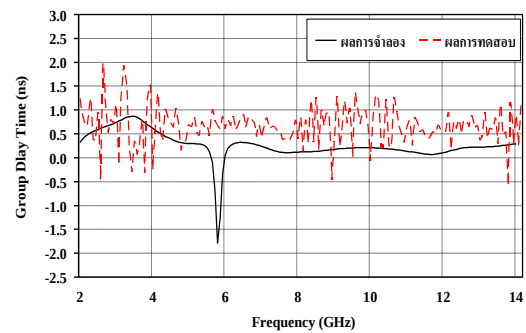
สายอากาศ	f_c (GHz)	Gain (dBi)	BW (GHz)	BW Ratio
จำลองผล	7.83	3.18	2.81-12.86	4.58:1
ผลการทดสอบ	7.61	3.07	2.97-12.26	4.13:1



รูปที่ 18 การเปรียบเทียบผลการจำลองแบบและผลการทดสอบจริงอัตราขยายของสายอากาศโมโนโพลรูปลี่เหลี่ยมต้นแบบ



รูปที่ 19 การติดตั้งระบบส่งสัญญาณเพื่อทดสอบหาค่าความสัมพันธ์ของเวลาหน่วงกลุ่ม

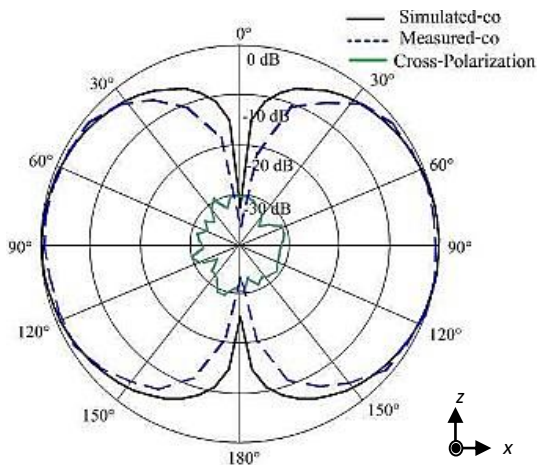


รูปที่ 20 การเปรียบเทียบผลการจำลองแบบและผลการทดสอบค่าความสัมพันธ์ของเวลาหน่วงกลุ่มของสายอากาศโมโนโพลรูปลี่เหลี่ยมต้นแบบ

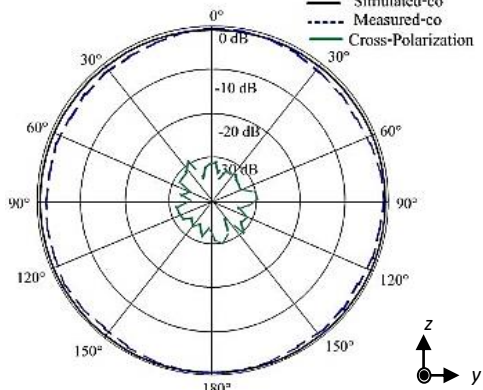
สำหรับการศึกษาผลกระทบค่าความสัมพันธ์ของเวลาหน่วงกลุ่ม (group delay time) ได้ทำการติดตั้งระบบส่งสัญญาณเพื่อทำการทดสอบค่าดังกล่าวแสดงดังรูปที่ 19 เนื่องจากมาตรฐานในการรับส่งสัญญาณพัลส์ที่ส่งข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพต้องมีการแกว่งของค่าการหน่วงเวลาไม่เกิน ± 2 ns ตลอดย่านความถี่ UWB เมื่อทำการทดสอบด้วยการปรับระยะห่าง R ตั้งแต่ 10 20 30 40 และ 50 ซม. พบว่าที่ระยะห่าง R เท่ากับ 30 ซม. ส่งผลต่อค่าประสิทธิภาพที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการประยุกต์ใช้งานรับส่งสัญญาณพัลส์ ทำให้ผลตอบสนองการรับส่งข้อมูลถูกต้องตามที่ต้องการ การเปรียบเทียบผลการจำลองแบบและผลการทดสอบค่าความสัมพันธ์ของเวลาหน่วงกลุ่มในระยะห่าง R เท่ากับ 30 ซม. แสดงดังรูปที่ 20

การเปรียบเทียบผลการจำลองแบบและทดสอบจริงของแบบรูปการแผ่พลังงาน ในระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กที่ช่วงความถี่ต่ำ (3.1 GHz) ความถี่กลาง (6.85 GHz) และความถี่สูง (10.6 GHz) แสดงดังรูปที่ 21 ถึง 23 การเปรียบเทียบผลดังกล่าวเพื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงของแบบรูปการแผ่พลังงานของสายอากาศ ซึ่งพบว่าสายอากาศมีแบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ต่ำมีลักษณะเป็นแบบรอบทิศทางทั้งผลการจำลองแบบและทดสอบดังแสดงในรูปที่ 21

กรณีการเปรียบเทียบผลการจำลองแบบและทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่กลางและความถี่สูง พบว่าผลที่ได้จากการจำลองแบบให้แบบรูปการแผ่พลังงานเป็นแบบรอบทิศทางแต่ขณะที่ได้ผลจากการทดสอบจริงกลับมีลักษณะเป็นแบบสองทิศทางดังแสดงในรูปที่ 22 และ 23 รายละเอียดค่าต่าง ๆ ด้านความถี่ มุม ขนาดของลำคลื่นหลัก และค่า HPBW ของระนาบสนามไฟฟ้าและระนาบสนามแม่เหล็กแสดงดังตารางที่ 6

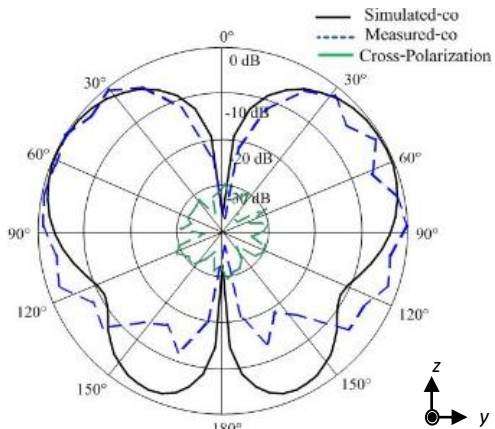


(ก) ระบายสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 3.10 GHz

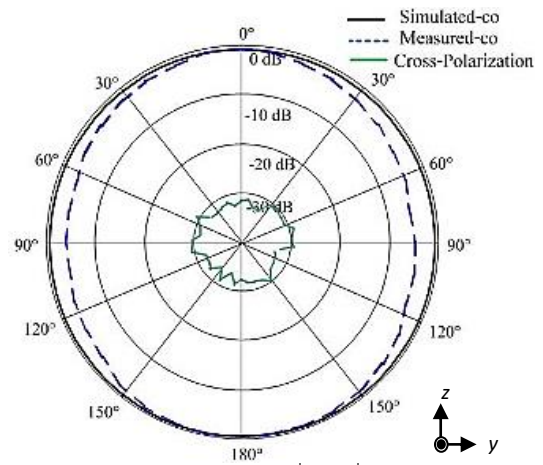


(ข) ระบายสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 3.10 GHz

รูปที่ 21 การเปรียบเทียบผลการจำลองแบบและทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 3.10 GHz

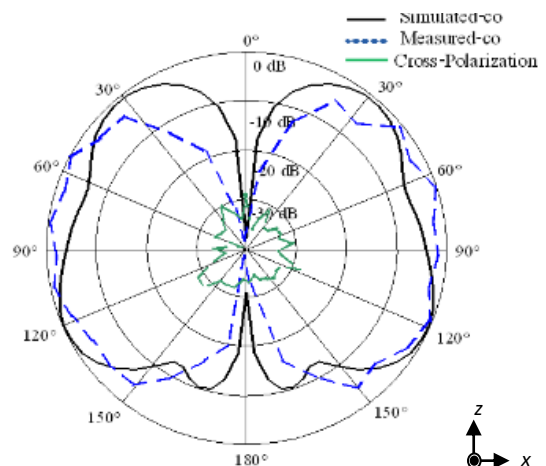


(ก) ระบายสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 6.85 GHz

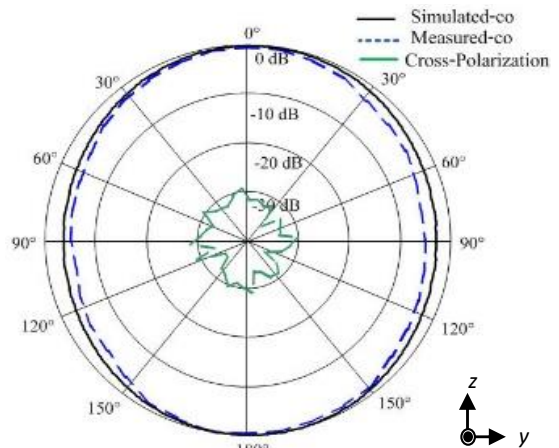


(ข) ระบายสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 6.85 GHz

รูปที่ 22 การเปรียบเทียบผลการจำลองแบบและทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 6.85 GHz



(ก) ระบายสนามไฟฟ้าที่ความถี่ 10.60 GHz



(ข) ระบายสนามแม่เหล็กที่ความถี่ 10.60 GHz

รูปที่ 23 การเปรียบเทียบผลการจำลองแบบและทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงานที่ความถี่ 10.60 GHz

ตารางที่ 6 แบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าและสนามแม่เหล็ก

ระนาบ	ความถี่	ลำคลื่นหลัก		HPBW	
		จำลอง	ทดสอบ	จำลอง	ทดสอบ
สนามไฟฟ้า	3.10 GHz	90°	114°	150°	120°
	6.85 GHz	54°	52°	90°	100°
	10.60 GHz	120°	118°	50°	95°
สนามแม่เหล็ก	3.10 GHz	0°	180°	360°	360°
	6.85 GHz	180°	0°	360°	313°
	10.60 GHz	180°	0°	360°	352°

การเปรียบเทียบผลกำลังงานที่ได้รับ (power received) จากการทดสอบที่สนามระยะไกล (far field) ที่ระยะเท่ากับ 1 ม. การที่เลือกระยะ 1 ม. เนื่องจากระยะดังกล่าวส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของค่ากำลังงานได้ชัดเจนมากที่สุดของสายอากาศไดโพลกับสายอากาศที่นำเสนอ ตั้งแต่ช่วงความถี่ 3-11 GHz ดังแสดงรูปที่ 24 นำมาคำนวณด้วยสมการที่ 19 (Balanis, 2005) กำหนดให้ภาคส่งกำลังงานเท่ากับ 0 dBm พบว่ากำลังงานที่ได้รับเมื่อพิจารณาเป็นสายอากาศไดโพลมีกำลังงานเฉลี่ยประมาณ -54.99 dBm ขณะที่สายอากาศที่นำเสนอมีกำลังงานที่ได้รับเฉลี่ยประมาณ -55.19 dBm สายอากาศที่นำเสนอมีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับสายอากาศไดโพลเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 99.63

$$P_r = G_t G_r P_t \left(\frac{\lambda}{4\pi r} \right)^2 \quad (\text{dBm}) \quad (19)$$

โดยที่

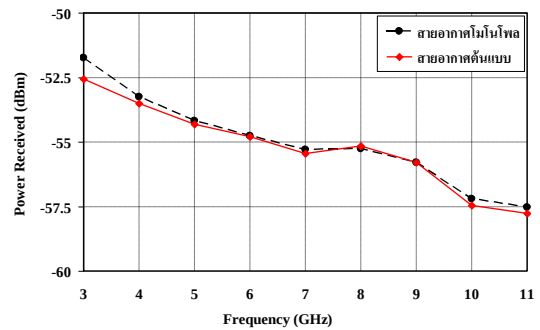
P_t คือ กำลังงานภาคส่ง (dBm)

P_r คือ กำลังงานภาครับ (dBm)

G_t คือ กำลังงานภาคส่งของสายอากาศ (dBi)

G_r คือ กำลังงานภาครับของสายอากาศ (dBi)

r คือ ระยะทางภาคส่งถึงภาครับ (ม.)



รูปที่ 24 ผลการทดสอบค่ากำลังงานภาครับของสายอากาศต้นแบบ

ตารางที่ 7 การเปรียบเทียบโครงสร้างสายอากาศไดโพล (Chang et al., 2005; Jan et al., 2006; Song et al., 2007; Naktong & Ruengwaree, 2011; Kaewchan & Ruengwaree, 2011; Moeikham & Akkaraekthalin, 2011; Naji, 2013; Ruengwaree et al., 2013; Vyas & Singhal, 2014; Jalali & Sedghi, 2014; Bhaskar et al., 2016; Naktong et al., 2016; Naktong et al., 2016; Thongbor et al., 2016; Naidu & Malhotra, 2016; Edalati et al., 2017; Bikram et al., 2017; Madanan et al., 2018)

งานวิจัย	โครงสร้างสายอากาศ		BW Ratio/ % BW	ความถี่ (GHz)
	รูปร่าง	ขนาด (mm)		
[4]		32x22.5x0.8	4.74:1	3.80-18.20
[5]		40x40x0.8	6.54:1	2.28-14.90
[6]		28x34x1.6	1.05:1 1.85:1	2.36-2.50 3.45-6.40
[7]		38x45x0.764	9.67:1	2.49 - 24.09
[8]		30x30x0.764	5.27:1	2.71-14.28
[9]		19.22x36x1.6	5.26:1	2.85 -15
[10]		20x18x1.6	2.10:1	3.80-8
[11]		30x30x0.764	3.47:1	3.09 - 10.73
[12]		30 x 32 x 1.6	3.5:1	2.60-9.10
[13]		14x18x1	4.34:1	2.95-12.81
[14]		16x24x1.6	3.14	3.50-10.90

ตารางที่ 7 (ต่อ)

งานวิจัย	โครงสร้างสายอากาศ		BW Ratio/ % BW	ความถี่ (GHz)
	รูปร่าง	ขนาด (mm)		
[15]		34x40x0.764	3.88:1	3.09-12
[16]		34x36x0.764	4.53:1	2.42 - 10.98
		34x36x0.764	4.03	2.79-11.25
		34x36x0.764	2.04:1 1.23:1	2.58-5.27 7.64-9.44
[17]		34x34x0.764	4.81	2.78-13.38
[18]		20x24x1.6	1.05:1 3.53:1	2.40-2.52 3-10.60
[19]		43.9x50.13x1.58	3.08:1	2.50-7.70
[20]		24x32.4x1.6	6.35:1	1.70-10.80
[21]		12x30x1.6	3.97:1	2.90-11.50
งานวิจัยนี้		34x34x0.764	4.13:1	2.97-12.26

จากการจำลองแบบโครงสร้างสายอากาศของงานจนได้ค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดและนำพารามิเตอร์ที่ได้มาสร้างสายอากาศจริง งานวิจัยนี้พบว่าสายอากาศโมโนโพลรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าส่งผลดีที่สุดและนำไปปรับโครงสร้างงานร่วมกับการเจาะพื้นผิวทองแดงที่ระนาบกราวด์เพื่อขยายแบนด์วิดท์ให้รองรับการใช้งานย่าน UWB จากนั้นนำมาเปรียบเทียบกับสายอากาศที่มีการปรับโครงสร้างเพื่อขยายแบนด์วิดท์สำหรับรองรับการใช้งานย่าน UWB กับงานวิจัยที่มีในอดีตที่ผ่านมา (Chang et al., 2005; Jan et al., 2006; Song et al., 2007; Naktong & Ruengwaree, 2011; Kaewchan & Ruengwaree, 2011; Moeikham & Akkaraekthalin, 2011; Naji, 2013; Ruengwaree et al., 2013; Vyas & Singhal, 2014; Jalali & Sedghi, 2014; Bhaskar et al., 2016; Naktong et al., 2016; Naktong et al., 2016; Thongbor et al., 2016; Naidu & Malhotra, 2016; Edalati et al., 2017; Bikram et al., 2017; Madanan et al., 2018) พบว่าสายอากาศที่นำเสนอมีข้อดีคือมีความไม่ซับซ้อนและ

มีขั้นตอนในการปรับโครงสร้างที่น้อยกว่างานวิจัยอื่น ๆ ที่นำมาเปรียบเทียบ ผลการเปรียบเทียบแสดงรายละเอียดแสดงดังตารางที่ 7

5. สรุป

งานวิจัยนี้นำเสนอการออกแบบและวิเคราะห์โครงสร้างสายอากาศโมโนโพลที่ป้อนพลังงานด้วยท่อนำคลื่นระนาบร่วมสำหรับการประยุกต์ใช้งานกับแถบความถี่กว้างยิ่งยวด ย่านความถี่ใช้งานของสายอากาศวิเคราะห์และพิจารณาจากค่าสัมประสิทธิ์การสะท้อนกลับ $|S_{11}|$ (dB) เริ่มจากการพิจารณาผลจากการจำลองแบบของโครงสร้างสายอากาศที่เหมาะสมจากตัวแผ่นพลังงานที่มีรูปทรงเรขาคณิตพื้นฐาน 3 รูปแบบ คือรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า วงกลม และสามเหลี่ยมตามลำดับ เพื่อนำมาพัฒนาเพิ่มแบนด์วิดท์ให้กว้างรองรับการใช้งานแถบความถี่กว้างยิ่งยวด ที่ครอบคลุมความถี่ที่ใช้งานตั้งแต่ความถี่ 3.1-10.6 GHz ตามมาตรฐาน IEEE 802.15.3a ด้วยการเจาะพื้นผิวทองแดงที่ระนาบกราวด์เพียงชั้นเดียว ข้อดีของเทคนิคดังกล่าวคือสามารถมีขั้นตอนการปรับโครงสร้างสายอากาศไม่มีความซับซ้อน

จากผลการศึกษาโครงสร้างสายอากาศโมโนโพลที่มีตัวแผ่นพลังงาน รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า รูปวงกลม และรูปสามเหลี่ยม ร่วมกับการปรับโครงสร้างด้วยการเจาะพื้นผิวทองแดงที่ระนาบกราวด์ทั้งสองฝั่ง พบว่าโครงสร้างสายอากาศที่มีการเพิ่มแบนด์วิดท์และรองรับการใช้งานย่าน UWB ได้เหมาะสมที่สุดคือรูปสี่เหลี่ยมผืนผ้า มีร้อยละแบนด์วิดท์ก่อนทำการปรับโครงสร้างด้วยการเจาะพื้นผิวทองแดงที่ระนาบกราวด์อยู่ที่ร้อยละ 57.14 ครอบคลุมการใช้งานได้ตั้งแต่ย่านความถี่ 2.45 - 4.41 GHz และเมื่อทำการปรับโครงสร้างด้วยการเจาะพื้นผิวทองแดงที่ระนาบกราวด์มีอัตราส่วนแบนด์วิดท์อยู่ที่ 4.53: 1 หรือคิดเป็นร้อยละ 122.07 ครอบคลุมการใช้งานตั้งแต่ย่านความถี่ 2.97 - 12.26 GHz ซึ่งกว้างกว่าโครงสร้างสายอากาศที่ไม่มีการเจาะพื้นผิวทองแดงประมาณ 2.13 เท่า มีอัตราขยายเฉลี่ยตลอดช่วงความถี่ (3-11 GHz) เท่ากับ 3.07dBi และมีค่าประสิทธิภาพกำลังงานภาครับของสายอากาศต้นแบบใกล้เคียงสายอากาศโมโนโพลเฉลี่ยเท่ากับ ร้อยละ 99.63 ข้อดีของสายอากาศที่นำเสนอในงานวิจัยนี้คือมีโครงสร้างที่มีความซับซ้อนน้อยกว่างานวิจัยที่ผ่านมา

จากผลจากการจำลองแบบและทดสอบแบบรูปการแผ่พลังงาน พบว่าเมื่อความถี่ที่ประยุกต์ใช้งานมีค่าเพิ่มสูงขึ้นมีแนวโน้มที่แบบ

รูปการแผ่พลังงานจะเบี่ยงเบนเป็นไปในลักษณะสองทิศทางเมื่อพิจารณาแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามแม่เหล็ก และเมื่อพิจารณาแบบรูปการแผ่พลังงานในระนาบสนามไฟฟ้าพบว่าที่ความถี่ปรับเพิ่มสูงขึ้นแบบรูปการแผ่พลังงานจะมีแนวโน้มบ่งชี้ทิศทางไปทางด้านบนมากขึ้นแทนที่จะออกไปทางด้านข้าง ตัวอย่างสำหรับประโยชน์ของสายอากาศในกลุ่มรูปแบบที่นำเสนอในงานวิจัยนี้พบว่ามีความนิยมนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านการแพทย์โดยนำสายอากาศติดตั้งบนร่างกายเพื่อวัดหาความผิดปกติของกล้ามเนื้อหรือหลอดเลือดในร่างกายหรือเป็นเครื่องมือตรวจรู้สำหรับช่วยวิเคราะห์หาโรคต่าง ๆ ส่วนในด้านอื่นได้มีการนำมาใช้เป็นเครื่องมือช่วยวิเคราะห์หาตำแหน่งพื้นที่ที่เป็นพื้นที่ปิดเสียงอันตรายเพื่อทำการสำรวจพร้อมเฝ้าตรวจรักษาความปลอดภัยเพื่อลดอันตรายที่อาจเกิดในพื้นที่ดังกล่าวอย่างถูกต้องรวดเร็วและมีประสิทธิภาพตามที่ต้องการและสำหรับด้านการส่งสัญญาณสื่อสารไร้สายในอนาคตใช้งานติดตั้งสายอากาศร่วมกับอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ความถี่สูงเพื่อนำหน้าที่ส่ง-รับสัญญาณแบบรองรับข้อมูลขนาดใหญ่ เป็นต้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ให้ความอนุเคราะห์การใช้โปรแกรม CST เพื่อจำลองแบบและมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ศูนย์กลางในส่วนเครื่องวิเคราะห์โครงข่าย (Network Analyzer) รุ่น E5071C ในการทดสอบผลงานวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- Akkaraekthalin, P. (1994). *Microwave circuit design* Mister Copy. King Mongkut's University of Technology North Bangkok.
- Balanis, C. A. (2005). *Antenna theory and design* (3rd ed.). John Wiley & sons New Jersey.
- Bhaskar, S., Brar, R. S., & Singh, A. K. (2016, December 9-11). *Compact planar rectangular monopole antenna for Bluetooth and UWB applications* [Paper presentation]. In 2016 IEEE Uttar Pradesh Section International Conference on Electrical, Computer and Electronics Engineering (UPCON), Varanasi, India.
- Bikram, B., Amit, K., Basant, P., Tejraj, G., & Dharti R. S., (2017) Design of CPW- Fed Triangular Shaped UWB Antenna for Multiband Applications. *International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET)*, 4(7), 2123-2128.
- Bustamante, P., Weiss, M. B., & Sicker, D. (2017, March 6-9). *Analysis of the Experimental Licenses of the Federal Communication Commission* [Paper presentation]. In IEEE International Symposium on Dynamic Spectrum Access Networks, Piscataway, USA.
- Chang, D. C., Liu, M. Y., & Lin, C. H. (2005, July 3-8). *A CPW-fed U type monopole antenna for UWB applications* [Paper presentation]. In 2005 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Washington, USA.
- Coase, R. H. (2013). *The federal communications commission*. In Private and Common Property.
- Edalati, A., Shao, W., McCollough, T., & McCollough, W. (2017). A novel cavity backed monopole antenna with UWB unidirectional radiation. *Progress in Electromagnetics Research*, 72, 1-13.
- Jalali, M., & Sedghi, T. (2014). Very compact UWB CPW-fed fractal antenna using modified ground plane and unit cells. *Microwave and Optical Technology Letters*, 56(4), 851-854.
- Jan, J. Y., Kao, J. C., Cheng, Y. T., Chen, W. S., & Chen, H. M. (2006, July 9-14). *CPW-fed wideband printed planar monopole antenna for ultra-wideband operation* [Paper presentation]. In 2006 IEEE Antennas and Propagation Society International Symposium, Albuquerque, Mexico.
- Kaewchan, B., & Ruengwaree, A. (2011). *Stepped grooving with half-circle stub on ground plane monopole antenna for UWB application*. http://ap-s.ei.tuat.ac.jp/isapx/2011/pdf/%5BWeE35%5D%20A01_1036.pdf
- Madanan, G., KRISHNA, D. D., & Aanandan, C. K. (2018). A Compact Rectangular Monopole Antenna Design with a Novel Feed for an Improved UWB Performance. *RADIOENGINEERING*, 27(1), 63-69.
- Mahmoud, N., & Hamad, E. K. (2016, February 22-25). *Tri-band microstrip antenna with L-shaped slots for bluetooth/WLAN/WiMAX applications* [Paper presentation]. In 2016 33rd National Radio Science Conference (NRSC), Aswan, Egypt.
- Matin, M. A., & Sayeed, A. I. (2010). A design rule for inset-fed rectangular microstrip patch antenna. *WSEAS Transactions on Communications*, 9(1), 63-72.
- Moeikham, P., & Akkaraekthalin, P. (2011, May 17-19). *A compact ultrawideband monopole antenna with tapered CPW feed and slot stubs* [Paper presentation]. In The 8th Electrical

- Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI) Association of Thailand-Conference 2011, Khon Kaen, Thailand.
- Naidu, P. V., & Malhotra, A. (2016). A compact stair case shaped monopole dual band antenna for bluetooth/WLAN and UWB applications. *International Journal of Microwave and Optical Technology*, 11(1), 64-71.
- Naji, D. K. (2013). Compact Broadband CPW-fed Taper-shaped Monopole Antenna with L- slots for C- band Applications. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 3, 136-143.
- Naktong, W., & Ruengwaree, A. (2011, May 17-19). *Increasing bandwidth of flambeau-shape monopole antenna for UWB application* [Paper presentation]. In The 8th Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI) Association of Thailand-Conference 2011, Khon Kaen, Thailand.
- Naktong, W., Apinya, I., Korsing, S., & Ruengwaree, A. (2016). *Mushroom Shaped Monopole Antenna which has Tuning on Ground Plane with Slot Etching Technique is Two Layers of Stair for Applying Ultra Wideband (UWB) Technology* [Paper presentation]. 10th South East Asian Technical University Consortium (SEATUC) Symposium, at Shibaura Institute of Technology, Tokyo, Japan.
- Naktong, W., Korsing, S., Boonmaitree, P., Dabbug, P., & Ruengwaree, A. (2016 June 28 – July 1). *Study of geometry-shaped monopole antenna with step- shaped etching technique on ground plane* [Paper presentation]. In 2016 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Chiang Mai, Thailand.
- Prasanna, K. L., & Sridevi, B. R. D. P. (2014). Design of CPW-Fed Monopole Antenna with L- shape and T-shape for WLAN/Wi-MAX Applications. *International Journal of Scientific & Engineering Research*, 5, 594-598.
- Ruengwaree, A., Naktong, W., & Namsang, A. (2013, October 23-25). *A TE-shaped monopole antenna with semicircle etching technique on ground plane for UWB applications* [Paper presentation]. In 2013 Proceedings of the International Symposium on Antennas & Propagation, Nanjing, China.
- Sharma, P., Koul, S. K., & Chandra, S. (2008). Ka-band triangular patch antenna on micromachined high- k substrate. *IEICE transactions on communications*, 91(6), 2073-2076.
- Song, Y., Jiao, Y. C., Zhao, G., & Zhang, F. S. (2007). Multiband CPW- fed triangle- shaped monopole antenna for wireless applications. *Progress In Electromagnetics Research*, 70, 329-336.
- Thongbor, P., Ruengwaree, A., Pirajanchai, V., Naktong, W., & Fhaphiem, N. (2016 June 28 – July 1). *Rectangular monopole antenna with arrow-shaped slot etching for UWB- MIMO application* [Paper presentation]. In 2016 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI- CON), Chiang Mai, Thailand.
- US Federal Communications Commission. (2002). *FCC Revision of part 15 of the commission's rules regarding ultra-wideband transmission systems: First report and order*. Technical Report.
- Vishwakarma, R. K., Ansari, J. A., & Meshram, M. K. (2006). Equilateral triangular microstrip antenna for circular polarization dual-band operation. *Indian Journal of Radio and Space Physics*, 35, 293-296.
- Vyas, K., & Singhal, P. K. (2014). Bandwidth Enhancement in CPW Fed Rectangular Patch Antenna by Modified Ground Structure. *International Journal of Modern Communication Technologies and Research*, 2(2), 25-28.

การประยุกต์ใช้วิธีเชิงพันธุกรรมสำหรับการจัดตารางการผลิตระบบการผลิตแบบไหลเลื่อนผสม A Genetic Algorithm for Hybrid Flow Shop Scheduling

สัจจิตา ทองเกิด*, ชูศักดิ์ พรสิงห์
Sunjita Thongkerd*, Choosak Pornsing

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร
Department of Industrial Engineering Management, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University

*Corresponding author e-mail: Thongkerd_s@silpakorn.edu

(Received: 22 January 2020, Revised: 19 March 2020, Accepted: 20 April 2020)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่ช่วยในการจัดตารางการผลิตให้กับระบบการผลิตแบบไหลเลื่อนผสมของบริษัทจำหน่ายเหล็กแผ่น แต่ละคำสั่งซื้อจะต่างกันในเรื่องของขนาดและปริมาณตามความต้องการของลูกค้า ซึ่งมีกระบวนการผลิต 3 กระบวนการหลัก ได้แก่ กระบวนการตัดซอย กระบวนการตัดเฉือน กระบวนการตัดแผ่น โดยแต่ละกระบวนการมีจำนวนเครื่องจักร และเวลาในการผลิตที่ไม่เท่ากัน ภายใต้เงื่อนไขการผลิตที่ว่า ทุก ๆ คำสั่งซื้อ ต้องผ่านกระบวนการผลิตตามลำดับ แต่สามารถเลือกทำงานบนเครื่องจักรใดก็ได้ ในกระบวนการเดียวกัน ดังนั้นผู้วิจัยจึงทำการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาเวลาปิดงาน (Makespan: C_{max}) และเวลาที่งานอยู่ในระบบโดยเฉลี่ย (Average Flow Time: $\bar{F}$) ต่ำที่สุด โดยทดลองนำขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมไปใช้ในการจัดตารางการผลิตให้กับคำสั่งซื้อตัวอย่างจำนวน 5, 10, 15 และ คำสั่งซื้อ 20 เพื่อเปรียบเทียบกับวิธีที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน และวิธีการหาค่าแม่นยำ ผลการทดลองพบว่าขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมมีประสิทธิภาพดีที่สุด เมื่อทำการเปรียบเทียบกับวิธีที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน ได้เวลาปิดงานโดยเฉลี่ยลดลง 12.99% เวลาที่งานอยู่ในระบบโดยเฉลี่ยลดลง 26.48% และเวลาในการวางแผนการผลิตลดลง 58.74% สรุปแล้วขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมช่วยลดเวลาปิดงาน เวลาที่งานอยู่ในระบบโดยเฉลี่ย เวลาในการวางแผนการผลิต ได้อย่างมีนัยสำคัญ

คำสำคัญ: การจัดตารางการผลิต ระบบการผลิตแบบไหลเลื่อนผสม ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

Abstract

The objective of this research is to apply a genetic algorithm for a hybrid flow shop scheduling problem in a steel plate production company. The manufacturing orders from customers are different in the characters of sizes and quantities. Besides, there are 3 main processes; slitter process, shear process, and squared shear process. Moreover, processes have unequal number of machines and production rates. The conditions are the products must go thru all processes sequentially and can select any machines in the process. The author applied a genetic

algorithm with two objective functions; minimized makespan (C_{max}) and minimized mean flowtime ($\bar{F}$). The algorithm was tested with the problem size of 5, 10, 15, and 20 orders in order to be compared with the current method of the company. The results showed that the genetic algorithm could decreased the average makespan by 12.99% and decreased the average mean flowtime by 26.48%. Moreover, it found that the production planning time was decreased by 58.74% when compared with the current method. In conclusion, the genetic algorithm could reduce makespan, mean flowtime, and production planning time significantly.

Keywords: Production Scheduling, Hybrid Flow Shop, Genetic Algorithm

1. บทนำ

ในอดีตบริษัทผู้ผลิตมักคิดว่าแผนการผลิตเป็นเพียงส่วนประกอบย่อยที่มีหน้าที่ผลิตสินค้าเพียงอย่างเดียว แต่เนื่องจากการแข่งขันในปัจจุบัน ทำให้การผลิตเป็นปัจจัยสำคัญที่ใช้ในการต่อสู้เพื่อความอยู่รอดของบริษัท และสภาพแวดล้อมในการประกอบธุรกิจได้เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม โดยความต้องการของผู้บริโภคมีความหลากหลายขึ้น ส่งผลให้ต้นทุนในการผลิตสูงขึ้นตามลำดับ

จากปัญหาด้านต้นทุนที่สูงขึ้นทำให้ผู้ผลิตต้องพยายามหาแนวทางที่จะลดต้นทุนในการผลิตให้ลดลงหรือเท่าเดิม จึงได้มีการนำระบบการผลิตที่ชื่อว่า ระบบการผลิตแบบไหลเลื่อนผสม (Hybrid Flow Shop: HFS) มาช่วยในการแก้ปัญหาครั้งนี้ โดย Ruiz et al. (2010) Ribas et al. (2010) Morais et al. (2014) ได้ให้นิยามว่า เป็นระบบการผลิตแบบไหลเลื่อน (Flow Shop) ที่มีเครื่องจักรหลาย ๆ เครื่องทำงานแบบคู่ขนาน (Multiple Parallel Machines) ซึ่งระบบการผลิตแบบไหลเลื่อนผสมจะเน้นการผลิตผลิตภัณฑ์ที่มีความหลากหลายในปริมาณมาก (Kahraman et al., 2010; Engin et al., 2011; Carlier & Neron, 2000; Songserm et al., 2018; Karthik & Prabahara, 2014; Jarbouy et al., 2013) เพื่อช่วยให้ต้นทุนในการผลิตต่ำที่สุด และตอบสนองความต้องการของผู้บริโภคในปัจจุบัน

แต่เนื่องจากความซับซ้อนของระบบการผลิตแบบไหลเลื่อนผสม ส่งผลให้ระบบการผลิตมีความซับซ้อนมากขึ้น (Ibrahim et al., 2013) ทำให้ประสบปัญหาในเรื่องของการจัดตารางการ

ผลิตให้มีความเหมาะสม เช่น ปัญหาการจัดตารางการผลิตของเครื่องจักรที่มีการจัดเรียงแบบขนาน (Parallel Machine Scheduling: PMS) หรือ ปัญหาการจัดตารางการผลิตแบบไหลเลื่อน (Flow Shop Scheduling: FSS) เป็นต้น จากตัวอย่างปัญหาที่กล่าวมาถือเป็นปัญหาที่มีขนาดใหญ่และมีตัวแปรจำนวนมาก ส่งผลให้การแก้ปัญหาด้วยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (Mathematical Model) ไม่เหมาะสมเนื่องจากใช้เวลาในการหาคำตอบที่ยาวนาน หรืออาจจะหาคำตอบไม่ได้เลย ดังนั้นการแก้ปัญหาขนาดใหญ่หรือปัญหาที่มีตัวแปรจำนวนมาก นิยมใช้วิธีฮิวริสติก (Heuristic) หรือวิธีเมตาฮิวริสติก (Metaheuristic) เข้ามาช่วยในการแก้ปัญหานี้ (Yilmaz et al., 2008; Chaimanee & Supitak, 2013)

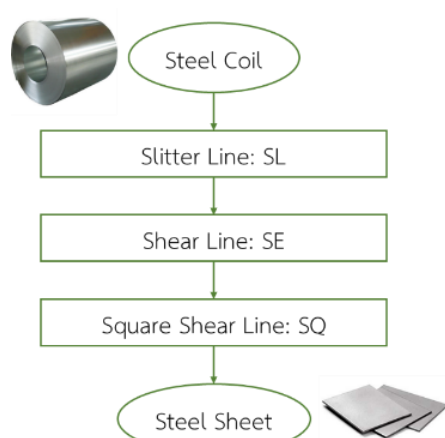
ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้ได้ทำการศึกษากระบวนการผลิตแบบไหลเลื่อนผสมของบริษัทจำหน่ายเหล็กแผ่น เพื่อช่วยในการจัดตารางการผลิตให้กับระบบการผลิต โดยประยุกต์ใช้วิธีเมตาฮิวริสติก ด้วยขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) (Songserm et al., 2018) เนื่องจากวิธีนี้เป็นการเรียนรู้การสร้างคำตอบและพัฒนาคำตอบด้วยตัวเอง ผ่านโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ถึงแม้ว่าจะไม่ได้คำตอบที่ดีที่สุด แต่คำตอบที่ได้ใกล้เคียงกับคำตอบที่ดีที่สุดและใช้เวลาในการคำนวณไม่นานมากนัก

2. ข้อมูลของบริษัท

บริษัท ทรูนิคศึกษา เป็นบริษัทจำหน่ายเหล็กแผ่น ที่มีระบบการผลิตแบบไหลเลื่อนผสม ซึ่งผลิตภัณฑ์ของบริษัทมีหลากหลายขนาดขึ้นอยู่กับความต้องการของลูกค้า

2.1 กระบวนการผลิต

เริ่มจากการรับเหล็กม้วน (Coil) เข้าสู่กระบวนการตัดซอย (Slitter Line: SL) กระบวนการตัดเฉือน (Shear Line: SE) และกระบวนการตัดแผ่น (Square Shear Line: SQ) ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 กระบวนการผลิตเหล็กแผ่น

ในกระบวนการตัดซอย เหล็กที่เข้าสู่กระบวนการเป็นเหล็กม้วน โดยจะทำการตัดตามความกว้างของคำสั่งซื้อ (เป็นการลดขนาดหน้ากว้างของเหล็กม้วน) และกรอกลับเป็นม้วนดั้งเดิม โดยเหล็กม้วนจะมี 2 ขนาดได้แก่ ขนาดหน้ากว้าง 1,145 มิลลิเมตร และขนาดหน้ากว้าง 1,219 มิลลิเมตร ซึ่งมีเครื่องจักรทำงานอยู่ 2 เครื่อง

ในกระบวนการตัดเฉือน เหล็กที่เข้าสู่กระบวนการเป็นเหล็กม้วน โดยจะตัดเป็นชิ้น ๆ ตามขนาดความกว้างของคำสั่งซื้อ ซึ่งมีเครื่องจักรทำงานอยู่ 3 เครื่อง

และกระบวนการตัดแผ่น เหล็กที่เข้าสู่กระบวนการเป็นเหล็กแผ่น โดยจะตัดเป็นชิ้น ๆ ตามขนาดความยาวของคำสั่งซื้อ ซึ่งมีเครื่องจักรทำงานอยู่ 5 เครื่อง สามารถสรุปกระบวนการในการผลิตและเวลาในการผลิต ได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สรุปกระบวนการในการผลิต

กระบวนการ	จำนวนเครื่องจักร	เวลาในการผลิต (เมตร/นาที/เครื่อง)
SL	2	120
SE	3	40
SQ	5	15

2.2 เงื่อนไขในกระบวนการผลิต

ทุก ๆ คำสั่งซื้อ ต้องผ่านกระบวนการผลิตตามลำดับ แต่สามารถเลือกทำงานบนเครื่องจักรใดก็ได้ ในกระบวนการเดียวกัน

ในกระบวนการตัดซอย จำเป็นต้องทำการตัดเหล็กทั้งม้วน โดยเหล็ก 1 ม้วนจะมีความยาวประมาณ 3,000 – 3,600 เมตร ขึ้นอยู่กับหน้ากว้างของเหล็ก

2.3 ลักษณะปัญหาการจัดตารางการผลิตในปัจจุบันของบริษัท

คำสั่งซื้อแต่ละประเภทจะมีความแตกต่างกันในเรื่องของขนาดชิ้นงาน (ขนาดความกว้างxยาว ไม่เท่ากัน) และจำนวน โดยใน 1 กะทำงาน จะมีคำสั่งซื้อประมาณ 10 – 20 คำสั่งซื้อ มีจำนวน 5 – 2,500 ชิ้นต่อคำสั่งซื้อ สามารถแสดงตัวอย่างคำสั่งซื้อได้ดังตารางที่ 2

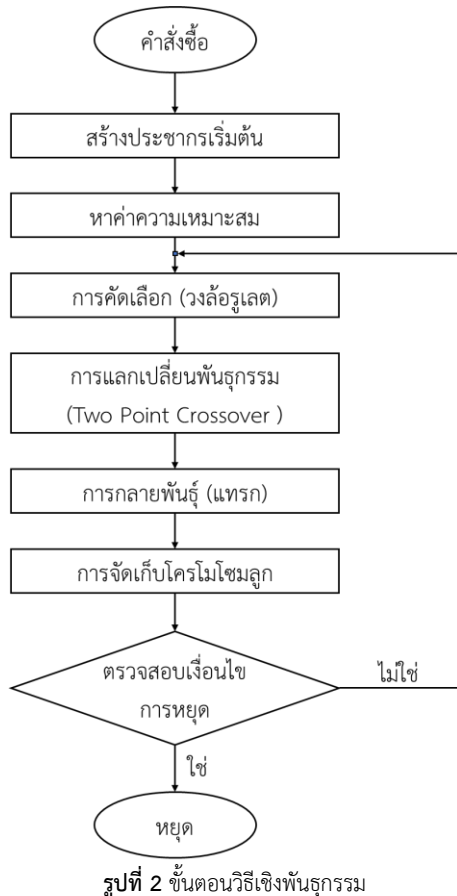
ตารางที่ 2 ตัวอย่างคำสั่งซื้อ

คำสั่งซื้อ	ขนาดชิ้นงาน (เมตร)		จำนวน (ชิ้น)
	กว้าง	ยาว	
A	0.12	0.70	700
B	0.25	1.50	500
C	0.23	0.15	1500
D	0.83	1.50	100

จากการศึกษาพบว่า การวางแผนการผลิตในปัจจุบัน ใช้หลักการวางแผนแบบมาก่อนผลิตก่อน หรือ First Come First Serve บางคำสั่งซื้อที่ใช้เวลาในการผลิตสูง ทำให้คำสั่งซื้อในลำดับถัดไปต้องรอคิวงาน ส่งผลให้เวลาในการผลิตโดยรวมสูงขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอวิธีการจัดตารางการผลิตที่เหมาะสมเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าว

3. ขั้นตอนการทำงานของวิธีเชิงพันธุกรรม

ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการจัดตารางการผลิต เพื่อเลือกเครื่องจักรให้มีความเหมาะสมกับงาน และจัดลำดับงานบนเครื่องจักรแบบคู่ขนาน โดยมีขั้นตอนการทำงานดังรูปที่ 2



3.1 การสร้างประชากร

ขั้นตอนนี้เป็นการสร้างประชากรเริ่มต้น ประชากรจะมีการเข้ารหัสโดยใช้ตัวอักษร โดยใช้คำสั่งในการผลิตเป็นรหัส ซึ่งความยาวของประชากรแต่ละตัวจะมีความยาวเท่ากับจำนวนของคำสั่งการผลิต ซึ่งประชากรเริ่มต้นมาจากการสุ่มดังตารางที่ 3 แสดงตัวอย่างการสุ่มประชากรเริ่มต้น

ตารางที่ 3 ตัวอย่างประชากร

โครโมโซม	ลำดับการผลิต			
1	C	B	D	A
2	A	D	B	C
3	A	D	C	B

3.2 การหาค่าความเหมาะสม

การหาค่าความเหมาะสมเป็นการวัดประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่มีวัตถุประสงค์หลายวัตถุประสงค์ (Ebrahimi et al., 2014; Sangudon & Wuttipornpun, 2012) โดยจะใช้วิธีการเปรียบเทียบชุดข้อมูลระหว่างกัน โดยการวัดระยะทาง (Distance) ดังสมการที่ 1 ซึ่งคำนวณได้จากเวลาปิดงาน (*Makespan: C_{max}*) (Engin et al., 2011), และเวลาที่งานอยู่ในระบบโดยเฉลี่ย (*Average Flow Time: F̄*) (Soponchai, 2000) ดังสมการที่ 2

$$Distance_j = \sqrt{(C_{max})_j^2 + (\bar{F})_j^2} \quad (1)$$

$$\bar{F} = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n F_i = \frac{1}{n} * \sum_{i=1}^n (C_i - r_i) \quad (2)$$

เมื่อ *m* คือ จำนวนของโครโมโซมทั้งหมด

j คือ 1, 2, ..., *m*

n คือ จำนวนของงาน

i คือ 1, 2, ..., *n*

C_{max} คือ เวลาปิดงานสูงสุด

F̄ คือ เวลาที่งานอยู่ในระบบเฉลี่ย

C_i คือ เวลาปิดงานของงาน *i* เสร็จ

r_i คือ เวลาที่งาน *i* พร้อมทำงาน

โดยที่ *C_{max}* สามารถคำนวณได้จากเวลาที่ใช้ในการผลิตแล้วเสร็จที่สูงที่สุดของแต่ละโครโมโซม และ *F̄* สามารถคำนวณได้จากเวลาเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ในการดำเนินการผลิตแล้วเสร็จลบด้วยเวลาที่พร้อมทำงานของแต่ละงาน *i*

สำหรับระบบการผลิตไหลต่อเนื่องผสม ที่มีจำนวนเครื่องจักรมากกว่า 1 เครื่องในกระบวนการเดียวกัน งานสามารถเลือก

ทำงานบนเครื่องจักรใดก็ได้ แสดงตัวอย่างการวางคำสั่งซื้อบน
สถานงาน ดังรูปที่ 3

[illegible]

รูปที่ 3 ตัวอย่างการวางคำสั่งซื้อบนสถานีนงานของโครโมโซมที่ 1

รูปที่ 3 แสดงตัวอย่างการวางแผนคำสั่งซื้อบนสถานการณ์ของโครโมโซมที่ 1 พบว่า คำสั่งซื้อ C เริ่มผลิตในวินาทีที่ 0 แล้วเสร็จในวินาทีที่ 2,906.25 คำสั่งซื้อ B เริ่มผลิตในวินาทีที่ 0 แล้วเสร็จในวินาทีที่ 4,687.50 คำสั่งซื้อ D เริ่มผลิตในวินาทีที่ 1,500 แล้วเสร็จในวินาทีที่ 3,723.75 และคำสั่งซื้อ A เริ่มผลิตในวินาทีที่ 1,500 แล้วเสร็จในวินาทีที่ 5,381.80 จากข้อมูลดังกล่าวสามารถคำนวณเวลาปิดงานของงานสูงสุด (C_{max1}) เท่ากับ 5,381.80 และเวลาการไหลเฉลี่ย ($\bar{F}_1$) เท่ากับ 859.83 ดังนั้นสามารถวัดระยะทางได้ (Distance₁) เท่ากับ 5,450.05

3.3 การคัดเลือก

การคัดเลือกเป็นกระบวนการที่โครโมโซมแต่ละตัว
เลียนแบบค่าฟังก์ชันเป้าหมาย หรือค่าความเหมาะสม โดย
โครโมโซมที่มีความเหมาะสมสูงกว่าจะมีความน่าจะเป็นใน
โครโมโซมตัวแทนสูงกว่า โดยวิธีที่เลือกใช้คือวิธีการคัดเลือก
แบบวงล้อสุ่ม (Genetic Algorithm, 2019)

การคัดเลือกแบบวงล้อสุ่ม ถือเป็นการสุ่มที่ใช้การถ่วงค่าน้ำหนัก โดยค่าที่จะนำมาถ่วงน้ำหนักจะขึ้นอยู่กับค่าความเหมาะสม สำหรับงานวิจัยนี้ค่าความเหมาะสมคือค่าระยะทาง (Distance) โดยค่าระยะทางน้อยถือว่าเป็นโครโมโซมที่ดี ทำให้ต้องคำนวณหาสัดส่วน เพื่อให้โครโมโซมที่มีค่าระยะทางน้อยเป็นโครโมโซมที่มีโอกาสถูกเลือกสูง ได้ตั้งสมการที่ 3

$$\text{สัดส่วน}_j = \frac{\sum_1^m \text{Distance}}{\text{Distance}_j} \quad (3)$$

เมื่อ สัดส่วน j ; คือ ค่าสัดส่วนของโครโมโซมตัวที่ j

$Distance_j$ คือ ค่าระยะทางของโครโมโซมตัวที่ j

หลังจากคำนวณสัดส่วนแล้ว ก็เข้าสู่กระบวนการสร้างวงล้อรูเลต เริ่มจากกำหนดช่องของรูเลต โดยแต่ละช่องจะถูกแทนด้วยโครโมโซมเริ่มต้น และความกว้างของแต่ละช่องขึ้นกับค่าความน่าจะเป็น โดยค่าความน่าจะเป็นสามารถหาได้ดังสมการที่ 4 หลังจากคำนวณหาค่าความน่าจะเป็นแล้ว จะสามารถนำค่าความน่าจะเป็นที่ได้มาสร้างวงล้อรูเลต จากนั้นทำการสุ่มค่าอยู่ระหว่าง 0 - 1 ขึ้นมา หากค่าที่ได้ตกอยู่ในช่องใดของวงล้อรูเลต โครโมโซมที่อยู่ในนั้นก็จะเป็นโครโมโซมพ่อแม่ และทำเช่นเดียวกันในการหาโครโมโซมแม่

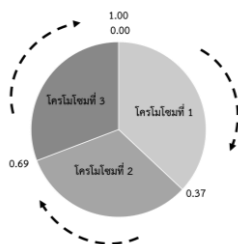
$$Probability_j = \frac{\text{สัดส่วน}_j}{\sum_1^m \text{สัดส่วน}} \quad (4)$$

เมื่อ $Probablilty_j$ คือ ค่าความน่าจะเป็นของโครโมโซมตัวที่ j

ตารางที่ 4 ได้แสดงตัวอย่างของการคำนวณความน่าจะเป็นในการถูกคัดเลือก หลังจากได้ค่าความน่าจะเป็นในการถูกคัดเลือกของแต่ละโครโมโซมแล้ว นำมาสร้างวงล้อรูเล็ตโดยใช้ค่าความน่าจะเป็นสะสม ได้ดังรูปที่ 4

ตารางที่ 4 ตัวอย่างความน่าจะเป็นในการถูกคัดเลือก

โครโมโซม	ค่าระยะทาง	สัดส่วน	ความน่าจะเป็นในการถูกคัดเลือก	ความน่าจะเป็นสะสม
1	5,450	3.367	0.37	0.37
2	6,302	2.912	0.32	0.69
3	6,597	2.781	0.31	1.00
รวม	18,349	9.060	1.00	



รูปที่ 4 ตัวอย่างวงล้อสุ่ม

หลังจากสร้างวงล้อสุ่มแล้ว ทำการสุ่มเลขระหว่าง 0 – 1 เพื่อหาโครโมโซมพ่อ และโครโมโซมแม่ โดยค่าที่สุ่มได้ครั้งนี้ คือ 0.09.06 และ 870.0 ดังนั้นโครโมโซมพ่อ ได้แก่โครโมโซมที่ 1 และโครโมโซมแม่ ได้แก่โครโมโซมที่ 3 เพื่อไปสู่กระบวนการแลกเปลี่ยนพันธุกรรม

3.4 การแลกเปลี่ยนพันธุกรรม (Crossover)

การแลกเปลี่ยนพันธุกรรมระหว่างโครโมโซมพ่อและโครโมโซมแม่ เพื่อสร้างโครโมโซมลูก แต่ก่อนจะเข้าสู่กระบวนการแลกเปลี่ยนพันธุกรรมจะมีการสุ่มระหว่าง 0 – 1 เพื่อนำมาเทียบกับค่าความน่าจะเป็นในการแลกเปลี่ยนพันธุกรรม (*Probability Crossover: P_c*) ซึ่งควรจะกำหนดให้อยู่ระหว่าง 0.7 – 1.0 (Polkavilat, 2011) ถ้าค่าที่สุ่มได้น้อยกว่าค่าความน่าจะเป็นในการแลกเปลี่ยนพันธุกรรม จะยอมให้เกิดการแลกเปลี่ยนพันธุกรรม แต่ถ้าค่าที่สุ่มได้มากกว่าค่าความน่าจะเป็นในการแลกเปลี่ยนพันธุกรรม จะข้ามขั้นตอนการแลกเปลี่ยนพันธุกรรมไปสู่ขั้นตอนถัดไป

วิธีการแลกเปลี่ยนพันธุกรรมในงานวิจัยนี้ เลือกวิธีการแลกเปลี่ยนพันธุกรรมแบบสองจุด (Two Point Crossover) (Ibrahim et al., 2013) มีขั้นตอนได้แก่ สุ่มตำแหน่งของโครโมโซมพ่อและแม่ เพื่อที่จะส่งไปยังโครโมโซมลูก และเติมเต็มโครโมโซมลูกให้ครบ โดยการรับยีนที่ไม่ซ้ำกับขั้นตอนแรก

ตัวอย่างการแลกเปลี่ยนพันธุกรรม ดังรูปที่ 5 โดยสุ่มตำแหน่งบนโครโมโซมพ่อและโครโมโซมแม่ ได้ 1 และ 4

	ขั้นตอนที่ 1				ขั้นตอนที่ 2			
ตำแหน่ง	1	2	3	4	1	2	3	4
โครโมโซมพ่อ	C	B	D	A	C	B	D	A
โครโมโซมลูก 1	C			A	C		B	A
โครโมโซมลูก 2	A			B	A		D	B
โครโมโซมแม่	A	D	C	B	A	D	C	B

รูปที่ 5 วิธีการแลกเปลี่ยนพันธุกรรมแบบสองจุด

3.5 การกลายพันธุ์ (Mutation)

การกลายพันธุ์ มีความสำคัญมากในการช่วยป้องกันความเสียหายของโครโมโซม แต่ก่อนจะเข้าสู่กระบวนการกลายพันธุ์จะมีการสุ่มระหว่าง 0 – 1 เพื่อนำมาเทียบกับค่าความน่าจะเป็นในการกลายพันธุ์ (*Probability Mutation: P_m*) ซึ่งควรจะกำหนดให้อยู่ระหว่าง 0.02 – 0.18 (Polkavilat, 2011) ถ้าค่าที่สุ่มได้น้อยกว่าค่าความน่าจะเป็นในการแลกเปลี่ยนพันธุกรรม จะยอมให้เกิดการแลกเปลี่ยนพันธุกรรม แต่ถ้าค่าที่สุ่มได้มากกว่าค่าความน่าจะเป็นในการกลายพันธุ์ จะข้ามขั้นตอนการกลายพันธุ์ไปสู่ขั้นตอนถัดไป

วิธีการกลายพันธุ์ ในงานวิจัยนี้ เลือกวิธีการกลายพันธุ์แบบแทรก (Oguz & Ercan, 2005) เป็นการเปลี่ยนตำแหน่งโดยการแทรกตำแหน่ง ซึ่งจะทำให้การสุ่มเลือกตำแหน่งของโครโมโซมมา 2 ตำแหน่ง โดยตำแหน่งแรกแทนบิต และตำแหน่งที่สองคือตำแหน่งที่จะนำบิตไปแทรก

ตัวอย่างการกลายพันธุ์ ดังรูปที่ 6 โดยสุ่มตำแหน่งบนโครโมโซมที่ 1 ได้แก่ 4 และ 1 โดย และโครโมโซมที่ 2 ได้แก่ 3 และ 2

โครโมโซมลูก 1 แลกเปลี่ยนพันธุกรรม	C	D	B	A
โครโมโซมลูก 1 กลายพันธุ์	A	C	D	B
โครโมโซมลูก 2 แลกเปลี่ยนพันธุกรรม	A	C	D	B
โครโมโซมลูก 2 กลายพันธุ์	A	D	C	B

ตำแหน่งที่ 1 ตำแหน่งที่ 2

รูปที่ 6 วิธีการกลายพันธุ์แบบแทรก

3.6 การจัดเก็บโครโมโซมลูก

ขั้นตอนนี้เป็นการจัดเก็บโครโมโซมลูก ซึ่งหลังจากผ่านกระบวนการแลกเปลี่ยนพันธุกรรมและการกลายพันธุ์แล้ว ทำให้ได้โครโมโซมลูก จากนั้นนำไปคำนวณค่าระยะทาง เพื่อตรวจสอบโครโมโซมลูก หากค่าระยะทางของโครโมโซมใดมีค่าเท่ากัน โครโมโซมตัวใหม่จะถูกตัดทิ้งไป แสดงตัวอย่างได้ดังตารางที่ 5 พบว่ามีโครโมโซมที่ซ้ำกัน 2 โครโมโซม ได้แก่ โครโมโซมที่ 3 กับโครโมโซมลูก 2 กลายพันธุ์ และโครโมโซมลูก 1 กลายพันธุ์กับโครโมโซมลูก 2 แลกเปลี่ยนพันธุกรรม

ดังนั้นการจัดเก็บโครโมโซมในรอบนี้จะมีเพียง 5 โครโมโซม ดังตารางที่ 6

ตารางที่ 5 ตัวอย่างการตรวจสอบโครโมโซมลูก

โครโมโซม	ลำดับการผลิต				ค่าระยะทาง
1	C	B	D	A	5,450
2	A	D	B	C	6,302
3	A	D	C	B	6,597
ลูก 1 แลกเปลี่ยนพันธุกรรม	C	D	B	A	6,393
ลูก 1 กลายพันธุ์	A	C	D	B	6,583
ลูก 2 แลกเปลี่ยนพันธุกรรม	A	C	D	B	6,583
ลูก 2 กลายพันธุ์	A	D	C	B	6,597

ตารางที่ 6 ตัวอย่างการการจัดเก็บโครโมโซมลูก

โครโมโซม	ลำดับการผลิต			
1	C	B	D	A
2	A	D	B	C
3	A	D	C	B
ลูก 1 แลกเปลี่ยนพันธุกรรม	C	D	B	A
ลูก 2 แลกเปลี่ยนพันธุกรรม	A	C	D	B

3.7 การหยุดทำงาน

ระบบจะหยุดทำงานเมื่อการทำงานเป็นไปตามเงื่อนไขที่ตั้งไว้ หรือหยุดทำงานเมื่อได้จำนวนครบตามที่กำหนดให้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมหยุดทำงานโดยพิจารณาจากจำนวนประชากรสูงสุดที่ดำเนินการและนำมาเป็นเกณฑ์

4. การออกแบบการทดลอง

การออกแบบการทดลอง เริ่มจากการหาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ประกอบด้วยพารามิเตอร์ 4 ชนิด ได้แก่ จำนวนรอบการทำซ้ำ จำนวนประชากร ความน่าจะเป็นในการแลกเปลี่ยนพันธุกรรม และความน่าจะเป็นในการกลายพันธุ์ โดยแต่ละพารามิเตอร์จะมี 2 ระดับ ดังตารางที่ 7 โดยทางผู้วิจัยได้ทำการออกแบบการทดลองแบบเต็มรูปแบบ 2 ระดับ (2^k Full Factorial Design) (Parakawong na ayuthaya, Pornsing, 2018) ซึ่งการทดลองนี้จะทำการทดลอง $2^4 = 16$ การทดลอง การทดลองละ 3 ครั้ง รวมทั้งหมด $16 \times 3 = 48$ การทดลอง และจัดลำดับการทดลองแบบสุ่มเพื่อลดความผิดพลาดโดยมีคำสั่งซื้อตัวอย่างจำนวน คำสั่งซื้อ 20

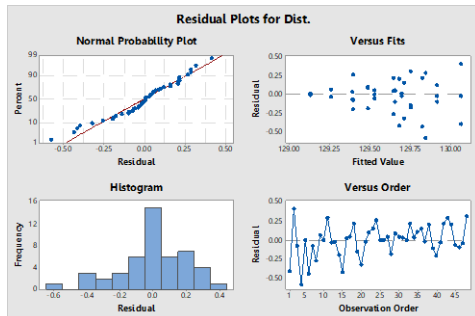
ตารางที่ 7 ค่าพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนด	
	ระดับต่ำ	ระดับสูง
จำนวนรอบ	100	500
จำนวนประชากร	10	20
ความน่าจะเป็นในการแลกเปลี่ยนพันธุกรรม (P_c)	0.8	0.9
ความน่าจะเป็นในการกลายพันธุ์ (P_m)	0.05	0.08

ในการทดลองได้ใช้โปรแกรม VBA (Visual Basic for Application) วิเคราะห์สถิติทางโปรแกรม Minitab 17 และประมวลผลบน Intel Core i3-2330M CPU 2.20GHz โดยใช้หน่วยความจำขนาด 6 GB

4.1 การตรวจสอบการแจกแจงตัวแบบปกติ (Normal Distribution)

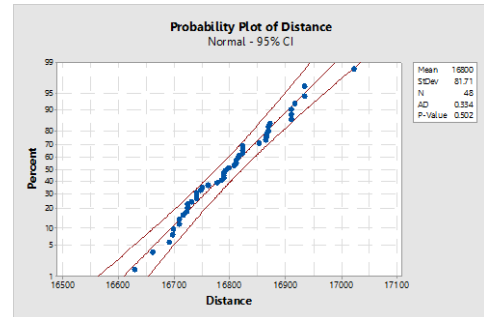
การทดลองการแจกแจงแบบปกติ ของการจัดตารางการผลิตแบบไหลเลื่อนผสม ได้ผลดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 การทดลองสมมติฐานของค่าความน่าจะเป็น

จากรูปที่ 7 แสดงการตรวจสอบสมมติฐานทางด้านการกระจายแบบปกติของข้อมูล โดยค่าความน่าจะเป็นแบบปกติของค่าระยะทาง (Normal Probability Plot of Distance) จากข้อมูลมีลักษณะการกระจายตัวแบบแนวเส้นตรง ประมวลได้ว่าค่าระยะทางมีการแจกแจงแบบปกติ ในการทดลองแบบกราฟแท่งของค่าระยะทาง (Histogram of Distance) ซึ่งผลการทดลอง พบว่าลักษณะของกราฟมีลักษณะเป็นรูปทรงระฆังคว่ำและกราฟมีความสมมาตรกัน ประมวลได้ว่าค่าระยะทางมีการแจกแจงแบบปกติ ในการทดลองความแปรปรวนคงที่ของข้อมูล (Plot of Distance Versus the Fitted Values) ข้อมูลมีการกระจายตัวแบบสุ่ม แสดงว่ามีค่าความแปรปรวนไม่คงที่ และการทดลองสมมติฐานของความเป็นอิสระ (Versus the Order of the Data) จากกราฟแสดงให้เห็นถึงข้อมูลของการเพิ่มและลดลง ซึ่งการกระจายตัวของค่าระยะทางมีรูปแบบที่เป็นอิสระ ไม่มีรูปแบบที่แน่นอน แสดงให้เห็นว่าค่าระยะทางมีความเป็นอิสระต่อกัน

เมื่อพิจารณาการกระจายตัวค่าระยะทางที่ใช้ในการทดลองการแจกแจงแบบปกติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($\alpha = 0.05$) ได้ผลดังรูปที่ 8

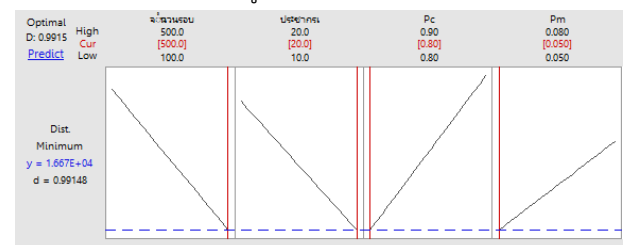


รูปที่ 8 แผนภาพความน่าจะเป็นการแจกแจงแบบปกติ

จากรูปที่ 8 พบว่าค่าระยะทางมีการกระจายตัวเป็นแนวเส้นตรง และค่า P-Value เท่ากับ 0.502 ซึ่งมีความมากกว่าค่าระดับนัยสำคัญที่กำหนดไว้ที่ 95% ($P\text{-Value} = 0.502 > 0.05$) แสดงว่าการแจกแจงของการทดลองเป็นปกติ

4.2 การหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมในการทดลองด้วยวิธีการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสม (Response Optimization)

ผู้วิจัยมีความสนใจที่จะกำหนดค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมเพื่อใช้ในการพัฒนาขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่ช่วยในการจัดการตารางการผลิตให้กับระบบการผลิตแบบไหลเลื่อนผสม โดยจะทำการทดลองเพื่อหาค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสมด้วยวิธีการหาค่าปัจจัยที่เหมาะสม ซึ่งได้ทำการวิเคราะห์โดยกำหนดให้ค่าที่ต่ำที่สุด (Minimize Goal) ได้ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 ค่าระดับปัจจัยที่เหมาะสม

สรุประดับปัจจัยที่เหมาะสมได้ดังตารางที่ 8 จากนั้นนำค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสม ไปทดลองกับคำสั่งซื้อตัวอย่างของบริษัทจำหน่ายเหล็กแผ่นโดยประกอบด้วย ขนาด (กว้าง, ยาว) และปริมาณ จำนวน 5, 10, 15 และ 20 คำสั่งซื้อ จะมีการทำซ้ำ 10 ครั้ง รวมทั้งสิ้น $4 \times 10 = 40$ ครั้ง และนำผลคำตอบที่ได้ไปเปรียบเทียบกับวิธีที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน และการจัดการตารางการผลิตโดยการหาค่าแม่นยำ (Chaimanee & Supithak, 2015)

ตารางที่ 8 พารามิเตอร์ที่เหมาะสม

พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนด
คำสั่งซื้อตัวอย่าง	5, 10 ,15 และ 20
จำนวนรอบ	500
จำนวนประชากร	20
ความน่าจะเป็นในการแลกเปลี่ยนพันธุกรรม	0.8
วิธีการแลกเปลี่ยนพันธุกรรม	การแลกเปลี่ยนพันธุกรรมแบบสองจุด
ความน่าจะเป็นในการกลายพันธุ์	0.05
วิธีการกลายพันธุ์	กลายพันธุ์แบบแทรก

5. ผลการทดลอง

5.1 วิธีการจัดการตารางการผลิตที่ใช้ในปัจจุบัน

วิธีการจัดการตารางการผลิตที่ใช้ในปัจจุบันทางบริษัทได้ใช้พนักงานในการวางแผนการผลิต โดยอาศัยหลักการแบบมาก่อนผลิตก่อน หรือ First Come First Serve หมายความว่าเมื่อมีคำสั่งซื้อเข้ามาพนักงานก็จะดูว่ามีเครื่องจักรใดบ้างที่ว่างเมื่อพบว่าเครื่องจักรว่างพนักงานก็จะส่งผลิตคำสั่งซื้อนั้น

5.2 วิธีการจัดการตารางการผลิตโดยการหาค่าแม่นยำ (Exact Method)

สำหรับตัวแปรที่ผู้วิจัยได้สร้างขึ้นสำหรับงานวิจัยนี้ เพื่อการหาค่าระยะทางที่น้อยที่สุด และสอดคล้องกับจำนวนเครื่องจักรที่มีอยู่อย่างจำกัด ผู้วิจัยจึงได้สร้างสมการเชิงเส้น (Linear Programming Models) โดยสมการวัตถุประสงค์ ได้แก่สมการที่ 5 สมการเงื่อนไขได้แก่สมการที่ 6-7 และใช้โปรแกรม Excel Solver มาช่วยในการแก้ปัญหาเพื่อหาค่าคำตอบที่ดีที่สุด

$$Min Distance_m = Min \left(\sqrt{(C_{max})_j^2 + (\bar{F})_j^2} \right)_m \quad (5)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^m X_{ij} \leq Machine \text{ inventory} \quad (6)$$

$$\sum_{i=1}^n \sum_{p=1}^3 Y_{ip} = 1 \quad (7)$$

เมื่อ m คือ จำนวนของโครโมโซม

j คือ $1, 2, \dots, m$

C_{max} คือ เวลาปิดงานสูงสุด

$\bar{F}$ คือ เวลาที่งานอยู่ในระบบเฉลี่ย

n คือ จำนวนของงาน

i คือ $1, 2, \dots, n$

p คือ กระบวนการในการผลิต มี 3 กระบวนการ

ผลการทดลองดังตารางที่ 9 แสดงคำตอบของวิธีการจัดการตารางการผลิตที่ใช้ในปัจจุบัน วิธีการจัดการตารางการผลิตโดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม และวิธีการจัดการตารางการผลิตโดยการหาค่าแม่นยำ พบว่าในคำสั่งซื้อ จำนวน 5 คำสั่งซื้อ วิธีการจัดการตารางการผลิตโดยหาค่าแม่นยำ สามารถคำนวณหาค่าระยะทางได้ดีที่สุด แต่เมื่อจำนวนของคำสั่งซื้อเพิ่มขึ้นเป็น 10, 15 และ 20 วิธีการจัดการตารางการผลิตโดยการหาค่าแม่นยำ ไม่สามารถคำนวณหาค่าระยะทางได้ภายในเวลา 4 ชั่วโมง ในทางกลับกันวิธีการจัดการตารางการผลิตโดยใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมสามารถคำนวณหาค่าระยะทางได้ทุกขนาดของคำสั่งซื้อ และเวลาที่ใช้ในการคำนวณก็น้อยกว่าวิธีการจัดการตารางการผลิตโดยการหาค่าแม่นยำ

อีกทั้งเมื่อทำการเปรียบเทียบกับวิธีการจัดการตารางการผลิตที่ใช้ในปัจจุบัน ดังตารางที่ 10 และ ตารางที่ 11 พบว่าเวลาปิดงานโดยเฉลี่ยลดลง 12.99% เวลาที่งานอยู่ในระบบเฉลี่ยโดยเฉลี่ยลดลง 26.48% และเวลาในการวางแผนการผลิตลดลง 58.74%

ตารางที่ 9 ผลการทดลอง

สั่งซื้อ	ค่าระยะทาง			เวลาในการคำนวณ (นาท)		
	ปัจจุบัน	ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม	การหาค่าแม่นยำ	ปัจจุบัน	ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม	การหาค่าแม่นยำ
5	5,239.85	5,232.67	4,929.10	15	7.08	139.13
10	9,938.13	8,584.99	_*	20	6.34	-
15	18,368.97	12,871.03	_*	25	10.55	-
20	18,598.68	16,674.85	_*	30	13.18	-

หมายเหตุ * ไม่สามารถหาค่าระยะทางได้ เนื่องจากมีการรันโปรแกรมมากกว่า 240 นาท แต่ก็ยังไม่มีคำตอบออกมา

ตารางที่ 10 เปรียบเทียบเวลาปิดงานของวิธีที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน กับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

คำสั่งซื้อ	เวลาปิดงาน (วินาที)			
	ปัจจุบัน	ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม	ลดลง	คิดเป็น
5	5,210.00	5,210.00	-	0%
10	9,800.00	8,452.50	1,347.50	14%
15	17,968.00	12,720.00	5,248.00	29%
20	18,045.00	16,420.00	1,625.00	9%

ตารางที่ 11 เปรียบเทียบเวลาที่งานอยู่ในระบบโดยเฉลี่ยของวิธีที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน กับขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม

คำสั่งซื้อ	เวลาที่งานอยู่ในระบบโดยเฉลี่ย (วินาที)			
	ปัจจุบัน	ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม	ลดลง	คิดเป็น
5	558.51	486.51	72.00	13%
10	1,651.18	1,502.46	148.72	9%
15	3,817.09	1,965.93	1,851.16	48%
20	4,504.34	2,904.16	1,600.17	36%

6. สรุปผลการทดลอง

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่ช่วยในการจัดตารางการผลิตให้กับระบบการผลิตแบบไหลเลื่อนผสมของบริษัทจำหน่ายเหล็กแผ่น โดยประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม โดยหลักการที่สำคัญของขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม คือการพัฒนาค่าของคำตอบ และการรักษาค่าคำตอบที่ดีไว้

งานวิจัยนี้ใช้วิธีการคัดเลือกแบบวงล้อรูเล็ต การแลกเปลี่ยนพันธุกรรมแบบสองจุด และการกลายพันธุกรรมแบบแทรก โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อหาเวลาปิดงาน และเวลาที่งานอยู่ในระบบโดยเฉลี่ยที่ต่ำที่สุด ผ่านการทดลองจัดตารางการผลิตให้กับคำสั่งซื้อตัวอย่างจำนวน 5, 10, 15 และ คำสั่งซื้อ 20 เพื่อเปรียบเทียบกับวิธีที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน และการจัดตารางการผลิตโดยการหาค่าแม่นยำ สามารถสรุปได้ว่าขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมช่วยลดเวลาปิดงาน เวลาที่งานอยู่ในระบบโดยเฉลี่ย และเวลาในการวางแผนการผลิตได้

ดังนั้นขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรมที่ได้นำเสนอจึงถือเป็นทางเลือกที่ดีสำหรับบริษัทจำหน่ายเหล็กแผ่น ในการนำไปประยุกต์ใช้เพื่อให้ผลลัพธ์ในการจัดตารางการผลิตที่ดีขึ้น

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณบริษัทจำหน่ายเหล็กแผ่นที่อำนวยความสะดวกในการเก็บข้อมูล และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยศิลปากร สำนักงานสภานโยบายการอุดมศึกษา วิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรมแห่งชาติ ที่สนับสนุนเงินทุนสำหรับงานวิจัยนี้

8. เอกสารอ้างอิง

Carlier, J., & Neron, E. (2000). An exact method for solving the multi-processor flow shop. *Rairo Operations Research*, 34, 1-25.

Chaimanee, A., & Supitak, W. (2013). Flexible production scheduling on Parallel machinery in the manufacturing industry. *KMITL Information Technology Journal*, 25(2), 219-231.

Chaimanee, A., & Supithak, W. (2015). Fleible Flow Shop Scheduling Problem with Sequence Dependent Setup Time under Just- Tn- Time Philosophy. *The Journal of KMUTNB*, 25(2), 219-231.

Ebrahimi, M., Ghomi, S. M. T., & Karimi, B. (2014). Hybrid flow shop scheduling with sequence dependent family setup time and uncertain due dates. *Applied Mathematical Modelling*, 38(9-10), 2490-2504.

Engin, O., Ceran, G., & Yilmaz, M. K. (2011). An efficient genetic algorithm for hybrid flow shop scheduling with multiprocessor task problem. *Applied Soft Computing*, 11, 3056-3065.

Genetic Algorithm. (2019). *Simple Genetic Algorithm*. <http://kb.psu.ac.th/psukb/bitstream>

Ibrahim, A. A., El-shaer, R. H., Al-rwasheda, H. A. & Nawarra, G. M. (2013). Flow Shop Scheduling using Genetic Algorithm: Historical review and categorization of procedures. *The Egyptian Journal for Engineering Sciences and Technology*, 16(3), 1671-1685.

Jarboui, B., Siarry, P., & Teghem, J. (2013). *Metaheuristics for Production Scheduling*. ISTE Ltd.

Kahraman, C., Engin, O., kayak, I., & Ozturk, R. E. (2010). Multiprocessor task scheduling in multistage hybrid flow-

shops: A parallel greedy algorithm approach. *Applied Soft Computing*, 10(4), 1293-1300.

Karthik, S., & Prabahara, T. (2014). Hybrid Flowshop Scheduling Using Discrete Harmony Search and Genetic Algorithm. *International Journal of Innovative Research in Science, Engineering and Technology*, 3(3), 1197-1202.

Morais, M. de F., Boiko, T. J. P., Federal, L. dos S. C., Peterson da Rocha, R., & Paraiso, P. R. (2014). Multicriteria hybrid flow shop scheduling problem: literature review, analysis, and future research, *Independent Journal of Management & Production*, 5(4), 1004-1031.

Oguz, C., & Erkan, M. F. (2005). A genetic algorithm for hybrid flow-shop scheduling with multiprocessor tasks. *Journal of Scheduling*, 8, 323-351.

Parakawong na ayuthaya, P., Pornsing, C. (2018). *Design of Experiment to Waste Reduction Injection Process of Electronic Parts* [Master's thesis]. Silpakorn University. <http://ithesis-ir.su.ac.th/dspace/handle/123456789/2110>

Polkavilat, A. (2011). Application of Genetic for Optimisation Problem. *RMUTP Research Journal*, 5(2), 153-163.

Ribas, I., Leisten, R., & Framinan, J. M. (2010). Review and classification of hybrid flow shop scheduling problems from a production system and a solutions procedure perspective. *Computers & Operations Research*, 37, 1439-1454.

Ruiz, R., Antonio, J., & Rodríguez, V. (2010). The hybrid flow shop scheduling problem. *European Journal of Operational Research*, 205, 1-18.

Sangudon, S., & Wuttipornpun, T. (2012). Application of Hybrid Genetic Algorithms for Assembly Flow Shop Scheduling Problem. *The Journal of KMUTNB*, 22(1), 107-117.

Songserm, W., Wuttipornpun, T., & Jaturanonda, C. (2018). Hybrid Metaheuristics and Linear Programming for Finite Capacity MRP in Multi- Stage Flexible Flow Shop with Permutation and Non- permutation Scheduling Options. *Applied Science and Engineering Progress*, 11(3), 173-183.

Songserm, W., Wuttipornpun, T., & Jaturanonda, C. (2018). Hybrid Metaheuristics and Linear Programming for Finite Capacity MRP in Multi- Stage Flexible Flow Shop with Permutation and Non- permutation Scheduling Options. *KMUTNB International Journal of Applied Science and Technology*, 11(3), 173-183.

- Soponchai, S. (2000). *Computer Aided Die Production Scheduling for Automotive Parts Industry* [Master's thesis]. Chulalongkorn University.
<http://www.thaithesis.org/detail.php?id=1082543001269>
- Yilmaz, M. K., Kaya, I., Engin, O., & Kahraman, C. (2008). An application of effective genetic algorithms for Solving Hybrid Flow Shop Scheduling Problems. *International Journal of Computational Intelligence Systems*, 1(2), 134-147.

9. ประวัติผู้วิจัย



นางสาวสัจจิตา ทองเกิด
นักศึกษาระดับปริญญาโท
สาขาการจัดการงานวิศวกรรม
บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยศิลปากร



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ชุตักดิ์ พรสิงห์
อาจารย์ที่ปรึกษา
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศิลปากร

การตรวจจับและแจ้งเตือนอัตโนมัติของการล้มในห้องน้ำโดยเซนเซอร์อินฟราเรด Automatic Detection and Alert of Fall in a Restroom by infrared sensor

กรกนก สาระนั้น และ นันทิยา ชัยบุตร
Kornkanok Saranan and Nuntiya Chaiyabut

ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยกรุงเทพ
Electrical and Electronics Department, School of Engineering, Bangkok University

*Corresponding author e-mail: nuntiya.cb@bu.ac.th

(Received February 21, 2020, Revised :March 18, 2020, Accepted :June 1, 2020)

บทคัดย่อ

บทความฉบับนี้นำเสนอระบบแจ้งเตือนการล้มในห้องน้ำซึ่งพัฒนาขึ้นจากแนวคิดของอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง โดยระบบนี้ประกอบด้วยอุปกรณ์ตรวจวัด ไมโครคอนโทรลเลอร์ อุปกรณ์ส่งสัญญาณ ข้อมูลในส่วนตรวจวัดสัญญาณจะถูกวัดโดยอุปกรณ์ตรวจวัดระยะทางแบบอินฟราเรดและส่งข้อมูลที่วัดได้ไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งในบทความนี้ใช้อาร์ดูโน ยูโน ในการประมวลผลการล้ม ผลที่ได้จากการประมวลผลจะถูกส่งออกด้วยอุปกรณ์ส่งสัญญาณไปยังแหล่งเก็บข้อมูลบนก้อนเมฆโดยใช้โหนด เอ็มซียู สำหรับอุปกรณ์รับสัญญาณคือโทรศัพท์เคลื่อนที่ซึ่งสัญญาณแจ้งเตือนที่ถูกส่งไปยังแอปพลิเคชันไลน์บนโทรศัพท์เคลื่อนที่เมื่อมีการล้มในห้องน้ำเกิดขึ้น นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาแอปพลิเคชันเพิ่มเติมเพื่ออำนวยความสะดวกในการขอความช่วยเหลือตามที่ผู้ใช้งานได้ระบุไว้ ผลการทดสอบระบบตรวจจับและแจ้งเตือนการล้มอัตโนมัติสรุปได้ว่าระบบสามารถแจ้งเตือนการล้มในห้องน้ำผ่านแอปพลิเคชันไลน์บนโทรศัพท์เคลื่อนที่ทุก 10 วินาทีเมื่อการล้มเกิดขึ้นโดยมีความถูกต้องแม่นยำในการวัดร้อยละ 98

คำสำคัญ: การตรวจจับการล้มอัตโนมัติ, อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง, การแจ้งเตือนอัตโนมัติ, ห้องน้ำ

Abstract

This paper presents the automatic detection and alert of fall in a restroom which is developed by internet of things (IoT) concept. The system consists of sensors, microcontroller, transmitter, and receiver device. The data are measured by infrared distance sensors and sent to the microcontroller. In this paper, Arduino Uno is used for processing the fall. Then the results of processing are transmitted to the cloud by Node MCU. The receiver device is a mobile phone. The alert signal is sent to Line application on a mobile phone when a fall in a restroom appears. Moreover, we develop the application for the Android operating system on mobile devices. This application is designed to facilitate the request for help as specified by the user. The test result of the automatic detection and alert system is the system can alert through the Line application on mobile devices for every ten seconds after the fall event occurs with 98 percent accuracy.

Keywords: Automatic Fall detection, Internet of Things, Auto alert, Restroom

1. บทนำ

การพลัดตกหกล้มเป็นสาเหตุการเสียชีวิตอันดับที่สองในกลุ่มของการบาดเจ็บโดยไม่ตั้งใจ โดยสาเหตุอันดับที่หนึ่งคือการ

เกิดอุบัติเหตุบนทางถนน ซึ่งการหกล้มทำให้เกิดอาการบาดเจ็บตั้งแต่การบาดเจ็บเล็กน้อยจนถึงขั้นรุนแรง คือ การเสียชีวิตได้ในช่วงหกเดือนแรกของปี พ.ศ. 2551 พบว่า การพลัดตกหกล้ม

ที่เกิดขึ้นกับผู้สูงอายุที่มีอายุ 60 ปีขึ้นไปคิดเป็นร้อยละ 18 โดยเกิดขึ้นในผู้หญิงมากกว่าผู้ชาย ซึ่งการพลัดตกหกล้มมีความถี่ของการเกิดนอกเขตเทศบาลสูงกว่าในเขตเทศบาล ในขณะเดียวกันจะเกิดในพื้นที่ภาคกลางสูงกว่าภาคอื่น (NHESO, 2009) การพลัดตกหกล้มในกลุ่มผู้มีอายุ 60 ปีขึ้นไปมีอัตราการเสียชีวิตสูงกว่ารวมทุกกลุ่มอายุประมาณ 3 เท่าในปี พ.ศ. 2552 และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ เป็น 4 เท่าในปี พ.ศ. 2561 (Ministry of public health, 2019)

ระบบการแจ้งเตือนการล้มที่ผ่านมามีมาโดยมากจะถูกพัฒนาโดยอาศัยกล้องในการจับภาพ ซึ่งมีทั้งกรณีใช้กล้องตรวจจับความร้อนเพื่อนำภาพที่ได้ไปผ่านกระบวนการประมวลผลภาพในการบ่งชี้สถานะการล้มของคนในขณะที่เข้าห้องน้ำ (Kido et al., 2009; Shirogane et al., 2019) และการใช้กล้องบันทึกภาพเพื่อนำภาพที่ได้ไปประมวลผลผ่านสมองกลฝังตัวก่อนส่งผลรายงานการล้มเท่านั้น (Chotikawanich, 2012) หรือมีการนำอัลกอริทึมใหม่ๆ ทางด้านปัญญาประดิษฐ์มาช่วยในการประมวลผลเพื่อช่วยลดค่าใช้จ่ายสำหรับอุปกรณ์ที่ใช้กับบ้านอัจฉริยะ (de Miguel et al., 2017) ซึ่งการนำวิธีการดังกล่าวไปใช้กับการตรวจสอบการล้มในห้องน้ำถือได้ว่าเป็นวิธีการที่ก่อให้เกิดความรู้สึกสูญเสียความเป็นส่วนตัวเนื่องจากการใช้กล้องในการบันทึกภาพในห้องน้ำ ถึงแม้ว่ารูปที่บันทึกจะมีได้ถูกส่งออกก็ตาม ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวระบบแจ้งเตือนการล้มที่ทำให้ไม่สูญเสียความเป็นส่วนตัวและสร้างความสะดวกสำหรับผู้อยู่อาศัยจึงถูกพัฒนาขึ้น

ระบบแจ้งเตือนการล้มจากการศึกษาของหลายงานวิจัยได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยอาศัยหลักการตรวจจับมุมที่เปลี่ยนแปลงไปตามแรงโน้มถ่วงของโลกโดยใช้เซนเซอร์ตรวจจับการเอียง (GP1S036HEZ) (Thawornwong et al., 2011) ในบางงานวิจัยใช้เซนเซอร์วัดความเร่งแบบ 3 แกนโดยใช้บอร์ด FiO-Std (Kanjananoppawong & Puttha, 2013) หรือเซนเซอร์วัดความเร่งแบบบลูทูธ (Bluetooth accelerometer) (Sompang & Jaruwittayakowit, 2017) ซึ่งอุปกรณ์ที่พัฒนาขึ้นจะถูกติดตั้งบริเวณเอวของผู้สูงอายุ เพื่อวัดมุมที่เปลี่ยนแปลงไปเมื่อผู้ใช้เกิดการล้ม แต่ผู้ใช้ต้องสวมใส่อุปกรณ์ดังกล่าวตลอดเวลาเพื่อตรวจสอบการล้มทำให้เกิดความไม่สะดวกในกรณีต้องเข้าห้องน้ำ

บทความฉบับนี้นำเสนอระบบแจ้งเตือนการล้ม โดยมีการตรวจจับเหตุการณ์ผิดปกติที่เกิดขึ้นในพื้นที่ที่พิจารณา ในที่นี้เจาะจงไปที่เหตุการณ์การเกิดการล้มบริเวณห้องน้ำซึ่งเป็นสถานที่ที่เสี่ยงต่อการเกิดการล้มมากที่สุด โดยได้พัฒนาอุปกรณ์ในการตรวจวัดสัญญาณเพื่อนำไปประมวลผลการทำงานที่

ไมโครคอนโทรลเลอร์และส่งผ่านสัญญาณจากการประมวลผลแล้วไปยังโทรศัพท์เคลื่อนที่เพื่อแจ้งเตือนการล้มผ่านแอปพลิเคชันไลน์ นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาแอปพลิเคชันเพิ่มเติมเพื่ออำนวยความสะดวกในการขอความช่วยเหลือตามที่อยู่งานได้ระบุไว้ โดยการทดสอบระบบแจ้งเตือนการล้มในห้องน้ำดำเนินการผ่านการจำลองท่าทางในการล้ม 4 ท่าทางคือ ท่านอนคว่ำหน้า ท่านอนหงายหน้า ท่านอนตะแคงข้าง และท่านั่งกึ่งนอน ซึ่งผลการทดสอบระบบการแจ้งเตือนการล้มในห้องน้ำสามารถมั่นใจได้ว่าระบบสามารถแจ้งเตือนการล้มในห้องน้ำผ่านโทรศัพท์เคลื่อนที่ได้อย่างถูกต้องและแม่นยำ

2. วิธีการศึกษา

วิธีการศึกษาแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 หัวข้อ ประกอบด้วย อุปกรณ์แจ้งเตือนการล้มและการประเมินผลความถูกต้องของระบบแจ้งเตือนการล้ม ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

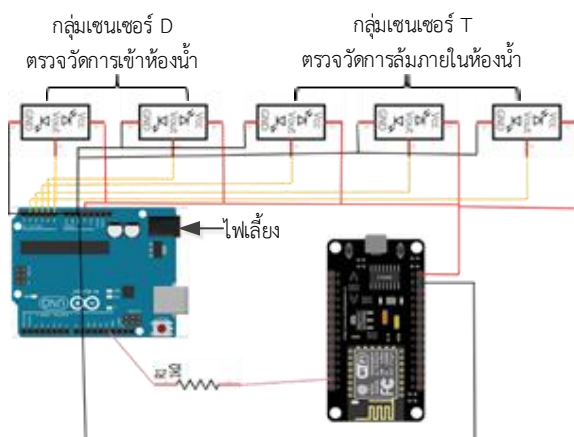
2.1 อุปกรณ์แจ้งเตือนการล้ม

อุปกรณ์สำหรับตรวจวัดการล้มอาศัยแนวคิดของระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things: IoT) ที่ว่าอุปกรณ์ที่สามารถเชื่อมต่อกับระบบอินเทอร์เน็ตได้ย่อมสามารถติดต่อสื่อสารกันได้ ซึ่งโดยทั่วไปแบ่งออกเป็น 3 ระดับ คือ ระดับส่งสัญญาณที่ต้องทำงานอย่างถูกต้องและครอบคลุมสิ่งที่ต้องการวัด ระดับเครือข่ายที่ต้องคำนึงถึงการสร้างระบบให้สามารถใช้งานในเครือข่ายได้ และระดับประยุกต์เพื่อตอบสนองต่อความต้องการของภาคธุรกิจหรืออุตสาหกรรม (de Miguel et al. 2017; Mattern & Floerkemeier, 2010) โดยที่ผ่านมามีการนำอินเทอร์เน็ตในทุกสรรพสิ่งไปประยุกต์ใช้กับงานด้านต่างๆ เช่น การแสดงข้อมูลแบบที่วัดได้แบบทันทีทันใด (real time) (Perera et al., 2014) และการแจ้งเตือนการทำงานของระบบเซลล์แสงอาทิตย์ (Casini, 2014)

อุปกรณ์สำหรับตรวจวัดการล้มถูกพัฒนาขึ้นจากอุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณ (sensor) ชนิดการวัดระยะทางแบบอินฟราเรด รุ่น Sharp GP2Y0A02 ซึ่งสามารถวัดระยะทางได้ 20 - 150 เซนติเมตร โดยมีเวลาหน่วงในการส่งสัญญาณสูงสุดไม่เกิน 5 มิลลิวินาที (Nilrak et al., 2018) ทำงานร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ ซึ่งในงานนี้เลือกใช้อาร์ดูโน ยูโน (Arduino Uno) เนื่องจากมีช่องรับสัญญาณแบบอนาล็อก (analog input) เพียงพอต่อการใช้งานร่วมกับตัวรับสัญญาณและ โหนด เอ็มซียู (Node MCU) เนื่องจากมีโมดูลไวไฟ (Wi-Fi module) ภายในสำหรับใช้เชื่อมต่ออินเทอร์เน็ต โดยอาร์ดูโนและโหนด เอ็มซียู สื่อสารกันแบบอนุกรม (serial

communication) ภายใต้มาตรฐาน RS232 ทั้งนี้ดำเนินการส่งสัญญาณผ่านช่องสัญญาณ Tx และ Rx ของบอร์ดทั้งสอง โดยใช้ขากราวตีในการอ้างอิง

โดยอาร์ดูโน ยูโน ถูกนำมาใช้สำหรับการประมวลผลจากสัญญาณที่ได้รับจากอุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณและกรณีที่มีการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณมากกว่า 1 ตัว สำหรับ โหนด เอ็มซียู ถูกนำมาใช้ในการส่งผลการประเมินที่ได้ไปยัง โทรศัพท์เคลื่อนที่ ซึ่งมีการต่อวงจรดังรูปที่ 1 โดยในรูปแสดง การเชื่อมต่ออุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณจำนวน 5 ตัว



รูปที่ 1 การเชื่อมต่ออุปกรณ์แจ้งเตือนการล้ม

2.2 การประเมินผลความถูกต้อง

การประเมินผลความถูกต้อง (Accuracy) ของปริมาณที่ได้จากการตรวจวัดการทำงานของระบบสามารถพิจารณาได้จาก ค่าความไว (Sensitivity) และความจำเพาะ (Specificity) เนื่องจากการประเมินในค่าความไวและความจำเพาะของระบบ มีความยืดหยุ่นและประสิทธิภาพที่ดีกว่าการวัดความถูกต้อง โดยตรงเพียงอย่างเดียว กล่าวคือ ในกรณีที่เหตุการณ์ขึ้นจริงและระบบทำงานกับกรณีที่ไม่มีเหตุการณ์และระบบไม่ทำงาน ซึ่งกรณีทั้ง 2 กรณีถือได้ว่าระบบสามารถทำงานได้อย่างถูกต้องเช่นเดียวกัน โดยเหตุการณ์ต่างๆ ที่สามารถเกิดขึ้นในระบบสามารถแบ่งออกเป็น 4 กรณี ดังนี้

กรณีที่ 1 เหตุการณ์เกิดขึ้นจริง และระบบมีการทำงานจริง เรียกว่า ผลบวกที่เป็นจริง (True Positive: TP)

กรณีที่ 2 เหตุการณ์เกิดขึ้นจริง แต่ระบบไม่มีการทำงาน เรียกว่า ผลลบที่ไม่เป็นจริง (False Negative: FN)

กรณีที่ 3 ไม่เกิดเหตุการณ์ขึ้นจริง แต่ระบบมีการทำงาน เรียกว่า ผลบวกที่ไม่เป็นจริง (False Positive: FP)

กรณีที่ 4 ไม่เกิดเหตุการณ์ขึ้นจริง และระบบไม่มีการทำงานจริง เรียกว่า ผลลบที่เป็นจริง (True Negative: TN)

ความไว (Sparkfun, 2019; Wangsuphachart, 2018) คือ สัดส่วนของผลบวกที่เป็นจริงต่อผลรวมของเหตุการณ์ที่เกิดขึ้นจริงทั้งหมด เมื่อพิจารณาความสอดคล้องกับงานวิจัยนี้ นั่นคือ ความสามารถในการตรวจจับการล้ม ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1) และ ร้อยละความไวสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (2)

$$Sensitivity = \frac{TP}{TP + FN} \quad (1)$$

$$\%Sensitivity = \frac{TP}{TP + FN} \times 100 \quad (2)$$

ความจำเพาะ (Sparkfun, 2019; Wangsuphachart, 2018) คือ สัดส่วนของผลลบที่เป็นจริงต่อผลรวมของเหตุการณ์ที่ไม่ได้เกิดขึ้นจริงทั้งหมด เมื่อพิจารณาความสอดคล้องกับงานวิจัยนี้ นั่นคือ ความสามารถในการตรวจจับว่าไม่เกิดการล้ม ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3) และร้อยละความจำเพาะสามารถพิจารณาได้จากสมการที่ (4)

$$Specificity = \frac{TN}{TN + FP} \quad (3)$$

$$\%Specificity = \frac{TN}{TN + FP} \times 100 \quad (4)$$

ความถูกต้อง (Sparkfun, 2019; Wangsuphachart, 2018) คือ ระดับความเที่ยงตรงของการวัดโดยพิจารณาจากค่าที่วัดได้ว่าใกล้เคียงกับเป้าหมายเพียงใด ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (6) และ (5)

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + FN + TN + FP} \quad (5)$$

$$\%Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + FN + TN + FP} \times 100 \quad (6)$$

การประเมินผลความถูกต้องในการวัดนี้จะถูกนำไปใช้เพื่อประเมินผลการทดสอบอุปกรณ์ตรวจวัดการล้มที่พัฒนาขึ้นสำหรับงานวิจัยนี้

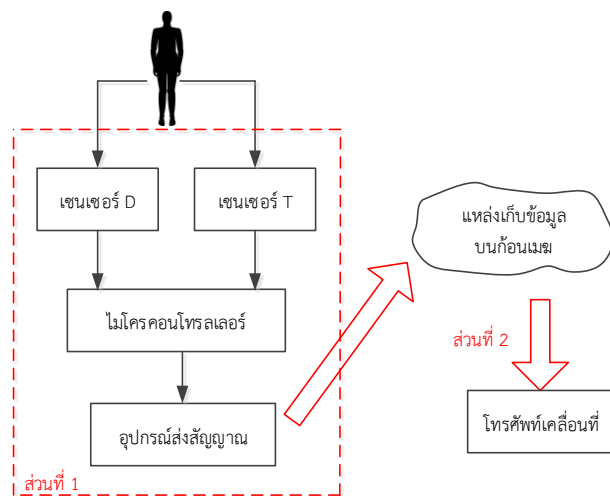
3. การออกแบบ

การออกแบบระบบแจ้งเตือนการล้นน้ำประกอบ 2 ส่วนหลัก คือ การออกแบบระบบการทำงานและการออกแบบการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับการล้นน้ำ

3.1 การออกแบบระบบการทำงาน

ระบบแจ้งเตือนการล้นน้ำถูกออกแบบให้การทำงานแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ประกอบด้วย ส่วนแรก คือ ส่วนของอุปกรณ์ตรวจวัดและส่งสัญญาณ และส่วนที่สอง คือ ส่วนรับสัญญาณ โดยแสดงผลผ่านโทรศัพท์เคลื่อนที่ในกรณีที่เกิดการล้นขึ้นจริงภายในห้องน้ำ สามารถแสดงแผนภาพการทำงานได้ดังรูปที่ 2

จากแผนภาพการทำงานระบบแจ้งเตือนการล้นน้ำ ส่วนที่ 1 คือ ส่วนของอุปกรณ์ตรวจวัดและส่งสัญญาณ ประกอบด้วยกลุ่มอุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณ (เซนเซอร์) D และ T โดยกลุ่มอุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณ D ทำหน้าที่ในการตรวจวัดสถานะการเข้าห้อง สำหรับกลุ่มอุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณ T ทำหน้าที่ตรวจวัดสถานะการล้นภายในห้อง ซึ่งในงานนี้กำหนดขอบเขตให้มีการตรวจสอบการล้นภายในห้องน้ำเท่านั้น



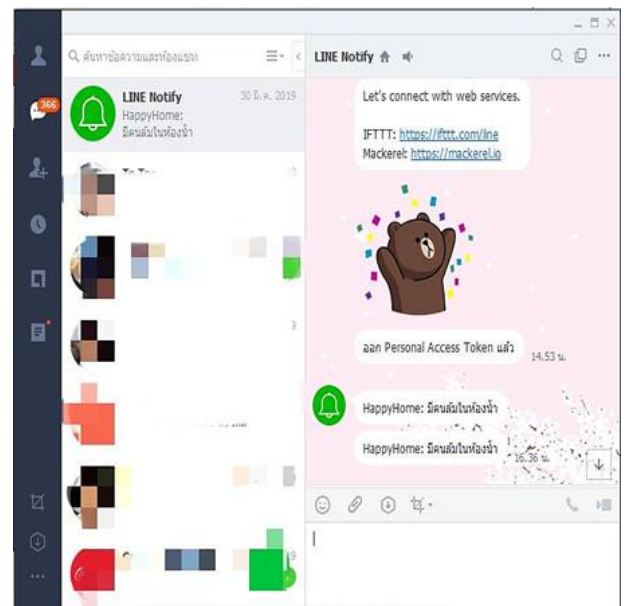
รูปที่ 2 แผนภาพการทำงานระบบแจ้งเตือนการล้นน้ำ

ไมโครคอนโทรลเลอร์ในที่นี้ทำหน้าที่ในการรับค่าจากอุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณเพื่อประมวลผลและส่งข้อมูลแจ้งเตือนขึ้นสู่แหล่งเก็บข้อมูลบนก้อนเมฆผ่านอุปกรณ์ส่งสัญญาณ (โมเด็ม 4G)

สำหรับแหล่งข้อมูลบนก้อนเมฆในที่นี้เลือกใช้รูปแบบการเก็บข้อมูลผ่านไฟร์เบส (Firebase) ซึ่งเป็นแพลตฟอร์ม (Platform) ที่รวบรวมเครื่องมือและโครงสร้างต่างๆ สำหรับจัดการทางด้านต่างๆ ภายใน (Backend) จึงสร้างความสะดวกให้แก่การพัฒนาแอปพลิเคชัน

สำหรับส่วนที่ 2 คือ ส่วนรับสัญญาณแบ่งออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนของการแจ้งเตือนตามเงื่อนไขที่กำหนดไว้จะแจ้งเตือนการผ่านแอปพลิเคชันไลน์ (LINE) และส่วนของการพัฒนาแอปพลิเคชันสำหรับโทรศัพท์เคลื่อนที่เพื่อระบุเบอร์โทรฉุกเฉิน ซึ่งจะช่วยให้เกิดความสะดวกและรวดเร็วในกรณีต้องการความช่วยเหลือแบบเร่งด่วน

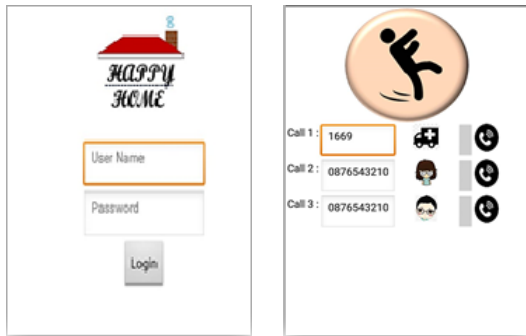
การแจ้งเตือนการผ่านแอปพลิเคชันไลน์ อาศัย Line Notify ซึ่งให้บริการโดยไลน์ในรูปแบบ API ซึ่งเป็นการสื่อสารผ่านระบบอินเทอร์เน็ต (hypertext transfer protocol: http) โดยใช้ RESTful API และสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดสำหรับการส่งข้อความแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชันไลน์ได้อย่างสะดวก โดยข้อความนี้จะแจ้งเตือนทุก 10 วินาที จนกว่าผู้ที่เกิดอุบัติเหตุได้รับการช่วยเหลือออกจากห้องน้ำจึงหยุดการส่งข้อความ ดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 การแจ้งเตือนการผ่านแอปพลิเคชันไลน์

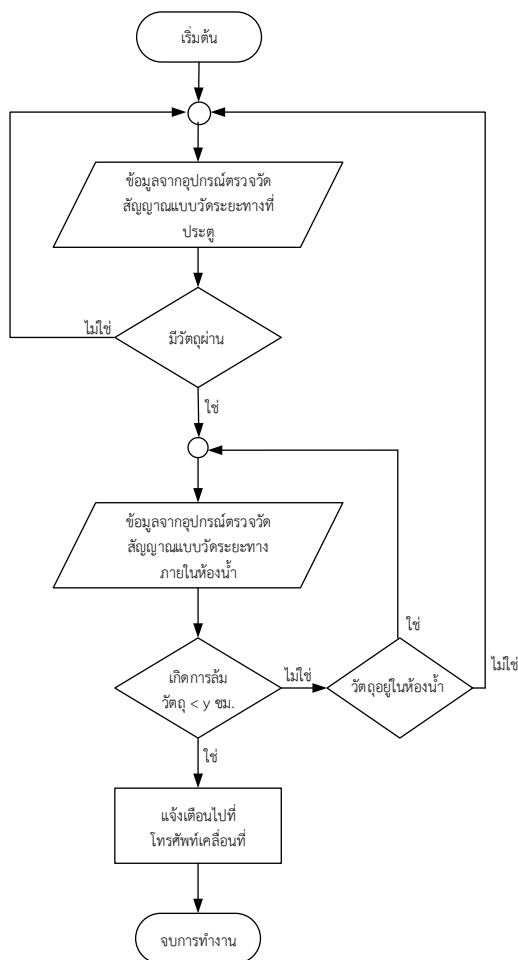
การพัฒนาแอปพลิเคชันสำหรับโทรศัพท์เคลื่อนที่ ซึ่งฟังก์ชันการทำงานของแอปพลิเคชันได้ถูกออกแบบและพัฒนาโดยใช้โปรแกรม MIT App Inventor (Dounghaklang et al., 2017) ให้ทำงานบนระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์ (Android Operating System) โดยมีการรักษาความปลอดภัยก่อนเข้าใช้งานด้วยการยืนยันตัวตนผ่านการป้อนชื่อผู้ใช้และรหัสผ่าน แสดงดังรูปที่ 4 (ก) เมื่อป้อนรหัสผ่านแล้วจะเข้าสู่หน้าต่างสำหรับกรอกหมายเลขฉุกเฉินที่ผู้ใช้ต้องการ โดยในที่นี้กำหนดให้มีการกรอกหมายเลขฉุกเฉินได้ 3 หมายเลข ซึ่งผู้ใช้

สามารถกดโทรออกจากหน้าแอปพลิเคชันนี้ได้โดยตรง ดังแสดงในรูปที่ 4 (ข)



(ก) (ข)
รูปที่ 4 แอปพลิเคชันสำหรับโทรศัพท์เคลื่อนที่

การทำงานของระบบแจ้งเตือนคนล้มในห้องน้ำสามารถแสดงได้ดังแผนผังขั้นตอนการทำงาน ดังรูปที่ 5



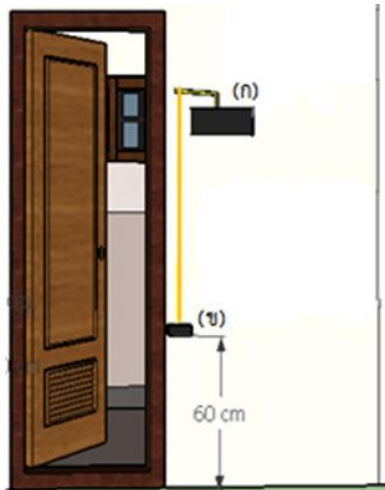
รูปที่ 5 แผนผังขั้นตอนการทำงานของระบบแจ้งเตือนการล้ม

ขั้นตอนการทำงานของระบบแจ้งเตือนคนล้มในห้องน้ำสามารถอธิบายได้ดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1 รับค่าจากอุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณแบบวัดระยะทางที่ประตูทางเข้าห้องน้ำ
- ขั้นตอนที่ 2 ตรวจสอบว่ามีวัตถุผ่านหรือไม่ ถ้าใช่ให้ไปที่ขั้นตอนที่ 3 ถ้าไม่ใช่ให้กลับไปขั้นตอนที่ 1
- ขั้นตอนที่ 3 สั่งให้อุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณแบบวัดระยะทางที่ติดตั้งอยู่ภายในห้องน้ำทำงานเพื่อดำเนินการตรวจสอบการล้มในห้องน้ำ
- ขั้นตอนที่ 4 รับค่าจากอุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณแบบวัดระยะทางภายในห้องน้ำ
- ขั้นตอนที่ 5 ตรวจสอบการล้มภายในห้องน้ำตามเงื่อนไขที่ว่าวัตถุอยู่ต่ำกว่า y เซนติเมตรหรือไม่ ถ้าใช่ให้ไปที่ขั้นตอนที่ 6 ถ้าไม่ใช่ให้ไปที่ขั้นตอนที่ 7
- ขั้นตอนที่ 6 แจ้งเตือนไปที่โทรศัพท์เคลื่อนที่
- ขั้นตอนที่ 7 ตรวจสอบว่ามีวัตถุอยู่ในห้องน้ำหรือไม่ ถ้าใช่ให้กลับไปขั้นตอนที่ 4 ถ้าไม่ใช่ให้กลับไปยังตอนที่ 1

3.2 การออกแบบการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับการล้ม

การนำอุปกรณ์แจ้งเตือนการล้มติดตั้งที่ห้องน้ำเพื่อทดสอบการทำงานได้มีการออกแบบให้มีการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณ 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 คือส่วนที่ใช้ตรวจสอบการเข้า-ออกห้องน้ำ (กลุ่มเซนเซอร์ D) โดยทำการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณแบบวัดระยะทาง 2 ชุด ประกอบด้วย ชุดด้านนอกและด้านในห้องน้ำเพื่อเพิ่มความแม่นยำในการตรวจสอบโดยภายนอกห้องน้ำมีการติดตั้งกล่องบรรจุไมโครคอนโทรลเลอร์ไว้ที่ตำแหน่ง (ก) ซึ่งระยะการติดตั้งขึ้นอยู่กับความสะดวกของเจ้าบ้านชุด และติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณที่ตำแหน่งสูงจากพื้น 60 เซนติเมตร ดังรูปที่ 6 สำหรับรูปที่ 7 แสดงการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณด้านนอก (ข) และด้านในห้องน้ำ (ค) เพื่อตรวจวัดการเข้าออกห้องน้ำ



รูปที่ 6 ระยะการติดตั้งอุปกรณ์ที่หน้าประตูห้องน้ำ



รูปที่ 7 ระยะการติดตั้งอุปกรณ์ที่หน้าประตูห้องน้ำ

ส่วนที่ 2 คือ ส่วนการตรวจวัดการล้มภายในห้องน้ำ (กลุ่มเซนเซอร์ T) ประกอบด้วยเซนเซอร์จำนวน 3 ตัว ซึ่งเซนเซอร์ทั้ง 3 ตัวนี้อาศัยการตรวจวัดระยะทาง โดยถ้ามีการล้มเกิดขึ้นในห้องน้ำแล้วระยะทางที่เซนเซอร์ตรวจวัดได้จะยาวกว่ากรณีที่ไม่มีการล้มในห้องน้ำ เนื่องจากไม่มีส่วนของร่างกายมาขวางระยะทางในการวัดของเซนเซอร์ สำหรับการออกแบบในงานวิจัยนี้อ้างอิงห้องน้ำที่มีขนาดกว้าง ยาว สูง คือ 1 X 2 X 2.5 เมตร ตามลำดับ มีฝักบัว ไม่มีอ่างอาบน้ำ และห้องอาบน้ำแยกเป็นสัดส่วน โดยเมื่อเปิดประตูเข้าห้องน้ำจะพบกับอ่างล้างหน้า โถสุขภัณฑ์ และฝักบัวอาบน้ำ ซึ่งภาพมุมมองของการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดถูกติดตั้งภายในห้องน้ำแสดงดังรูปที่ 8



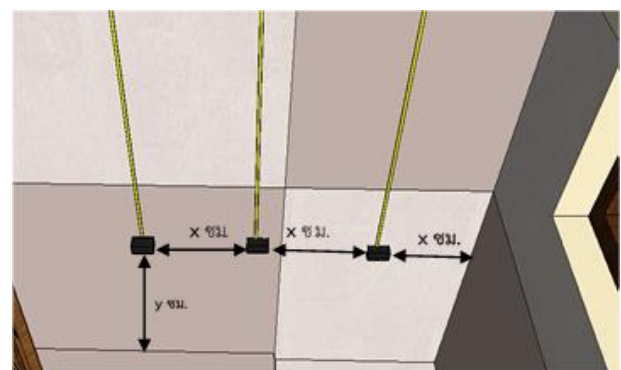
รูปที่ 8 ภาพมุมมองบนของการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดภายในห้องน้ำ

จากผลการสำรวจรูปร่างทั่วประเทศของศูนย์อิเล็กทรอนิกส์และคอมพิวเตอร์แห่งชาติ (NECTEC) (National Electronics and Computer Technology Center, 2009) พบว่า รูปร่างผู้ชายไทยและผู้หญิงไทยโดยเฉลี่ย สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยรูปร่างผู้ชายไทยและผู้หญิงไทย

เพศ	น้ำหนัก (กก.)	ส่วนสูง (ซม.)	รอบอก (ซม.)	รอบเอว (ซม.)	รอบสะโพก (ซม.)
ผู้ชาย	68.83	169.46	99.20	84.79	37.40
ผู้หญิง	57.40	157.00	91.09	79.83	38.50

จากข้อมูลในตารางที่ 1 เพื่อให้สามารถตรวจสอบการล้มภายในห้องน้ำได้จึงออกแบบให้อุปกรณ์ตรวจวัดถูกติดตั้งดังรูปที่ 9 โดยมีค่า x และ y เท่ากับ 25 และ 75 ซม. ตามลำดับ



รูปที่ 9 ระยะการติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดภายในห้องน้ำ

ทั้งนี้ระยะ x และ y ของการติดตั้งและจำนวนของอุปกรณ์ตรวจวัด สามารถปรับเปลี่ยนได้ตามขนาดของห้องน้ำและรูปร่างของผู้ใช้งานจริง

4. ผลการทดลอง

การทดลองเพื่อทดสอบระบบการทำงานของระบบแจ้งเตือนการล้นในท้องน้ำของงานวิจัยนี้จะดำเนินการทดสอบทั้ง 2 ส่วน คือ ส่วนการตรวจวัดการเข้าออกท้องน้ำ และส่วนการตรวจวัดการล้นภายในท้องน้ำ โดยได้แสดงผลการทดลองความถูกต้องในการวัดแยกในแต่ละส่วน ดังรายละเอียดด้านล่าง

4.1 ผลการตรวจวัดการเข้าออกท้องน้ำ

การทดลองความถูกต้องในส่วนของการตรวจวัดการเข้า-ออกท้องน้ำซึ่งอ้างอิงตำแหน่งจากรูปที่ 6 และ 7 ได้ดำเนินการผ่านกรณีศึกษา 4 กรณี ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 กรณีศึกษาของการทดลองการตรวจวัดการเข้า-ออกท้องน้ำ

กรณี	ลำดับการทำงานของอุปกรณ์วัด	ผลลัพธ์
1	(ข)	ไม่ผ่านเข้าท้องน้ำ
2	(ข)→(ค)	ผ่านเข้าท้องน้ำ
3	(ข)→(ค) แล้ว (ค)	ผ่านเข้าแต่ไม่ออกจากท้องน้ำ
4	(ข)→(ค) แล้ว (ค)→(ข)	ผ่านเข้าและออกจากท้องน้ำ

ผลการทดลองการตรวจวัดการเข้า-ออกท้องน้ำในแต่ละกรณี สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3 โดยทำการทดลองกรณีละ 10 ครั้งเพื่อให้มั่นใจว่าการทำงานของส่วนการตรวจสอบการเข้าออกท้องน้ำมีเสถียรภาพ ซึ่งจะพบว่า การทำงานของส่วนนี้สามารถทำงานได้อย่างถูกต้องแม่นยำในทุกกรณีและทุกครั้งที่ทำการทดลอง

ตารางที่ 3 ผลการทดลองการตรวจวัดการเข้า-ออกท้องน้ำ

กรณี	การทดลองครั้งที่									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
2	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
3	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
4	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/

หมายเหตุ / คือ เป็นไปตามผลลัพธ์ × คือ ไม่เป็นไปตามผลลัพธ์

4.2 ผลการตรวจวัดการล้นภายในท้องน้ำ

การทดลองความถูกต้องในส่วนของการตรวจวัดการล้นภายในท้องน้ำจะถูกจำลองกรณีศึกษา 2 กรณี คือ กรณีเกิดการล้นในท้องน้ำ และกรณีที่มิเกิดการล้นในท้องน้ำ โดยในกรณีเกิดการล้นในท้องน้ำจะพิจารณาตามลักษณะการล้น ทั้งการล้นไปข้างหน้าและการล้นไปทางด้านหลัง (Kitisomprayoonkul,

2018) ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้จะพิจารณาท่าทางภายหลังการล้นทั้งหมด 4 ท่า คือ ท่านอนคว่ำหน้า ท่านอนหงายหน้า ท่านอนตะแคงข้าง และท่านั่งกึ่งนอน ซึ่งเมื่อเกิดเหตุการณ์ขึ้นในแต่ละกรณี ผลลัพธ์ที่ได้จากระบบการแจ้งเตือนการล้นสามารถเป็นไปได้ 2 ผลลัพธ์ ทำให้เกิดเหตุการณ์ที่เป็นไปได้สำหรับระบบแจ้งเตือนการล้น 4 เหตุการณ์ คือ

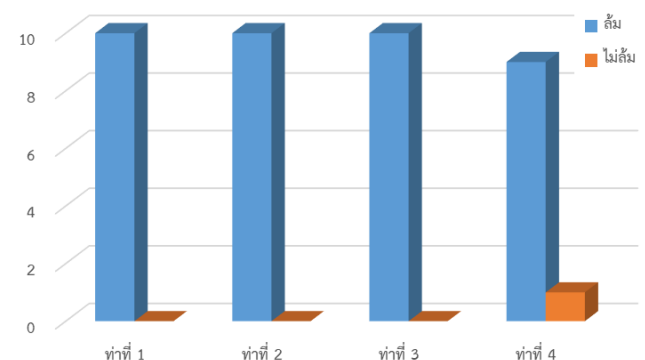
เหตุการณ์ 1 เกิดการล้นในท้องน้ำ และมีการแจ้งเตือน เหตุการณ์นี้เปรียบได้กับการประเมินกรณี TP

เหตุการณ์ 2 เกิดการล้นในท้องน้ำ แต่ไม่มีการแจ้งเตือน เหตุการณ์นี้เปรียบได้กับการประเมินกรณี FN

เหตุการณ์ 3 ไม่เกิดการล้นในท้องน้ำ แต่มีการแจ้งเตือน เหตุการณ์นี้เปรียบได้กับการประเมินกรณี FP

เหตุการณ์ 4 ไม่เกิดการล้นในท้องน้ำ และไม่มีการแจ้งเตือน เหตุการณ์นี้เปรียบได้กับการประเมินกรณี TN

ผลการทดลองการตรวจวัดกรณีเกิดการล้นภายในท้องน้ำทั้ง 4 ท่าทาง ประกอบด้วย ท่าที่ 1, 2, 3 และ 4 คือ การล้นท่านอนคว่ำหน้า ท่านอนหงายหน้า ท่านอนตะแคงข้าง และท่านั่งกึ่งนอน ตามลำดับ โดยทำการทดลองท่าทางละ 10 ครั้ง สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 10 ซึ่งจะพบว่า การล้นใน 3 ท่าแรก ระบบตรวจจับการล้นในท้องน้ำสามารถตรวจวัดได้ทุกครั้งของการทดลองเมื่อเกิดการล้นขึ้น ยกเว้นกรณีการล้นท่านั่งกึ่งนอนมีเพียงการทดลอง 1 ครั้งที่ทำให้ระบบไม่แจ้งเตือน ซึ่งเกิดจากลักษณะการล้นที่ระบบไม่สามารถตรวจวัดเจอไม่ใช่เกิดจากระบบตรวจวัดได้แล้วไม่แจ้งเตือน



รูปที่ 10 ผลการทดลองการล้นภายในท้องน้ำ

สำหรับผลการทดลองการตรวจวัดกรณีที่มิเกิดการล้นในท้องน้ำ ทำการทดลองทั้งหมด 10 ครั้ง ผลที่ได้พบว่าระบบ

สามารถทำงานได้อย่างถูกต้องทุกครั้ง กล่าวคือ ไม่เกิดการแจ้งเตือนมายังโทรศัพท์เคลื่อนที่

จากผลการทดลองระบบแจ้งเตือนการล้มในห้องน้ำ สามารถนำมาประเมินผลความถูกต้อง โดยมีค่าดังนี้

$$\%Sensitivity = \frac{39}{39+1} \times 100 = 97.5\%$$

ความจำเพาะ

$$\%Specificity = \frac{10}{10+0} \times 100 = 100\%$$

ความถูกต้อง

$$\%Accuracy = \frac{39+10}{39+1+10+0} \times 100 = 98\%$$

จากผลการประเมินจะพบว่า ระบบแจ้งเตือนการล้มในห้องน้ำความไวในการตรวจสอบการล้มร้อยละ 97.5 ในขณะที่มีความจำเพาะที่แสดงถึงความสามารถในการตรวจจับว่าไม่เกิดการล้มร้อยละ 100 ซึ่งโดยรวมแล้วค่าความถูกต้องหรือความเที่ยงตรงในการวัดของระบบแจ้งเตือนการล้มในห้องน้ำมีค่าอยู่ที่ร้อยละ 98

5. สรุป

การพัฒนาาระบบแจ้งเตือนการล้มในห้องน้ำประกอบด้วย 2 ส่วน คือ อุปกรณ์ตรวจวัดและส่งสัญญาณ และแอปพลิเคชันสำหรับรับสัญญาณและแจ้งเตือน โดยอุปกรณ์ตรวจวัดและส่งสัญญาณทำหน้าที่รับข้อมูลจากอุปกรณ์ตรวจวัดสัญญาณการเข้า-ออกและการล้มภายในห้องน้ำที่พัฒนาขึ้น ซึ่งข้อมูลที่รับมาจะนำไปประมวลผลสถานการณ์การล้มในห้องน้ำและส่งสัญญาณและข้อมูลแจ้งเตือนไปยังแหล่งเก็บข้อมูลบนก้อนเมฆ จากนั้นส่วนรับสัญญาณจะนำข้อมูลแจ้งเตือนให้แก่ผู้ใช้งานได้ทราบผ่านแอปพลิเคชันไลน์และเพิ่มความสะดวกและรวดเร็วในการขอความช่วยเหลือโดยใช้แอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้นสำหรับโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่ใช้ระบบปฏิบัติการแอนดรอยด์เท่านั้น ข้อดีของระบบการแจ้งเตือนที่ได้พัฒนาขึ้นนี้ คือ ระบบนี้จะไม่ทำให้ผู้ใช้งานสูญเสียความเป็นส่วนตัวเหมือนกับการใช้กล้องเพื่อตรวจสอบ และไม่ก่อให้เกิดความรำคาญหรือสร้างความสะดวกโดยไม่ต้องพกพาอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับการตรวจวัดการล้มติดตัวตลอดเวลา

ผลการทดสอบระบบแจ้งเตือนการล้มในห้องน้ำทำให้ทราบว่า ระบบแจ้งเตือนฯ สามารถแจ้งเตือนการล้มในห้องน้ำ

ได้อย่างถูกต้องแม่นยำถึงร้อยละ 98 โดยแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชันไลน์ในทุกๆ 10 วินาที จนกว่าผู้ที่เกิดอุบัติเหตุ

ได้รับการช่วยเหลือออกจากห้องน้ำ นอกจากนี้ยังเพิ่มในส่วนของแอปพลิเคชันสำหรับโทรศัพท์เคลื่อนที่ที่พัฒนาขึ้นเพื่ออำนวยความสะดวกและรวดเร็วในการขอความช่วยเหลือตามที่ต้องการได้

6. เอกสารอ้างอิง

- NHESO. (2009). *Report of the Thai public health survey by physical examination (2008 - 2009)*. <https://www.hiso.or.th/hiso/picture/reportHealth/report/report6.pdf> The Graphico systems
- Ministry of public health. (2019, 20 December). *Data on the number and rate of death from falls in the elderly ICD10 (W00 - W19)*. <http://www.thaincd.com/2016/mission/documents-detail.php?id=13658&tid=39&gid=1-027>
- Kido, S., Miyasaka, T., Tanaka, T., Shimizu, T., & Saga, T. (2009, January 29). *Fall detection in toilet rooms using thermal imaging sensors* [Paper presentation]. 2009 IEEE/ SICE International Symposium on System Integration (SII), Tokyo, Japan.
- Shirogane, S., Takahashi, H., Murata, K., Kido, S., Miyasaka, T., Saga, T., Sakurai, S., Hamaguchi, T., & Tanaka, T. (2019). Use of Thermal Sensors for Fall Detection in a Simulated Toilet Environment. *International Journal of New Technology and Research (IJNTR)*, 5(11), 21–25.
- Chotikawanich, T. (2012). *An Embedded System for Fall Detection While Showering by a Privacy Camera* [Master's Thesis]. Prince of Songkla University. <https://kb.psu.ac.th/psukb/handle/2010/8375>
- de Miguel, K., Brunete, A., Hernando, M., & Gambao, E. (2017). Home Camera-Based Fall Detection System for the Elderly. *Sensors (Basel)*, Multidisciplinary Digital Publishing Institute (MDPI), 17(12), 1 – 31. <https://doi.org/10.3390/s17122864>
- Thawornwong, N., Akarasatthung, A., & Makasorn, P. (2011). Designing of Falls Detection for Elderly by Using Tilt Sensor. *Naresuan University Journal, Special Issue*, 43–46.
- Kanjananoppawong, J., & Puttha, K. (2013). *Fall Behavior Detection System using 3-Axis Accelerometer by FiO Std Board* [Bachelor's Thesis]. Nakhon Ratchasima. Suranaree university of technology.
- Sompang, P., & Jaruwittayakowit, T. (2017, November 1-2). 2D Fall Detection with Bluetooth Accelerometer Sensor. 9th National Conference on Information Technology, NCIT.

- Mattern, F., & Floerkemeier, C. (2010). *From Internet of Computers to the Internet of Things*. Springer-Verlag Berlin.
- Perera, C., Zaslavsky, A., Christen, P., & Georgakopoulos, D. (2014). Context-Aware Computing for The Internet of Things: A Survey. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, 6(1), 414–454.
- Casini, M. (2014). Internet of things for Energy efficiency of buildings. *International Scientific Journal Architecture and Engineering*, 29, 1–5.
- Nilrak, P., Yatdon, W., & Chaiyabut, N. (2018). Alert System of Solar Panels Operation. *Engineering Journal Chiang Mai University*, 25(2), 124 – 134.
- Sparkfun. (2019, January 29). *Sharp GP2Y0A02*. https://www.sparkfun.com/datasheets/Sensors/Infrared/gp2y0a02yk_e.pdf
- Wangsuphachart, S. (2018, October 29). *Research Design & Research Methodology*. <http://www.cai.md.chula.ac.th/lesson/research/re7.htm>
- Doungthaklang, P., Sreesompan, P., & Batchinger, R. (2017). Real-world Applications Development with MIT App Inventor. *Apheit journals*, 6(1), 80–91.
- National Electronics and Computer Technology Center. (2009, October 29). *survey results of size nationwide*. http://www.sizethailand.org/region_all.html
- Kitisomprayoonkul, W. (2018, October 29). *Falling and prevention*. http://medinfo2.psu.ac.th/cancer/db/news_ca.php?newsID=106&typeID=20&form=7

การประเมินความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการเบรก คุณสมบัติผ้าเบรก และตัวแปรในกระบวนการ
อัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อน ด้วยเทคนิคการกระจายหน้าที่เชิงคุณภาพ

Evaluation of Relationship between Brake Performances, Properties of Brake Pad
and Hot-Pressing Process Parameters by QFD Technique

อนุดิตา มากมี*, ประจวบ กล่อมจิตร
Anutida Makmee*, Prachuab Klomjit

สาขาวิชาการจัดการงานวิศวกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร
Department of Engineering Management, Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University

*Corresponding author: ked.anu17@gmail.com

(Received: 23 January 2020, Revised: 263 March 2020, Accepted: 1 June 2020)

บทคัดย่อ

อุตสาหกรรมการผลิตผ้าเบรกมีการแข่งขันกันมากขึ้น โดยเฉพาะในด้านของคุณภาพ ประสิทธิภาพการเบรกจะถูกออกแบบให้ตอบสนองความต้องการของลูกค้า แต่ในการทดสอบประสิทธิภาพนั้นมีความยากในการทดสอบและมีค่าใช้จ่ายสูง คุณภาพของผ้าเบรกจึงถูกควบคุมโดยการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของผ้าเบรกทดแทน ซึ่งในกระบวนการผลิต กระบวนการอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อนเป็นกระบวนการที่สำคัญที่สุด เนื่องจากส่งผลกระทบต่อตรงกับคุณสมบัติทางกายภาพและประสิทธิภาพของการเบรก จากการศึกษาบริษัทตัวอย่าง พบว่ามีสูตรเคมี B เป็นสูตรที่มีมูลค่าสูง มีการผลิตมาก พบของเสียในกระบวนการผลิตต่ำ แต่เกิดการร้องเรียนจากลูกค้าสูง ซึ่งคาดว่าเกิดจากการควบคุมการผลิตและการตรวจพบที่ยังไม่ครอบคลุม จุดประสงค์ของการศึกษานี้จึงเป็นการใช้เทคนิคการกระจายหน้าที่เชิงคุณภาพ เพื่อประเมินความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการเบรก คุณสมบัติของผ้าเบรก และตัวแปรในกระบวนการอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อน เพื่อเป็นแนวทางการพัฒนาควบคุมการผลิต จากการศึกษาทำให้ทราบว่าสูตรเคมี B ถูกออกแบบประสิทธิภาพโดยเน้นความสามารถในการเบรกสูง มีตัวแปรสำคัญ จำนวน 5 ตัวในกระบวนการอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อนได้แก่ แรงอัด อุณหภูมิ เวลา จำนวนครั้งในการกด และระยะยกแม่พิมพ์ ซึ่งตัวแปรทั้ง 5 ตัวแปรส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของผ้าเบรก และประสิทธิภาพการเบรก จากการคำนวณค่าสัดส่วนความสำคัญแต่ละตัวแปรโดยเทคนิคการกระจายหน้าที่เชิงคุณภาพพบว่ามีความสำคัญแต่ละตัวแปรอยู่ที่ 15%

คำสำคัญ: เทคนิคการกระจายหน้าที่เชิงคุณภาพ ผ้าเบรก ประสิทธิภาพการเบรก คุณสมบัติผ้าเบรก กระบวนการอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อน

Abstract

Due to high competition in brake pad manufacturing especially in term of quality, brake performance must be perfectly designed to meet the customer needs. The performance testing of brake pad is practically difficult and relatively high cost, so brake pad quality is controlled by physical property tests instead. In production process, Hot-pressing process is the most crucial step because it directly affects physical properties and performances. The study asserted that formula “B” from sample manufactory was high value and mass produced with low manufacturing waste, yet it received lots of customer complains. It could be expected that the process control and the detection couldn’t solve all problems. The objective of this study was to evaluate relationships between brake performances, physical properties of brake pad and hot-pressing process parameters by using Quality Function Deployment technique (QFD). The relationship evaluation was a tool to help process control in production. The result showed that formula B was originally designed for high stopping

performance. Also, it was found that there were five parameters of hot-pressing process; pressure, temperature, holding time, number of gas release and lifting height; that had high impact to physical properties and performances of brake pad. In addition, QFD technique showed the significant weight of each parameter which was 15%.

Keywords: Quality Function Deployment (QFD), Brake pad, Brake performance, Properties of disc brake, Hot-pressing process

1. บทนำ

ผ้าเบรก เป็นชิ้นส่วนที่สำคัญในระบบเบรก มีหน้าที่สำคัญในการหยุดรถและชะลอความเร็ว เป็นอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับความปลอดภัยของผู้ใช้งานรถยนต์ ในปัจจุบันตลาดผ้าเบรกมีการแข่งขันกันมากขึ้น โดยเฉพาะในด้านของคุณภาพ (Ministry of Industry, 2010; GSB Research, 2018) นอกจากนี้ความสามารถในการหยุดรถ ประสิทธิภาพอื่น ๆ ของผ้าเบรกก็ถือเป็นเรื่องสำคัญ ไม่ว่าจะเป็น การสึกของผ้าเบรกและจานเบรก การเกิดเสียง การเกิดฝุ่น และความทนทานต่อสภาพการใช้งาน ที่เป็นส่วนสำคัญในการตัดสินใจเลือกซื้อสินค้าของลูกค้า ซึ่งจะมีการเลือกให้ตรงกับการใช้งาน

ประสิทธิภาพการเบรกขึ้นอยู่กับสองส่วนที่สำคัญ คือ วัสดุที่ใช้และกระบวนการผลิต ซึ่งสองส่วนนี้จะมีผลกระทบโดยตรง กับสมบัติทางกายภาพ (Physical properties) และสมบัติเชิงกล (Mechanical properties) ทำให้ผ้าเบรกมีประสิทธิภาพการเบรกที่แตกต่างกันออกไป (Wilairat et al., 2018)

การเลือกวัสดุที่ใช้และเงื่อนไขการผลิต เป็นขั้นตอนในการออกแบบผลิตภัณฑ์ให้ตรงกับลูกค้ากลุ่มเป้าหมาย ซึ่งจะมีการตรวจสอบประสิทธิภาพการเบรกของชิ้นงานให้เป็นไปตามการออกแบบ แต่การผลิตในอุตสาหกรรมไม่สามารถตรวจสอบประสิทธิภาพการเบรกได้โดยตรง เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายสูงและระยะเวลาทดสอบนาน จึงมีการควบคุมคุณภาพโดยการตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพและคุณสมบัติเชิงกลทดแทนการตรวจสอบประสิทธิภาพโดยตรง (ISO, 2008)

บริษัทตัวอย่างเป็นบริษัทผลิตผ้าเบรกที่มีการทดสอบประสิทธิภาพในขั้นตอนของการออกแบบด้วยเครื่องทดสอบไดนาโมมิเตอร์ (Dynamometer) ในกระบวนการผลิตมีกระบวนการอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อน ซึ่งเป็นกระบวนการที่ส่งผลกระทบต่อประสิทธิภาพการเบรกมากที่สุด กระบวนการอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อนเป็นการทำให้ก้อนเคมีเกิดปฏิกิริยากลายเป็นวัสดุที่มีความแข็งและมีสมบัติเสียดทาน ทำให้แผ่นเหล็กและเคมีติดกัน และทำให้ผ้าเบรกมีรูปร่างและลักษณะตามต้องการเพื่อให้สามารถประกอบติดตั้งได้ โดยมีการควบคุมคุณภาพของผ้าเบรกโดยการตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพและการตรวจสอบด้วยสายตาเท่านั้น

บริษัทตัวอย่างมีสูตรเคมี B ซึ่งเป็นสูตรเคมีที่มีการผลิตสูง มีมูลค่าสินค้ามาก เกิดข้อเสียในการผลิตต่ำ แต่เกิดปัญหาการร้องเรียนเรื่องประสิทธิภาพบ่อยครั้ง ซึ่งมีโอกาสสูงที่ระบบการควบคุมในปัจจุบันอาจจะยังไม่ครอบคลุมปัญหาที่เกิดขึ้นในการผลิต และการตรวจสอบคุณภาพยังไม่สัมพันธ์กับประสิทธิภาพที่ลูกค้าได้รับ ทำให้ผ้าเบรกที่ลูกค้าได้รับมีการใช้งานที่ไม่เต็มประสิทธิภาพ โดยในส่วนของบริษัทจะทำการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบในการออกแบบและกระบวนการ (DFMEA และ PFMEA) เป็นพื้นฐานในการออกแบบระบบควบคุมคุณภาพและตรวจสอบข้อร้องเรียนต่าง ๆ ซึ่งปัจจุบัน DFMEA และ PFMEA ยังไม่มีการเชื่อมโยงข้อมูลกัน ทำให้ระบบการทำงานไม่สอดคล้องกัน ในงานวิจัยนี้จึงเป็นการประยุกต์ใช้เทคนิคการกระจายหน้าที่เชิงคุณภาพแบบสี่ช่วง (4 Phase QFD) เนื่องจากในเฟสที่ 1 บริษัทตัวอย่างมีการศึกษาความต้องการของลูกค้าเพื่อแปลความต้องการของลูกค้าเป็นในเชิงเทคนิคแล้ว ซึ่งต้องการเน้นกลุ่มลูกค้าที่ใช้งานทั่วไป ใช้งานได้ทุกการขับขี ในงานการศึกษานี้จึงใช้เฟสที่ 2 และ 3 มาประยุกต์ใช้เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการเบรก คุณสมบัติทางกายภาพของผ้าเบรก และกระบวนการอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อน ในสูตรเคมี B ของบริษัทตัวอย่าง เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนา FMEA ของบริษัทต่อไป

2. เอกสารและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ผ้าเบรก

ผ้าเบรก เป็นอุปกรณ์ที่ช่วยชะลอและหยุดการเคลื่อนที่ของรถ ผ้าเบรกมีองค์ประกอบหลักทั้งหมด 3 ส่วน ได้แก่ แผ่นเหล็กเคมี และกาวสำหรับทำให้แผ่นเหล็กและเคมียึดติดกัน

องค์ประกอบเคมีของเนื้อผ้าเบรกสามารถแบ่งได้เป็น 5 กลุ่ม ได้แก่ สารยึด (Binder), ไฟเบอร์ (Fibers), สารขัดถู (Abrasives), สารเติมเต็ม (Mineral Fillers) และ สารหล่อลื่น (Lubricants) (Kosbe & More, 2010) ซึ่งสารเคมีเหล่านี้จะถูกออกแบบให้ใช้ในปริมาณที่แตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับสูตร (Formula) ที่มีการออกแบบเพื่อตอบสนองการใช้งานในรูปแบบต่าง ๆ (Hemso, 2013)

2.2 ประสิทธิภาพของผ้าเบรก

ประสิทธิภาพของผ้าเบรกคือสิ่งที่ลูกค้าได้รับจากการใช้ผลิตภัณฑ์ เพื่อตอบสนองความพึงพอใจของลูกค้าประสิทธิภาพการเบรกถูกออกแบบเพื่อตอบสนองการใช้งานที่แตกต่างกันโดยประสิทธิภาพของผ้าเบรกที่สำคัญได้แก่

1. สัมประสิทธิ์แรงเสียดทาน (Friction coefficient: μ) เป็นประสิทธิภาพที่สื่อถึงความสามารถในการหยุดของผ้าเบรก หากมีค่าน้อยจะทำให้ระยะเบรกมาก เป็นอันตรายต่อการขับขี่ ยิ่งมีค่ามากจะทำให้ระยะเบรกสั้น แต่หากมีค่าสูงเกินไปก็ทำให้เกิดอาการล้อล็อกและเกิดอันตรายได้ ดังนั้นสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานจึงต้องมีการออกแบบให้เหมาะสมกับการใช้งาน เพื่อไม่เป็นอันตรายกับผู้ขับขี่ ในการใช้งานสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานมีความแปรปรวนจากหลาย ๆ ด้าน ทั้งในเรื่องของแรงที่ใช้ในการเหยียบเบรก น้ำหนักในการบรรทุก ความเร็วต้นในการหยุด และอุณหภูมิสะสมในงานเบรก การใช้งานที่อุณหภูมิสูง (มากกว่า 250°C) จะทำให้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานลดลงจนไม่สามารถหยุดรถได้ในระยะปลอดภัย เรียกปรากฏการณ์นี้ว่าการเฟด (Fade) ซึ่งในการออกแบบผ้าเบรกจึงต้องมีการออกแบบให้ครอบคลุมถึงการใช้งานที่อุณหภูมิที่แตกต่างกันด้วย (Kosbe & More, 2010; Hemso, 2013; Nicholson, 1995)

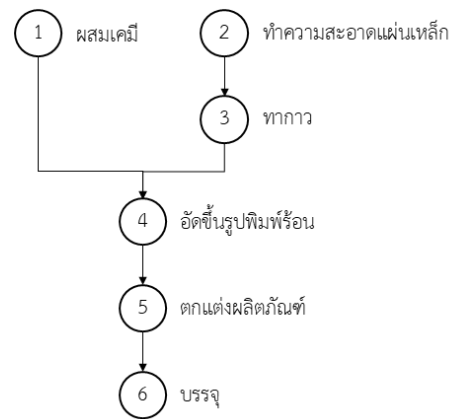
2. อัตราการสึก (Wear) เนื่องจากการใช้งานในระบบเบรกคือการเสียดสีกันระหว่างผ้าเบรกและจานเบรกเพื่อให้เกิดแรงในการหยุดล้อ ทำให้ทั้งผ้าเบรกและจานเบรกเกิดการสึก อัตราการสึกจึงสื่อถึงอายุการใช้งานของผ้าเบรกด้วย หากมีการสึกต่ำอายุการใช้งานของผ้าเบรกก็จะมากขึ้นไปด้วย นอกจากนั้นการสึกของจานเบรกและผ้าเบรกกยังส่งผลต่อปัญหาในด้านของฝุ่นดำที่อาจจะทำให้ลูกค้าไม่พึงพอใจได้ (Hemso, 2013; Nicholson, 1995)

3. เสียง (Noise) เสียงที่เกิดขึ้นจากการใช้งานเบรกไม่ได้ส่งผลกระทบต่อความปลอดภัยหรือประสิทธิภาพของการเบรก แต่ส่งผลกระทบต่อจิตใจของผู้ใช้งาน การเกิดเสียงทำให้ผู้ใช้งานรู้สึกถึงความผิดปกติของการเบรก และเกิดความรู้สึกไม่ปลอดภัยกับการขับขี่ ดังนั้นเรื่องการเกิดเสียงจึงเป็นอีกเรื่องที่สำคัญในการออกแบบผ้าเบรก (Hemso, 2013; Nicholson, 1995)

4. ลักษณะภายนอก (Appearance) ต้องไม่เกิดการแตกร้าว มีการสึกที่สม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นผิว ไม่เกิดรอยไหม้ และสภาพภายนอกของผ้าเบรกและจานเบรกหลังจากการใช้งานที่ต้องมีสภาพสมบูรณ์ตลอดการใช้งาน (ISO, 2008; Hemso, 2013)

2.3 กระบวนการผลิตผ้าเบรก

กระบวนการผลิตผ้าเบรกมีกระบวนการหลักตามรูปที่ 1 ซึ่งเป็นการผสมเคมีต่าง ๆ ให้ได้ตามสูตร เตรียมแผ่นเหล็กด้วยการทำความสะอาดและทากาว นำแผ่นเหล็กและเคมีอัดเข้าด้วยกันโดยการอัดด้วยความร้อนและแรงดันในเวลาที่เหมาะสมจะทำให้เคมีแปลงสภาพเป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติความเสียดทานและได้รูปร่างตามต้องการ หลังจากนั้นจึงนำไปตกแต่งผลิตภัณฑ์และบรรจุ เพื่อเตรียมการจำหน่าย (Wilairat et al., 2018)



รูปที่ 1 แผนภาพกระบวนการผลิต

2.4 กระบวนการอัดขึ้นรูปพรีมพ์ร้อน (Hot-pressing process)

การอัดขึ้นรูปร้อนเป็นกระบวนการที่ทำให้เกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลของพีนอลิกเรซินโดยอาศัยความร้อนและแรงดัน โดยนำเคมีอัดที่อุณหภูมิ $150 - 200^{\circ}\text{C}$ ที่แรงดัน $30 - 70\text{ MPa}$ ทำให้พีนอลิกเรซินเกิดการหลอมและไหลแทรกไปตามเนื้อวัสดุเกิดการเชื่อมโยงโมเลกุลเรซิน วัสดุเกิดการยึดติดกันที่สุดในที่สุด แต่ในระหว่างการเกิดปฏิกิริยาการเชื่อมโยงจะเกิดแก๊สแอมโมเนียเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ ซึ่งหากมีสะสมมากเกิดไปจะทำให้ผ้าเบรกเกิดการแตกและมีผลกระทบกับการใช้งาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการเพิ่มโอกาสในการเกิดเฟด ดังนั้นในช่วงแรกของการอัดจึงต้องมีการอัดและคลายแรงดันสลับกันไปมาเพื่อคลายแก๊สเป็นระยะเวลาสั้นๆ (breathing cycle) ในกระบวนการพรีมพ์ร้อนจึงมีหลากหลายปัจจัยที่ต้องกำหนดให้เหมาะสมกับแต่ละสูตรของเคมี เนื่องจากปัจจัยในกระบวนการสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของปริมาณรูพรุน สภาพอัดตัว ความยืดหยุ่น คุณสมบัติอื่น ๆ ทำให้ประสิทธิภาพการเบรกเปลี่ยนไป (Wilairat et al., 2018)

2.5 เทคนิคการกระจายหน้าที่เชิงคุณภาพ (Quality Function Deployment: QFD)

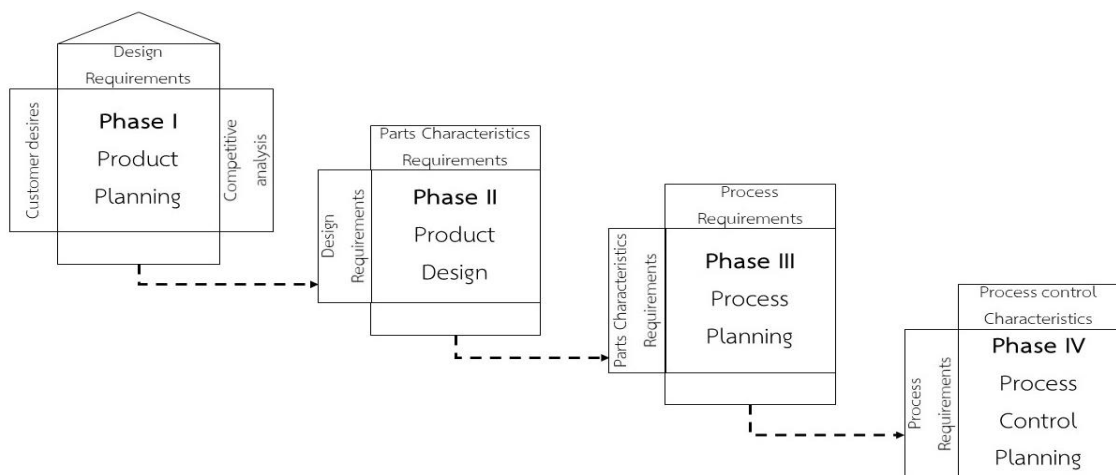
เทคนิคการกระจายหน้าที่เชิงคุณภาพ เป็นเครื่องมือที่ช่วยในการเข้าใจถึงความต้องการของลูกค้าและตลาดเป้าหมาย มุ่งเน้นให้เกิดการออกแบบผลิตภัณฑ์ที่ตอบสนองความพึงพอใจของลูกค้า รวมถึงการออกแบบกระบวนการเพื่อผลิตสินค้าและการควบคุมคุณภาพให้ได้ตามที่ต้องการ เทคนิคการกระจายหน้าที่เชิงคุณภาพมีการประยุกต์ใช้ด้วยกันหลายรูปแบบ โดยรูปแบบที่มีการนิยมใช้มากที่สุดคือแบบสี่ช่วง (Four - Phase Approach หรือ Four - Phase Model) เป็นการใช้ออนุกรมของเมทริกซ์ 4 เฟส ดังรูปที่ 2 เพื่อให้ครอบคลุมช่วงการดำเนินการที่สำคัญในการออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์ เป็นรูปแบบที่สามารถเข้าใจได้ง่ายและมีความคล่องตัวสูง

เทคนิคการกระจายหน้าที่เชิงคุณภาพแบบสี่ช่วง ประกอบไปด้วย 4 เฟส ได้แก่

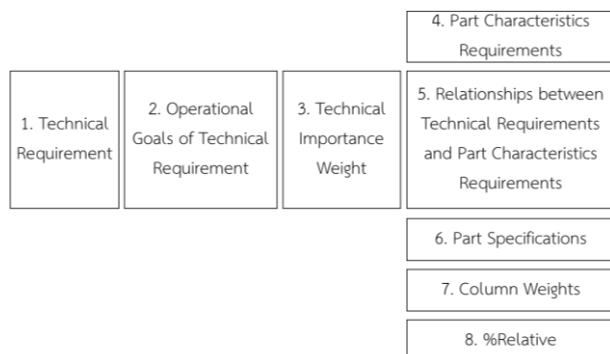
เฟส 1 การวางแผนผลิตภัณฑ์ (Product Planning Matrix) เป็นการแปลงความต้องการของลูกค้า (Customer

Requirements) ให้เป็นความต้องการทางเทคนิค (Technical Requirements) โดยการวิเคราะห์ความคิดเห็นของลูกค้า จัดลำดับความสำคัญของความต้องการ ประเมินความสามารถขององค์กรในการตอบสนองความต้องการของลูกค้ากับบริษัท คู่แข่ง ประเมินความสัมพันธ์ของความต้องการของลูกค้ากับความต้องการทางเทคนิค และคำนวณค่าน้ำหนักความต้องการทางเทคนิค เพื่อช่วยในการสื่อสารกันภายในองค์กรให้มีความเข้าใจตรงกันในแต่ละด้านต่าง ๆ

เฟส 2 การออกแบบผลิตภัณฑ์ (Product Design Matrix) เป็นการแปลงความต้องการทางเทคนิค ให้เป็นคุณลักษณะของส่วนประกอบผลิตภัณฑ์ (Part Characteristics) โดยวิเคราะห์ผ่านความต้องการและน้ำหนักความสำคัญของความต้องการทางเทคนิคในเฟสที่ 1 พิจารณารายละเอียดของส่วนประกอบผลิตภัณฑ์ในแต่ละส่วน พิจารณาหาความสัมพันธ์ที่ส่วนประกอบสามารถตอบสนองความต้องการทางเทคนิคได้ เพื่อกำหนดคุณลักษณะของส่วนประกอบ และจัดลำดับความสำคัญของคุณลักษณะส่วนประกอบ



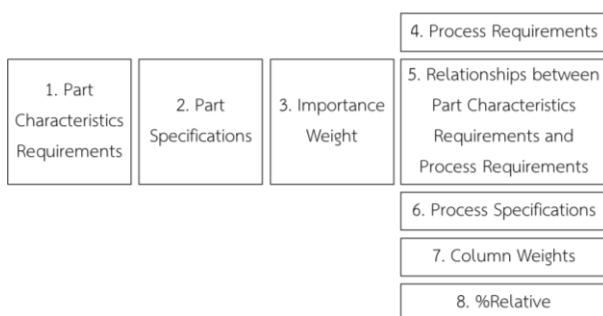
รูปที่ 2 แผนภาพเทคนิคการกระจายหน้าที่เชิงคุณภาพแบบสี่ส่วน



รูปที่ 3 QFD เฟสที่ 2 เมทริกซ์การออกแบบผลิตภัณฑ์

เฟส 3 การวางแผนกระบวนการ (Process Planning Matrix) เป็นการแปลงข้อกำหนดคุณสมบัติของส่วนประกอบ ให้เป็นข้อกำหนดหรือคุณลักษณะทางด้านกระบวนการผลิต (Process Characteristics) โดยการวิเคราะห์จากข้อกำหนดและความสำคัญของส่วนประกอบที่ได้จากเฟสที่ 2 พิจารณาถึงข้อกำหนดในกระบวนการผลิต เพื่อให้สามารถผลิตแต่ละส่วนประกอบได้ตามต้องการ และพิจารณาความสัมพันธ์ของกระบวนการผลิตกับคุณลักษณะของส่วนประกอบ เพื่อกำหนดเป็นคุณลักษณะของกระบวนการผลิต และจัดลำดับความสำคัญของข้อกำหนดหรือคุณลักษณะทางด้านกระบวนการผลิต

เฟส 4 การวางแผนการผลิต (Production Planning Matrix) เป็นการนำคุณลักษณะทางด้านกระบวนการผลิตมาออกแบบและกำหนดวิธีในการควบคุมการผลิต โดยพิจารณาจากข้อกำหนดและความสำคัญของคุณลักษณะกระบวนการในเฟสที่ 3 เพื่อพิจารณาความยากในการควบคุมกระบวนการ ความถี่ในการเกิดปัญหา ความรุนแรงของปัญหา และความสามารถในการตรวจพบ เพื่อกำหนดและกำหนดวิธีการในการควบคุมการผลิตให้สามารถผลิตได้ตามต้องการ ลดโอกาสในการเกิดข้อผิดพลาดในการผลิต (Chiraboonthanandom, 2008)



รูปที่ 4 QFD เฟสที่ 3 เมตริกซ์การวางแผนกระบวนการ

2.6 เทคนิคเดลฟาย Delphi Technique

เทคนิคเดลฟายเป็นวิธีการทางวิทยาศาสตร์เพื่อรวบรวมข้อมูลจากผู้เชี่ยวชาญ มักใช้ในการวิเคราะห์และรวบรวมข้อมูลเพื่อแก้ปัญหาที่ยังไม่มีคำตอบอย่างชัดเจน การคาดคะเนเรื่องที่จะเกิดขึ้นในอนาคต หรือความรู้ใหม่ ๆ ผ่านการตอบคำถามด้วยแบบสอบถาม โดยผู้เชี่ยวชาญแต่ละท่านสามารถแสดงความคิดเห็นได้อย่างอิสระ ช่วยลดความขัดแย้ง และลดระยะเวลาในการทำงาน

กระบวนการวิจัยด้วยเทคนิคเดลฟาย

1. กำหนดประเด็นปัญหาของการวิจัย ควรเป็นประเด็นที่ยังไม่มีคำตอบที่ชัดเจน แนวโน้มหรือคำตอบที่เป็นเรื่องในอนาคต เพื่อให้วางแผนหรือตัดสินใจได้ โดยเฉพาะด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
2. คัดเลือกผู้เชี่ยวชาญ ผู้เชี่ยวชาญในการตอบแบบสอบถาม จำเป็นต้องมีประสบการณ์และความเชี่ยวชาญในประเด็นที่เกี่ยวข้องกับประเด็นปัญหาของการวิจัย ยินดีตอบแบบสอบถามและสามารถติดต่อได้ตลอดการทำงานวิจัย
3. สร้างเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยและเก็บรวบรวมข้อมูล เครื่องมือในเทคนิคเดลฟายคือแบบสอบถาม โดยจะทำการสอบถาม 2 - 4 รอบ ขึ้นอยู่กับผลการวิจัยที่ได้รับ โดยแต่ละรอบของการสอบถามจะมีคำถามที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งใช้

เวลาแต่ละรอบไม่ควรเกิน 2 สัปดาห์ โดยคำถามในแต่ละรอบจะมีลักษณะดังต่อไปนี้

รอบที่ 1 : แบบสอบถามแบบปลายเปิด (opened end) เป็นการสอบถามความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญแต่ละคนเพื่อให้ครอบคลุมปัญหาและประเด็นต่าง ๆ ของงานวิจัย เพื่อวิเคราะห์ผลและสังเคราะห์ผลในประเด็นต่าง ๆ เพื่อใช้ทำแบบสอบถามในรอบต่อไป

รอบที่ 2 : แบบสอบถามแบบมาตราส่วนประเมินค่า เป็นการรวบรวมความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญในแบบสอบถามรอบที่ 1 และทำให้เป็นแบบสอบถามมาตราส่วนประเมินค่า ส่งกลับไปยังผู้เชี่ยวชาญกลุ่มเดิม เพื่อจัดลำดับความสำคัญของแต่ละข้อ รวมทั้งสามารถระบุเหตุผลที่เห็นด้วย ไม่เห็นด้วยและข้อเสนอแนะต่าง ๆ นำคะแนนที่ได้จากแบบสอบถามวิเคราะห์หาค่ามัธยฐาน ฐานนิยม และพิสัยระหว่างควอไทล์ หรือค่า IR (Interquartile Range) ถ้าหากพบค่า IR น้อยแสดงว่าความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญค่อนข้างสอดคล้องกัน สามารถสรุปความได้ แต่หากค่า IR มาก แสดงว่าความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญค่อนข้างกระจาย จะทำการส่งแบบสอบถามในรอบที่ 3

รอบที่ 3 : แบบสอบถามแบบมาตราส่วนประเมินค่า เป็นการพัฒนาคำตอบจากรอบที่ 2 โดยคำถามที่ใช้ในแบบสอบถามรอบที่ 3 จะใช้คำถามเช่นเดียวกันกับรอบที่ 2 แต่เพิ่มค่ามัธยฐานและค่า IR ลงไป ส่งกลับไปยังผู้เชี่ยวชาญอีกครั้งเพื่อยืนยันคำตอบเดิมหรือเปลี่ยนแปลงคำตอบ และนำมาวิเคราะห์ค่ามัธยฐานและค่า IR เช่นเดียวกับรอบที่ 2 และหากค่า IR มีค่าน้อยก็สามารถสรุปความได้ แต่หากยังมีค่ามากก็จะทำการส่งแบบสอบถามในรอบที่ 4

รอบที่ 4 : แบบสอบถามแบบมาตราส่วนประเมินค่า ใช้แบบสอบถามเช่นเดียวกันกับรอบที่ 3 แต่เปลี่ยนค่ามัธยฐานและค่า IR เป็นผลที่ได้จากการวิเคราะห์ในรอบที่ 3 ส่งแบบสอบถามให้ผู้เชี่ยวชาญประเมินอีกครั้ง ทำวิเคราะห์ค่ามัธยฐานและค่า IR

4. สรุปและวิเคราะห์ผล หลังจากได้ข้อมูลที่สอดคล้องเมื่อพิจารณาค่ามัธยฐานและค่า IR แล้วจึงทำการสรุปคำตอบแต่ละประเด็น (Tiantong, 2005)

2.7 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

Chiraboonthanandom (2008) ได้ทำการศึกษาการใช้เทคนิคการกระจายหน้าที่เชิงคุณภาพ โดยประยุกต์ใช้ในเมตริกซ์ที่ 2 - 4 ในการวิเคราะห์ถึงการออกแบบและพัฒนาการผลิตคอยล์ร้อน โดยใช้เมตริกซ์ที่ 2 ในการแปลความ

หมายความว่าความต้องการเชิงเทคนิคของคอยล์ร้อนเป็นความต้องการคุณสมบัติของส่วนประกอบต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในผลิตภัณฑ์ หลังจากนั้นวิเคราะห์เมตริกซ์ที่ 3 เพื่อพิจารณาถึงกระบวนการต่าง ๆ ที่จะใช้ในการผลิตชิ้นส่วนให้ได้ตามต้องการ และวิเคราะห์เมตริกซ์ที่ 4 เพื่อควบคุมกระบวนการผลิตชิ้นส่วนให้ได้ตามที่ออกแบบไว้ ทำให้ทราบถึงความสัมพันธ์ของผลิตภัณฑ์และการทำงานในกระบวนการ รวมทั้งในการควบคุมกระบวนการมีการใช้เทคนิควิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบในกระบวนการผลิต (PFMEA) โดยพิจารณาจากปัญหาต่าง ๆ ที่เกิดขึ้นในเดือนกันยายนถึงเดือนตุลาคม ซึ่งมีสัดส่วน 16.29 % ซึ่งหลังจากพิจารณาถึงข้อบกพร่องต่าง ๆ เพื่อหาสาเหตุที่เกิดขึ้นและทำการปรับปรุงแก้ไขข้อบกพร่อง ทำให้ยอดของเสียลดลงจนเหลือ 7.5 %

Srimai et al. (2019) การใช้เทคนิค QFD เพื่อปรับปรุงคุณค่าของผลิตภัณฑ์ โดยการศึกษาความต้องการของผู้ใช้งานและแปลงออกมาเป็นการออกแบบข้อกำหนดของผลิตภัณฑ์ ทำให้ทราบความสำคัญของคุณสมบัติในแต่ละด้านของผลิตภัณฑ์ ซึ่งสามารถนำข้อมูลดังกล่าวไปวิเคราะห์ต่อการเลือกวัตถุดิบเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่ตรงตามความต้องการของลูกค้า

Sanguansai (2007) การก่อสร้างบ้านซึ่งพบปัญหาในการส่งงานล่าช้าอันเนื่องมาจากความผิดพลาดในการทำงานต่าง ๆ ที่จะมีการจ้างผู้รับเหมาจากภายนอกเข้ามาทำ โดยประยุกต์ใช้ QFD ในเมตริกซ์ที่ 3 – 4 โดยวิเคราะห์จากความคาดหวังของลูกค้า ความสามารถของคู่แข่ง ประสิทธิภาพการทำงานของผู้รับเหมา และทิศทางการพัฒนาของบริษัทตัวอย่าง ซึ่งทำให้ทราบความสัมพันธ์และความสำคัญของข้อมูลเหล่านี้ สามารถเชื่อมโยงข้อมูลของความคิดเห็นต่าง ๆ ไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งเมื่อทำการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบ (FMEA) จากขั้นตอนการทำงานที่ส่งผลให้เกิดความผิดพลาด คุณภาพไม่ได้ตามที่กำหนดไว้ หลังจากการประเมินผู้วิจัยได้เลือก 3 ขั้นตอนที่มีดัชนีความเสี่ยงสูงสุดในแต่ละกระบวนการ เพื่อจัดทำเป็นเอกสารขั้นตอนการทำงาน การตรวจสอบ และแผนการควบคุม ซึ่งหลังการปรับปรุงพบว่าค่าจำนวนบกพร่องต่อหน่วย ลดลงจาก 216.18 DPU เหลือ 85.33 DPU

Korayem and Iravani (2008) ได้ทำการพัฒนาความน่าเชื่อถือและคุณภาพของแขนกลประเภท 3P และ 6R ได้ทำการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบโดยพิจารณาถึงข้อบกพร่องต่าง ๆ ที่อาจจะเกิดขึ้นเมื่อใช้งาน และเลือกค่าดัชนีความเสี่ยงที่ต้องการปรับปรุง หลังจากนั้นได้ทำการวิเคราะห์ QFD ทั้ง 4 เฟส โดยเริ่มจากพิจารณาถึงความต้องการของผู้ใช้งานแขนกล วิเคราะห์หาจุดที่ต้องการพัฒนา หลังจากนั้นวิเคราะห์ถึงการออกแบบส่วนประกอบต่าง ๆ กระบวนการใน

การผลิต และการควบคุมการผลิต ซึ่งประโยชน์ที่ได้จากการวิเคราะห์ FMEA และการวิเคราะห์ QFD เพื่อทำการปรับปรุงนั้น ก็ทำให้ได้ลักษณะความผิดพลาด ผลกระทบ สาเหตุ ความสำคัญของส่วนประกอบ และเทคนิคที่เหมาะสมในการป้องกันข้อผิดพลาด สามารถลดดัชนีความเสี่ยงที่เกิดขึ้น และได้รายการตรวจสอบการซ่อมบำรุงและซ่อมแซมเครื่องจักร

Almannai et al. (2008) ได้นำเทคนิค QFD และ FMEA มาใช้เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจ ในการนำระบบอัตโนมัติมาใช้ในอุตสาหกรรม เนื่องจากการนำระบบอัตโนมัติมาใช้งานมีการกระทบทั้งในด้านของการเทคโนโลยี การบริหารจัดการและพนักงาน จึงจะต้องมีการหาทางเลือกที่ดีที่สุด ที่ทำให้การนำระบบอัตโนมัติเข้ามาใช้นั้นเกิดประโยชน์สูงสุด โดยได้ทำการวิเคราะห์ QFD โดยพิจารณาถึง กลยุทธ์ นโยบายและการดำเนินงานของบริษัท เพื่อหาความสอดคล้องกับการพัฒนาองค์ประกอบต่าง ๆ โดยการนำระบบอัตโนมัติเข้ามาใช้ และได้้นำเทคนิค FMEA เข้ามาใช้ในการวิเคราะห์ถึงความเสี่ยงต่าง ๆ ในการนำระบบอัตโนมัติเข้ามาใช้ ทำให้เห็นถึงความสำคัญของแต่ละองค์ประกอบ ทำให้สามารถเลือกวิธีการที่ดีที่สุดในการนำระบบอัตโนมัติเข้ามาใช้ได้ หลังจากนั้นได้มีการทดลองนำเทคโนโลยีตามทางเลือกที่ได้จากการวิเคราะห์เข้ามาใช้และพัฒนาต่อเพื่อให้เหมาะสมกับบริษัท และพบว่าความคิดเห็นที่ได้รับจากการนำมาใช้เป็นไปในทิศทางที่ดี

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 เก็บรวบรวมข้อมูล

3.1.1 ประสิทธิภาพของผ้าเบรกสูตรเคมี B ของบริษัทตัวอย่าง โดยมีการรวบรวมข้อมูลจากการทดสอบไดนามิเตอร์ (Dynamometer test) ซึ่งเป็นการจำลองประสิทธิภาพเบรกที่แรงเบรก ความเร็ว และอุณหภูมิที่แตกต่างกันไป เพื่อจำลองการเบรกในลักษณะที่ต่าง ๆ ซึ่งมีข้อมูลจำนวนการทดสอบทั้งหมด 4 ครั้งโดยมีลักษณะความเป็นรูปทรงของชิ้นงานที่แตกต่างกัน โดยใช้มาตรฐานการตรวจสอบ SAE-J2522 ค่าโฆษณาจากช่างกล่อ่งผลิตภัณฑ์และสื่อต่าง ๆ ที่ลูกค้ารับทราบถึงประสิทธิภาพที่จะได้รับจากผลิตภัณฑ์ และข้อมูลการเคลมสินค้าของบริษัทในเดือนมกราคม – มิถุนายน ปี 2562

3.1.2 คุณสมบัติของผ้าเบรกสูตรเคมี B โดยรวบรวมจากข้อกำหนดการตรวจสอบผลิตภัณฑ์ ข้อมูลการตรวจสอบจากแผนการควบคุมกระบวนการของบริษัทตัวอย่าง ซึ่งจะระบุถึงรายละเอียดในการตรวจสอบคุณสมบัติผลิตภัณฑ์ ได้แก่ วิธีการตรวจสอบ ระยะเวลาในการตรวจสอบ และผู้ตรวจสอบ รวมทั้งศึกษาจาก ISO 15484 ซึ่งเป็นมาตรฐานสากลการประกันคุณภาพของผ้าเบรก (ISO, 2008)

3.1.3 กระบวนการอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อน โดยรวบรวมข้อมูลข้อกำหนดกระบวนการผลิตการผลิต ขั้นตอนการทำงานของพนักงาน การทดสอบและงานวิจัยต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการกระบวนการอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อน และข้อมูลของเสียในกระบวนการผลิตเดือนมกราคม – มิถุนายน ปี 2562

3.2 พิจารณาเลือกประสิทธิภาพการเบรกที่ต้องการวิเคราะห์ โดยพิจารณาจากประสิทธิภาพที่ลูกค้าคาดว่าจะได้รับจากผลิตภัณฑ์ ซึ่งได้จากการโฆษณาและการสื่อสารให้กับลูกค้า ประสิทธิภาพที่เราต้องการตอบสนองให้กับลูกค้า ซึ่งได้จากทางบริษัทในการออกแบบผลิตภัณฑ์และการทดสอบต่าง ๆ และความไม่พึงพอใจของลูกค้าจากการเคลมสินค้า

3.3 ประเมินความสำคัญของสูตรเคมี B โดยผู้เชี่ยวชาญด้วยเทคนิคเดลฟาย พิจารณาประสิทธิภาพที่ได้จากข้อ 3.2 ประเมินความสำคัญของแต่ละประสิทธิภาพที่ต้องการตอบสนองให้กับลูกค้าโดยการจัดคะแนนความสำคัญน้อยไปมากตั้งแต่ 1 – 5 ทำการประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญทั้งหมด 6 ท่าน ซึ่งเป็นวิศวกรจากแผนกวิจัยพัฒนา ที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบผ้าเบรกสูตรเคมี B ประเมินโดยใช้เทคนิคเดลฟาย คำนวณหาค่าพิสัยควอไทล์ (IR) จากผลต่างควอไทล์ที่ 3 และ 1

3.4 พิจารณาเลือกคุณสมบัติของผ้าเบรกที่ต้องการวิเคราะห์ โดยพิจารณาจากข้อกำหนดผลิตภัณฑ์และการทดสอบมาตรฐาน ISO 15484 ว่าต้องมีคุณสมบัติด้านไหนที่จำเป็นต้องตรวจสอบ และการทดสอบคุณสมบัติในปัจจุบันที่ทางบริษัทสามารถตรวจสอบได้ เพื่อเลือกคุณสมบัติที่สำคัญสำหรับผ้าเบรกในการศึกษา

3.5 ประเมินความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการเบรก และคุณสมบัติของผ้าเบรก โดยการระดมสมอง (brainstorming) ของผู้เชี่ยวชาญในการทดสอบประสิทธิภาพ 1 ท่าน การทดสอบคุณสมบัติ 1 ท่าน และการออกแบบผลิตภัณฑ์ 1 ท่าน

3.6 คำนวณหาความสำคัญและจัดทำ QFD เฟสที่ 2 2 การจัดทำ QFD เฟสที่ 2 เป็นการนำข้อมูลความสำคัญของประสิทธิภาพการเบรกที่ได้จากการประเมินด้วยเทคนิคเดลฟายวิเคราะห์ร่วมกับเมตริกซ์ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการเบรกและคุณสมบัติผ้าเบรกที่ได้จากการวิเคราะห์ร่วมกับผู้เชี่ยวชาญที่เกี่ยวข้องโดยการระดมสมอง ซึ่งมีการกำหนดสัญลักษณ์เชิงตัวเลขแสดงค่าคะแนนความสัมพันธ์เป็นดังนี้

- 0 ไม่มีความสัมพันธ์กัน
- 1 มีความสัมพันธ์กันน้อย
- 3 มีความสัมพันธ์กันปานกลาง
- 9 มีความสัมพันธ์กันมาก

จัดทำข้อมูลในรูปแบบของ QFD เพื่อให้ง่ายกับการสื่อสารดังตัวอย่างรูปที่ 3 และคำนวณหาความสำคัญของคุณสมบัติจาก ผลรวมของผลคูณระหว่างค่าความสำคัญของประสิทธิภาพและค่าคะแนนความสัมพันธ์ และนำมาคำนวณหาสัดส่วนความสำคัญของคุณสมบัติโดยการเปรียบเทียบค่าความสำคัญทั้งหมดในรูปของร้อยละ

3.7 พิจารณาเลือกตัวแปรในกระบวนการอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อนที่ต้องการวิเคราะห์ ศึกษาข้อกำหนดกระบวนการผลิต ขั้นตอนการทำงาน งานวิจัยและการทดสอบต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องเพื่อพิจารณาเลือกตัวแปรที่สำคัญที่ทำให้คุณสมบัติของผ้าเบรกไม่ได้ตามต้องการ หรือส่งผลกระทบต่อในด้านต่าง ๆ หรือเป็นสาเหตุที่ทำให้เกิดของเสียในกระบวนการ

3.8 ประเมินความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติผ้าเบรกและกระบวนการอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อนโดยผู้เชี่ยวชาญด้วยเทคนิคเดลฟาย จัดคะแนนความสำคัญน้อย ปานกลาง มาก และไม่มีความสัมพันธ์กัน ทำการประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบผลิตภัณฑ์และกระบวนการทั้งหมด 4 ท่าน โดยพิจารณาแต่ละข้อกำหนดของกระบวนการว่ามีผลกระทบกับคุณสมบัติของผ้าเบรกอย่างไร คำนวณหาค่าพิสัยควอไทล์จากผลต่างควอไทล์ที่ 3 และ 1

3.9 คำนวณหาความสำคัญและจัดทำ QFD เฟสที่ 3 เป็นการนำข้อมูลคุณสมบัติที่ได้จากการพิจารณาในเฟสที่ 2 เปลี่ยนค่าสัดส่วนความสำคัญของคุณสมบัติให้อยู่ในสเกล 1-5 นำมาจัดรูปแบบ QFD เฟสที่ 3 ดังตัวอย่างรูปที่ 4 ร่วมกับผลประเมินความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติและตัวแปรในกระบวนการพิมพ์ร้อน และคำนวณหาความสำคัญของกระบวนการ จากผลรวมของผลคูณระหว่างค่าความสำคัญของคุณสมบัติและค่าคะแนนความสัมพันธ์ และนำมาคำนวณหาสัดส่วนความสำคัญของกระบวนการโดยการเปรียบเทียบค่าความสำคัญทั้งหมดในรูปของร้อยละ

3.10 วิเคราะห์และสรุปผลการวิจัย

4. ผลการวิจัย

4.1 ประสิทธิภาพการเบรกที่ใช้ในการศึกษา

ประสิทธิภาพการเบรกที่เราใช้ในการศึกษามีทั้ง 9 ด้าน ซึ่งมาจากการพิจารณารวมกันระหว่างผู้วิจัยและบริษัทตัวอย่าง เป็นประสิทธิภาพพื้นฐานของผ้าเบรก ประสิทธิภาพที่เกี่ยวข้องกับการใช้งาน ความปลอดภัย และความพึงพอใจของลูกค้า

4.1.1 ความสามารถในการหยุดรถที่อุณหภูมิปกติ (Stopping Performance Normal Temp.) การ ขับ ชี โดยทั่วไป ไม่ได้ใช้ความเร็วสูงและมีการเบรกบ่อย ช่วงอุณหภูมิ

ของการเบรกจะไม่เกิน 250 °C ซึ่งเบรกที่ดีไม่ควรมีความสามารถในการเบรกแปรผันตามอุณหภูมิ มีความเสถียรในการเบรก และมีประสิทธิภาพการเบรกเหมาะสมกับการหยุดของรถ

4.1.2 ความสามารถในการหยุดรถที่อุณหภูมิสูง (Stopping Performance High Temp.) อุณหภูมิที่สูงกว่า 250 °C มักเกิดจากการใช้งานที่ความเร็วสูงมีการเบรกถี่ ๆ จนเกิดความร้อนสะสมในการเบรก โดยปกติแล้ว สมบัติความเสถียรของผ้าเบรกจะมีค่าลดต่ำลงเมื่ออุณหภูมิสูงขึ้น ทำให้ในการใช้งาน ผู้ขับซึ่งจะรู้สึกถึงระยะเบรกที่มากขึ้น แรงเบรกที่ใช้นามากขึ้น ซึ่งประสิทธิภาพการเบรกที่ดีควรมีความเสถียรและเหมาะสมกับการหยุดเช่นเดียวกับการใช้งานที่อุณหภูมิปกติ

4.1.3 การป้องกัน การเกิด เฟด (Anti - fade Performance) โอกาสในการเกิดเฟดที่การใช้งานช่วงอุณหภูมิสูงที่ทำให้สัมประสิทธิ์แรงเสียดทานลดลง ซึ่งอาจจะทำให้เกิดอันตรายในการขับขี่ได้ เนื่องจากผ้าเบรกเกิดปฏิกิริยาเคมีภายใน ทำให้เกิดแก๊ส แก๊สจะเคลือบบริเวณผิวหน้าจานเบรก ลักษณะเช่นเดียวกันกับฟิล์มบาง ทำให้ความสามารถในการเบรกลดลง

4.1.4 อัตราการสึกของผ้าเบรก (Pad wear) การสึกของเบรกส่งผลกระทบต่ออายุการใช้งานและฝุ่นดำ ยังมีการสึกน้อยก็จะสามารถใช้งานได้นานและมีฝุ่นน้อย

4.1.5 อายุการใช้งานของจานเบรกที่อุณหภูมิปกติ (Rotor Life Time Normal Temp.) การสึกของจานเบรกเนื่องจากการเสียดสีของผ้าเบรกและจานเบรก ซึ่งส่งผลกระทบต่อทั้งในด้านฝุ่นและความพึงพอใจของลูกค้า ภาพลักษณ์ของจานเบรกหลังการใช้งานควรมีความสม่ำเสมอทั้งผิวหน้า ไม่มีลักษณะการสึกเป็นเส้นหรือสร้างความเสียหายให้กับจาน

4.1.6 อายุการใช้งานของจานเบรกที่อุณหภูมิสูง (Rotor Life Time High Temp.) อายุการใช้งานที่อุณหภูมิของจานเบรกสูง มีลักษณะความสำคัญเช่นเดียวกันกับที่อุณหภูมิปกติ แต่ในการใช้งานที่อุณหภูมิสูงมักจะทำให้เกิดการสึกที่มากกว่า รวมทั้งการทำร้ายจานเบรกในรูปแบบต่าง ๆ

4.1.7 การเกิดฝุ่น (Dust) ซึ่งเกิดจากการสึกของผ้าเบรกและจานเบรก เป็นสิ่งที่ลูกค้าสามารถมองเห็นได้ และอาจจะเกิดความพึงพอใจในผลิตภัณฑ์

4.1.8 การเกิดเสียง (Noise) เสียงที่เกิดจากการเบรกในช่วงความถี่ที่ผู้ขับซึ่งและผู้โดยสารสามารถได้ยิน เสียงไม่ได้ส่งผลกระทบต่อคุณภาพของการเบรก แต่เป็นในเรื่องของความมั่นใจและความรู้สึกของลูกค้า ที่อาจจะรู้สึกถึงความผิดปกติของผลิตภัณฑ์และเกิดการร้องเรียนได้

4.1.9 ลักษณะของผ้าเบรก (Appearance) ต้องสามารถประกอบติดตั้งได้ มีคุณลักษณะและส่วนประกอบครบถ้วนตามข้อกำหนดผลิตภัณฑ์ และไม่เกิดการแตกหักระหว่างการใช้งาน

จากการประเมินความสำคัญของประสิทธิภาพที่ต้องการตอบสนองให้กับลูกค้าในสูตรเคมี B โดยผู้เชี่ยวชาญด้วยเทคนิคเดลฟาย กำหนดค่าการประเมินเป็น 1 – 5 โดยที่ 5 คือความสำคัญมาก และ 1 คือความสำคัญน้อย พบว่าความสำคัญของประสิทธิภาพการเบรกแต่ละด้านเป็นไปตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ความสำคัญของประสิทธิภาพการเบรกสูตรเคมี B

ประสิทธิภาพ	ความสำคัญ	IR
Stopping Performance (Normal Temp.)	4.4	1.0
Stopping Performance (High Temp.)	4.0	0.0
Ant - Fade	3.3	1.0
Pad wear	3.2	0.0
Rotor Life Time (Normal Temp.)	3.7	0.8
Rotor Life Time (High Temp.)	2.8	0.0
Dust	3.0	0.0
Noise	3.5	1.0
Appearance	3.0	0.0

ซึ่งสูตรเคมี B เน้นให้ความสำคัญในเรื่องของประสิทธิภาพการเบรกเป็นหลักทั้งที่อุณหภูมิปกติและที่อุณหภูมิสูง ประสิทธิภาพอื่นก็ให้ความสำคัญในระดับที่ใกล้เคียงกัน จากค่าพิสัยควอไทล์มีค่า 0.0 - 1.0 แสดงว่าความคิดของผู้เชี่ยวชาญไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งพิสัยควอไทล์ที่มากที่สุดคือ 1 แสดงว่าร้อยละ 50 ของผู้เชี่ยวชาญมีความเห็นค่าความสำคัญต่างกัน 1 และพิสัย ควอไทล์ที่ต่ำที่สุดคือ 0 แสดงว่าร้อยละ 50 ของผู้เชี่ยวชาญมีความเห็นตรงกันทั้งหมด ซึ่งมีมากถึง 5 ประสิทธิภาพที่มีพิสัย ควอไทล์เป็น 0 และอีก 4 ประสิทธิภาพผู้เชี่ยวชาญมีความเห็นแตกต่างกันเล็กน้อย

4.2 คุณสมบัติของผ้าเบรกสูตรเคมี B

จากการพิจารณาร่วมกันระหว่างผู้วิจัยและบริษัทตัวอย่างจึงสามารถเลือกคุณสมบัติของผ้าเบรกที่ใช้ในการศึกษามีทั้ง 5 ด้าน ซึ่งเป็นสมบัติทางกายภาพพื้นฐานของผ้าเบรก ซึ่งมีการระบุให้มีการตรวจสอบในมาตรฐานสากล และทางบริษัทตัวอย่างมีการทดสอบในปัจจุบัน คุณสมบัติเหล่านี้มีการทดสอบในช่วงของการออกแบบผลิตภัณฑ์ และคุณสมบัติบางตัวใช้ในการควบคุมคุณภาพในการการผลิต ได้แก่

- 4.2.1 ความเป็นรูพรุน (Porosity)
- 4.2.2 ความถ่วงจำเพาะ (Specific gravity, S.G.)
- 4.2.3 ความแข็ง (Hardness)
- 4.2.4 ค่าการอัด (Compressibility)
- 4.2.5 ความยืดหยุ่น (Modulus)

4.3 QFD เฟส 2

จากการประเมินความสำคัญประสิทธิภาพของสูตรเคมี B ด้วยเทคนิคเดลฟาย ประเมินความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพการเบรกและคุณสมบัติของผ้าเบรกโดยการระดม

สมองจากผู้เชี่ยวชาญ คำนวณหาค่าความสำคัญและสัดส่วนความสำคัญของคุณสมบัติ ทำให้สามารถจัดทำเมตริกซ์ QFD เฟส 2 ได้ดังรูปที่ 5

จากรูปที่ 5 จะเห็นได้ว่า คุณสมบัติความเป็นรูพรุน ความถ่วงจำเพาะ ความแข็ง และความยืดหยุ่น มีค่าความสัมพันธ์กับ

ประสิทธิภาพในทิศทางเดียวกัน เนื่องจากว่าคุณสมบัติทั้ง 4 มีความสอดคล้องกันเอง ยกตัวอย่างเช่น หากความเป็นรูพรุนของผ้าเบรกต่ำ จะทำให้ความหนาแน่นของชิ้นงานสูงขึ้น

		Performance Importance	Product Requirement				
			Porosity	S.G.	Hardness	Compressibility	Modulus
Performance Requirement	Stopping Performance (Normal Temp.)	4.4	9	9	9	0	9
	Stopping Performance (High Temp.)	4.0	1	1	1	0	1
	Anti-fade Performance	3.3	1	1	1	0	1
	Pad wear	3.2	3	3	3	0	3
	Rotor Life Time (Normal Temp.)	3.7	9	9	9	3	9
	Rotor Life Time (High Temp.)	2.8	9	9	9	3	9
	Dust	3.0	9	9	9	3	9
	Noise	3.5	3	3	3	9	3
	Appearance	3.0	3	3	3	0	3
Column Weights			161.4	161.4	161.4	60.0	161.4
% Relative Weights			23%	23%	23%	9%	23%

รูปที่ 5 QFD เฟสที่ 2 ความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการเบรกและคุณสมบัติผ้าเบรก

ความแข็งแรงมากขึ้น ความยืดหยุ่นสูงขึ้น เป็นต้น ซึ่งคุณสมบัติของผ้าเบรกที่เปลี่ยนไปเหล่านี้ก็จะทำให้ ความสามารถในการหยุดรถที่อุณหภูมิปกติ ซึ่งเป็นประสิทธิภาพที่สำคัญที่สุดของสูตรเคมี B เปลี่ยนไปอย่างมาก นอกจากนั้นยังส่งผลกระทบต่ออย่างมากในเรื่องการสึกของจานเบรกและปัญหาด้านการเกิดฝุ่น ซึ่งปัญหาที่ลูกค้าสามารถมองเห็นได้ด้วยตา ทำให้อาจจะ

เกิดความไม่พึงพอใจได้ ทำให้คุณสมบัติความเป็นรูพรุน ความถ่วงจำเพาะ ความแข็ง และความยืดหยุ่น มีความสำคัญที่เท่ากัน และมีสัดส่วนความสำคัญอยู่ที่ 23% ในแต่ละคุณสมบัติ ในส่วนของคุณสมบัติค่าการอัดนั้น ไม่ได้ส่งผลกระทบต่อของความสามารถการเบรกและการสึกของการผ้าเบรก แต่ส่งผลกระทบมากในเรื่องของการเกิดเสียง ซึ่งเสียงมีค่า

ความสำคัญประสิทธิภาพอยู่ที่ 3.5 ทำให้ค่าสัดส่วนความสำคัญของคุณสมบัติการอัดอยู่ที่ 9%

4.4 ตัวแปรในกระบวนการอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อน

จากการพิจารณาร่วมกันระหว่างผู้วิจัยและบริษัทตัวอย่าง โดยพิจารณาจากงานวิจัย ข้อกำหนดกระบวนการ รวมทั้งวิธีการทำงานของพนักงาน ทำให้สามารถสรุปตัวแปรในกระบวนการอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อนที่ส่งผลกระทบต่อคุณสมบัติของผ้าเบรกที่สนใจ มีด้วยกันทั้งหมด 11 ตัวแปร ได้แก่

4.4.1 แรงอัดที่ชิ้นงานได้รับ แรงอัดที่กระทำกับชิ้นงาน โดยการกดแม่พิมพ์ลงมาด้วยระบบไฮดรอลิก

4.4.2 อุณหภูมิที่ชิ้นงานได้รับ ซึ่งมีกำหนดใช้อุณหภูมิในช่วงที่ชิ้นงานมีการเกิดปฏิกิริยา ทำให้พินอลิเกรซินเกิดปฏิกิริยา

4.4.3 เวลาในการกดครั้งแรก เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาเริ่มต้น ชิ้นงานเกิดการขึ้นรูป

4.4.4 เวลาในการกดซ้ำ หลังจากการกดครั้งแรกจะเกิดแก๊สแอมโมเนียเป็นผลิตภัณฑ์พลอยได้ของกระบวนการ ซึ่งหากมีแก๊สสะสมเยอะเกินไปอาจจะทำให้ชิ้นงานแตกได้ จึงต้องมีการคลายแก๊ส โดยการกดซ้ำสลับกับการยกแม่พิมพ์บนขึ้นเพื่อคลายแก๊ส

4.4.5 เวลาในการยกพิมพ์บน เป็นเวลาที่ยกแม่พิมพ์ขึ้นเพื่อทำการคลายแก๊สในแต่ละครั้ง

4.4.6 จำนวนครั้งในการกด เป็นจำนวนครั้งในการกดซ้ำสลับกับยกพิมพ์บนขึ้นเพื่อคลายแก๊ส

4.4.7 เวลาในการกดแช่ หลังจากการคลายแก๊ส จะมีการกดแช่อีกครั้งเพื่อทำปฏิกิริยาที่สมบูรณ์

4.4.8 ระยะยก เป็นระยะความสูงในการยกพิมพ์บนขึ้นในแต่ละครั้ง

4.4.9 ขนาดชิ้นงาน ขึ้นกับลักษณะของผ้าเบรกสำหรับรถแต่ละรุ่น ซึ่งก็จะมี ขนาด รูปร่าง พื้นที่ หรือความหนาของผ้าเบรกแตกต่างกันไป

4.4.10 การฉีดสเปรย์ซิลิโคนและปริมาณซิลิโคนที่ได้รับ การฉีดซิลิโคนจะฉีดบริเวณแม่พิมพ์แต่ละชั้น เพื่อป้องกันไม่ให้ชิ้นงานติดแม่พิมพ์ ซึ่งจะต้องมีปริมาณซิลิโคนที่เหมาะสมและได้รับทั่วถึงทั้งพื้นผิวแม่พิมพ์ที่สัมผัสกับชิ้นงาน

4.4.11 การใส่ชิ้นงานที่แตกต่างกัน การใส่ชิ้นงานพนักงานแต่ละคนมีลักษณะที่แตกต่างกัน ทั้งใส่ชิ้นงานทั้งชิ้นลงหลุมพอดี้ แต่พนักงานบางคนจะใส่ชิ้นงานไม่ได้ลงหลุมทั้งหมดเนื่องจากสะดวกรับกับความถนัดการทำงานของคนพนักงาน

4.5 QFD เฟส 3

จากการจัดทำ QFD เฟส 2 ทำให้ได้ค่าความสำคัญของคุณสมบัติต่าง ๆ นำมาจัดรูปแบบคะแนนในอยู่ในสเกล 1 – 5 วิเคราะห์ร่วมกับผลประโยชน์ความสัมพันธ์ระหว่างคุณสมบัติของผ้าเบรกและตัวแปรในกระบวนการอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อนจากผู้เชี่ยวชาญด้วยเทคนิคเดลฟาย และคำนวณหาค่าความสำคัญและสัดส่วนความสำคัญของตัวแปรในกระบวนการ ทำให้สามารถจัดทำเมตริกซ์ QFD เฟส 3 ได้ดังรูปที่ 6

จากรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่า แรงอัดที่ชิ้นงานได้รับ อุณหภูมิที่ชิ้นงานได้รับ จำนวนครั้งในการกด เวลาในการกดแช่ และระยะยก เป็นตัวแปรที่ส่งผลกระทบมากกับทั้ง 5 คุณสมบัติผ้าเบรกที่พิจารณา ทำให้ค่าสัดส่วนความสำคัญของตัวแปรเหล่านี้มีค่าสูงที่สุด คือตัวแปรละ 15% ซึ่งเมื่อรวมกันทั้ง 5 ตัวแปรนี้มีสัดส่วนความสำคัญมากถึง 75%

			Hot Pressing Parameters										
			Product Spec. Importance	แรงอัดที่ชิ้นงานได้รับ	อุณหภูมิที่ชิ้นงานได้รับ	เวลาในการกดครั้งแรก	เวลาในการกดซ้ำ	เวลาในการยกพิมพ์	จำนวนครั้งในการกด	เวลาในการกดแช่	ระยะยก	ขนาดชิ้นงาน	การฉีดสเปย์ซิลิโคนและปริมาณซิลิโคนที่ได้รับ
Product Specification	Porosity	5.0	9	9	3	3	3	9	9	9	3	0	3
	S.G.	5.0	9	9	3	3	3	9	9	9	3	1	3
	Hardness	5.0	9	9	9	3	3	9	9	9	1	1	3
	Compressibility	1.9	9	9	3	3	3	9	9	9	3	1	3
	Modulus	5.0	9	9	3	3	3	9	9	9	1	1	3
Column Weights			196.7	196.7	95.6	65.6	65.6	196.7	196.7	196.7	45.6	16.9	65.6
% Relative Weights			15%	15%	7%	5%	5%	15%	15%	15%	3%	1%	5%

รูปที่ 6 QFD เฟสที่ 3 ความสัมพันธ์ของคุณสมบัติผ้าเบรกและตัวแปรในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน

5. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความสัมพันธ์ของประสิทธิภาพการเบรก คุณสมบัติผ้าเบรก และกระบวนการอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อน ด้วยเทคนิค QFD เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปพัฒนาในระบบการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบให้มีความเชื่อมโยงของข้อมูล ซึ่งจากการศึกษาสามารถสรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

เกรดเคมี B ซึ่งเป็นผ้าเบรกที่เน้นความสามารถในการเบรกเป็นหลัก ซึ่งจากการศึกษาด้วยเทคนิค QFD เฟส 2 ทำให้ทราบว่าคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับความสามารถในการเบรกคือ ความเป็นรูปทรง ความถ่วงจำเพาะ ความแข็ง และความยืดหยุ่น นอกจากนั้นคุณสมบัติเหล่านี้ยังส่งผลกระทบมากในเรื่องการสึกของจานและการเกิดฝุ่น ทำให้ค่าสัดส่วนความสำคัญของคุณสมบัติทั้ง 4 อย่างนี้ มีค่า 23% ในแต่ละคุณสมบัติ

จากการศึกษาด้วยเทคนิค QFD เฟส 3 ทำให้ทราบว่าในกระบวนการอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อน แรงอัดที่ชิ้นงานได้รับ อุณหภูมิที่ชิ้นงานได้รับ เวลาในการกดแช่ จำนวนครั้งในการกด และ

ระยะยก มีความสัมพันธ์อย่างมากกับคุณสมบัติของผ้าเบรกทั้ง 5 ด้านที่นำมาศึกษา ซึ่งมีค่าสัดส่วนความสำคัญของตัวแปรในกระบวนการมีค่า 15% ในแต่ละตัวแปร

ซึ่งจากการศึกษาทำให้ทราบความสัมพันธ์ทั้งหมดของประสิทธิภาพการเบรก คุณสมบัติ และตัวแปรในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนซึ่งสามารถนำไปใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาการวิเคราะห์ข้อบกพร่องและผลกระทบได้ เนื่องจากความสัมพันธ์จากศึกษานี้สามารถช่วยอธิบายถึงสาเหตุและผลกระทบหากเกิดข้อบกพร่องได้ รวมทั้งในการศึกษานี้สามารถระบุตัวแปรสำคัญในกระบวนการอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อน ทำให้สามารถนำไปเป็นแนวทางในการควบคุมตัวแปรเหล่านี้เพื่อลดความผิดพลาดที่จะเกิดขึ้นได้

นอกจากนั้นการระดมสมองและการทำแบบสอบถามจากผู้เชี่ยวชาญทำให้ได้ เมตริกซ์ QFD ที่เชื่อมโยงความรู้ของผู้เชี่ยวชาญในหน่วยงานต่าง ๆ ช่วยในการทำงานของผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องให้มีความตรงเข้าใจที่ตรงกันมากยิ่งขึ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัทตัวอย่างที่ช่วยอำนวยความสะดวกในการเข้าถึงข้อมูล ผู้เชี่ยวชาญทุกท่านที่ช่วยร่วมการประเมินและให้ข้อมูลตลอดการทำการศึกษ ขอขอบคุณมหาลัยศิลปากรและสำนักงานคณะกรรมการนโยบายวิทยาศาสตร์เทคโนโลยีและนวัตกรรมแห่งชาติ ที่ให้คำปรึกษาและเงินทุนสนับสนุนการทำงานวิจัย

7. เอกสารอ้างอิง

- Almannai, B., Greenough, R., & Kay, J. (2008). A decision support tool based on QFD and FMEA for the selection of manufacturing automation technologies. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 24(4), 501-507.
- Chiraboonthanandom, S. (2008). *Application of QFD and PFMEA Techniques for Design and Trial Production of Automotive Condensers* [Master's thesis]. Chulalongkorn University.
- GSB Research. (2018). *Automotive industry*. https://www.gsb.or.th/getattachment/07c2aa6e-9bc2-4682-8a9e-90b057178223/motor_61_62.aspx
- Hemso, W. (2013). *Defect Reduction from Brake Pads Production by Using DMAIC Method* [Master's thesis]. Rajamangala University of Technology Thanyaburi.
- ISO. (2008). ISO 15484 In Road vehicles – Brake lining Friction materials – Product definition and quality assurance. <https://www.iso.org/standard/37538.html>
- Korayem, M. H., & Iravani, A. (2008). Improvement of 3P and 6R mechanical robots reliability and quality applying FMEA and QFD approaches. *Robotics and Computer-Integrated Manufacturing*, 24(3), 472-487.
- Kosbe, P., & More, C. (2010). Performance of NAO Friction Material for Disc Brake. *National Journal on Advances in Building Sciences and Mechanics*, 1(2), 1-5.
- Ministry of Industry. (2010). *National Industrial Development Master Plan 2012-2031*. http://www.oie.go.th/assets/portals/1/fileups/2/files/Industrial%20Master%20Plan/National_Industrial_Development_Master_Plan.pdf
- Nicholson, G. (1995). *100 years of brake linings & clutch facings*. P&W Price Enterprises.
- Sanguansai, H. (2007). *Quality Improvement and Monitoring in House Building Process Applying the Concepts of QFD and FMEA* [Master's thesis]. Chulalongkorn University, Bangkok.
- Srimai, N., Sinthavilai, R., Suthmmanon, S., & Auckara-aree, K. (2019). Development of Rubber Metal Glue for Using in an Automotive Industry by Quality Function Deployment Technique. *The Industrial Engineering Network Journal*, 5(2), 46-54.

Tiantong, M. (2005). Delphi Techniques. In *Statistics and research methodology for information technology*. King Mongkut's University of Technology North Bangkok.

Wilairat, T., Saechin, N., Buggakupta, W., & Sujaridworakun, P. (2018). Effects of Hot Molding Parameters on Physical and Mechanical Properties of Brake Pads. *Key Engineering Materials*, 824, 59-66.

8. ประวัติผู้เขียน



นางสาวอนูธิดา มากมี
นักศึกษาระดับปริญญาโท
สาขาการจัดการงานวิศวกรรม
บัณฑิตวิทยาลัย
มหาวิทยาลัยศิลปากร



รองศาสตราจารย์ ดร. ประจวบ กล่อมจิตร
อาจารย์ที่ปรึกษา
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการจัดการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศิลปากร

การประยุกต์ใช้เทคนิคการจำลองสถานการณ์แบบมอนติคาร์โลเพื่อการจัดการอะไหล่สำหรับการ บำรุงรักษาในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม

An Application of Monte Carlo Simulation Techniques to Spare Parts managing Maintenance in Petroleum Industry

สุวรรณา พลภักดิ์*, นิภาส ลีณะธรรม

Suwanna Ponpakdee*, Nipas Leenatham

สาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี

Industrial management technology, Faculty of Science and Technology, Suratthani Rajabhat University

*Corresponding author e-mail: suwanna.pon@sru.ac.th

(Received: 30 January 2020, Revised: 26 March 2020, Accepted: 19 May 2020)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณการสั่งซื้ออะไหล่ที่เหมาะสมสำหรับใช้ในงานบำรุงรักษาในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม โดยประยุกต์ใช้แบบจำลองสถานการณ์แบบมอนติคาร์โล ปัจจุบันโรงงานกรณีศึกษาประสบปัญหาการมีต้นทุนการจัดการอะไหล่ที่สูง เนื่องจากการจัดซื้ออะไหล่ยังไม่มีระบบการจัดการสั่งซื้อที่ดี ยังใช้การคาดการณ์เป็นเกณฑ์ในการสั่งซื้อ ซึ่งส่งผลให้อะไหล่บางชนิดมีการจัดเก็บที่มากเกินไป ดังนั้นคณะผู้วิจัยจึงได้เสนอนโยบายเพื่อหาปริมาณการสั่งซื้อที่เหมาะสมภายใต้ความต้องการที่ไม่แน่นอนที่ส่งผลให้ต้นทุนรวมต่ำที่สุด ขั้นตอนการวิจัยเริ่มจากการวิเคราะห์หาระดับความสำคัญของอะไหล่ด้วยการจัดกลุ่มอะไหล่แบบ ABC และเลือกศึกษาเฉพาะอะไหล่ที่อยู่ในกลุ่ม A โดยคิดเป็นร้อยละ 80.34 ของมูลค่าอะไหล่ทั้งหมด งานวิจัยนี้กำหนดนโยบายสินค้าคงคลังเป็น 2 แบบ คือ (s,Q) และ (s,S) เนื่องจากลักษณะการตรวจสอบอะไหล่ของโรงงานกรณีศึกษาเป็นแบบต่อเนื่อง โดยประยุกต์ใช้แบบจำลองสถานการณ์แบบมอนติคาร์โล พบว่านโยบายที่ทำให้ปริมาณการสั่งซื้ออะไหล่ที่เหมาะสมที่สุดภายใต้ต้นทุนรวมที่ต่ำที่สุดคือ นโยบายแบบ (s,S) จากนั้นนำผลลัพธ์ที่ได้ไปเปรียบเทียบกับแผนการสั่งซื้อเดิมของโรงงานกรณีศึกษา พบว่านโยบายแบบ (s,S) มีต้นทุนรวมเท่ากับ 75,394,160 บาทต่อปี และเดิมโรงงานมีต้นทุนรวมเท่ากับ 96,357,062 บาทต่อปี ดังนั้นผลที่ได้จากการใช้เทคนิคการจำลองสถานการณ์แบบมอนติคาร์โลสามารถลดต้นทุนรวมของการจัดการอะไหล่ได้เท่ากับ 20,962,902 บาทต่อปี หรือลดลงร้อยละ 21.76 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ : การจัดการอะไหล่, เทคนิคการจำลองสถานการณ์แบบมอนติคาร์โล, อุตสาหกรรมปิโตรเลียม

Abstract

The objective of this research was to analyze the optimum spare parts order quantities for maintenance activities in petroleum industry by applying the Monte Carlo Simulation Techniques. Recently, the factory of interest is facing costly spare parts management issues due to the incomprehensive spare parts inventory system and rather than establishing a strategic method, the perception has been used to manage the movement and storage of the inventory. The lack of knowledge on how to implement an inventory system leads to a large stock of various parts. To address this problem, the researcher team attempted to propose practical spare parts management to cope with the unstable demand in order to achieve the lowest total cost. The research procedure began with defining and categorizing the spare parts into A, B and C groups. Group A, accounting for 80.34 percent of the net value, was selected for the analysis. The inventory policies were defined as (s,Q) and (s,S). The data obtained from a continuous survey of the inventory system were processed by applying the Monte Carlo Simulation Model. It was found that (s,S) was the most effective policy for the inventory control that enabled

the lowest total cost. According to the comparison between the (s,S) and the former purchasing plan the factory has carried out, the (s, S) strategy cost 75,394,160 baht per year while originally the factory had a total cost of 96,357,062 baht per year. Therefore, the Monte Carlo Simulation approach can reduce the total cost of inventory management of the spare parts for 20,962,902 baht per year. This 21.76 percent cost reduction has statistical significance with a corresponding 95 percent confidence level.

Keywords: Spare Parts Management, Monte Carlo Simulation Techniques, Petroleum Industry

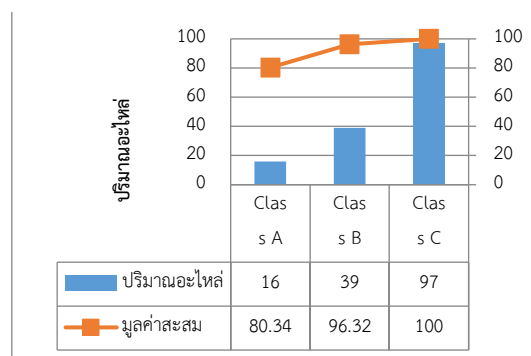
1. บทนำ

ในสภาวะปัจจุบันอุตสาหกรรมปิโตรเลียม (Sorkhabi, 2017) มีการแข่งขันกันมากขึ้น ดังนั้นการลดต้นทุนจึงเป็นสิ่งที่จำเป็นและต้องดำเนินการในสภาวะเศรษฐกิจปัจจุบัน และต้นทุนด้านสินค้าคงคลังนับเป็นต้นทุนสำคัญที่มีถูกมองข้ามและส่งผลอย่างยิ่งต่อการดำเนินของอุตสาหกรรม ซึ่งการจัดการสินค้าคงคลังเป็นส่วนหนึ่งของการใช้กลยุทธ์การบริหารทางด้านต้นทุน และระบบงานบำรุงรักษาก็เป็นส่วนหนึ่งของอุตสาหกรรมที่มีความจำเป็นต่อการจัดการบริหารสินค้าคงคลัง โดยปกติสินค้าคงคลังในอุตสาหกรรมมีอยู่ด้วยกัน 4 ประเภท (Ivanov et al., 2017) คือ สินค้าคงคลังประเภทวัตถุดิบ (Raw Material) สินค้าคงคลังประเภทงานระหว่างกระบวนการ (Work in Process) สินค้าคงคลังประเภทอะไหล่สำหรับการบำรุงรักษา (Spare Parts) และสินค้าคงคลังประเภทผลิตภัณฑ์สำเร็จรูป (Finished Goods) แต่ละอุตสาหกรรมต้องมีการจัดการสินค้าคงคลังที่เหมาะสมภายใต้ต้นทุนที่ต่ำที่สุด

สำหรับงานวิจัยนี้อุตสาหกรรมปิโตรเลียมที่เป็นกรณีศึกษาประสบปัญหาด้านต้นทุนการจัดการอะไหล่ เนื่องจากอะไหล่ที่ใช้ในการบำรุงรักษาของอุตสาหกรรมปิโตรเลียมราคาค่อนข้างสูงกว่าอุตสาหกรรมอื่น มีปริมาณอะไหล่ที่มากเกินไปและบางช่วงเวลาก็ไม่มีอะไหล่เพียงพอสำหรับกิจกรรมบำรุงรักษาทั้งงานบนฝั่งและงานบำรุงรักษาในทะเลหรือแท่นขุดเจาะ ทำให้ต้องสูญเสียโอกาส สูญเสียเวลา และที่สำคัญทำให้ต้องสูญเสียต้นทุนโดยต้นทุนสำหรับการจัดการบริหารสินค้าคงคลัง ประกอบด้วยต้นทุนหลัก 3 อย่าง คือ ต้นทุนการสั่งซื้อ (Ordering Cost) ต้นทุนการจัดเก็บ (Holding Cost) และต้นทุนสินค้าขาดแคลน (Shortage Cost) (Malindzakova & Zimon, 2019) และจากข้อมูลเบื้องต้นของอุตสาหกรรมปิโตรเลียมพบว่า สภาพการสั่งซื้ออะไหล่ในปัจจุบันของอุตสาหกรรมปิโตรเลียมไม่มีการจัดอะไหล่เป็นกลุ่มตามหลักการ ABC Analysis (Kampf et al., 2016) ในการควบคุมปริมาณตามลักษณะและความสำคัญของอะไหล่ในการใช้งาน ปัจจุบันอุตสาหกรรมปิโตรเลียมมีความต้องการใช้อะไหล่ประมาณ 152 ชนิด มียอดการใช้ทั้งปีทั้งสิ้น 181,965 ชิ้น คิดเป็นมูลค่าประมาณ 102,814,570 บาทต่อปี เวลานำในการสั่งซื้อ (Lead Time) ประมาณ 15 วัน จากการ

จัดกลุ่มอะไหล่ตามหลักการ ABC Analysis แสดงดังรูปที่ 1 โดยแบ่งตามเปอร์เซ็นต์สะสมของมูลค่าอะไหล่ ซึ่งมาจากอัตราการใช้งานทั้งปีของอะไหล่แต่ละชนิดคูณกับราคาของอะไหล่ พบว่าจำนวนอะไหล่ในกลุ่ม A มีทั้งหมด 16 ชนิด โดยคิดเป็นร้อยละ 80.34 ของมูลค่าอะไหล่ทั้งหมด ซึ่งงานวิจัยนี้จะพิจารณาเฉพาะอะไหล่ประเภทกลุ่ม A เท่านั้น เพื่อเป็นแนวทางในการแก้ปัญหาอะไหล่ประเภทกลุ่ม B และ C ต่อไป

จากปัญหาดังกล่าวที่เกิดขึ้นกับอุตสาหกรรมปิโตรเลียม คณะผู้วิจัยจึงได้ประยุกต์ใช้เทคนิคแบบจำลองสถานการณ์มอนติ คาร์โล (Monte Carlo Simulation Techniques) (Resteanu et al., 2008) ซึ่งก็คือ วิธีหนึ่งทางคณิตศาสตร์ที่ใช้คอมพิวเตอร์ช่วยในการจำลองสถานการณ์ (Simulation) โดยอาศัยตัวเลขสุ่ม (Random Number) มาสร้างตัวแปรให้เหมือนกับสถานการณ์จริง และมีการทดลองซ้ำหลายๆ ครั้งเพื่อให้ได้ค่าที่แน่นอนที่ใช้เป็นข้อสรุป หรือช่วยหาคำตอบในเรื่องราวต่างๆ ที่ยังไม่แน่ใจในผลที่จะเกิดขึ้น และเนื่องจากปัจจุบันทางโรงงานกรณีศึกษาต้องการหาหนโยบายเพื่อลดต้นทุนในการจัดการอะไหล่ จึงได้ประยุกต์ใช้นโยบายสินค้าคงคลังแบบ (s, Q) และ (s, S) เพราะมีการตรวจสอบอะไหล่แบบต่อเนื่องด้วยระบบคอมพิวเตอร์ ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์คือ หาหนโยบายการสั่งซื้ออะไหล่ที่เหมาะสมภายใต้ต้นทุนรวมที่ต่ำที่สุด เพื่อใช้เป็นแนวทางในการบริหารจัดการอะไหล่สำหรับการบำรุงรักษาในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมต่อไป



รูปที่ 1 การแบ่งอะไหล่ด้วยระบบ ABC Analysis

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1 ทฤษฎีเกี่ยวกับการจัดการสินค้าคงคลัง

2.1.1 การจัดการสินค้าคงคลังที่นิยมใช้ในงานบำรุงรักษา (Jintaketkarm, 2012) (Maintenance/ Repair/ Operating Supply: MROs) คือชิ้นส่วนหรืออะไหล่ที่ใช้ในการบำรุงรักษาเครื่องจักรที่สำรองไว้เพื่อเปลี่ยน เมื่อชิ้นส่วนเดิมเสียหายเกิดผลเสียรุนแรงและสามารถทำผ่านบริษัทบำรุงรักษาทั้งนี้เพื่อป้องกันไม่ให้เกิดภาวะอะไหล่ขาดแคลนหรือหาซื้อไม่ได้ในยามที่อุปกรณ์ชำรุดเสียหายหรือหมดอายุการใช้งาน และอะไหล่สิ้นเปลือง คือ อะไหล่ทั่วไปที่ใช้ในการปฏิบัติการเป็นประจำ อาจกล่าวได้ว่าอะไหล่ประเภท MRO คืออะไหล่ทั่วไปที่ไม่มีส่วนผสมอยู่ในสินค้าสำเร็จรูปเลย โรงงานอุตสาหกรรมที่ใช้เครื่องจักรเป็นฐานผลิต จะมีอะไหล่ประเภทงานบำรุงรักษาและอะไหล่สิ้นเปลืองที่มีมูลค่าสูง และจำเป็นต้องเก็บเป็นสินค้าคงคลัง เพราะส่วนมากอะไหล่จะต้องสั่งล่วงหน้าเสมอ

ซึ่งประเภทของอะไหล่บำรุงรักษาและอะไหล่สิ้นเปลืองได้แก่ อะไหล่พิเศษเฉพาะเครื่อง อะไหล่ประเภทเตรียมพร้อม อะไหล่ที่ใช้กับหลายเครื่อง อะไหล่ที่สามารถจัดซื้อเมื่อต้องการได้ อะไหล่อุปกรณ์ที่มีลักษณะเป็นสินทรัพย์ถาวร อะไหล่ที่มีลักษณะเป็นวัสดุทั่วไป เคมีและก๊าซ เครื่องมือ และอะไหล่สำรองในการเดินเครื่องครั้งแรก

2.1.2 นโยบายสินค้าคงคลัง (Inventory Policy) (Van Horenbeek & Pintelon, 2015) นโยบายสินค้าคงคลังเป็นการกำหนดว่าเมื่อใดจะจัดหาสินค้าและจำนวนเท่าไร ในทางปฏิบัตินโยบายสินค้าคงคลังอาจกำหนดขึ้นมาได้หลายรูปแบบ

นโยบายสินค้าคงคลังที่รู้จักกันแพร่หลายจะอยู่ในรูปแบบ (*, **) โดยที่ * หมายถึงจุดที่มีการจัดหาสินค้า และ ** แสดงถึงจำนวนที่เกี่ยวข้องกับสินค้าที่จัดหา ซึ่งอาจจะเป็นการระบุจำนวนสินค้าโดยตรง หรือระบุระดับสินค้าคงคลังที่ต้องการให้กลับขึ้นไปอยู่เมื่อมีการจัดหาสินค้าก็ได้ ตัวอย่างนโยบายสินค้าคงคลังเช่น

นโยบายสินค้าคงคลัง (R, Q) ตัวแบบการจัดการสินค้าคงคลังที่มีการตรวจสอบคงคลังแบบเป็นช่วงเวลา โดยกำหนดให้มีการจัดหาสินค้า ทุกๆ R หน่วยเวลา โดยปริมาณสินค้าที่จะจัดหาในแต่ละครั้งจะเท่ากับ Q หน่วย

นโยบายสินค้าคงคลัง (R, S) ตัวแบบการจัดการสินค้าคงคลังที่มีการตรวจสอบคงคลังแบบเป็นช่วงเวลา โดยกำหนดให้มีการจัดหาสินค้าทุกๆ R หน่วยเวลา เพื่อให้ระดับสินค้ากลับขึ้นไปอยู่ที่ S หน่วย

นโยบายสินค้าคงคลัง (s, Q) ตัวแบบการจัดการสินค้าคงคลังที่มีการตรวจสอบคงคลังอย่างต่อเนื่อง โดยกำหนดให้มีการจัดหาสินค้ามาเติมเต็มในคลังสินค้าเป็นจำนวน Q หน่วย ค่า

เท่ากับปริมาณการสั่งซื้ออย่างประหยัด (EOQ) และจะสั่งซื้อเมื่อระดับสินค้าคงคลังลดลงต่ำกว่าจุดสั่งซื้อเพิ่ม (s)

นโยบายสินค้าคงคลัง (s, S) ตัวแบบการจัดการสินค้าคงคลังที่มีการตรวจสอบคงคลังอย่างต่อเนื่อง โดยกำหนดให้มีการจัดหาสินค้ามาเติมเต็มในคลังสินค้านั้นคือสินค้าที่เหลือนรวมกับสินค้าที่สั่งมาเพิ่มจะเท่ากับระดับสินค้าคงคลังสูงสุด (S)

นโยบายสินค้าคงคลัง (R, s, S) เป็นนโยบายสินค้าคงคลังที่รวมนโยบายแบบ (s, S) และ (R, S) เข้าด้วยกัน โดยจะมีการจัดหาสินค้าทุกๆ R หน่วยเวลาจะกำหนดให้มีการจัดหาสินค้าเมื่อระดับสินค้าลดมาถึงระดับ s หน่วย หรือต่ำกว่า และปริมาณสินค้าที่จะจัดหาจะมีจำนวนเพื่อถึงระดับสินค้ากลับขึ้นไปอยู่ที่ระดับ S หน่วย

งานวิจัยนี้ได้ใช้นโยบายสินค้าคงคลัง (s, Q) และ (s, S) เนื่องจากการทำงานปัจจุบันของโรงงานกรณีศึกษาใช้ระบบตรวจสอบสินค้าคงคลังแบบต่อเนื่อง (Continuous Inventory System) เป็นระบบสินค้าคงคลังที่มีวิธีการลงบัญชีทุกครั้งที่มีการรับและจ่ายอะไหล่ คือ การเอาคอมพิวเตอร์เข้ามาประยุกต์ใช้ในการตรวจสอบจำนวนอะไหล่ที่เข้าและออกงานวิจัยที่เกี่ยวกับการจัดการสินค้าคงคลัง เช่น

Penpakkol and Intarakumthorncha (2018) ได้ศึกษาการจัดการอะไหล่ภายใต้ความต้องการที่ไม่แน่นอนของโรงงานผลิตไม้ปาร์ติเกิลบอร์ด โดยการเปรียบเทียบเชิงปริมาณระหว่าง 3 นโยบายการสั่งซื้อ ผ่านการจำลองสถานการณ์ ผลพบว่านโยบายสั่งซื้อด้วยผลจากการคำนวณด้วยโปรแกรม Microsoft Excel Solver มีค่าใช้จ่ายรวมต่ำที่สุด

Porras and Dekker (2008) ได้ศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับระบบควบคุมสินค้าคงคลังสำหรับชิ้นส่วนอะไหล่ของโรงงาน: การเปรียบเทียบเชิงประจักษ์ด้วยวิธีการสั่งซื้อเพิ่ม ด้วยเทคนิคการสร้างแบบจำลองความต้องการที่แตกต่างกันและนโยบายสินค้าคงคลังจะถูกประเมินโดยใช้ข้อมูลจริง

Gutierrez et al., (2014) ได้เสนอตัวแบบทางคณิตศาสตร์เพื่อใช้ในการแก้ปัญหาการสั่งซื้อแบบพลวัตโดยมีข้อจำกัดในเรื่องพื้นที่ในการจัดเก็บวัสดุคือปริมาณของระดับคงคลังช่วงก่อนหน้ารวมกับปริมาณที่สั่งซื้อเข้ามาจะต้องไม่เกินพื้นที่จัดเก็บวัสดุ พบว่าวิธีการที่เสนอสามารถรับประกันได้ว่าจะได้คำตอบที่ดีที่สุดในการสั่งซื้อโดยการกำหนดปริมาณการสั่งซื้อในแต่ละช่วงเวลาให้เท่ากับศูนย์หรือผลรวมของอุปสงค์ลบด้วยระดับของคงคลังสำรองเมื่อสิ้นสุดช่วงเวลาก่อนหน้าซึ่งเป็นข้อจำกัดที่จะลดทางเลือกในการตัดสินใจให้น้อยลงทำให้สามารถแก้ปัญหาได้อย่างรวดเร็วยิ่งขึ้น

2.2 ทฤษฎีเกี่ยวกับเทคนิคการจำลองสถานการณ์แบบมอนติคาร์โล การสร้างแบบจำลองสถานการณ์ รวมถึงการสร้างแบบจำลองของระบบขึ้นมาจริงและทำการสร้างแล้วทดลองซ้ำ

หลายๆ ครั้ง ซึ่งแบบจำลองสถานการณ์ความน่าจะเป็น จะมี การกำหนดความน่าจะเป็นให้กับตัวแปรอิสระ เช่น ตัวแปร ความต้องการ (Demand) จะจัดว่าเป็นตัวแปรอิสระที่ต้อง กำหนดความน่าจะเป็นในปัญหาที่เกิดขึ้นกับการจัดการสินค้า คงคลัง เป็นต้น เมื่อกำหนดความน่าจะเป็นได้แล้วจะทำการแจก ความน่าจะเป็นดังกล่าวออกเป็น 2 ลักษณะ ได้แก่ การแจกแจง แบบไม่ต่อเนื่อง (Discrete Distribution) จะใช้กับสถานการณ์ ที่มีจำนวนเหตุการณ์ (หรือจำนวนตัวแปร) ที่เกิดขึ้นอย่างจำกัด หรือกล่าวคือ สามารถกำหนดค่าของตัวแปรได้นั่นเอง ซึ่งการ จำลองสถานการณ์ที่มีการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบไม่ ต่อเนื่อง โดยส่วนใหญ่แล้วจะอาศัยการสุ่มค่าของตัวแปรความ น่าจะเป็น ด้วยเทคนิคที่เรียกว่า Monte Carlo Simulation ซึ่งมีวัตถุประสงค์ คือ การสร้างตัวแปรสุ่ม งานวิจัยนี้มีตัวแปร อิสระ คือปริมาณความต้องการใช้เชื้อเพลิงที่เป็นการแจกแจง แบบไม่ต่อเนื่อง ส่วนการแจกแจงแบบต่อเนื่อง (Continuous Distribution) จะใช้กับสถานการณ์ที่มีเหตุการณ์ที่เป็นไปได้ เกิดขึ้นอย่างไม่จำกัด

เทคนิคการจำลองสถานการณ์แบบมอนติคาร์โลอาจจะไม่ จำเป็นต้องสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขึ้นมา แต่อาจใช้ วิธีจำลองพฤติกรรมของระบบขึ้นมาโดยตรง ซึ่ง เป็น กระบวนการแบบสุ่ม (Stochastic Process) เหมือนอย่าง เหตุการณ์ที่เกิดขึ้นในโลกความเป็นจริง การจำลองสถานการณ์ สามารถทำซ้ำได้หลายๆ ครั้ง หลังจากนั้นจะทำการหาความ แปรปรวนของคำตอบ และเพิ่มจำนวนการจำลองสถานการณ์ เพื่อทำให้คำตอบมีความแปรปรวนลดลง อยู่ในขอบเขตตามที่ ต้องการ การสร้างตัวแปรสุ่ม (Random Variable) ตัวแปรสุ่ม ที่สร้างขึ้นจะเปรียบเสมือนข้อมูลที่เก็บได้จากโลกความจริง การ สร้างตัวเลขสุ่มในทางปฏิบัติเดิม จะใช้ตารางตัวเลขสุ่ม แต่ใน ปัจจุบันเราสามารถใช้อคอมพิวเตอร์ซึ่งสามารถทำงานได้อย่าง สะดวกขึ้นและรวดเร็ว (Sedtakomkul, 2011)

หลักการสำคัญของเทคนิคมอนติคาร์โล ก็คือการนำเอา ตัวเลขสุ่ม มาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาต่างๆ ซึ่งมีขั้นตอนที่ สำคัญดังนี้ ขั้นตอนแรกคือ สร้างตัวเลขสุ่ม (Generate Random Number) การสร้างตัวเลขสุ่มในคอมพิวเตอร์นิยม สร้างตัวเลขแบบสุ่มเทียมโดยอาศัยสูตรทางคณิตศาสตร์ วิธีที่ใช้ กันมาก มี 2 วิธีคือ 1) วิธีส่วนกลางกำลังสอง (Midsquare Method) เป็นวิธีที่ใช้ในยุคแรกๆ ของการสร้างเลขสุ่มเทียม 2) วิธีเศษเหลือ (Congruent Method) วิธีเศษเหลือที่นิยมใช้กัน มากที่สุด นอกจากวิธีการที่กล่าวมาแล้ว 2 วิธี ในปัจจุบันมีการ ใช้วิธีการอีกหลายอย่างในการสร้างตัวเลขแบบสุ่มเทียม รวมทั้ง มีโปรแกรมสำเร็จรูปให้เลือกใช้ โดยผู้ที่ไม่ต้องสร้างโปรแกรม เอง งานวิจัยนี้ได้ใช้โปรแกรม Microsoft Excel ซึ่งใช้คำสั่ง Rand () เป็นการกำหนดช่วงตัวเลขสุ่ม ขั้นตอนที่สองนำตัวเลข

สุ่มมาประยุกต์ใช้กับปัญหาต่างๆ งานวิจัยนี้ได้นำเลขสุ่มที่เป็น ปริมาณความต้องการใช้เชื้อเพลิง ไปคำนวณหาต้นทุนรวมในการ จัดการอะไหล่ของแต่ละนโยบาย ขั้นตอนที่สามทำการทดลอง ซ้ำหลายๆ ครั้ง หลักการสำคัญประการหนึ่งของเทคนิควิธีมอน ตีคาร์โล ก็คือ ต้องมีการทดลองซ้ำหลายๆ ครั้งเพื่อลดความ คลาดเคลื่อนของคำตอบที่จะได้ มีงานวิจัยที่ได้ใช้เทคนิคการ จำลองสถานการณ์แบบมอนติคาร์โล เช่น

Phupha (2014) ได้ศึกษางานวิจัยเรื่องการประยุกต์ใช้ เทคนิคการจำลองสถานการณ์แบบมอนติคาร์โล เพื่อหาปริมาณ การสั่งซื้อที่เหมาะสม กรณีศึกษาการจัดซื้อวัตถุดิบใน โรงงานผลิตอาหารแปรรูป พบว่าปริมาณการสั่งซื้อที่เหมาะสม และจุดสั่งซื้อที่เหมาะสมที่ทำให้ต้นทุนรวมของการจัดการสินค้า คงคลังของวัตถุดิบทั้ง 3 ชนิดต่ำสุด ประกอบด้วยปริมาณการ สั่งซื้อโครงไก่ เนื้อไก่และแป้งมัน เท่ากับ 4,400 1,000 และ 930 กิโลกรัมต่อครั้ง ตามลำดับ และที่จุดสั่งซื้อโครงไก่ เนื้อไก่ และแป้งมันที่เหมาะสมเท่ากับ 5,904 1,416 และ 2,760 กิโลกรัม ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่านโยบายคำสั่งซื้อแบบ ใหม่ทำให้เกิดต้นทุนในการจัดการสินค้าคงคลังต่ำสุด

Furness (2011) ได้ ประยุกต์ใช้เทคนิคการจำลอง สถานการณ์แบบมอนติคาร์โลในด้านการตลาด และลูกค้า สัมพันธ์ (CRM) โดยใช้ตลาดเป็นกรณีศึกษาสามแหล่ง เพื่อ นำมาวิเคราะห์ข้อดีข้อเสียในการจัดการด้านการตลาด และ นำมาเป็นกลยุทธ์ด้านการตลาดให้กับองค์กรเพื่อนำไปปรับใช้

Ozkan and Kilic (2019) ประยุกต์ใช้การจำลอง สถานการณ์ของมอนติคาร์โล (MC) เพื่อประเมินความน่าเชื่อถือ ของโลจิสติกส์และเครือข่ายโซ่อุปทาน ผลการวิจัยพบว่า การ จำลองแบบที่เสนอนั้นเป็นการประมาณความน่าเชื่อถือของ เครือข่ายโซ่อุปทานในเวลาที่เหมาะสม ดังนั้นอัลกอริทึมที่ นำเสนอจากแบบจำลองสถานการณ์สามารถแก้ปัญหาการ ออกแบบเครือข่ายโซ่อุปทานสำหรับกรณีศึกษาได้

ดังนั้นงานวิจัยนี้จะประยุกต์ใช้เทคนิคการจำลอง สถานการณ์แบบมอนติคาร์โล เพื่อหาปริมาณการสั่งซื้ออะไหล่ สำหรับงานบำรุงรักษาในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม ด้วย 2 นโยบายคือ นโยบายสินค้าคงคลังแบบ (s, Q) และ (s, S) ภายใต้ต้นทุนที่ทำให้ต้นทุนรวมต่ำที่สุด

3. วิธีการดำเนินงานวิจัย

รายละเอียดในการดำเนินการวิจัย ซึ่งประกอบด้วยขั้นตอน ในการดำเนินงาน วิธีการออกแบบการจัดการอะไหล่ที่อาศัยค่า จากตัวเลขสุ่ม โดยการสร้างแบบจำลองสถานการณ์เข้ามาช่วย สำหรับการจัดการอะไหล่ เพื่อหาปริมาณการสั่งซื้อและจุดสั่งซื้อ ที่เหมาะสม รวมถึงการเปรียบเทียบผลที่ได้กับวิธีแบบเดิมของ โรงงานกรณีศึกษา โดยดำเนินการตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.1 วิเคราะห์ต้นทุนในการจัดการอะไหล่ ทางคณะผู้วิจัยได้ใช้แบบสอบถามไปยังฝ่ายบัญชีของโรงงานกรณีศึกษา เพื่อรวบรวมข้อมูลและนำผลมาวิเคราะห์ต้นทุนในแต่ละส่วน โดยต้นทุนในการจัดการอะไหล่ ประกอบด้วย ต้นทุนในการเก็บรักษา ต้นทุนในการสั่งซื้อ ต้นทุนที่เกิดจากการขาดแคลนอะไหล่ และต้นทุนของราคาอะไหล่แต่ละชนิด (Penpakkol & Intarakumthorncha, 2018) แสดงรายละเอียดดังต่อไปนี้

3.1.1 ต้นทุนการเก็บรักษา จะประกอบไปด้วยค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการดูแลรักษาอะไหล่ คือ ค่าประกันภัยอะไหล่ ค่าบริหารจัดการอะไหล่ ค่าสถานที่ในการจัดเก็บ และค่าแรงงานในการดูแลรักษา โดยมีรายละเอียดของค่าใช้จ่ายแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าใช้จ่ายต่างๆ ของต้นทุนการเก็บรักษา

รายการ	% ต้นทุน
เงินลงทุน (ทุนยืม ภาษีและค่าประกันภัยอะไหล่)	9.5
การจัดการอะไหล่ (ค่าไฟฟ้า ค่าอุปกรณ์เครื่องมือ)	3
ค่าสถานที่ (ค่าเสื่อมราคา)	7
ค่าแรงงานปฏิบัติการ	4
รวมต้นทุนการเก็บรักษา	23.5

ที่มา: ข้อมูลจากฝ่ายบัญชีของโรงงานกรณีศึกษาปี 2561

3.1.2 ต้นทุนการสั่งซื้อ การสั่งซื้ออะไหล่ของโรงงานกรณีศึกษาจะมีการสั่งซื้อจากผู้ส่งมอบทั้งภายในและภายนอกประเทศ โดยประกอบด้วยต้นทุน 2 ส่วนคือ ค่าโลหิต์และค่าแรงงานในการดำเนินการ จากการรวบรวมข้อมูลพบว่าต้นทุนในการสั่งซื้อแสดงดังตารางที่ 2 ดังนี้

ตารางที่ 2 ค่าใช้จ่ายต่างๆ ของต้นทุนการสั่งซื้อ

รายการ	บาท/ครั้ง
ค่าโลหิต์	
- ค่าใช้จ่ายใบขอซื้อ (PR)	6
- ค่าใช้จ่ายใบสั่งซื้อ (OP)	10
- ค่าใช้จ่ายในการติดต่อสื่อสาร (โทรศัพท์ อีเมลล์ แฟกซ์)	12
ค่าแรงงาน	435.7
รวมต้นทุนการสั่งซื้อ	463.7

ที่มา: ข้อมูลจากฝ่ายบัญชีของโรงงานกรณีศึกษาปี 2561

3.1.3 ต้นทุนการขาดแคลนอะไหล่ กรณีการขาดอะไหล่สำหรับใช้ในกระบวนการผลิตหรือกระบวนการบำรุงรักษา ทางโรงงานจะแจ้งให้กับผู้ที่เกี่ยวข้องทราบ ซึ่งทุกครั้งก็ทำให้กระบวนการดังกล่าวหยุดชะงัก ทางแผนกคลังสินค้าได้ประมาณต้นทุนการขาดแคลนอะไหล่โดยคิดสองเท่าของราคาต่อหน่วยของอะไหล่ที่ขาดแคลนคูณด้วยจำนวนที่ขาดแคลน

3.1.4 ต้นทุนของราคาอะไหล่แต่ละชนิด ค่าใช้จ่ายด้านราคาอะไหล่แต่ละชนิดจะอาศัยข้อมูลที่ทำให้การสั่งซื้อย้อนหลัง

จากต้นทุนดังกล่าวคณะผู้วิจัยจะนำไปใช้ในการหาต้นทุนรวมของแต่ละนโยบายในขั้นตอนของการจำลองสถานการณ์แบบมอนติคาร์โล

3.2 ประยุกต์ใช้เทคนิคการจำลองสถานการณ์แบบมอนติคาร์โล (Leepaitoon & Bunternsichit, 2019) เป็นวิธีเชิงปริมาณที่สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับระบบงานที่มีองค์ประกอบของระบบงานที่มีพฤติกรรมในลักษณะที่ไม่แน่นอน ซึ่งสอดคล้องกับสภาพปัญหาของโรงงานกรณีศึกษาที่มีปัญหาความต้องการใช้อะไหล่ที่ไม่แน่นอน โดยการประยุกต์ใช้เทคนิคการจำลองสถานการณ์แบบมอนติคาร์โล (Han et al., 2018) มีขั้นตอนแสดงดังรูปที่ 2

3.3 ประยุกต์ใช้นโยบายสินค้าคงคลัง ปัจจุบันโรงงานกรณีศึกษามีการตรวจสอบอะไหล่แบบต่อเนื่องจากระบบ SAP (Systems Applications and Products in data processing) ที่จะมีพนักงานดูแลระบบเมื่ออะไหล่มีการเบิกจ่าย และปริมาณคงเหลือในคลังสินค้า ในงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้นโยบายสินค้าคงคลัง 2 แบบ (Xu, 2017; Ohta et al., 2007) คือ

3.3.1 นโยบาย (s,Q) เป็นนโยบายที่มีการตรวจสอบอะไหล่อย่างต่อเนื่อง โดยกำหนดให้มีการสั่งซื้อเป็นจำนวน Q หน่วย เมื่อระดับอะไหล่ลดลงต่ำกว่าจุดสั่งซื้อ s ที่กำหนดไว้ การสั่งซื้อจากการคำนวณปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัด (EOQ) และกำหนดจุดสั่งซื้อ s กรณีที่มีความต้องการอะไหล่มีค่าผันแปร แต่เวลานำคงที่

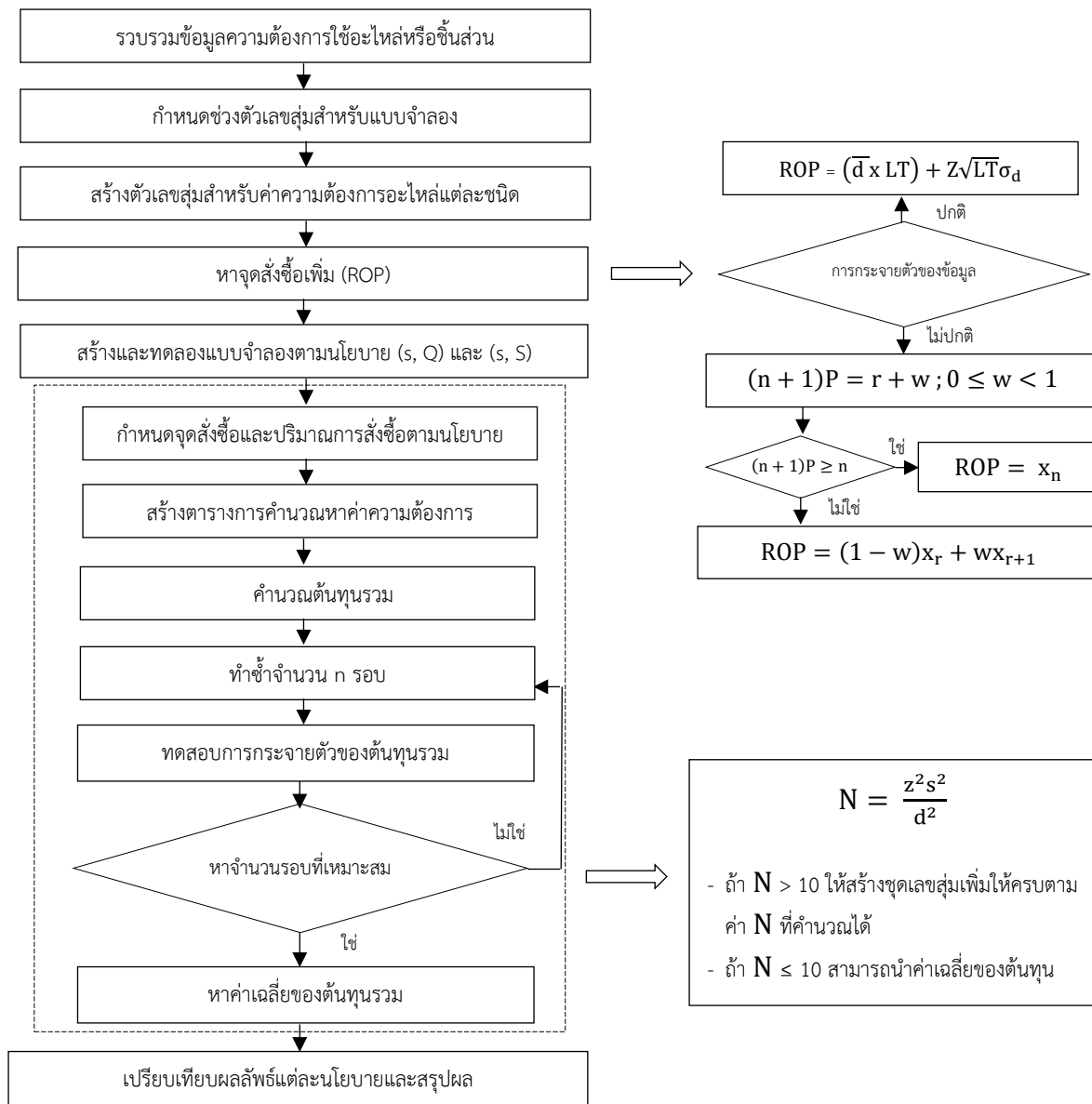
3.3.2 นโยบาย (s,S) เป็นนโยบายที่มีการตรวจสอบอะไหล่อย่างต่อเนื่อง โดยกำหนดให้มีการสั่งซื้อจำนวนเท่ากับระดับอะไหล่สูงสุด S หน่วย เมื่อระดับอะไหล่ลดลงต่ำกว่าจุดสั่งซื้อ (s)

ดังนั้นทั้งสองนโยบายจะมีวิธีในการบริหารอะไหล่ต่างกัน ขึ้นอยู่กับหลายปัจจัย เช่น ความต้องการ เวลา นำ ระดับการให้บริการ ต้นทุนต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบในการพิจารณาในระบบคลังสินค้า แต่อย่างไรก็ดีแล้วแต่สิ่งที่คาดหวังคือ นโยบายแบบใดที่ทำให้ต้นทุนการจัดการอะไหล่ต่ำที่สุด

3.4 เปรียบเทียบต้นทุนการจัดการอะไหล่

การเปรียบเทียบผลลัพธ์ที่ได้จากการวิจัยจะพิจารณาในด้านของต้นทุนรวมของการจัดการอะไหล่ โดยประกอบไปด้วยต้นทุนการสั่งซื้ออะไหล่ ต้นทุนการเก็บรักษาอะไหล่ ต้นทุนการขาดแคลนอะไหล่ และต้นทุนของราคาอะไหล่แต่ละชนิด ซึ่งจะมีการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของนโยบายที่ดีที่สุดกับนโยบายเดิม

ของโรงงานกรณีศึกษา เพื่อหาปริมาณการสั่งซื้อที่เหมาะสมสำหรับอะไหล่แต่ละชนิดภายใต้ต้นทุนที่ต่ำที่สุด



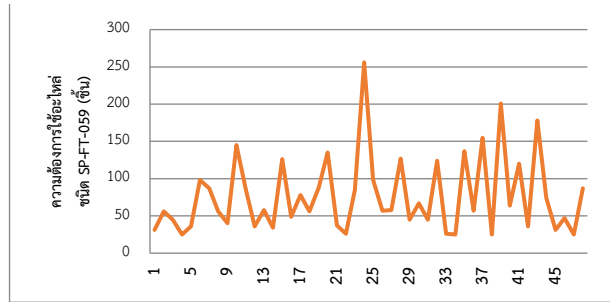
รูปที่ 2 ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองสถานการณ์มอนติคาร์โล

4. ผลการวิจัย

ผลที่ได้จากการดำเนินงานวิจัย จากการประยุกต์ใช้แบบจำลองสถานการณ์แบบมอนติคาร์โล ที่มีวัตถุประสงค์เพื่อหาปริมาณการสั่งซื้อและจุดสั่งซื้อที่เหมาะสมของอะไหล่ภายใต้ต้นทุนรวมที่ต่ำ โดยสามารถอธิบายผลการดำเนินงานได้ดังต่อไปนี้ (Medeiros, 2005; Collado et al., 2011)

4.1 รวบรวมข้อมูลความต้องการใช้อะไหล่

ความต้องการอะไหล่ที่อยู่ในกลุ่ม A ทั้งหมดมี 16 ชนิด ซึ่งเป็นความต้องการในการใช้ภายใน 1 ปี ย้อนหลัง จำนวน 48 สัปดาห์ โดยข้อมูลดังกล่าวได้มาจากการเบิก-จ่าย อะไหล่เพื่อนำไปใช้ในการสนับสนุนฝ่ายผลิตและฝ่ายบำรุงรักษา ซึ่งแสดงความต้องการใช้อะไหล่ SP-FT-059 เพื่อเป็นตัวอย่างให้กับอะไหล่ชนิดอื่นที่เหลือ โดยความต้องการอะไหล่ชนิด SP-FT-059 แสดงดังรูปที่ 3 โดยมีค่าสูงสุดเท่ากับ 256 ชิ้น ค่าต่ำสุดเท่ากับ 25 ชิ้น ค่าเฉลี่ย 76.6 ชิ้น



รูปที่ 3 ตัวอย่างความต้องการใช้อะไหล่ชนิด SP-FT-059

4.2 กำหนดช่วงตัวเลขสำหรับแบบจำลอง การสร้างตารางแสดงความแจกแจงความน่าจะเป็นของตัวแปรสุ่มที่ต้องการสำหรับใช้ในการจำลองสถานการณ์ เพื่อที่จะหาปริมาณการสั่งซื้อและจุดสั่งซื้อเพิ่มที่เหมาะสม ซึ่งงานวิจัยมีตัวแปรนำเข้าคือปริมาณความต้องการใช้อะไหล่ ดังนั้นจะต้องสร้างเงื่อนไขของตัวเลขสุ่มของอะไหล่ทั้ง 16 ชนิด เพื่อใช้แทนเหตุการณ์ความต้องการใช้อะไหล่ โดยข้อมูลที่จะเกิดขึ้นเป็นความถี่ของความถี่ความต้องการในปริมาณต่างๆ นำมาเรียงจากน้อยไปมาก เพื่อพิจารณาว่าในแต่ละปริมาณมีจำนวนครั้งที่เกิดขึ้น ที่จำนวนเท่าไร แล้วหาความน่าจะเป็นของความถี่ความต้องการในปริมาณต่างๆ ที่มีโอกาสเกิดขึ้น หาความน่าจะเป็นสะสมและกำหนดช่วงของตัวเลขสุ่ม เพื่อใช้จำลองสถานการณ์ความต้องการของอะไหล่ในแต่ละชนิด แสดงดังตารางที่ 3

จากตารางที่ 3 อธิบายได้ว่าหากตัวเลขสุ่มที่เลือกมาอยู่ในค่าระหว่าง 0-0.08 ก็จะเกิดเหตุการณ์ความต้องการอะไหล่ที่ 25 หน่วย หรือตัวเลขสุ่มที่เลือกมามีค่าอยู่ระหว่าง 0.08-0.13 ก็จะแทนเหตุการณ์ที่เกิดความต้องการอะไหล่ที่ 201 หน่วย

ตารางที่ 3 ตัวอย่างกำหนดช่วงตัวเลขสุ่มของความถี่ความต้องการอะไหล่

ความต้องการ (หน่วย)	จำนวนครั้งที่เกิด	ความน่าจะเป็น	ความน่าจะเป็นสะสม	ช่วงของตัวเลขสุ่ม
25	4	0.08	0.08	$r \leq 0.08$
26	2	0.04	0.13	$0.08 < r \leq 0.13$
.	.	.	.	.
56	3	0.06	0.46	$0.40 < r \leq 0.46$
57	2	0.04	0.50	$0.46 < r \leq 0.50$
.	.	.	.	.
145	1	0.02	0.92	$0.90 < r \leq 0.92$
155	1	0.02	0.94	$0.92 < r \leq 0.94$
178	1	0.02	0.96	$0.94 < r \leq 0.96$
201	1	0.02	0.98	$0.96 < r \leq 0.98$
256	1	0.02	1.00	$0.98 < r$
รวม	48	1		

4.3 สร้างตัวเลขสุ่มสำหรับค่าความต้องการอะไหล่แต่ละชนิด จากการกำหนดช่วงตัวเลขสุ่มของความถี่ความต้องการอะไหล่ จากตารางที่ 3 มาทำการสร้างตัวเลขสุ่มสำหรับค่าความต้องการอะไหล่แต่ละชนิด โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel ซึ่งใช้คำสั่ง Rand () เป็นการกำหนดช่วงตัวเลขสุ่มให้อยู่ในช่วง 0-1 เพื่อให้สอดคล้องกับช่วงตัวเลขสุ่ม (r) ที่สร้างขึ้นมาจากผลก่อนหน้า ซึ่งสุ่มจำนวน 48 สัปดาห์ ละ 10 ชุดเลขสุ่ม ดังตารางที่ 4 คณะผู้วิจัยได้สร้างตารางความต้องการอะไหล่ที่เกิดจากเลขสุ่ม ในตารางสามารถปรับเปลี่ยนรูปแบบการสั่งซื้อได้ เพื่อที่จะได้นำไปใช้เปรียบเทียบในการคิดต้นทุนรวมของการสั่งซื้อในแต่ละแบบตามนโยบายที่กำหนดไว้

ตารางที่ 4 ตัวอย่างเลขสุ่มของอะไหล่ชนิด SP-FT-059

สัปดาห์ที่	ตัวเลขสุ่มชุดที่				
	1	2	3	4	5
1	0.182	0.057	0.084	0.480	0.091
2	0.118	0.421	0.910	0.203	0.545
3	0.328	0.645	0.128	0.368	0.068
.	.	.	.	.	.
48	0.022	0.114	0.047	0.377	0.797
สัปดาห์ที่	ตัวเลขสุ่มชุดที่				
	6	7	8	9	10
1	0.028	0.334	0.837	0.113	0.201
2	0.291	0.771	0.251	0.269	0.123
3	0.595	0.201	0.150	0.239	0.087
.	.	.	.	.	.
48	0.726	0.357	0.815	0.126	0.247

4.4 หาจุดสั่งซื้อเพิ่ม (ROP) จากการทดสอบการกระจายตัวของข้อมูลของวัตถุดิบทั้ง 16 ชนิด พบว่ามีลักษณะการกระจายตัวของข้อมูล 2 แบบ คือการกระจายตัวแบบปกติและการกระจายตัวแบบไม่ปกติ ดังนั้นสามารถหาจุดสั่งซื้อที่เหมาะสมโดยใช้ทฤษฎีของ Lordahl and Bookbinder (1994) ได้ดังนี้

4.4.1 การกระจายตัวแบบปกติ เนื่องจากอัตราความต้องการอะไหล่แปรผันและเวลานำมาคงที่ เป็นสภาวะที่อาจเกิดของขาดมือเพราะอัตราการใช้หรือความต้องการอะไหล่ไม่มีความสม่ำเสมอ จึงต้องมีการเก็บอะไหล่เผื่อขาดมือ (Safety Stock) สำรองไว้ และต้องมีการประมาณระดับการให้บริการ (Service Level) สามารถหาจุดสั่งซื้อเพิ่มได้จากสมการที่ (1) (Tamura et al., 2010)

$$ROP = (\bar{d} \times LT) + Z\sqrt{LT}\sigma_d \quad (1)$$

โดยที่

$\bar{d}$ = อัตราความต้องการอะไหล่เฉลี่ย

LT = เวลารนำ

Z = ค่าระดับความเชื่อมั่นว่าจะมีอะไหล่เพียงพอ

ต่อความต้องการ กำหนดช่วงความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

σ_d = ความเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราความต้องการอะไหล่

จากสมการที่ (1) กรณีอะไหล่ชนิด SP-FT-068 จากข้อมูลพบว่า ความต้องการเฉลี่ย ($\bar{d}$) เท่ากับ 53.7 หน่วย เวลารนำ (LT) เท่ากับ 15 วันหรือ 2.14 สัปดาห์ ระดับความเชื่อมั่น (Z) เท่ากับ 1.645 และความเบี่ยงเบนมาตรฐานของอัตราความต้องการสินค้า (σ_d) เท่ากับ 35.17 หน่วย ดังนั้น

$$ROP = (53.7 \times 2.14) + 1.645\sqrt{2.14 \times 35.17} \\ = 199.5 \text{ หน่วย} \approx 200 \text{ หน่วย ดังตารางที่ 6}$$

4.4.2 การกระจายตัวแบบไม่ปกติ สามารถหาจุดสั่งซื้อเพิ่มได้จากสมการที่ (2) [11]

$$(n+1)P = r + w; 0 \leq w < 1 \quad (2)$$

1. กรณี $(n+1)P \geq n$

แล้วจุดสั่งซื้อเพิ่ม = x_n (ข้อมูลความต้องการลำดับที่ n)

2. กรณี $(n+1)P < n$

- ถ้า $0 < w < 1$

$$\text{แล้วจุดสั่งซื้อเพิ่ม} = (1-w)x_r + wx_{r+1}$$

- ถ้า $w = 0$

$$\text{แล้วจุดสั่งซื้อเพิ่ม} = x_r$$

โดยที่

n = จำนวนข้อมูล

(ความต้องการในช่วงเวลานำ $n = 48$ สัปดาห์)

P = ค่าความเชื่อมั่น

(กำหนดให้มีค่าความเชื่อมั่นเป็น 95 เปอร์เซนต์)

x_r = ข้อมูลความต้องการลำดับที่ r

r = จำนวนเต็มไม่ติดลบ

จากสมการที่ (2) แทนค่า n และ P ได้ค่าดังนี้

$$(n+1)P = (48+1)0.95 = 46.55 = r + w < n$$

จะได้ $r = 46$ และ $w = 0.55$ ยกตัวอย่างการหาจุดสั่งซื้อเพิ่มของอะไหล่ชนิด SP-FT-059 คือ จากข้อมูลปริมาณความต้องการในช่วงเวลานำของอะไหล่ชนิด SP-FT-059 โดยเรียงลำดับจากน้อยไปมากได้ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ปริมาณความต้องการของอะไหล่ชนิด SP-FT-059 เรียงจากน้อยไปมาก

25	25	25	25	26	26	31	31
34	36	36	36	37	40	45	45
45	47	49	56	56	56	57	57
58	58	64	67	74	78	85	86
87	87	88	98	98	120	124	126
127	135	137	145	155	178	201	256

จากตารางที่ 5 พบว่า $X_{46}=178$ และ $X_{47}=201$ ดังนั้นจะได้จุดสั่งซื้อเพิ่ม คือ

$$ROP = (1 - 0.55) \times 178 + (0.55 \times 201) \\ = 190.65 \text{ หน่วย} \approx 191 \text{ หน่วย}$$

และทำแบบเดียวกันสำหรับอะไหล่ชนิดอื่นที่เหลือ จุดสั่งซื้อเพิ่มที่ได้จะนำไปใช้เป็นเงื่อนไขในการหาปริมาณการสั่งซื้อที่เหมาะสม ดังนั้นจุดสั่งซื้อเพิ่มของอะไหล่ทั้ง 16 ชนิด แสดงผลดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 จุดสั่งซื้อเพิ่ม (ROP) ของอะไหล่ทั้ง 16 ชนิด

ลำดับที่	ชนิดอะไหล่	ROP	ลำดับที่	ชนิดอะไหล่	ROP
1	SP-FT-059	191	9	SP-FT-026	343
2	SP-FT-096	214	10	SP-FT-023	73
3	SP-FT-041	185	11	SP-FT-001	85
4	SP-FT-005	491	12	SP-FT-006	71
5	SP-FT-068	200	13	SP-FT-128	250
6	SP-FT-129	170	14	SP-FT-024	82
7	SP-FT-127	182	15	SP-FT-056	94
8	SP-FT-008	91	16	SP-FT-049	166

4.5 การหาปริมาณการสั่งซื้อที่เหมาะสม (EOQ) หรือ (Q) เพื่อใช้สำหรับการวิเคราะห์ของนโยบาย SQ4 (s,Q) ในตารางที่ 7 และ S4 (s,S) การหาปริมาณการสั่งซื้อที่เหมาะสมเป็นการนำข้อมูลปริมาณความต้องการของอะไหล่ที่เกิดขึ้นจริงในอดีตมาคำนวณจากสมการ โดยใช้ต้นทุนการสั่งซื้อ ต้นทุนการเก็บรักษาซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3) [10]

$$EOQ = \sqrt{\frac{2C_oD}{C_c}} \quad (3)$$

โดยที่

EOQ = ขนาดของการสั่งซื้อต่อครั้งที่ประหยัด หรือ Q

D = ความต้องการอะไหล่ต่อปี (หน่วย)

C_o = ต้นทุนการสั่งซื้อต่อครั้ง (บาท)

C_c = ต้นทุนการเก็บรักษาต่อหน่วยต่อปี (บาท)

จากสมการที่ (3) ยกตัวอย่างอะไหล่ชนิด SP-FT-059 เมื่อ $D=3678$ หน่วย/ปี $C_0=463.7$ บาท/ครั้ง $C_C = 23.5\%$ ต่อราคาอะไหล่ โดยที่ราคาอะไหล่ชนิดนี้ขึ้นละ 5487 บาท ดังนั้น

$$EOQ = \sqrt{\frac{2 \times 463.7 \times 3678}{0.235 \times 5487}} = 51 \text{ หน่วย แสดงค่าตามตารางที่ 7}$$

4.6 สร้างและทดลองแบบจำลองตามนโยบาย (s, Q)

4.6.1 กำหนดจุดสั่งซื้อและปริมาณการสั่งซื้อตามนโยบาย (s,Q) การหาปริมาณการสั่งซื้อที่เหมาะสมโดยนำค่าจากความต้องการปริมาณการใช้ในอดีตมากำหนดนโยบายโดย

ปริมาณการสั่งซื้อที่ต่ำสุดในอดีต (Q) และจุดสั่งซื้อเพิ่มเป็น (s) เป็นนโยบายที่ 1 (SQ1)

ปริมาณการสั่งซื้อจากค่าเฉลี่ยในอดีต (Q) และจุดสั่งซื้อเพิ่มเป็น (s) เป็นนโยบายที่ 2 (SQ2)

ปริมาณการสั่งซื้อจากค่าสูงสุดในอดีต (Q) และจุดสั่งซื้อเพิ่มเป็น (s) เป็นนโยบายที่ 3 (SQ3)

ปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัด (Q) และจุดสั่งซื้อเพิ่มเป็น (s) เป็นนโยบายที่ 4 (SQ4) แสดงค่าแต่ละนโยบายดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 กำหนดนโยบายการสั่งซื้อของอะไหล่ทั้ง 16 ชนิด ของนโยบาย (s,Q)

ลำดับที่	ชนิดอะไหล่	นโยบายการสั่งซื้อ			
		ค่าสูงสุด ในอดีต (SQ1)	ค่าเฉลี่ย ในอดีต (SQ2)	ค่าต่ำสุด ในอดีต (SQ3)	EOQ (SQ4)
1	SP-FT-059	256	77	25	51
2	SP-FT-096	265	77	1	56
3	SP-FT-041	194	74	1	56
16	SP-FT-049	98	50	3	163

4.6.2 สร้างตารางการคำนวณหาความต้องการ โดยสร้างตารางข้อมูลในโปรแกรม Microsoft Excel โดยมีช่วงข้อมูล 48 สัปดาห์ ความต้องการนี้เกิดจากเงื่อนไขตัวเลขสุ่มที่ได้สร้างไว้จากข้อมูลความต้องการใช้อะไหล่ในอดีต ซึ่งในการให้ข้อดังกล่าวแสดงค่าที่ได้จากเงื่อนไขตัวเลขสุ่มจะใช้ชุดคำสั่ง VLOOKUP ใน โปรแกรม Microsoft Excel (lookup_value,table_array,col_index_num,range_lookup) แสดงตามรูปที่ 4

STDEV													
=VLOOKUP(B3,\$L\$3:\$M\$50,2)													
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	
1	สัปดาห์ที่	ตัวเลขคู่ทุกที									ความน่าจะเป็นสะสม		
2		1	2	3	4	5	6	7	8	9		10	
3	1	0.182	0.057	0.084	0.480	0.091	0.028	0.334	0.837	0.113		0.201	0.08
4	2	0.118	0.421	0.910	0.203	0.545	0.291	0.771	0.251	0.269		0.123	0.13
5	3	0.328	0.645	0.128	0.368	0.068	0.595	0.201	0.150	0.239		0.087	0.17
6	4	0.802	0.850	0.343	0.853	0.518	0.389	0.265	0.466	0.651		0.030	0.19
7	5	0.435	0.926	0.540	0.476	0.261	0.060	0.453	0.176	0.954		0.026	0.25
8	6	0.916	0.032	0.368	0.392	0.850	0.805	0.123	0.273	0.958		0.772	0.27
9	7	0.382	0.250	0.660	0.096	0.164	0.872	0.128	0.603	0.473		0.887	0.29
10	8	0.273	0.059	0.646	0.684	0.705	0.760	0.867	0.924	0.554		0.667	0.35
11	9	0.289	0.715	0.939	0.748	0.875	0.971	0.555	0.536	0.796		0.915	0.38
12	10	0.118	0.296	0.408	0.210	0.917	0.368	0.298	0.150	0.170	0.818	0.40	
M		N		O	P	Q	R	S	T	U	V	W	X
SP-FT-059		ค่าความต้องการ SP-FT-059											
ความต้องการ (s)		4	5	6	7	8	9	10					
25	=VLOOKUP(B3,\$L\$3:\$M\$50,2)	57	25	25	45	126	26	34					
25	=VLOOKUP(lookup_value, table_array, col_index_num, [range_lookup])												
25		3	45	78	26	45	25	67	34	31	36	25	
25		4	120	126	45	126	57	47	36	56	85	25	
26		5	56	145	58	56	36	25	56	31	155	25	
26		6	137	25	45	47	126	120	26	37	155	98	
31		7	47	36	85	25	31	127	26	67	56	135	
31		8	37	25	85	86	87	98	127	145	58	86	
34		9	37	87	155	88	135	178	58	58	120	137	
36		10	26	40	49	36	145	45	40	31	31	124	
36		11	64	26	145	45	45	74	40	56	86	74	
36		12	37	64	36	26	58	145	37	26	56	126	

รูปที่ 4 ตัวอย่างการสร้างค่าความต้องการของอะไหล่

จากรูปที่ 4 ผลจากการใช้คำสั่ง VLOOKUP จะได้ค่าความต้องการใหม่ที่เกิดจากตัวเลขสุ่มในคอลัมน์ O-X ของอะไหล่ชนิด SP-FT-059 ทั้ง 48 สัปดาห์ ซึ่งจะทำให้ได้ความต้องการทั้งปีของแต่ละชุดเลขสุ่มทั้งหมด 10 ชุด แสดงตามตัวอย่างรูปที่ 4 (ล่าง)

4.6.3 หาต้นทุนรวม โดยต้นทุนรวมประกอบด้วย ต้นทุนการเก็บรักษา ต้นทุนการสั่งซื้อ ต้นทุนการขาดแคลนอะไหล่ และต้นทุนของราคาอะไหล่แต่ละชนิด ที่ได้ผลการวิเคราะห์ต้นทุนมาจากหัวข้อที่ 3.1 ยกตัวอย่างแสดงตามรูปที่ 5

สัปดาห์ที่	ราคาอะไหล่	ตัวเลขสุ่มชุดที่										ปริมาณการสั่งซื้อ (Q)
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
4	SP-FT-059	3307	3267	3455	3295	3743	3289	3296	3097	3432	3336	25
5	SP-FT-096	2849	2105	3234	3001	3598	4067	3028	2731	3230	3083	1
6	SP-FT-041	3212	3256	3385	3199	3713	4103	3288	3003	3411	3275	1
7	SP-FT-005	11433	12345	11580	11392	13070	12365	11937	11168	11882	11379	15
8	SP-FT-068	2285	2679	2355	2398	2623	2779	2390	2204	2465	2207	2
9	SP-FT-129	3275	3156	3388	3306	3731	4085	3386	3138	3424	3287	6
10	SP-FT-127	2072	2315	2091	2084	2363	2618	2177	1986	2199	1992	1
11	SP-FT-008	1111	1345	1197	1048	1316	1326	1099	945	1133	1193	2
12	SP-FT-026	4306	4216	4349	4326	4874	5220	4498	4213	4620	4249	3
13	SP-FT-023	670	780	731	643	787	657	623	543	697	680	1
14	SP-FT-001	976	1235	1104	966	1251	1366	1040	918	1085	1010	1
15	SP-FT-006	923	1037	1057	938	1160	1023	973	867	1010	995	1
16	SP-FT-128	2912	2233	2995	2959	3362	2435	2997	2834	3181	2879	0
17	SP-FT-024	1197	1657	1236	1132	1448	1683	1218	1038	1161	1265	1
18	SP-FT-056	1581	1809	1676	1589	1898	1356	1651	1487	1660	1644	0
19	SP-FT-049	2240	2347	2264	2243	2682	2609	2278	2159	2323	2207	3

ซ้ำครั้งที่ 1						
อะไหล่ หมายเลข	จำนวนครั้ง ในการสั่งซื้อ	ต้นทุน				ต้นทุนรวม
		ต้นทุนการ ขาดแคลน อะไหล่	ต้นทุนเก็บ รักษา	ต้นทุนสั่งซื้อ	ต้นทุนอะไหล่	
13	132	-	2.938	61338	5487	18206850
1	2849	-	0.118	1320849	4612	14458132
1	3212	-	0.118	1489404	4568	16161821
8	762	-	1.763	353432	359	4457881
1	1143	-	0.235	529777	1678	4364007
3	546	-	0.705	253103	956	3384004
1	2072	-	0.118	960786	1258	3567363
1	556	-	0.235	257585	1689	2134065
2	1435	-	0.353	665564	452	2611876
1	670	-	0.118	310679	2589	2045309
1	976	-	0.118	452533	1525	1940806
1	923	-	0.118	427995	1589	1894642
0	0	2143232	0.000	0	368	3214848
1	1197	-	0.118	555049	785	1494694
0	0	1827636	0.000	0	578	2741454
2	747	-	0.353	346229	356	1143670
						83,821,420

รูปที่ 5 ตัวอย่างต้นทุนรวมในการทำซ้ำรอบที่ 1 ของนโยบาย SQ3

ผลจากรูปที่ 5 เป็นต้นทุนรวมในการทำซ้ำจากตัวเลขสุ่มครั้งที่ 1 ได้ต้นทุนรวม 83,821,420 บาท แสดงผลดังตารางที่ 8

4.6.4 ทำซ้ำด้วยวิธีเดิม จากขั้นตอนที่ 4.6.3 จำนวน 10 รอบ และหาค่าเฉลี่ยของต้นทุนรวมทั้ง 10 รอบ หลักการสำคัญประการหนึ่งของเทคนิควิธีมอนติคาร์โล ก็คือ ต้องมีการทดลองซ้ำหลายๆ ครั้ง เพื่อลดความคลาดเคลื่อนของค่าตอบที่ได้ งานวิจัยนี้กำหนดการทำซ้ำรอบแรกจากการสุ่มตัวเลข 10 ครั้ง จะได้ต้นทุนรวมของแต่ละครั้ง หากหาจำนวนรอบที่เหมาะสมแล้วมีค่ามากกว่า 10 ครั้ง ก็จะต้องทำซ้ำจนครบตามจำนวน

ตารางที่ 8 ตัวอย่างต้นทุนรวมของอะไหล่ทั้ง 16 ชนิดจากการสุ่ม 10 ครั้ง ของนโยบาย SQ3

ตัวเลขสุ่มชุดที่	ต้นทุนรวม (บาท)
1	83,821,420
2	83,207,005
3	89,016,360
4	84,520,326
5	98,415,444
6	99,260,424
7	86,187,101
8	78,986,491
9	89,478,906
10	85,447,027
เฉลี่ย	87,834,050

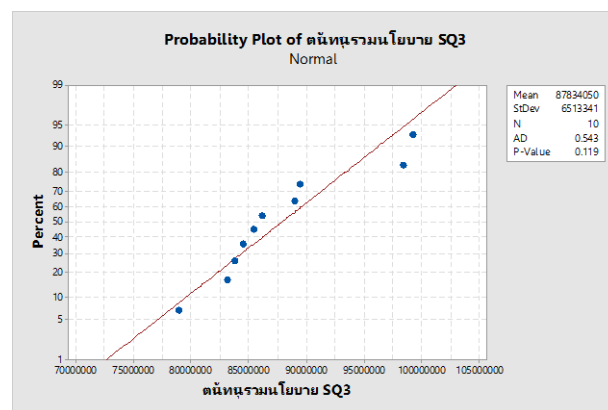
จากตารางที่ 8 พบว่าค่าเฉลี่ยของต้นทุนรวมของนโยบาย SQ3 เท่ากับ 87,834,050 บาท

4.6.5 ทดสอบการกระจายตัวของข้อมูลของต้นทุนที่เกิดจากการทำซ้ำที่ 10 รอบ เพื่อหาจำนวนของการทำซ้ำของนโยบาย SQ3 ภายใต้สมมติฐานการทดสอบดังนี้ กำหนดให้

H_0 : ข้อมูลมีการกระจายตัวแบบปกติ

H_1 : ข้อมูลมีการกระจายตัวแบบไม่ปกติ

โดยกำหนดช่วงความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ ($\alpha=0.05$) โดยข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบได้จากตารางที่ 8 และได้ผลการทดสอบสมมติฐานดังรูปที่ 6 การกระจายตัวของต้นทุนรวมพบว่าค่า p-value มีค่ามากกว่าค่าความเชื่อมั่นที่ 95% (p-value>0.05) ดังนั้นจึงต้องยอมรับ H_0 คือ ข้อมูลมีการกระจายตัวเป็นการแจกแจงแบบปกติ



รูปที่ 6 การกระจายตัวของต้นทุนรวมจากนโยบาย (SQ3)

4.6.6 หาจำนวนรอบที่เหมาะสม ได้จากสมการที่ (4)

$$N = \frac{z^2 s^2}{d^2} \quad (4)$$

โดยที่

Z = ค่าความเชื่อมั่นที่ 95% ($Z_{0.025}$ เปิดตารางได้ 1.96)

S = ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

d = $0.05 \times$ ค่าเฉลี่ยต้นทุนรวม

ดังนั้น หากต้องการหาจำนวนรอบที่เหมาะสมของนโยบาย SQ3 จะได้

Z = ค่าความเชื่อมั่นที่ 95% ($Z_{0.025}$ เปิดตารางได้ 1.96)

S = ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (6,513,341)

d = $0.05 \times$ ค่าเฉลี่ยต้นทุนรวม ($0.05 \times 87,834,050$)

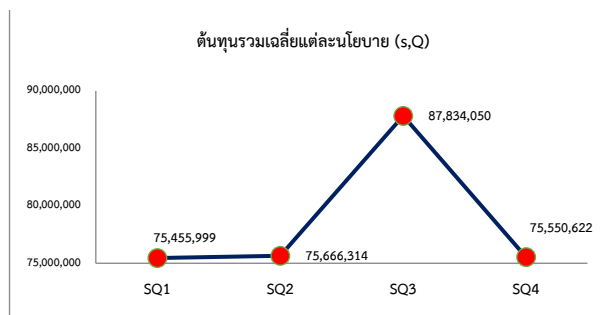
จากสมการที่ 4 จำนวนรอบที่เหมาะสมในการทำซ้ำของนโยบาย SQ3 จะเท่ากับ

$$N = \frac{1.96^2 6,513,341^2}{(0.05 \times 87,834,050)^2}$$

$$= 8.45 \text{ รอบ} \approx 9 \text{ รอบ}$$

ผลของรอบการทำซ้ำใหม่ N ที่ได้มีค่าต่ำกว่าจำนวนรอบของการจำลองสถานการณ์ที่กำหนดไว้ครั้งแรกที่ 10 รอบสามารถใช้ผลของต้นทุนรวมเฉลี่ยที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ที่เกิดจากตัวเลขสุ่ม 10 ชุดแรกมาวิเคราะห์สรุปผลได้เลย แต่ถ้าค่า N ที่คำนวณใหม่มีค่ามากกว่า 10 ให้สร้างชุดตัวเลขสุ่มเพิ่มเท่ากับจำนวนรอบที่เกินจาก 10 รอบ และทำการจำลองสถานการณ์ซ้ำให้ครบ ทำการคำนวณในลักษณะเดียวกันนี้สำหรับแผนสั่งซื้อแบบใหม่ทั้ง 3 นโยบายที่เลือกตามที่ได้กำหนดไว้

ผลจากการจำลองสถานการณ์ทั้ง 10 รอบ โดยใช้นโยบาย (s,Q) ทั้ง 4 นโยบาย แสดงค่าดังรูปที่ 7 จากนโยบายแบบ (s,Q) จะเห็นว่า นโยบายที่ SQ1 มีต้นทุนรวมเฉลี่ยต่ำที่สุด 75,455,999 บาท และต้นทุนรวมเฉลี่ยที่สูงที่สุดของนโยบายนี้คือ นโยบาย SQ3 คิดเป็นต้นทุน 87,834,050 บาท



รูปที่ 7 เปรียบเทียบต้นทุนรวมเฉลี่ยต่อปีของนโยบายแบบ (s,Q)

4.7 สร้างและทดลองแบบจำลองตามนโยบาย (s, S)

4.7.1 กำหนดจุดสั่งซื้อ (s) เหมือนกับนโยบายแบบ (s,Q) และกำหนดระดับอะไหล่คงคลังสูงสุด (S) เป็นนโยบายที่มีการตรวจสอบสินค้าคงคลังอย่างต่อเนื่อง เป็น 4 นโยบาย (S1 S2 S3 และ S4 ตามลำดับดังนี้

ปริมาณการสั่งซื้อ S1 = ค่าสูงสุดในอดีต (Max)+ จุดสั่งซื้อ (s)

ปริมาณการสั่งซื้อ S1 = ค่าเฉลี่ยในอดีต (Average)+ จุดสั่งซื้อ (s)

ปริมาณการสั่งซื้อ S1 = ค่าต่ำสุดในอดีต (Min)+ จุดสั่งซื้อ (s)

ปริมาณการสั่งซื้อ S1 = ปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัด (EOQ)+ จุดสั่งซื้อ (s) แสดงผลตารางที่ 9

ตารางที่ 9 กำหนดนโยบายการสั่งซื้อของอะไหล่ทั้ง 16 ชนิด ของนโยบาย (s,S)

ลำดับที่	ชนิดอะไหล่	นโยบายการสั่งซื้อ (ระดับอะไหล่คงคลังสูงสุด : S)			
		S1	S2	S3	S4
1	SP-FT-059	447	268	216	242
2	SP-FT-096	479	291	215	270
3	SP-FT-041	379	259	186	241
.	.	.	.	.	.
16	SP-FT-049	264	216	169	329

จากตารางที่ 9 เป็นปริมาณการสั่งซื้อในแต่ละนโยบายของ S1 S2 S3 และ S4 ดังนั้นจุดสั่งซื้อเพิ่มก็มีค่าเท่ากับนโยบายของ (s,Q) เปลี่ยนเฉพาะปริมาณการสั่งซื้อ S ที่ได้จากตารางที่ 9 แสดงตัวอย่างนโยบาย S1 ตามตารางที่ 10

ตารางที่ 10 การกำหนดนโยบาย S1 สำหรับจุดสั่งซื้อและปริมาณการสั่งซื้อ

ลำดับที่	ชนิดอะไหล่	นโยบาย S1	
		จุดสั่งซื้อเพิ่ม (s)	ปริมาณการสั่งซื้อ (S)
1	SP-FT-059	191	447
2	SP-FT-096	214	479
3	SP-FT-041	185	379
.	.	.	.
16	SP-FT-049	166	264

4.7.2 สร้างตารางการคำนวณหาความต้องการ โดยสร้างตารางข้อมูลในโปรแกรม Microsoft Excel โดยมีช่วงข้อมูล 48 สัปดาห์ ความต้องการนี้เกิดจากเงื่อนไขตัวเลขสุ่มที่ได้สร้างไว้จากข้อมูลความต้องการใช้อะไหล่ในอดีตโดยใช้เลขสุ่มชุดเดียวกันกับนโยบายแบบ (s,Q) ตามรูปที่ 4

4.7.3 หาต้นทุนรวม เช่นเดียวกับนโยบาย (s,Q) ดังรูปที่ 5

4.7.4 ทำซ้ำด้วยวิธีเดิม จากขั้นตอนที่ 4.7.3 จำนวน 10 รอบ และหาค่าเฉลี่ยของต้นทุนรวมทั้ง 10 รอบ จากการสุ่มตัวเลขทั้ง 10 จะได้ต้นทุนรวมของแต่ละครั้งของแต่ละนโยบาย แสดงตัวอย่างดังตารางที่ 11

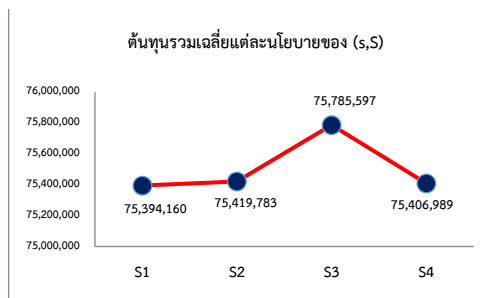
ตารางที่ 11 ตัวอย่างต้นทุนรวมของอะไหล่ทั้ง 16 ชนิดจากการสุ่ม 10 ครั้ง ของนโยบาย S1

ตัวเลขสุ่มชุดที่	ต้นทุนรวม (บาท)
1	71,920,737
2	71,153,943
3	76,452,507
4	72,530,020
5	84,358,395
6	85,847,854
7	73,855,551
8	67,732,184
9	76,741,429
10	73,348,979
เฉลี่ย	75,394,160

4.7.5 ทดสอบการกระจายตัวของข้อมูล ของต้นทุนที่เกิดจากการทำซ้ำที่ 10 รอบ แบบเดียวกับนโยบาย (s,Q)

4.7.6 หาจำนวนรอบที่เหมาะสม เพื่อหาจำนวนของการทำซ้ำของนโยบาย S1 S2 S3 และ S4 โดยใช้สมการที่ (4)

ผลจากการจำลองสถานการณ์ทั้ง 10 รอบ โดยใช้นโยบาย (s,S) ทั้ง 4 นโยบาย แสดงค่าดังรูปที่ 8 จะพบว่า นโยบายที่ S1 มีต้นทุนรวมเฉลี่ยต่ำที่สุด 75,394,160 บาท และต้นทุนรวมเฉลี่ยที่สูงที่สุดของนโยบายนี้คือ นโยบาย S3 คิดเป็นต้นทุน 75,785,597 บาท



รูปที่ 8 เปรียบเทียบต้นทุนรวมเฉลี่ยต่อปีของนโยบายแบบ (s,S)

จากการกำหนดนโยบาย 2 แบบ คือ (s,Q) และ (s,S) และจำลองสถานการณ์โดยใช้เทคนิคมอนติคาร์โลพบว่าการใช้ นโยบาย (s,S) จะทำให้ต้นทุนรวมของสินค้าคงคลังต่ำที่สุด โดยใช้ นโยบาย S1

4.8 การวิเคราะห์ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานเฉลี่ยของแบบจำลองสถานการณ์

งานวิจัยนี้สร้างตัวเลขสุ่มตามหลักการของแบบจำลองมอนติคาร์โลในการหาปริมาณความต้องการในแต่ละนโยบาย เพื่อคำนวณหาต้นทุนรวมและนำค่าเฉลี่ยไปใช้ในการวิเคราะห์หา นโยบายที่ทำให้ต้นทุนรวมต่ำสุด ด้วยปริมาณการสั่งซื้อที่เหมาะสม ดังนั้นในแต่ละนโยบายจะมีค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานเฉลี่ย (Standard Error of Mean) จากรูปที่ 9 พบว่า นโยบาย S1 ค่า Standard Error of Mean เท่ากับ 1,813,762 บาท โดยค่าเฉลี่ยของต้นทุนรวมอยู่ระหว่าง 71,291,146 บาท ถึง 79,497,174 บาท ภายใต้ค่าความเชื่อมั่น 95%

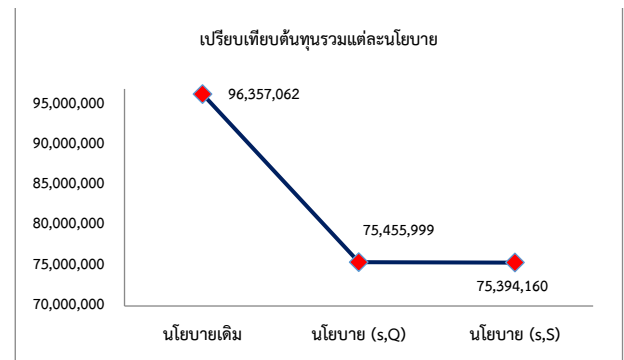
Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI
นโยบาย SQ1	10	75455999	5739460	1814977	(71350237, 79561762)
Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI
นโยบาย SQ2	10	75666314	5753412	1819389	(71550571, 79782057)
Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI
นโยบาย SQ3	10	87834050	6513341	2059699	(83174687, 92493414)
Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI
นโยบาย SQ4	10	75550622	5747130	1817402	(71439373, 79661872)
Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI
นโยบาย S1	10	75394160	5735618	1813762	(71291146, 79497174)
Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI
นโยบาย S2	10	75419783	5737353	1814310	(71315528, 79524039)
Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI
นโยบาย S3	10	75785597	5704838	1804028	(71704601, 79866592)
Variable	N	Mean	StDev	SE Mean	95% CI
นโยบาย S4	10	75406989	5736655	1814090	(71303233, 79510745)

รูปที่ 9 ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐานเฉลี่ยของแต่ละนโยบาย

4.9 เปรียบเทียบต้นทุนการจัดการสินค้าคงคลัง

4.9.1 การเปรียบเทียบผลลัพธ์กับนโยบายเดิมของโรงงานกรณีศึกษา นโยบายการสั่งซื้อแบบเดิมของโรงงานกรณีศึกษา ไม่ได้มีหลักการการสั่งซื้อที่แน่นอน ดังนั้นข้อมูลที่น่ามาใช้เปรียบเทียบจะใช้จากค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่เกิดขึ้นในอดีต และเมื่อนำมาพิจารณาเพื่อหาต้นทุนรวมของสินค้าคงคลังพบว่า นโยบายเดิมของบริษัทมีต้นทุนรวมเท่ากับ 96,357,062 บาท

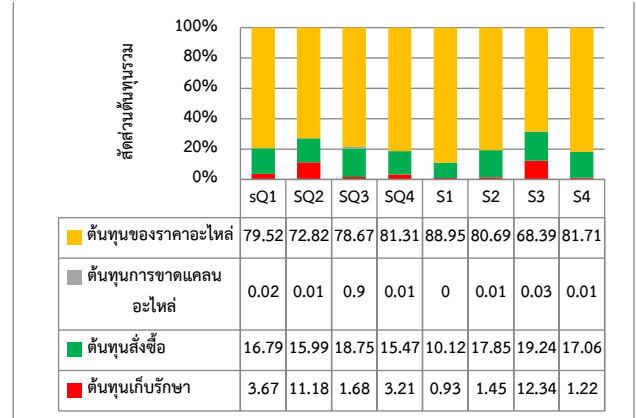
ดังนั้นเมื่อเปรียบเทียบผลที่ได้จากการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคมอนติคาร์โลของทั้ง 2 นโยบายและนโยบายแบบเดิมของโรงงานกรณีศึกษา โดยแสดงการเปรียบเทียบต้นทุนได้ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 เปรียบเทียบต้นทุนรวมของนโยบายและต้นทุนรวมที่ได้จากการจำลองสถานการณ์

4.10 การเปรียบเทียบข้อดี ข้อเสีย และการนำแต่ละนโยบายไปประยุกต์ใช้งาน

จากผลที่ได้จากแบบจำลองสถานการณ์พบว่า แต่ละนโยบายจะมีองค์ประกอบของต้นทุนรวม คือ ต้นทุนเก็บรักษา ต้นทุนการสั่งซื้อ ต้นทุนการขาดแคลนอะไหล่ และต้นทุนของราคาอะไหล่ ซึ่งในแต่ละนโยบายมีต้นทุนรวมที่ต่างกัน ดังรูปที่ 11 ดังนั้นคณะผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ข้อดี ข้อเสีย ในการนำแต่ละนโยบายไปประยุกต์ใช้งาน ซึ่งทั้งนโยบาย (s,Q) และนโยบาย (s,S) มีความคล้ายคลึงกันอย่างมาก



รูปที่ 11 สัดส่วนต้นทุนรวมแต่ละนโยบาย

ตารางที่ 12 การวิเคราะห์ข้อดี ข้อเสีย ของแต่ละนโยบายจากผลการจำลองสถานการณ์ด้วยเทคนิคมอนติคาร์โล

นโยบาย	รายละเอียด	ข้อดี	ข้อเสีย	การใช้งาน
(s,Q)	SQ1 ปริมาณการสั่งซื้อจากค่าสูงสุดในอดีต (Q) และจุดสั่งซื้อเพิ่มเป็น (s)	ต้นทุนการเก็บรักษา และต้นทุนการขาดแคลนอะไหล่ต่ำ	ต้นทุนการสั่งซื้อค่อนข้างสูง ดังนั้นจะต้องมีการควบคุมจำนวนครั้งในการสั่งซื้อ	เหมาะสำหรับช่วงเวลาที่ปริมาณความต้องการใช้อะไหล่คงที่ เนื่องจากต้นทุนการขาดแคลนอะไหล่เกิดขึ้นน้อย
	SQ2 ปริมาณการสั่งซื้อจากค่าเฉลี่ยในอดีต (Q) และจุดสั่งซื้อเพิ่มเป็น (s)	ต้นทุนการขาดแคลนอะไหล่ต่ำ	ต้นทุนการสั่งซื้อค่อนข้างสูง และมีต้นทุนการเก็บรักษาที่สูง ดังนั้นจะต้องมีการควบคุมจำนวนครั้งในการสั่งซื้อและจำนวนอะไหล่หมุนเวียน	เหมาะสำหรับช่วงเวลาที่มีความต้องการใช้อะไหล่ปริมาณน้อย เนื่องจากสามารถลดจำนวนครั้งในการสั่งซื้อได้
	SQ3 ปริมาณการสั่งซื้อจากค่าต่ำสุดในอดีต (Q) และจุดสั่งซื้อเพิ่มเป็น (s)	คล้ายกับนโยบาย SQ1	ต้นทุนการสั่งซื้อสูง เนื่องจากใช้ปริมาณการสั่งซื้อขั้นต่ำทำให้บางช่วงอะไหล่เกิดความขาดแคลนทำให้ต้องจ่ายต้นทุนที่สูงขึ้น	เหมาะสำหรับช่วงเวลาที่ความต้องการใช้อะไหล่ในปริมาณต่ำ ควรพิจารณาระดับการให้บริการ เพื่อช่วยลดปัญหาอะไหล่ขาดแคลน เป็นนโยบายที่ทำให้เกิดต้นทุนรวมสูงที่สุด
	SQ4 ปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัด (Q) และจุดสั่งซื้อเพิ่มเป็น (s)	คล้ายกับนโยบาย SQ1	คล้ายกับนโยบาย SQ1	คล้ายกับนโยบาย SQ1
(s,S)	S1 ระดับคงคลังสูงสุด S = ค่าสูงสุดในอดีต + จุดสั่งซื้อเพิ่ม (s)	ต้นทุนการเก็บรักษา ต้นทุนการสั่งซื้อต่ำ และต้นทุนการขาดแคลนอะไหล่เป็นศูนย์	จะต้องมีการควบคุมในส่วนของราคาของอะไหล่ เพราะมูลค่าการสั่งซื้ออะไหล่แต่ละครั้งอยู่ในระดับสูง	เหมาะสำหรับช่วงเวลาที่มีความต้องการใช้อะไหล่ในปริมาณสูง เป็นนโยบายที่เหมาะสมที่สุดกับอุตสาหกรรมปิโตรเคมี ที่เป็นกรณีศึกษา
	S2 ระดับคงคลังสูงสุด S = ค่าเฉลี่ยในอดีต + จุดสั่งซื้อเพิ่ม (s)	คล้ายกับนโยบาย SQ1	ต้นทุนการสั่งซื้อสูง จะต้องมีการควบคุมจำนวนครั้งในการสั่งซื้อ	เหมาะสำหรับช่วงเวลาที่มีความต้องการใช้อะไหล่ปริมาณน้อย เนื่องจากสามารถลดจำนวนครั้งในการสั่งซื้อได้
	S3 ระดับคงคลังสูงสุด S = ค่าต่ำสุดในอดีต + จุดสั่งซื้อเพิ่ม (s)	ต้นทุนการขาดแคลนอะไหล่ต่ำ	ต้นทุนการสั่งซื้อและต้นทุนการเก็บรักษาสูง จะต้องมีการควบคุมจำนวนครั้งในการสั่งซื้อและจำนวนอะไหล่หมุนเวียน	คล้ายกับนโยบาย S2
	S4 ระดับคงคลังสูงสุด S = ปริมาณการสั่งซื้อที่ประหยัด (EOQ) + จุดสั่งซื้อเพิ่ม (s)	คล้ายกับนโยบาย SQ1	คล้ายกับนโยบาย S2	คล้ายกับนโยบาย S2

5. สรุปผลและอภิปรายผลการวิจัย

จากผลการวิจัย สามารถนำปัญหาด้านการจัดการอะไหล่สำหรับงานบำรุงรักษาของอุตสาหกรรมปิโตรเลียมมาแก้ไขด้วยวิธีการจำลองสถานการณ์แบบมอนติคาร์โล โดยงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้นโยบายสินค้าคงคลัง 2 แบบ คือ (s,Q) และ (s,S) เพื่อหานโยบายที่ทำให้ต้นทุนรวมของสินค้าคงคลังต่ำที่สุด โดยผลที่ได้จากการประยุกต์ใช้เทคนิคการจำลองสถานการณ์แบบมอนติคาร์โล สามารถสรุปผลได้ดังนี้

5.1 สรุปผลการวิจัย

5.1.1 นโยบายปริมาณการสั่งซื้อที่เหมาะสมสำหรับการจัดการอะไหล่ของการบำรุงรักษาในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมคือการใช้นโยบาย (s,S) จะทำให้ต้นทุนรวมของสินค้าคงคลังต่ำที่สุด โดยใช้นโยบายที่ระดับอะไหล่คงคลังสูงสุด (S1) เป็นปริมาณการสั่งซื้อ (S) และจุดสั่งซื้อเพิ่ม (s) จะทำให้เกิดต้นทุนที่ต่ำที่สุดคือ 75,394,160 บาท

5.1.2 การหานโยบายปริมาณการสั่งซื้ออะไหล่ที่เหมาะสมด้วยเทคนิคการจำลองสถานการณ์แบบมอนติคาร์โลสามารถลดต้นทุนรวมที่เกิดขึ้นจากนโยบายเดิมของอุตสาหกรรมปิโตรเลียมที่มีต้นทุนรวมเท่ากับ 96,357,062 บาทต่อปี เหลือ 75,394,160 บาทต่อปี หรือลดลงร้อยละ 21.76

5.2 อภิปรายผลการวิจัย

5.2.1 จากการประยุกต์ใช้เทคนิคมอนติคาร์โลเพื่อวิเคราะห์หาปริมาณการสั่งซื้ออะไหล่ที่เหมาะสมสำหรับใช้ในโรงงานบำรุงรักษาในอุตสาหกรรมปิโตรเลียมพบว่า นโยบายที่ทำให้ต้นทุนรวมของสินค้าคงคลังต่ำที่สุดคือ (s,S) ทำให้ต้นทุนลดลง 20,962,902 บาทต่อปี ซึ่งคิดเป็น 80.34 เปอร์เซ็นต์ของมูลค่าอะไหล่ทั้งหมด ดังนั้นอีก 19.66 เปอร์เซ็นต์ที่เหลือของอะไหล่ในกลุ่ม B และ C จำนวน 39 และ 97 ชนิดตามลำดับ สามารถใช้เทคนิคมอนติคาร์โลในการหานโยบายปริมาณการสั่งซื้อที่เหมาะสมด้วยนโยบายที่แตกต่างกัน เช่น นโยบาย (R,Q) นโยบาย (R,s) ในอะไหล่กลุ่ม B และ Two Bin System สำหรับอะไหล่กลุ่ม C

5.2.2 จากการวิเคราะห์ข้อดี ข้อเสีย ที่ได้จากการใช้เทคนิคมอนติคาร์โลในการจำลองสถานการณ์ในตารางที่ 12 จะเห็นว่านโยบายทั้งหมดมีจุดเด่น จุดด้อยที่ต่างกัน จากความต้องการใช้อะไหล่ที่ไม่แน่นอนจึงเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้มีปัญหาในด้านของต้นทุน และค่าความคลาดเคลื่อนจากรูปที่ 9 สามารถช่วยตัดสินใจเลือกใช้แต่ละนโยบายของการจัดการอะไหล่สำหรับการบำรุงรักษาในอุตสาหกรรมได้อย่างเหมาะสม

6. ข้อเสนอแนะการวิจัย

จากขั้นตอนในการหานโยบายปริมาณการสั่งซื้อที่เหมาะสมนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับสินค้าคงคลังกลุ่มอื่นของโรงงานการศึกษาหรือโรงงานอื่นได้ เช่น วัตถุดิบ สินค้าสำเร็จรูป และสินค้าระหว่างกระบวนการ ในกรณีที่นโยบายการสั่งซื้อมีหลายทางเลือก สามารถนำวิธี Microsoft Excel Solver มาช่วยในการคำนวณหาค่าที่เหมาะสมที่สุด เพื่อลดเวลาในการจัดการและมีความสะดวกรวดเร็วกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการคำนวณแบบปกติที่ละนโยบาย

7. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัย พ.ศ. 2562 จากมหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี และ ขอขอบคุณ โรงงานการศึกษาอุตสาหกรรมปิโตรเลียม ที่ได้ให้ข้อมูลวิจัย ตลอดจนสาขาวิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่สนับสนุนเครื่องมือ อุปกรณ์ ในงานวิจัยครั้งนี้

8. เอกสารอ้างอิง

- Collado, J., Falco, A., Rodrigo, D., Sampedro, F., Consuelo, M., & Martinez, A. (2011). Application of Monte Carlo Simulation in Industrial Microbiological Exposure Assessment. In S. Mordechay (Ed.), *Applications of Monte Carlo Method in Science and Engineering* (pp. 83- 94) . InTech. <https://www.intechopen.com>
- Furness, P. (2011). Applications of Monte Carlo Simulation in marketing analytics. *Direct Data Digit Mark Pract*, 13(2), 132–147. <https://doi.org/10.1057/dddmp.2011.25>
- Gutiérrez, J., Sedeño-Noda, A., Colebrook, M., & Sicilia, J. (2003). A new characterization for the dynamic lot size problem with bounded inventory. *Computers & Operations Research*, 30(3) , 383– 395. [https://doi.org/10.1016/S0305-0548\(01\)00105-8](https://doi.org/10.1016/S0305-0548(01)00105-8)
- Han, H. J., Kim, B. K., & Park, B. G. (2018). Monte Carlo simulation of gamma- ray distribution around spent nuclear fuel assembly using a fiber- optic Cerenkov radiation sensor. *Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry*, 316(3), 1189– 1193. <https://doi.org/10.1007/s10967-018-5785-5>
- Ivanov, D., Tsipoulanis, A., & Schönberger, J. (2017). Inventory Management. In D. Ivanov, A. Tsipoulanis, & J. Schönberger (Eds.), *Global Supply Chain and Operations Management* (pp. 345– 388) . Springer International Publishing.

- Jintaketcharm, P. (2012). *The Application of Monte Carlo Technique for Optimizing order Quantity Policy: A Case Study in Light Bulb Industry* [Master's thesis]. Department of Industrial Engineering, Faculty of King Mongkut's University of Technology North Bangkok.
- Kampf, R., Hitka, M., & Caha, Z. (2016). The Application of ABC Analysis to Inventories in the Automatic Industry Utilizing the Cost Saving Effect. *Naše More*, 63(3), 120–125.
- Leepaitoon, S., & Bunterngrit, C. (2019). The Application of Monte Carlo Simulation for Inventory Management: A Case Study of a Retail Store. *International Journal of the Computer, the Internet and Management*, 27, 67–83.
- Lordahl, A., & Bookbinder, J. (1994). Order-statistic calculation, costs, and service in an (s, Q) inventory system. *Naval Research Logistics (NRL)*, 41, 81–97. [https://doi.org/10.1002/15206750\(199402\)41:1<81::AID-NAV3220410106>3.0.CO;2-9](https://doi.org/10.1002/15206750(199402)41:1<81::AID-NAV3220410106>3.0.CO;2-9)
- Malindzakova, M., & Zimon, D. (2019). Design Supply Cycle for Inventory Management. *TEM*, 8(3), 894–899. <https://doi.org/10.18421/TEM83-29>
- Medeiros, M. (2005). Monte Carlo simulation of polarizable systems: Early rejection scheme for improving the performance of adiabatic nuclear and electronic sampling Monte Carlo simulations. *Theoretical Chemistry Accounts*, 113(3), 178–182.
- Ohta, H., Hirota, T., & Rahim, A. (2007). Optimal production-inventory policy for make-to-order versus make-to-stock based on the M/Er/1 queueing model. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 33(1–2), 36–41.
- Ozkan, O., & Kilic, S. (2019). A Monte Carlo Simulation for Reliability Estimation of Logistics and Supply Chain Networks. *IFAC- PapersOnLine*, 52(13), 2080–2085. <https://doi.org/10.1016/j.ifacol.2019.11.512>
- Penpakkol, P., & Intarakumthorncha, T. (2018). Inventory Management of Spare Parts under Uncertain Demand: A Case Study of Particle Board Manufacturer. *The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, 21(1), 9–22.
- Phupha, V. (2014). An Application of Monte Carlo Simulation for Optimal Order Quantity: A Case Study of Raw Materials Procurement in Processed food Industry. *Kasetsart Engineering Journal*, 88, 41–56.
- Porras, E., & Dekker, R. (2008). An inventory control system for spare parts at a refinery: An empirical comparison of different re-order point methods. *European Journal of Operational Research*, 184, 101–132. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2006.11.008>
- Resteanu, C., Vaduva, I., & Andreica, M. (2008). Monte Carlo Simulation for Reliability Centered Maintenance Management. In I. Lirkov, S. Margenov, & J. Waniewski (Eds.), *Large-Scale Scientific Computing Vol. 4818* (pp. 148–156). Springer Berlin Heidelberg.
- Sedtakomkul, N. (2011). *The Applied Monte Carlo Simulation Method to Reorder Point and Order Quantity for Purchasing Under Uncertainties of Demand* [Master's thesis]. Department of Industrial Engineering, Faculty of King Mongkut's University of Technology North Bangkok. http://www.ijcim.th.org/past_editions/2019V27N2/27n2Page76.pdf
- Sorkhabi, R. (2017). Petroleum Industry. In R. Sorkhabi (Ed.), *Encyclopedia of Petroleum Geoscience* (pp. 1–2). Springer International Publishing.
- Tamura, M., Morizawa, K., & Nagasawa, H. (2010). Dynamic robust optimal reorder point with uncertain lead time and changeable demand distribution. *Journal of Zhejiang University-SCIENCE A*, 11(12), 938–945.
- Van Horenbeek, A., & Pintelon, L. (2015). A Joint Predictive Maintenance and Inventory Policy. In P. W. Tse, J. Mathew, K. Wong, R. Lam, & C. N. Ko (Eds.), *Engineering Asset Management— Systems, Professional Practices and Certification* (pp. 387–399). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09507-3_34
- Xu, N. (2017). Optimal inventory policy for a dynamic stochastic inventory problem with order revision. *Optimization Letters*, 11(7), 1489–1497.

Characterization of native and oxidized cassava starch prepared using a solution plasma process

Nattha Klanarong¹, Samorn Hirunpraditkoon¹, Nagahiro Saito², Isarawut Prasertsung^{3*}

¹Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Naresuan University, Phitsanulok 65000, Thailand.

²Department of Molecular Design and Engineering, Nagoya University, Chikusa-ku, Nagoya 464-8603, Japan.

³Department of Biotechnology, Faculty of Technology, Mahasarakham University, Mahasarakham 44150, Thailand.

*Corresponding author e-mail: isarawut_nui@hotmail.com

(Received: 25 February 2020, Revised: 16 April 2020, Accepted: 16 June 2020)

Abstract

In this work, a solution plasma process (SPP) was used to treat cassava starch suspensions in order to prepare oxidized cassava starch. The plasma treatment time and pulsed frequency were varied from 0 to 300 min and from 15 to 30 kHz, respectively. Oxidation levels were determined by carbonyl and carboxyl content which formed on the cassava starch granules after oxidation with SPP. The amylose content of untreated and plasma treated cassava starch was then determined. FT-IR was employed to analyze the chemical structural change of cassava starch plasma treated samples. Oxidation levels tended to increase as time and pulsed frequency of plasma treatment increased. The amylose contents decreased due to depolymerization of the cassava starch by oxidation with SPP. FT-IR spectra exhibited important peaks occurring on plasma treated cassava starch from 1737-1742 cm⁻¹, which were identified as carbonyl and carboxyl groups formed during the oxidation process.

Keywords: Solution plasma process, Oxidized cassava starch, Hydroxyl radical, Carbonyl, Carboxyl.

1. INTRODUCTION

Starch is typically the primary food ingredient in almost every country around the world where it is often used as thickener and gelling agent (Singh et al., 2017). It is a natural polysaccharide that can be found in various parts of plants like roots (sweet potatoes, cassava), tubers (cassava), stems (sago), grains (corn, rice, wheat, barley, oats and sorghum) and legume seeds (Gurunathan et al., 2015). The main chemicals composing starch are amylose and amylopectin. The structural characteristics of starch are mainly semi-crystalline and crystalline, which have been reported at between 20 to 45% of the total composition (Breuninger et al., 2009; Tadini, 2017).

Cassava starch or *Manihot esculenta* is used as rotational crop in Thailand. During 2017-2018, the average yield of cassava was 28.67 million tons. It has a high molecular weight and purity (Colivet & Carvalho, 2017). The physicochemical, thermal, and pasting properties of cassava starch are useful for various industries, such as the food, pharmaceutical, textile, paper and cosmetic industries. However, the main drawbacks of native cassava starch are its low solubility, thermal stability and physical properties (Jayakody, & Hoover, 2008). Therefore, modified starch has been employed to improve these properties for various applications (Kaur et al., 2012).

Oxidized starch is one modification method derived from the degradation of its polymer chain by an oxidation reaction. The chemical modification of starch is done by adding carbonyl and carboxyl groups on amylose chains. Oxidation of cassava starch enhances some of its properties by reducing retrogradation and viscosity, increasing thermal resistant and decreasing bacterial contamination (Thunwall et al., 2008). Oxidized starch is extensively used in many industries, especially the paper, textile, decoration, laundry and coating industries (Dias et al., 2011). An interesting application for oxidized starch is as a biodegradable film. Previously, many researchers have studied biodegradable films from oxidized starch. For example, Biduski et al. and Pauli et al. prepared biodegradable films from oxidized sorghum starch (Biduski et al., 2017) and cassava starch (Pauli et al., 2011) with sodium hypochlorite for biodegradable food packaging. They found that the tensile strength and solubility of oxidized starch were improved, thus demonstrating a potential for food packaging applications.

Based on available literature, there have been several methods to prepare oxidized starch, including chemical and physical methods. The chemical methods have widely used vinyl acetate (Colivet & Carvalho, 2017); acid hydrogen peroxide (Dias et al., 2011); sodium hypochlorite (Fonseca et al., 2015) and combinations of an acid and sodium hypochlorite (Biduski et al., 2017) to synthesize modified starch. This oxidation is a method that requires a short treatment time, however,

chemical contamination of the starch may occur which renders it unsuitable for use in the food and pharmaceutical industries. Therefore, starch modification is presently performed using physical methods such as heat-moisture treatment (Rosa Zavareze et al., 2012); ozone treatment (Castanha et al., 2017) and microwave treatment (Kaasova et al., 2002) to avoid the above contamination from chemical residues (Tomasik & Zaranyika, 1995). However, all of these physical processes require high temperatures which induce deformation of starch granules (Ashogbon, 2018).

Takai (2008) developed a new physical process and called it the solution plasma process (SPP). Previously, the solution plasma process has been used in many applications such as the preparation of low molecular weight chitosan (Tantiapap et al., 2015), conversion of cellulose to reducing sugar (Prasertsung et al., 2017) and preparation of reducing sugar from cassava starch waste (Prasertsung et al., 2019). This SPP method has been found to produce the hydroxyl radical ($\text{OH}\cdot$). The hydroxyl radical induced oxidation reaction has introduced new functional groups in the starch granular structure, resulting in improved characteristics of starch granules. In addition, SPP does not require strong chemical and high temperatures. Therefore, the objective of this study was the novel modification of cassava starch using the SPP process. The influences of pulse frequency and plasma treatment time on the properties of starch were explored and reported.

2. MATERIALS AND METHODS

2.1 Materials

High purity cassava starch was purchased commercially from a market. It was produced by the Thai Flour Industry Co., Ltd., Thailand. In order to preserve the properties of cassava starch, it was kept in a desiccator at 50% relative humidity and 30 °C. All chemicals used in the work were of analytical grades.

2.2 Solution plasma experiment

The experimental setup of the solution plasma process was from Prasertsung et al. (2019) as shown in Figure 1. The equipment consisted of a glass reactor with 1 mm-diameter tungsten electrodes (99.95%, CaHc Co., Ltd., Thailand) installed on both sides of the reactor. The distance between the electrodes was adjusted to 0.2 mm. Before plasma treatment, the glass reactor was connected to a DC pulsed power supply. The cassava starch colloid at a concentration of 3% (w/v) was poured into the reactor. The colloid was then oxidized using the SPP at a voltage of 16 kV and a pulse width of 3 μs . The plasma treatment time and applied pulsed frequency were varied from 0-300 minutes and 20-30 kHz, respectively. In order to prevent gelatinization of starch, the mixture temperature was controlled at 45 °C using a coolant.

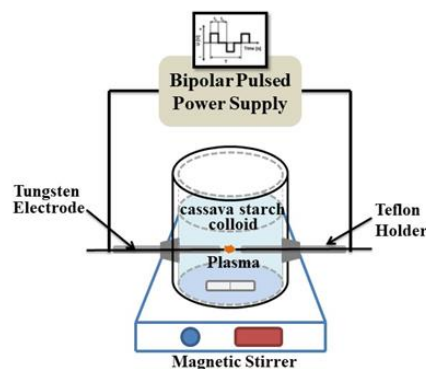


Figure 1 Experimental SPP setup

2.3 Characterization of oxidized cassava starch

2.3.1 Determination of hydroxyl radicals content

During the SPP, highly active species, especially hydroxyl radicals, were produced. In order to determine the hydroxyl radical production during plasma treatment, modified salicylic acid (SA) method was used (Prasertsung et al., 2017). In brief, 1 mL of SA (1×10^{-3} mol/L) was mixed with 1 mL of treated and untreated plasma samples. These suspensions were centrifuged for 8 min and the filtrates were further characterized for hydroxyl radicals using UV-vis Spectrophotometer (Shimadzu UV-9100, Japan) at 303 nm. The calibration curve was performed using SA as a standard reagent. Therefore, the concentration of hydroxyl radical could be calculated.

2.3.2 Carbonyl and carboxyl contents

Carbonyl and carboxyl contents can indicate the degree of depolymerization by oxidation within the SPP. Therefore, carbonyl content was determined according to Dias et al. (2011). The oxidized cassava starch was completely gelatinized at 95 °C for 30 min and then cooled to 40 °C. Next, the solution pH was adjusted to 3.2 using 0.1 mol/L HCl solution and 15 mL of hydroxylamine chloride was added (prepared by dissolving 25 g of reagent grade hydroxylamine chloride in water, adding 100 mL of 0.5 mol/L NaOH and sufficient distilled water to provide a final volume 500 mL). Finally, the mixed solution was kept in an oven at 40 °C for 4 h and then rapidly titrated with 0.1 M of HCl until a pH of 3.2 was reached. The carbonyl content was calculated using Eq. (1).

$$CO = ((V_b - V_s) \times M \times 0.028 \times 100) / W \quad (1)$$

where V_b is the volume of HCl used for the blank (mL), V_s is the volume of HCl required for the sample (mL), M is the molarity of HCl and W is the sample weight (dry basis).

The carboxyl content was determined according to Biduski et al. (2017). The suspension was prepared by dispersing 3 g of oxidized cassava starch in 25 mL of HCl 0.1 mol/L and stirring for 1 h. Then, the oxidized cassava starch suspension was vacuum filtered using a Buchner funnel and washed with 400 mL of distilled

water when the oxidized cassava starch was transferred to a beaker. Then, 300 mL of distilled water was added and heated to 95 °C for 30 min under continuous agitation. The hot oxidized cassava starch solution was titrated with 0.01 mol/L of NaOH with constant stirring until a pH of 8.2 was reached. The native cassava starch was used as a blank test. The carboxyl content was calculated using Eq. (2).

$$COOH = ((V_s - V_b) \times M \times 0.045 \times 100) / W \quad (2)$$

where V_s is the volume of NaOH required for the sample (mL), V_b is the volume of NaOH used to test the blank (mL), M is the molarity of NaOH and W is the sample weight (dry basis).

2.3.3 Amylose content

The depolymerization of oxidized cassava starch granules was investigated to study the decrease in amylose content. The determination of amylose content of oxidized cassava starch using colorimetric method was conducted according to McGrance et al. (1998). 20 mg of oxidized cassava starch was mixed with 8 mL of dimethyl sulfoxide 90% (DMSO) and then heated to a temperature of 95 °C for 15 min. The mixed solution was then cooled to 40 °C and the volume adjusted to 25 mL. The sample solution was mixed with 5 mL of I_2/KI (2.5/6.5 mmol/L) and adjusted to a final volume of 50 mL. The mixed solution was kept for 15 min and then amylose content was determined using a UV-vis Spectrophotometer (Shimadzu UV-9100, Japan) at 600 nm. The calibration curve was performed using pure amylose from potato (SIGMA-ALDRICH Co., USA) as a standard reagent. The amylose content was then calculated.

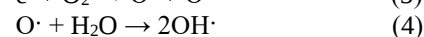
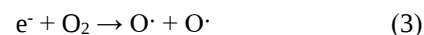
2.3.4 Fourier Transform Infrared Spectrometer

FT-IR (Digilab, FTS 7000 Series, USA) was used to characterize the chemical compositions of native and oxidized cassava starch powder. The FT-IR spectra of the powder samples prepared with KBr were obtained over the range of 4000–400 cm^{-1} at a resolution of 4 cm^{-1} .

3. RESULTS AND DISCUSSION

The carbonyl and carboxyl contents of oxidized cassava starch are shown in Figure 2. The results showed that carbonyl and carboxyl groups in oxidized starch after plasma treatment increased with increasing plasma treatment time and pulse frequency. This revealed that

the oxidation reaction of cassava starch occurred during plasma treatment. The number of carbonyl and carboxyl groups in starch can be associated with depolymerization by oxidation, which increases the amount of carbon available for the reaction (Biduski et al., 2017). Hoover (2000) mentioned that higher levels of depolymerization in starch depended on different factors such as the oxidizing agent, the reaction time as well as the botanical origin of starch and most of the depolymerization occurs in the amylose fraction of the starch. During the oxidation reaction, the hydroxyl groups of glucose have oxidized to the carbonyl groups and thereafter to carboxyl groups (Zamudio-Flores et al., 2006). However, during the oxidation of cassava starch by SPP, hydroxyl radicals have been generated. These hydroxyl radicals have been considered as reactive oxygen species (ROS) and immediately reacted with the surrounding molecules (Halliwell, 1999)]. The generation of hydroxyl radicals was previously reported by Baroch et al. (2008). The generation of hydroxyl radicals during the plasma treatment has been caused by the reaction of oxygen radical with water as follows (Prasertsung et al., 2019):



The production of hydroxyl radicals in SPP have been effective in depolymerization of the 1,4-glycosidic linkage and hydrogen bonds of the hydroxyl group within the starch structure. Carbonyl and carboxyl groups have been formed (Prasertsung et al., 2019; Vanier et al., 2017). The mechanism of carbonyl and carboxyl groups formed during plasma treatment 1 to 4 is shown in Figure 3. The production of the hydroxyl radical in the system increases with increasing plasma treatment time, as shown in Figure 4. This may have enhanced the formation of carbonyl and carboxyl groups, as shown in Figure 5. In addition, an increase in pulsed frequency improved oxidation levels of oxidized cassava starch. Malik et al. (2001) reported that increasing of frequencies increased the average energy input in the system, which may have accelerated an inelastic collision of high energy electrons and the surrounding molecules, resulting in a high dissociation of the target molecules. This may have increased the amount of hydroxyl radicals in the plasma system, resulting in high amounts of carbonyl and carboxyl groups.

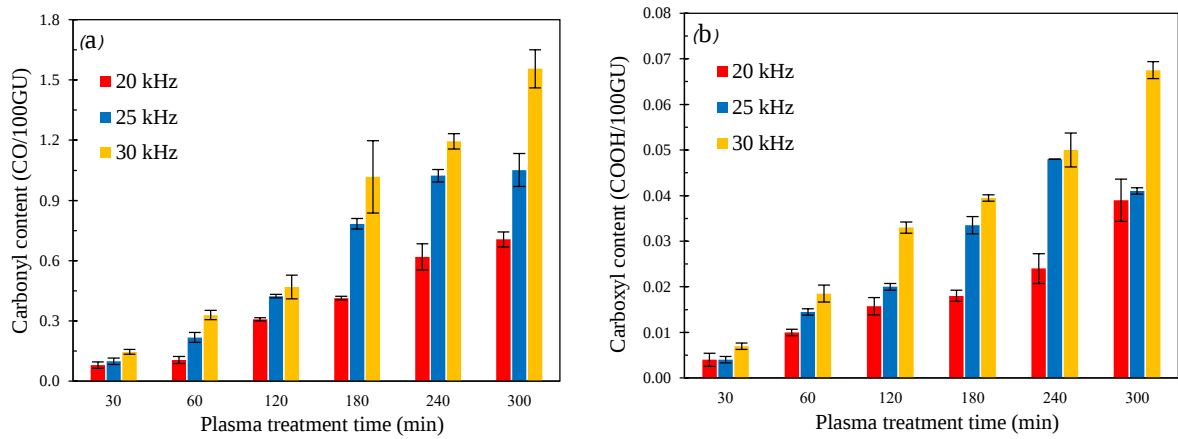


Figure 2 Formation of (a) carbonyl content and (b) carboxyl content of oxidized cassava starch.

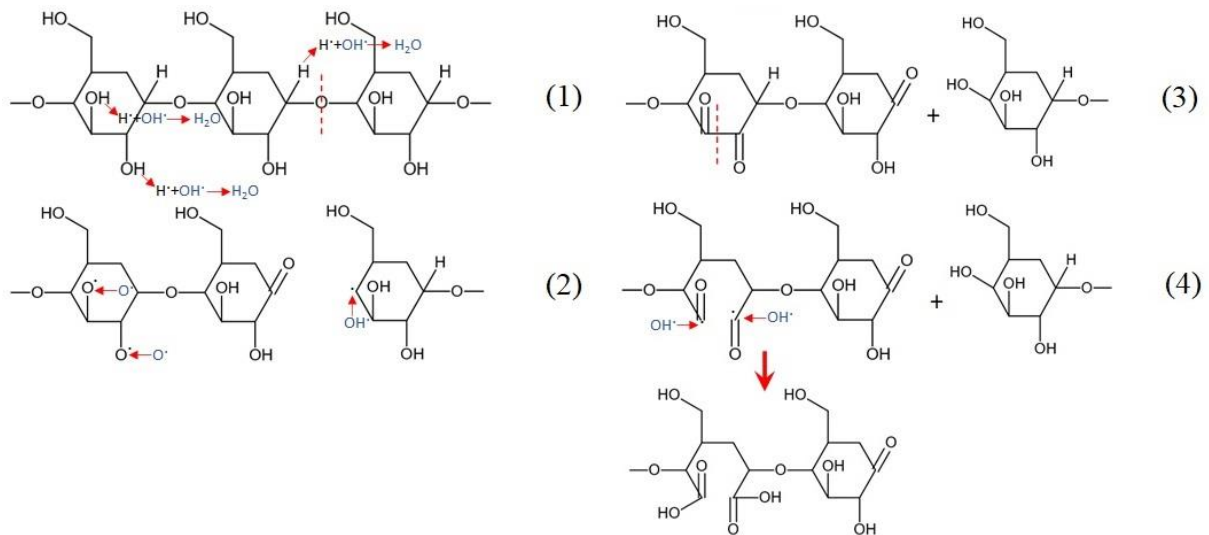


Figure 3 Mechanism of oxidized cassava starch by SPP.

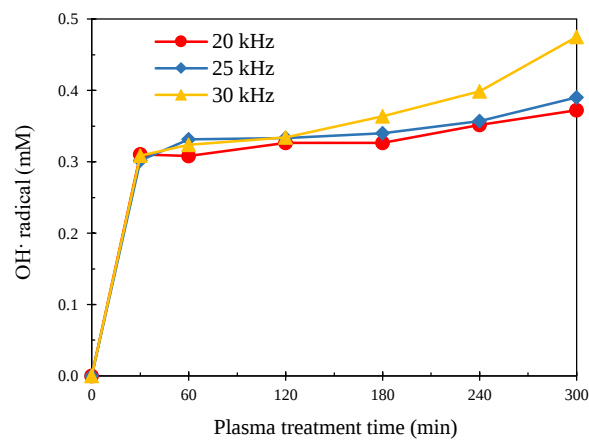


Figure 4 Hydroxyl radical concentration of plasma treated oxidized cassava starch colloid.

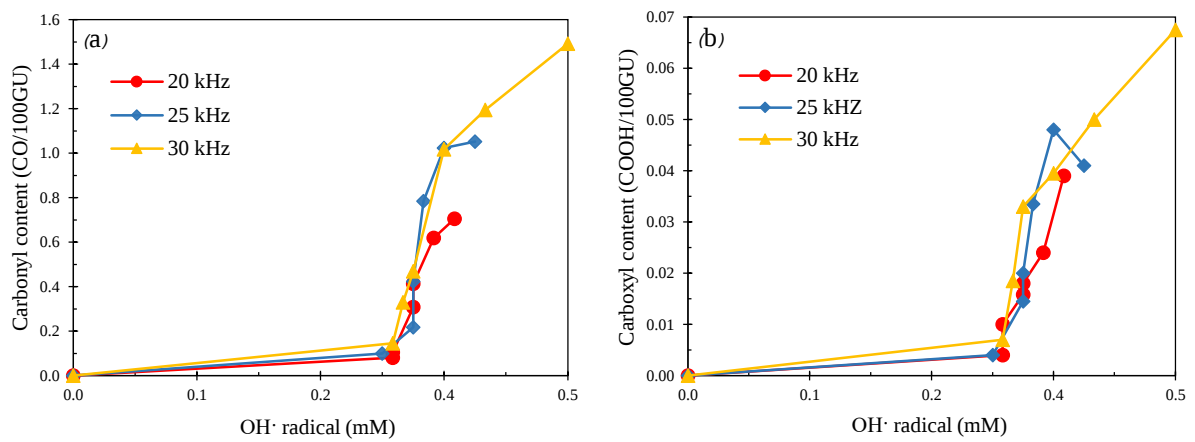


Figure 5 Formation of hydroxyl radical (a) carbonyl content and (b) carboxyl content.

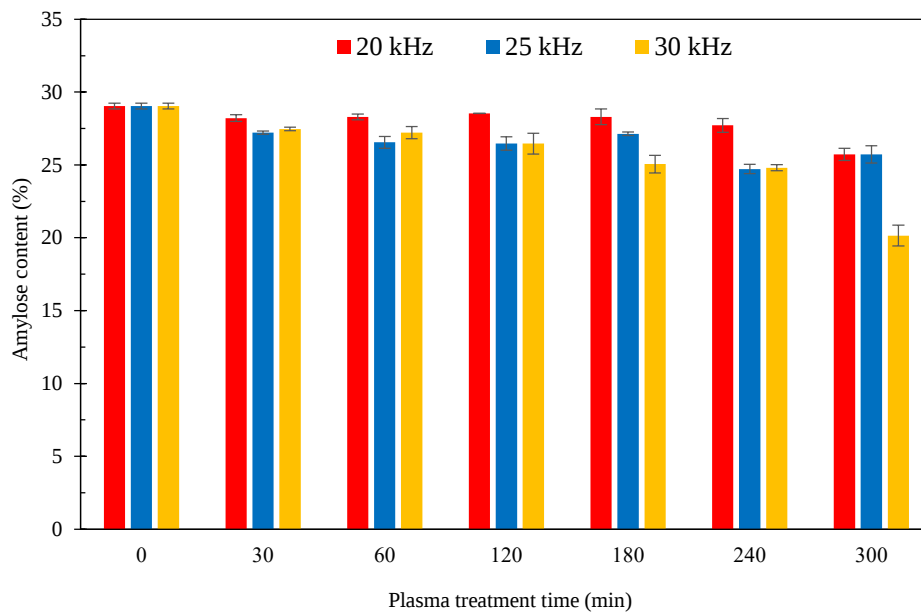


Figure 6 Amylose content of untreated and plasma treated cassava starch.

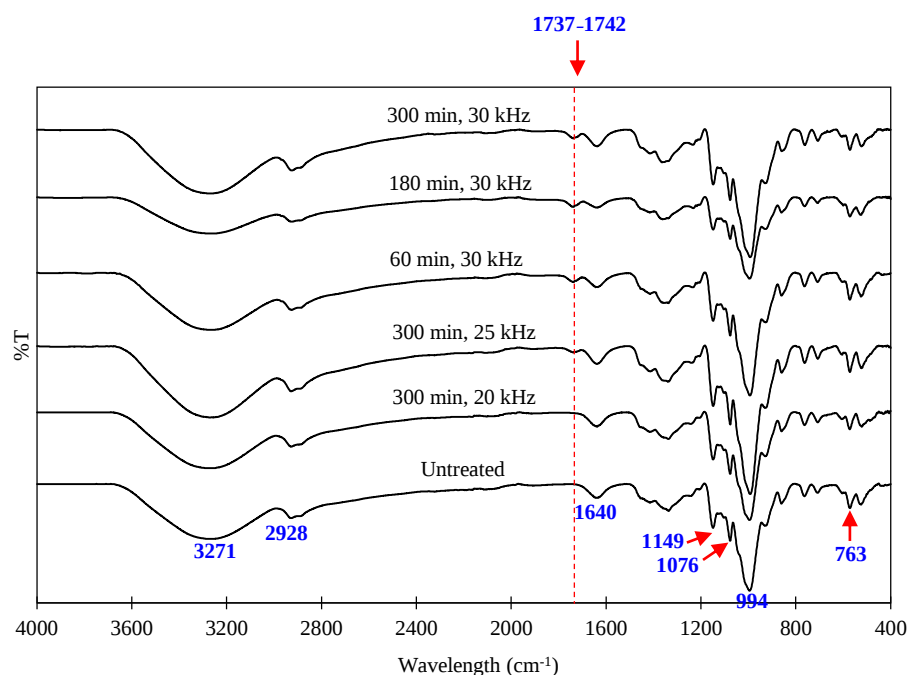


Figure 7 FT-IR spectra of untreated and plasma treated cassava starch.

The amylose content of starch is shown in Figure 6. The amylose content of oxidized cassava starch decreased with increasing plasma treatment time and pulse frequency. The reduction of amylose content indicated depolymerization by the oxidation reaction in the starch. The starch granules consist of amylose and amylopectin which represented amorphous and crystal regions, respectively (Breuninger et al., 2009). Chávez-Murillo et al. (2008) mentioned that depolymerization of starch components (amylose and amylopectin) during the oxidation process mainly occurred in the amylose component. During depolymerization, the starch chain was degraded to become shortened and unable to form amylose-iodine complexes. Amylose-iodine complexes are formed only when the chain length is greater than 100 glucose units (Kuakpetoon & Wang, 2001). Therefore, molecules were not detected as amylose molecules.

To confirm the results described above, FT-IR was employed to analyze the chemical structural change of oxidized cassava starch prepared by SPP. The FT-IR spectra of untreated and plasma treated samples are shown in Figure 7. The peaks of untreated sample displayed at 3271 cm⁻¹ and 2928 cm⁻¹ corresponded to O-H and C-H stretching, respectively (Prachayawarakorn & Tamseekhram, 2019). The peak at 1634 cm⁻¹ and 1149 cm⁻¹ were defined as the O-H bending of water and asymmetric stretching of the C-O-C glycosidic linkage, respectively (Mina et al., 2011; Klein et al., 2014). The other apparent peaks at 1076 cm⁻¹, 994 cm⁻¹ and 763 cm⁻¹ were identified as C-O-H vibration, C-O stretching and C-H₂ rocking, respectively (Bower & Maddams, 1992). After plasma treatment, the new peak at 1737-1742 cm⁻¹ corresponded to carbonyl and carboxyl groups. This

confirmed that the SPP treatment could generate the oxidation reaction of cassava starch.

4. CONCLUSIONS

The carbonyl and carboxyl groups of oxidized cassava starch prepared by SPP compared to the untreated cassava starch sample were found to be increased. An increase of plasma treatment time and pulsed frequency in the plasma process increased the amount of hydroxyl radicals, which enhanced the depolymerization reaction of starch. The results also showed that the amylose content of oxidized cassava starch was reduced. The chemical compositions of oxidized cassava starch granules prepared by SPP displayed an important peak at 1737-1742 cm⁻¹, which could be identified as the formation of carbonyl and carboxyl groups.

5. ACKNOWLEDGEMENT

The solution plasma equipment was supported from EcoTopia Science Institute and Technology and Department of Materials Engineering, Nagoya University. This research was funded by the Faculty of Engineering, Naresuan University, Thailand. Editing was performed by Thomas Elliott at the Graduate school, Naresuan University, Thailand.

6. REFERENCE

Ashogbon, A. O. (2018). Current Research Addressing Physical Modification of Starch from Various Botanical Sources. *Global Nutrition and Dietetics*, 1(1), 1-7.

- Baroch, P., Anita, V., Saito, N., & Takai, O. (2008). Bipolar pulsed electrical discharge for decomposition of organic compounds in water. *Journal of Electrostatics*, 66(5-6), 294-299.
- Biduski, B., Silva, F. T., Silva, W. M., El Halal, S. L. D. M., Pinto, V. Z., Dias, A. R. G., & Rosa Zavareze, E. (2017). Impact of acid and oxidative modifications, single or dual, of sorghum starch on biodegradable films. *Food Chemistry*, 214, 53-60.
- Bower, D. I., & Maddams, W. F. (1992). *The vibrational spectroscopy of polymers*. Cambridge University Press.
- Breuninger, W. F., Piyachomkwan, K., & Sriroth, K. (2009). *Tapioca/cassava starch: production and use*. Academic Press.
- Castanha, N., Matta Junior, M. D., & Augusto, P. E. D. (2017). Potato starch modification using the ozone technology. *Food Hydrocolloids*, 66, 343-356.
- Chávez-Murillo, C. E., Wang, Y. J., & Bello-Pérez, L. A. (2008). Morphological, physicochemical and structural characteristics of oxidized barley and corn starches. *Starch-Stärke*, 60(11), 634-645.
- Colivet, J., & Carvalho, R. A. (2017). Hydrophilicity and physicochemical properties of chemically modified cassava starch films. *Industrial Crops and Products*, 95, 599-607.
- Dias, A. R. G., Rosa Zavareze, E., Helbig, E., Moura, F. A., Vargas, C. G., & Ciacco, C. F. (2011). Oxidation of fermented cassava starch using hydrogen peroxide. *Carbohydrate Polymers*, 86(1), 185-191.
- Fonseca, L. M., Gonçalves, J. R., El Halal, S. L. M., Pinto, V. Z., Dias, A. R. G., Jacques, A. C., & Rosa Zavareze, E. (2015). Oxidation of potato starch with different sodium hypochlorite concentrations and its effect on biodegradable films. *LWT-Food Science and Technology*, 60(2), 714-720.
- Gurunathan, T., Mohanty, S., & Nayak, S. K. (2015). A review of the recent developments in biocomposites based on natural fibres and their application perspectives. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 77, 1-25.
- Halliwell, B. (1999). Establishing the significance and optimal intake of dietary antioxidants: the biomarker concept. *Nutrition Reviews*, 57(4), 104-113.
- Hoover, R. (2000). Acid-treated starches. *Food Reviews International*, 16(3), 369-392.
- Jayakody, L., & Hoover, R. (2008). Effect of annealing on the molecular structure and physicochemical properties of starches from different botanical origins-A review. *Carbohydrate Polymers*, 74(3), 691-703.
- Kaasova, J., Hubackova, B., Kadlec, P., Prihoda, J., & Bubnik, Z. (2002). Chemical and biochemical changes during microwave treatment of wheat. *Czech Journal of Food Sciences*, 20(2), 74-78.
- Kaur, B., Ariffin, F., Bhat, R., & Karim, A. A. (2012). Progress in starch modification in the last decade. *Food Hydrocolloids*, 26(2), 398-404.
- Klein, B., Vanier, N. L., Moomand, K., Pinto, V. Z., Colussi, R., Rosa Zavareze, E., & Dias, A. R. G. (2014). Ozone oxidation of cassava starch in aqueous solution at different pH. *Food Chemistry*, 155, 167-173.
- Kuakpetoon, D., & Wang, Y. J. (2001). Characterization of different starches oxidized by hypochlorite. *Starch-Stärke*, 53(5), 211-218.
- Malik, M. A., Ghaffar, A., & Malik, S. A. (2001). Water purification by electrical discharges. *Plasma Sources Science and Technology*, 10(1), 82-91.
- McGrance, S. J., Cornell, H. J., & Rix, C. J. (1998). A simple and rapid colorimetric method for the determination of amylose in starch products. *Starch-Stärke*, 50(4), 158-163.
- Mina, J., Valadez-Gonzalez, A., Herrera-Franco, P., Zuluaga, F., & Delvasto, S. (2011). Physicochemical characterization of natural and acetylated thermoplastic cassava starch. *Medellin*, 78(166), 174-182.
- Pauli, R. B., Quast, L. B., Demiate, I. M., & Sakanaka, L. S. (2011). Production and characterization of oxidized cassava starch (Manihot esculenta Crantz) biodegradable films. *Starch-Stärke*, 63(10), 595-603.
- Prachayawarakorn, J., & Tamseekhram, J. (2019). Chemical modification of biodegradable cassava starch films by natural mono-, di- and tri-carboxylic acids. *Songklanakarin Journal of Science & Technology*, 41(2), 355-362.
- Prasertsung, I., Aroonraj, K., Kamwilaisak, K., Saito, N., & Damrongsakkul, S. (2019). Production of reducing sugar from cassava starch waste (CSW) using solution plasma process (SPP). *Carbohydrate Polymers*, 205, 472-479.
- Prasertsung, I., Chutinate, P., Watthanaphanit, A., Saito, N., & Damrongsakkul, S. (2017). Conversion of cellulose into reducing sugar by solution plasma process (SPP). *Carbohydrate Polymers*, 172, 230-236.
- Rosa Zavareze, E., Pinto, V. Z., Klein, B., El Halal, S. L. M., Elias, M. C., Prentice-Hernández, C., & Dias, A. R. G. (2012). Development of oxidized and heat-moisture treated potato starch film. *Food Chemistry*, 132(1), 344-350.
- Singh, A., Geveke, D. J., & Yadav, M. P. (2017). Improvement of rheological, thermal and functional properties of tapioca starch by using gum arabic. *Lebensmittel-Wissenschaft & Technologie*, 80, 155-162.
- Tadini, C. C. (2017). *Bio-based materials from traditional and nonconventional native and modified starches*. Academic Press.
- Takai, O. (2008). Solution plasma processing (SPP). *Pure and Applied Chemistry*, 80(9), 2003-2011.
- Tantiapap, T., Singasawat, Y., Narongsil, N., Damrongsakkul, S., Saito, N., & Prasertsung, I. (2015). Influences of solution plasma conditions on degradation rate and properties of chitosan. *Innovative Food Science & Emerging Technologies*, 32, 116-120.
- Thunwall, M., Kuthanova, V., Boldizar, A., & Rigdahl, M. (2008). Film blowing of thermoplastic starch. *Carbohydrate Polymers*, 71(4), 583-590.
- Tomasik, P., & Zaranyika, M. F. (1995). Nonconventional methods of modification of starch. *Advances in Carbohydrate Chemistry and Biochemistry*, 51, 243-318.
- Vanier, N. L., El Halal, S. L. M., Dias, A. R. G., & Rosa Zavareze, E. (2017). Molecular structure, functionality and applications of oxidized starches: A review. *Food Chemistry*, 221, 1546-1559.
- Zamudio-Flores, P. B., Vargas-Torres, A., PérezGonzález, J., Bosquez-Molina, E., & Bello-Pérez, L. A. (2006). Films prepared with oxidized banana starch: mechanical and barrier properties. *Starch-Stärke*, 58(6), 274-282.

7. BIOGRAPHIES



Nattha Klanarong is Master's degree students in Chemical Engineering Program, Naresuan University Graduate School, Thailand.



Assoc. Prof. Samorn Hirunpraditkoon, Ph.D., is a lecturer in Chemical Engineering Program, Faculty of Engineering at Naresuan University, Thailand.



Asst. Prof. Isarawut Prasertsung, D.Eng., is a lecturer in Department of Biotechnology, Faculty of Technology at Mahasarakam University, Thailand.



Prof. Nagahiro Saito, Ph.D., is a developer solution plasma process. Currently works at the Department of Chemical Systems Engineering, Nagoya University, Japan.

อดีต ปัจจุบัน และอนาคตของปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่พิจารณาประเด็นด้านสิ่งแวดล้อม Green Vehicle Routing Problem: Past, Present and Future

ธัญพร สมใส¹ ภูพงษ์ พงษ์เจริญ^{2*}
Thanatporn Somsai¹ Pupong Pongcharoen^{2*}

¹หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการจัดการ

²หน่วยวิจัยด้านการวิจัยการดำเนินงานและการประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม
ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

¹Master of Engineering Program in Engineering Management

²Director of Centre of Operations Research and Industrial Applications (CORIA)
Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Naresuan University

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

(Received: 2 April 2020, Revised: 27 May 2020, Accepted: 12 June 2020)

บทคัดย่อ

ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่พิจารณาประเด็นด้านสิ่งแวดล้อม (Green vehicle routing problem: GVRP) เป็นปัญหาที่ถูกพัฒนาต่อยอดจากปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะ (Vehicle routing problem: VRP) ซึ่งเน้นการพิจารณาผลกระทบทางเศรษฐกิจเป็นหลัก ปัญหา GVRP จึงเพิ่มความสำคัญในการพิจารณาผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมร่วมด้วย เพราะสถานการณ์สิ่งแวดล้อมในปัจจุบันที่เกิดการเปลี่ยนแปลงไปของอุณหภูมิโลก บทความวิจัยนี้จึงได้ทำการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับปัญหา GVRP โดยสืบค้นจากฐานข้อมูลวิชาการในระดับนานาชาติ ได้แก่ ฐานข้อมูล Scopus, ISI Web of Science และ IEEE Xplore โดยเริ่มสืบค้นตั้งแต่เริ่มมีการตีพิมพ์บทความที่เกี่ยวข้องกับปัญหา GVRP จนกระทั่งถึงปี พ.ศ. 2562 หลังจากทำการคัดกรองและตรวจสอบความซ้ำซ้อนของบทความจากทั้งสามฐานข้อมูล พบบทความที่เกี่ยวข้องทั้งสิ้น 171 ฉบับ แล้วจึงนำมาแจกแจงลงในตารางสรุป เพื่อวิเคราะห์และจำแนกลักษณะของปัญหา ในประเด็นพิจารณาด้านสิ่งแวดล้อม ด้านมลพิษที่เกิดขึ้น และด้านโลจิสติกส์แบบย้อนกลับ ผลลัพธ์ที่ได้จากการทบทวนวรรณกรรม คือ แนวทางการวิจัยในอนาคตสำหรับปัญหา GVRP ควรมุ่งเน้นไปที่การพิจารณาชนิดของยานพาหนะ โหมดการขนส่ง และประเด็นต่าง ๆ ซึ่งถูกกล่าวถึงในหัวข้อการคาดการณ์ช่วงอนาคตของปัญหา GVRP

คำสำคัญ: ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะ ประเด็นด้านสิ่งแวดล้อม โลจิสติกส์เพื่อรักษาสิ่งแวดล้อม การทบทวนวรรณกรรม

Abstract

Green vehicle routing problem (GVRP) is a branch of traditional vehicle routing problems, which usually focus on the economic impact. Due to the environmental situation, the GVRP additionally plays more attention on both economic impacts and environmental issues. This review paper presents a literature survey on the topic of the GVRP by searching research articles indexed by three well-known international academic databases (including Scopus, ISI Web of Science and IEEE Xplore): After screening the duplications of the articles indexed by those three databases, only 171 articles were adopted and summarised into tables for classification into 3 characteristics: Green-VRP, Pollution Routing and VRP in Reverse Logistics. The result of literature review has found the future research direction for this problem should focus on the vehicle types, mode of transportation and other perspective of this research area is described in the future research direction section.

Keywords: Green vehicle routing problem, Environmental issues, Green logistics, Literature review

1. บทนำ

ปัจจุบันภาคอุตสาหกรรมเติบโตไปอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้เศรษฐกิจเกิดความคล่องตัวมากขึ้น แต่ในขณะเดียวกันการเติบโตของภาคอุตสาหกรรมส่งผลกระทบเชิงลบที่ก่อให้เกิดภัยคุกคามต่อสิ่งแวดล้อม (Environmental disasters) (Waidyathilaka et al., 2019) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของโลก หรือภาวะโลกร้อน (Global warming) ซึ่งเป็นสาเหตุของภัยพิบัติทางธรรมชาติ เช่น การเกิดอัคคีภัย การเกิดอุทกภัย หรือแม้กระทั่งน้ำแข็งขั้วโลกละลาย ด้วยเหตุนี้ทางรัฐบาลทั่วโลกจึงผลักดันให้องค์กรต่าง ๆ ดำเนินกิจการให้เป็นไปอย่างยั่งยืน (Sustainable) และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม (Eco-friendly) โดยกิจกรรม หรือกระบวนการที่เป็นที่ยอมรับสำหรับการดำเนินธุรกิจให้เป็นไปอย่างยั่งยืน ได้แก่ การจัดการของเสียในกระบวนการ (Waste management) การลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกของโรงงาน (Greenhouse gas reduction) หรือการจัดการโลจิสติกส์เพื่อรักษาสิ่งแวดล้อม (Green logistics) ในห่วงโซ่อุปทาน (Supply chain)

โลจิสติกส์เพื่อรักษาสิ่งแวดล้อม เป็นประเด็นที่เกี่ยวข้องกับการผลิต และการกระจายสินค้าในห่วงโซ่อุปทานด้วยวิธีการที่ยั่งยืน หมายถึง การคำนึงถึงปัจจัยทางด้านสังคม ปัจจัยทางด้านสิ่งแวดล้อม และปัจจัยทางด้านเศรษฐกิจอย่างเท่าเทียมกัน (Sbihi & Eglese, 2007) การคำนึงถึงปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อมได้รับความสนใจจากภาครัฐและภาคเอกชน เนื่องจากกลยุทธ์สำหรับการผลิตและการขนส่งสินค้าในปัจจุบันยังไม่เป็นไปในทิศทางที่ยั่งยืนในระยะยาว (Sbihi & Eglese, 2007; Lin et al., 2014) และการขนส่งถือเป็นสาเหตุหลักที่ก่อให้เกิดผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อม ยกตัวอย่างเช่น มลพิษ เสียงรบกวน หรือความแออัด [4] นอกเหนือจากการให้ความสำคัญกับผลกระทบทางด้านเศรษฐกิจ เช่น ต้นทุนที่เกิดขึ้นจากกิจกรรมต่าง ๆ ซึ่งเป็นสิ่งที่สถานประกอบการให้ความสำคัญเป็นปกติ อย่างไรก็ตาม การกำหนดกลยุทธ์สำหรับการพัฒนาการดำเนินงานให้เป็นไปอย่างยั่งยืน ผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อม และสังคมได้ถูกนำมาพิจารณาด้วย เพื่อมุ่งเน้นการเปลี่ยนแปลงรูปแบบการขนส่งที่ยั่งยืน (Sbihi & Eglese, 2007; Affi et al., 2018)

ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะ (Vehicle routing problem) ได้ถูกพัฒนาต่อยอดโดยการนำผลกระทบทางด้านสิ่งแวดล้อมเข้ามาร่วมพิจารณา ซึ่งเกิดเป็นปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่พิจารณาเรื่องสิ่งแวดล้อม (Green vehicle routing problem) (Waidyathilaka et al., 2019) และเนื่องจากสถานการณ์ปัจจุบันของโลกที่ประเด็นด้านสิ่งแวดล้อมนั้น ถือเป็นประเด็นที่ทุกภาคส่วนให้ความสำคัญ ดังนั้น การจัดเส้นทางยานพาหนะที่คำนึงถึงสิ่งแวดล้อมจึงเป็นปัญหาที่ได้รับ

ความนิยมจากนักวิจัยเป็นอย่างยิ่ง แต่อย่างไรก็ตาม พบว่า ที่ผ่านมามีบทความที่ได้ทำการทบทวนวรรณกรรมในกลุ่มของปัญหา GVRP เพียง 1 ฉบับ โดย Lin et al. (2014) ซึ่งถูกตีพิมพ์ในปี พ.ศ. 2557 ทั้งนี้เป็นบทความที่ครอบคลุมวรรณกรรมที่ถูกตีพิมพ์จนกระทั่งถึงปี พ.ศ. 2555 เท่านั้น อย่างไรก็ตาม จากการสืบค้นฐานข้อมูลวิชาการในระดับนานาชาติ พบว่า ได้พบบทความที่เกี่ยวข้องกับ GVRP เพิ่มขึ้นมากมายจนถึงปัจจุบัน

ดังนั้นบทความวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับปัญหา GVRP ให้เป็นปัจจุบัน โดยเพิ่มช่วงเวลาของการศึกษา จนกระทั่งถึงปี พ.ศ. 2562 เพื่อเป็นประโยชน์ต่อนักวิจัยที่มีความสนใจในปัญหาดังกล่าว โดยพิจารณาเป็นแนวทางในการกำหนดหัวข้อของการทำวิจัยในอนาคต และอาจเป็นประโยชน์ต่อผู้ประกอบการ โดยเฉพาะอย่างยิ่ง ผู้ที่ทำธุรกิจเกี่ยวกับอุตสาหกรรมขนส่ง ซึ่งอาจจะนำแนวความคิดของปัญหานี้ ไปประยุกต์เป็นแนวทางในการวางแผนการดำเนินงานของบริษัทได้ นอกจากจะช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมแล้ว ยังสามารถช่วยลดต้นทุนการบริโภคพลังงานเชื้อเพลิงของธุรกิจได้อีกด้วย สำหรับบทความนี้ได้นำเสนอผลการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่เกี่ยวข้องกับประเด็นด้านสิ่งแวดล้อม จากฐานข้อมูลวิชาการระดับนานาชาติจำนวน 3 ฐานข้อมูล ได้แก่ Scopus, ISI web of Science และ IEEE Xplore

เริ่มจากการนำเสนอจุดเริ่มต้นของปัญหา GVRP ในหัวข้อที่ 2 จากนั้นจำแนกลักษณะของปัญหา GVRP ในหัวข้อที่ 3 ตามด้วยการนำเสนอผลการรวบรวมและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับปัญหา GVRP ในหัวข้อที่ 4 โดยทั้ง 4 หัวข้อที่ถูกกล่าวถึงข้างต้น เป็นการนำเสนอปัญหา GVRP แบ่งออกเป็น 2 ช่วงเวลา คือ ช่วงอดีต เริ่มตั้งแต่ปี พ.ศ. 2552-2557 ซึ่งถือเป็นช่วงเริ่มต้นของปัญหา GVRP และช่วงปัจจุบัน เริ่มตั้งแต่ปี พ.ศ. 2558-2562 ซึ่งเป็นช่วงที่ปัญหา GVRP เริ่มได้รับความนิยมนำมาเพิ่มแบบทวีคูณ ส่วนหัวข้อที่ 5 เป็นการคาดการณ์แนวโน้มช่วงอนาคต ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2563 เป็นต้นไปของปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่พิจารณาประเด็นด้านสิ่งแวดล้อม และบทสรุปในหัวข้อที่ 6

2. ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่พิจารณาประเด็นด้านสิ่งแวดล้อม

ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะแบบดั้งเดิม (Classical vehicle routing problem) เป็นปัญหาที่มีเป้าประสงค์ในการวางแผนเส้นทางที่เหมาะสมสำหรับยานพาหนะที่มีลักษณะเดียวกัน ความจุเท่ากัน เพื่อการให้บริการแก่ลูกค้า หรือเรียกอีกอย่างว่าปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่มีข้อจำกัดด้านความจุ (Capacitate vehicle routing problem) (Lin et al.,

2014) โดยยานพาหนะเริ่มต้นและสิ้นสุดที่คลังสินค้า ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะถูกนำเสนอครั้งแรกในปี พ.ศ. 2502 โดย Dantzig and Ramser (1959) เป็นปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการจัดเส้นทางยานพาหนะในการขนส่งน้ำมันจากคลังเก็บน้ำมันไปยังสถานีให้บริการน้ำมันหลายแห่ง จุดประสงค์ของปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะนี้ คือ การหาต้นทุนการดำเนินงานที่ต่ำที่สุด เช่น การหาเส้นทางที่สั้นที่สุดในการขนส่ง การหาจำนวนยานพาหนะที่เหมาะสมสำหรับการขนส่ง หรือต้นทุนต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการขนส่ง (Costa et al., 2018)

ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะได้ถูกนำไปพัฒนาต่อเพื่อให้แตกต่างจากปัญหาแบบดั้งเดิม ยกตัวอย่างเช่น ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่พิจารณาช่วงเวลาในการเดินทาง (Time-dependent vehicle routing problem) คือ ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่พิจารณาช่วงเวลาในการเดินทาง โดยมักมุ่งเน้นไปที่ระยะทางระหว่างตำแหน่งของลูกค้า และตำแหน่งของคลังสินค้า ชั่วโมงเร่งด่วน และสภาพอากาศ (Lin et al., 2014; Cooke & Halsey, 1966) ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่มีคลังสินค้าอยู่หลายแห่ง (Multi-depot vehicle routing problem) คือ ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่ใช้ในการขนส่งสินค้าจากคลังสินค้าไปสู่ลูกค้า โดยมีคลังสินค้ามากกว่า 1 แห่ง (Lin et al., 2014) ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่อยู่ภายใต้ความไม่แน่นอน (Stochastic VRP) ความไม่แน่นอนที่ถูกกล่าวถึง เกิดขึ้นจากปริมาณความต้องการของลูกค้าที่ไม่คงที่เวลาที่ใช้ในการเดินทาง หรือแม้กระทั่งความไม่เท่ากันของจำนวนลูกค้าในแต่ละรอบของการขนส่ง (Gendreau et al., 1996) จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้น หัวข้อของงานวิจัยมุ่งเน้นไปที่การคำนึงถึงผลกระทบทางเศรษฐกิจ จนกระทั่งปี พ.ศ. 2550 เริ่มมีการศึกษาทางงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่คำนึงถึงประเด็นด้านสิ่งแวดล้อม (GVRP) ซึ่งเกี่ยวข้องกับการใช้พลังงาน การปล่อยมลพิษ โดยประเด็นเหล่านี้เริ่มดึงดูดความสนใจของนักวิจัย และกลายเป็นประเด็นที่ได้รับความนิยมในหลายปีที่ผ่านมา (Lin et al., 2014)

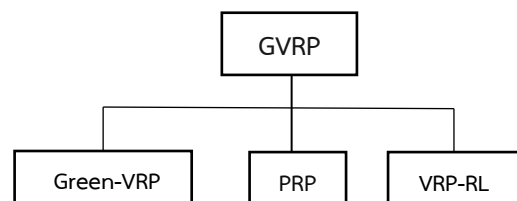
ในปี พ.ศ. 2550 Sbihi and Eglese (2007) ได้นำเสนอประเด็นโลจิสติกส์เพื่อรักษาสีสิ่งแวดล้อมบูรณาการร่วมกับปัญหาอื่น ๆ เพื่อสร้างเป็นปัญหาการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดเชิงการจัด (Combinatorial optimisation problems) เช่น ปัญหาโลจิสติกส์แบบย้อนกลับ (Reverse logistics: RL) ปัญหาการจัดการของเสีย (Waste management) และปัญหาการจัดเส้นทางของยานพาหนะและกำหนดเวลาของการขนส่ง (Vehicle routing and scheduling problem)

ปัญหา GVRP เริ่มเป็นที่รู้จักอย่างแพร่หลายในปี พ.ศ. 2555 โดย Erdogan and Miller-Hooks (2012) พัฒนาเทคนิคในการ

แก้ปัญหาสำหรับองค์กรที่มีการใช้งานยานพาหนะที่ใช้พลังงานเชื้อเพลิงทางเลือก (Alternative fuel vehicle: AFV) ที่มีระยะการขับข้อย่างจำกัด และโครงสร้างพื้นฐานการเติมเชื้อเพลิงที่จำกัด สำหรับปัญหา GVRP มีจุดประสงค์ในการผสมผสานระหว่างด้านสิ่งแวดล้อมและต้นทุนทางด้านเศรษฐกิจ ผ่านการวางแผนเส้นทางที่มีประสิทธิภาพเพื่อตอบสนองต่อข้อกำหนดในด้านสิ่งแวดล้อม และด้านเศรษฐกิจ ปัญหา GVRP ได้ถูกจำแนกออกเป็น 3 กลุ่มหลัก ๆ โดย Lin et al. (2014) ซึ่งจะได้กล่าวถึงในหัวข้อถัดไป

3. การจำแนกลักษณะของปัญหา GVRP

สำหรับการจำแนกลักษณะของปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่พิจารณาประเด็นด้านสิ่งแวดล้อมนั้น สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่มหลัก ๆ ได้แก่ ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่พิจารณาประเด็นด้านสิ่งแวดล้อม (Green-VRP) ปัญหาการจัดเส้นทางที่พิจารณามลพิษที่เกิดขึ้น (Pollution routing problem: PRP) และปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะในโลจิสติกส์แบบย้อนกลับ (VRP-RL) (Waidyathilaka et al., 2019; Lin et al., 2014) ดังแสดงในรูปที่ 1



รูปที่ 1 ลักษณะของปัญหา GVRP

3.1 ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่พิจารณาประเด็นด้านสิ่งแวดล้อม (Green-VRP)

ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่พิจารณาประเด็นด้านสิ่งแวดล้อม คือ ปัญหาการจัดเส้นทางสำหรับกลุ่มยานพาหนะที่ให้บริการในการขนส่งสินค้า โดยพิจารณาประเด็นด้านสิ่งแวดล้อมร่วมกับการประมาณต้นทุนที่ใช้สำหรับการขนส่ง ด้วยการหาเส้นทางที่มีประสิทธิภาพ เพื่อให้เกิดผลกระทบเชิงลบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยที่สุด และในขณะเดียวกันก็ยังมีต้นทุนทางเศรษฐกิจที่สามารถยอมรับได้ (Affi et al., 2018) เช่น การลดการใช้พลังงานเชื้อเพลิงของกลุ่มยานพาหนะที่ถูกนำมาใช้ในการขนส่งโดยใช้น้ำมันเชื้อเพลิงทางเลือก (Alternative fuel vehicles: AFV) เข้ามาแทนการใช้งานยานพาหนะที่ใช้พลังงานจากน้ำมันเชื้อเพลิง (Gasoline or diesel vehicles: GDV/Non-AFV) การลดการใช้พลังงานเชื้อเพลิงของกลุ่มยานพาหนะส่งผลต่อการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกได้อย่างมีนัยสำคัญ (Erdogan & Miller-Hooks, 2012) จากการทบทวน

วรรณกรรม พบว่า บทความวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่พิจารณาประเด็นด้านสิ่งแวดล้อมนี้สามารถแบ่งออกได้ดังต่อไปนี้

3.1.1 ปัญหา Green-VRP ที่พิจารณากลุ่มยานพาหนะที่ใช้พลังงานน้ำมันเชื้อเพลิง (GDV/Non-AFV) ตัวอย่างของงานวิจัยที่ประเภทนี้ ได้แก่ งานวิจัยของ Xiao and Konak (2016) ศึกษาปัญหาการจัดตารางและจัดเส้นทางของยานพาหนะที่พิจารณาประเด็นด้านสิ่งแวดล้อม (Green vehicle routing and scheduling problem: GVRSP) มีจุดประสงค์ในการวางแผนเส้นทางการขนส่งหรือรับสินค้าด้วยยานพาหนะที่มีความจุแตกต่างกัน ที่ก่อให้เกิดก๊าซเรือนกระจกต่ำที่สุดในระบบโลจิสติกส์ โดยใช้วิธีการลูกผสม (Hybrid Algorithm) งานวิจัยของ Norouzi et al. (2017) ศึกษาปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่เวลาการเดินทางขึ้นอยู่กับช่วงเวลา (Time-dependent vehicle routing problem) โดยมีจุดประสงค์ในการลดเวลาการเดินทาง และการลดการใช้เชื้อเพลิงของยานพาหนะ ในสถานการณ์ที่การขนส่งขึ้นอยู่กับช่วงเวลา ร่วมกับการพิจารณาถึงแรงต้านของอากาศ เงื่อนไขทางกายภาพของถนน ลักษณะทางกายภาพของยานพาหนะแต่ละชนิด น้ำหนักและน้ำหนักบรรทุกของยานพาหนะโดยใช้วิธีการดัดแปลง (Modified Algorithm) ในการแก้ไขปัญห

3.1.2 ปัญหา Green-VRP ที่พิจารณากลุ่มยานพาหนะที่ใช้พลังงานทางเลือก (AFV) ตัวอย่างของงานวิจัยประเภทนี้ ได้แก่ งานวิจัยของ Normasari et al. (2019) ศึกษาปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่พิจารณาประเด็นด้านสิ่งแวดล้อม โดยพิจารณายานพาหนะที่ใช้พลังงานทางเลือก และมีเงื่อนไขด้านความจุของยานพาหนะ จุดประสงค์ของงานวิจัยดังกล่าว คือ การหาเส้นทางที่สั้นที่สุดในการขนส่ง ด้วยการประยุกต์ใช้วิธีการจำลองการอบอ่อน (Simulated Annealing) นอกจากนี้ Wang and Lu (2019) ได้ทำการศึกษาเพื่อหาเส้นทางที่สั้นที่สุดสำหรับการขนส่งสินค้า ด้วยกลุ่มยานพาหนะที่ใช้พลังงานทางเลือก และมีเงื่อนไขด้านความจุของยานพาหนะ ด้วยการประยุกต์ใช้วิธีการลอกแบบ (Memetic Algorithm)

3.1.3 ปัญหา Green-VRP ที่พิจารณากลุ่มยานพาหนะที่ใช้ทั้งพลังงานน้ำมันเชื้อเพลิง และกลุ่มยานพาหนะที่ใช้พลังงานทางเลือก ตัวอย่างของงานวิจัยประเภทนี้ ได้แก่ งานวิจัยของ Cirovic et al. (2014) นำเสนอปัญหาการจัดเส้นทางขนส่งของยานพาหนะขนาดเล็ก โดยพิจารณาทั้งยานพาหนะที่ใช้พลังงานทางเลือกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม และยานพาหนะที่ใช้พลังงานเชื้อเพลิง โดยประยุกต์ใช้วิธีการจำลองการอบอ่อน (Simulated Annealing) เพื่อหาเส้นทางที่เหมาะสมที่สุด งานวิจัยของ Macrina et al. (2019) นำเสนอปัญหาการจัดเส้นทาง

ยานพาหนะที่พิจารณาประเด็นด้านสิ่งแวดล้อมแบบมีกรอบเวลา (Green vehicle routing problem with time window) โดยยานพาหนะที่พิจารณาประกอบด้วย ยานพาหนะที่ใช้พลังงานเชื้อเพลิงแบบดั้งเดิมสำหรับเครื่องยนต์สันดาปภายใน และยานพาหนะที่ใช้พลังงานไฟฟ้า (Electric vehicle) ซึ่งคำนึงถึงสถานีให้บริการในการชาร์จพลังงานของยานพาหนะที่ใช้พลังงานไฟฟ้า และจำกัดการปล่อยมลพิษของยานพาหนะที่ใช้พลังงานเชื้อเพลิง โดยประยุกต์ใช้วิธีการหาคำตอบแบบวนรอบซ้ำ (Iterated Local Search: ILS)

สำหรับงานวิจัยในกลุ่มของ Green-VRP โดยแบ่งแยกตามประเภทของกลุ่มยานพาหนะที่ถูกนำมาพิจารณาในแต่ละงานวิจัย ได้ถูกสรุปไว้ในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ตารางสรุปงานวิจัย Green-VRP โดยแบ่งตามประเภทของกลุ่มยานพาหนะที่พิจารณา

ประเภทของกลุ่มของยานพาหนะที่พิจารณา	หมายเลขอ้างอิงบทความ
Non-AFV	Macrina et al. , 2019; Simao et al. , 2009; Maden et al. , 2010; Hollis & Green, 2012; Jabali et al., 2012; Adiba et al., 2013; Adiba et al., 2013; Kopfer et al. , 2014; Qian & Eglese, 2014; Zhang et al. , 2014; Chand & Mohanty, 2015; He et al. , 2015; Jabbarpour et al. , 2015; Naoum-Sawaya et al. , 2015; Norlund et al. , 2015; Li-Ying et al. , 2015; Tiwari et al. , 2015; Wang et al. , 2015; Xiao et al. , 2015; Adiba et al. , 2016; Afshar-Bakeshloo et al. , 2016; Alinaghian & Naderipour, 2016; Ehmke et al., 2016; Ene et al., 2016; Lee & Prabhu, 2016; Naderipour & Alinaghian, 2016; Toro et al. , 2016; Wang et al., 2016; Yin & Chuang, 2016; Behnke & Kirschstein, 2017; Camm et al. , 2017; Çimen & Soysal, 2017; Hassanzadeh & Rasti- Barzoki, 2017; Jabir et al. , 2017; Jemai et al. , 2017; Leggieri, & Haouari, 2017; Liao, 2017; Nakhjirkan et al. , 2017; Sawik et al. , 2017; Sawik et al. , 2017; Soysal & Çimen, 2017; Toro et al. , 2017; Toro et al. , 2017; Turkensteen, 2017; Xiao & Konak, 2017; Chabot et al., 2018; de Oliveira da Costa et al. , 2018; Ehmke et al. , 2018; Elgesem et al. , 2018; Faraji et al. , 2018; Fukasawa et al. , 2018; Gifford et al. , 2018; Hamad et al., 2018; Hu et al., 2018; Kancharla

ประเภทของกลุ่มของยานพาหนะที่พิจารณา	หมายเลขอ้างอิงบทความ
	& Ramadurai, 2018; Kazemian et al., 2018; Kong et al., 2018; Li & Sun, 2018; Liu et al., 2018; Niu et al., 2018; Niu et al., 2018; Poonthalir & Nadarajan, 2018; Rabbani et al., 2018; Sousa Matos et al., 2018; Soysal et al., 2018; Wang et al., 2018; Wensing, 2018; Almira et al., 2019; Chiang et al., 2019; Dukkanci et al., 2019; Fallah et al., 2019; Fallah et al., 2019; Ghannadpour & Zarrabi, 2019; Han et al., 2019; Khalafi & Zarei, 2019; Li et al., 2019; Li et al., 2019; Li et al., 2019; Poonthalir & Nadarajan, 2019; Rezaei et al., 2019; Schroder & Cabral, 2019; Serrano- Hernandez & Faulin, 2019; Soon et al., 2019; Soon et al., 2019; Sruthi et al., 2019; Wang et al., 2019; Wang et al., 2019; Wang et al., 2019; Xin et al., 2019; Xu et al., 2019; Yu et al., 2019; Yu et al., 2019; Yu et al., 2019; Zhang et al., 2019; Zhu & Hu, 2019; Zulvia et al., 2020; Zhou et al., 2019
AFV	Affi et al., 2018; Erdogan & Miller-Hooks, 2012; Wang & Lu, 2019; Koyuncu & Yavuz, 2019; Gen et al., 2009; Gajanand et al., 2013; Felipe et al., 2014; Jovanović et al., 2014; Juan et al., 2014; Schneider et al., 2014; Goeke & Schneider, 2015; Kramer et al., 2015; Yang et al., 2015; Bruglieri et al., 2016; Fukasawa et al., 2016; Koc & Karaoglan, 2016; Montoya et al., 2016; Roberti & Wen, 2016; Andelmin & Bartolini, 2017; Bruglieri et al., 2017; Coelho et al., 2017; Muñoz- Villamizar et al., 2017; Schiffer & Walther, 2017; Sundar et al., 2017; Yavuz, 2017; Yu et al., 2017; Croce et al., 2018; Ferro et al., 2018; Ghezavati et al., 2018; Madankumar et al., 2018; Zhang et al., 2018; Abu Al Hla et al., 2019; Andelmin et al., 2019; Arroyo et al., 2019; Basso et al., 2019; Bruglieri et al., 2019; Bruglieri et al., 2019; Bruglieri et al., 2019;

ประเภทของกลุ่มของยานพาหนะที่พิจารณา	หมายเลขอ้างอิงบทความ
	Erdem et al., 2019; Eskandarpour et al., 2019; Goeke 2019; Guo & Guo, 2019; Heshmati et al., 2019; Hooshmand & MirHassani, 2019; Mahmoudi et al., 2019; Reyes-Rubiano et al., 2019; Xiao et al., 2019; Zhen et al., 2019
Non-AFV และ AFV	Ćirović et al., 2014; Macrina et al., 2019; Gao & Zhao, 2018; Macrina et al., 2019; Mancini, 2017

3.2 ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่พิจารณามลพิษที่เกิดขึ้น (Pollution Routing Problem: PRP)

ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่พิจารณามลพิษที่เกิดขึ้นนี้ เป็นปัญหาที่ต่อยอดมาจากปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะแบบดั้งเดิม ที่มีจุดประสงค์ที่เพิ่มมากยิ่งขึ้น ไม่เพียงแต่การหากระยะทางในการเดินทางที่สั้นที่สุดเท่านั้น แต่ยังรวมไปถึงปริมาณการปล่อยก๊าซเรือนกระจก การใช้พลังงานเชื้อเพลิง ระยะเวลาในการเดินทาง และค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นจากการเดินทางอีกด้วย (Lin et al., 2014; Bektaş & Laporte, 2011) ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่พิจารณามลพิษที่เกิดขึ้นถูกนำเสนอโดย Bektaş and Laporte (2011) สำหรับการแบ่งกลุ่มของปัญหาโดยใช้ประเภทของกลุ่มยานพาหนะที่นำมาพิจารณาแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ตารางสรุปงานวิจัย PRP โดยแบ่งแยกตามประเภทของกลุ่มยานพาหนะที่พิจารณา

ประเภทของกลุ่มของยานพาหนะที่พิจารณา	หมายเลขอ้างอิงบทความ
Non-AFV	Suzuki, 2016; Ubeda et al., 2011; Costa et al., 2018; Dabia et al., 2017; Eshtehadi et al., 2017; Franceschetti et al., 2017; Abad et al., 2018; Bravo et al., 2019; Kumar & Kumar, 2018
AFV	-

จากตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่า ในปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่พิจารณามลพิษที่เกิดขึ้นนั้น ยังไม่พบว่ามีบทความที่ศึกษายานพาหนะที่ใช้พลังงานทางเลือก โดยปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่พิจารณามลพิษที่เกิดขึ้นนี้ เน้นไปที่กลุ่มของยานพาหนะที่ใช้พลังงานเชื้อเพลิง ปัญหานี้เป็นปัญหาที่ต่อ

ยอดมาจากปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะ (Costa et al., 2018; Suzuki, 2016; Eshtehadi et al., 2017) เพื่อกำหนดเส้นทางที่เหมาะสมที่สุด สำหรับกลุ่มยานพาหนะที่ให้บริการแก่กลุ่มลูกค้า โดยการพิจารณาหลายปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อการใช้พลังงานเชื้อเพลิงของยานพาหนะ โดยปัจจัยที่พิจารณาได้แก่ 1) คุณสมบัติเฉพาะของการเคลื่อนที่ เช่น ความลาดชันและความแออัดของถนน 2) คุณสมบัติเฉพาะของยานพาหนะ เช่น ขนาดความจุของเครื่องยนต์และน้ำหนักของยานพาหนะ 3) สภาพของสิ่งแวดล้อม เช่น ลมและระดับความสูงของถนน 4) คุณสมบัติของคนขับ เช่น พฤติกรรมในการขับรถ (Suzuki, 2016)

การศึกษาปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่พิจารณามลพิษที่เกิดขึ้น เป็นหัวข้องานวิจัยที่ได้รับความสนใจจากทั้งผู้ให้บริการและผู้ให้บริการในการขนส่งสินค้า ไม่เพียงแต่ในแง่ของความเสี่ยงทางด้านสิ่งแวดล้อม แต่ยังส่งผลในแง่ของด้านต้นทุน อันเนื่องมาจากการลดการใช้พลังงานเชื้อเพลิงจากยานพาหนะส่งผลให้ต้นทุนเชื้อเพลิงของผู้ให้บริการในการขนส่งลดลง และยังช่วยลดต้นทุนค่าขนส่งของผู้ให้บริการในการขนส่งต่าง ๆ อีกด้วย (Suzuki, 2016) ตัวอย่างของงานวิจัยปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่พิจารณามลพิษที่เกิดขึ้น เช่น งานวิจัยของ Suzuki (2016) พัฒนาระบบช่วยตัดสินใจสำหรับกำหนดเส้นทางยานพาหนะที่ใช้ในการขนส่งสินค้าอย่างเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมผ่านมุมมองของผู้ให้บริการขนส่งสินค้า โดยพิจารณาทั้งหมด 6 ปัจจัย ได้แก่ 1) พฤติกรรมในการขับรถของคนขับ 2) ขนาดยานพาหนะ 3) น้ำหนักบรรทุก 4) ความเร็วของยานพาหนะ 5) ความลาดชันของถนน และ 6) ความแออัดของถนน โดยกำหนดให้ปัจจัยน้ำหนักบรรทุก เป็นตัวแปรตัดสินใจ งานวิจัยของ Eshtehadi et al. (2017) ศึกษาปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่พิจารณามลพิษที่เกิดขึ้น มีจุดประสงค์ในการกำหนดเส้นทางของยานพาหนะที่ใช้ในการขนส่งสินค้า เพื่อให้เกิดการใช้พลังงานเชื้อเพลิงของยานพาหนะต่ำที่สุด โดยมีการพิจารณาเงื่อนไขด้านความไม่แน่นอนของความต้องการของลูกค้าและความไม่แน่นอนของเวลาที่ใช้ในการเดินทาง

3.3 ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะ (Vehicle routing problem) ที่พิจารณาโลจิสติกส์แบบย้อนกลับ (Reverse logistics: RL)

ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่พิจารณาโลจิสติกส์แบบย้อนกลับ (Reverse logistics) ให้ความสนใจที่ลักษณะของการกระจายสินค้าของโลจิสติกส์ย้อนกลับ โดยส่วนใหญ่ปัญหา VRP ในกรณีที่พิจารณาโลจิสติกส์แบบย้อนกลับ (RL) ศึกษาปัญหาที่เกี่ยวข้องกับการนำขยะกลับมาใช้ใหม่ หรือการนำสินค้าที่หมดอายุกลับมาเข้ากระบวนการผลิตใหม่อีกครั้ง (Lin et al., 2014) ปัญหา VRP ประเภท RL เป็นปัญหาที่เน้นการพิจารณาการไหล

แบบย้อนกลับ (Backward stream) ในระบบการขนส่งสินค้า หมายถึง การนำประเด็นด้านโลจิสติกส์แบบย้อนกลับ เข้ามาประยุกต์ใช้กับปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะ (Coelho et al., 2016) งานวิจัยของ Dekker et al. (2013) ได้อธิบายถึงโลจิสติกส์แบบย้อนกลับ คือ กระบวนการวางแผนและควบคุมการไหลย้อนกลับของวัตถุดิบในกระบวนการ เช่น สินค้าคงคลัง (Inventory) บรรจุภัณฑ์ (Packaging) และสินค้าสำเร็จรูป (Finish goods) ตั้งแต่กระบวนการผลิต การกระจายสินค้า หรือการนำสินค้าไปใช้ จนกระทั่งถึงการกู้คืนผลิตภัณฑ์ หรือการกำจัดทิ้ง

โลจิสติกส์แบบย้อนกลับมุ่งเน้นการบูรณาการที่ดีที่สุด ระหว่างการไหลของสินค้าจากผู้ผลิตสู่ผู้บริโภค และการไหลย้อนกลับของของเสีย (Waste) หรือสินค้าที่ถูกใช้แล้วจากผู้บริโภคสู่คลังสินค้าสำหรับการนำสินค้าที่ถูกใช้แล้ว หรือสินค้าที่ไม่สามารถใช้ได้แล้วเหล่านั้นกลับมาใช้ใหม่ (Recycling) (Dell'Amico et al., 2006) สำหรับปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่พิจารณาโลจิสติกส์แบบย้อนกลับ สามารถแบ่งออกเป็น 4 ประเภท (Lin et al., 2014) ได้ดังต่อไปนี้

3.3.1 ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่พิจารณาโลจิสติกส์แบบย้อนกลับ ประเภทการเลือกรับสินค้าจากกลับแบบพิจารณาค่าบริการ (Selective pickups and pricing) เป็นปัญหาที่พิจารณาเพื่อหาเส้นทางของการขนส่งสินค้าจากคลังสินค้า เพื่อให้บริการแก่ลูกค้าทุกคน โดยในเที่ยวกลับอาจมีการรับสินค้าจากลูกค้าบางคนหากน้ำหนักของสินค้าที่รับจากลูกค้าไม่เกินความจุของยานพาหนะ และในการรับสินค้ายังก่อให้เกิดรายได้ อีกด้วย (Coelho et al., 2016) ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่พิจารณาโลจิสติกส์แบบย้อนกลับประเภทนี้ มีจุดประสงค์เพื่อสร้างกำไรให้มากที่สุด (Lin et al., 2014)

ตัวอย่างของงานวิจัยของปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่พิจารณาโลจิสติกส์แบบย้อนกลับประเภทนี้ได้แก่ งานวิจัยของ Ubeda et al. (2011) ได้ทำการหาเส้นทางที่มีต้นทุนต่ำที่สุดสำหรับการให้บริการขนส่งสินค้าไปยังลูกค้า พร้อมทั้งกำหนดจุดในการรับสินค้าจากลูกค้า โดยที่การนำหนักของสินค้าที่ยานพาหนะรับนั้นต้องไม่เกินน้ำหนักบรรทุกของยานพาหนะ โดยใช้วิธี Four-Neighborhood Variable Neighborhood Search (FN-VNS) ในการแก้ปัญหา

3.3.2 ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่พิจารณาโลจิสติกส์แบบย้อนกลับ ประเภทการเก็บรวบรวมของเสีย (Waste collection) เป็นปัญหาที่พิจารณาเพื่อหาเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการจัดการขยะ (Wastes) โดยขยะที่กล่าวถึงนี้สามารถแบ่งออกเป็น 3 ประเภท ได้แก่ 1) ขยะที่เกิดจากแหล่งชุมชน/แหล่งที่พักอาศัย หรือบ้านพักส่วนบุคคล (Residential waste) โดยยานพาหนะเคลื่อนที่ไปตามถนนเพื่อทำการเก็บขยะจากถังขยะขนาดเล็ก โดยความถี่ในการเก็บขยะขึ้นอยู่กับสภาพภูมิอากาศ สภาพภูมิศาสตร์ และค่าบริการ 2) ขยะเชิงพาณิชย์ (Commercial waste) เป็นขยะที่เกิดจากห้างสรรพสินค้า ร้านอาหาร และอาคารสำนักงานขนาดเล็ก ซึ่งมีถังขยะขนาดใหญ่ ความถี่ในการให้บริการค่อนข้างคงที่ และ 3) ขยะอุตสาหกรรม (Industrial waste) เป็นขยะที่เกิดจากพื้นที่ก่อสร้าง ขยะจากพื้นที่ย่านกลางเมือง และห้างสรรพสินค้าขนาดใหญ่ การเก็บขยะอุตสาหกรรม และขยะเชิงพาณิชย์มีความแตกต่างกันไม่เพียงแต่ขนาดของภาชนะที่ใช้บรรจุ แต่ยังมีความแตกต่างในด้านของเส้นทางด้วย

สำหรับกระบวนการในการเก็บรวบรวมขยะอุตสาหกรรมนั้น เริ่มจากยานพาหนะนำส่งภาชนะเปล่าไปยังตำแหน่งของลูกค้า เพื่อนำภาชนะเปล่าไปแทนที่ภาชนะที่บรรจุขยะเต็มความจุ จากนั้นจึงนำขยะที่ได้รับไปยังสถานที่กำจัด (Idrus et al., 2017) ตัวอย่างงานวิจัยที่พิจารณาปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะสำหรับเก็บรวบรวมขยะ ได้แก่ งานวิจัยของ Lu et al. (2017) ทำการหาเส้นทางที่เหมาะสมสำหรับการเก็บรวบรวมขยะมูลฝอยในเขตเมือง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของระบบเก็บรวบรวมขยะมูลฝอย เป็นเกิดการจัดการขยะอย่างยั่งยืน

3.3.3 ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่พิจารณาโลจิสติกส์แบบย้อนกลับ ประเภทการเก็บรวบรวมส่วนประกอบของ

ผลิตภัณฑ์หรือสินค้าที่หมดอายุ (End-of-life goods) เพื่อนำกลับมาใช้ประโยชน์ เนื่องจากบางสินค้าหรือผลิตภัณฑ์ยังมี

บางส่วนที่สามารถนำกลับมาใช้งานประโยชน์ได้ใหม่ หรือบางส่วนยังสามารถใช้งานซ้ำได้ จึงเป็นประโยชน์โดยตรงต่อกระบวนการผลิตสินค้า (Lin et al., 2014) ตัวอย่างงานวิจัยที่

ศึกษาปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่พิจารณาโลจิสติกส์แบบย้อนกลับประเภทนี้ได้แก่ งานวิจัยของ Lin et al. (2014) ได้รับแรงบันดาลใจจากการขนส่งและเก็บรวบรวมภาชนะสำหรับใส่น้ำ งานวิจัยนี้ได้ออกแบบแผนการส่งมอบน้ำและเก็บรวบรวมถังพลาสติกเปล่าที่ใช้ในการใส่น้ำจากลูกค้า โดยมีเงื่อนไขด้านพื้นที่ของยานพาหนะ คือ จำนวนถังพลาสติกที่เก็บรวบรวมต้องไม่เกินพื้นที่ว่างของยานพาหนะ มีจุดประสงค์ในการลดต้นทุนทางเศรษฐกิจ และหาระยะทางในการเดินทางที่สั้นที่สุดเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

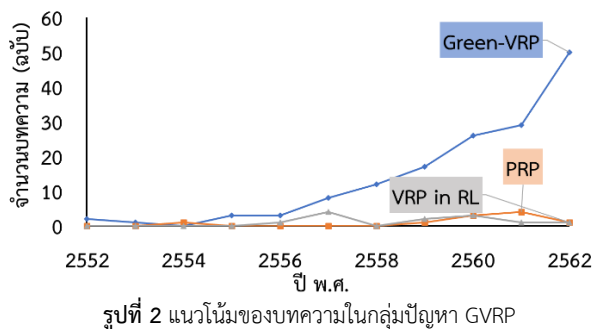
3.3.4 ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่พิจารณาโลจิสติกส์แบบย้อนกลับ ประเภทการเก็บรวบรวมและกระจายอย่างทันที (Simultaneous distribution and collection) เป็นปัญหาที่มีการพิจารณาเพื่อหาเส้นทางสำหรับการให้บริการขนส่งสินค้าหรือผลิตภัณฑ์สำหรับกลุ่มยานพาหนะที่มีข้อจำกัดด้านความจุไปสู่ลูกค้า โดยลูกค้าแต่ละรายต้องได้รับสินค้าหรือผลิตภัณฑ์ตามที่กำหนด และจัดเก็บรวบรวมสินค้าหรือผลิตภัณฑ์ที่ใช้แล้วจากลูกค้าหรือผู้บริโภคไปยังคลังสินค้า ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่พิจารณาโลจิสติกส์แบบย้อนกลับประเภทนี้มีจุดประสงค์เพื่อหาเส้นทางขนส่งสินค้า และจัดเก็บสินค้าที่มีระยะทางที่สั้นที่สุด (Lin et al., 2014; Dell'Amico et al., 2006) สำหรับตารางที่ 3 เป็นตารางสรุปงานวิจัยที่ได้ศึกษาปัญหานี้ ตามประเภทของกลุ่มยานพาหนะที่พิจารณา

ตัวอย่างงานวิจัยที่ศึกษาปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่พิจารณาโลจิสติกส์แบบย้อนกลับประเภทนี้ได้แก่ งานวิจัยของ Dondo and Mendez (2016) ได้ออกแบบเส้นทางที่ดีที่สุดสำหรับการกระจายสินค้าและนำภาชนะบรรจุสินค้ากลับมาสู่โรงงาน เพื่อกระตุ้นให้สามารถใช้ใหม่ได้อีกครั้ง (Recovering) โดยยานพาหนะเคลื่อนที่ออกจากโรงงานเพื่อขนส่งสินค้า และเก็บรวบรวมชิ้นส่วนที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้มายังโรงงาน

ตารางที่ 3 ตารางสรุปงานวิจัยที่ศึกษาปัญหา VRP ประเภท RL โดยแบ่งแยกตามประเภทของกลุ่มยานพาหนะที่พิจารณา

ประเภทของ VRP-RL	ประเภทของกลุ่มยานพาหนะที่พิจารณา	หมายเลขอ้างอิงบทความ
Selective pickups and pricing	Non-AFV	Coelho et al., 2006
	AFV	Granada-Echeverri et al., 2020
Waste collection	Non-AFV	Lu et al., 2017; Kim et al., 2014; Ramos et al., 2014; Ramos et al., 2014; Henke et al., 2019
	AFV	-
End of life goods collection	Non-AFV	Lin et al., 2014; Kumar et al., 2017
	AFV	-
Simultaneous distribution and collection	Non-AFV	Dondo & Mendez, 2016; Mohammadi et al., 2013; Majidi et al., 2017; Soleimani et al., 2018
	AFV	-

จากการทบทวนวรรณกรรมของปัญหาการจัดเส้นทางพิจารณาประเด็นด้านสิ่งแวดล้อม หากแบ่งออกตามคุณลักษณะที่กล่าวมาข้างต้น พบว่า ปัญหา Green-VRP มีสัดส่วนมากที่สุดคือร้อยละ 87.28 จากทั้งหมด รองลงมาคือปัญหา VRP-RL คิดเป็นร้อยละ 6.94 และสุดท้ายคือ ปัญหา PRP คิดเป็นร้อยละ 5.78 ในรูปที่ 2 แสดงถึงแนวโน้มของบทความในกลุ่มปัญหา GVRP



จากรูปที่ 2 พบว่า ในอดีตบทความที่เกี่ยวข้องกับปัญหา GVRP เริ่มขึ้นใน ปี พ.ศ. 2552 ปัญหา GVRP ถูกตีพิมพ์ลงในฐานข้อมูลวิชาการระดับนานาชาติ และเริ่มเป็นที่นิยมเรื่อยมาจนกระทั่งช่วงปัจจุบันตั้งแต่ปี พ.ศ. 2558 – ปี พ.ศ. 2562 ปัญหา GVRP ได้รับความสนใจจากนักวิจัยเป็นอย่างมาก พบว่า ช่วงปัจจุบันมีปริมาณบทความวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหา GVRP ที่ถูกตีพิมพ์ลงในฐานข้อมูลวิชาการระดับนานาชาติมากกว่าช่วงอดีตประมาณ 5 เท่า ซึ่งมีปริมาณมากถึง 151 ฉบับ

การรวบรวมวรรณกรรมจากฐานข้อมูลวิชาการระดับนานาชาติเพื่อคาดการณ์แนวโน้มอนาคตของปัญหา GVRP ถูกรวบรวมจากฐานข้อมูลวิชาการระดับนานาชาติทั้งหมด 3 ฐานข้อมูล โดยรายละเอียดถูกกล่าวถึงในหัวข้อที่ 4

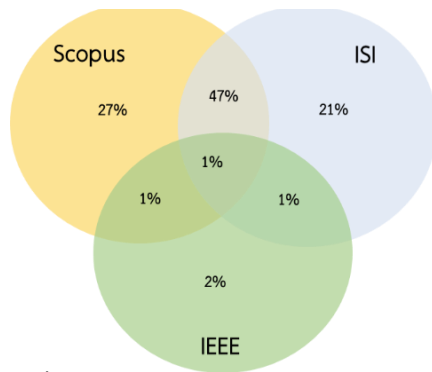
4. การรวบรวมและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับ

GVRP

การรวบรวมและทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับปัญหา GVRP ถูกสืบค้นจากฐานข้อมูลทางวิชาการในระดับนานาชาติ ได้แก่ Scopus, ISI Web of Science และ IEEE Xplore กำหนดช่วงเวลาการสืบค้น คือ ทุกปี ตั้งแต่เริ่มมีบทความในกลุ่มของปัญหา GVRP ที่ถูกตีพิมพ์ในฐานข้อมูลวิชาการระดับนานาชาติ จนกระทั่งถึงปี พ.ศ. 2562 คำสำคัญที่กำหนดในการสืบค้น คือ Green และ Vehicle routing สืบค้นจากชื่อเรื่อง (Article title) บทคัดย่อ (Abstract) หรือคำสำคัญ (Keywords) โดยในฐานข้อมูล Scopus พบทั้งสิ้น 289 บทความ หลังจากนั้นคัดกรองเฉพาะบทความที่เกี่ยวข้องกับด้านวิศวกรรมศาสตร์ (Engineering) ด้านวิทยาการคอมพิวเตอร์ (Computer science) ด้านคณิตศาสตร์ (Mathematics) และด้านวิทยาศาสตร์สำหรับการตัดสินใจ (Decision science) ทั้งหมด 151 บทความ

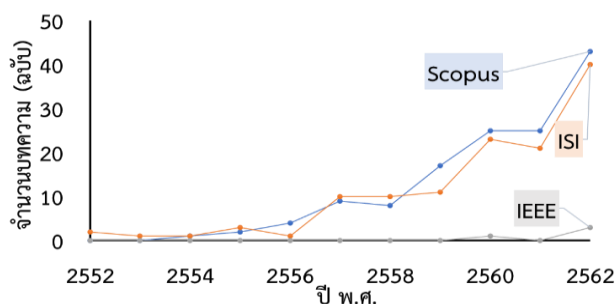
สำหรับฐานข้อมูล ISI Web of Science พบทั้งสิ้น 196 บทความ หลังจากนั้นคัดกรองเฉพาะ บทความวิจัยที่เกี่ยวข้องกับด้านวิศวกรรมศาสตร์ (Engineering) ด้านวิทยาการคอมพิวเตอร์ (Computer science) ด้านคณิตศาสตร์ (Mathematics) และด้านการจัดการการดำเนินงาน (Operations research management science) ทั้งหมด 144 บทความ

ฐานข้อมูล IEEE Xplore พบทั้งสิ้น 69 บทความ คัดเลือกประเภทของบทความที่ลงในวารสาร (Journal) ทั้งหมด 6 บทความ หลังจากนั้นทำการตัดความซ้ำซ้อนของบทความที่เหมือนกันจากทั้ง 3 ฐานข้อมูล สุดท้ายพบจำนวนบทความที่เกี่ยวข้องกับปัญหา GVRP ทั้งหมด 171 บทความ ซึ่งเป็นบทความที่ศึกษาปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่พิจารณาด้านสิ่งแวดล้อม โดยวิธีที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อแก้ปัญหาที่แตกต่างกันออกไป โดยสัดส่วนของบทความวิจัยที่ถูกพบในฐานข้อมูลต่าง ๆ แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 สัดส่วนของบทความวิจัยในฐานข้อมูลต่าง ๆ

จากบทความที่ถูกสืบค้นดังกล่าว พบว่า เป็นบทความที่มีอยู่ในฐานข้อมูลทั้ง Scopus และ ฐานข้อมูล ISI Web of Science ร้อยละ 47 รองลงมาคือ บทความที่อยู่ในฐานข้อมูล Scopus เพียงฐานข้อมูลเดียวคิดเป็นร้อยละ 27 ถัดมาคือ บทความที่อยู่ในฐานข้อมูล ISI Web of Science เพียงฐานข้อมูลเดียวคิดเป็นร้อยละ 21 สำหรับฐานข้อมูล IEEE Xplore พบเพียงร้อยละ 2 โดยแนวโน้มของปริมาณบทความในช่วงอดีตและปัจจุบันจากฐานข้อมูลทั้ง 3 ฐานข้อมูล แสดงดังรูปที่ 4



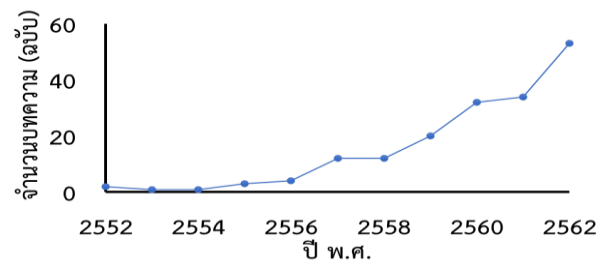
รูปที่ 4 ปริมาณบทความในช่วงอดีตและปัจจุบันจากฐานข้อมูล

หากนักวิจัยที่สนใจหัวข้อปัญหา GVRP ฐานข้อมูล Scopus และ ฐานข้อมูล ISI Web of Science ถือเป็นฐานข้อมูลทางวิชาการที่ควรให้ความสำคัญในการค้นคว้า เพื่อเป็นแนวทางในการทำวิจัยต่อไป เนื่องจากฐานข้อมูลวิจัยทั้ง 2 ฐานข้อมูลนี้เป็นฐานข้อมูลที่มีการตีพิมพ์บทความที่เกี่ยวข้องกับปัญหา GVRP มากที่สุด แสดงดังรูปที่ 4 แนวโน้มของบทความที่เกี่ยวข้องกับปัญหา GVRP ซึ่งถูกตีพิมพ์ในฐานข้อมูลวิชาการระดับนานาชาติ จากรูปจะเห็นได้ว่าบทความวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหา GVRP ที่ตีพิมพ์ในฐานข้อมูลทั้งฐานข้อมูล Scopus และ ฐานข้อมูล ISI Web of Science มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นทุกปี

4.1 แนวโน้มบทความวิจัยในปัญหา GVRP

จากการทบทวนวรรณกรรมจากฐานข้อมูลทางวิชาการระดับนานาชาติที่กล่าวถึงในข้างต้น พบว่ามีการตีพิมพ์งานวิจัยที่

เกี่ยวข้องกับปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่พิจารณาประเด็นด้านสิ่งแวดล้อมครั้งแรก ในปี พ.ศ. 2552 และในปี พ.ศ. 2562 พบว่า มีการตีพิมพ์ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะสูงถึง 52 ฉบับ ซึ่งถือว่าเป็นปีที่ปัญหา GVRP ได้รับการตีพิมพ์มากที่สุด ตั้งแต่เริ่มมีการตีพิมพ์งานวิจัยในหัวข้อปัญหานี้ ดังแสดงในรูปที่ 5 ซึ่งแสดงจำนวนของบทความที่ถูกตีพิมพ์ในแต่ละปี โดยปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่พิจารณาประเด็นด้านสิ่งแวดล้อมถือเป็นปัญหาที่ได้รับความสนใจจากนักวิจัยเป็นอย่างมาก เนื่องจากมีแนวโน้มการตีพิมพ์เพิ่มขึ้นทุกปี



รูปที่ 5 จำนวนบทความที่ถูกตีพิมพ์ในแต่ละปี

สำหรับรายละเอียดการสรุปวารสารที่มีการตีพิมพ์บทความที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการจัดเส้นทางที่พิจารณาประเด็นด้านสิ่งแวดล้อม ได้ถูกรวบรวมและนำเสนอในตารางที่ 3

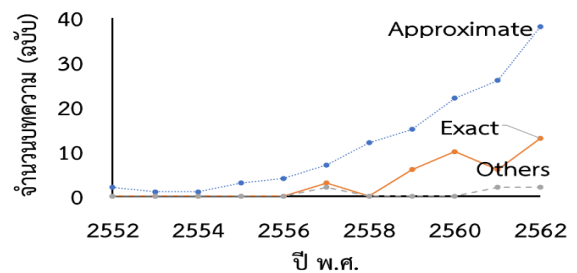
จากตารางที่ 3 พบว่า วารสารที่มีการตีพิมพ์บทความที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่พิจารณาประเด็นด้านสิ่งแวดล้อมมากที่สุดเป็นอันดับแรก คือ วารสาร Journal of Cleaner Production ซึ่งได้ตีพิมพ์บทความทั้งหมด 14 ฉบับ คิดเป็นอัตราส่วนร้อยละ 8.19 รองลงมาคือ วารสาร Computers and Operations Research มีการตีพิมพ์ทั้งหมด 13 บทความ คิดเป็นอัตราส่วนร้อยละ 7.60 อันดับที่สามคือ วารสาร Transportation Research Part E: logistics and Transportation Review ตีพิมพ์ทั้งหมด 10 บทความ คิดเป็นอัตราส่วนร้อยละ 5.85 อันดับที่ 4 มีทั้งหมด 2 วารสารที่มีจำนวนการตีพิมพ์งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่พิจารณาประเด็นด้านสิ่งแวดล้อมเป็นจำนวนเท่ากัน คือ 7 บทความ คิดเป็นอัตราส่วนร้อยละ 4.09 ได้แก่ วารสาร Expert Systems with Applications และ วารสาร Transportation Research Part D: Transport and Environment

ตารางที่ 3 สรุปวารสารที่มีการตีพิมพ์งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการจัดเส้นทางที่พิจารณาประเด็นด้านสิ่งแวดล้อม

ลำดับ	วารสาร	จำนวน (ฉบับ)	อัตราส่วน (ร้อยละ)
1	Journal of Cleaner Production	14	8.19
2	Computers and Operations Research	13	7.60
3	Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review	10	5.85
4	Expert Systems with Applications	7	4.09
5	Transportation Research Part D: Transport and Environment	7	4.09
6	European journal of Operational Research	6	3.51
7	Applied Soft Computing Journal	6	3.51
8	International Journal of Production Economics	5	2.92
9	Transportation Science	5	2.92
10	Electronic Notes in Discrete Mathematics	4	2.34
11	Computers and Industrial Engineering	4	2.34
12	International Journal of Industrial Engineering Computations	4	2.34
13	Networks	4	2.34
14	International Journal of Logistics System and Management	3	1.75
15	International Journal of Production Research	3	1.75
16	Transportation Research Part C: Emerging Technologies	3	1.75
17	Annals of Operations Research	2	1.17
18	Transportation Research Part B: Methodological	2	1.17
19	Advances in Transportation Studies	2	1.17
20	International Journal of Soft Computing	2	1.17
21	Journal of Theoretical and Applied Information Technology	2	1.17
22	Mathematical Problems in Engineering	2	1.17
23	Sort-Statistics and Operations Research Transactions	2	1.17
24	Applications of Management Science	2	1.17
25	Energy Systems	1	0.58
26	Industrial Management and Data Systems	1	0.58
27	Advanced Engineering Informatics	1	0.58
28	Advances in Modelling and Analysis A	1	0.58
29	Applied Energy	1	0.58
30	Applied Mathematical Modelling	1	0.58
31	Central European Journal of Operations Research	1	0.58
32	Computation and Applied Mathematics	1	0.58
33	Decision Science Letters	1	0.58
34	Others	48	28.07
รวม		171	100

4.2 วิธีการค้นหาคำตอบที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับปัญหา GVRP และวัตถุประสงค์ที่พิจารณาในปัญหา

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่พิจารณาประเด็นด้านสิ่งแวดล้อม พบว่าวิธีการค้นหาคำตอบที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้กับปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะมีอย่างหลากหลาย โดยสามารถแบ่งกลุ่มได้ 3 ประเภท ได้แก่ 1) วิธีแบบประมาณค่า 2) วิธีแบบแม่นยำ และ 3) วิธีอื่น ๆ โดยแนวโน้มของกลุ่มวิธีการค้นหาคำตอบที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหา แสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 กลุ่มของวิธีการค้นหาคำตอบที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้

จากรูปที่ 6 จะเห็นได้ว่าวิธีการค้นหาคำตอบที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้มากที่สุด คือ วิธีแบบประมาณค่า รองลงมาคือวิธีแบบแม่นยำ โดยในวิธีแบบประมาณค่า มีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นทุกช่วงเวลาทั้งในอดีตและปัจจุบัน ซึ่งถือเป็นวิธีที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากสำหรับการแก้ปัญหา GVRP

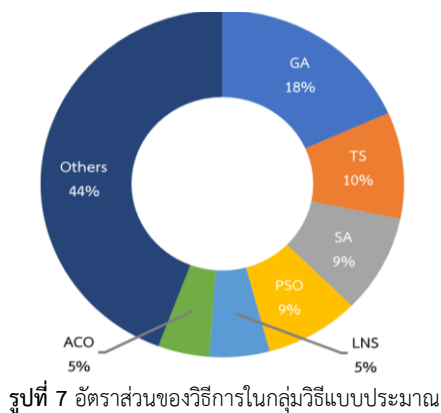
4.2.1 วิธีแบบประมาณค่า (Approximation methods) เป็นวิธีที่มีขั้นตอนสำหรับวิเคราะห์คำตอบ โดยคำตอบที่ได้รับจากวิธีการประเภทนี้เป็นคำตอบที่มีประสิทธิภาพ ภายใต้กรอบเวลาที่กำหนด ซึ่งคำตอบที่ได้ไม่สามารถการันตีได้ว่าเป็นคำตอบที่ดีที่สุด จากการทบทวนวรรณกรรม พบว่า ขั้นตอนวิธีที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาของกลุ่มวิธีแบบประมาณค่ามากที่สุด คือ ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (Genetic Algorithm: GA) งานวิจัยของ Adiba et al. (2013) Qian and Eglese (2014) He et al. (2015) Liao (2017) Rezaei et al. (2019) คิดเป็นอัตราส่วนร้อยละ 18 รองลงมาคือ วิธีการค้นหาแบบทาบู (Tabu Search: TS) เช่น งานวิจัยของ Maden et al. (2010) Jabali et al. (2012) Wang et al. (2019) คิดเป็นอัตราส่วนร้อยละ 10 ถัดมาคือ วิธีการจำลองการอบอ่อน (Simulated Annealing: SA) เช่น งานวิจัยของ Cirovic et al. (2014) Felipe et al. (2014) Rabbani et al. (2018) คิดเป็นอัตราส่วนร้อยละ 9 ส่วนการหาค่าเหมาะสมที่สุดแบบกลุ่มอนุภาค (Particle Swarm Optimisation: PSO) เช่น งานวิจัยของ Norouzi et al. (2017) Kumar et al. (2017) ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาคิดเป็นอัตราส่วนร้อยละ 9 สำหรับรูปที่ 7 แสดงอัตราส่วนของ

ขั้นตอนวิธีในกลุ่มวิธีแบบประมาณค่าที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหา และError! Reference source not found. สรุป

4.2.2 บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับปัญหา GVRP

4.2.3 วิธีแบบแม่นยำ (Exact methods) เป็นวิธีที่มีขั้นตอนสำหรับวิเคราะห์หาคำตอบ โดยคำตอบที่ได้รับจากวิธีการประเภทนี้เป็นคำตอบที่มีประสิทธิภาพ และสามารถการันตีได้ว่าคำตอบที่ได้จากวิธีนี้เป็นคำตอบที่ดีที่สุดจากการทบทวนวรรณกรรม พบว่า วิธีที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหาของกลุ่มวิธีแบบแม่นยำมากที่สุด คือ แบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์แบบ Mixed Integer Linear Programming (MILP) เช่น งานวิจัยของ Kopfer และคณะ [23] Munoz-Villamizar [131] Ferro และคณะ [137] คิดเป็นอัตราส่วนร้อยละ 36 รองลงมาคือ วิธีการหาคำตอบแบบ Branch and Price (BAP) งานวิจัยของ Kopfer et al. (2014) Munoz-Villamizar (2017) Ferro et al. (2018) คิดเป็นอัตราส่วนร้อยละ

4.2.4 ละ 3 รองลงมาคือ วิธีการหาคำตอบแบบ Branch and Price (BAP) เช่น งานวิจัยของ Yu et al. (2019) คิดเป็นอัตราส่วนร้อยละ 8 เช่นเดียวกันกับวิธีการหาคำตอบแบบ Branch and Cut (BC) เช่น งานวิจัยของ Koc and Karaoglan (2016) Sundar et al. (2017) ส่วนแบบจำลองเชิงคณิตศาสตร์แบบ Mixed Integer Nonlinear Programming (MINLP) เช่น งานวิจัยของ Soysal et al. (2018) Yu et al. (2019) คิดเป็นอัตราส่วนร้อยละ 7 นอกจากนี้ยังมีวิธีการหาคำตอบแบบ Branch-Cut and Price (BCP) เช่น งานวิจัยของ Fuksawa et al. (2018) โดยรูปที่ 8 แสดงอัตราส่วนของขั้นตอนวิธีในกลุ่มวิธีแบบแม่นยำที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหา และ Error! Reference source not found. สรุปบทความที่ได้รับการตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับปัญหา GVRP



รูปที่ 7 อัตราส่วนของวิธีการในกลุ่มวิธีแบบประมาณ

ตารางที่ 5 ตารางสรุปบทความที่เกี่ยวข้องกับปัญหา GVRP ที่ได้รับการตีพิมพ์ในฐานข้อมูลวิชาการนานาชาติจนถึงปัจจุบัน

ผู้แต่ง	วิธี			วัตถุประสงค์					
	วิธีแบบประมาณค่า	วิธีแบบแม่นยำ	วิธีอื่น ๆ	ต้นทุน			ไม่เกี่ยวกับต้นทุน	สิ่งแวดล้อม	สิ่งแวดล้อม
				การดำเนินงาน	การขนส่ง	การปล่อยก๊าซ	การบริโภคเชื้อเพลิง	ระยะเวลา	อัตราการใช้พลังงาน
Gen et al., 2009	HGA			☐	☐				
Simao et al., 2009	ADP							☐	
Maden et al., 2010	TS							☐	☐
Ubeda et al., 2011	SRB and							☐	
Erdogan et al., 2012	MCWS							☐	
Hollis & Green, 2012	SIA and							☐	
Jabali et al., 2012	TS				☐			☐	☐
Mohammadi et al., 2013	MOIWA			☐	☐			☐	
Adiba et al., 2013	GA							☐	☐
Adiba et al., 2013	HACS								☐
Gajanand et al., 2013	CG								☐
Cirovic et al., 2014	SA			☐					
Felipe et al., 2014	SA						☐		
Jovanovic et al., 2014			Fuzzy	☐					☐
Juan et al., 2014	MRH							☐	
Kim et al., 2014			RFID					☐	
Kopfer et al., 2014		MILP							☐
Lin et al., 2014	GA							☐	☐
Qian & Eglese, 2014		DP							☐
Ramos et al., 2014		MILP						☐	☐
Ramos et al., 2014	PF							☐	☐
Scheider et al., 2014	VNS with							☐	
Zhang et al., 2014	ABC				☐			☐	
Chand & Mohanty 2015	PPES							☐	☐
Goeke & Schneider, 2015	ALNS							☐	☐
He et al., 2015	GA and								☐
Jabbarpour et al., 2015	AVCAS								☐
Kramer et al., 2015	ILS-SOA-								☐
Naoum-Sawaya et al., 2015	SH							☐	
Norlund et al., 2015	Simulatio			☐					☐
Li-Ying & Yuan-Bin, 2015	AVNS with			☐		☐			
Tiwari & Chang, 2015	BR							☐	
Wang et al., 2015	MACO							☐	☐
Xiao & Konak, 2015	SA							☐	☐
Yang et al., 2015	HGA			☐					
Adiba et al., 2016	ACS							☐	☐
Afshar-Bakeshloo et al., 2016		MILP		☐	☐				
Alinaghian & Naderipour, 2016	IGF								☐
Bruglieri et al., 2016		MILP				☐			
Coelho et al., 2016	FN-VNS			☐	☐				
Dondo & Mendez 2016	BAP			☐	☐				

Error! Reference source not found. (ต่อ)

ผู้แต่ง	วิธี			วัตถุประสงค์					
	วิธีแบบประมาณค่า	วิธีแบบแม่นยำตรง	วิธีอื่น ๆ	ต้นทุน			ไม่เกี่ยวกับต้นทุน	สิ่งแวดล้อม	
				การดำเนินงาน	การขนส่ง	การปล่อยก๊าซ	การบริโภคเชื้อเพลิง	ระยะเวลา	อัตราใช้พลังงาน
Yu et al., 2017	SA-RS				□				
Abad et al., 2018	NRGA and			□					□
Chabot et al., 2018	ALNS				□			□	
Costa et al., 2018	PLS			□					□
Croce et al., 2018	PG								□
de Oliveira da Costa et al., 2018	GA								□
Ehmke et al., 2018	TS			□		□		□	□
Elgesem et al., 2018	Simulatio							□	
Faraji & Afshar-Nadjafi, 2018	GA and							□	
Ferro et al., 2018		MILP				□	□		
Fukasawa et al., 2018		BCP							□ □
Gao & Zhao, 2018	HSAA				□				□
Ghezavati et al., 2018	SA and			□	□				
Gifford et al., 2018	CG			□					
Affi et al., 2018	VNS					□			
Hamad et al., 2018			AHP	□			□ □		□
Hu et al., 2018	RTSP								□
Kancharla & Ramadurai, 2018		MILP							□
Kazemian et al., 2018		GT							□ □
Kumar & Kumar, 2018	GA				□ □				
Kong et al., 2018	PTO			□				□	
Li & Sun, 2018	GA							□	
Liu et al., 2018	C-HQIA			□		□ □			
Madankumar & Rajendran, 2018		MILP			□				
Niu et al., 2018	HTS								□
Niu et al., 2018	HTS					□ □			
Poonthalir & Nadarajan, 2018	TVa-						□		□
Rabbani et al., 2018	SA				□				□
Soleimani et al., 2018			Fuzzy				□		□
Sousa et al., 2018	ILS								□
Soysal et al., 2018		MINL		□		□			
Wang et al., 2018	IPSO and			□ □					
Wensing 2018	EA				□				□
Zhang et al., 2018	NNC and						□		
Abu Al Hla et al., 2019	GIN								□
Almira et al., 2019	INS							□	
Andelmin & Bartolini, 2019	MSLS					□ □			
Arroyo et al., 2019		MILP				□			
Basso et al., 2019		Form							□
Bravo et al., 2019	EA							□ □	
Bruglieri et al., 2019		MILP					□		
Bruglieri et al., 2019		MILP					□		
Bruglieri et al., 2019		CP					□		

Error! Reference source not found. (ต่อ)

ผู้แต่ง	วิธี			วัตถุประสงค์						
	วิธีแบบประมาณค่า	วิธีแบบแม่นยำตรง	วิธีอื่น ๆ	ต้นทุน			ไม่ เกี่ยวกับ ต้นทุน	สิ่ง แวดล้อม		
				การดำเนินงาน	การขนส่ง	การปล่อยก๊าซ				
				การปรับโมด	ระยะเวลา	ระยะทาง	อัตราใช้พลังงาน	อัตราการใช้พลังงาน	อัตราการใช้พลังงาน	อัตราการใช้พลังงาน
Chiang et al., 2019	GA									
Dukkanci et al., 2019	ILS									
Eskandarpour et al., 2019	EMDLS									
Fallah et al., 2019	DE									
Fallah et al., 2019	IDE									
Ghannadpour & Zarrabi, 2019	EA									
Goeke, 2019	GTS									
Guo & Guo, 2019	GrA									
Han et al., 2019		MILP								
Henke et al., 2019		BC								
Heshmati et al., 2019	GA									
Hooshmand & Mirhassani, 2019	GRASP									
Khalafi & Zarei, 2019			Fuzzy							
Koyuncu & Yavuz, 2019		MILP								
Li et al., 2019	PSO and									
Li et al., 2019	IACO									
Li et al., 2019	TS and									
Macrina et al., 2019	ILS									
Macrina et al., 2019	HLNS									
Mahmoudi et al., 2019		DP								
Normasari et al., 2019	SA									
Erdem & Koc, 2019	GA and									
Poonthalir et al., 2019	e-CRO									
Reyes-Rubiano et al., 2019	Simulatio									
Rezaei et al., 2019	GA and									
Schroder & Cabral, 2019		DEM								
Serrano-Hernandez & Faulin, 2019	BRS									
Soon et al., 2019		PHMA								
Soon et al., 2019	MD k-SP									
Sruthai et al., 2019	GA									
Wang et al., 2019	TS									
Wang & Lu, 2019	MAC									
Wang et al., 2019	HGA									
Wang et al., 2019	CWSHA									
Xiao et al., 2019		MILP								
Xin et al., 2019	CG									
Xu et al., 2019	NSGA-II									
Yu et al., 2019		BAP								
Yu et al., 2019		MINL								
Yu et al., 2019	DRL									
Zhang et al., 2019	LANDCO									
Zhen et al., 2019	IPSO									
Zhou et al., 2019	GA and									

Error! Reference source not found. (ต่อ)

ผู้แต่ง	วิธี			วัตถุประสงค์						
	วิธีแบบประมาณค่า	วิธีแบบแม่นยำตรง	วิธีอื่น ๆ	ต้นทุน			ไม่ เกี่ยวกับ ต้นทุน	สิ่ง แวดล้อม		
				การดำเนินงาน	การขนส่ง	การปล่อยก๊าซ				
				การปรับโมด	ระยะเวลา	ระยะทาง	อัตราใช้พลังงาน	อัตราการใช้พลังงาน	อัตราการใช้พลังงาน	อัตราการใช้พลังงาน
Zhu & Hu, 2020	HH									

หมายเหตุ HGA = Hybrid Genetic Algorithm; ADP = Approximate Dynamic Programming; ALNS = Adaptive Large Neighborhood Search; TS = Tabu Search; SH = Saving Heuristic MRH = Multi Round Heuristic; SRB and NNI = Sequential route building and the nearest neighbor insertion; ILS = Iterated Local Search; HACS = Hybrid Ant Colony System PF = Pareto Front; MOWA = Multi Objective Invasive Weed Optimization; SA = Simulated Annealing; CG = Column Generation; MILP = Mixed Integer Linear Programming VNS with TS = Variable Neighborhood Search with Tabu Search; MCWS and DBC = The Modified Clark and Wright Saving Heuristics and Density-Based Clustering GA = Genetic Algorithm; ABC = A Hybrid Artificial Bee Colony; DP = Dynamic Programming; SIA and GLSA = Sequential Insertion Algorithm and Guided Local Search PPES = Predator Prey Evolutionary Strategy; PSO = Particle Swarm Optimization; ACO = Ant Colony Optimization; BR = Block Recombination; IGF = Improved Gaussian Firefly BCP = Branch-Cut and Price Algorithm; MOGA = Multi Objective Genetic Algorithm; MOGE = A Many Objective Gradient Evolution; MACO = Multimetric Ant Colony Algorithm AVCAS and SIDRA = Ant-Based Vehicle Congestion Avoidance System Signalized Intersection Design and Research Aid; ACS = Ant Colony System; BC = Branch and Cut ILS-SOA-SP = Integrated Iterated Local Search with A Set Partitioning Procedure and A Speed Optimization Algorithm; GEET = Greening via Energy and Emission in Transportation AVNS with TS = An Adaptive Variable Neighborhood Search with Tabu Search; MSH = Multi-Space Sampling Heuristic; FN-VNS = Four-Neighborhood Variable Neighborhood Search P-MIP-INS = A Hybrid Algorithm of Partial MIP Optimization and Iterative Neighborhood Search; BAP = Branch and Price Algorithm; IPSO = Improved Particle Swarm Optimization AMABC = An Adaptive Memory Artificial Bee Colony; VNSB = Variable Neighborhood Search Local Branching; NSGA - II = Non-Dominated Sorting Genetic Algorithm II; EC = Epsilon Constraint; MOSPOOLS = Multi-Objective Smart Pool Search; MIQP = Mixed Integer Quadratic Programming; PS = Path Selection Algorithm; RO = Robust Optimization DEM = Digital Elevation Model; TPH = Three-Phase Heuristic; HACO = Hybrid Ant Colony Optimization; MCMC-RORO = Multicompartment Roll-on and Roll-off AIS and PSO = Artificial Immune System and Particle Swarm Optimization; K - PC = K - Path Cuts; MINLP = Mixed Integer Nonlinear Programming; LG = Lexicographic Method LNS = Large Neighborhood Search; MOIP = Multi Objective Integer Programming; RDP = Restricted Dynamic Programming; MPSO = Modified Particle Swarm Optimization CMEM = Comprehensive Modal Emission Model; GA-DP = Genetic Algorithm with dynamic programming; IBS = Iterated Beam Search; PG = Path Generation SA- RS = Simulated Annealing with A Re-Strategy; MOPSO = Multi Objective Particle Swarm Optimization; PLS = Pareto Local Search; AHP = Analytic Hierarchy Process NRGA = Non Dominated Ranking Genetic Algorithm; HSAA = A hybrid Tabu Search Improved Simulated Annealing; GT = Graph Transformation; EA = Evolution Algorithm SA and SMPSA = Simulated Annealing and The Self-Modifier of Probability of Section Approach; RTSP = Real Time Shortest Path; HTS = Hybrid Tabu Search C-HQIA = Hybrid Quantum Immune Algorithm Based on Cloud Model; PTO = Polynomial Time Optimization; VND = Variable Neighborhood Descent; CP = Cutting Planes GTS = Granular Tabu Search; TVa-PSOGMO = Particle Swarm Optimization with Greedy Mutation Operator and Time Varying Acceleration Coefficient; HH = Hybrid Heuristic

GIN = Greedy and The Intra-Route Neighborhood; NNC and ACS = Nearest Neighbor Criteria and Ant Colony System; MSLS = Multi-Start Local Search Heuristic
DE = Differential Evolution; GRASP = Greedy Randomized Adaptive Search Procedure and Simulated Annealing; IDE = Improved Differential Evolution Algorithm
DRL = Deep Reinforcement Learning Algorithm; PHMAS = Pheromone- Based Hierarchical Multi Agent System; HLNS = Hybrid Large Neighborhood Search; GR = Greedy Algorithm

4.2.3 วิธีอื่น ๆ (Other methods) นอกเหนือจากกลุ่มวิธีการค้นหาคำตอบที่ได้กล่าวมาข้างต้นแล้วปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่พิจารณาประเด็นด้านสิ่งแวดล้อม ยังมีวิธีอื่น ๆ ที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการแก้ปัญหา ยกตัวอย่างเช่น การนำเทคโนโลยี Radio Frequency Identification (RFID) เข้ามาช่วยแก้ปัญหา ได้แก่ งานวิจัยของ Kim et al. (2014) หรือทฤษฎีตรรกศาสตร์คลุมเครือ (Fuzzy Logic) ได้แก่ งานวิจัยของ Jovanovic et al. (2014) Soleimani et al. (2018) โดยError! Reference source not found. สรุปบทความที่ได้รับการตีพิมพ์ที่เกี่ยวข้องกับปัญหา GVRP

จากError! Reference source not found. ซึ่งเป็นตารางสรุปการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับปัญหา GVRP ที่ได้รับการตีพิมพ์ในฐานข้อมูลวิชาการระดับนานาชาติจนถึงปี พ.ศ. 2562 นอกจากวิธีที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในปัญหานี้ตามที่กล่าวไว้ในหัวข้อที่ 4.2.1 – 4.2.3 แล้วนั้น ในส่วนของวัตถุประสงค์ของปัญหา GVRP มุ่งเน้นไปที่ 3 ประเด็นหลัก ๆ ได้แก่ 1) ปัญหา GVRP ที่มีวัตถุประสงค์ในการหาผลเฉลยที่เกี่ยวข้องกับต้นทุน ยกตัวอย่างเช่น การหาผลเฉลยที่มีต้นทุนที่เกิดจากการบริโภคพลังงานเชื้อเพลิงที่ต่ำที่สุด หรือการหาผลเฉลยที่มีต้นทุนการปล่อยก๊าซเรือนกระจกต่ำที่สุด 2) ปัญหา GVRP ที่มีวัตถุประสงค์ในการหาผลเฉลยไม่เกี่ยวข้องกับต้นทุน เช่น การหาระยะทางที่ต่ำที่สุด หรือ การหาเวลาที่ใช้ในการขนส่งต่ำที่สุด และ 3) ปัญหา GVRP ที่มีวัตถุประสงค์ในการหาผลเฉลยที่เกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อม ยกตัวอย่างเช่น การหาอัตราการบริโภคพลังงานเชื้อเพลิงที่ต่ำที่สุด หรืออัตราการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่ต่ำที่สุด สำหรับวัตถุประสงค์ที่ถูกพิจารณามากที่สุดปัญหา GVRP 3 อันดับแรก ได้แก่ การหาอัตราการบริโภคเชื้อเพลิงที่ต่ำที่สุด รองลงมาคือ การหาระยะทางสำหรับการขนส่งที่ต่ำที่สุด และสุดท้าย คือ การหาอัตราการปล่อยก๊าซเรือนกระจกที่ต่ำที่สุด

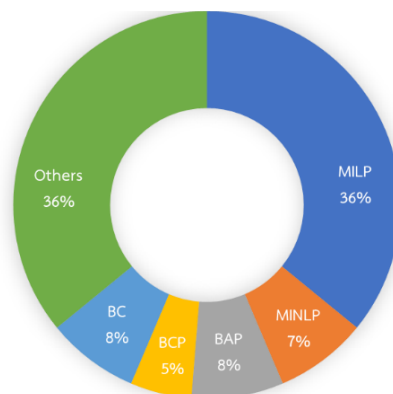
4.3 ประเภทกลุ่มยานพาหนะที่ถูกพิจารณา AFV และ Non-AFV

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่พิจารณาประเด็นด้านสิ่งแวดล้อมสามารถสรุปได้ว่า ประเภทของกลุ่มยานพาหนะที่ถูกนำมาพิจารณาในบทความแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม คือ 1) กลุ่มของยานพาหนะที่ใช้พลังงานเชื้อเพลิงแบบเดิมยานพาหนะที่ใช้พลังงานจากน้ำมัน

BRS = A Biased Randomization Saving Algorithm; e-CRO = Enhanced Chemical Reaction Optimization; IACO = Improved Ant Colony Optimization; Swa = Sweep Algorithm

MD k-SP = Modified Dynamic K – Shortest Path Algorithm; MAC = Memetic Algorithm with Competition; CWSHA = Clarke and Wright Saving Heuristic

เชื้อเพลิง (Gasoline or Diesel vehicles: GDV/Non-AFV) และ 2) กลุ่มของยานพาหนะที่ใช้พลังงานทางเลือก (Alternative fuel vehicle) ซึ่งข้อแตกต่างระหว่างยานพาหนะที่ใช้พลังงานเชื้อเพลิงกับยานพาหนะที่ใช้พลังงานทางเลือก คือ 1) ยานพาหนะที่ใช้พลังงานทางเลือกมีระยะทางในการขับขี่จำกัด 2) ยานพาหนะที่ใช้พลังงานทางเลือกยังขาดแคลนสถานีให้บริการเชื้อเพลิง และ 3) ยานพาหนะที่ใช้พลังงานทางเลือกใช้เวลาในการเติมเชื้อเพลิงนานกว่ายานพาหนะที่ใช้พลังงานเชื้อเพลิง (Koyuncu & Yavuz, 2019)

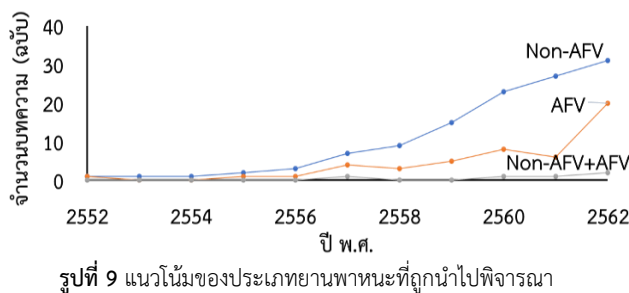


รูปที่ 8 อัตราส่วนของขั้นตอนวิธีในกลุ่มวิธีแบบแมนตรง

การพิจารณากลุ่มยานพาหนะในปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่เกี่ยวข้องประเด็นด้านสิ่งแวดล้อม พบว่า มีบทความที่พิจารณากลุ่มของยานพาหนะที่ใช้พลังงานเชื้อเพลิงแบบเดิม มากกว่ากลุ่มยานพาหนะที่ใช้พลังงานเชื้อเพลิงทางเลือก โดยบทความที่พิจารณากลุ่มของยานพาหนะที่ใช้พลังงานเชื้อเพลิงแบบเดิมคิดเป็นอัตราส่วนร้อยละ 68.96 ยกตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ Simao et al. (2009) Jabali et al. (2012) Liao (2017) Ehmke et al. (2018) Bravo et al. (2019) ส่วนบทความที่พิจารณากลุ่มของยานพาหนะที่ใช้พลังงานทางเลือกคิดเป็นอัตราส่วนร้อยละ 28.16 ยกตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ Erdogan & Miller-Hooks (2012) Juan et al. (2014) Karmer et al. (2015) Bruglieri et al. (2017) Goeke (2019)

นอกเหนือจากนั้น บทความที่พิจารณากลุ่มยานพาหนะที่ใช้ทั้งพลังงานเชื้อเพลิงและพลังงานทางเลือกคิดเป็นอัตราส่วนร้อยละ 2.87 ยกตัวอย่างเช่น งานวิจัยของ Cirovic et al. (2014) Macrina et al. (2019) สำหรับแนวโน้มของบทความ

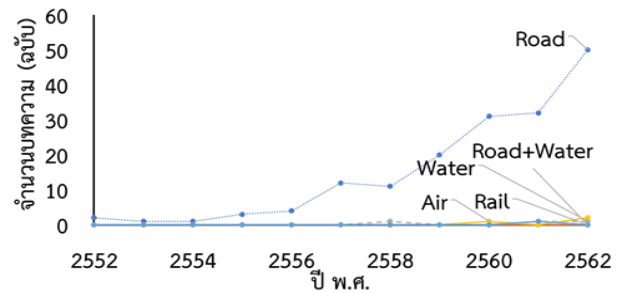
ที่มีการพิจารณาเฉพาะกลุ่มยานพาหนะที่ใช้พลังงานเชื้อเพลิง
บทความที่มีการพิจารณาเฉพาะกลุ่มยานพาหนะที่ใช้พลัง
ทางเลือก และบทความที่พิจารณาทั้งกลุ่มยานพาหนะที่ใช้
พลังงานเชื้อเพลิง และพลังงานทางเลือก ทั้งในช่วงอดีต และ
ช่วงปัจจุบัน แสดงในรูปที่ 9 ซึ่งจะเห็นได้ว่าการพิจารณากลุ่ม
ยานพาหนะที่ใช้พลังงานเชื้อเพลิงยังคงเป็นที่นิยมตั้งแต่ในอดีต
จนถึงปัจจุบัน การพิจารณากลุ่มยานพาหนะที่ใช้พลังงาน
เชื้อเพลิง ร่วมกับกลุ่มยานพาหนะที่ใช้พลังงานทางเลือกยังไม่
เป็นที่นิยมมากนัก



รูปที่ 9 แนวโน้มของประเภทยานพาหนะที่นำไปพิจารณา

4.4 โหมดการขนส่งที่ถูกพิจารณาในปัญหาการจัดเส้นทาง ยานพาหนะที่พิจารณาประเด็นด้านสิ่งแวดล้อม

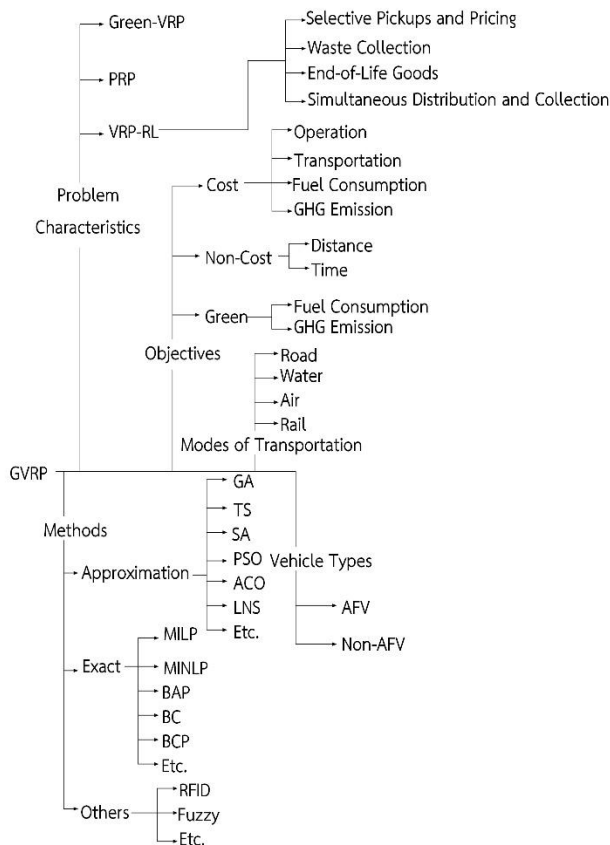
โหมดการขนส่งโดยทั่วไปแบ่งออกได้เป็น 4 โหมดหลัก
ได้แก่ 1) ทางถนน การขนส่งที่ผ่านทางถนน ถือเป็นการขนส่ง
ที่ได้รับความนิยมมากที่สุด เนื่องจากสามารถขนส่งได้รวดเร็ว
และทันตามกำหนดเวลา มีความยืดหยุ่นสูง และเป็นการขนส่ง
แบบถึงที่หรือถึงมือผู้รับได้ในทันที (Door to door) 2) ทางน้ำ
การขนส่งที่ผ่านทางน้ำหรือทางทะเล โดรนส่วนใหญ่ใช้ในการ
ขนส่งสินค้าที่ระยะทางที่ไกล ซึ่งใช้มหาสมุทร ทะเล ทะเลสาบ
หรือแม่น้ำ เป็นเส้นทางในการเดินเรือ เพื่อขนส่งสินค้าไปยัง
ปลายทาง 3) ทางราง การขนส่งผ่านทางราง คือ การขนส่งที่
ผ่านทางรางโดยใช้ที่มีล้อวิ่งติดกับราง (รถไฟ) และ 4) ทาง
อากาศ การขนส่งประเภทนี้ใช้เครื่องบินเป็นยานพาหนะในการ
ขนส่ง การขนส่งประเภทนี้มีต้นทุนการขนส่งที่ค่อนข้างสูง โดย
แนวโน้มของโหมดการขนส่งที่ถูกนำมาพิจารณา ดังแสดงใน
รูปที่ 10



รูปที่ 10 แนวโน้มโหมดการขนส่งที่ถูกพิจารณาในอดีตถึงปัจจุบัน

จากรูปที่ 10 พบว่า โหมดการขนส่งทางถนน เป็นโหมด
การขนส่งที่ถูกนำมาพิจารณาในบทความมากที่สุดร้อยละ
95.98 ส่วนโหมดการขนส่งที่ถูกพิจารณาเป็นอันดับต่อมา ได้แก่
โหมดการขนส่งทางอากาศ และทางน้ำ ซึ่งมีอัตราส่วนที่เท่ากัน
คือ ร้อยละ 1.72 ส่วนการขนส่งทางราง พบว่ายังไม่ถูกนำมา
พิจารณาในบทความที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการจัดเส้นทาง
ยานพาหนะที่พิจารณาประเด็นด้านสิ่งแวดล้อม และการขนส่ง
ต่อเนื่องหลายรูปแบบ (Multimodal transportation) ถูก
นำมาพิจารณาคิดเป็นร้อยละ 0.57

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับปัญหา GVRP พบว่า
บทความในกลุ่มของปัญหา GVRP สามารถสรุปได้ดังรูปที่ 11
เป็นการสรุปประเด็นต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับปัญหา GVRP ที่ได้
จากการทบทวนวรรณกรรม ไม่ว่าจะเป็น ลักษณะของปัญหาที่
แบ่งออกเป็น 3 ลักษณะ คือ 1) ปัญหา Green-VRP 2) ปัญหา
PRP และ 3) ปัญหา VRP-RL วัตถุประสงค์ของปัญหาซึ่งแบ่ง
ออกเป็น 3 กลุ่มหลัก คือ 1) กลุ่มที่เกี่ยวข้องกับต้นทุน (Cost)
ได้แก่ ต้นทุนการดำเนินงาน (Operation) ต้นทุนการขนส่ง
(Transportation) ต้นทุนการบริโภคพลังงานเชื้อเพลิง (Fuel
consumption) ต้นทุนการปล่อยก๊าซเรือนกระจก (GHG
Emission) 2) กลุ่มที่ไม่เกี่ยวข้องกับต้นทุน ได้แก่ ระยะทาง
(Distance) และ เวลาในการเดินทาง (Time) และ 3) กลุ่มที่
เกี่ยวข้องกับสิ่งแวดล้อม (Green) ได้แก่ อัตราการบริโภค
พลังงานเชื้อเพลิง (Fuel consumption) และอัตราการปล่อย
ก๊าซเรือนกระจก (GHG Emission)



รูปที่ 11 แผนภาพสรุปประเภทของปัญหา GVRP

วิธีที่ถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหา ซึ่งแบ่งออกเป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ 1) วิธีแบบประมาณค่า (Approximation methods) เช่น GA SA และอื่น ๆ 2) วิธีแบบแม่นยำ (Exact methods) เช่น MILP MINLP และอื่น ๆ และ 3) วิธีอื่น ๆ เช่น RFID ประเภทของยานพาหนะที่ถูกนำมาพิจารณา ไม่ว่าจะเป็น AFV และ Non-AFV และสุดท้ายนี้โหมดการขนส่งที่พิจารณาได้แก่ โหมดการขนส่งทางถนน โหมดการขนส่งทางน้ำ โหมดการขนส่งทางอากาศ และโหมดการขนส่งทางราง ดังแสดงในรูปที่ 11

5. การคาดการณ์ช่วงอนาคตของปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่พิจารณาประเด็นด้านสิ่งแวดล้อม

ในหัวข้อนี้จะเป็นการคาดการณ์แนวโน้มของบทความที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่พิจารณาประเด็นด้านสิ่งแวดล้อมในอนาคต เริ่มตั้งแต่ ปี พ.ศ. 2563 เป็นต้นไป โดยการคาดการณ์แนวโน้มนี้เป็นการคาดการณ์จากแนวทางที่ได้รับความนิยมจากนักวิจัย และช่องทางการวิจัย (Research gaps and opportunities) ที่ไม่ได้รับความนิยมจากนักวิจัยในอดีตที่ผ่านมา

5.1 แนวทางการวิจัยที่ได้รับความนิยม

จากการทบทวนวรรณกรรมของปัญหา GVRP ที่ผ่านมา ในช่วงอดีตจนถึงปัจจุบันพบว่า ปัญหาประเภท Green-VRP เป็นประเภทที่ได้รับความนิยมมากที่สุดและมีแนวโน้มที่จะเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ส่วนของวิธีการแก้ปัญหาที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้มากที่สุด คือ วิธีแบบประมาณค่า โดยมีการประยุกต์ใช้ขั้นตอนวิธีเชิงพันธุกรรม (GA) มากที่สุด รองลงมา คือ วิธีการจำลองการอบอ่อน (SA) ประเภทของกลุ่มยานพาหนะที่ถูกนำมาพิจารณามากที่สุด คือ กลุ่มยานพาหนะประเภทใช้พลังงานเชื้อเพลิงแบบดั้งเดิม โดยส่วนใหญ่บทความเน้นที่การปรับปรุงเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการขนส่ง ส่วนโหมดการขนส่งที่ถูกนำมาพิจารณามากที่สุด คือ โหมดการขนส่งทางถนน สำหรับวัตถุประสงค์ที่ถูกพิจารณามากที่สุดในกลุ่มของปัญหา GVRP คือ การพิจารณาหาอัตราการใช้เชื้อเพลิงของยานพาหนะ คิดเป็นอัตราส่วนร้อยละ 28.65

5.2 ช่องทางการวิจัย (Research gaps)

จากการทบทวนวรรณกรรมในกลุ่มของปัญหา GVRP พบบทความที่เกี่ยวข้องกับปัญหา PRP คิดเป็นอัตราส่วนร้อยละ 5.26 ส่วนบทความที่เกี่ยวข้องกับปัญหา VRP-RL คิดเป็นอัตราส่วนร้อยละ 7.60 ซึ่งสังเกตได้ว่าปัญหาทั้ง 2 ประเภทนี้ยังไม่ได้รับความนิยมเท่ากับปัญหาประเภท Green-VRP ในส่วนของวิธีการแก้ปัญหา พบว่า บทความที่ถูกแก้ปัญหาดังกล่าวมีเพียง 39 บทความ คิดเป็นอัตราส่วนร้อยละ 22.80 สำหรับการพิจารณาประเภทยานพาหนะที่ใช้พลังงานเชื้อเพลิงดั้งเดิมร่วมกับกลุ่มยานพาหนะที่ใช้พลังงานทางเลือก ในอดีตที่ผ่านมาพบบทความที่พิจารณากลุ่มยานพาหนะทั้งสองประเภทนี้ทั้งหมด 5 บทความ นอกเหนือจากนั้นที่ผ่านมา มีเพียง 1 บทความที่มีการพิจารณาโหมดการขนส่งมากกว่า 1 โหมดการขนส่ง และวัตถุประสงค์ในการพิจารณาถึงต้นทุนการปล่อยก๊าซเรือนกระจกถูกนำมาพิจารณาเพียงร้อยละ 7.01

นอกจากนี้แล้วประเด็นของช่องทางการวิจัย ที่ได้จากบทความต่าง ๆ สำหรับการพัฒนางานวิจัยในปัญหา GVRP ยกตัวอย่างเช่น การพิจารณาหาอัตราการใช้เชื้อเพลิง ควรคำนึงถึงลักษณะทางกายภาพของถนน การพิจารณาหาอัตราความเร็วที่เหมาะสมสำหรับยานพาหนะ การพิจารณาถึงความไม่แน่นอนของเวลาในการเดินทาง

6. บทสรุป

บทความนี้นำเสนอการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่พิจารณาประเด็นด้านสิ่งแวดล้อม โดยได้นำเสนอที่มาของปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่พิจารณาประเด็นด้านสิ่งแวดล้อม การจำแนกลักษณะของปัญหา บทความที่ตีพิมพ์ในหัวข้อของปัญหาการจัด

เส้นทางยานพาหนะที่พิจารณาประเด็นด้านสิ่งแวดล้อมแบ่งตามประเภท และรวมถึงการรวบรวมข้อมูลจากการทบทวนวรรณกรรม เพื่อทราบถึงที่มาของปัญหา GVRP ตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน และเสนอแนะแนวโน้มในช่วงอนาคตสำหรับการจัดทำบทความวิจัยในหัวข้อของปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะที่พิจารณาประเด็นด้านสิ่งแวดล้อม

สรุปแนวทางสำหรับการพัฒนาปัญหา GVRP เพื่อต่อยอดในการจัดทำงานวิจัยในอนาคต หากนักวิจัยที่สนใจในการพัฒนาปัญหา GVRP อาจมุ่งเน้นไปที่การพิจารณายานพาหนะทั้งชนิดที่ใช้พลังงานเชื้อเพลิงแบบดั้งเดิม ร่วมกันกับยานพาหนะชนิดที่ใช้พลังงานเชื้อเพลิงทางเลือก การพิจารณาโหมดการขนส่ง ควรพิจารณาโหมดการขนส่งอื่น ๆ ร่วมด้วย นอกเหนือจากทางถนน หรือพิจารณาถึงรูปแบบการขนส่งต่อเนื่องหลายรูปแบบ เพื่อเพิ่มความซับซ้อนของปัญหา สำหรับวัตถุประสงค์ของปัญหา อาจมุ่งเน้นไปที่การหาอัตราการใช้ของพลังงานเชื้อเพลิง หรือการหาต้นทุนการปล่อยก๊าซเรือนกระจก

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้แต่งบทความคนแรก ขอแสดงความขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ที่ได้มอบทุนการศึกษาตลอดหลักสูตร ในการศึกษาระดับปริญญาโท หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิศวกรรมการจัดการ ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

8. เอกสารอ้างอิง

Abad, H.K.E., Vahdani, B., Sharifi, M. , & Etebari, F. (2018). A bi-objective model for pickup and delivery pollution-routing problem with integration and consolidation shipments in cross-docking system. *Journal of Cleaner Production*, 193, 784-801.

Abu Al Hla, Y., Othman, M., & Saleh, Y. (2019). Optimising an eco-friendly vehicle routing problem model using regular and occasional drivers integrated with driver behaviour control. *Journal of Cleaner Production*, 234, 984-1001.

Adiba, E.B.E.I., Ahmed, E.H.A., & Youssef, B. (2013). A genetic algorithm for optimizing the amount of emissions of greenhouse GAZ for capacitated vehicle routing problem in green transportation. *International Journal of Soft Computing*, 8(6), 406-415.

Adiba, E.B.E.I., Elhassania, M., & Ahemd, E.H.A. (2013). A hybrid ant colony system for green capacitated vehicle routing problem in sustainable transport. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 54(2), 198-208.

Adiba, E.L.B.E.I., Elhassania, M., & Ahemd, E.A. (2016). A hybrid metaheuristic to minimize the carbon dioxide emissions and the total distance for the vehicle routing problem. *International Journal of Soft Computing*, 11(6), 409-417.

Affi, M., Derbel, H., & Jarboui, B. (2018). Variable neighborhood search algorithm for the green vehicle routing problem. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 9(2), 195-204.

Afshar-Bakeshloo, M., Mehrabi, A., Safari, H., Maleki, M., & Jolai, F. (2016). A green vehicle routing problem with customer satisfaction criteria. *Journal of Industrial Engineering International*, 12(4), 529-544.

Alinaghian, M. , & Naderipour, M. (2016). A novel comprehensive macroscopic model for time- dependent vehicle routing problem with multi- alternative graph to reduce fuel consumption: A case study. *Computers and Industrial Engineering*, 99, 10-222.

Almira, Mawengkang, H., Suwilo, S., & Tulus. (2019). Green open vehicle routing and scheduling problem considering the time spent in traffic congestion. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 7(6), 1452-1455.

Andelmin, J., & Bartolini, E. (2017). An exact algorithm for the green vehicle routing problem. *Transportation Science*, 51(4), 1288-1303.

Andelmin, J., & Bartolini, E. (2019). A multi-start local search heuristic for the green vehicle routing problem based on a multigraph reformulation. *Computers and Operations Research*, 109, 43-63.

Arroyo, J. L., Felipe, Á., Ortuño, M.T., & Tirado, G. (2019). Effectiveness of carbon pricing policies for promoting urban freight electrification: analysis of last mile delivery in Madrid. *Central European Journal of Operations Research*, 28, 1417-1440

Basso, R., Kulcsár, B., Egardt, B., Lindroth, P., & Sanchez-Diaz, I. (2019). Energy consumption estimation integrated into the electric vehicle routing problem. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 69, 141-167.

Behnke, M., & Kirschstein, T. (2017). The impact of path selection on GHG emissions in city logistics. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 106, 320-336.

Bektaş, T., & Laporte, G. (2011). The pollution-routing problem. *Transportation Research Part B: Methodological*, 45(8), 1232-1250.

Bravo, M., Rojas, L. P. , & Parada, V. (2019). An evolutionary algorithm for the multi- objective pick- up and delivery pollution-routing problem. *International Transactions in Operational Research*, 26(1), 302-317.

- Bruglieri, M., Mancini, S., & Pisacane, O. (2019). More efficient formulations and valid inequalities for the green vehicle routing problem. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 105, 283-296.
- Bruglieri, M., Mancini, S., & Pisacane, O. (2019). The green vehicle routing problem with capacitated alternative fuel stations. *Computers and Operations Research*, 112, 1-12.
- Bruglieri, M., Mancini, S., Pezzella, F., & Pisacane, O. (2016). A new mathematical programming model for the green vehicle routing problem. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 55, 89-92.
- Bruglieri, M., Mancini, S., Pezzella, F., & Pisacane, O. (2019). A path-based solution approach for the green vehicle routing problem. *Computers and Operations Research*, 103, 109-122.
- Bruglieri, M., Mancini, S., Pezzella, F., Pisacane, O., & Suraci, S. (2017). A three-phase matheuristic for the time-effective electric vehicle routing problem with partial recharges. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 58, 95-102.
- Camm, J.D., Magazine, M.J., Kuppusamy, S., & Martin, K. (2017). The demand weighted vehicle routing problem. *European Journal of Operational Research*, 262(1), 151-162.
- Chabot, T., Bouchard, F., Legault-Michaud, A., Renaud, J., & Coelho, L.C. (2018). Service level, cost and environmental optimization of collaborative transportation. *Transportation Research Part E- Logistics and Transportation Review*, 110, 1-14.
- Chand, P., & Mohanty, J. R. (2015). Environmental multi objective uncertain transport trail model using variant of predator prey evolutionary strategy. *International Journal of Applied Decision Sciences*, 8(1), 21-51.
- Chiang, W.C., Li, Y., Shang, J., & Urban, T.L. (2019). Impact of drone delivery on sustainability and cost: realizing the UAV potential through vehicle routing optimization. *Applied Energy*, 242, 1164-1175.
- Çimen, M., & Soysal, M. (2017). Time-dependent green vehicle routing problem with stochastic vehicle speeds: An approximate dynamic programming algorithm. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 54, 82-98.
- Ćirović, G., Pamučar, D., & Božanić, D. (2014). Green logistic vehicle routing problem: Routing light delivery vehicles in urban areas using a neuro-fuzzy model. *Expert Systems with Applications*, 41(9), 4245-4258.
- Coelho, B.N., Coelho, V.N., Coelho, I.M., Ochi, L.S., Haghazadeh, K., Zuidema, D., Lima, M.S.F., & da Costa, A.R. (2017). A multi-objective green UAV routing problem. *Computers and Operations Research*, 88, 306-315.
- Coelho, I.M., Munhoz, P.L.A., Ochi, L.S., Souza, M.J.F., Bentes, C., & Farias, R. (2016). An integrated CPU-GPU heuristic inspired on variable neighbourhood search for the single vehicle routing problem with deliveries and selective pickups. *International Journal of Production Research*, 54(4), 945-962.
- Cooke, K. L., & Halsey, E. (1966). The shortest route through a network with time-dependent internodal transit times. *Journal of Mathematical Analysis and Applications*, 14(3), 493-498.
- Costa, L., Lust, T., Kramer, R., & Subramanian, A. (2018). A two-phase Pareto local search heuristic for the bi-objective pollution-routing problem. *Networks*, 72(3), 311-336.
- Croce, A., Musolino, G., Rindone, C., & Vitetta, A. (2018). From green energy to green logistic: a joint analysis of energy, accessibility and mobility. *Advances in Modelling and Analysis A*, 55(3), 121-127.
- Dabia, S., Demir, E., & Van Woensel, T. (2017). An exact approach for a variant of the pollution-routing problem. *Transportation Science*, 51(2), 607-628.
- Dantzig, G. B., & Ramser, J. H. (1959). The Truck Dispatching Problem. *Management Science*, 6(1), 80-91.
- de Oliveira da Costa, P.R., Mauceri, S., Carroll, P., & Pallonetto, F. (2018). A genetic algorithm for a green vehicle routing problem. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 64, 65-74.
- Dekker, R., Fleischmann, M., Inderfurth, K., van Wassenhove, L. N., (2013). *Reverse logistics: quantitative models for closed-loop supply chains*. Springer Science & Business Media.
- Dell'Amico, M., Righini, G., & Salani, M. (2006). A Branch-and-Price Approach to the Vehicle Routing Problem with Simultaneous Distribution and Collection. *Transportation Science*, 40, 235-247.
- Dondo, R.G., & Mendez, C.A. (2016). Operational planning of forward and reverse logistic activities on multi-echelon supply-chain networks. *Computers & Chemical Engineering*, 88, 170-184.
- Dukkanci, O., Kara, B.Y., & Bektaş, T. (2019). The green location-routing problem. *Computers and Operations Research*, 105, 187-202.
- Ehmke, J.F., Campbell, A.M., & Thomas, B.W. (2016). Vehicle routing to minimize time-dependent emissions in urban areas. *European Journal of Operational Research*, 251(2), 478-494.
- Ehmke, J.F., Campbell, A.M., & Thomas, B.W. (2018). Optimizing for total costs in vehicle routing in urban areas. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 116, 242-265.

- Elgesem, A. S., Skogen, E. S., Wang, X., & Fagerholt, K. (2018). A traveling salesman problem with pickups and deliveries and stochastic travel times: An application from chemical shipping. *European Journal of Operational Research*, 269(3), 844-859.
- Ene, S., Kucukoglu, I., Aksoy, A., & Ozturk, N. (2016). A hybrid metaheuristic algorithm for the green vehicle routing problem with a heterogeneous fleet. *International Journal of Vehicle Design*, 71(1-4), 75-102.
- Erdem, M., & Koç, Ç. (2019). Analysis of electric vehicles in home health care routing problem. *Journal of Cleaner Production*, 234, 1471-1483.
- Erdogan, S., & Miller-Hooks, E. (2012). A green vehicle routing problem. *Transportation Research Part E-Logistics and Transportation Review*, 48(1), 100-114.
- Eshtehadi, R., Fathian, M., & Demir, E. (2017). Robust solutions to the pollution-routing problem with demand and travel time uncertainty. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 51, 351-363.
- Eskandarpour, M., Ouelhadj, D., Hatami, S., Juan, A. A., & Khosravi, B. (2019). Enhanced multi-directional local search for the bi-objective heterogeneous vehicle routing problem with multiple driving ranges. *European Journal of Operational Research*, 277(2), 479-491.
- Fallah, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Alinaghian, M., & Salamatbakhsh-Varjovi, A. (2019). A robust approach for a green periodic competitive VRP under uncertainty: De and PSO algorithms. *Journal of Intelligent and Fuzzy Systems*, 36(6), 5213-5225.
- Fallah, M., Tavakkoli-Moghaddam, R., Salamatbakhsh-Varjovi, A., & Alinaghian, M. (2019). A green competitive vehicle routing problem under uncertainty solved by an improved differential evolution algorithm. *International Journal of Engineering, Transactions A: Basics*, 32(7), 976-981.
- Faraji, F., & Afshar-Nadjafi, B. (2018). A bi-objective green location-routing model and solving problem using a hybrid metaheuristic algorithm. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 30(3), 366-385.
- Felipe, Á., Ortuño, M.T., Righini, G., & Tirado, G. (2014). A heuristic approach for the green vehicle routing problem with multiple technologies and partial recharges. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 71, 111-128.
- Ferro, G., Paolucci, M., & Robba, M. (2018). An optimization model for electrical vehicles routing with time of use energy pricing and partial recharging. *IFAC-PapersOnLine*, 51(9), 212-217.
- Franceschetti, A., Demir, E., Honhon, D., Van Woensel, T., Laporte, G., & Stobbe, M. (2017). A metaheuristic for the time-dependent pollution-routing problem. *European Journal of Operational Research*, 259(3), 972-991.
- Fukasawa, R., He, Q., & Song, Y.J. (2016). A branch-cut-and-price algorithm for the energy minimization vehicle routing problem. *Transportation Science*, 50(1), 23-34.
- Fukasawa, R., He, Q., Santos, F., & Song, Y. (2018). A joint vehicle routing and speed optimization problem. *INFORMS Journal on Computing*, 30(4), 694-709.
- Gajanand, M.S., & Narendran, T.T. (2013). Green route planning to reduce the environmental impact of distribution. *International Journal of Logistics Research and Applications*, 16(5), 410-432.
- Gao, F., & Zhao, Q. (2018). A hybrid simulated annealing algorithm for load varying green vehicle routing problem with stochastic demands. *Journal of Computers (Taiwan)*, 29(6), 96-110.
- Gen, M., Lin, L., & Jo, J. B. (2009). *Hybrid genetic algorithm for designing logistics network, VRP and AGV Problems*. Springer.
- Gendreau, M., Laporte, G., & Séguin, R. (1996). Stochastic vehicle routing. *European Journal of Operational Research*, 88(1), 3-12.
- Ghannadpour, S. F., & Zarrabi, A. (2019). Multi-objective heterogeneous vehicle routing and scheduling problem with energy minimizing. *Swarm and Evolutionary Computation*, 44, 728-747.
- Ghezavati, V.R., Sahihi, A., & Barzegar, A. (2018). Using an intelligent self-modifier of probability of section approach to study the revenue influence of the pricing scheme of recyclable items in a green vehicle routing problem. *Simulation*, 94(4), 359-372.
- Gifford, T., Opicka, T., Sinha, A., Vanden Brink, D., Gifford, A., & Randall, R. (2018). Dispatch optimization in bulk tanker transport operations. *Interfaces*, 48(5), 403-421.
- Goeke, D. (2019). Granular tabu search for the pickup and delivery problem with time windows and electric vehicles. *European Journal of Operational Research*, 278(3), 821-836.
- Goeke, D., & Schneider, M. (2015). Routing a mixed fleet of electric and conventional vehicles. *European Journal of Operational Research*, 245(1), 81-99.
- Granada-Echeverri, M., Cubides, L.C., & Bustamante, J.O. (2020). The electric vehicle routing problem with backhauls. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 11(1), 131-152.
- Guo, Q., & Guo, H.J. (2019). A framework for end-of-life photovoltaics distribution routing optimization. *Sustainable Environment Research*, 29, 105-110.

- Hamad, K., Shanableh, A., & Sahnoon, I. (2018). Multi-objective, risk-based approach for safe and sustainable vehicle routing. *Advances in Transportation Studies*, 45, 5-20.
- Han, S., Ozer, B., Alioglu, B., Polat, O., & Aktin, A. T. (2019). A mathematical model for the delivery routing problem via drones. *Pamukkale University Journal of Engineering Sciences- Pamukkale Universitesi Muhendislik Bilimleri Dergisi*, 25(1), 89-97.
- Hassanzadeh, A., & Rasti-Barzoki, M. (2017). Minimizing total resource consumption and total tardiness penalty in a resource allocation supply chain scheduling and vehicle routing problem. *Applied Soft Computing Journal*, 58, 307-323.
- He, J., Huang, Y., & Yan, W. (2015). Yard crane scheduling in a container terminal for the trade-off between efficiency and energy consumption. *Advanced Engineering Informatics*, 29(1), 59-75.
- Henke, T., Speranza, M.G., & Wascher, G. (2019). A branch-and-cut algorithm for the multi-compartment vehicle routing problem with flexible compartment sizes. *Annals of Operations Research*, 275(2), 321-338.
- Heshmati, S., Verstichel, J., Esprit, E., & Vanden Berghe, G. (2019). Alternative e-commerce delivery policies: a case study concerning the effects on carbon emissions. *EURO Journal on Transportation and Logistics*, 8(3), 217-248.
- Hollis, B.L., & Green, P.J. (2012). Real-life vehicle routing with time windows for visual attractiveness and operational robustness. *Asia-Pacific Journal of Operational Research*, 29(4), 1250017.1-1250017.29.
- Hooshmand, F., & MirHassani, S.A. (2019). Time dependent green VRP with alternative fuel powered vehicles. *Energy Systems*, 10(3), 721-756.
- Hu, L., Zhong, Y., Hao, W., Moghimi, B., Huang, J., Zhang, X., & Du, R. (2018). Optimal route algorithm considering traffic light and energy consumption. *IEEE Access*, 6, 59695-59704.
- Idrus, Z., Ku-Mahamud, K.R., & Benjamin, A.M. (2017). Waste collection vehicle routing problem benchmark datasets and case studies: A review. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 95(5), 1048-1057.
- Jabali, O., Van Woensel, T., & de Kok, A.G. (2012). Analysis of travel times and CO2 emissions in time-dependent vehicle routing. *Production and Operations Management*, 21(6), 1060-1074.
- Jabbarpour, M.R., Noor, R.M., & Khokhar, R.H. (2015). Green vehicle traffic routing system using ant-based algorithm. *Journal of Network and Computer Applications*, 58, 294-308.
- Jabir, E., Panicker, V.V., & Sridharan, R. (2017). Design and development of a hybrid ant colony- variable neighbourhood search algorithm for a multi-depot green vehicle routing problem. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 57, 422-457.
- Jemai, J., Zekri, M., & Mellouli, K. (2017). Multi-objective genetic algorithms for the green vehicle routing problem: a comparative study. *Journal of Theoretical and Applied Information Technology*, 95(23), 6597-6607.
- Jovanović, A. D., Pamučar, D. S., & Pejčić-Tarle, S. (2014). Green vehicle routing in urban zones - a neuro-fuzzy approach. *Expert Systems with Applications*, 41(7), 3189-3203.
- Juan, A.A., Goentzel, J., & Bektaş, T. (2014). Routing fleets with multiple driving ranges: Is it possible to use greener fleet configurations?. *Applied Soft Computing Journal*, 21, 84-94.
- Kancharla, S. R., & Ramadurai, G. (2018). Incorporating driving cycle based fuel consumption estimation in green vehicle routing problems. *Sustainable Cities and Society*, 40, 214-221.
- Kazemian, I., Rabbani, M., & Farrokhi-Asl, H. (2018). A way to optimally solve a green time-dependent vehicle routing problem with time windows. *Computational and Applied Mathematics*, 37(3), 2766-2783.
- Khalafi, S., & Zarei, M. (2019). Design of a green supply chain network by considering the possibility of storage and location-routing problem under uncertainty. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 34(2), 253-268.
- Kim, H., Kang, J.G., & Kim, W. (2014). An application of capacitated vehicle routing problem to reverse logistics of disposal food waste. *International Journal of Industrial Engineering-Theory Applications and Practice*, 21(1), 46-52.
- Koc, C., & Karaoglan, I. (2016). The green vehicle routing problem: A heuristic based exact solution approach. *Applied Soft Computing*, 39, 154-164.
- Kong, L.L., Li, H., Luo, H.B., Ding, L.Y., & Zhang, X.L. (2018). Sustainable performance of just-in-time (JIT) management in time-dependent batch delivery scheduling of precast construction. *Journal of Cleaner Production*, 193, 684-701.
- Kopfer, H.W., Schönberger, J., & Kopfer, H. (2014). Reducing greenhouse gas emissions of a heterogeneous vehicle fleet. *Flexible Services and Manufacturing Journal*, 26(1-2), 221-248.
- Koyuncu, I., & Yavuz, M. (2019). Duplicating nodes or arcs in green vehicle routing: a computational comparison of two formulations. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 122, 605-623.
- Kramer, R., Subramanian, A., Vidal, T., & Cabral, L.D.A.F. (2015). A matheuristic approach for the pollution-routing problem. *European Journal of Operational Research*, 243(2), 523-539.

- Kumar, M., & Kumar, D. (2018). Green logistics decision support system for blood distribution in time window. *International Journal of Logistics Systems and Management*, 31(3), 420-447.
- Kumar, V., Kumar, V., Brady, M., Garza-Reyes, J.A., & Simpson, M. (2017). Resolving forward-reverse logistics multi-period model using evolutionary algorithms. *International Journal of Production Economics*, 183, 458-469.
- Lee, S., & Prabhu, V.V. (2016). Just-in-time delivery for green fleets: A feedback control approach. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 46, 29-245.
- Leggieri, V., & Haouari, M. (2017). A practical solution approach for the green vehicle routing problem. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 104, 97-112.
- Li, X., & Sun, J. (2018). Signal multiobjective optimization for urban traffic network. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 19(11), 3529-3537.
- Li, Y., Lim, M.K., & Tseng, M.L. (2019). A green vehicle routing model based on modified particle swarm optimization for cold chain logistics. *Industrial Management and Data Systems*, 119(3), 473-494.
- Li, Y., Soleimani, H., & Zohal, M. (2019). An improved ant colony optimization algorithm for the multi-depot green vehicle routing problem with multiple objectives. *Journal of Cleaner Production*, 227, 1161-1172.
- Li, Y.L., & Chung, S.H. (2019). Disaster relief routing under uncertainty: a robust optimization approach. *Ise Transactions*, 51(8), 869-886.
- Liao, T.Y. (2017). On-line vehicle routing problems for carbon emissions reduction. *Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering*, 32(12), 1047-1063.
- Lin, C., Choy, K.L., Ho, G.T.S., Chung, S.H., & Lam, H.Y. (2014). Survey of green vehicle routing problem: past and future trends. *Expert Systems with Applications*, 41(4 PART 1), 1118-1138.
- Lin, C.H., Choy, K.L., Ho, G.T.S., & Ng, T.W. (2014). A Genetic Algorithm-based optimization model for supporting green transportation operations. *Expert Systems with Applications*, 41(7), 3284-3296.
- Liu, X.H., Shan, M.Y., Zhang, R.L., & Zhang, L.H. (2018). Green vehicle routing optimization based on carbon emission and multiobjective hybrid quantum immune algorithm. *Mathematical Problems in Engineering*, 2018, 1-9.
- Li-Ying, W., & Yuan-Bin, S. (2015). Multiple charging station location-routing problem with time window of electric vehicle. *Journal of Engineering Science and Technology Review*, 8(5), 190-201.
- Lu, J.W., Chang, N.B., Liao, L., & Liao, M.Y. (2017). Smart and green urban solid waste collection systems: advances, challenges, and perspectives. *Ieee Systems Journal*, 11(4), 2804-2817.
- Macrina, G., Laporte, G., Guerriero, F., & Pugliese, L.D. (2019). An energy-efficient green-vehicle routing problem with mixed vehicle fleet, partial battery recharging and time windows. *European Journal of Operational Research*, 276(3), 971-982.
- Macrina, G., Pugliese, L.D., Guerriero, F., & Laporte, G. (2019). The green mixed fleet vehicle routing problem with partial battery recharging and time windows. *Computers & Operations Research*, 101, 183-199.
- Madankumar, S., & Rajendran, C. (2018). Mathematical models for green vehicle routing problems with pickup and delivery: A case of semiconductor supply chain. *Computers and Operations Research*, 89, 183-192.
- Maden, W., Eglese, R., & Black, D. (2010). Vehicle routing and scheduling with time-varying data: A case study. *Journal of the Operational Research Society*, 61(3), 515-522.
- Mahmoudi, M., Song, Y., Miller, H.J., & Zhou, X.S. (2019). Accessibility with time and resource constraints: Computing hyper-prisms for sustainable transportation planning. *Computers Environment and Urban Systems*, 73, 171-183.
- Majidi, S., Hosseini-Motlagh, S.M., Yaghoubi, S., & Jokar, A. (2017). Fuzzy green vehicle routing problem with simultaneous pick-delivery and time windows. *Rairo- Operations Research*, 51(4), 1151-1176.
- Mancini, S. (2017). The hybrid vehicle routing problem. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 78, 1-12.
- Mohammadi, M., Razmi, J., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2013). Multi-objective invasive weed optimization for stochastic green hub location routing problem with simultaneous pick-ups and deliveries. *Economic Computation and Economic Cybernetics Studies and Research*, 47(3), 247-266.
- Montoya, A., Guéret, C., Mendoza, J.E., & Villegas, J.G. (2016). A multi-space sampling heuristic for the green vehicle routing problem. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies*, 70, 113-128.
- Muñoz-Villamizar, A., Montoya-Torres, J.R., & Faulin, J. (2017). Impact of the use of electric vehicles in collaborative urban transport networks: A case study. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 50, 40-54.
- Naderipour, M., & Alinaghian, M. (2016). Measurement, evaluation and minimization of CO₂, NO_x, and CO emissions in the open time dependent vehicle routing

- problem. *Measurement: Journal of the International Measurement Confederation*, 90, 443-452.
- Nakhjirkan, S., & Mokhtab Rafiei, F. (2017). An integrated multi-echelon supply chain network design considering stochastic demand: A genetic algorithm based solution. *Promet - Traffic - Traffico*, 29(4), 391-400.
- Naoum-Sawaya, J., Cogill, R., Ghaddar, B., Sajja, S., Shorten, R., Taheri, N., Tommasi, P., Verago, R., & Wirth, F. (2015). Stochastic optimization approach for the car placement problem in ridesharing systems. *Transportation Research Part B-Methodological*, 80, 173-184.
- Niu, Y.Y., Yang, Z.H., Chen, P., & Xiao, J.H. (2018). A hybrid tabu search algorithm for a real-world open vehicle routing problem involving fuel consumption constraints. *Complexity*, 2018, 1-12.
- Niu, Y.Y., Yang, Z.H., Chen, P., & Xiao, J.H. (2018). Optimizing the green open vehicle routing problem with time windows by minimizing comprehensive routing cost. *Journal of Cleaner Production*, 171, 962-971.
- Norlund, E.K., Gribkovskaia, I., & Laporte, G. (2015). Supply vessel planning under cost, environment and robustness considerations. *Omega- International Journal of Management Science*, 57, 271-281.
- Normasari, N.M.E., Yu, V.F., Bachtiyar, C., & Sukoyo. (2019). A simulated annealing heuristic for the capacitated green vehicle routing problem. *Mathematical Problems in Engineering*, 2019(2), 1-18.
- Norouzi, N., Sadegh-Amalnick, M., & Tavakkoli-Moghaddam, R. (2017). Modified particle swarm optimization in a time-dependent vehicle routing problem: minimizing fuel consumption. *Optimization Letters*, 11(1), 121-134.
- Poonthalir, G., & Nadarajan, R. (2018). A fuel efficient green vehicle routing problem with varying speed constraint (F-GVRP). *Expert Systems with Applications*, 100, 131-144.
- Poonthalir, G., & Nadarajan, R. (2019). Green vehicle routing problem with queues. *Expert Systems with Applications*, 138(2019), 1-18.
- Qian, J.N., & Eglese, R. (2014). Finding least fuel emission paths in a network with time-varying speeds. *Networks*, 63(1), 96-106.
- Rabbani, M., Bosjin, S.A., Yazdanparast, R., & Saravi, N.A. (2018). A stochastic time-dependent green capacitated vehicle routing and scheduling problem with time window, resiliency and reliability: A case study. *Decision Science Letters*, 7(4), 381-394.
- Ramos, T.R.P., Gomes, M.I., & Barbosa-Povoa, A.P. (2014). Economic and environmental concerns in planning recyclable waste collection systems. *Transportation Research Part E-Logistics and Transportation Review*, 62, 34-54.
- Ramos, T.R.P., Gomes, M.I., & Barbosa-Povoa, A.P. (2014). Planning a sustainable reverse logistics system: balancing costs with environmental and social concerns. *Omega- International Journal of Management Science*, 48, 60-74.
- Reyes-Rubiano, L., Ferone, D., Juan, A.A., & Faulin, J. (2019). A simheuristic for routing electric vehicles with limited driving ranges and stochastic travel times. *Sort- Statistics and Operations Research Transactions*, 43(1), 3-24.
- Rezaei, N., Ebrahimnejad, S., Moosavi, A., & Nikfarjam, A. (2019). A green vehicle routing problem with time windows considering the heterogeneous fleet of vehicles: two metaheuristic algorithms. *European Journal of Industrial Engineering*, 13(4), 507-535.
- Roberti, R., & Wen, M. (2016). The electric traveling salesman problem with time windows. *Transportation Research Part E-Logistics and Transportation Review*, 89, 32-52.
- Sawik, B., Faulin, J., & Perez-Bernabeu, E. (2017). Multi-objective traveling salesman and transportation problems with environment aspects. *Applications of Management Science*, 18, 21-55.
- Sawik, B., Faulin, J., & Perez-Bernabeu, E. (2017). Selected multi-criteria green vehicle routing problems. *Applications of Management Science*, 18, 57-83.
- Sbihi, A., & Eglese, R. W. (2007). Combinatorial optimization and Green Logistics. *4OR*, 5(2), 99-116.
- Schiffer, M., & Walther, G. (2017). The electric location routing problem with time windows and partial recharging. *European Journal of Operational Research*, 260(3), 995-1013.
- Schneider, M., Stenger, A., & Goeke, D. (2014). The electric vehicle-routing problem with time windows and recharging stations. *Transportation Science*, 48(4), 500-520.
- Schroder, M., & Cabral, P. (2019). Eco-friendly 3D-Routing: A GIS based 3D-Routing-Model to estimate and reduce CO₂-emissions of distribution transports. *Computers Environment and Urban Systems*, 73, 40-55.
- Serrano-Hernandez, A., & Faulin, J. (2019). Internalizing negative externalities in vehicle routing problems through green taxes and green tolls. *Sort- Statistics and Operations Research Transactions*, 43(1), 75-93.
- Simao, H.P., Day, J., George, A.P., Gifford, T., Nienow, J., & Powell, W.B. (2009). An approximate dynamic programming algorithm for large-scale fleet management: a case application. *Transportation Science*, 43(2), 178-197.
- Soleimani, H., Chaharlang, Y., & Ghaderi, H. (2018). Collection and distribution of returned-remanufactured products in a vehicle routing problem with pickup and delivery

- considering sustainable and green criteria. *Journal of Cleaner Production*, 172, 960-970.
- Soon, K.L., Lim, J.M.Y., & Parthiban, R. (2019). Coordinated traffic light control in cooperative green vehicle routing for pheromone-based multi-agent systems. *Applied Soft Computing*, 2019(81), 1-16.
- Soon, K.L., Lim, J.M.Y., Parthiban, R., & Ho, M.C. (2019). Proactive eco-friendly pheromone-based green vehicle routing for multi-agent systems. *Expert Systems with Applications*, 121, 324-337.
- Sousa Matos, M.R., Frota, Y., & Ochi, L.S. (2018). Green vehicle routing and scheduling problem with split delivery. *Electronic Notes in Discrete Mathematics*, 69, 13-20.
- Soysal, M., & Çimen, M. (2017). A Simulation Based Restricted Dynamic Programming approach for the Green Time Dependent Vehicle Routing Problem. *Computers and Operations Research*, 88, 297-305.
- Soysal, M., Çimen, M., & Demir, E. (2018). On the mathematical modeling of green one-to-one pickup and delivery problem with road segmentation. *Journal of Cleaner Production*, 174, 1664-1678.
- Sruthi, A., Anbuudayasankar, S.P., & Jeyakumar, G. (2019). Energy efficient green vehicle routing problem. *International Journal of Information Systems and Supply Chain Management*, 12(4), 27-41.
- Sundar, K., Venkatachalam, S., & Rathinam, S. (2017). Analysis of mixed-integer linear programming formulations for a fuel-constrained multiple vehicle routing problem. *Unmanned Systems*, 5(4), 197-207.
- Suzuki, Y. (2016). A dual-objective metaheuristic approach to solve practical pollution routing problem. *International Journal of Production Economics*, 176, 143-153.
- Teng, L., & Zhang, Z. (2016). Green vehicle routing problem with load factor. *Advances in Transportation Studies*, 3(Special Issue), 75-82.
- Tiwari, A., & Chang, P.C. (2015). A block recombination approach to solve green vehicle routing problem. *International Journal of Production Economics*, 164, 379-387.
- Toro, E.M., Franco, J.F., Echeverri, M.G., & Guimarães, F.G. (2017). A multi-objective model for the green capacitated location-routing problem considering environmental impact. *Computers and Industrial Engineering*, 110, 114-125.
- Toro, E.M., Franco, J.F., Echeverri, M.G., Guimarães, F.G., & Gallego Rendón, R.A. (2016). Green open location-routing problem considering economic and environmental costs. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 8(2), 203-216.
- Toro, E.M., Franco, J.F., Echeverri, M.G., Guimaraes, F.G., & Rendon, R.A.G. (2017). Green open location-routing problem considering economic and environmental costs. *International Journal of Industrial Engineering Computations*, 8(2), 203-216.
- Turkensteen, M. (2017). The accuracy of carbon emission and fuel consumption computations in green vehicle routing. *European Journal of Operational Research*, 262(2), 647-659.
- Ubeda, S., Arcelus, F. J., & Faulin, J. (2011). Green logistics at eroski: a case study. *International Journal of Production Economics*, 131(1), 44-51.
- Waidyathilaka, E., Vidanagamachchi, K., & Wickramarachchi, R. (2019). *Trends in green vehicle routing in reverse logistics* [Paper presentation]. The International Conference on Industrial Engineering and Operations Management 2019, Bangkok, Thailand.
- Wang, J., Yao, S., Sheng, J., & Yang, H. (2019). Minimizing total carbon emissions in an integrated machine scheduling and vehicle routing problem. *Journal of Cleaner Production*, 229, 1004-1017.
- Wang, L., & Lu, J. (2019). A memetic algorithm with competition for the capacitated green vehicle routing problem. *IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica*, 6(2), 516-526.
- Wang, R., Zhou, J., Yi, X., & Pantelous, A.A. (2019). Solving the green-fuzzy vehicle routing problem using a revised hybrid intelligent algorithm. *Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing*, 10(1), 321-332.
- Wang, Y., Assogba, K., Fan, J.X., Xu, M.Z., Liu, Y., & Wang, H.Z. (2019). Multi-depot green vehicle routing problem with shared transportation resource: Integration of time-dependent speed and piecewise penalty cost. *Journal of Cleaner Production*, 232, 12-29.
- Wang, Y., He, Y.M., He, L., & Xing, L.N. (2016). Bio-inspired algorithms applied to the multi-objective vehicle routing problem: Frameworks and applications. *Journal of Computational and Theoretical Nanoscience*, 13(6), 3997-4009.
- Wang, Y., Peng, S.G., Xu, C.C., Assogba, K., Wang, H.Z., Xu, M.Z., & Wang, Y.H. (2018). Two-echelon logistics delivery and pickup network optimization based on integrated integrated cooperation and transportation fleet sharing. *Expert Systems with Applications*, 113, 44-65.
- Wang, Z., Li, J.Q., Fang, M.L., & Li, Y. (2015). A multimetric ant colony optimization algorithm for dynamic path planning in vehicular networks. *International Journal of Distributed Sensor Networks*, 2015(1), 1-10.
- Wensing, T., (2018). *Social and environmental impact of advances in economically driven transport optimization: case study in automobile distribution*. Springer.

- Xiao, Y., & Konak, A. (2016). The heterogeneous green vehicle routing and scheduling problem with time-varying traffic congestion. *Transportation Research Part E: Logistics and Transportation Review*, 88, 146-166.
- Xiao, Y., Zuo, X., Kaku, I., Zhou, S., & Pan, X. (2019). Development of energy consumption optimization model for the electric vehicle routing problem with time windows. *Journal of Cleaner Production*, 225, 647-663.
- Xiao, Y.Y., & Konak, A. (2015). A simulating annealing algorithm to solve the green vehicle routing & scheduling problem with hierarchical objectives and weighted tardiness. *Applied Soft Computing*, 34, 372-388.
- Xiao, Y.Y., & Konak, A. (2017). A genetic algorithm with exact dynamic programming for the green vehicle routing & scheduling problem. *Journal of Cleaner Production*, 167, 1450-1463.
- Xin, X., Wang, X.L., Tian, X.C., Chen, Z.G., & Chen, K. (2019). Green scheduling model of shuttle tanker fleet considering carbon tax and variable speed factor. *Journal of Cleaner Production*, 234, 1134-1143.
- Xu, Z., Elomri, A., Pokharel, S., & Mutlu, F. (2019). A model for capacitated green vehicle routing problem with the time-varying vehicle speed and soft time windows. *Computers and Industrial Engineering*, 2019(137), 1-14.
- Yang, B., Hu, Z.H., Wei, C., Li, S.Q., Zhao, L., & Jia, S. (2015). Routing with time- windows for multiple environmental vehicle types. *Computers & Industrial Engineering*, 89, 150-161.
- Yavuz, M. (2017). An iterated beam search algorithm for the green vehicle routing problem. *Networks*, 69(3), 317-328.
- Yin, P.Y., & Chuang, Y.L. (2016). Adaptive memory artificial bee colony algorithm for green vehicle routing with cross-docking. *Applied Mathematical Modelling*, 40(21-22), 9302-9315.
- Yu, J.J.Q., Yu, W., & Gu, J. (2019). Online vehicle routing with neural combinatorial optimization and deep reinforcement learning. *IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems*, 20(10), 3806-3817.
- Yu, V.F., Redi, A., Hidayat, Y.A., & Wibowo, O.J. (2017). A simulated annealing heuristic for the hybrid vehicle routing problem. *Applied Soft Computing*, 53, 119-132.
- Yu, Y., Wang, S.H., Wang, J.W., & Huang, M. (2019). A branch-and-price algorithm for the heterogeneous fleet green vehicle routing problem with time windows. *Transportation Research Part B-Methodological*, 122, 511-527.
- Yu, Y., Wu, Y.T., & Wang, J.W. (2019). Bi-objective green ride-sharing problem: model and exact method. *International Journal of Production Economics*, 208, 472-482.
- Zhang, S., Campbell, A.M., & Ehmke, J.F. (2019). Impact of congestion pricing schemes on costs and emissions of commercial fleets in urban areas. *Networks*, 73(4), 466-489.
- Zhang, S., Gajpal, Y., & Appadoo, S.S. (2018). A meta-heuristic for capacitated green vehicle routing problem. *Annals of Operations Research*, 269(1-2), 753-771.
- Zhang, S., Lee, C.K.M., Choy, K.L., Ho, W., & Ip, W.H. (2014). Design and development of a hybrid artificial bee colony algorithm for the environmental vehicle routing problem. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 31, 85-99.
- Zhen, L., Xu, Z., Ma, C., & Xiao, L. (2019). Hybrid electric vehicle routing problem with mode selection. *International Journal of Production Research*, 58(2), 562-576.
- Zhou, F., He, Y., & Zhou, L. (2019). Last mile delivery with stochastic travel times considering dual services. *IEEE Access*, 7, 159013-159021.
- Zhu, L., & Hu, D. (2019). Study on the vehicle routing problem considering congestion and emission factors. *International Journal of Production Research*, 57(19), 6115-6129.
- Zulvia, F.E., Kuo, R.J., & Nugroho, D.Y. (2020). A many-objective gradient evolution algorithm for solving a green vehicle routing problem with time windows and time dependency for perishable products. *Journal of Cleaner Production*, 242, 1-14.

9. ประวัติผู้เขียนบทความ



นางสาวธนัชพร สมใส จบการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ จากมหาวิทยาลัยนเรศวร ในปี พ.ศ. 2558 ปัจจุบันอยู่ระหว่างศึกษาต่อในระดับปริญญาโท วิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมการจัดการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ผลงานวิจัยที่ผ่านมาส่วนใหญ่จะเป็นทางด้านการประยุกต์ใช้วิธีการแบบแม่นยำ (Exact methods) เพื่อการแก้ปัญหาการจัดเส้นทางยานพาหนะ (Vehicle routing problem)



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภพพงษ์ พงษ์เจริญ
สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาตรี วิศวกรรม
ศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ระดับปริญญาโท
Master of Engineering ในสาขา Industrial
and System Engineering จากสถาบัน
Asian Institute of Technology และระดับ
ปริญญเอก Doctor of Philosophy

(Manufacturing Engineering) จาก University of Newcastle upon
Tyne ประเทศอังกฤษ เริ่มรับราชการเป็นอาจารย์ประจำ สังกัดภาควิชา
วิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร ปี
พ.ศ. 2537 ปัจจุบันดำรงตำแหน่งหัวหน้าหน่วยวิจัยด้านการวิจัย
ดำเนินงานและประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรม (Centre for Operations
Research and Industrial Applications: CORIA) ผลงานวิจัยที่ผ่านมา
ส่วนใหญ่จะเป็นทางด้านการประยุกต์ใช้วิธีการหาค่าที่เหมาะสมแบบต่าง
ๆ (Optimisation algorithms) เพื่อการแก้ปัญหาการดำเนินงานทาง
ธุรกิจและการจัดการโลจิสติกส์ (Business and logistics operations)