

NUEJ

NARESUAN

UNIVERSITY ENGINEERING JOURNAL

July-December 2020 Vol.15 No.2
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 จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
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

กองบรรณาธิการ		
ศาสตราจารย์ ดร.สำเริง	จักรใจ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ศาสตราจารย์ ดร.อภิวัฒน์	ธนะยานนท์	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	นัยนิติกุล	สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์และทรัพยากร มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
รองศาสตราจารย์ ดร.กุลยา	กนกจาร์วิจิตร	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.วิสันย์	วรรณจรรย์ยา	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.วิระสิทธิ์	อัมภวิล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.สงวน	ปัทมธรรมกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.สถาพร	โกคา	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
รองศาสตราจารย์ ดร.สมบัติ	ชื่นชูกลิ่น	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.สมร	หิรัญประดิษฐ์กุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ	แย้มเม่น	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.ธันยดา	พรรณเชษฐ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

กองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชัย	ฤตวิรุฬห์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
Assoc.Prof.Dr. Vo Ngoc	Dieu	Ho Chi Minh City University of Technology Vietnam
รองศาสตราจารย์ ดร.พนัส	นัถฤทธิ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ เมธี	บุญพิเชฐวงศ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.แก้วกันยา	สุดประเสริฐ	คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พนมขวัญ	ริยะมงคล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปาจริย์	ทองสนิท	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศุภวรรณ	พลพิทักษ์ชัย	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมลักษณ์	วรรณฤมล กิเยลาโรว่า	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์.ดร.สสิกรณณ์	เหลื่องวิซขเจริญ	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

Low-Pressure Die Casting Machine Selection Using a Combined AHP and TOPSIS Method

Prin Boonkanit.....1

การคำนวณเชิงตัวเลขเพื่อหาขนาดวิกฤติของตำหนิเริ่มต้นในรอยเชื่อมขนาบของรางรถไฟ

Numerical Calculation for the Critical Initial Flaw Size of Flash-Butt Welded Rail

กชพร ถาดสูงเนิน, นิติกร นรภัยพิพากษา, อาณัติ หาทรัพย์ และ ชาวสวน กาญจนมัย

Kotchaporn Thadsoongnoen, Nitikorn Noraphaiphaksa, Anat Hasap and Chaosuan Kanchanomai.....12

การศึกษาเชิงตัวเลขค่าสมรรถนะเชิงสถิตยของกังหันลมชาโวเนียสเมื่อติดตั้งช่องทางไหลนำร่องแบบแผ่นโค้งโดยใช้โปรแกรม

OpenFOAM A Numerical Study of Static Performance of Savonius Wind Turbine with Curved Guide Vanes Using

OpenFOAM

เจษฎาภรณ์ ปรียาดำกล, ชاکริต สุวรรณจำรัส, วีรชัย ชัยวรพฤกษ์ และ กันต์ธกรณ์ เขาทอง

Jetsadaporn Priyadumkol, Chakrit Suvanjumrat, Weerachai Chaiworapuek and Kunthakorn Khaothong21

โครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็งเกรด 2024 กับ 6061 ที่เชื่อมด้วยความเสียดทานแบบกวน

Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welding of 2024 and 6061 Aluminium Semi-Solid

Casting

วรพงศ์ บุญช่วยแทน, วรธนพร ชีววุฒิพงศ์, และ รอมฎอน บุระพา

Worapong Boonchouytan, Watthanaphon Cheewawuttipong and Romadon Burapa34

ขั้นตอนการปรับปรุงกระบวนการผลิตด้วยลีน ซิกส์ซิกม่า และลีนอัตโนมัติ

Production Improvement Steps: Lean, Six Sigma and Lean Automation

ประภัสสร ตันติพันธ์วดี, อาณัติ ศิริปัญญา, พัชรพงศ์ ปัญญาคุณานนท์, พศิษฐ์ ธนาโชติอนันต์กุล, นันทชัย ว่องปวิเวธ,

สุจินต์ พวงมาลัย และ สิริวัฒน์ ไวยนิตย์

Prapassorn Tantiphanwadi, Anut Siripanya, Pacharappong Panyakunant, Pasidth Thanachotanankul

Nantachai Wongpatiwate, Suchinda Phwngmalay and Siriwat Waiyanit47

ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าขานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม

Factors Affecting Compressive Strength of Geopolymer Concrete from Bagasse Ash Mixed with Aluminum Dust

พิพรรธน์ อินปลัด และ สหลาก หอมวุฒิวงศ์

Pipat Inpalad and Sahalaph Homwuttiwong.....65

การเลือกที่ตั้งศูนย์หลบภัยชั่วคราวในช่วงภัยพิบัติมลพิษทางอากาศ PM 2.5 ด้วยกระบวนการ วิเคราะห์ตามลำดับชั้น กรณีศึกษา
มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

Temporary Shelter-Site Selection During PM 2.5 Air Pollution Disaster Via Analytic Hierarchy Process: A Case
Study of Chiang Mai University

ชวิศ บุญมี, ศิวัช แจ่มจรรยา และ ภูริชญา อัสวโกวิทพงศ์

Chawis Boonmee, Siwach Chamchanya, and Purichaya Atsawakowitphong75

การกำหนดตารางงานและเส้นทางวิ่งของพาหนะลำเลียงงานอัตโนมัติ: กรณีศึกษาอุตสาหกรรมการผลิต

Approach to Scheduling and Routing for Automated Guided Vehicles: A Case Study in the Manufacturing Industry
โพธิ์งาม สมกุล, จิรัฐติภรณ์ ลอยลม และ อนูวัต หม่องเขียว

Po-ngarm Somkun, Jirattiphorn Loylom and Anuwat Mhongkiew.....90

วิธีการหาบุเร่สำหรับแบบจำลองระบบพัสดुकงคลังโลหิตเมื่อพิจารณาความต้องการสองประเภท

Tabu Search Method for Model of Blood Inventory System with Two Priorities

สุรัสวดี นัยนารถ และ กัญชลา สุดตาชาติ

Suratsawadee Naiyanart and Kanchala Sudtachat.....105

การศึกษาพารามเตอร์ของความลาดดินที่เพิ่มเสถียรภาพด้วยถุงจีโอเทกซ์ไทล์บรรจุทราย โดยอาศัยการทบทวนวรรณกรรมและการ
วิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

The Parametric Study of Soil Slope Stabilized with Geotextile Sand Container Based on Review Works and Finite
Element Analysis

จิตินันต์ พรหมรินทร์, พีรพงศ์ จิตเสงี่ยม และ ธวัชชัย ต้นชัยสวัสดิ์

Jitinun Prommarin, Peerapong Jitsangiam and Tawatchai Tanchaisawat.....122

การพัฒนาเครื่องรับรู้สำหรับตรวจวัดพฤติกรรมหินโรยทางรถไฟ

Development of Prototype for Monitoring the Railway Ballast Behavior

กฤษฎา ชีโนวัง และ พีรพงศ์ จิตเสงี่ยม

Kidsada Cheenowang and Peerapong Jitsangiam.....136

Aims and Objectives

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

Journal Policies

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

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

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

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

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

วัตถุประสงค์

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

นโยบาย

วิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยนเรศวร เป็นวารสารที่มีกระบวนการพิจารณาบทความประเภท Double-blind peer review จากผู้ทรงคุณวุฒิ อย่างน้อย 2 ท่าน เพื่อคัดสรรบทความที่มีคุณภาพลงตีพิมพ์ในวารสาร โดยมีกำหนดการออกเผยแพร่ปีละ 2 ฉบับ คือ ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม - มิถุนายน และฉบับ 2 เดือนกรกฎาคม - ธันวาคม สำหรับเงื่อนไขในการพิจารณาบทความ ทางกองบรรณาธิการของวารสารฯ จะพิจารณาเฉพาะผลงานที่ไม่เคยเสนอหรือกำลังเสนอเพื่อตีพิมพ์ในวารสารวิชาการใดมาก่อน หากงานวิจัยใดมีความเกี่ยวข้องกับมนุษย์หรือสัตว์ทดลอง วารสารฯ จะรับพิจารณาเฉพาะบทความที่มีหลักฐานยืนยันว่าโครงการวิจัยดังกล่าวได้ผ่านการรับรองเชิงจริยธรรมจากคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์หรือสัตว์ทดลองแล้วเท่านั้น สำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับมนุษย์ เจ้าของผลงานนิพนธ์ต้องแสดงให้เห็นว่าผู้เข้าร่วมการทดลองได้รับทราบข้อมูลและตัดสินใจเข้าร่วมการทดลองด้วยความสมัครใจ ทั้งนี้การอนุมัติให้ลงตีพิมพ์ขึ้นอยู่กับผลการพิจารณาจากกองบรรณาธิการวิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยนเรศวร 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 0-5596-4092 โทรสาร 0-5596-4000

E-mail: nuej@nu.ac.th

Editor's Note

This issue, Vol. 15 No. 2 (2020), is one of our last three Thai publications. As part of our efforts to continue to grow and improve the journal and aspire to make it a worldwide reference, we have started accepting only manuscripts in English since October 1st, 2020, and will begin publishing in English in 2021. We hope this transition will improve the visibility of our Thai authors and make their scholarly contributions available to a broader audience. In this issue, there are eleven interesting, high-quality engineering articles; as always, our sincere thanks to the authors and reviewers for making this possible.

We look forward to continuing to work with the academic community as a resource and platform for sharing their knowledge for a better future.

Asst. Prof. Dr. Sutanit Puttapanom
Editor
Naresuan University Engineering Journal

บทบรรณาธิการ

วิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยนเรศวร ได้จัดพิมพ์ขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่ผลงานวิชาการ ผลงานวิจัย และความก้าวหน้าใหม่ที่เกี่ยวข้องกับศาสตร์ทางวิศวกรรม โดยบทความทุกฉบับได้ผ่านการพิจารณากลั่นกรองจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้องจากหลายสถาบันการศึกษา ซึ่งวารสารปีที่ 15 ฉบับที่ 2 (กรกฎาคม-ธันวาคม 2563) นี้ ได้รับรวบรวมบทความไว้อย่างน่าสนใจจำนวน 11 ฉบับ ซึ่งมีหัวข้อโดยย่อดังนี้ Low-Pressure Die Casting Machine Selection Using a Combined AHP and TOPSIS Method การคำนวณเชิงตัวเลขเพื่อหาขนาดวิกฤติของตำหนิเริ่มต้นในรอยเชื่อมขนาบของรางรถไฟ การศึกษาเชิงตัวเลขค่าสมรรถนะเชิงสถิติของกังหันลมชาโวนีเยสโดยใช้ OpenFOAM พฤติกรรมโครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็งต่างชนิดระหว่าง 2024 กับ 6061 ขั้นตอนการปรับปรุงด้วยสลิค ซิกส์ซิมา และสลิคอัตโนมัติ ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าขานอ้อยผสมเศษอลูมิเนียม การเลือกที่ตั้งศูนย์หลบภัยชั่วคราวในช่วงภัยพิบัติมลพิษทางอากาศ PM 2.5 ด้วยกระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น กรณีศึกษามหาวิทยาลัยเชียงใหม่ การกำหนดตารางงานและเส้นทางวิ่งของพาหนะลำเลียงงานอัตโนมัติ : กรณีศึกษาอุตสาหกรรมการผลิต วิธีการหาบูเลิร์ชสำหรับแบบจำลองระบบพัสดุคงคลังโลหิตเมื่อพิจารณาความต้องการสองประเภท การศึกษาอิทธิพลของอุณหภูมิเทกซ์ไทล์บรรจุทรายที่มีผลต่อกำลังรับแรงกดและเสถียรภาพลาดดินโดยอาศัยการทบทวนวรรณกรรมและการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ และ การพัฒนาระบบเครื่องรับรู้สำหรับการวัดพฤติกรรมหินโรยทางรถไฟ

กองบรรณาธิการวารสารหวังเป็นอย่างยิ่งว่า วารสารฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้อ่านทั้งในทางวิชาการและวิชาชีพต่อไป จึงขอขอบคุณคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิและทีมงานทุกฝ่าย ที่มีส่วนร่วมในการพัฒนาคุณภาพและมาตรฐานของวารสารฯ ฉบับนี้สุดท้ายนี้ขอขอบคุณผู้เขียนบทความ สมาชิกวารสารและผู้อ่านทุกท่าน ที่ได้สนับสนุนและติดตามมาอย่างต่อเนื่อง และยินดีรับข้อเสนอแนะเพื่อการปรับปรุงวารสารให้มีคุณภาพยิ่งขึ้นต่อไป

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. ภูพงษ์ พงษ์เจริญ

บรรณาธิการ

วิศวกรรมสาร มหาวิทยาลัยนเรศวร

Low-Pressure Die Casting Machine Selection Using a Combined AHP and TOPSIS Method

Prin Boonkanit

Sustainable Industrial Management Engineering Department, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology
Phra Nakorn, Bangkok, Thailand

Corresponding author's e-mail: prin.b@rmutp.ac.th

(Received: July 9, 2020, Revised: October 20, 2020, Accepted: December 8, 2020)

Abstract

Decision making is the process of making choices by identifying a decision, gathering information, and assessing alternative solutions. This research is standing with the decision to change the foundry department with low-pressure die casting technologies. It is highly related to machine selection, which should meet the requirements of the manufacturer. However, this decision-making process is rather complicated because various parameters must be considered such as melting rate, production cycle time, the capacity of the furnace, energy consumption, etc. Hence, a decision support system has been developed in this article using a combined Analytic Hierarchy Process (AHP) and Technique of Order Preference Similarity to the Ideal Solution (TOPSIS) method to select the best Low Pressure Die Casting (LPDC) machine among a list of machine alternatives. A case study of brass valve manufacturing in Thailand is used to illustrate the presented method. The results from the study showed that decision-makers can effectively select new LPDC machinability as expected.

Keywords: Low- pressure die casting, Decision support system, Analytic hierarchy process, TOPSIS method, Multi-criteria decision making

1. INTRODUCTION

Low-Pressure Die Casting (LPDC) is an economical solution to producing high- quality brass parts, e. g. sanitary fittings, valve housings, water meter housings, and building hardware due to its advantages of smooth filling and good feeding capabilities. Likewise, it is widely used because LPDC technology can reduce scrap waste and operation time while increasing production throughput. Consequently, many companies have considered using this technology to increase their manufacturing capability. The advantages of LPDC include high yield capacity, the reduction of machining costs, excellent control of process parameters, a high degree of automation, good metallurgical quality, and good mechanical as well as metallurgical properties, etc.

The quality of LPDC parts is mostly influenced by machine technology and process conditions such as filling pressure, filling speed, holding pressure, pressure holding time, casting temperature, die temperature, etc. Hence, the selection of the proper LPDC machine is an overly critical aspect of the casting processes for products. If the decision-maker can choose the correct casting machine, the production quality, speed, flexibility, scrap, energy consumption, and investment costs enable good results by the casting processes' performance. On the other hand, dramatic problems could occur in casting production performance when decided with incorrect casting machines, such as poor quality, high scrap percentage, high energy consumption etc.

In this work, the following research questions are raised: What is the most suitable methodology to select the LPDC machine? What is the result of decision-making? In light of these questions, several research papers related to this topic have been investigated. Tabucanon et al. (1997) developed a decision support system to solve the multi- criteria machine selection problem of machine selection in flexible manufacturing systems. Arslan (2004) designed a decision support system that was developed for the selection of machine tools. Fu et al. (2008) indicated the influence of different parameters on the mechanical properties of LPDC magnesium alloy AM50. Merlin et al. (2009) investigated the impact behavior of A356 alloy for automotive wheels. The results showed that the impact strength of T6 heat-treated wheels was higher than as-cast ones. Meanwhile, higher impact strength always showed correspondence with finer microstructure. Ahmadzadeh et al. (2016) suggested that differences among machines in terms of cost, speed, quality, after- sale services, type, and the number of machines were important parameters to be considered. Hafezalkotoba et al. (2018) proposed a decision support system for agricultural machines and equipment selection to develop and improve the economic conditions in the agriculture field to maintain food demand with a case study on olive harvester machines. Li et al. (2020) developed a novel hybrid Multi- Criteria Decision Making (MCDM) model for machine tool selection using fuzzy DEMATEL. The

indication is that the presented hybrid model has advantages in granting flexibility to the preferences of decision-makers for machine tools selection problems. Breaz et al. (2017) presented a decision-making process for selecting between CNC milling, robot milling and a process of additive manufacturing using the AHP method. This method has a certain degree of generality, specifically targeting metal accurate parts from the machine-building industry. It can be applied for every part considered for manufacturing.

As mentioned above, numerous researches are related in this area, but only a few researchers have published papers related to the topic of selecting appropriate machine technology and parameters, especially the manufacturing of the LPDC machine. Since it is a complex problem with many criteria and parameters for consideration that affects product quality and costs to firms, it needs to deal with both qualitative and quantitative criteria. This is particularly true in the early decision-making phases of machine selection, which have the potential to reduce production impact and manufacturing costs.

To address the above issues, this study presents a decision support system method that has been developed using integrated the AHP and TOPSIS methods and presents a numerical example for solving this problem. The AHP is one of the most famous and extensively used soft computing MCDM methodologies. It is based on priority theory and deals with complex problems that involve the consideration of multiple criteria and alternatives simultaneously. Its ability to incorporate data and the judgment of experts in a logical way provides a scale for measuring intangible qualities.

Applying AHP in combination with TOPSIS methods allows for more decision-making flexibility and performance. The AHP is used to define the weight of each criterion and sub-criterion through qualitative and quantitative comparisons. AHP is suitable for determining the quantitative and qualitative data which limitation for large numbers of numerical data that has a high chance of bias in making decisions. TOPSIS is another famous MCDM approach used in solving decision-making problems. The TOPSIS concept provides the best rankings for each criterion as it is described in the form of a simple mathematical formula. TOPSIS allows the results from decision-making to correlate with a solution target concept that is not paying attention to only pairwise comparisons as AHP. Accordingly, combining the two techniques is a great way to counter their weaknesses. This type of integration will lead to better results in decision-making efficiency, as shown in the researches of Prakash and Barua (2015) and Hasnain et al. (2020).

The structure of this paper is organized as follows: Section 2 presents the basic approaches used in LPDC. Section 3 presents the deciding multi-criteria decision-making model, while Section 4 presents the verification and validation techniques with a case study. Section 5 presents the research results and discussions, and

Section 6 presents the research conclusions and recommendations.

2. LOW-PRESSURE DIE CASTING (LPDC) METHOD

Die casting is a metal casting process that is characterized by forcing molten metal under high pressure into a mold cavity. The mold cavity is created using two hardened tool steel dies which have been machined into shape and work similarly to an injection mold during the process. Most die castings are made from non-ferrous metals, specifically zinc, copper, aluminum, magnesium, lead, pewter, and tin-based alloys. Depending on the type of metal being cast, a hot or cold chamber machine is used. Low-pressure die casting primarily uses alloys with low melting points, allowing for the production of components up to approximately 150 kg. The advantages are high strength and the ability to form complex geometries while maximizing material usage. The LPDC process by Powell and Luo is illustrated in Figure 1. (Powell et al., 2012)

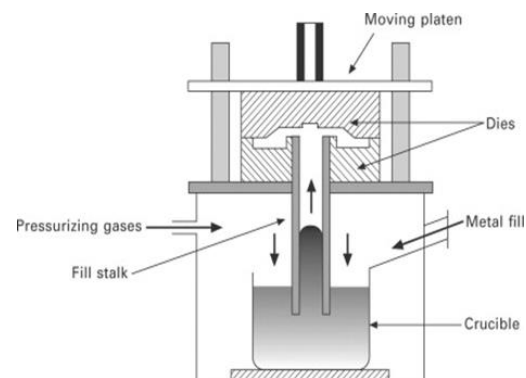


Figure 1 Low-Pressure Die Casting Process

The mold is located above the sprue. Metal flows up the sprue and into the runner system and the casting cavity. The metal flow for the arrangement is accomplished by pressurizing the furnace, which is located below the mold. The rate of metal flow is controlled by the rate of pressurization of the furnace. Metal flow can also be directed by electromagnetic pumping, but the principle of low-pressure casting is the same. Zhang and Wang (2012) stated that LPDC is one of the most widely used casting processes for manufacturing light-weight components in industrial sectors, including automotive, energy, electronics, etc. This process allows an excellent compromise between quality, costs, productivity, and geometrical feasibility.

Another advantage of this process is the precise control of die cavity filling. Molten metal flows quickly and smoothly through the feeding conduits, reducing oxide formation and preventing porosity. This process was created to produce axially symmetrical parts such as car wheels or water valves. Bonollo et al. (2005) concluded that the advantages of low pressure die casting process were numerous: the high yield achievable

(typically over 90%), the reduction of machining costs, the absence of feeders, the excellent control of process parameters which can be obtained with a high degree of automation, the good metallurgical quality, a homogeneous filling, and controlled solidification dynamics, resulting in good mechanical and technological properties of the castings.

Selecting the appropriate LPDC machine is quite complicated as many parameters are concerned, such as correlating processes with material preference, melting rate, cycle time, maximize production rate, energy consumption, the number of workers, etc. Therefore, the aim of this paper is to propose a Multi-Criteria Decision Making (MCDM) model that can support LPDC machine selection. The MCDM literature review and the decision-making tools are presented in the next section.

3. MULTIPLE-CRITERIA DECISION MAKING (MCDM)

The MCDM evaluation procedure for supporting LPDC machine selection by using the AHP and TOPSIS is presented in this paper. It consists of four main steps as summarized in Figure 2.

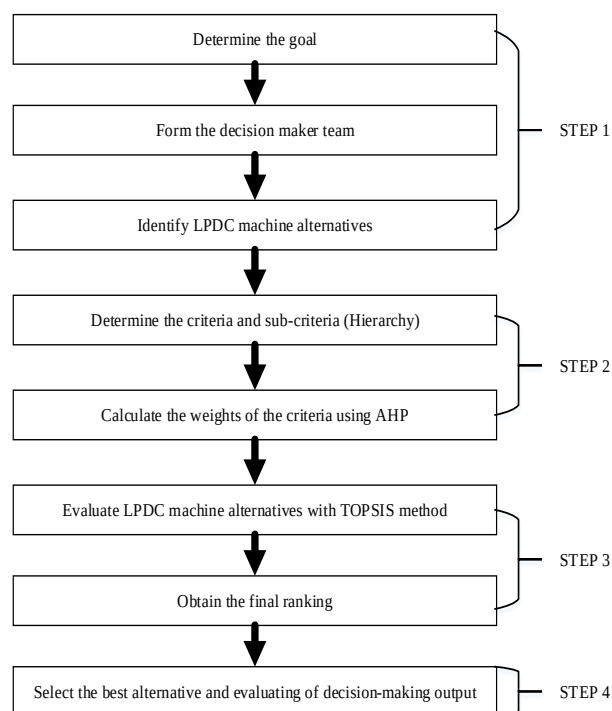


Figure 2 The MCDM evaluation procedure by using the AHP and TOPSIS (Developed by the author)

Step 1: Determine the goal and construct a decision-making team, then determine the machine decision alternative. Decision making is a central responsibility of managers and leaders. It requires problem defining and related factors identification. Doing so helps create a clear understanding of what needs to be decided and can

influence the choice among alternatives. An important aspect of any decision is its purpose or objective. This is different from identifying a specific decision outcome; rather, it has to do with the motivation to decide in the first place.

Step 2: Determine the criteria and sub- criteria (Hierarchy) . Identifying the evaluation criteria is considered the most important performance measure for the machine selection problem. The decision-making hierarchy structure is constructed for the evaluation of criteria and calculating the weights of these criteria using the AHP method. The AHP was introduced by Saaty in 1980. This method benefits from its similarity to the decision-making mechanisms of human beings, namely decomposition, judgment, and synthesis. It is particularly distinguished by its ability to manage different classes of criteria: qualitative and quantitative criteria Saaty, 1980). Nowadays, it is widely used in various fields including economics, ecology, and industry. This method is used to solve complex decision- making problems that have several attributes by modeling unstructured problems under study into hierarchical forms of elements (Boonkanit & Kengpol, 2010). The AHP is widely used by decision- makers and researchers. Kengpol and Boonkanit (Kengpol & Boonkanit, 2011) developed the decision support framework for developing an ecodesign at the conceptual phase based upon ISO/ TR14062. Khamhong et al. (2019) implemented the fuzzy AHP based criteria analysis for 3D printer selection in additive manufacturing that is related to selecting the best alternative of 3D printers by analyzing two types of decision-makers. Chaiyaphan and Ransikarbum (2020) presented criteria analysis of food safety using the AHP by applying a case study in Thailand's fresh markets which subject from the viewpoints of stakeholders. Busaba (2012) presented the selection of a cellular layout for an Electronics Manufacturing Service (EMS) by AHP. Then, a computer simulation was done for the evaluation of the layout design. From the results of the simulation, the cellular layout design can increase the throughput rate by 32%, decrease the average time in the system by 28%, and increase the average utilization of a workstation by 13% . Busaba and Piyanan (2013) proposed an inventory classification method based on AHP and lot sizing policy for purchasing materials in group A for a case study factory. Satirasetthavee et al. (2018) offered the determination criteria of an appropriate location for the construction of a truck terminal in Thailand by using AHP; the study aims to explore more factors and the appropriate weight of each factor to determine an appropriate location to more effectively decrease transportation costs in Thailand.

To obtain the degree of relative importance for the elements at each level, a pairwise comparison matrix is developed using Saaty 1-9 preference scale, as shown in Table 1.

Table 1 Pairwise comparison scale

Scale	Definition
1	Equally important
3	Minimally important
5	Highly important
7	Very highly important
9	Extremely important
2,4,6,8	The intermediate value between adjacent scales

Then, the eigenvector and the maximum eigenvalue (λ_{max}) are derived from the pairwise comparison matrices. The significance of the eigenvalue is to assess the strength of the consistency ratio CR of the comparative matrix in order to validate whether the pairwise comparison matrix provides a completely consistent evaluation. The final step is to derive the consistency index and the consistency ratio (Saaty & Vargas, 2001).

The procedure of AHP is presented as follows:

Process 1: Build the structural hierarchy of the problem.

Process 2: Calculate the pairwise comparison matrix. The scoring average of the clustered expert will be used for determination by Geometric mean (Gm.) as Equation 1.

$$Gm = \sqrt[n]{N_1 \times N_2 \times N_3 \times \dots \times N_n} \quad (1)$$

Then, the calculation of Gm is used to perform in the AHP matrix model. Assuming n attributes, the pairwise comparison of attribute i with attribute j yields a square matrix $A_{n \times n}$ where a_{ij} denotes the comparative importance of attribute i with respect to attribute j. In the matrix, $a_{ij} = 1$ when $i = j$ and $a_{ji} = 1/a_{ij}$ (Valentina et al., 2015).

$$A_{n \times n} = \begin{pmatrix} a_{11} & \dots & a_{1n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1} & \dots & a_{nn} \end{pmatrix}$$

Process 3: Once the pairwise matrix is done, it should be normalized using rule number (2).

$$C_{ij} = \frac{a_{ij}}{\sum_{j=1}^n a_{parameters}} \quad \text{Where } i, j = 1 \dots n \quad (2)$$

Process 4: Calculate the weighted normalized decision matrix.

$$W_i = \sum_{j=1}^n C_{ij} \quad \text{Where } i = 1 \dots n \quad (3)$$

Process 5: Calculate the Eigenvector and row matrix.

$$E = N^{th} \text{rootvalue} / \sum N^{th} \quad (4)$$

$$\text{Row Matrix} = \sum_{j=1}^n a_{ij} \times e_{j1} \quad (5)$$

Process 6: Calculate the Eigenvalue λ_{max}

$$\lambda_{max} = \text{Row Matrix} \quad (6)$$

Process 7: Calculate the consistency index and consistency ration.

$$CI = (\lambda_{max} - 1) / (n - 1) \quad (7)$$

$$CR = CI / RI \quad (8)$$

Where n and RI denote the order of the matrix.

Step 3: Evaluate the LPDC machine alternatives with the TOPSIS method to achieve the final ranking results. TOPSIS is one of the numerical methods for multi-criteria decision-making (on the history of TOPSIS see (Hwang & Yoon, 1981; Hwang et al., 1993; Zaltako & Novoselac, 2013)). This is a broadly applicable method with a simple mathematical model. The standard TOPSIS methodology aims to select the alternatives which have the shortest distance from the positive ideal solution and the longest distance from the negative ideal solution at the same time. The positive ideal solution maximizes the benefit attributes and minimizes the cost attributes, whereas the negative ideal solution maximizes the cost attributes and minimizes the benefit attributes. The TOPSIS methodology has been applied extensively in the MCDM field, such as by Khalili-Damghani et al. (2013); Rubayet and Karmaker (2016); Wisetla and Ransikarbum (2020); Warapoj and Nitidetch (2019).

The stepwise procedure for implementing TOPSIS is presented as follows:

Process 1: Construct the normalized decision matrix of beneficial and non-beneficial criteria.

$$r_{ij} = \frac{x_{ij}}{\sqrt{\sum_{j=1}^J x_{ij}^2}} \quad \text{Where } j = 1 \dots J, i = 1 \dots n \quad (9)$$

x_{ij} and r_{ij} are the original and normalized scores of the decision matrix, respectively.

Process 2: Construct the weighted normalized decision matrix.

$$V_{ij} = w_i \times r_{ij} \quad \text{where } j = 1 \dots J, i = 1 \dots n \quad (10)$$

Process 3: Determine the positive ideal solution (PIS) and the negative ideal solution (NIS).

$$A^+ = \{V_1^+, V_2^+, \dots, V_n^+\} \text{ max values} \quad (11)$$

$$V_i^+ = \{\max(V_{ij}) \text{ if } j \in J; \min(V_{ij}) \text{ if } j \in J^-\} \quad (12)$$

$$A^- = \{V_1^-, V_2^-, \dots, V_n^-\} \text{ min values} \quad (13)$$

$$V_i^- = \{\min(V_{ij}) \text{ if } j \in J; \max(V_{ij}) \text{ if } j \in J^-\} \quad (14)$$

Process 4: Calculate the Euclidian distance of each alternative from PIIS and NIS.

$$d_i^+ = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^+)^2} \quad \text{Where } j = 1, 2, \dots, J \quad (15)$$

$$d_i^- = \sqrt{\sum_{j=1}^n (V_{ij} - V_j^-)^2} \quad \text{Where } j = 1, 2, \dots, J \quad (16)$$

Process 5: Calculate the relative closeness coefficient to the ideal solution of each alternative CC_i

$$CC_i = \frac{d_i^-}{d_i^+ - d_i^-} \quad \text{Where } j = 1, 2, \dots, J \quad (16)$$

Process 6: Based on the decreasing values of the closeness coefficient, alternatives are ranked from the most valuable to the worst. The alternative having the highest closeness coefficient (CC_i) is selected.

Step 4: Evaluating Outcomes: the objective of evaluating outcomes is for the decision-maker to develop insight into the decision. Many of the lessons developed in this stage come from examining the implications of the decision. Insight can be obtained by referencing key business metrics, such as increased revenue, lower costs, larger market share, or greater consumer awareness. Once the outcome of a decision is known, the results may imply a need to revise the decision and try again. When decision outcomes are immeasurable or ambiguous, data deliberation and a measure to deal with negative attitudes are considered.

Maintaining self-esteem may also cause decision-makers to attribute good outcomes to their actions and bad outcomes to factors outside their control. This type of bias can limit the honest assessment of what went right and what did not, thus reducing what could be learned by carefully evaluating outcomes. Hence, a case study of this research is to highlight the result supporting the proposed decision, which contributes to the research outcome.

4. CASE STUDY

The case study in this research was performed at the medium-sized manufacturing factory located in Samut Prakarn Province, Thailand. It manufactures and distributes water valves, ball taps, and ball valves. The company also offers water meters, brass rods, valves, and related fittings. According to the proposed model in Figure 2, Step 1 has been performed by determining the goal, constructing a decision-making team, and determining the machine decision alternative. Over many years, the company has continued to focus on the development of production processes to be more efficient, while reducing costs and improving quality, especially in the die casting production process of the sand-casting department, which is the most important process for water valve production.

The production process starts at the sand-casting department where the sand and core are prepared for a jolt and squeeze operations to obtain the sand mold. In the melting process, pouring operations are considered in the next step. When this operation is completed, the sprue

will be removed to be used as a water meter. Then, the product is grounded and undergoes shot blasting operations. The process of the case study is explained in detail in Figure 3.

According to Figure 3, a case study of the die casting production process, defects can cause rework or even worse; they can lead to scraps for many reasons, such as lack of quality control, the absence of a maintenance schedule, lack of skills, lack of standard machine, absence of communication, uncontrollable sand quality, light insufficient, a lack of work rules, and a high rate of downtime. In this case study, the defect ratio has been analyzed by the engineering team and it has been discerned that the majority of defective work is found in the casting process.

The chief executive officer subsequently ordered changes in the current casting production process from the gravity sand casting process; the alloy is poured into a mold made of sand that must be destroyed to reveal the manufactured component, to the LPDC method with its advantage of strength and the ability to form complex geometries whilst maximizing material usage and controlling die cavity filling at the same time.

There are many advantages of LPDC compared to the current casting process. For example, it guarantees high yields greater than 90 percent. The production costs are lower than for high-pressure die casting, and it has improved linear tolerance than gravity casting. It is also possible to obtain parts with thin walls. However, this manufacturing technique has certain main disadvantages, e.g. the tooling costs being slightly higher than other casting technologies such as gravity casting. It also requires complex machinery that may be expensive.

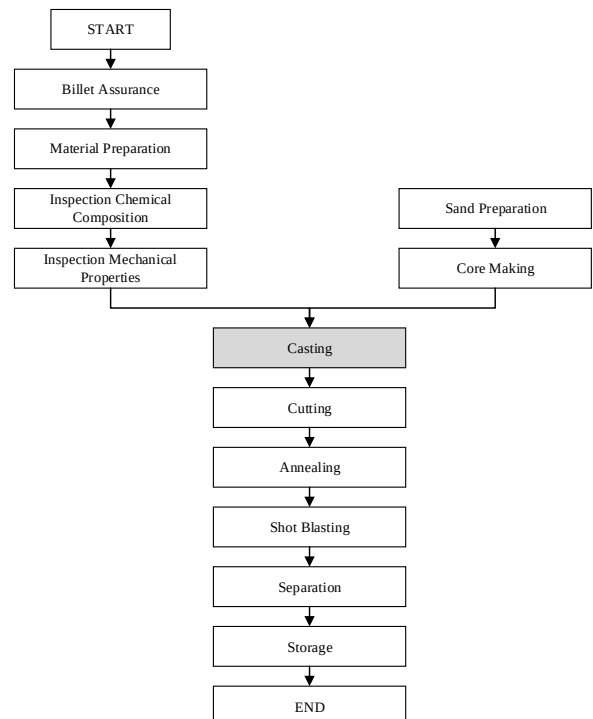


Figure 3 A case study of the die-casting production process

As mentioned earlier, the quality of LPDC parts is mostly influenced by the process technology and conditions, which are highly impacted by the casting machine. Thus, choosing the right die casting machine is an important consideration because it impacts the process flexibility, involves a high degree of reproducibility and precision, energy-saving, and maximum productivity and efficiency. Many decision parameters must be involved such as the ton capacity, injection and ejection system, the die locking mechanism, the electrical systems, etc. In this case study, the current process is adapted by three low pressures die casting machine alternatives; each machine has certain advantages and disadvantages to decide from multiple perspectives. The characteristics of these machines are illustrated in Figure 4 and described in the next section.



Figure 4 LPDC alternatives machines

4.1 LPDC Machine A

LPDC machine A in the selection list is a compact system with an integrated induction melting furnace, two manipulator units for the two die halves, a coating or cooling bath, and an electronic control unit with a touch panel. The control panel of the system is divided into two logical areas: one for controlling the furnace and the other for controlling the casting machine. However, both control areas are monitored by a Programmable Logic Control (PLC) and visualization.

The power for the inductors is supplied via a thyristor controller. There is one thyristor module available for each of the three inductors that are controlled by a control unit. At the beginning of the casting cycle, the manipulator starts from the park position. The manipulator swivels so that the opened die halves are in front of the core insertion window, which must be opened before the core is inserted. The sand core is then inserted into the mobile die half.

In the following, reference will always be made to the mobile and the fixed die, where the mobile die represents the side of the mobile die half. The fixed die or the fixed die half is mounted rigidly to the manipulator arm and can be swiveled, but not traversed. After the sand core is inserted by hand, the core insertion window must be closed, and the casting cycle starts automatically. The manipulator moves to the furnace and the freely programmable pressure curve is executed at the same time. After the die touches down on the riser tube, the molten metal is filled into the die from below by a controlled pressure build-up.

This procedure guarantees the laminar flow in die without turbulence. After the casting process, the die is lifted automatically from the furnace, and the manipulator

moves to the parts removal position. The die opens and the casting part is ejected. It drops automatically into the vertically adjustable removal device. The table registers the finished casting by an initiator and moves back to its original position. In this position, the casting is tilted from the table through the removal window out of the work zone.

An additional collecting container is recommended for this procedure. After the casting part is ejected, the manipulator traverses to the split coating/cooling bath. The die halves dip into the respective bath half. By the individually adjustable dip time, the die halves are cooled and coated with a layer of graphite. The manipulator then moves back to the core insertion position. At this point, the cycle can be repeated, as described above, or it can be ended. The second manipulator works during production equally. When both manipulators are in production, the manipulators always traverse clockwise.

If only one manipulator is in production and another is in park position for die change or is in a special function i.e. sandblasting, the manipulator is moved counterclockwise to the furnace. The entire system with its area of movements is enclosed by a safety fence and safety doors that may not be opened during the running operation. In addition, there is a safety barrier between the parking position for die change and the rest of the machine. This allows the operator to work on one manipulator, e.g. maintenance or die changing, while the second manipulator is working.

4.2 LPDC Machine B

The LPDC machine B is specially designed to work with an operator for each machine. Its task is to place the sand-cores and to supervise quality. The machine is composed of a furnace and a manipulator that controls all the die movements. The operator is positioned in front of the core placing area. Once the head is placed in the right position, the working cycle is ready to start. The automatic cycle can be started by pushing the relevant button, and it will be completely automatic.

The manipulator closes the two half-dies, places them horizontally, and rotates the furnace. Next, the furnace raises, and the molten metal is injected into the die. When the furnace lowers, the manipulator rotates and places itself in the core-placing area. The half dies open themselves and the operator picks up the cast with appropriate pliers. Then, the dies dip into the tank filled with liquid graphite and return to the starting position. After that, the bench tilts and gets ready for the positioning of another core.

The operator will repeat the operation previously described. The machine positions the dies on the furnace and low-pressure casts automatically; it waits till the melted metal gets solid and opens the half-dies to allow the casting extraction.

4.3 LPDC Machine C

LPDC Machine C can be used for casting all kinds of small components of zinc alloy and copper alloy. This

technology greatly reduces the internal porosity in products and improves the quality of products, so it has been welcomed by many manufactures. This machine has a similar technology as Machine A, but is made by another brand in another country.

According to the information for three machines, Step 2 of the proposed model has been performed. The criteria were separated to calculate AHP (Underlining character is the best parameter), as illustrated in Table 2.

Table 2 Characteristics of Machines A, B, and C

	Criteria	Values Machine		
		A	B	C
C1	Melting rate	<u>500 kg/h</u>	410 kg/h	350kg/h
C2	Cycle time	<u>35s</u>	50s	70s
C3	Maximal production/ Day	822 pieces	576 pieces	411 pieces
C4	Capacity of the furnace	<u>1800 Kg</u>	1000 Kg	<u>1800kg</u>
C5	Charging mode	Manual	<u>Automatic</u>	Manual
C6	Control system	PLC S7	<u>PC477b</u>	<u>PC477b</u>
C7	Hydraulic pressure	<u>90 bar / 7.5 kW</u>	<u>90 bar / 7.5 kW</u>	80bar/ 7.5 kW
C8	Electrical feed	400 V	410 V	<u>380V</u>
C9	Energy during melting	150 kW	<u>80kw</u>	125KW
C10	Scrap percentage	3%	<u>1%</u>	2%
C11	Number of workers	2	<u>1</u>	2

The LPDC machine selection hierarchy structure is presented in Figure 5. It consists of eleven decision criteria and three machine alternatives. However, the cost of each LPDC machine was not considered because the distributors offered the same price level, and the top management aimed to pay more attention to machine efficiency than the economic perspective.

Eleven attributes were chosen as comparison criteria by the decision-making team (experts), including a production manager, general manager, and production engineer. The experts' team profile includes: the production manager possesses a master's degree in industrial engineering; the general manager possesses a master's in economics; the senior production engineer

possesses a master's degree in electrical engineering. Moreover, years of experience in the water valves industry among the experts were 20, 24, and 15 years, respectively.

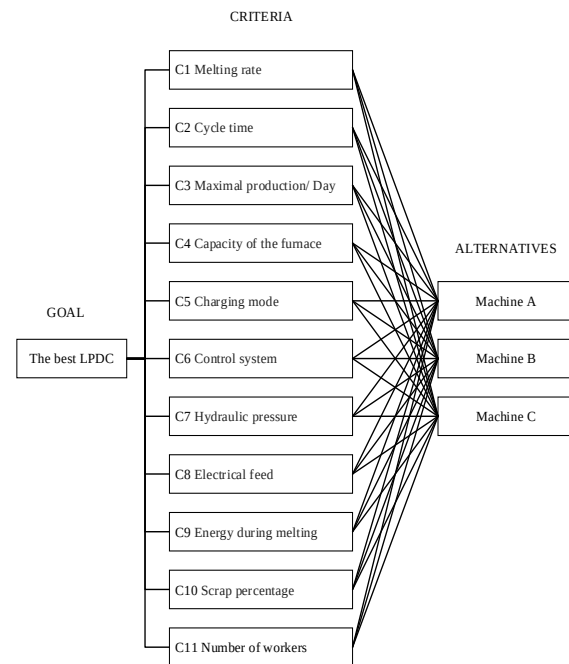


Figure 5 Hierarchy structure for the LPDC machine selections

The analysis and calculation of eleven criteria were performed based on the proposed methodology in Step 2. It is important to consider the weight of important criteria, and the comparison using pairwise comparison from the decision rating of the decision-maker. The Gm from Equation (1) was retrieved from the expert group that compared each pair using the primary criteria following the AHP. The calculation methods are as follows.

The first expert has given a score of 5, while the second expert has given a score of 7, and the third expert has given a score of 3; the results are as follows:

$$C2 = \sqrt[3]{5 \times 7 \times 3}$$

$$C2 = 4.72$$

The pairwise comparison matrix is presented in Table 3 and the formula (3), the result criteria weight calculation is presented in Tables 4-5.

Table 3 Pair-wise comparison matrix

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11
C1	1.00	0.21	0.16	3.00	2.00	0.25	0.33	0.20	0.14	0.12	0.20
C2	4.72	1.00	0.71	5.00	8.00	3.00	5.00	3.00	4.00	2.00	3.00
C3	6.25	1.40	1.00	6.00	9.00	3.00	5.00	4.00	3.00	2.00	3.00
C4	0.33	0.20	0.17	1.00	3.00	0.20	0.62	0.50	0.20	0.14	0.76
C5	0.50	0.13	0.11	0.33	1.00	0.14	0.33	0.14	0.11	0.11	0.28
C6	4.00	0.33	0.33	5.00	7.00	1.00	3.00	2.00	1.00	0.66	2.00
C7	3.00	0.20	0.20	1.61	3.00	0.33	1.00	0.76	0.25	0.27	1.00
C8	5.00	0.33	0.25	2.00	7.00	0.50	1.32	1.00	0.45	0.33	1.50
C9	7.00	0.25	0.33	5.00	9.00	1.00	4.00	2.22	1.00	2.00	2.00
C10	8.33	0.50	0.50	7.00	9.00	1.52	3.70	3.00	0.50	1.00	2.50
C11	5.00	0.33	0.33	1.32	3.57	0.50	1.00	0.67	0.50	0.40	1.00
Sum	45.13	4.89	4.10	37.26	61.57	11.44	25.31	17.49	11.15	9.04	17.24

Table 4 Criteria weight table

C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11
0.03	0.19	<u>0.21</u>	0.03	0.01	0.10	0.04	0.07	0.12	0.14	0.06

Table 5 Consistency matrix

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	WSV*	CrW*
C1	0.03	0.04	0.03	0.09	0.03	0.02	0.01	0.01	0.02	0.02	0.01	0.31	0.03
C2	0.13	0.19	0.15	0.14	0.12	0.30	0.21	0.20	0.50	0.27	0.17	2.38	0.19
C3	0.17	0.27	0.21	0.17	0.13	0.30	0.21	0.26	0.37	0.27	0.17	2.54	0.21
C4	0.01	0.04	0.04	0.03	0.04	0.02	0.03	0.03	0.02	0.02	0.04	0.32	0.03
C5	0.01	0.02	0.02	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.01	0.02	0.02	0.17	0.01
C6	0.11	0.06	0.07	0.14	0.10	0.10	0.13	0.13	0.12	0.09	0.11	1.18	0.10
C7	0.08	0.04	0.04	0.05	0.04	0.03	0.04	0.05	0.03	0.04	0.06	0.50	0.04
C8	0.14	0.06	0.05	0.06	0.10	0.05	0.06	0.07	0.06	0.05	0.08	0.77	0.07
C9	0.19	0.05	0.07	0.14	0.13	0.10	0.17	0.15	0.12	0.27	0.11	1.51	0.12
C10	0.23	0.10	0.11	0.20	0.13	0.15	0.16	0.20	0.06	0.14	0.14	1.61	0.14
C11*	0.14	0.06	0.07	0.04	0.05	0.05	0.04	0.04	0.06	0.05	0.06	0.67	0.06

*Remarks: (WSV = weighted sum value, CrW = criteria weight, CR = Consistency Ratio) In this study, $n = 11$, as a result, $RI = 1.51$, $\lambda_{max} = 11.80$, $CI = (11.80-11)/(11-1) = 0.08$, $CR = 0.053$ (If the Consistency Ratio is lower than 10%, the inconsistency is acceptable).

Table 6 Pre-Normalized decision matrix

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11
MC A	500	35	822	1800	2	3	90	400	150	3	2
MC B	410	50	576	1000	5	5	90	410	80	1	1
MC C	350	70	411	1800	2	1	80	380	125	2	2
$\sqrt{\sum_{j=1}^n x_{ij}^2}$	735.26	92.87	1,084.61	2,734.96	5.74	5.92	150.33	687.39	211.01	3.74	3.00

Table 7 Normalized decision matrix

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11
MC A	0.68	0.38	0.76	0.66	0.35	0.51	0.60	0.58	0.71	0.80	0.67
MC B	0.56	0.54	0.53	0.37	0.87	0.85	0.60	0.60	0.38	0.27	0.33
MC C	0.48	0.75	0.38	0.66	0.35	0.17	0.53	0.55	0.59	0.53	0.67

Table 8 Weighted normalized decision matrix

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11
MC A	0.02	0.07	0.16	0.02	0.01	0.05	0.03	0.04	0.09	0.11	0.04
MC B	0.02	0.10	0.11	0.01	0.01	0.08	0.03	0.04	0.05	0.04	0.02
MC C	0.01	0.15	0.08	0.02	0.01	0.02	0.02	0.04	0.07	0.07	0.04

Table 9 Ideal solutions and Euclidian distances values

	C1	C2	C3	C4	C5	C6	C7	C8	C9	C10	C11	d_i^+	d_i^-
MC A	0.02	0.07	0.16	0.02	0.01	0.05	0.03	0.04	0.09	0.11	0.04	0.08	0.12
MC B	0.02	0.10	0.11	0.01	0.01	0.08	0.03	0.04	0.05	0.04	0.02	0.11	0.08
MC C	0.01	0.15	0.08	0.02	0.01	0.02	0.02	0.04	0.07	0.07	0.04	0.11	0.09
V_i^+	0.02	0.15	0.16	0.02	0.01	0.08	0.03	0.04	0.09	0.11	0.04		
V_i^-	0.01	0.07	0.08	0.01	0.01	0.02	0.02	0.04	0.05	0.04	0.02		

In the next step, the decision result from AHP is calculated to ranking and estimations of the three machines by using the TOPSIS method, as proposed in Step 3 (Figure 2). Consequently, equation numbers 9-16 are applied in Tables 6-9. The pre-normalized decision matrix of the TOPSIS method is presented in Table 6. It is initiated by creating an evaluation matrix consisting of three alternatives and eleven criteria, with the normalized value of each alternative and criteria. After that, the matrix is normalized for the decision matrix of beneficial and non-beneficial criteria, as depicted in Table 7. Then, the LPDC machine alternatives with the TOPSIS method in Step 3 are evaluated using the criteria weight from Table 4. The weighted norm decision matrix is presented in Table 8, while ideal solutions and Euclidean distances values are presented in Table 9.

Step 4, as proposed in Figure 2, involves selecting the best alternative and evaluating the decision output after

MCDM methods are used to rank the potential alternatives by considering the weights of all criteria obtained by AHP. A decision matrix using three decision-makers' opinions is developed using numerical values. The decision matrix of the TOPSIS method is shown in Table 10.

The aggregated values of each criterion are then calculated by using the average technique in the TOPSIS method. Focusing on the values of closeness coefficients of three suitable machines, Machine A becomes the most dominating alternative that has the highest closeness coefficient (CC_i) of 0.60. As a result, Machine A should be selected as the best machine among the three alternatives, followed by Machine C (0.44) and Machine B (0.43), respectively.

Table 10 Rank of machines based on CC_i

Machine	d_i^+	d_i^-	$d_i^+ + d_i^-$	CC_i	Rank
MC A	0.08	0.12	0.20	0.60	1
MC B	0.11	0.08	0.19	0.43	3
MC C	0.11	0.09	0.20	0.44	2

5. RESULTS AND DISCUSSION

The MCDM evaluation procedure for supporting LPDC machine selection by using the AHP and TOPSIS is presented in this paper. It consists of four main steps for selecting the best LPDC machine. In this case study, eleven criteria are analyzed including Melting rate, Cycle time, Maximal production per Day, Capacity of the furnace, Charging mode, Control system, Hydraulic pressure, Electrical feed, Energy during melting, Scrap percentage, and Number of workers. Top ranking criteria are Maximal production rate (C3), Cycle time (C2), and scrap percentage (C10). A variety of decision-making factors and different opinions from experts can be resolved and consented logically by this method. Machine A becomes the most dominating alternative, which has the highest closeness coefficient score. The result of the final decision-making is fulfilled with involved parties. Therefore, the results from the application of this methodology can offer the water valve manufacturer case study with valuable insight into the criteria that reflect the business assessment of machine selection.

This framework will act as a guide for the decision-makers to select the most suitable LPDC machine via an integrated approach of AHP and TOPSIS. The anticipated methods in this research consist of four steps at its core, starting from determining the goal and constructing a decision-making team, then determining the machine alternative with the criteria of the existing problem, and finally, inspection and identification. The calculation method is carried out by using AHP and TOPSIS. The final decision is made by selecting the best alternative and evaluating the decision output.

6. CONCLUSIONS AND RECOMMENDATIONS

Selecting the right machine is an important issue for business improvement and supporting the industry 4.0 development direction. This paper presents a methodology for selecting the LPDC machine based on a hybrid multi-criteria decision-making process. However, there are several criteria that need to be considered in the machine selection process, which involves multiple consideration parameters based on the requirement of decision-makers, such as production rate, waste ratio, and energy consumption, etc.

According to the research question, selecting an appropriate manufacturing machine is an especially important and complex problem for firms, usually dealing

with many criteria. The contribution of this research is the comprehensive decision-making methodology for selecting LPDC machine production. The approach presented in this paper applies the AHP and TOPSIS methods for selecting the most beneficial variant among three machine structures. Moreover, a large matrix with eleven criteria was used for pairwise comparisons and presented. The closeness coefficient values are used in decision making; the best machine alternative with the highest rate is selected. In this research, the results from the present method were calculated using Microsoft Excel. In conclusion, the utilization of the machine after installation and operation was achieved as anticipated. Therefore, it is not optional, but essential to implement this method for dealing with a variety of multi-criteria decision-making problems due to its flexibility. The proposed method is effective in a group decision environment and can also solve the problem of complex individual decision-making.

In addition to suggestions for future research, some other MCDM methods, such as ELECTRE; PROMETHEE, etc. and other decision-making criteria such as environmental or economic perspectives can be integrated and applied to increase the ability for decision making.

7. ACKNOWLEDGMENT

The author gratefully acknowledges Rajamangala University of Technology Phra Nakhon and the collaboration with a firm in Thailand and its staff, whose names, unfortunately, cannot be revealed because of a confidentiality agreement.

8. REFERENCES

- Ahmadzadeh, K., Karami, F., & Shhanqy, K. (2016). New method of machine selection for product layout: the case of Iranpichkar factory. *Journal of Industrial Strategic Management*, 1(1), 65-76.
- Arslan, M. C. (2004). A decision support system for machine tool selection. *Journal of Manufacturing Technology Management*, 15(1), 101-109. <https://doi.org/10.1108/09576060410512374>
- Bonollo, F., Urban, J., Bonatto, B., & Botter, M. (2005). Gravity and low pressure die casting of aluminum alloys: a technical and economical benchmark. *la metallurgia italiana*, 6, 23-32.
- Boonkanit, P., & Kengpol, A. (2010). The Development and Application of a Decision Support Methodology for Product Eco-Design: A Study of Engineering Firms in Thailand. *International Journal of Management*, 27(1), 185-201.
- Breaz, E. R., Boluga, O., Racz, G. S., (2017). Selecting between CNC milling, robot milling, and DMLS processes using a combined AHP and fuzzy approach. *Information Technology and Quantitative Management*, 122, 796-803.
- Busaba, P. (2012). Analytic hierarchy process for cell layout selection and simulation for electronic manufacturing service plant. *KKU Engineering Journal*, 39(4), 365-374. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/easr/article/view/4608>

- Busaba, P., & Piyanan, K. (2013). Analytic hierarchy process for inventory classification and purchasing order policy for class A inventory: A case study. *KKU Engineering Journal*, 40(2), 163-171. <https://ph01.tcithaijo.org/index.php/east/article/view/19096/16799>
- Chaiyaphan, C., & Ransikarbum, K. (2020). Criteria Analysis of Food Safety using the Analytic Hierarchy Process (AHP)-A Case study of Thailand's Fresh Markets *E3S Web of Conferences*, 141, 1-7. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/202014102001>
- Fu, P. H., Luo, A. A., Jiang, H. Y., Peng, L. M., Yu, Y. D., Zhai, C. Q., & Sachdev, A. K. (2008). Low-pressure die casting of magnesium alloy AM50: response to process parameters. *Journal of Materials Processing Technology*, 205(1-3), 224-234. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2007.11.111>
- Hafezalkotoba, A., Hami-Dindara, A., Rabiea, N., Hafezalkotob, A., (2018). A decision support system for agricultural machines and equipment selection: A case study on olive harvester machines. *Computers and Electronics in Agriculture*, 148, 207-216.
- Hasnain, S., Khurram, M. A, Akhter, J., Ahmed, B. Abbas, N. (2020). Selection of an industrial boiler for a soda-ash production plant using analytical hierarchy process and TOPSIS approaches. *Case Studies in Thermal Engineering*, 19, 100636.
- Hwang, C. L., & Yoon, K. (1981). *Multiple Attribute Decision Making: Methods and Applications*, Berlin Heidelberg. Springer-Verlag.
- Hwang, C. L., Lai, Y. J., & Liu, T. Y. (1993). A new approach for multiple objective decision making. *Computers and Operational Research*, 20(8), 889-899. [https://doi.org/10.1016/0305-0548\(93\)90109-V](https://doi.org/10.1016/0305-0548(93)90109-V)
- Kengpol, A., & Boonkanit, P. (2011). The decision support framework for developing Ecodesign at conceptual phase based upon ISO/ TR 14062. *International journal of production economics*, 131(1), 4-14. <https://doi.org/10.1016/j.ijpe.2010.10.006>
- Khalili-Damghani, K., Sadi-Nezhad, S., & Tavana, M. (2013). Solving multi-period project selection problems with fuzzy goal programming based on {TOPSIS} and a fuzzy preference relation. *Information Sciences*, 252, 42- 61. <https://doi.org/10.1016/j.ins.2013.05.005>
- Khamhong, P., Yingviwatanapong, C., & Ransikarbum, K. (2019, December). *Fuzzy Analytic Hierarchy Process (AHP)-based Criteria Analysis for 3D Printer Selection in Additive Manufacturing* [Paper presentation] . 2019 Research, Invention, and Innovation Congress (RI2C) , Bangkok, Thailand.
- Li, H., Wang, W., Fan, L., Li, Q., Chen., X., (2020). A novel hybrid MCDM model for machine tool selection using fuzzy DEMATEL, entropy weighting, and later defuzzification VIKOR. *Applied Soft Computing Journal*, 91, 106207.
- Meethom, W., & Koohathongsumrit, N. (2019). An Integrated Potential Assessment Criteria and TOPSIS Based Decision Support System for Freight Transportation Routing. *Applied Science and Engineering Progress*, <https://doi.org/10.14416/ijast.2019.01.002>
- Merlin, M., Timelli, G., Bonollo, F., & Garagnani, G. L. (2009). Impact behavior of A356 alloy for low-pressure die casting automotive wheels. *Journal of Materials Processing Technology*, 209(2), 1060-1073. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2008.03.027>
- Powell, B. R., Luo, A. A., & Krajewski, P. E. (2012). Magnesium alloys for lightweight powertrains and automotive bodies. *Advanced Materials in Automotive Engineering*, 2012, 150-209.
- Prakash C., Barua M. K., (2015). Integration of the AHP-TOPSIS method for prioritizing the solutions of reverse logistics adoption to overcome its barriers under fuzzy environment. *Journal of Manufacturing Systems*, 37, 599-615.
- Rubayet, K., & Karmaker, C. L. (2016). Machine Selection by AHP and TOPSIS Methods. *American Journal of Industrial Engineering*, 4(1), 7-13. <https://doi.org/10.12691/ajie-4-1-2>
- Saaty, T. L. (1980). *The Analytic Hierarchy Process, Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. McGraw-Hill.
- Saaty, T. L., & Vargas, L. G. (2001). *Models, Methods, Concepts, and Applications of the Analytic Hierarchy Process*. Kluwer Academic Publishers.
- Satirasetthavee, D., Suwannahoi, R., Kitthamkesorn, S., & Leungvichcharoen, S. (2018). The Determination Criteria of Appropriate Location for The Construction of Truck Terminal in Thailand by using Analytic Hierarchy Process (AHP). *Naresuan University Engineering Journal*, 13(2), 54-65. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/nuej/article/view/109560/114972>
- Tabucanon, M. T., Batanov, D. N., & Verma, D. K. (1994). Intelligent decision support system (DSS) for the selection process of alternative machines for flexible manufacturing systems (FMS). *Computers in Industry*, 25(2), 131-143. [https://doi.org/10.1016/0166-3615\(94\)90044-2](https://doi.org/10.1016/0166-3615(94)90044-2)
- Valentina, P., Henrikas, S., & Askoldas, P. (2015). Scientific applications of the AHP method in transport problems. *Archives of Transport*, 29(1), 47-54. <https://doi.org/10.5604/08669546.1146966>
- Wisetla, K., & Ransikarbum, K. (2020). Process Planning in FDM 3D- Printed Acrylonitrile- Butadiene- Styrene Using Integrative DEA and TOPSIS. *Journal of Science and Technology, Ubon Ratchathani University*, 22(1), 22-32. https://li01.tci-thaijo.org/index.php/sci_ubu/article/download/175366/165066/
- Zaltako, P., & Novoselac, V. (2013). Notes on TOPSIS Method. *International Journal of Research in Engineering and Science (IJRES)*, 1(2), 5-12.
- Zhang, L., & Wang, R. (2012). An intelligent system for low-pressure diecast process parameters optimization. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 65(1-4), 517-524. <https://doi.org/10.1007/s00170-012-4190-4>

7. BIOGRAPHY

Prin Boonkanit



Lecturer for the Sustainable Industrial Management Engineering Department, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Phra Nakorn, Thailand. Prin's research interests are primarily in the areas of Decision Support Systems and Industrial Manufacturing Technology with emphasis on green product design, automation, and industry 4.0.

การคำนวณเชิงตัวเลขเพื่อหาขนาดวิกฤติของตำหนิเริ่มต้นในรอยเชื่อมชนวาบของรางรถไฟ

Numerical Calculation for the Critical Initial Flaw Size of Flash-Butt Welded Rail

กชพร ถาดสูงเนิน^{1,*}, นิติกอร์ นรภัยพิพาक्षा², อาณัติ หาทรัพย์³ และ ชาวสวน กาญจนมัย¹
Kotchaporn Thadsoongnoen^{1,*}, Nitikorn Noraphaiphaksa², Anat Hasap³ and Chaosuan Kanchanomai¹

¹ศูนย์แห่งความเป็นเลิศทางวิชาการด้านวิศวกรรมและสมรรถนะของวัสดุ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120

²บริษัท นิติกอร์ รีเสิร์ช พาร์ตเนอร์ จำกัด อ.ลำลูกกา จ.ปทุมธานี 12150

³ศูนย์ทดสอบมาตรฐานระบบขนส่งทางราง สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120

¹Center of Materials Engineering and Performance, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering,
Thammasat University, Pathumthani 12120

²Nitikorn Research Partner Co. Ltd., Lumlukka, Pathumthani 12150

³Railway Transportation System Testing Center, Thailand Institute of Scientific and Technological Research, Pathumthani 12120

(Received: February 24, 2020, Revised: July 2, 2020, Accepted: July 18, 2020)

บทคัดย่อ

ตำหนิที่เกิดขึ้นบริเวณรอยเชื่อมชนวาบของรางรถไฟ อาจเกิดระหว่างการเชื่อม และ/หรือ เกิดระหว่างการใช้งาน ตำหนิเหล่านี้เป็นอันตรายต่อรอยเชื่อมชนวาบของรางรถไฟ โดยขนาดของตำหนิที่ทำให้เกิดการขยายตัวของรอยร้าวแล้ว เรียกว่า ขนาดวิกฤติของตำหนิเริ่มต้น งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษานาขนาดวิกฤติของตำหนิเริ่มต้นบริเวณรอยเชื่อมชนวาบด้วยทฤษฎีกลศาสตร์การแตกหักแบบยืดหยุ่น เชิงเส้น และระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยศึกษาดำหนิแบบรอยร้าวครึ่งวงกลมบริเวณด้านล่างของราง ซึ่งเป็นตำแหน่งที่รับโมเมนต์ดัดสูงสุดภายใต้แรงกดของล้อรถไฟ พบว่า ค่าพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้นบริเวณตำหนิ เท่ากับขอบเขตค่าพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้นของเหล็กกล้ารางรถไฟ เมื่อตำหนิเริ่มต้นวิกฤติมีขนาดประมาณ 2 มม. ซึ่งส่งผลให้รอยร้าวสามารถขยายตัวจากตำหนิเริ่มต้นนี้ได้ ผลที่ได้เป็นประโยชน์ต่อวงการวิชาการด้านวิศวกรรมระบบราง โดยสามารถใช้เป็นแนวทางในการซ่อมบำรุง และปรับปรุงการเชื่อมชนวาบของรางรถไฟ

คำสำคัญ: รางรถไฟ; การเชื่อมชนวาบ; ขนาดวิกฤติของตำหนิเริ่มต้น; การคำนวณเชิงตัวเลข

Abstract

The flaws within flash-butt welded joint of a rail may occur during welding and/or operation. They may cause the damage of the welded joint of a rail. The size of flaw that allows the fatigue crack to propagate is defined as the critical initial flaw size. In the present work, the critical initial flaw size of flash-butt welded joint of a rail was studied using the linear-elastic fracture mechanics and finite element method. A semi-circular crack at the bottom surface of rail foot (i.e., the region with the maximum bending stress from wheel load) was selected to represent the flaw. It was observed that the stress intensity factor range of flaw equals to the threshold stress intensity factor range of rail steel, when the flaw size is approximately 2 mm (i.e., the critical initial flaw size). At this critical initial

flaw, the propagation of fatigue crack is likely to occur. The finding can be beneficial to the railway engineering, and applied for the maintenance, and improvement of flash-butt welded joint.

Keywords: rail; flash-butt welding; critical initial flaw size; numerical calculation

1. บทนำ

การเชื่อมเป็นกระบวนการสำคัญในการสร้างทางรถไฟ และข้อบกพร่องของรอยเชื่อมมีผลต่อความปลอดภัยของทางรถไฟโดยตรง ทางรถไฟสามารถเชื่อมต่อกันด้วยวิธีการเชื่อมที่หลากหลาย วิธีการเชื่อมรางรถไฟที่นิยมใช้ในปัจจุบันคือการเชื่อมชนวบ (flash-butt welding) และการเชื่อมอะลูมิเนียม-เทอร์มิก (aluminothermic welding) โดยการเชื่อมชนวบใช้หลักการเดียวกันกับการเชื่อมไฟฟ้า รางรถไฟทั้งสองถูกยึดด้วยทองแดงซึ่งทำหน้าที่เป็นขั้วไฟฟ้า ปลายของรางรถไฟทั้งสองถูกวางห่างกันเล็กน้อย เมื่อกระแสไฟฟ้าถูกปล่อยผ่านรางรถไฟ ส่งผลให้เกิดความร้อนจนปลายของรางรถไฟทั้งสองอยู่ในสถานะเกือบหลอมละลาย จากนั้นกดรางรถไฟทั้งสองเข้าหากัน แล้วปล่อยให้เย็นตัวจนเกิดรอยเชื่อม (Lewis & Olofsson, 2009; BS EN 14587-1: Railway applications - Track - Flash butt welding of rails - Part 1: New R220, R260, R260Mn and R350HT grade rails in a fixed plant, 2007) ส่วนการเชื่อมอะลูมิเนียมเทอร์มิก คือการเชื่อมด้วยการหลอมโลหะ และเติมในช่องว่างระหว่างปลายของราง ภายใต้ความเค้นแบบวงรอบที่เกิดจากแรงกดของล้อรถไฟ (wheel load) ความเสียหายจากการล้า (fatigue) สามารถเกิดขึ้นได้กับรอยเชื่อมของรางรถไฟ การเชื่อมชนวบนิยมใช้ในการสร้างทางรถไฟ เนื่องจากมีอัตราการเกิดความเสียหายจากการล้าต่ำกว่าการเชื่อมอะลูมิเนียมเทอร์มิก นอกจากนี้การเชื่อมชนวบใช้เวลาในการเชื่อมน้อยกว่าการเชื่อมอะลูมิเนียมเทอร์มิก (Lewis & Olofsson, 2009)

ปัจจุบันได้มีการศึกษาความสัมพันธ์ของรอยเชื่อมจากการเชื่อมชนวบของรางรถไฟ และตำหนิที่เกิดขึ้น เช่น Cannon et al. (2003) ได้อธิบายสาเหตุของตำหนิที่เกิดขึ้นกับรางรถไฟที่ตำแหน่งต่าง ๆ Ozakgul et al. (2015) ได้ทดสอบการล้าแบบการดัด 4 จุด (4 point bending fatigue test) กับรางรถไฟที่มีรอยเชื่อมชนวบ และนำอายุการล้า (fatigue life) ของรางรถไฟแบบ 49E1 (รางรถไฟที่มีน้ำหนัก 49 kg/m) และ 60E1 (รางรถไฟที่มีน้ำหนัก 60 kg/m) มาเปรียบเทียบกับอายุ

การล้าของรางรถไฟแบบ 60E1 ที่ได้จากทดสอบการล้าของ European Commission (D 4.6.1. The influence of the working procedures on the formation and shape of the HAZ of flash butt and aluminothermic welds in rails, 2009) Beretta et al. (2005) ได้ศึกษาการเกิดรอยร้าวล้า และการขยายตัวของรอยร้าวล้าในรางรถไฟ พบว่า รอยร้าวล้าเกิดขึ้นในรูปแบบการเฉือน (shearing mode หรือ mode II) และเปลี่ยนเป็นรูปแบบการเปิด (opening mode หรือ mode I) เมื่อรอยร้าวล้าขยายตัวยาวขึ้น Desimone and Beretta (2006) ได้จำลองการขยายตัวของรอยร้าวล้าในรางรถไฟ จากตำหนิเริ่มต้นในแนวแกนบริเวณรอยเชื่อม ด้วยขั้นตอนทดสอบรูปทรงกระบอกกลวง รับแรงบิดแบบวงรอบร่วมกับแรงในแนวแกนแบบวงรอบ (แรงดึง/แรงกด) พบว่า การขยายตัวของรอยร้าวล้า สอดคล้องกับการขยายตัวของรอยร้าวล้าจริงบริเวณรอยเชื่อมของรางรถไฟ โดยการขยายตัวของรอยร้าวล้าเกิดขึ้นในรูปแบบการเฉือน (shearing mode หรือ mode II) ซึ่งงานวิจัยเหล่านี้ได้แสดงให้เห็นว่า รอยร้าวล้าสามารถเกิดจากตำหนิบริเวณรอยเชื่อมได้ง่ายกว่าบริเวณอื่น ๆ โดยการขยายตัวของตำหนิขึ้นอยู่กับตำแหน่งของตำหนิ และภาระทางกล

ตำหนิที่เกิดขึ้นบริเวณรอยเชื่อมชนวบของรางรถไฟ อาจเกิดระหว่างการเชื่อม และ/หรือ เกิดระหว่างการใช้งาน จากทฤษฎีกลศาสตร์การแตกหักแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear-elastic fracture mechanics) ตำหนิเหล่านี้เป็นอันตรายต่อรอยเชื่อมชนวบของรางรถไฟ โดยเกิดการขยายตัวใหญ่ขึ้น และเกิดความเสียหายจากการล้า เมื่อค่าพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้น (stress intensity factor range หรือ ΔK) บริเวณตำหนิสูงกว่าค่าขอบเขตพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้น (threshold stress intensity factor range หรือ ΔK_{th}) ของวัสดุรางรถไฟ (Suresh, 1998) ขนาดของตำหนิที่ทำให้เกิดการขยายตัวของรอยร้าวล้า เรียกว่า ขนาดวิกฤติของตำหนิเริ่มต้น (critical initial flaw size) ซึ่งในปัจจุบันยังไม่มีงานวิจัยที่ศึกษาขนาดวิกฤติของตำหนิเริ่มต้นในรอยเชื่อมชนวบของรางรถไฟ เมื่อรับโมเมนต์ดัดจากแรงกดของล้อรถไฟ (wheel load)

ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษานาวิกฤติของตำหนิเริ่มต้นบริเวณรอยเชื่อมขนาบด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ (finite element method หรือ FEM) โดยศึกษาตำหนิบริเวณด้านล่างของราง ซึ่งเป็นตำแหน่งที่รับโมเมนต์ดัดสูงสุดภายใต้แรงกดของล้อรถไฟ โมเมนต์ดัดสูงสุดภายใต้แรงกดของล้อรถไฟถูกจำลองด้วยการดัด 4 จุดตามมาตรฐาน BS EN 14587 (BS EN 14587-1: Railway applications - Track - Flash butt welding of rails - Part 1: New R220, R260, R260Mn and R350HT grade rails in a fixed plant, 2007) ผลที่ได้สามารถใช้เป็นแนวทางในการซ่อมบำรุง และปรับปรุงการเชื่อมขนาบของรางรถไฟ

2. อุปกรณ์และวิธีการ

2.1 ตำหนิรูปร่างครึ่งวงกลมบริเวณรอยเชื่อมขนาบของรางรถไฟ

Ozakgul et al. (2015) ได้ศึกษาการล้าของรางรถไฟแบบ 60E1 ที่ผ่านการเชื่อมขนาบและผ่านการใช้งานแล้ว ด้วยการทดสอบการล้าแบบดัด 4 จุด ในการทดสอบ พิสัยความเค้นที่บริเวณตีนรางรถไฟ และอัตราส่วนความเค้นถูกควบคุมให้มีขนาดเป็น 190 MPa และ 0.1 ตามลำดับ รางรถไฟที่ใช้ทดสอบมีความยาวเป็น 2,000 มม. ระยะห่างระหว่างหัวกดด้านบนและแท่นรองรางรถไฟด้านล่างมีขนาดเป็น 240 มม. และ 1,800 มม. ตามลำดับ โดยรอยเชื่อมขนาบที่อยู่กึ่งกลางของรางรถไฟมีความกว้าง 20 มม. จากการทดสอบโดย Ozakgul et al. (2015) พบว่ารอยร้าวรูปร่างครึ่งวงกลม ได้ขยายตัวจากตำหนิเริ่มต้นบริเวณด้านล่างของตีนรางรถไฟ (rail foot) ซึ่งมีตำแหน่งและรูปร่างแสดงใน

รูปที่ 1

เนื่องจากการทดสอบการล้าเพื่อหาขนาดนาวิกฤติของตำหนิเริ่มต้นใช้เวลามาก และมีค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้นตำแหน่งของตำหนิเริ่มต้นจากงานของ Ozakgul et al. (2015) ได้ถูกนำมาใช้ศึกษานาวิกฤติของตำหนิเริ่มต้นในงานวิจัยนี้ ซึ่งกำหนดให้เหล็กกล้ารางรถไฟและรอยเชื่อมขนาบมีคุณสมบัติทางกลของวัสดุ (Iwafuchi, 2004) เป็นดังนี้ โมดูลัสยืดหยุ่น (E) เป็น 210 GPa, ความเค้นคราก (σ_y) เป็น 460 MPa และ อัตราส่วนปัวซอง (ν) เป็น 0.3

2.2 ระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

ในงานวิจัยนี้ ตำหนิเริ่มต้นถูกกำหนดให้เป็นรอยร้าวแบบครึ่งวงกลม (semi-circular crack) ที่ด้านล่างของตีนราง ดังแสดงใน

รูปที่ 1 ผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยแบบจำลองสามมิติ คือค่าพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้น (stress intensity factor range หรือ ΔK) ที่ตำแหน่งต่าง ๆ ของขอบรอยร้าว (crack front) โดยใช้โปรแกรม Abaqus/Standard (ABAQUS User's Manual, 2016) ΔK ที่คำนวณได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับ ขอบเขตค่าพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้น (ΔK_{th}) ของเหล็กกล้ารางรถไฟ โดยขนาดของรอยร้าวแบบครึ่งวงกลมที่ส่งผลให้ ΔK เท่ากับ ΔK_{th} คือขนาดนาวิกฤติของตำหนิเริ่มต้น ซึ่งขั้นตอนการทำนายขนาดนาวิกฤติของตำหนิเริ่มต้นแสดงดัง

รูปที่ 2

ตัวประกอบความเข้มของความเค้นสามารถคำนวณได้จากทฤษฎีกลศาสตร์การแตกหักแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นดังสมการต่อไปนี้ (ABAQUS User's Manual, 2016)

$$K_I = \sqrt{JE} \quad (1)$$

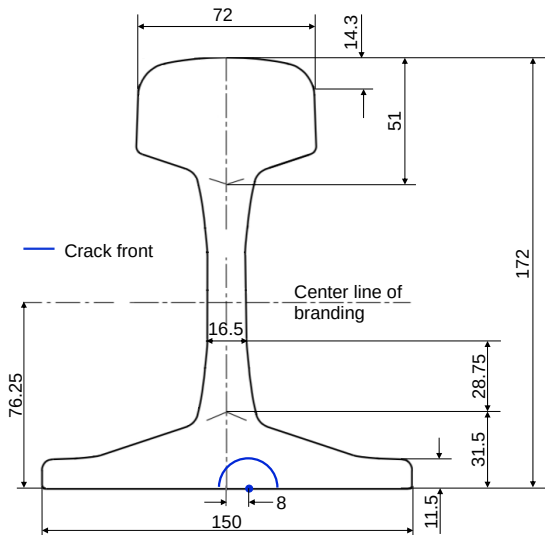
โดยที่ K_I คือ ค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้นภายใต้ภาระที่ทำให้รอยร้าวเปิด, E' คือ โมดูลัส ในกรณีความเค้นระนาบ $E' = E$ ส่วนในกรณีความเค้นระนาบ $E' = E/(1-\nu^2)$ และ J คือ อัตราการปลดปล่อยพลังงานความเค้นเนื่องจากการสร้างผิวรอยร้าวใหม่ โดย J สามารถคำนวณได้จากสมการดังต่อไปนี้

$$J = \int_{A_t} \lambda(s)n \cdot H \cdot qdA \quad (2)$$

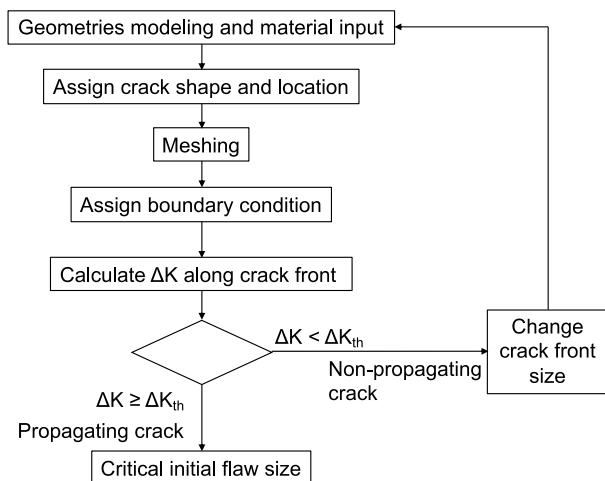
โดยที่ dA คือพื้นที่เอลิเมนต์ที่อยู่ในหลอด (tubular) ที่ปลายของรอยร้าว, A คือพื้นที่ทั้งหมดของหลอดที่ปลายของรอยร้าว (contour), $\lambda(s)$ คือ ระบายของผิวรอยร้าว, n คือเวกเตอร์ที่ตั้งฉากกับผิวของ contour, q คือทิศทางการขยายตัวของรอยร้าว และ H สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3)

$$H = WI - \sigma \frac{\partial u}{\partial x} \quad (3)$$

โดยที่ W คือพลังงานความเครียดของวัสดุยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear elastic material), s คือความเค้นที่เกิดขึ้นที่ contour และ $\frac{\partial u}{\partial x}$ คือตำแหน่งที่เคลื่อนที่ไปของขอบรอยร้าว



รูปที่ 1 รางรถไฟแบบ 60E1 และ ตำแหน่งบริเวณด้านล่างของดินรางรถไฟที่ผ่านการเชื่อมขวาง (Ozakgul et al., 2015) (หน่วย : มม.)



รูปที่ 2 ขั้นตอนการทำนายขนาดวิกฤติของตำหนิเริ่มต้น

ค่า K ที่ได้จากการคำนวณถูกนำมาคำนวณต่อเป็น ΔK โดยใช้สมการที่ (4)

$$\Delta K = K_{max} - K_{min} \quad (4)$$

โดยที่ K_{min} คือค่า K ที่เกิดขึ้นบนรอยร้าวในขณะที่รางรถไฟรับภาระที่ต่ำที่สุด และที่ K_{max} คือค่า K ที่เกิดขึ้นบนรอยร้าวในขณะที่รางรถไฟรับภาระที่สูงที่สุด

ความต้านทานการล้ามีความสัมพันธ์แบบผกผันกับขนาดของตำหนิ จากงานวิจัยของ Kitagawa and Takahashi (1976) พบว่า เมื่อขนาดของตำหนิลดลง ความต้านทานการล้าเพิ่มขึ้น จนเมื่อตำหนิมีขนาดเล็กกว่าขนาดวิกฤติของตำหนิเริ่มต้น (a_0) ค่า ΔK มีขนาดเล็กกว่า ΔK_{th} รอยร้าวล้ามีอัตราการขยายตัวที่ช้ามาก หรือหยุดขยายตัว ดังนั้นความต้านทานการล้าของชิ้นส่วนทางวิศวกรรมที่มีตำหนิเล็กกว่า a_0 จึงใกล้เคียงกับขีดจำกัดความล้า (fatigue limit หรือ S_{se}) ในทางตรงกันข้าม ถ้าขนาดของตำหนิใหญ่กว่าขนาดของ a_0 ค่า ΔK ที่มีขนาดสูงกว่า ΔK_{th} ส่งผลให้รอยร้าวล้าขยายตัว และเกิดความเสียหายจากการล้าได้ ดังนั้นขนาดของ a_0 สามารถประมาณได้จาก (Suresh, 1998)

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \left(\frac{\Delta K_{th}}{F \Delta \sigma_e} \right)^2 \quad (5)$$

โดย F คือ ฟังก์ชันรูปร่าง (geometry function)

จากงานวิจัยของ Maya-Johnson et al. (2015) พบว่า ΔK_{th} ของเหล็กกล้ารางรถไฟมีค่าเป็น $11 \text{ MPa.m}^{1/2}$ และ Iwafuchi et al. (2004) พบว่า S_{se} ของเหล็กกล้ารางรถไฟมีค่าเป็น 450 MPa ถ้ากำหนดให้ $F = 1$ พบว่า ขนาด a_0 เป็น 0.2 มม. เนื่องจากรางรถไฟมีรูปร่างซับซ้อน และมีรอยร้าวที่ผิวด้านล่างของดินราง ($F \neq 1$) ขนาดของ a_0 จึงไม่สามารถคำนวณได้จากทฤษฎีกลศาสตร์การแตกหักโดยตรง ดังนั้น รอยร้าวรูปครึ่งวงกลมมีความลึก 0.5 มม. ถูกกำหนดให้เป็นรอยร้าวเริ่มต้นรูปครึ่งวงกลม (a_0) เพื่อทำนายขนาดของ a_0 ของรางรถไฟ 60E1 ที่ผ่านการเชื่อมขวาง

แบบจำลองไฟไนต์เอลิเมนต์แสดงดังรูปที่ 3 โดยเอลิเมนต์บริเวณแนวรอยร้าวเป็นแบบปริซึมหน้าตัดสามเหลี่ยม 20 โหนด ซึ่งเกิดจากการปรับปรุงร่างของเอลิเมนต์ลูกบาศก์ 20 โหนด (20-node quadratic brick, reduced integration, C3D20R) เพื่อให้สามารถคำนวณความเค้นของขอบรอยร้าวได้แม่นยำยิ่งขึ้น และเอลิเมนต์บริเวณตัวรางรถไฟเป็นแบบพีระมิดฐานสามเหลี่ยม 10 โหนด (10 node tetrahedral element, C3D10) ภาระที่ใช้ในการคำนวณ และเงื่อนไขขอบเขต ถูกกำหนดตามการทดสอบการล้าของ Ozakgul et al. (2015) โดยกำหนดให้มีการคำนวณทั้งหมด 50 ระดับ จากแรงเป็นศูนย์ถึงแรงสูงสุด

จากการศึกษาผลกระทบของจำนวนเอลิเมนต์ ต่อค่าตัวประกอบความเข้มของความเค้น พบว่า ผลลัพธ์ที่ได้เข้าสู่ที่ 134,486, 222,631 และ 431,521 เอลิเมนต์ เมื่อนำผลลัพธ์จากแบบจำลอง 134,486 เอลิเมนต์ เทียบกับแบบจำลอง 431,521 เอลิเมนต์ พบว่า ความแตกต่างของผลลัพธ์น้อยกว่า 5% เมื่อคำนวณโดยใช้ คอมพิวเตอร์ที่มีระบบปฏิบัติการ Intel(R) Xeon (R) CPU E5-2620 0 @ 2.00 GHz 2.00 GHz (2 processors) และมีหน่วยความจำหลัก (RAM) 128GB พบว่า แบบจำลองที่มีจำนวนเอลิเมนต์เป็น 134,486, 222,631 และ 431,521 เอลิเมนต์ ใช้เวลาในการคำนวณ 8, 15 และ 30 นาที ตามลำดับ ดังนั้น จึงเลือกใช้แบบจำลองที่มีเอลิเมนต์จำนวน 134,486 เอลิเมนต์

2.3 การตรวจสอบความถูกต้องของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

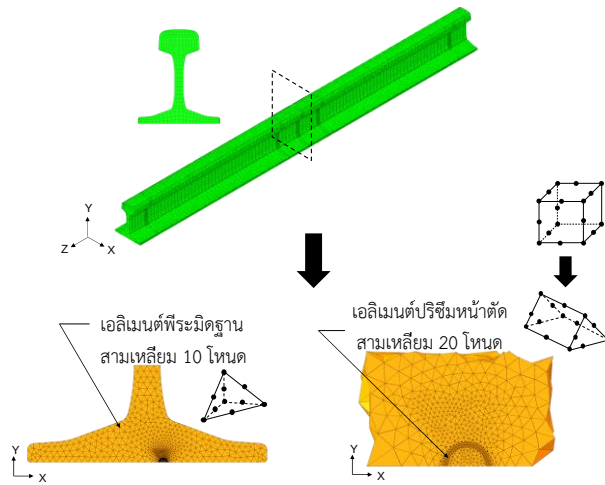
เนื่องจากข้อจำกัดของการหาราง 60E1 เพื่อใช้ในงานวิจัย จึงใช้รางรถไฟที่สามารถหาได้ในประเทศไทย คือราง 54E1 (รางรถไฟที่มีน้ำหนัก 54 kg/m) มาทำการทดสอบ โดยรางทั้งสองมีรูปร่างที่คล้ายกัน โดยราง 54E1 มีความสูงน้อยกว่าราง 60E1 1.3 ซม. ดังนั้น ราง 54E1 จึงถูกนำมาทดสอบการดัด 4 จุด และวัดความเครียดที่เกิดขึ้นระหว่างการทดสอบ ผลที่ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบกับผลจากระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของราง 54E1

รางรถไฟ 54E1 (BS EN 13674-1: Railway applications - Track - Vignole railway rails 46 kg/ m and above, 2002) ที่ผ่านการเชื่อมชนวาบและไม่มีตำหนิ ถูกทดสอบการดัด 4 จุด (4 point bending test) ตามมาตรฐาน BS EN 14587 (BS EN 14587-1: Railway applications - Track - Flash butt welding of rails - Part 1: New R220, R260, R260Mn and R350HT grade rails in a fixed plant, 2007) ดังรูปที่ 4 การทดสอบการดัด 4 จุด ทำด้วยเครื่องทดสอบการล้าแบบเซอร์โวไฮดรอลิก (MTS: 244.22 with 500-kN load cell) แรกกดแบบสถิตมีขนาดสูงสุดเป็น 240 kN อุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ระหว่างการทดสอบเป็น 30 ± 2 °C และ 60 ± 5 % ตามลำดับ ความเครียดตามแนวยาวของรางถูกวัดด้วยเกจวัดความเครียด ที่มีระยะเกจ 3 มม. (strain gage, TML: FRA-3-11) ที่กึ่งกลางของรอยเชื่อม โดยตำแหน่งของเกจวัดความเครียด (e_A , e_B , e_C , e_D) แสดงในรูปที่ 4 ความเครียดที่วัดได้ ถูกนำไปเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ที่ได้จากการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ของรางรถไฟ 54E1 ที่ไม่มีตำหนิ เพื่อตรวจสอบความถูกต้องของการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

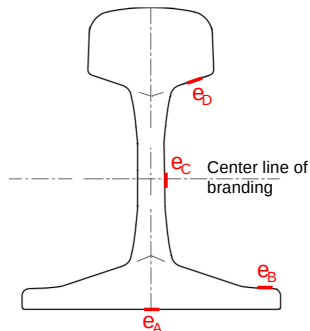
2.4 การกระจายของความเค้นและความเครียด

การกระจายของความเค้นและความเครียดตามแนวแกนของรางรถไฟ 54E1 ที่ผ่านการเชื่อมชนวาบเมื่อรับแรงกดสูงสุด แสดงดัง

รูปที่ 5 พบว่า ความเค้นบริเวณด้านบนของแกนสมดุล (neutral axis) หรือบริเวณหัวรางเป็นความเค้นอัด โดยบริเวณหัวรางมีค่าความเค้นอัดเป็น -769.21 MPa ความเค้นอัดไม่ส่งผลต่อการขยายตัวของรอยร้าว เนื่องจากความเค้นอัดทำให้รอยร้าวปิด ในขณะที่ความเค้นบริเวณด้านล่างของแกนสมดุล (neutral axis) หรือบริเวณตีนราง เป็นความเค้นดึง 150 MPa ความเค้นดึงทำให้รอยร้าวเปิด ดังนั้นบริเวณความเค้นดึงเป็นบริเวณที่รางมีโอกาสเสียหายจากการเกิดและขยายตัวของรอยร้าวได้ ซึ่งสอดคล้องกับพฤติกรรมความเสียหายของรางรถไฟที่แสดงในงานวิจัยของ Ozakgul et al. (2015) ที่รอยร้าวได้ขยายตัวจากตำหนิที่บริเวณตีนรางรถไฟ และขยายตัวไปยังหัวรางรถไฟ



รูปที่ 3 แบบจำลองการทดสอบการดัด 4 จุด ของรางรถไฟ 60E1 ที่ผ่านการเชื่อมชนวา



รูปที่ 4 การทดสอบการดัด 4 จุด ของรางรถไฟ 54E1 ที่ผ่านการเชื่อมชนวา

ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำกับความเครียดตามแนวแกนของราง แสดงดังรูปที่ 6 พบว่า ความเครียดเพิ่มขึ้นตามแรงที่กระทำ โดยแสดงความสัมพันธ์เชิงเส้น ความเครียดที่เกิดขึ้นบริเวณด้านล่างของแกนสมดูล (e_A และ e_B) หรือบริเวณ

ตีนราง (rail foot) ในขณะที่ยังบริเวณด้านบนของแกนสมดูล (e_D) หรือบริเวณหัวราง (rail head) เกิดความเครียดอัด และในบริเวณแกนสมดูล (e_C) หรือบริเวณเอวราง (rail web) พบว่าความเครียดเข้าใกล้ศูนย์ เมื่อนำความเครียดที่ได้จากการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เปรียบเทียบกับความเครียดจากการวัดด้วยเกจวัดความเครียด พบว่า มีความสอดคล้องกัน โดยความแตกต่างของความเครียดสูงสุดที่ตำแหน่ง A ระหว่างการวัดด้วยเกจวัดความเครียด และการคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ เป็น 1.15% ดังนั้น การคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ มีความถูกต้อง และสามารถใช้ในการคำนวณความเค้น และความเครียดที่ตำแหน่งต่าง ๆ บนรางรถไฟได้

3. ผลการวิจัยและวิจารณ์ผลการวิจัย

3.1 ขนาดวิกฤติของตำหนิเริ่มต้น

รอยร้าวครึ่งวงกลมขนาดต่าง ๆ ถูกใช้ในการทำนายขนาดวิกฤติของตำหนิเริ่มต้น โดย DK ถูกคำนวณที่มุมต่าง ๆ (q) ของรอยร้าวครึ่งวงกลม แสดงดังรูปที่ 7 ขนาดของรอยร้าว ครึ่งวงกลมถูกจำกัดด้วยขนาดและรูปร่างของตีนราง โดยรัศมีของรอยร้าวครึ่งวงกลมที่ใหญ่ที่สุดที่สามารถขยายตัวไปแต่ละผิวด้านบนของตีนรางรถไฟเป็น $r_c = 27$ มม. ดังนั้นขนาดรอยร้าวครึ่งวงกลมกำหนดเป็น a/r_c ปากของรอยร้าว (crack mount) วางอยู่บนผิวด้านล่างของตีนราง โดยมีขอบรอยร้าว (crack front) อยู่ที่ $q = 0^\circ$ และ 180° ในขณะที่รอยร้าวมีความลึกสูงสุดที่ $q = 90^\circ$

จากการที่รางรถไฟรับความเค้นดัดสูงสุดที่บริเวณผิวด้านล่างของตีนราง DK ที่ $q = 0^\circ$ และ 180° จึงมีขนาดสูงกว่า DK ที่ $q = 90^\circ$ ดังแสดงในรูปที่ 7 โดยความแตกต่างระหว่าง DK ที่ $q = 0^\circ$ และ 180° กับ DK ที่ $q = 90^\circ$ เพิ่มขึ้นตามขนาดของรอยร้าว เมื่อเปรียบเทียบระหว่าง DK ที่ $q = 0^\circ$ และ 180° พบว่า DK ที่ $q = 0^\circ$ มีค่ามากกว่า DK ที่ $q = 180^\circ$ เพียง 0.7 % เนื่องจากที่ $\theta = 0^\circ$ มีพื้นที่ในการขยายตัวของรอยรำน้อยกว่าที่ตำแหน่ง $\theta = 180^\circ$ ทำให้รอยร้าวที่ $\theta = 0^\circ$ มีความรุนแรงมากกว่า ดังนั้น DK ที่ 0° จึงถูกใช้ในการเปรียบเทียบความรุนแรงกับตำแหน่งอื่น ๆ ของรอยร้าว

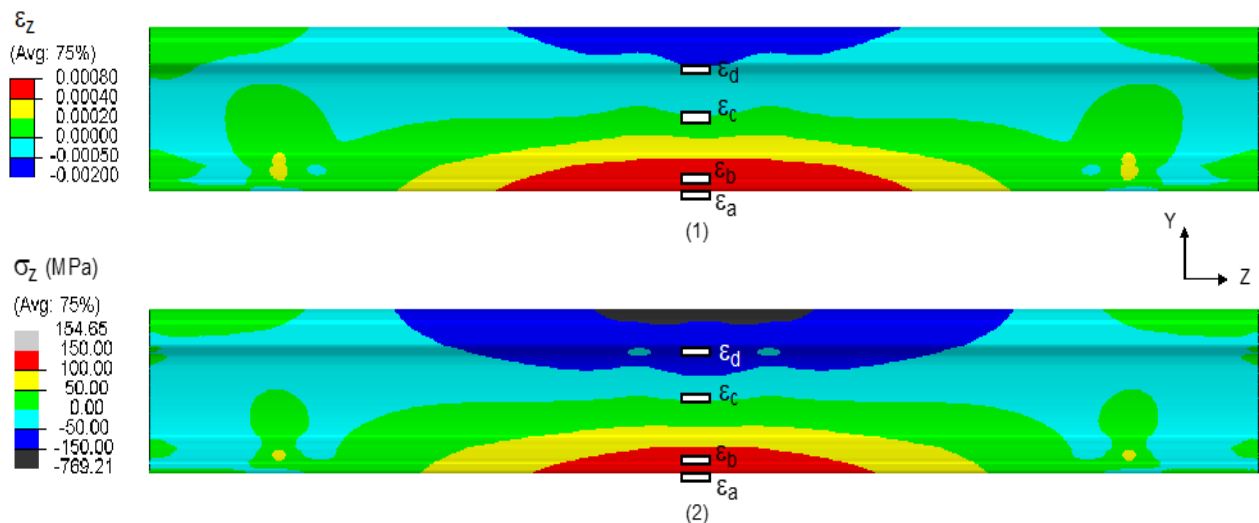
จากทฤษฎีกลศาสตร์การแตกหักแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น ระบุว่าขนาดของรอยร้าวที่สามารถเกิดการขยายตัวได้จากภาระแบบวงรอบ คือรอยร้าวที่มี DK เท่ากับ ΔK_{th} โดยผลจากการคำนวณเชิงตัวเลขด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่า รอย

ร้าวขนาด 2 มม. หรือ $a/r_c = 0.07$ ส่งผลให้เกิด σ_K มากกว่า ΔK_{th} ที่ $\theta = 0^\circ$ จึงสามารถสรุปได้ว่า รอยร้าวสามารถเกิดการขยายตัวได้ เมื่อขนาดวิกฤติของตำหนิเริ่มต้นเป็น 2 มม. ซึ่งรอยร้าวขนาดดังกล่าวเริ่มขยายตัวที่ตำแหน่ง $\theta = 0^\circ$ ก่อนตำแหน่งอื่น ๆ เนื่องจากในตำแหน่งอื่น ๆ ยังคงมีค่า σ_K น้อยกว่า ΔK_{th} ดังที่แสดงในรูปที่ 8 ซึ่งเป็นรูปแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง σ_K กับขนาดรอยร้าว a/r_c ที่ $\theta = 0^\circ$ และ $\theta = 90^\circ$

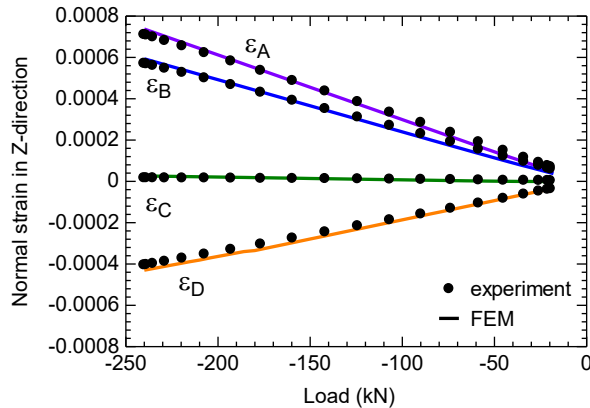
3.2 ขนาดของบริเวณพลาสติกรอบตำหนิเริ่มต้นวิกฤติ

เนื่องจากความเค้นบริเวณตำหนิเริ่มต้นวิกฤติ (critical initial flaw) มีขนาดสูง และลดลงตามระยะห่างจากตำหนิเริ่มต้นวิกฤติ ในบริเวณที่ความเค้นมีขนาดสูงกว่าความเค้นครากการเปลี่ยนแปลงขนาดเป็นการเปลี่ยนแปลงขนาดแบบ

พลาสติก ซึ่งเรียกว่า บริเวณพลาสติก (plastic zone) ถ้าขนาดของบริเวณพลาสติกเล็กมาก เมื่อเทียบกับขนาดของตำหนิ และขนาดของรางรถไฟ ค่า σ_K ตามทฤษฎีกลศาสตร์การแตกหักแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear-elastic fracture mechanics) สามารถใช้อธิบายความรุนแรงของตำหนิในรอยเชื่อมขนาบของรางได้ ดังนั้น ความเค้นวอนมิส (von Mises stress หรือ σ_v) ที่บริเวณตำหนิเริ่มต้นวิกฤติขนาด 2 มม. ถูกคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ แสดงดัง รูปที่ 9 บริเวณพลาสติกที่ปากรอยร้าว ($q = 0^\circ$ และ 180°) มีขนาดใหญ่กว่า บริเวณพลาสติกที่ความลึกสูงสุด ($q = 90^\circ$) บริเวณพลาสติกที่ปากรอยร้าวมีขนาด 0.31 มม. ซึ่งมีขนาดเล็กกว่าขนาดของตำหนิเริ่มต้นวิกฤติ และขนาดของราง

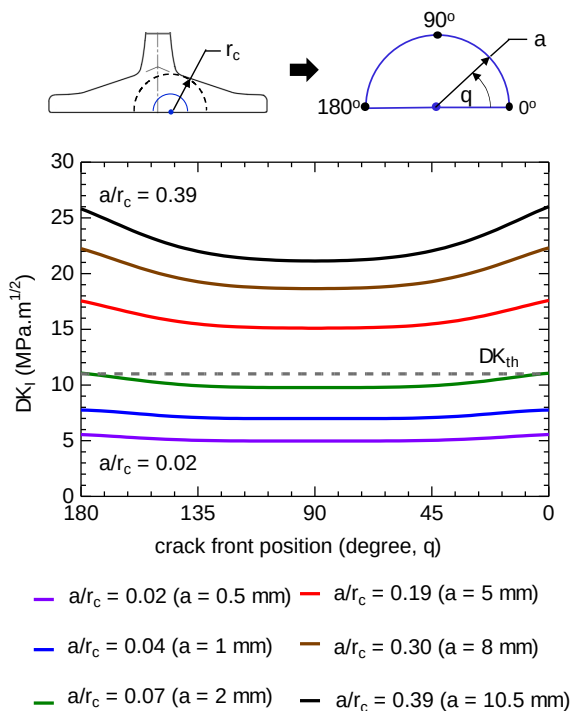


รูปที่ 5 การกระจายของ (1) ความเครียดและ (2) ความเค้นตามแนวแกนของรางรถไฟ 54E1 ที่ผ่านการเชื่อมขนาบ เมื่อรับแรงสูงสุด โดยสี่เหลี่ยมสีขาวคือตำแหน่งของเกจวัดความเครียด



รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำกับความเครียดตามแนวแกนของรางรถไฟ 54E1 ที่ผ่านการเชื่อมขวาง

ดังนั้นค่า oK ตามทฤษฎีกลศาสตร์การแตกหักแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น (linear-elastic fracture mechanics) สามารถใช้อธิบายความรุนแรงของตำหนิ และสามารถใช้ทำนายขนาดวิกฤติของตำหนิเริ่มต้นในรอยเชื่อมขวางของรางได้



รูปที่ 7 ค่าพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้นที่ขอบของรอยร้าวครึ่งวงกลมขนาดต่าง ๆ บนรางรถไฟ 60E1

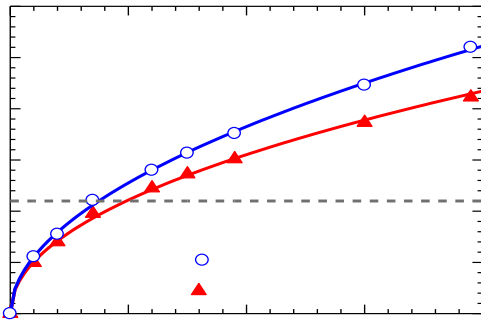
4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำนายขนาดวิกฤติของตำหนิเริ่มต้นในรอยเชื่อมขวางของรางรถไฟ ด้วยทฤษฎีกลศาสตร์การแตกหัก แบบยืดหยุ่นเชิงเส้น โดยขนาดของตำหนิ เป็นขนาดวิกฤติของตำหนิ เริ่มต้น เมื่อ $oK \geq oK_{th}$ ค่า oK ของตำหนิที่มีลักษณะแบบรอยร้าวครึ่งวงกลมถูกคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ผลที่ได้สามารถสรุปได้ดังนี้

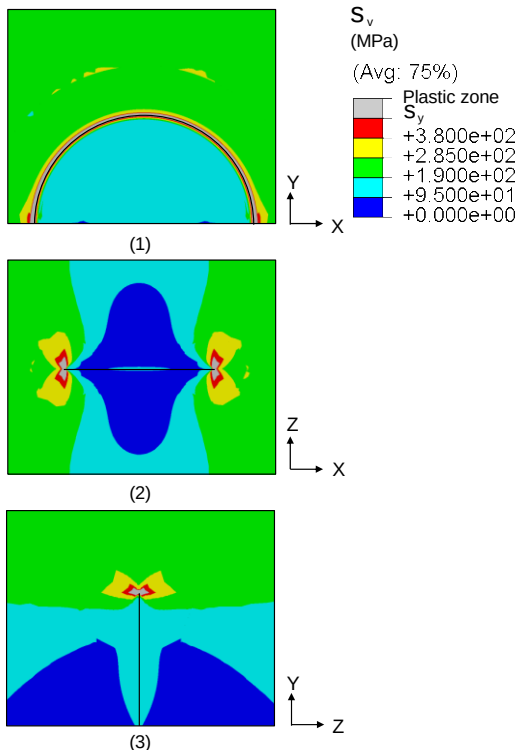
□ ความถูกต้องของระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ถูกยืนยันด้วยการนำความเครียดที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลขเปรียบเทียบกับความเครียดบนรางระหว่างการทดสอบการดัด 4 จุด ผลทั้งสองมีความสอดคล้องกัน ดังนั้น การคำนวณด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สามารถใช้คำนวณความเค้น และ oK บริเวณตำหนิในรอยเชื่อมขวางของรางรถไฟได้

□ ค่า oK ที่ผิวด้านล่างของตีนรางมีขนาดสูงกว่า oK ที่ความลึกสูงสุด เนื่องจากการที่รางรับความเค้นดัดสูงสุดที่บริเวณผิวด้านล่างของตีนราง ความแตกต่างระหว่าง oK ที่ผิวด้านล่างของตีนรางและที่ความลึกสูงสุด เพิ่มมากขึ้นตามขนาดของรอยร้าว ค่า oK ที่บริเวณผิวด้านล่างของตีนราง $\geq oK_{th}$ เมื่อตำหนิเริ่มต้นวิกฤติมีขนาดเป็น 2 มม. ซึ่งส่งผลให้รอยร้าวสามารถขยายตัวจากตำหนิเริ่มต้นนี้ได้

□ บริเวณพลาสติกที่ตำหนิเริ่มต้นวิกฤติมีขนาดเล็กกว่าขนาดของตำหนิเริ่มต้นวิกฤติ และขนาดของรางอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้น สมมติฐานกลศาสตร์การแตกหักแบบยืดหยุ่นเชิงเส้นเป็นจริง และ oK สามารถใช้อธิบายความรุนแรงของตำหนิ และสามารถใช้ทำนายขนาดวิกฤติของตำหนิเริ่มต้นในรอยเชื่อมขวางของรางได้ ผลที่ได้เป็นประโยชน์ต่อวงการวิชาการด้านวิศวกรรมระบบราง โดยสามารถใช้เป็นแนวทางในการซ่อมบำรุงและปรับปรุงการเชื่อมขวางของรางรถไฟ



รูปที่ 8 ค่าพิสัยตัวประกอบความเข้มของความเค้นของรอยร้าวบนรางรถไฟ 60E1



รูปที่ 9 การกระจายของความเค้นวอนมีสบนตำแหน่งเริ่มต้นวิกฤติ (1) ด้านหน้าของรอยร้าว (2) ปากรอยร้าว และ (3) ภาพตัดของรอยร้าว

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก (1) สำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (2) มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (3) คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (ทุนวิจัย และทุนการศึกษาระดับปริญญาโท)

6. เอกสารอ้างอิง

- ABAQUS User's Manual. (2016). *Abaqus/Standard*. ABAQUS.
- Beretta, S., Boniardi, M., Carboni, M., & Desimone, H. (2005). Mode II fatigue failures at rail butt-welds. *Engineering Failure Analysis*, 12(1), 157-165.
- BS EN 13674-1: Railway applications - Track - Vignole railway rails 46 kg/m and above. (2002). In British-Adopted European Standard
- BS EN 14587-1: Railway applications - Track - Flash butt welding of rails - Part 1: New R220, R260, R260Mn and R350HT grade rails in a fixed plant. (2007). In British-Adopted European Standard.
- Cannon, D. F., Edel, K. O., Grassie, S. L., & Sawley, K. (2003). Rail defects: an overview. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 26(10), 865-886.
- D 4.6.1. The influence of the working procedures on the formation and shape of the HAZ of flash butt and aluminothermic welds in rails. (2009). International Union of Railways (UIC).
- Desimone, H., & Beretta, S. (2006). Mechanisms of mixed mode fatigue crack propagation at rail butt-welds. *International journal of fatigue*, 28(5-6), 635-642.
- Iwafuchi, K., Satoh, Y., Toi, Y., & Hirose, S. (2004). Fatigue property analysis of rail steel based on damage mechanics. *Quarterly Report of RTRI*, 45, 203-209.
- Kitagawa, H., & Takahashi, S. (1976). *Applicability of fracture mechanics to very small cracks or the cracks in the early stage* [Paper presentation]. Mechanical Behavior of Materials, American Society for Metals, Metals Park, Ohio.
- Lewis, R. & Olofsson, U. (2009). *Wheel-rail interface handbook*. Elsevier.
- Maya-Johnson, S., Ramirez, A. J., & Toro, A. (2015). Fatigue crack growth rate of two pearlitic rail steels. *Engineering fracture mechanics*, 138, 63-72.
- Ozakgul, K., Piroglu, F., & Caglayan, O. (2015). An experimental investigation on flash butt welded rails. *Engineering Failure Analysis*, 57, 21-30.
- Suresh, S. (1998). *Fatigue of materials*. Cambridge university press.

การศึกษาเชิงตัวเลขค่าสมรรถนะเชิงสถิตยศาสตร์ของกังหันลมชาโวเนียสเมื่อติดตั้งช่องทางไหลนำร่องแบบ แผ่นโค้งโดยใช้โปรแกรม OpenFOAM

A Numerical Study of Static Performance of Savonius Wind Turbine with Curved Guide Vanes Using OpenFOAM

เจษฎาภรณ์ ปรียาดุก^{1*}, ชาคริต สุวรรณจรัส¹, วีรชัย ชัยวรพฤษ² และ กันต์ธกรณ์ เขาทอง³
Jetsadaporn Priyadumkol^{1*}, Chakrit Suvanjumrat¹, Weerachai Chaiworapuek² and Kunthakorn Khaothong³

¹ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล

²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

³ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

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

²Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

³Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering at Khamphengsean, Kasetsart University

*Corresponding author email: jetsadaporn.pri@mahidol.edu

(Received: March 19, 2020, Revised: October 22, 2020, Accepted: November 10, 2020)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการไหลของกังหันลมชาโวเนียส ที่ตำแหน่งของใบพัด 0°, 30°, 60°, 90°, 120° และ 150° ใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ OpenFOAM พิจารณาในรูปแบบสองมิติ โดยเทียบผลการจำลองกับการทดลองจริงที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ เท่ากับ 4.32×10^5 โดยมีวัตถุประสงค์ของงานวิจัยเพื่อจำลองการไหลของอากาศ พิจารณาค่าความดันและความเร็วของอากาศที่ใบพัดตำแหน่งต่างๆ นอกจากนั้นงานวิจัยนี้ได้ศึกษาประสิทธิภาพกังหันลมเมื่อมีการติดตั้งช่องทางไหลนำร่องแบบแผ่นโค้ง พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดเชิงสถิตยศาสตร์มีค่าสูงขึ้นที่ตำแหน่ง 0°, 30°, 60°, 120° และ 150° เมื่อเทียบกับกังหันลมที่ไม่มีการติดตั้งช่องทางไหลนำร่อง อย่างไรก็ตาม ที่ตำแหน่งใบพัด 90° เป็นตำแหน่งที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดลดลง โดยผลการวิเคราะห์ที่ได้จะเป็นตัวแปรที่ใช้ในการออกแบบเพื่อพัฒนากังหันลมให้มีประสิทธิภาพต่อไป

คำสำคัญ: กังหันลมแบบชาโวเนียส, ประสิทธิภาพ, ช่องทางไหลนำร่อง, พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ, OpenFOAM

Abstract

This paper studies the flow over Savonius wind turbine at the angle of turbine blade of 0°, 30°, 60°, 90°, 120° and 150°. The study was using the commercial Computational Fluid Dynamics (CFD) program, OpenFOAM, and conducted in a 2D domain. The numerical and experimental results were compared for validation at the Reynolds number of 4.32×10^5 . The propose is to numerically simulate the behavior of airflow though turbine blade including pressure contour and velocity streamline. Moreover, the present study is to show the effect of the Savonius wind turbine with curved guide vanes on the performance. The results show that the turbine with the curved guide vanes has a higher torque coefficient compared to conventional rotors at the 0°, 30°, 60°, 120° and 150° positions except 90°. Those obtained results will be used as parameters to design for improvement the performance of Savonius wind turbine.

Keywords: Savonius wind turbine, Performance, Guide vane, Computational Fluid Dynamics, OpenFOAM

1. บทนำ

กังหันลมแบบซาโวนีเยสเป็นกังหันลมแนวตั้ง รูปร่างของใบพัดมีลักษณะคล้ายตัวเอส (S) หลักการทำงานของกังหันลมชนิดนี้คือ บริเวณด้านหน้าของใบพัดมีลักษณะเว้าโค้งทำหน้าที่รับลม ขณะที่บริเวณด้านหลังใบพัดมีลักษณะโค้งคว่ำทำให้มีการต้านลม เมื่ออากาศไหลผ่านใบพัดจะเกิดแรงดันทำให้ใบพัดหมุน ซึ่งมีความมากกว่าแรงต้านอากาศ นอกจากนั้นจุดเด่นของกังหันลมชนิดนี้ยังสามารถรับลมได้ทุกทิศทางซึ่งต่างจากกังหันลมแนวอนที่รับลมได้ทิศเดียว มีความเร็วรอบของกังหันลมต่ำแต่ให้แรงบิดสูง และมีระดับเสียงขณะใช้งานต่ำ ปัจจุบันนิยมนำไปใช้ในเชิงการเกษตรเพราะสามารถสร้างได้ง่ายและรวดเร็ว อย่างไรก็ตามกังหันแบบลมซาโวนีเยสมีประสิทธิภาพกำลังเพียง 15 % (The Renewable Energy Website, 2017) ทำให้ไม่เป็นที่นิยมเมื่อเทียบกับประสิทธิภาพกำลังของกังหันลมในอุดมคติที่ทำได้สูงสุดคือ 59 % (Watson, 2017) จึงมีความพยายามเพิ่มประสิทธิภาพกำลังในหลายวิธี เช่น การปรับเปลี่ยนรูปร่างใบพัดกังหัน หรือการติดตั้งช่องทางไหลนำร่อง เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานให้สูงขึ้น เป็นต้น (Roy & Saha, 2013)

การติดตั้งช่องทางไหลนำร่อง หรือ Guide vane เป็นวิธีการหนึ่งในการเพิ่มประสิทธิภาพกำลังของกังหันลม โดยช่องทางไหลนำร่องเป็นอุปกรณ์สำหรับเบี่ยงเบนทิศทางของอากาศก่อนเข้าไปยังใบพัดกังหันลม (Altan et al., 2008; Mohamed et al., 2011; Altan & Atilgan, 2010) ปี 2008 Altan et al. (2008) ได้ทำการทดลองติดตั้งช่องทางไหลนำร่องแบบแผ่นเรียบตรงกับกังหันลมซาโวนีเยสรูปร่างพื้นฐาน (Conventional rotor) จำนวน 2 แผ่น ที่ความยาว 45 เซนติเมตร และ 52 เซนติเมตร มุมของช่องทางไหลนำร่องที่ถูกวิเคราะห์คือ 30° ถึง 60° และที่ 0° ถึง 30° ต่อมาในปี 2010 Altan and Atilgan (2010) ได้หาค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดเมื่อมีการติดตั้งช่องทางไหลนำร่อง ที่ตำแหน่งใบพัด 0°, 45°, 60° และ 90° ปี 2011 Mohamed et al. (2011) Roy and Saha (2013) ได้ศึกษาช่องทางไหลนำร่องแบบเรียบโดยจำลองการหมุนของกังหันโดยใช้โปรแกรม ANSYS เพื่อหาค่าระยะห่างของช่องทางไหลนำร่องกับแนวแกนกังหันลมในระบบพิกัด x และ y อย่างไรก็ตามจากการตรวจสอบพบว่าได้มีการศึกษาสมรรถนะของกังหันลมแบบซาโวนีเยสที่มีการติดตั้งช่องทางไหลนำร่องแบบแผ่นตรงเพื่อรับลมเพียงทิศทางเดียวเท่านั้น ดังนั้นถ้ามีการศึกษาสมรรถนะของกังหันลมแบบซาโวนีเยสที่มีการติดตั้งช่องทางไหลนำร่องรูปร่างอื่นที่สามารถรับลมได้ทุกทิศทาง จะสามารถนำไปสู่การออกแบบโครงสร้างของช่องทางไหลนำร่องและ

ใบพัดของกังหันลมแบบซาโวนีเยสให้มีสมรรถนะและประสิทธิภาพทางด้านอากาศพลศาสตร์สูงขึ้นได้

การศึกษาการไหลของอากาศผ่านกังหันลมแบบซาโวนีเยสในรูปแบบ 2 มิติ เป็นที่นิยมกันอย่างแพร่หลาย (Mohamed et al., 2011; Hayashi et al., 2005; Wang et al., 2012; Menet & Rezende, 2013; Blackwell et al., 1977; Kacprzak et al., 2013; Chaiworapuek & Saengswarn, 2015) โดยลักษณะการจำลองการไหลของอากาศผ่านใบพัดกังหัน แบ่งเป็น 2 ประเภทคือ เชิงสถิตยศาสตร์ (Static) และเชิงพลศาสตร์ (Dynamic) โดยผลที่ได้จากการวิเคราะห์ในเชิงสถิตยศาสตร์ เป็นการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิด (Torque coefficient, C_T) เทียบกับตำแหน่งใบพัดขณะหมุนใน 1 รอบที่มุมต่าง ๆ ขณะที่การวิเคราะห์ในเชิงพลศาสตร์ เป็นการวิเคราะห์ค่าสัมประสิทธิ์กำลัง (Power coefficient, C_p) เทียบกับอัตราส่วนความเร็วปลายใบพัดเทียบกับความเร็วลม (Tip speed ratio, TSR)

จากงานวิจัยที่ผ่านมา การจำลองการไหลของอากาศผ่านกังหันลมซาโวนีเยสโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป มีการใช้แบบจำลองความปั่นป่วนและแบบจำลองขอบเขตลักษณะแตกต่างกันไป ในปี 2011 Mohamed et al. (2011) ได้เลือกใช้แบบจำลองขอบเขตสี่เหลี่ยม (square domain) เปรียบเทียบแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ k- ω SST, standard k- ϵ และ k- ϵ realizable โดยสอบเทียบผลกับการทดลองของ Hayashi et al. (2005) ซึ่งใช้โปรแกรม ANSYS-Fluent พบว่าค่าสัมประสิทธิ์กำลัง (C_p) ของแบบจำลองความปั่นป่วน k- ϵ realizable ใกล้เคียงกับการทดลองมากที่สุด ต่อมา ปี 2012 Wang et al. (2012) วิเคราะห์อากาศพลศาสตร์ของใบพัดกังหันลมแนวตั้งเมื่อเปลี่ยนแปลงความเร็วลม โดยเลือกใช้แบบจำลองขอบเขตโค้ง (Semi cycle domain) ร่วมกับ แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ k- ϵ realizable โดยใช้ โปรแกรม Fluent พบว่าการเพิ่มความเร็วลมทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิด (Torque coefficient, C_t) มีค่าสูงขึ้น อย่างไรก็ตามลมหมุนวนด้านหลังใบพัดก็มีปริมาณเพิ่มขึ้นเช่นกัน ต่อมา ปี 2013 Manet and Rezende (2013) ได้ศึกษาการไหลของอากาศผ่านกังหันลมซาโวนีเยสแบบทั่วไป โดยใช้แบบจำลองความปั่นป่วน k- ω SST เปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองขอบเขตสี่เหลี่ยมและแบบจำลองขอบเขตโค้ง รวมถึงสอบเทียบผลการจำลองกับการทดลองของ Blackwell et al. (1977) พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดเชิงสถิตย (C_T) ของแบบจำลองขอบเขตโค้งมีค่าใกล้เคียงกับการทดลองจริง ในปีเดียวกัน Kacprzak et al. (2013)

เลือกใช้แบบจำลองขอบเขตสี่เหลี่ยมและแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ $k-\omega$ SST โดยใช้โปรแกรม ANSYS-CFX พบว่าเมื่อปรับรูปร่างของใบพัดให้มีลักษณะเป็นครึ่งทรงรี ส่งผลให้สัมประสิทธิ์กำลัง (C_p) ของกังหันมีค่าสูงกว่าใบพัดรูปทรงปกติ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่ออัตราส่วนความเร็วปลายใบพัดระหว่าง 0.2-0.4. ปี 2015 Chaiworapuek and Saengswang (2015) ได้ศึกษากังหันลมแบบซาโวนีเยสแบบสถิตย์โดยใช้โปรแกรม Fluent เลือกใช้แบบจำลองขอบเขตสี่เหลี่ยม โดยสอบเทียบผลกับการทดลองจริง (Blackwell et al., 1977) เปรียบเทียบแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ $k-\epsilon$ RNG, standard $k-\epsilon$ และ $k-\epsilon$ realizable พบว่า standard $k-\epsilon$ ให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิด (C_t) ใกล้เคียงกับการทดลองมากที่สุด

จากผลการศึกษาที่ผ่านมา พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมีความสามารถในการทำนายลักษณะการไหลของของไหลผ่านกังหันลมได้อย่างแม่นยำ (Roy & Saha, 2013) เมื่อมีแบบจำลองทางด้านคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมแล้วจะทำให้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเป็นเครื่องมือช่วยออกแบบกังหันลมที่มีประสิทธิภาพและความแม่นยำสูงโดยที่ไม่ต้องสร้างชิ้นงานมาทดสอบจริง (Anderson, 1995; Versteeg & Malalasekera, 1995) โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ OpenFOAM ซึ่งเป็นฟรีแวร์ (freeware) ถูกพัฒนาด้วยภาษา C++ ซึ่งผู้ใช้งานสามารถนำไปใช้และพัฒนาโค้ด (code) ภายใต้โครงสร้างโปรแกรมได้อย่างอิสระและมีความยืดหยุ่น (OpenCFD, 2011)

งานวิจัยนี้สนใจศึกษากังหันลมซาโวนีเยสเชิงสถิตย์ศาสตร์ในรูปแบบ 2 มิติเพื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์แรงบิด ที่ตำแหน่งใบพัด 0° , 30° , 60° , 90° , 120° และ 150° โดยกำหนดให้ของไหลอยู่ในสภาวะคงที่ (Steady), อัดตัวไม่ได้ (Incompressible) และใช้ระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม (Finite Volume) เพื่อแก้ระบบสมการด้วยโปรแกรมสำเร็จรูปทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ OpenFOAM โดยพิจารณาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ขอบเขตสี่เหลี่ยม (Square domain) และขอบเขตโค้ง (Semi cycle domain) รวมถึงพิจารณาแบบจำลองความปั่นป่วนแบบ $k-\omega$ SST และ standard $k-\epsilon$ ซึ่งค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดจะถูกสอบเทียบความแม่นยำกับการทดลองจริง (Blackwell et al., 1977) ที่ค่าเรย์โนลด์นัมเบอร์ (Reynolds number, Re) เท่ากับ 4.32×10^5 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่เหมาะสมจะถูกนำไปใช้ทำนายการไหลของอากาศผ่านกังหันลมซาโวนีเยสเมื่อติดตั้งโครงสร้างช่องทางไหลนำร่องแบบแผ่นโค้ง พฤติกรรมการไหลของอากาศและค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดจะถูกวิเคราะห์เพื่อเป็นแนวทางในการออกแบบปรับปรุงประสิทธิภาพสัมประสิทธิ์แรงบิดของกังหันลมซาโวนีเยสต่อไป

2. สมการที่เกี่ยวข้อง

การคำนวณทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณของแบบจำลองความปั่นป่วน (Turbulence Model) ได้มีการพัฒนาขึ้นเพื่อประมาณพจน์ความเค้นเรย์โนลด์ การประมาณค่าของพจน์ความเค้นเรย์โนลด์ของแต่ละแบบจำลองความปั่นป่วนจำเป็นต้องใช้สมการส่งผ่าน (Transport Equation) แบบจำลองสองสมการ (Two Equation Model) เป็นแบบจำลองที่มีสมการการส่งผ่านจำนวน 2 สมการ [16] ในงานวิจัยนี้ซอฟต์แวร์ OpenFOAM มีการจำลองสองสมการ คือแบบจำลอง Standard $k-\epsilon$ และแบบจำลอง $k-\omega$ SST

2.1 แบบจำลองความปั่นป่วน Standard $k-\epsilon$

แบบจำลองนี้เป็นรูปแบบพื้นฐานที่สุดของแบบจำลองความปั่นป่วน $k-\epsilon$ ถูกนำเสนอโดย Launder และ Spalding [17] เป็นแบบจำลองความปั่นป่วนที่นิยมใช้มากในอุตสาหกรรมเนื่องจากให้ความแม่นยำสูงแต่ใช้เวลาในการคำนวณน้อย และสามารถประยุกต์ใช้ในงานประยุกต์ทางด้านวิศวกรรมของไหลได้หลากหลาย แบบจำลอง $k-\epsilon$ เป็นแบบจำลองความปั่นป่วน 2 สมการ ประกอบด้วย สมการการเคลื่อนที่ของพลังงานจลน์ของความปั่นป่วน (k) และสมการการเคลื่อนที่ของอัตราการลดลงของความปั่นป่วน (ϵ) ดังสมการที่ (1-4) (Loksupapuiiboon & Suvanjumrat, 2020; Suvanjumrat, 2018)

$$\frac{\partial \rho k}{\partial t} + \text{div}(\rho k \bar{U}) = \text{div} \left(\left(\frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla \cdot k \right) + 2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - \rho \epsilon \quad (1)$$

$$\frac{\partial \rho \epsilon}{\partial t} + \text{div}(\rho \epsilon \bar{U}) = \text{div} \left(\left(\frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \nabla \cdot \epsilon \right) + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} 2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} \quad (2)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\epsilon} \quad (3)$$

$$S_{ij} = \left(\frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{U}_j}{\partial x_i} \right) \quad (4)$$

โดยที่ ค่าคงที่ต่างๆ ประกอบด้วย σ_k , σ_ϵ , $C_{1\epsilon}$, $C_{2\epsilon}$ และ C_μ มีค่าคือ 1.00, 1.30, 1.44, 1.92 และ 0.09 ตามลำดับ

2.2 แบบจำลองความปั่นป่วน $k-\omega$ SST

Menter (1993) นำเสนอ $k-\omega$ Shear Stress Transport ได้จากการพัฒนาจากแบบจำลองของ Wilcox (1994) โดยแบบจำลอง $k-\omega$ เป็นแบบจำลองความปั่นป่วน 2 สมการ ประกอบด้วย สมการการเคลื่อนที่ของพลังงานจลน์ของความ

ปั่นป่วน (k) และสมการการเคลื่อนที่ของอัตราการผลิตของความปั่นป่วน (ω) ดังสมการที่ (5-7) (Loksupapui boon & Suvanjumrat, 2020)

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \text{div}(\rho k \bar{U}) = \text{div} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + 2\mu_t S_{ij} \cdot S_{ij} - \frac{2}{3} \rho k \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} \delta_{ij} - \beta^* \rho k \omega \quad (5)$$

$$\frac{\partial(\rho \omega)}{\partial t} + \text{div}(\rho \omega \bar{U}) = \text{div} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_{\omega 1}} \right) \nabla \omega \right] + 2 \frac{\rho}{\omega \sigma_{\omega 2}} \frac{\partial k}{\partial x_k} \frac{\partial \omega}{\partial x_k} + \gamma \left(2\rho S_{ij} \cdot S_{ij} - \frac{2}{3} \rho \omega \frac{\partial \bar{U}_i}{\partial x_j} \delta_{ij} \right) - \beta \rho \omega^2 \quad (6)$$

โดย

$$\mu_t = \frac{a_1 \rho k}{\max(a_1 \omega, \sqrt{2 S_{ij} S_{ij}} F_2)} \quad (7)$$

โดยที่ ค่าคงที่ต่าง ๆ ประกอบด้วย σ_k , β^* , $\sigma_{\omega 1}$, γ , β and $\sigma_{\omega 2}$ มีค่าคือ 1.0, 0.09, 2.0, 0.44, 0.083 และ 1.17 ตามลำดับ

2.3 การทำนายค่าสัมประสิทธิ์แรงบิด

ผลเบื้องต้นที่ได้จากการวิเคราะห์การไหลของของไหลด้วยการใช้พลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณคือ การกระจายความเร็ว, การกระจายความดัน และ ลักษณะการไหลของของไหล ซึ่งจะส่งผลให้สามารถคำนวณตัวแปรอื่นได้ เช่น ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิด (Torque coefficient, C_T) ดังแสดงในสมการที่ 8 โดยค่าแรงที่ใช้ในการสร้างแรงบิดถูกคำนวณจากค่าความดันที่กระทำกับใบพัด

$$C_T = \frac{T_S}{0.5 \rho U^2 R A} \quad (8)$$

เมื่อ T_S คือแรงบิดของใบพัดกังหันลมได้ถูกเฉลี่ยและนำมาใช้ในการคำนวณ ขณะที่ U คือความเร็วลมเริ่มต้น A คือพื้นที่ฉายของใบพัดกังหันลม และ R คือรัศมีของใบพัดกังหันลม

2.4 ค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย

ค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Squared Error : RMSE) เป็นวิธีที่การวัดค่าความคลาดเคลื่อนแบบมาตรฐาน ซึ่งนิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย ดังสมการที่ 9 ในการวัดค่าความแม่นยำจากวิธีการนี้ ยิ่งค่า RMSE ที่ได้นั้นน้อย แสดงว่าโมเดลที่ได้จะมีความแม่นยำมาก

$$RMSE = \sqrt{\frac{(a_1 - y_1)^2 + \dots + (a_n - y_n)^2}{n}} \quad (9)$$

โดยที่ RMSE คือค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย, n คือจำนวนข้อมูลที่ใช้, a คือค่าการทดลองจริง และ y คือค่าที่ได้จากการทำนาย

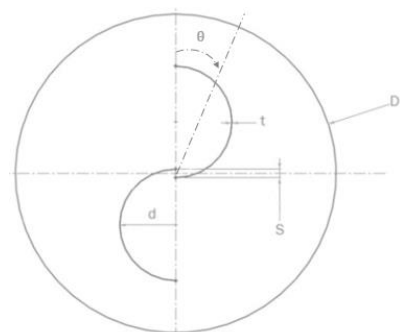
3. ระเบียบวิธีเชิงตัวเลข

ระบบสมการถูกแก้ด้วยระเบียบวิธีไฟไนต์วอลุ่ม (Finite volume) โดยใช้โปรแกรม OpenFOAM กำหนดให้ของไหลอยู่ในสถานะคงที่และอัดตัวไม่ได้ โดเมนของปัญหาถูกแบ่งออกเป็นเซลล์เล็ก ๆ จำนวนมากและเก็บค่าตัวแปรต่าง ๆ ไว้ที่จุดศูนย์กลางของเซลล์ (Cell center) ดังนั้นค่าที่ขอบของแต่ละเซลล์จะถูกหาโดยการ Interpolation การคำนวณถูกกำหนดให้รู้ค่าเมื่อค่าความต่างกันของข้อมูลที่ได้จากการคำนวณค่าความเร็วและความดันที่ 0.00001 มีการคำนวณที่ใช้ scheme แบบ second order upwind และในส่วนของการกระจาย (Diffusion terms) กำหนดเป็น Central difference ในการคำนวณ มีการกำหนดส่วนของการคำนวณ pressure-velocity coupling เป็น SIMPLE discretization algorithm เพื่อให้เหมาะสมกับการไหลที่ไม่ขึ้นกับเวลา

4. วิธีการดำเนินงานวิจัย

4.1 ขนาดและรูปร่างกังหัน

งานวิจัยนี้ได้สอบเทียบผลศึกษาเกี่ยวกับการทดลองจริงของ Blackwell et al. (1977) ที่อัตราส่วน s/d คือ 0.15 ซึ่งมีรูปร่างแบบจำลองใบพัดดังแสดงในรูปที่ 1 โดยได้ศึกษาการไหลของอากาศผ่านใบพัดที่หยุดนิ่ง ซึ่งใบพัดทำมุมกับแนวตั้ง (θ) ที่ 0° , 30° , 60° , 90° , 120° และ 150° กำหนดให้อากาศมีความเร็ว 7 เมตรต่อวินาที และใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ OpenFOAM ในการจำลองการไหล ซึ่งรายละเอียดต่าง ๆ ของกังหันลมได้แสดงในตารางที่ 1



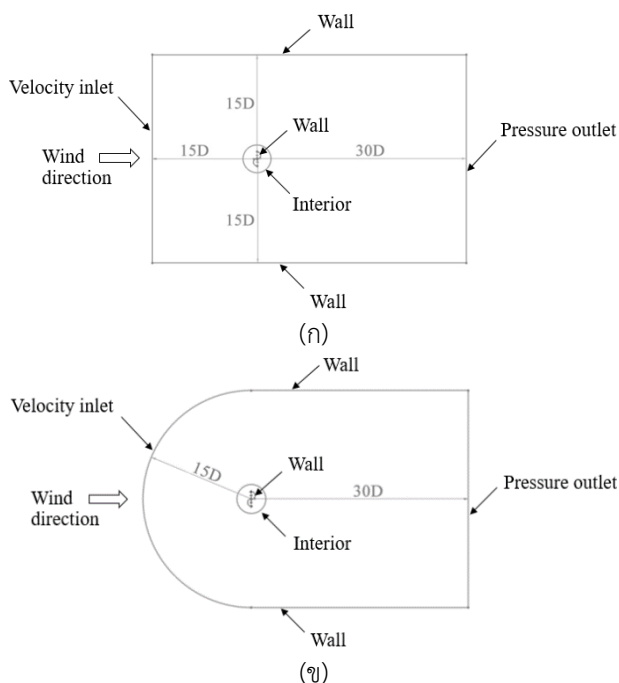
รูปที่ 1 กังหันลมแบบฮาโวเนียสที่ตำแหน่ง $\theta = 0^\circ$

ตารางที่ 1 ขนาดใบพัดของกังหันลมแบบซาโวนเนียส

รายละเอียด	ขนาด(มิลลิเมตร)
เส้นผ่านศูนย์กลางของใบพัด, D	1000
เส้นผ่านศูนย์กลางของคังใบพัด, d	525
ความหนาของใบพัด, t	1
ระยะเยื้องของใบพัด, s	78.8
ความสูงของใบพัด, H	1000

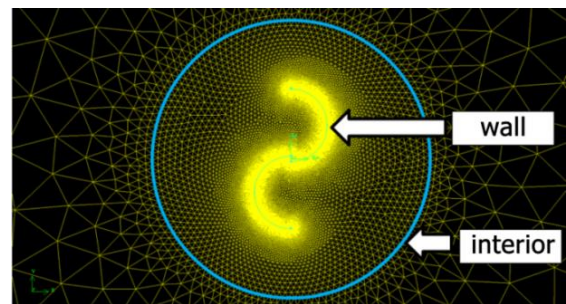
4.2 โดเมนและเงื่อนไขขอบ

การกำหนดโดเมนดังแสดงในรูปที่ 2 ระยะห่างจากจุดศูนย์กลางใบพัดถึงขอบด้านซ้าย ขอบด้านบนและขอบด้านล่าง มีระยะเท่ากับ 15D และระยะห่างจากจุดศูนย์กลางถึงทางออกด้านหลัง มีระยะเท่ากับ 30D ในแบบจำลองที่มีขอบเขตสี่เหลี่ยม (Square Domain) ขณะที่ระยะรัศมีจากจุดศูนย์กลางใบพัดถึงขอบด้านบน ด้านซ้าย และด้านขวา มีค่าเท่ากับ 15D และระยะห่างจากจุดศูนย์กลางถึงทางออกด้านหลัง มีระยะเท่ากับ 30D ในแบบจำลองที่มีขอบเขตโค้ง (Semi cycle Domain) (Shaheen et al., 2015; Mohamed, 2011)



รูปที่ 2 แบบจำลองรูปร่าง (ก) ขอบเขตสี่เหลี่ยม (Square domain) (ข) ขอบเขตโค้ง (Semi cycle domain)

การกำหนดเงื่อนไขค่าขอบเขต (boundary condition) ของแบบจำลองที่เป็นสี่เหลี่ยมและเส้นโค้ง โดยขอบเขตด้านซ้ายนั้นกำหนดให้เป็น Velocity inlet ซึ่งกำหนดให้มีความเร็วลมเท่ากับ 7 เมตรต่อวินาที, ขอบเขตด้านบนและด้านล่างกำหนดให้เป็น Wall, ขอบเขตทางออกกำหนดให้เป็น Pressure outlet มีค่าเท่ากับ 0 ปาสกาล ซึ่งเท่ากับความดันบรรยากาศ ขณะที่การกำหนดเงื่อนไขค่าขอบเขต (boundary condition) ของบริเวณใบพัด โดยใบพัดของกังหันลมนั้นกำหนดให้เป็นผนัง (Wall) มีสถานะไม่ลื่นไถล (No slip) และวงกลมด้านนอกกังหันกำหนดขอบเขตให้เป็น Interior เพื่อแสดงถึงอากาศสามารถไหลผ่านกังหันและเพื่อแบ่งแยกช่วงการสร้างกริด ทำให้การสร้างกริดภายในวงกลมบริเวณใกล้ใบพัดมีความละเอียดสูง ขณะที่กริดภายนอกวงกลมที่ห่างไกลจากใบพัดมีความละเอียดต่ำกว่า สำหรับกริดที่ใช้ในการคำนวณเป็นรูปทรงสามเหลี่ยม (Triangular elements) ดังแสดงในรูปที่ 3

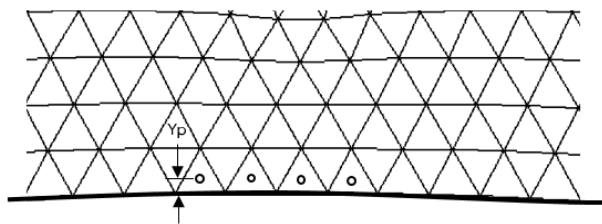


รูปที่ 3 การกำหนดเงื่อนไขค่าขอบของใบพัด

โดยบริเวณผิวของใบพัดกังหันได้สร้างกริด ซึ่งกำหนดให้ค่า y^+ ที่ผิวกังหันให้มีค่าน้อยกว่า 11.63 (Versteeg & Malalasekera, 2007) เพื่อให้ชั้นขีดผิวมีการไหลแบบราบเรียบ โดยค่าเฉลี่ยของ y^+ ที่ผิวกังหันนี้คือ 10 ดังแสดงในรูปที่ 4 โดยสมการที่ 10 แสดงการคำนวณการกำหนดชั้นของการไหลขีดกับผนัง (y^+)

$$y^+ = \frac{y_p}{\nu} \sqrt{\frac{T_w}{\rho}} \quad (10)$$

โดยที่ y_p คือระยะห่างจากผนังของจุดข้อมูลภายในเซลล์ซึ่งติดกับผิวกังหัน, ν คือ ความหนืดพลวัต (dynamic viscosity), T_w คือความเค้นเฉือนของผนัง (wall shear stress), ρ คือความหนาแน่นของของไหล (fluid density) (Suvanjumrat, 2017)

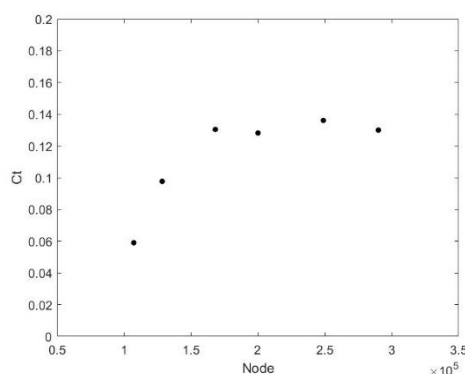


รูปที่ 4 ตาข่ายข้อมูลบริเวณผิวใบพัดกังหันลม

4.3 การตรวจสอบผลกระทบของความหนาแน่นของกริด (Grid independence check)

สำหรับกริดที่ใช้ในการคำนวณนี้ ได้มีการหาจำนวนจุดข้อมูล (Node) ที่เหมาะสม เพื่อพิจารณาการกระจายโดยได้สร้างตาข่ายข้อมูลให้หยาบขึ้น เพื่อให้มีจุดคำนวณน้อยลง ทำให้การจำลองการไหลสามารถทำได้เร็วขึ้นและแม่นยำที่สุด ในงานวิจัยนี้ได้ตรวจสอบโดยพิจารณาการไหลของอากาศที่ตำแหน่งใบพัด 30 องศา กำหนดให้ค่าเฉลี่ย y^+ เท่ากับ 10 และเพิ่มจำนวนจุดข้อมูลภายในวงกลม (ด้านนอกกังหัน) ให้มีความหนาแน่นมากขึ้นโดยทดสอบที่จำนวนจุดข้อมูลทั้งหมด 5 ค่า คือ 107,224 128,444 168,136 200,000 และ 248,878 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิด (C_T) มีค่าเท่ากับ 0.059, 0.0977, 0.1304, 0.1282 และ 0.1361 ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 5

จากการศึกษาพบว่าผลการคำนวณในกรณีที่จุดข้อมูลเท่ากับ 168,136 มีค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดต่างจากจำนวนจุดข้อมูลที่มากขึ้นคือที่ 200,000 และ 248,878 ประมาณ 3 % โดยพบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดมีแนวโน้มคงที่และใกล้เคียงกันเมื่อจุดข้อมูลมากขึ้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้ค่ากริดที่มีค่าน้อยที่สุด คือ 168,136 ในการวิเคราะห์ผลต่อไป

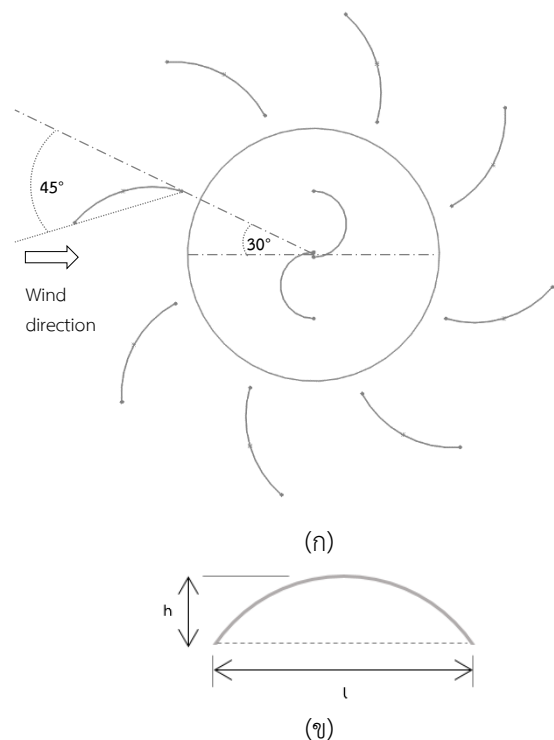


รูปที่ 5 การหาจำนวนจุดข้อมูลที่เหมาะสม

4.4 การศึกษาผลกระทบจากช่องทางไหลนําร่องแบบแผ่นโค้ง

งานวิจัยในส่วนนี้ ศึกษากังหันลมชาโวเนียสเมื่อมีการติดตั้งโครงสร้างของช่องทางการไหลนําร่องแบบแผ่นโค้ง มีลักษณะเป็นแผ่นที่มีความหนา 2 มิลลิเมตร จำนวน 4 คู่ (Chong et al.,

2012) โดยมีตำแหน่งของแต่ละแผ่นสมมาตรกันซึ่งติดตั้งโดยรอบใบพัดกังหันลมแบบชาโวเนียส ดังแสดงในรูปที่ 6 ช่องทางการไหลนําร่องแบบแผ่นโค้งทำหน้าที่จัดระเบียบการไหลของอากาศก่อนเข้าพื้นที่หมุนของใบพัดกังหันลม โดยกำหนดให้ทิศทางของกระแสลมหลักต่อการติดตั้งช่องทางการไหลนําร่อง มีค่าเท่ากับ 30° และมุมเอียงของช่องทางไหลนําร่องแบบแผ่นโค้งมีค่าเท่ากับ 45° โดยช่องทางไหลนําร่องแต่ละแผ่นมีความยาว 2000 มิลลิเมตร และมีความสูง 333.33 มิลลิเมตร คิดเป็นอัตราส่วนแผ่นโค้ง (l/h) เท่ากับ 6



รูปที่ 6 โครงสร้างช่องทางไหลนําร่องแบบแผ่นโค้งติดตั้งโดยรอบกังหันลมชาโวเนียสที่ตำแหน่ง 0°

5. ผลการจำลองและวิเคราะห์ผล

5.1 การสอบเทียบความถูกต้องของแบบจำลองความปั่นป่วน

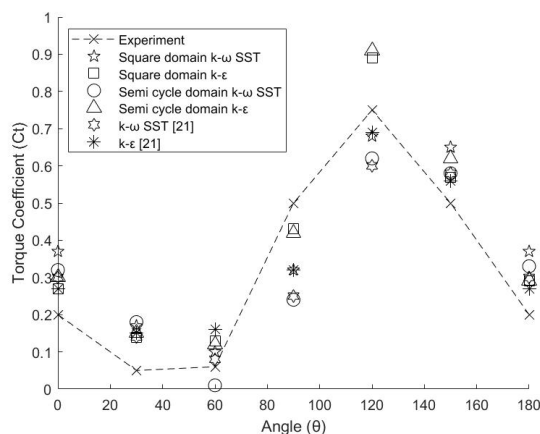
ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิด (Torque coefficient, C_t) ของกังหันลมที่ได้จากการคำนวณเชิงตัวเลขโดยใช้โปรแกรม OpenFOAM ถูกเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Blackwell et al. (1977) ที่ตำแหน่งของใบพัดขณะหมุนโดยทำมุมกับแนวตั้ง $0^\circ, 30^\circ, 60^\circ, 90^\circ, 120^\circ$ และ 150° ดังแสดงในรูปที่ 7 พบว่าค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดของกังหันลมของแบบจำลองความปั่นป่วน standard k- ϵ และ k- ω SST ที่มีรูปร่างขอบเขตสี่เหลี่ยม (Square domain) และขอบเขตโค้ง (Semi cycle domain) มีค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดของกังหันลมที่ได้จากการ

คำนวณเชิงตัวเลขมีค่าใกล้เคียงกับผลที่ได้จากการทดลอง (Blackwell et al., 1977) และแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับผลการจำลองของ (Shaheen et al., 2015)

รูปที่ 7 เมื่อพิจารณาในตำแหน่ง 0° , 30° , 60° และ 150° การทำนายผลของค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดมีค่าใกล้เคียงกัน โดยมีค่าสูงกว่าการทดลองจริง ตารางที่ 3 แสดงค่า RMSE ซึ่งแสดงค่าความคลาดเคลื่อนเปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง พบว่าเมื่อพิจารณาที่แบบจำลอง standard k- ϵ และ แบบจำลอง k- ω SST ผลของโดเมนขอบเขตสี่เหลี่ยมมีค่า RMSE น้อยกว่าขอบเขตโค้ง ขณะที่ถ้าพิจารณาที่โดเมนขอบเขตสี่เหลี่ยม และขอบเขตโค้ง ผลของแบบจำลอง standard k- ϵ มีค่า RMSE น้อยกว่าแบบจำลอง k- ω SST จากผลที่ได้ แบบจำลอง standard k- ϵ ขอบเขตสี่เหลี่ยม มีค่าใกล้เคียงกับการทดลองจริงมากที่สุด นอกจากนี้เมื่อพิจารณาที่ตำแหน่ง 90° และ 120° ค่า RMSE ที่ตำแหน่ง 90° และ 120° แบบจำลอง standard k- ϵ ขอบเขตสี่เหลี่ยม มีค่าใกล้เคียงกับการทดลองจริงมากกว่าแบบจำลองอื่นเช่นกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้แบบจำลอง standard k- ϵ ขอบเขตสี่เหลี่ยม ในการวิเคราะห์และอธิบายกังหันลมแบบซาโวนีเยสเมื่อติดตั้งช่องทางไหลนำร่องแบบแผ่นโค้งต่อไป

ตารางที่ 3 ค่า RMSE ที่ได้จากการจำลอง

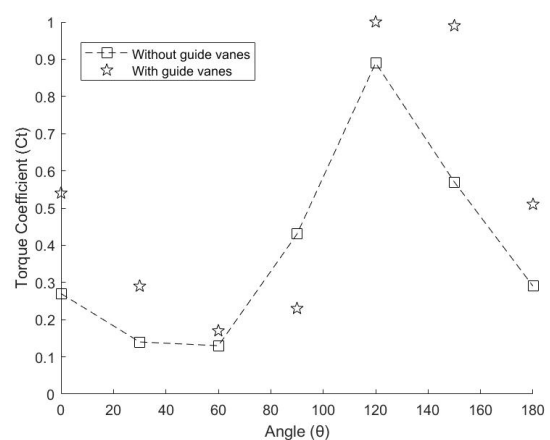
Domain	Turbulence model	RMSE	RMSE at 90° and 120°
Square	k w SST	0.148	0.091
	k epsilon	0.096	0.070
Semi cycle	k w SST	0.156	0.127
	k epsilon	0.113	0.078



รูปที่ 7 ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดของแบบจำลองแบบต่าง ๆ เปรียบเทียบกับผลการทดลองจริง (Blackwell et al., 1977)

5.2 การเปรียบเทียบกังหันลมซาโวนีเยสที่มีและไม่มีการติดตั้งช่องทางไหลนำร่องแบบแผ่นโค้ง

รูปที่ 8 แสดงค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดของกังหันลมแบบซาโวนีเยสเมื่อติดตั้งช่องทางไหลนำร่องแบบแผ่นโค้ง และค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดของใบพัดของกังหันลมแบบไม่มีการติดตั้งช่องทางไหลนำร่อง โดยใช้แบบจำลอง standard k- ϵ ขอบเขตสี่เหลี่ยม จากการวิเคราะห์ข้อมูลการติดตั้งช่องทางไหลนำร่องแบบแผ่นโค้ง ที่ตำแหน่ง 0° , 30° , 60° , 120° , 150° และ 180° สามารถเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดให้กับกังหันลมได้ ขณะที่ที่ตำแหน่ง 90° ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดเชิงสถิติมีค่าลดลง



รูปที่ 8 ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดของกังหันลมแบบซาโวนีเยสเมื่อติดตั้งช่องทางไหลนำร่องแบบแผ่นโค้ง

ผลของกังหันที่มีการติดตั้งช่องทางไหลนำร่องแบบแผ่นโค้ง และกังหันที่ไม่มีการติดตั้งช่องทางไหลนำร่อง ได้ถูกนำมาเปรียบเทียบและวิเคราะห์การกระจายความดัน ลักษณะการไหลของอากาศ และค่าสัมประสิทธิ์แรงบิด ดังต่อไปนี้

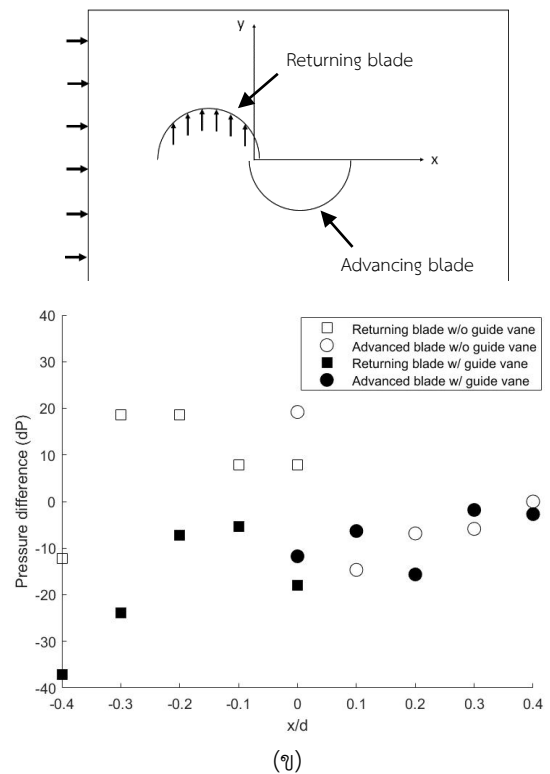
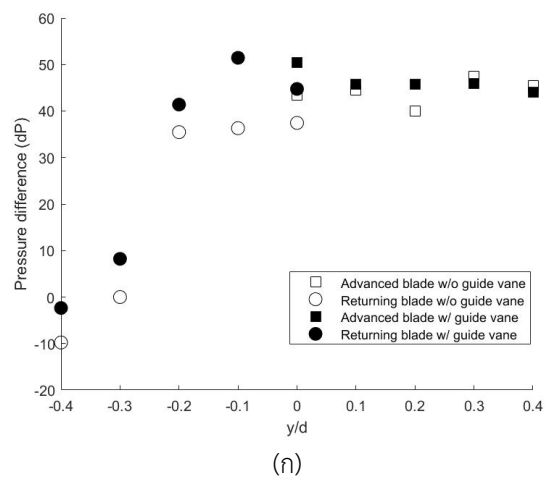
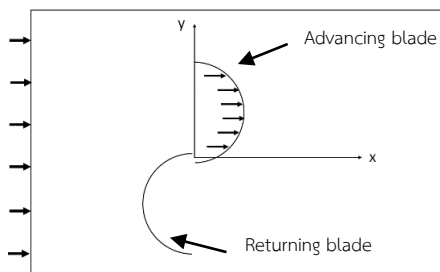
5.2.1 ผลต่างความดันบริเวณผิวใบพัด ตำแหน่ง 0° และ 90°

รูปที่ 9 แสดงถึงการเปรียบเทียบการกระจายความดันที่บริเวณผิวใบพัดตลอดความยาวของใบพัดในรูปของผลต่างความดัน (Pressure difference) เมื่อไม่มีการติดตั้งช่องทางไหลนำร่อง และมีการติดตั้งช่องทางไหลนำร่อง ที่ตำแหน่ง 0° และ 90° โดยที่ตำแหน่ง 0° เป็นตำแหน่งที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อติดตั้งช่องทางไหลนำร่อง ขณะที่ตำแหน่ง 90° เป็นตำแหน่งที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดมีค่าลดลงเมื่อติดตั้งช่องทางไหลนำร่อง

รูปที่ 9(ก) แสดงทิศทางการไหลของอากาศเมื่อกังหันอยู่ที่ตำแหน่ง 0° และค่าผลต่างความดันบริเวณด้านหัวและด้านนูนพิจารณาตลอดความยาวตามแนวทิศทางตั้งฉากการไหลหลัก

โดยพบว่าใบพัดด้านหน้า (Advancing blade) ซึ่งอยู่ในตำแหน่งรับลมจากกระแสลมหลักมีค่าผลต่างความดัน (dP) ค่อนข้างคงที่ตลอดความยาวใบพัด เมื่อติดตั้งและไม่ติดตั้งช่องทางไหลนำร่องแบบโค้ง โดยมีค่าอยู่ในช่วง 40-50 Pa ขณะที่ใบพัดหมุนกลับ (Returning blade) ช่วงใกล้แกนหมุนมีค่าผลต่างความดันสูงกว่าด้านปลายใบพัด และผลต่างความดันของใบพัดเมื่อติดตั้งช่องทางไหลนำร่องแบบโค้ง มีค่าสูงกว่าเมื่อไม่มีช่องทางไหลนำร่องในทุกตำแหน่ง โดยมีค่าเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 9 Pa จากผลดังกล่าวเมื่อพิจารณาผลรวมของค่าผลต่างความดันที่ผิวกังหันของใบพัดด้านหน้าและใบพัดหมุนกลับที่มีการติดตั้งช่องทางไหลนำร่อง มีค่ามากกว่ากังหันที่ไม่ได้ติดตั้งช่องทางไหลนำร่อง ส่งผลให้แรงบิดที่เกิดขึ้นมากขึ้น ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดจึงเพิ่มขึ้น

ในรูปที่ 9(ข) แสดงทิศทางการไหลของอากาศเมื่อกังหันอยู่ที่ตำแหน่ง 90° และค่าผลต่างความดันบริเวณด้านเว้าและด้านนูนของใบพัด พิจารณาตลอดความยาวตามแนวทิศทางการไหลหลัก พบว่าใบพัดหมุนกลับ (Returning blade) ค่าผลต่างความดันของใบพัดเมื่อมีการติดตั้งช่องทางไหลนำร่องมีค่าน้อยกว่าการไม่ติดตั้งช่องทางในทุกตำแหน่ง โดยมีค่าน้อยลงประมาณ 26 Pa โดยบริเวณปลายใบพัดมีค่าผลต่างความดันน้อยที่สุด ขณะที่ใบพัดด้านหน้า (Advancing blade) ผลต่างความดันของกังหันค่อนข้างใกล้เคียงกัน ที่ระยะ x/d ระหว่าง 0.1 ถึง 0.4 เมื่อติดตั้งและไม่ติดตั้งช่องทางไหลนำร่อง และเมื่อพิจารณาระยะ x/d เท่ากับ 0 ที่ใบพัดด้านหน้าและหมุนกลับพบว่า การติดตั้งช่องทางไหลนำร่องทำให้ผลต่างความดันลดลง จากรูปที่ 9(ข) พบว่า ผลรวมของค่าผลต่างความดันที่ผิวกังหันของใบพัดด้านหน้าและใบพัดหมุนกลับที่มีการติดตั้งช่องทางไหลนำร่อง มีค่าน้อยกว่ากังหันที่ไม่ได้ติดตั้งช่องทางไหลนำร่อง ส่งผลให้แรงบิดที่เกิดขึ้นน้อยลง ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดของการติดตั้งช่องทางไหลนำร่องจึงมีค่าลดลง



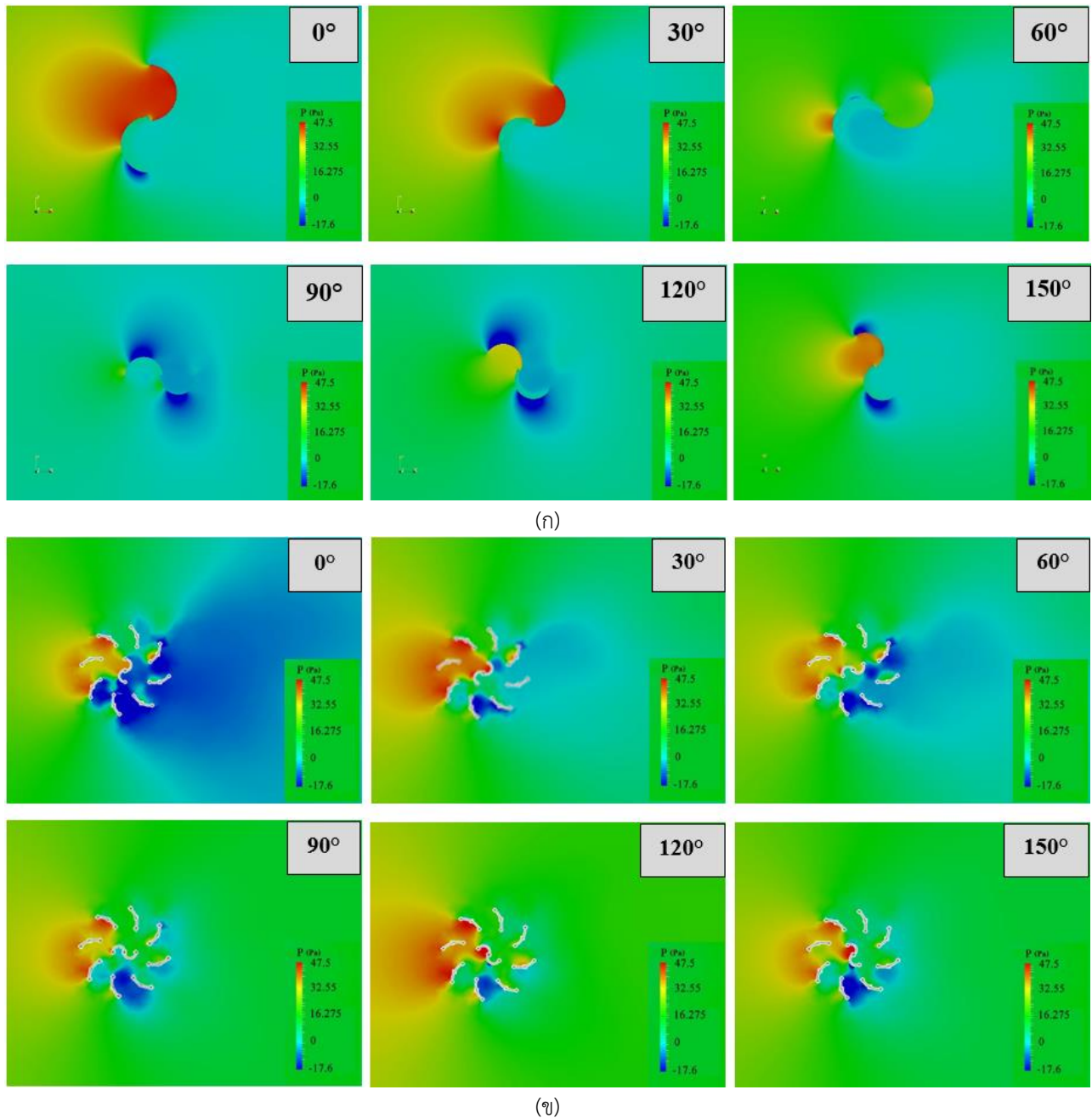
รูปที่ 9 การกระจายความดัน (Pressure distributions) ที่ผิวใบพัด (ก) ตำแหน่ง 0° (ข) ตำแหน่ง 90°

5.2.2 การกระจายความดัน

รูปที่ 10 แสดงผลการกระจายความดัน (Pressure contour) ของอากาศ เมื่อกังหันไม่มีและมีการติดตั้งช่องทางไหลนำร่องแบบแผ่นโค้ง ที่ตำแหน่งของใบพัดทำมุมกับแนวตั้ง คือ 0° , 30° , 60° , 90° , 120° และ 150° ตามลำดับ โดยแสดงค่าความดันอากาศอยู่ในช่วงระหว่าง 47.5 ปาสกาล ถึง -17.6 ปาสกาล

ที่ตำแหน่งใบพัด 0° และ 30° ความดันบริเวณด้านเว้าของใบพัดด้านหน้า (Advanced blade) และตำแหน่ง 120° และ 150° ความดันบริเวณด้านเว้าของใบพัดหมุนกลับ (Returning blade) เกิดความดันสูงเป็นบริเวณกว้าง ขณะที่ตำแหน่งใบพัด 60° และ 90° ความดันบริเวณด้านนูนของใบพัดหมุนกลับอากาศไหลปะทะทำให้เกิดความดันสูงเป็นบริเวณแคบ

เมื่อติดตั้งช่องทางไหลนำร่องพบว่าบริเวณด้านหน้าของช่องทางไหลนำร่องก่อนเข้ากังหันเกิดความดันสูงเป็นบริเวณกว้าง ขณะที่เมื่ออากาศไหลผ่านกังหันลมและเข้าสู่ช่องทางไหลนำร่องด้านหลังเกิดความดันต่ำ ที่ตำแหน่ง 90° , 120° , 150° เมื่อติดตั้งช่องทางไหลนำร่องค่าความดันบริเวณด้านเว้าของใบพัดด้านหน้ามีค่าสูงกว่าเมื่อไม่ติดตั้งช่องทางไหลนำร่อง



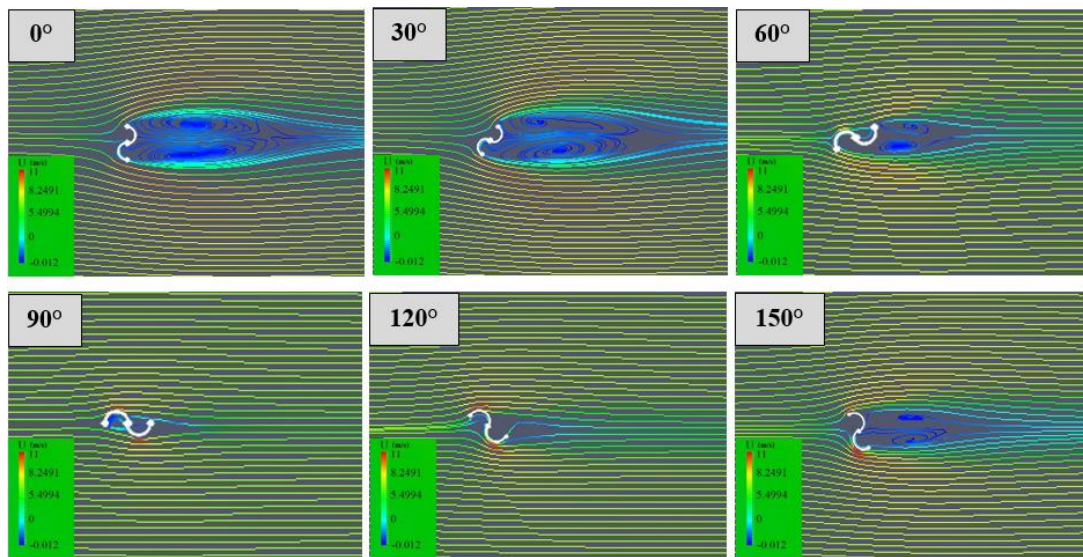
รูปที่ 10 การกระจายความดันของอากาศเมื่อพิจารณาที่ตำแหน่งใบพัด ต่าง ๆ (ก) ไม่ติดตั้งช่องทางไหลนำร่องแบบแผ่นโค้ง (ข) ติดตั้งช่องทางไหลนำร่องแบบแผ่นโค้ง

5.2.3 ลักษณะการไหลของอากาศ

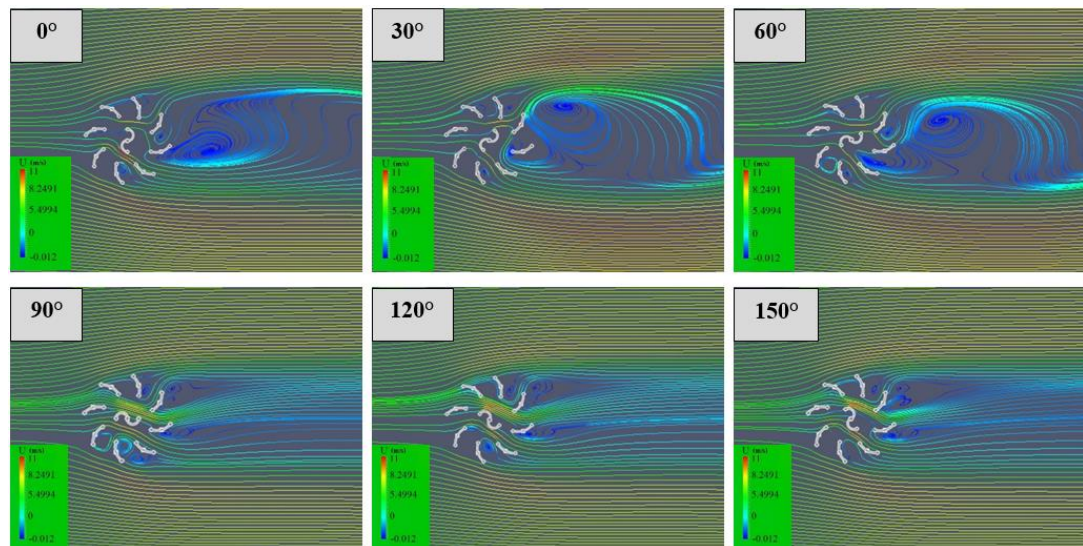
รูปที่ 11 แสดงเส้นกระแสการไหลในรูปแบบความเร็ว (Velocity streamline) ของอากาศ เมื่อกังหันลมไม่มีและมีการติดตั้งช่องทางไหลนําร่องแบบแผ่นโค้ง ที่ตำแหน่งของใบพัดทำมุมกับแนวตั้งคือ 0° , 30° , 60° , 90° , 120° และ 150° ตามลำดับ โดยแสดงค่าความเร็วอากาศอยู่ในช่วงระหว่าง 11 เมตรต่อวินาที ถึง -0.012 เมตรต่อวินาที

รูปที่ 11(ก) ที่ตำแหน่ง 90° , 120° และ 150° ความเร็วสูงสุดเกิดขึ้นบริเวณขอบนอกของใบพัด ซึ่งมีค่ามากกว่า

ความเร็วลมหลักอยู่ 1.57 เท่า ขณะที่ตำแหน่ง 0° , 30° , 60° และ 150° พบว่าการไหลวนของอากาศบริเวณด้านหลังใบพัดมีลักษณะเป็นโพรงอากาศ (Separation bubble) ซึ่งเป็นบริเวณที่อากาศโดยรอบไม่สามารถไหลเข้าไปได้ แต่เมื่อมีการติดตั้งช่องทางไหลนําร่อง ดังแสดงในรูปที่ 11(ข) พบว่าโพรงอากาศมีขนาดใหญ่ขึ้นโดยไหลวนบริเวณด้านหลังช่องทางไหลนําร่องที่ตำแหน่ง 0° , 30° และ 60° โพรงอากาศที่เกิดด้านหลังช่องทางไหลนําร่องแสดงให้เห็นว่า ช่องทางไหลนําร่องสามารถจัดระเบียบการไหลของอากาศใหม่



(ก)



(ข)

รูปที่ 11 ลักษณะการไหลของอากาศเมื่อพิจารณาค่าความเร็วที่ไหลผ่านตำแหน่งใบพัดต่าง ๆ (ก) ไม่ติดตั้งช่องทางไหลนําร่องแบบแผ่นโค้ง (ข) ติดตั้งช่องทางไหลนําร่องแบบแผ่นโค้ง

5.2.4 ความสัมพันธ์ความดัน การไหลและ C_t

เมื่ออากาศไหลเข้าปะทะกับผิวใบพัดความเร็วของอากาศจะลดลงใกล้เคียง 0 เมตรต่อวินาที เป็นจุดหยุดนิ่ง หรือ Stagnation point ซึ่งเป็นจุดที่มีการเปลี่ยนจากพลังงานจลน์ของอากาศเป็นแรงดันกระทำกับใบพัดทำให้มีความดันสูง

เมื่อไม่มีการติดตั้งช่องทางไหลนาร่อง พบว่าสัมประสิทธิ์แรงบิดมีค่าใกล้เคียงกันที่ตำแหน่ง 0° และ 30° โดยอากาศไหลเข้าปะทะบริเวณด้านเว้าของใบพัดด้านหน้าทำให้เกิดความดันสูง ขณะที่ด้านหลังใบพัดมีลมหมุนวนส่งผลให้ใบพัดไม่สามารถสร้างแรงบิดได้อย่างเต็มที่เนื่องจากลมหมุนวนด้านหลังด้านการหมุน ที่ตำแหน่ง 60° อากาศไหลเข้าปะทะบริเวณด้านเว้าของใบพัดด้านหน้ามีแต่ความดันไม่สูงเมื่อเทียบกับตำแหน่ง 0° และ 30° ขณะที่ด้านหลังใบพัดมีอากาศหมุนวนเล็กน้อยทำให้เกิดแรงต้าน ส่งผลให้ที่ตำแหน่งนี้ไม่สามารถสร้างแรงบิดได้อย่างเต็มที่ สัมประสิทธิ์แรงบิดจึงต่ำที่สุด อย่างไรก็ตามสัมประสิทธิ์แรงบิดมีค่าสูงสุดเมื่อกังหันอยู่ที่ตำแหน่ง 120° อากาศไหลเข้าบริเวณด้านเว้าของใบพัดหมุนกลับ ทำให้เกิดความดันค่อนข้างสูง ขณะเดียวกันบริเวณด้านหลังใบพัดไม่มีลมหมุนวนเกิดขึ้น ส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดสูงที่สุด

เมื่อมีการติดตั้งช่องทางไหลนาร่อง ที่ตำแหน่ง 0° , 30° และ 60° พบว่ามีโพรงอากาศขนาดใหญ่ไหลวนบริเวณด้านหลังช่องทางไหลนาร่อง โดยช่องทางไหลนาร่องได้กั้นลมที่หมุนวนนี้ไม่ให้ส่งผลต่อสร้างแรงบิดของใบพัด จึงทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดเพิ่มขึ้น ที่ตำแหน่ง 120° และ 150° ปรากฏโพรงอากาศขนาดเล็กที่ด้านในและด้านหลังของช่องทางไหลนาร่องเช่นเดียวกัน โดยองศาของใบพัดทั้งสองตำแหน่งสามารถรับลมได้ดี ทำให้แรงต้านที่เกิดจากโพรงอากาศด้านหลังส่งผลน้อยต่อใบพัด ค่าแรงบิดของตำแหน่งนี้จึงเพิ่มขึ้น โดยเฉพาะที่ตำแหน่ง 150° มีค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน ขณะที่เมื่อพิจารณาที่ตำแหน่ง 90° ซึ่งเป็นตำแหน่งเดียวที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดมีค่าลดลง พบว่าเกิดโพรงอากาศที่ช่องทางไหลนาร่องบริเวณใกล้ใบพัดในหลายตำแหน่ง พฤติกรรมการไหลของอากาศลักษณะนี้ส่งผลให้พื้นที่บริเวณนั้นมีค่าความดันต่ำ ทำให้ใบพัดไม่สามารถสร้างแรงบิดได้อย่างเต็มที่เนื่องจากเกิดลมหมุนวนด้านการหมุนของใบพัด ทำให้มีค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดลดลงต่ำกว่ากังหันแบบไม่ติดช่องทางไหลนาร่อง

6. สรุปผลการศึกษา

การจำลองการไหลของอากาศผ่านกังหันลมชาโวนีเยสแบบ 2 ใบพัด ถูกคำนวณด้วยซอฟต์แวร์ OpenFOAM ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ทางด้านพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเขียนด้วยภาษา C++ และไม่มีค่าลิขสิทธิ์ซอฟต์แวร์ ได้ถูกนำมาสอบเทียบกับการทดลองจริง [10] เพื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดเชิงสถิติ ของใบพัดเมื่อทำมุมกับแนวตั้งที่ 0° , 30° , 60° , 90° , 120° และ 150° โดยเลือกใช้แบบจำลองความปั่นป่วนแบบ Standard k- ϵ ขอบเขตสี่เหลี่ยมในวิเคราะห์การไหลของอากาศเมื่อติดตั้งช่องทางไหลนาร่องแบบแผ่นโค้ง ผลการเปรียบเทียบการไหลของอากาศที่มีการติดตั้งช่องทางไหลนาร่องและไม่มี การติดตั้งช่องทางไหลนาร่อง พบว่าการติดตั้งช่องทางไหลนาร่องแบบแผ่นโค้งสามารถเพิ่มค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดเชิงสถิติให้สูงขึ้นได้เมื่อเทียบกับกังหันแบบไม่มีการติดตั้งช่องทางไหลนาร่อง ที่ตำแหน่ง 0° , 30° , 60° , 120° และ 150° อย่างไรก็ตามที่ตำแหน่งใบพัด 90° เป็นตำแหน่งเดียวที่ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดลดลง จากพฤติกรรมการไหลของอากาศเมื่อติดตั้งช่องทางไหลนาร่องแบบโค้งพบว่า การติดตั้งช่องทางไหลนาร่องช่วยจัดระเบียบการไหลของอากาศได้ดีขึ้นโดยลมหมุนวนบริเวณด้านหลังใบพัด ย้ายไปปรากฏที่บริเวณด้านหลังช่องทางไหลนาร่องแทน ทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดมีค่าเพิ่มขึ้น แต่โพรงอากาศขนาดเล็กที่เกิดขึ้นบริเวณด้านหน้าและด้านเว้าของช่องทางไหลนาร่องที่บริเวณใกล้ใบพัดด้านรับลม มีผลทำให้ค่าสัมประสิทธิ์แรงบิดลดลง ดังนั้นการออกแบบช่องทางไหลนาร่องแบบโค้งที่เหมาะสม จะช่วยลดปริมาณโพรงอากาศ โดยเฉพาะในตำแหน่งใบพัด 90° ให้มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นได้ ซึ่งข้อมูลนี้จะถูกนำไปใช้ในการวิเคราะห์หาค่าสัมประสิทธิ์กำลัง (Power coefficient, C_p) เพื่อใช้ในการปรับปรุงและการออกแบบช่องทางไหลนาร่องให้มีประสิทธิภาพต่อไป

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณนายสรวิศ ดลบันดาลโชค และนายอรรถพันธ์ เม่งช่วย ที่ช่วยเก็บรวบรวมข้อมูลงานวิจัยครั้งนี้

8. เอกสารอ้างอิง

- Altan, B. D., & Atilgan, M. (2010). The use of a curtain design to increase the performance level of a Savonius wind rotors. *Renewable Energy*, 35, 821-829.
- Altan, B. D., Atilgan, M., & Ozdamar, A. (2008). An experimental study on improvement of a Savonius rotor performance with curtaining. *Experimental Thermal and Fluid Science* 32, 1673-1678.
- Anderson, J. D. (1995). *Computational Fluid Dynamics: The basics with applications*. McGrawHill Book.
- Blackwell, B. F., Sheldahl, R. E., & Feltz, L. V. (1977). *Wind tunnel performance data for two- and three-bucket Savonius rotors*. Sandia Report SAND 76-0131.
- Chaiworapuek, W., & Saengswarn, S. (2015). Prediction of Static Performance of Savonius Wind Turbine under the Variation of Wind Velocities. *Kasetsart engineering journal*, 94(28), 1-10.
- Chong, W. T., Poh, S. C., Fazlizan, A., & Pan, K.C. (2012). Vertical axis wind turbine with omni-directional guide vane for urban high-rise buildings. *Journal of Central South University*, 19, 727-732.
- Hayashi, T., Li, Y., & Hara, Y. (2005). Wind tunnel tests on a different phase three-stage Savonius rotor. *JSME International Journal Series B Fluids and Thermal Engineering*, 48(1), 9-16.
- Kacprzak, K., Liskiewicz, G., & Sobczak, K. (2013). Numerical investigation of conventional and modified Savonius wind turbines. *Renewable Energy*, 60, 578 – 585.
- Launder, B. E., & Spalding, D. B. (1972). *Lectures in Mathematical models of turbulence*. Academic Press.
- Loksupapui boon, K., & Suvanjumrat, C. (2020). Validation of Wall Functions for Two-Equation Turbulence Models of OpenFOAM. *The Engineering Institute of Thailand under H. M. The King's Patronage*, 31(2), 105-117.
- Menet, J. L., & Rezende, T. D. (2013). *Static and dynamic study of a conventional Savonius rotor using a numerical simulation* [Paper presentation]. 21^è Congrès Français de Mécanique (CFM), Bordeaux, France.
- Menter, F. R. (1993). *Zonal two equations k- ω turbulence models for aerodynamic flows*. AIAA-93-2906.
- Mohamed, M. H. (2011). *Design optimization of Savonius and wells turbines* [Doctoral dissertation] . Otto von Guericke University of Magdeburg. <https://d-nb.info/1011710889/34>
- Mohamed, M. H., Janiga, G., Pap, E., & Thevenin, D. (2011). Optimal blade shape of a modified Savonius turbine using an obstacle shielding the returning blade. *Energy Conversion and Management*, 52, 236 - 242.
- OpenCFD. (2011, August 8). *OpenFOAM foundation*. <http://www.openfoam.com>
- Roy, S., & Saha, U. K. (2013) Review on the numerical investigations into the design and development of Savonius wind rotors. *Renewable Sustainable Energy Rev*, 24(2013), 73-83.
- Shaheen, M., El-Sayed, M., & Abdallah, S. (2015). Numerical study of two-bucket Savonius wind turbine cluster. *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, 137, 78-89.
- Suvanjumrat, C. (2017). Comparison of Turbulence Models for Flow Past NACA0015 Airfoil using OpenFOAM. *Engineering Journal*, 21(3), 207-221.

- Suvanjumrat, C. (2018). *Computational Fluid Dynamics of finite volume method*. Mahidol University Press.
- The Renewable Energy Website (2017, September 9). *Savonius Wind Turbines*. <http://www.reuk.co.uk>
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (2007). *Implementation of boundary conditions, An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method* (2nd ed.). Pearson Education Limited.
- Versteeg, H. K., & Malalasekera, W. (1995). *Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*. John Wiley and Sons.
- Wang, H., Wang, J., Yao, J., Yuan, W., & Cao, L. (2012). Analysis on the aerodynamic performance of vertical axis wind turbine subjected to the change of wind velocity. *Procedia Engineering*, 31, 213-219.
- Watson, D. (2017, September 8). *Wind Turbines and the Energy in Wind*. <http://www.ftexploring.com>
- Wilcox, D. C. (1994). Turbulence energy equation models, in *Turbulence Modelling for CFD* (2nd ed.). ECW Industries.

โครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของอะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็งเกรด 2024 กับ 6061 ที่เชื่อมด้วยความเสียดทานแบบกวน

Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Welding of 2024 and 6061 Aluminium Semi-Solid Casting

วรพงศ์ บุญช่วยแทน^{1,2*} วรธนพร ชีววุฒิพงศ์^{1,2} และ รอมฎอน บุระพา^{1,2}

Worapong Boonchouytan,^{1,2*} Watthanaphon Cheewawuttipong,^{1,2} and Romadon Burapa^{1,2}

¹สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

²หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการแปรรูปวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

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

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

* Corresponding authors e-mail: worapong.b@rmutsv.ac.th

(Received: March 27, 2020, Revised: July 16, 2020, Accepted: November 10, 2020)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเชื่อมเสียดทานแบบกวนวัสดุต่างชนิดระหว่างอะลูมิเนียมผสมหล่อกึ่งแข็งของแข็ง 2024 กับ 6061 ซึ่งตัวอย่างมีขนาดความหนาของอะลูมิเนียม 4 มิลลิเมตร ความกว้าง 50 มิลลิเมตร และความยาว 100 มิลลิเมตร โดยการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกล ภายใต้ความเร็วหมุนเชื่อม 710 1000 และ 1400 รอบต่อนาที และความเร็วเดินเชื่อม 40 80 และ 112 มิลลิเมตรต่อนาที ผลการทดลองพบว่า สภาวะการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ดีที่สุด ที่ความเร็วหมุนเชื่อมที่ 1000 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อมที่ 112 มิลลิเมตรต่อนาที ซึ่งมีค่าความต้านทานแรงดึงและความแข็งสูงสุดในบริเวณแนวแกน เท่ากับ 190.4 MPa และ 137.0 HV ตามลำดับ นอกจากนี้โครงสร้างทางโลหะวิทยาของรอยเชื่อมมีลักษณะรอยเชื่อมที่กว้างเมื่อใช้ความเร็วหมุนเชื่อมสูง

คำสำคัญ: การเชื่อมเสียดทานแบบกวน อะลูมิเนียมหล่อกึ่งแข็ง โครงสร้างจุลภาค

Abstract

The purpose of this research was to study friction stir welding of dissimilar materials, that is the semi-solid 2024 and 6061 aluminum alloy. The dimensions of aluminium alloy were 4 mm in thickness, 50 mm in width and 100 mm in length. The analysis of the microstructure and mechanical properties was carried out with the rotation speed of 710, 1000 and 1400 rpm and the welding speed of 40, 80 and 112 mm/min. The research results indicated that the rotation speed of 1000 rpm and welding speed of 112 mm/min were condition most suitable to friction stir welding. The tensile strength and ultimate hardness in the stirred zone were found to be 190.4 MPa and 137 HV, respectively. In addition, an investigation of metallurgical structure of the weld revealed that the welded joint became wider when using a high rotation speed.

Keywords: Friction Stir Welding, Aluminium Semi-Solid Casting, Microstructure

1. บทนำ

การเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding : FSW) มีข้อดีและข้อได้เปรียบกว่ากระบวนการเชื่อมในสภาวะหลอมละลาย เช่น มีความร้อนที่ต่ำกว่าจุดหลอมละลายของวัสดุทำให้ไม่เกิดรูพรุนหรือรอยแตกในแนวเชื่อม ไม่เกิดการบิดตัวของแนวเชื่อม รวมถึงการใช้อุปกรณ์ในการเชื่อมที่น้อยกว่า เป็นต้น ดังนั้นการเชื่อมเสียดทานแบบกวนจึงกลายเป็นกระบวนการที่เหมาะสมมากสำหรับการเชื่อมวัสดุโดยเฉพาะอะลูมิเนียมที่มีค่าความต้านทานแรงดึงสูง เช่น 2024 6061 7075 เป็นต้น (Ericsson & Sandström, 2003) เมื่อเทียบกับการเชื่อมแบบหลอมละลายแล้วบริเวณที่แตกต่างกันจะเกิดขึ้นในช่วงของแนวเชื่อม เนื่องจากความร้อนจากแรงเสียดทานก่อให้เกิดการแปรรูปถาวรของเกรน ความร้อนจากแรงเสียดทานของเครื่องมือเชื่อมกับวัสดุเชื่อมทำให้เกิดการหมุนย้ายของโครงสร้างทางโลหะวิทยาเป็นไปตามแนวการหมุนของเครื่องมือภายใต้พารามิเตอร์การเชื่อมของเครื่องมือเชื่อม (บ่าและหัวพิน) (Lockwood et al., 2002) โครงสร้างจุลภาคของชิ้นงานที่ผ่านการเชื่อมเสียดทานแบบกวนจะแสดงให้เห็นถึงสามบริเวณที่แตกต่างกัน เนื่องจาก ความเครียดทางกลที่รุนแรงแนวเชื่อม คือ บริเวณแนวกวน (Stir Zone; SZ) บริเวณที่มีผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อนทางกล (Thermo Mechanical Affected Zone : TMAZ) และบริเวณกระทบร้อน (Heat Affected Zone : HAZ) บริเวณ SZ เป็นพื้นที่ที่หัวพินของเครื่องมือเชื่อมผ่าน มีทั้งการเปลี่ยนแปลงรูปร่างของเกรนสูง และการรักษาความร้อนบริเวณแนวเชื่อม โดยทั่วไปจะประกอบด้วยเกรนชนิดอีควิแอกซ์ (Equiaxed Grains) ที่ตีมาจากเนื่องจากการตกผลึกใหม่ของเกรนที่เติมรูปแบบที่มีผลมาจากความร้อนจากแรงเสียดทานทำให้มีจำนวนมากและเป็นเกรนละเอียด บริเวณที่อยู่ติดกับ SZ เป็น TMAZ บริเวณที่เกิดการเปลี่ยนแปลงของเกรนจากความร้อนทางกลอย่างรุนแรงถึงแม้ว่าจะไม่ได้รับผลโดยตรงในการกดหรือการหมุนของเครื่องมือเชื่อมที่หัวพิน แต่เครื่องมือเชื่อมที่บ่าเชื่อมก็ส่งผลกระทบต่อโดยตรงเนื่องจากความเครียดเฉือนภายในแนวเชื่อมทำให้บริเวณ TMAZ เกรนจะเกิดการแปรรูปถาวร เช่นเดียวกับบริเวณ SZ แต่ไม่เพียงพอที่จะทำให้เกิดการตกผลึกใหม่ของเกรน นอกเหนือจากบริเวณ TMAZ ที่เป็นบริเวณที่โดนผลกระทบจากความร้อนแล้วยังมีบริเวณอีกบริเวณหนึ่งที่ซึ่งบริเวณนี้จะโดนการกระทำของเครื่องมือเชื่อมที่บ่าเชื่อมส่งผลกระทบจากความร้อนเช่นกัน เรียกว่า บริเวณ HAZ ซึ่งเกิดจากการไหลเวียนของความร้อนบริเวณส่วนปลายของเครื่องมือเชื่อม (Lockwood et al., 2002; Ali et al., 2006;

Booth et al., 2007; Golestaneh et al., 2009; Shusheng et al., 2006) นอกจากนี้รูปร่างของรอยเชื่อมที่เป็นลักษณะวงแหวนครึ่งวงกลมด้านบนของพื้นผิวรอยเชื่อม จะมีระยะห่างระหว่างวงแหวนครึ่งวงกลมอย่างสม่ำเสมอหรือจะเพิ่มขึ้นและลดลงก็ได้ซึ่งขึ้นอยู่กับพารามิเตอร์ของการเชื่อม คือ ความเร็วเดินเชื่อมและความเร็วหมุนเชื่อม ส่งผลให้โครงสร้างเป็นเนื้อเดียวกันภายใต้แนวเชื่อม (Krishnan, 2002) ปัจจัยต่าง ๆ ของการเชื่อมเสียดทานแบบกวน เช่น ความเร็วหมุนเชื่อม (R) ความเร็วเดินเชื่อม (V) แรงกดตามแนวแกนเครื่องมือ รูปทรงเรขาคณิตของหัวพิน การเอียงองศาของเครื่องมือเชื่อม รวมถึงความลึกในกตเครื่องมือเชื่อมลงในเนื้อวัสดุ เป็นต้น ต่างก็ส่งผลกระทบต่อกระบวนการ FSW ท่ามกลางปัจจัยต่าง ๆ เหล่านี้ ความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อม เป็นสองปัจจัยการเชื่อมที่สำคัญที่สุดที่มีอิทธิพลต่อความร้อนจากแรงเสียดทานส่งผลต่อคุณภาพของโครงสร้างทางโลหะวิทยาและสมบัติทางกลของแนวเชื่อม (Kanwer et al., 2010; Zhang et al., 2012)

อะลูมิเนียม AA2024 และ AA6061 ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมการบิน อุตสาหกรรมยานยนต์ และอุตสาหกรรมทางทะเล ในส่วนของเฟรมท่อนและส่วนกล่องเก็บข้อมูล การเชื่อมต่อวัสดุสองชนิดนี้เข้าด้วยกันถือเป็นความท้าทายอย่างหนึ่ง เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกลของวัสดุเดิม (Heidarzadeh et al., 2012; Amancio-Filho et al., 2008; Babu et al., 2011) ในอดีตการเชื่อมแบบหลอมละลายของอะลูมิเนียมที่ไม่เหมือนกันเป็นเรื่องที่ลำบาก และทำได้ยากมาก ดังนั้นกระบวนการ FSW จึงได้รับความนิยมกันอย่างแพร่หลายสำหรับการเชื่อมวัสดุต่างชนิด โดยใช้หลักการสะสมของความร้อนที่ต่ำกว่าอุณหภูมิหลอมละลายของวัสดุเชื่อม โดยมีงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่เกี่ยวกับกระบวนการเชื่อม FSW เช่น พฤติกรรมโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของแผ่นอะลูมิเนียมหล่อขึ้นของแข็งต่างชนิด SSM2024 และ SSM6061 พบว่า โครงสร้างจุลภาคบริเวณพินกวน (Stir Pin Zone; SpZ) ด้านล่างของหัวพินเกิดการประสานกันของวัสดุสองชนิดเป็นรูปแบบลามลาร์ (lamellar) ที่เกิดจากการแผ่ความร้อนโดยการเสียดทานของเครื่องมือเชื่อม (Boonchouytan et al., 2017) การไหลและโครงสร้างจุลภาคที่เกี่ยวข้องกับการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของอะลูมิเนียม 2024 กับอะลูมิเนียม 6061 พบว่า การเปลี่ยนแปลงของเกรนเกิดจากการตกผลึกแบบไดนามิก ซึ่งเป็นกลไกของการเชื่อมเสียดทานแบบกวน ทิศทางการหมุนของเกรนสามารถเห็นได้ชัดจากทิศทางการหมุนของเครื่องมือเชื่อม ซึ่งมีลักษณะที่คล้าย

กับกระแสน้ำวน (Ying et al., 1999) การศึกษาเบื้องต้นเกี่ยวกับโครงสร้างจุลภาคและสมบัติทางกลของการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่วัสดุต่างชนิดในโลหะผสมอะลูมิเนียม 2024-T351 และ 6056-T4 พบว่า การไหลของวัสดุมีรูปแบบบลาล์ว เนื่องจากสมบัติทางกลที่ต่างกันของสองวัสดุเกิดการผสมผสานกันภายในบริเวณ SZ ส่งผลให้ความเครียดของวัสดุมีค่าสูง การแตกหักของการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึงเกิดขึ้นที่บริเวณ TMAZ (Amancio-Filho et al., 2009) การศึกษาเกี่ยวกับการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของการเชื่อมโลหะ AA 2024 และ AA 6061 พบว่า บริเวณ HAZ เกรนไม่มีการแปรรูปถาวร เนื่องจากเป็นบริเวณที่ได้รับผลกระทบน้อย ในขณะที่บริเวณ TMAZ เกิดการแปรรูปถาวรของเกรนอย่างมากในขอบเขตของเกรนระหว่าง บริเวณ TMAZ กับบริเวณ SZ ซึ่งเกิดจากการความร้อนในระหว่างกระบวนการเชื่อม (Sadeesh et al., 2014) แรงบิด อุณหภูมิ และการกระจายความเค้นในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนวัสดุต่างชนิดระหว่าง 6061-T6 และ 2014-T6 พบว่า แรงบิดที่เกิดจากเครื่องมือเชื่อมส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิและการไหลวนของโลหะ กล่าวคือ เมื่อยิ่งเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อมมากขึ้นส่งผลให้มีแรงบิดเพิ่มมากขึ้น เกิดการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิในขณะทำการเชื่อม และเกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างบริเวณ SZ กว้างมากขึ้น (Caroline et al., 2013) จากงานวิจัยดังกล่าวยังไม่มีการกล่าวถึงผลงานเกี่ยวกับการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอะลูมิเนียมหล่อทั้งของแข็งระหว่าง 2024 และ 6061

ดังนั้นงานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางโลหะวิทยา (โครงสร้างมหภาค และจุลภาค) และสมบัติทางกล (ค่าความต้านทานแรงดึง และความเค้น) ของรอยเชื่อมด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวนวัสดุต่างชนิดให้เหมาะสมกับภาคอุตสาหกรรมต่อไป

2. วัสดุ อุปกรณ์ และกระบวนการวิจัย

โลหะอะลูมิเนียมผสมหล่อทั้งของแข็ง (Aluminum Casting Semi Solid Metal; SSM) 2024 กับ 6061 ที่ผ่านการหล่ออัด (Squeeze Casting) โดยมีส่วนผสมทางเคมีของวัสดุทดลอง (ร้อยละโดยน้ำหนัก) แสดงดังตารางที่ 1 และมีค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุทดลอง แสดงดังตารางที่ 2 นำวัสดุไปตัดด้วยเครื่องเลื่อยสายพานแนวนอน ยี่ห้อ Chenlong รุ่น CS - 230 และทำการปรับขนาดชิ้นงานด้วยเครื่องกัดแนวตั้งยี่ห้อ HELLER รุ่น 2S ให้มีขนาดความยาว × ความกว้าง × ความหนา คือ 100 × 50 × 4 มิลลิเมตร โดยมีลักษณะการวางชิ้นงานเพื่อเชื่อมต่อนั้น แสดงดังรูปที่ 1

ตารางที่ 1 ส่วนผสมทางเคมีของวัสดุทดลอง (ร้อยละโดยน้ำหนัก)

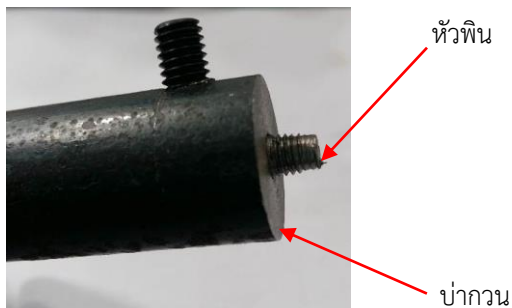
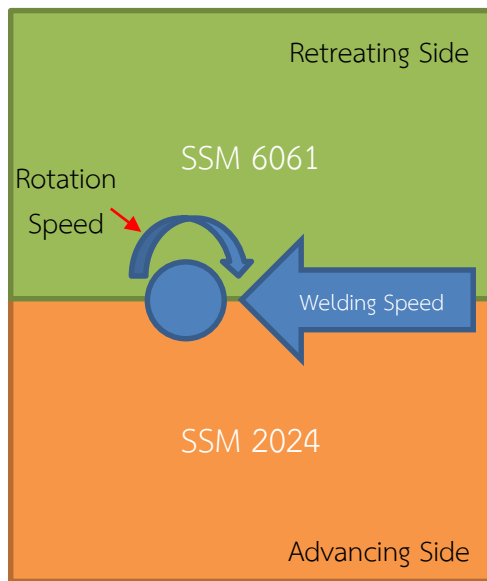
Element	SSM 2024	SSM 6061
Cr	0.1	0.2
Cu	4.4	0.3
Fe	0.5	0.7
Mg	1.5	1.0
Mn	0.6	0.2
Si	0.5	0.6
Ti	0.2	0.2
Zn	0.3	0.3
Al	91.9	96.5

ตารางที่ 2 ค่าความต้านทานแรงดึงของวัสดุทดลอง

Aluminium	SSM 2024	SSM 6061
Tensile Strength (MPa)	260.9	164.0
Yield Strength (MPa)	208.7	131.2
Elongation (%)	9.5	3.9

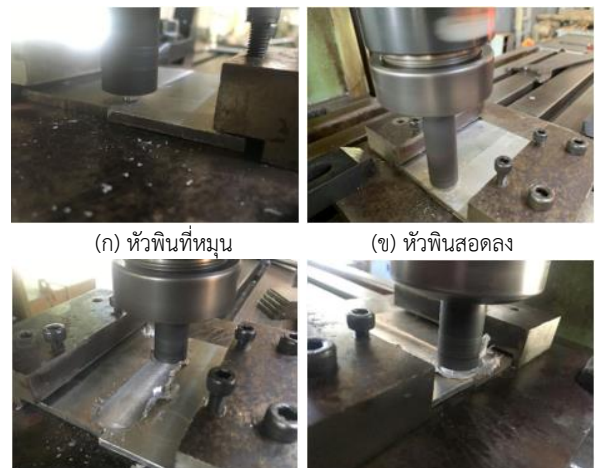
เครื่องมือเชื่อมผลิตจากวัสดุเหล็กกล้าเครื่องมือ เกรด SKD 11 มีลักษณะหัวพินเป็นเกลียวสามเหลี่ยมหมุนขวา มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของหัวพิน (Pin) 5 มิลลิเมตร ความยาว 3.2 มิลลิเมตร และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของบ่ากวน (Shoulder) 20 มิลลิเมตร แสดงดังรูปที่ 2

การประยุกต์นำเครื่องกัดแนวตั้งมาเป็นเครื่องเชื่อมเสียดทานแบบกวน ซึ่งจะต้องปรับให้เครื่องมือเชื่อมเอียงทำมุม 3 องศา กับผิวหน้าชิ้นทดลอง การปรับเปลี่ยนปัจจัยที่ใช้ในการทดลอง คือ ความเร็วหมุนเชื่อม (Rotation Speed) มี 3 ระดับ คือ 710 1000 และ 1400 รอบต่อนาที (rpm) และความเร็วเดินเชื่อม (Welding Speed) มี 3 ระดับ คือ 40 80 และ 112 มิลลิเมตรต่อนาที (mm/min) การจับยึดชิ้นงาน และการจับยึดเครื่องมือของการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding : FSW) จะทำการจับยึดชิ้นงาน 2 ชิ้นติดกันกับแท่นรองชิ้นงานหรือฟิกเจอร์ โดยจับยึดฟิกเจอร์ติดกับโต๊ะงานของเครื่องกัดแนวตั้งด้วยแคลมป์ขั้นบันได (Step Clamp) การทดลองกำหนดให้เครื่องมือเชื่อมหมุนอยู่กับที่และชิ้นทดลองเคลื่อนที่ และกำหนดให้ อะลูมิเนียมผสมหล่อทั้งของแข็ง 6061 อยู่ด้านตรงข้ามกับทิศทางการหมุนของเครื่องมือเชื่อม (Retreating Side : RS) และอะลูมิเนียมผสมหล่อทั้งของแข็ง 2024 อยู่ด้านเดียวกันกับทิศทางการหมุนของเครื่องมือเชื่อม (Advancing Side : AS)

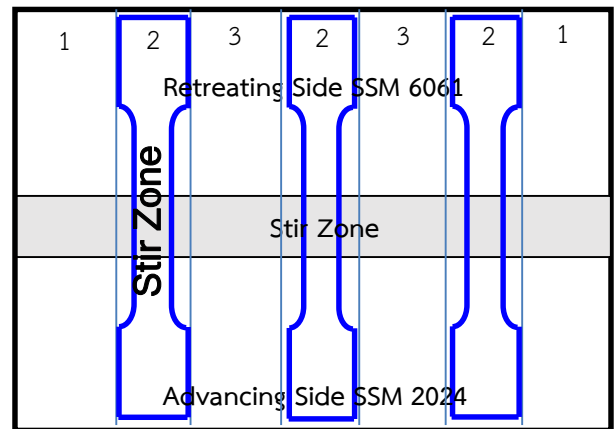


รูปที่ 2 ลักษณะเครื่องมือเชื่อมของงานวิจัยครั้งนี้

การเชื่อมในทุก ๆ การทดลองในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน แสดงดังรูปที่ 3 ประกอบด้วยขั้นตอน (ก) เปิดเครื่องกัดให้หัวพินที่หมุนตามเข็มนาฬิกาตามความเร็วรอบที่กำหนดไว้ในปัจจัยเชื่อม (ข) จากนั้นสอดหัวพินลงไปใ้เนื้อวัสดุ จนกระทั่งปลายของหัวพินถูกสอดลงไปและปากกวนสัมผัสกับชิ้นงานเชื่อม ในระยะความลึก 1 มิลลิเมตร จากนั้นกำหนดให้เครื่องมือเชื่อมหมุนวน ณ ตำแหน่งนี้เป็นระยะเวลา 30 วินาที เพื่อให้เกิดการสะสมความร้อนในแนวเชื่อมทำให้วัสดุเกิดการอ่อนตัวและเกิดการเคลื่อนที่ไหลวนรอบ ๆ หัวพิน (ค) เดินเชื่อมด้วยความเร็วเดินเชื่อมที่กำหนดไว้ในปัจจัยเชื่อม ในขั้นตอนนี้จะเกิดการรวมตัวของวัสดุทั้ง 3 ชนิด (ง) เมื่อสิ้นสุดขอบของชิ้นงานเชื่อมให้หยุดการเดินเชื่อมที่กำหนดไว้ จากนั้นก่อนการยกเครื่องมือเชื่อมออกจากรอยเชื่อม ให้หมุนเครื่องมือเชื่อมวน ณ ตำแหน่งนี้เป็นระยะเวลา 30 วินาที เพื่อให้การเสียดทานที่เกิดจากเครื่องมือเชื่อมกับวัสดุทดลองคงที่ เมื่อครบเวลาที่กำหนดจึงยกเครื่องมือเชื่อมออกจากแนวเชื่อม เป็นอันเสร็จขั้นตอนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนต่อหนึ่งปัจจัยเชื่อม

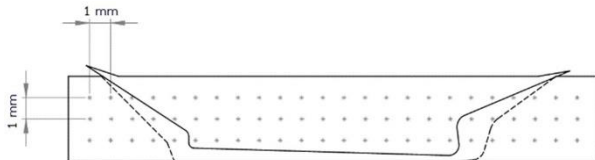


รูปที่ 3 ขั้นตอนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน



การเตรียมชิ้นงานสำหรับตรวจสอบโครงสร้าง จากชิ้นงานเชื่อมเสร็จแล้วนำมาตัดตามแนวขวางกับรอยเชื่อม แสดงดังรูปที่ 4 โดยชิ้นงานส่วนที่ (1) เป็นส่วนเริ่มต้นและสิ้นสุดแนวเชื่อมจะเป็นส่วนที่ตัดทิ้งไป ชิ้นงานส่วนที่ (2) ส่วนนี้จะทำการตัดเพื่อนำไปทำการทดสอบค่าความต้านทานแรงดึง และชิ้นงานส่วนที่ (3) นำไปตรวจสอบสมบัติทางโลหะวิทยาเพื่อดูโครงสร้างมหภาค โครงสร้างจุลภาค และทดสอบความแข็ง การเตรียมชิ้นทดสอบเพื่อตรวจสอบโครงสร้างมหภาค โครงสร้างจุลภาค และทดสอบความแข็ง นำชิ้นทดสอบที่ตัดเสร็จแล้วมาดำเนินการหล่อด้วยน้ำยา Epoxy Resin ชัดด้วยกระดาษทรายน้ำเบอร์ 80 320 400 600 800 1000 และ 1500 ตามลำดับทรายพร้อมเปิดน้ำไหลผ่าน เมื่อขัดด้วยกระดาษทรายจนผิวหน้าของชิ้นทดสอบเรียบแล้ว ก็ขัดด้วยสีกหลาดโดยใช้ผงอลูมินาขนาด 0.5 3.0 และ 0.1 ไมโครเมตร ตามลำดับ เสร็จแล้วนำไปกัด้วยกรดคิลเลอร์เป็นเวลา 10 วินาที แล้วนำไปตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาระดับมหภาคและจุลภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง

การทดสอบความแข็ง ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ รุ่น Zwick / Roell ZHU กดบริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยเชื่อม ระยะห่างของรอยกดแต่ละจุด 1 มิลลิเมตร แรงกดที่ใช้ 100 กรัม และเวลาในการกด 10 วินาที ตำแหน่งของการทดสอบแสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ตำแหน่งการกดทดสอบความแข็ง

การเตรียมชิ้นทดสอบค่าความต้านทานแรงดึง โดยดำเนินการขึ้นรูปด้วยเครื่องกดแนวตั้ง ให้ได้ขนาดตามมาตรฐาน ASTM E8M นำชิ้นงานทดสอบที่ขึ้นรูปแล้วเสร็จไปทดสอบค่าความต้านทานแรงดึง ด้วยเครื่องทดสอบแบบประกอบประสงค์ที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้ความเร็วในการดึง 1 มิลลิเมตรต่อนาที

3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผล

3.1 โครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อม

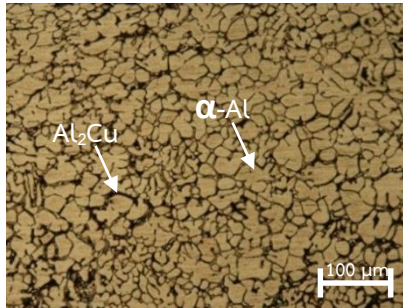
ลักษณะผิวด้านบนของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวนวัสดุต่างชนิดระหว่างอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็ง 2024 กับ 6061 แสดงดังรูปที่ 6 วิเคราะห์ผลการตรวจสอบลักษณะผิวด้านบนของรอยเชื่อม พบว่า บริเวณผิวหน้ารอยเชื่อมเกิดการผสมกันที่ดีของรอยเชื่อมต่อชนและบริเวณด้านล่างของรอยเชื่อมมีการซึมลึกที่ดี ไม่พบรอยแยกที่ไม่ประสานกันของรอยเชื่อม แต่จะเกิดรูบริเวณจุดสิ้นสุดของรอยเชื่อมอันเนื่องมาจากปลายหัวพิน แต่อย่างไรก็ตามลักษณะผิวหน้าด้านบนของรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1400 รอบต่อนาที จะเกิดผิวขรุขระที่หยาบมากกว่าความเร็วหมุนเชื่อม 710 รอบต่อนาที แต่ลักษณะของผิวหน้าของรอยเชื่อมที่ขรุขระไม่เรียบคล้ายกับเกล็ดปลานั้นจะเกิดขึ้นที่ความเร็วเดินเชื่อม 160 มิลลิเมตรต่อนาที เท่านั้น เนื่องจากมาจากความเร็วหมุนเชื่อมสูงในขณะที่ความเร็วเดินเชื่อมสูง ทำให้อุณหภูมิที่สะสมในแนวเชื่อมมีไม่เพียงพอจึงทำให้เกิดชั้นสะสมของโลหะ ส่งผลทำให้ผิวหน้ารอยเชื่อมมีความขรุขระ

Rotation Speed (rpm)	Welding Speed (mm/min)	Surfaces of Welded
710	40	RS : SSM 6061
	80	AS : SSM 6061 AS : SSM 2024
	112	RS : SSM 6061 AS : SSM 2024
1000	40	RS : SSM 6061 AS : SSM 2024
	80	RS : SSM 6061 AS : SSM 2024
	112	RS : SSM 6061 AS : SSM 2024
1400	40	RS : SSM 6061 AS : SSM 2024
	80	RS : SSM 6061 AS : SSM 2024
	112	RS : SSM 6061 AS : SSM 2024

รูปที่ 6 ลักษณะผิวหน้าด้านบนของรอยเชื่อม

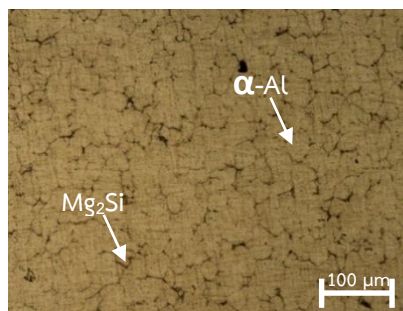
3.2 โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อโลหะเดิม

โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อโลหะเดิม อะลูมิเนียมผสมหล่อ กิ่งของแข็ง 2024 บริเวณเนื้อโลหะเดิมเกรนของเฟส α -Al เป็นลักษณะก้อนกลมต่อเนื่องกันมีเฟส Al_2Cu จับกลุ่มรอบเฟส α -Al แสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 โครงสร้างจุลภาคอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง 2024

โครงสร้างจุลภาคบริเวณเนื้อโลหะเดิม อะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็ง 6061 บริเวณเนื้อโลหะเดิมเกรนของเฟส α -Al เป็นลักษณะโครงสร้างก้อนกลมที่ล้อมรอบด้วยเฟสยูเทคติก แมกนีเซียมซิลิไซด์ (Mg_2Si) แสดงดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 โครงสร้างจุลภาคอะลูมิเนียมหล่อกิ่งของแข็ง 6061

3.3 โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของรอยเชื่อม

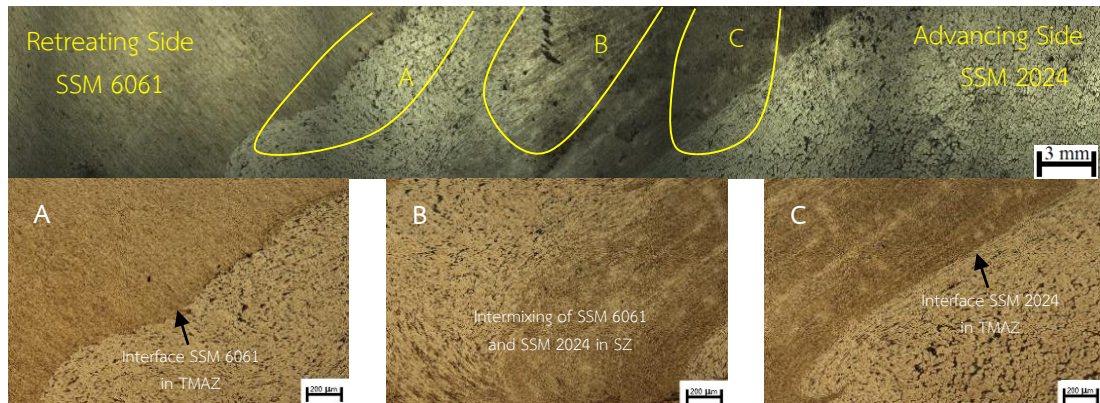
โครงสร้างมหภาคและจุลภาคของการเชื่อมเสียดทานแบบ กวนวัสดุต่างชนิดระหว่างอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็ง 2024 กับ 6061 ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 1000 และ 1400 รอบต่อนาที แสดงดังรูปที่ 9-11 โครงสร้างมหภาค พบว่า บริเวณรอยเชื่อมที่ประกอบไปด้วย บริเวณ SZ บริเวณ TMAZ บริเวณ HAZ และบริเวณ BM ไม่มีข้อบกพร่องใด ๆ เกิดขึ้นกับรอยเชื่อม และรอยเชื่อมมีลักษณะที่ประสานกันเป็นอย่างดีของวัสดุทั้งสองชั้น การประสานกันของวัสดุทั้งสองชั้นเกิดจากความร้อนที่สะสมในรอยเชื่อมซึ่งเป็นอิทธิพลมาจากกลไกการเชื่อม ประกอบด้วย ความเร็วหมุนเชื่อม ความเร็วเดินเชื่อม วัสดุ

ทดลอง เครื่องมือเชื่อม การเอียงองศาการเชื่อม ซึ่งทั้งหมดนี้ล้วนแต่เป็นปัจจัยการเชื่อมที่ช่วยเสริมซึ่งกันและกันทำให้เกิดการประสานกันด้วยดี ข้อสังเกตจากการทดลอง พบว่า เกิดการผสมผสานกันระหว่างวัสดุทั้งสองด้วยการไหลวนรอบ ๆ หัวพิน ทำให้มีลักษณะภาพร่างคล้ายกับชั้นของหัวพินที่มีภาพแบบชัดเจนเป็นชั้น ๆ ตามทิศทางการกวนของหัวพิน อีกทั้งพบว่า รอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อมจะมีลักษณะรอยเชื่อมที่กว้าง อันเนื่องมาจากความร้อนที่มากในรอยเชื่อมทำให้อะลูมิเนียมเกิดการอ่อนตัวจนเกิดการไหลวนของเนื้ออะลูมิเนียมรอบหัวพินได้อย่างดีทำให้เกิดรอยเชื่อมที่กว้าง (Zhang et al., 2012) ที่ความเร็วในการหมุนหัวพิน 1000 รอบต่อนาที จะเห็นการรวมตัวกันของเนื้ออะลูมิเนียมทั้งสองชั้นได้ดีที่สุด (Kanwer et al., 2010)

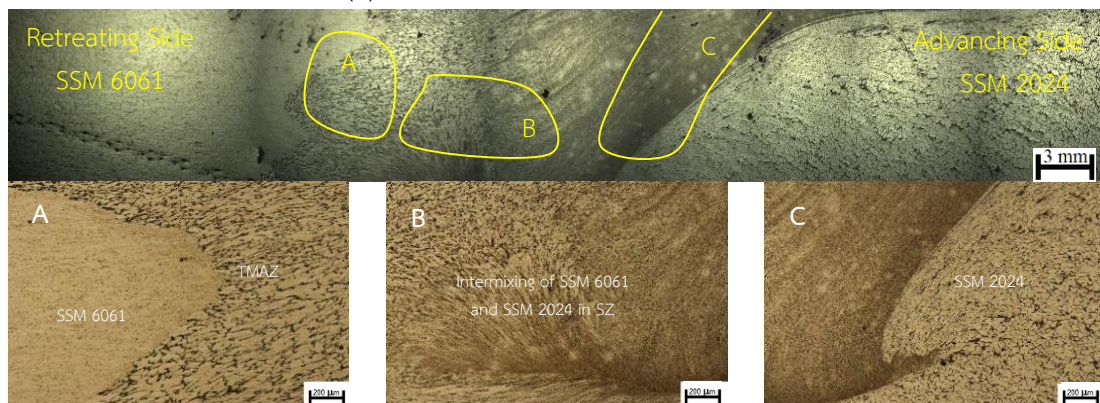
โครงสร้างจุลภาค พบว่า มีความแตกต่างกันอย่างชัดเจนมากกว่าโครงสร้างมหภาค โดยเฉพาะบริเวณ TMAZ กับบริเวณ BM อันเนื่องมาจากอิทธิพลของเครื่องมือเชื่อมที่บริเวณ บ่ากวนที่ตกลงไปในเนื้อวัสดุ ความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานระหว่างวัสดุทดลองกับเครื่องมือเชื่อมที่บริเวณที่บ่ากวนแผ่อิทธิพลของผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อนทางกลอย่างเห็นได้ชัด ส่งผลทำให้เกิดการแปรรูปถาวรของเกรนจากเกรนที่ลักษณะก้อนกลมเดิม ทำให้เกรนในบริเวณ TMAZ มีลักษณะที่ละเอียดเพิ่มมากขึ้นซึ่งย่อมส่งผลต่อสมบัติทางกลค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นมากกว่าเนื้อโลหะเดิมตามขึ้นไปด้วย (Hasan et al., 2019) ข้อสังเกตจากโครงสร้างจุลภาค พบว่า การแปรรูปถาวรของเกรนบริเวณ SZ กับบริเวณ TMAZ มีความแตกต่างกันมาก กล่าวคือ เกรนบริเวณ SZ เกิดจากการเสียดทานแบบกวนของเครื่องมือเชื่อมที่หัวพินโดยตรง ทำให้เกิดความร้อนสะสมมุ่งเข้าสู่จุดกึ่งกลางรอยเชื่อม โดยมีบริเวณบ่ากวนของเครื่องมือเชื่อมเป็นตัวสะสมความร้อนในรอยเชื่อม จากปรากฏการณ์ดังกล่าวทำให้เกรนในบริเวณนี้มีขนาดละเอียดเพิ่มมากขึ้นกว่าบริเวณ TMAZ ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงมีค่ามากที่สุดเมื่อเทียบกับในแต่ละบริเวณของการเชื่อม นอกจากนี้จากรูปที่ 9-11 ก็ยังพบว่า เกรนบริเวณ SZ มีการผสมผสานกันของวัสดุทั้งสองซึ่งปรากฏเป็นชั้นของวัสดุอย่างชัดเจน โดยมีผลมาจากการวางแผนเชื่อมของชิ้นงานในลักษณะต่อชน พร้อมกันนั้นการหมุนกดลงของเครื่องมือเชื่อมที่ตำแหน่งวัสดุทั้งสอง ย่อมส่งผลให้เกิดการผสมผสานของเนื้อวัสดุทั้งสองเข้าด้วยกันเป็นอย่างดี ข้อสังเกตอีกประการ เมื่อเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อมมากขึ้นทำให้เกิดการประสานของเกรนทั้งสองรุนแรงมากขึ้น กล่าวคือ เห็นการแปรรูปถาวรของเกรนทั้งสองที่ผสมผสานกันอย่างชัดเจนมากขึ้น ลักษณะการซ้อนทับกันของเกรนทั้งสองมีมากขึ้น และ

นอกจากนั้นยังเห็นได้ชัดว่าความกว้างของเกรนบริเวณ SZ มีความกว้างมากขึ้น ที่เป็นลักษณะนั้นอันเนื่องมาจากอิทธิพลของความร้อนสะสมที่สูงขึ้นด้วยการอาศัยพลังงานของเครื่องมือเชื่อมจากการเพิ่มขึ้นของความเร็วหมุนเชื่อม ส่งผล

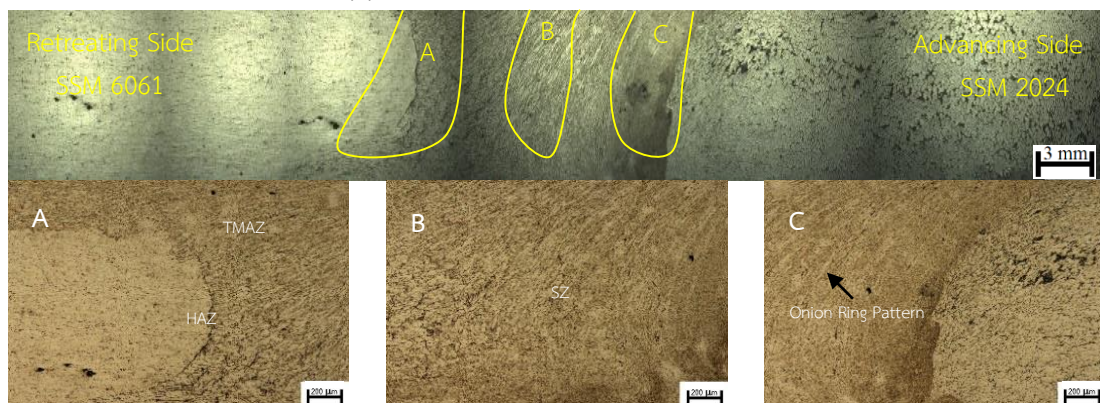
ก่อให้เกิดความร้อนที่เพิ่มมากขึ้นในรอยเชื่อมแผ่ความร้อนไปยังเกรนทำให้เกิดการแปรรูปถาวรอย่างต่อเนื่อง ส่งผลทำให้บริเวณ SZ มีความกว้างเพิ่มมากขึ้นตามไปด้วย



(ก) ความเร็วเดินเชื่อม 40 มิลลิเมตรต่อนาที



(ข) ความเร็วเดินเชื่อม 80 มิลลิเมตรต่อนาที



(ค) ความเร็วเดินเชื่อม 112 มิลลิเมตรต่อนาที

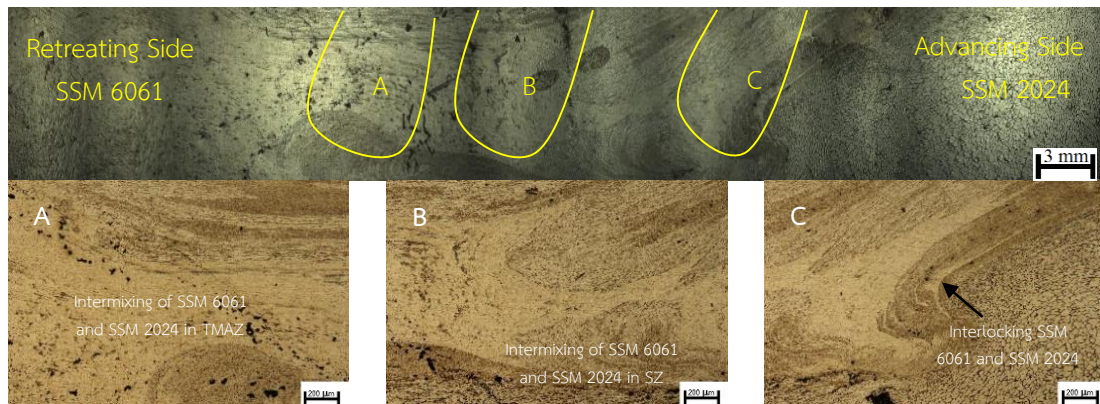
รูปที่ 9 ลักษณะโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 รอบต่อนาที

เมื่อพิจารณาปัจจัยเชื่อมด้านความเร็วเดินเชื่อม 40 80 และ 112 มิลลิเมตรต่อนาที ได้นำเสนอโครงสร้างพื้นที่บริเวณ A B

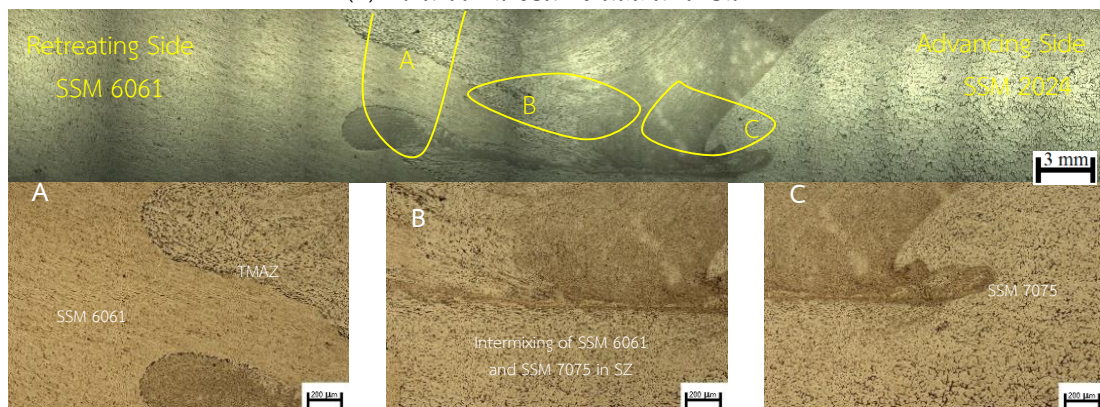
และ C จากรูปที่ 9 บริเวณพื้นที่ A และ B จะเป็นลักษณะของผิวรอยต่อของสองบริเวณ (Interface) คือ บริเวณ TMAZ กับ

บริเวณ BM และในรูปที่ 9(ค) ที่ความเร็วเดินเชื่อม 112 มิลลิเมตรต่อนาที สามารถเห็นการสลับเป็นชั้น ๆ ของเนื้อเกรน

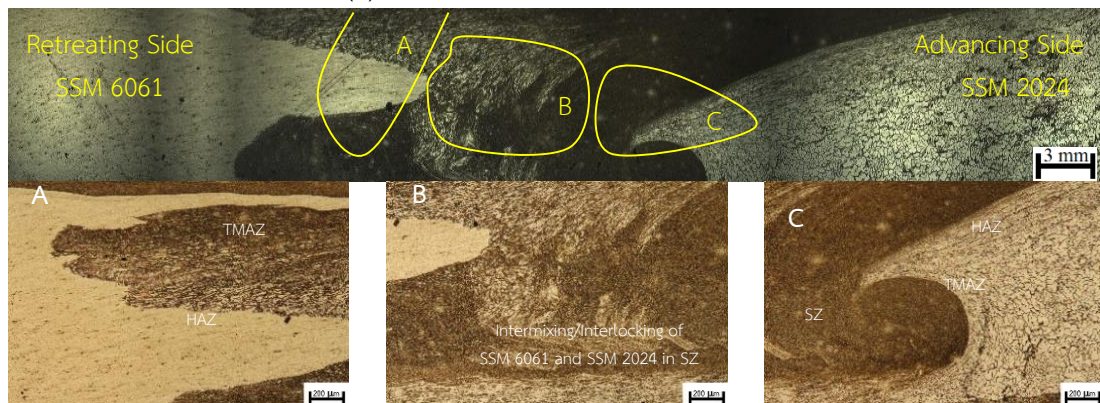
วัสดุทั้งสองได้อย่างชัดเจนซึ่งมีลักษณะคล้ายกับชั้นของหัวหอม (Onion Ring Pattern) (Chen & Cui, 2008)



(ก) ความเร็วเดินเชื่อม 40 มิลลิเมตรต่อนาที



(ข) ความเร็วเดินเชื่อม 80 มิลลิเมตรต่อนาที



(ค) ความเร็วเดินเชื่อม 112 มิลลิเมตรต่อนาที

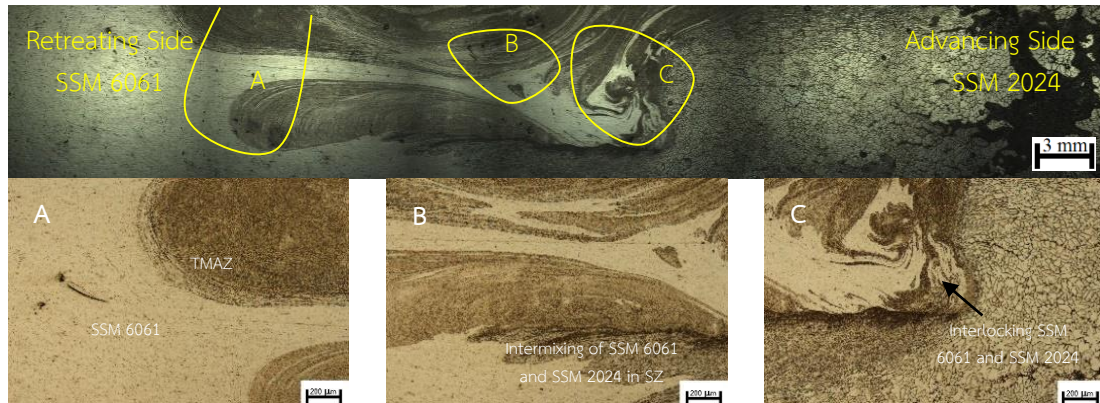
รูปที่ 10 ลักษณะโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1000 รอบต่อนาที

ข้อสังเกตของรูปที่ 10 โครงสร้างพื้นที่บริเวณ A B และ C จากรูปที่ 10 อย่างที่เคยก่่าวถึงถึงความกว้างของบริเวณ SZ มากขึ้นเมื่อเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อมมากขึ้นบริเวณพื้นที่ A และ B จะเห็นได้ชัดขึ้น กล่าวคือ การขยายของบริเวณ SZ มีความกว้างมากขึ้นแผ่อิทธิพลไปยังบริเวณ TMAZ มากกว่าเดิม นอกจากนี้ที่

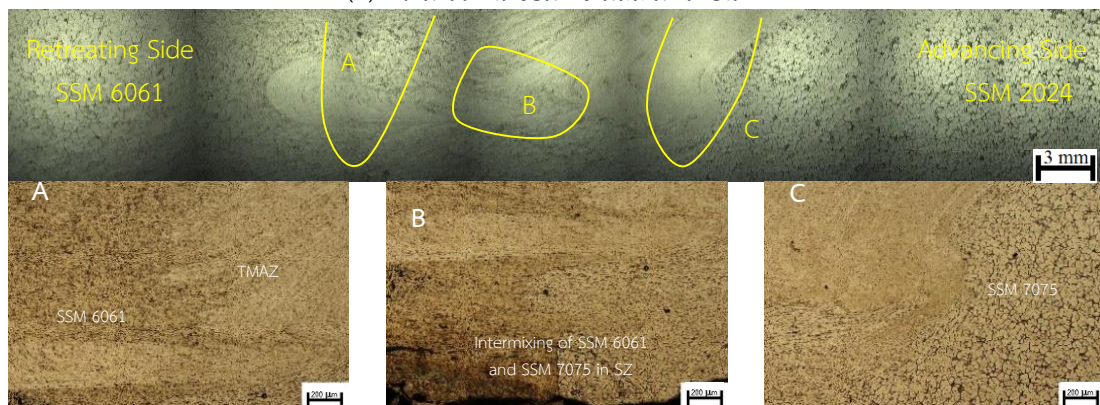
บริเวณพื้นที่ B ของทั้งรูปที่ 10(ก) – 10(ค) จะเห็นการผสมผสานของเนื้อโลหะอะลูมิเนียมทั้งสอง (Intermixing) เมื่อเทียบกับความเร็วหมุนเชื่อม 710 รอบต่อนาที มากขึ้นอีกด้วย และเป็นข้อสังเกตบริเวณพื้นที่ C เป็นลักษณะของผิวรอยต่อการเชื่อมต่อที่มีรูปทรงตะขอ (Interlocking) เป็นลักษณะที่เกรนเกิดการหมุนวน

ด้วยแรงบิดของเครื่องมือเชื่อมและเกิดการระบายความร้อนออกจากรอยเชื่อมอย่างรวดเร็ว ส่งผลทำให้เกิดการแปรรูปถาวร ซึ่งผลจากปรากฏการณ์ดังกล่าวทำให้สมบัติทางกลด้านค่าความต้านทานแรงดึงเพิ่มมากขึ้น สอดคล้องกันกับผลการวิจัย (Shen et al., 2005; Gonçalo et al., 2017) ที่พบว่าเกิด

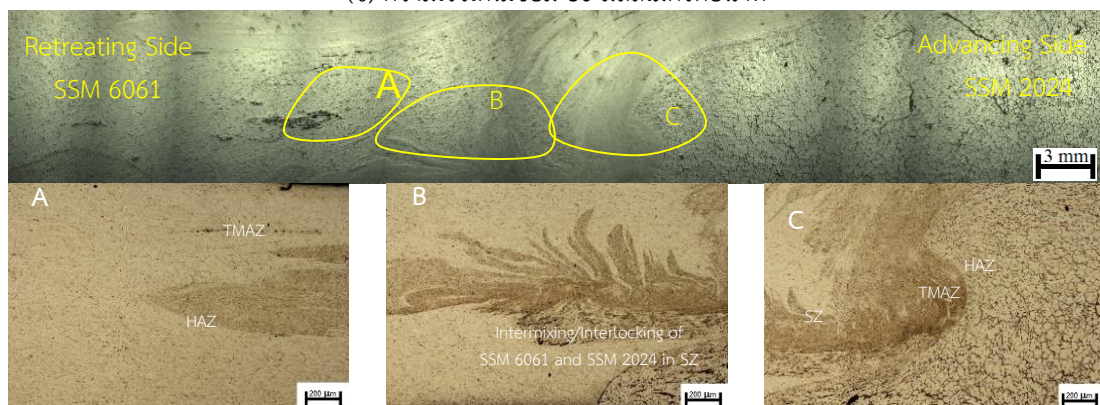
Interlocking สามารถเพิ่มค่าความต้านทานแรงดึงมากขึ้นไปด้วย เช่นเดียวกับกับงานวิจัยครั้งนี้ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1000 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 112 มิลลิเมตรต่อนาที มีค่าความต้านทานแรงดึงมากที่สุดซึ่งมากที่สุดในการทดลองครั้งนี้ คือ 190.4 MPa



(ก) ความเร็วเดินเชื่อม 40 มิลลิเมตรต่อนาที



(ข) ความเร็วเดินเชื่อม 80 มิลลิเมตรต่อนาที



(ค) ความเร็วเดินเชื่อม 112 มิลลิเมตรต่อนาที

รูปที่ 11 ลักษณะโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1400 รอบต่อนาที

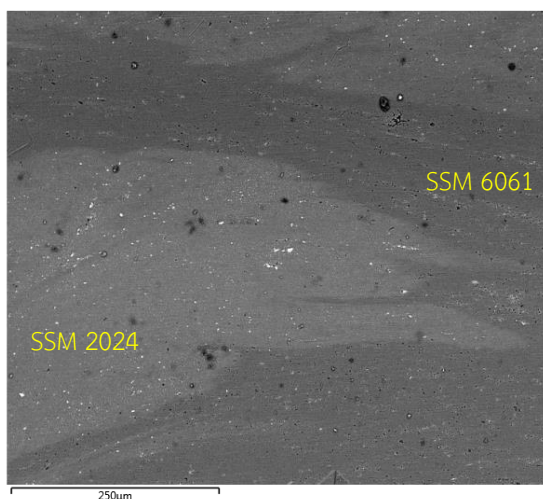
ส่วนข้อสังเกตของรูปที่ 11 โครงสร้างพื้นที่บริเวณ A B และ C จากรูปที่ 11 มีการขยายของบริเวณ SZ มีความกว้าง

มากที่สุด จะเห็นการผสมผสานของเนื้อโลหะอะลูมิเนียมทั้งสอง (Intermixing) ส่วนลักษณะของผิวรอยต่อการเชื่อมต่อนี้มี

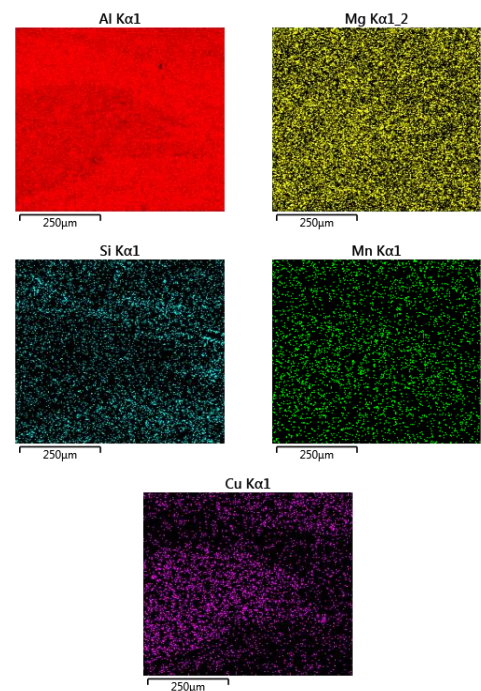
รูปทรงตะขอ (Interlocking) ในสภาวะความเร็วหมุนเชื่อมนี้จะไม่ค่อยเกิดขึ้นมากนัก อันเนื่องมาจากสาเหตุความเร็วหมุนเชื่อมที่เร็วเกินไป ทำให้ไม่เกิดความร้อนสะสมในรอยเชื่อมมากนัก ประกอบกับการระบายออกจากแนวเชื่อมที่ช้า ส่งผลให้เกรนเกิดการแปรรูปแบบไม่ถาวร ซึ่งผลจากปรากฏการณ์ดังกล่าวทำให้สมบัติทางกลด้านค่าความต้านทานแรงดึงที่ต่ำที่สุดซึ่งน้อยที่สุดในการทดลองครั้งนี้ คือ 127.2 MPa ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1000 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 80 มิลลิเมตรต่อนาที

3.4 โครงสร้างจุลภาค Scanning Electron Microscope (SEM) ของรอยเชื่อม

โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมภาพถ่าย Scanning Electron Microscope (SEM) ของรอยเชื่อม ที่ความเร็วหมุนเชื่อมที่ 1,000 รอบต่อนาที และความเร็วเดินเชื่อม 112 มิลลิเมตรต่อนาที แสดงดังรูปที่ 12 พบว่าในบริเวณ SZ มีการประสานกันของวัสดุทั้งสองอย่างชัดเจนอันเนื่องมาจากอิทธิพลของปัจจัยการเชื่อมเสียดทาน และการวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเครื่องวิเคราะห์ (Energy Dispersive X-ray Spectrometer : EDX) แบบ Mapping ของรอยเชื่อม แสดงดังรูปที่ 13 มีความสัมพันธ์กันของส่วนผสมทางเคมีของวัสดุทดลอง จะเห็นการกระจายตัวของธาตุซิลิกอน (Si) ในเนื้ออะลูมิเนียม SSM 6061 เห็นการกระจายตัวของธาตุทองแดง (Cu) ในเนื้ออะลูมิเนียม SSM 2024



รูปที่ 12 โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมภาพถ่าย Scanning Electron Microscope (SEM) ของรอยเชื่อม ที่ความเร็วหมุนเชื่อมที่ 1,000 รอบต่อนาที และความเร็วเดินเชื่อม 112 มิลลิเมตรต่อนาที



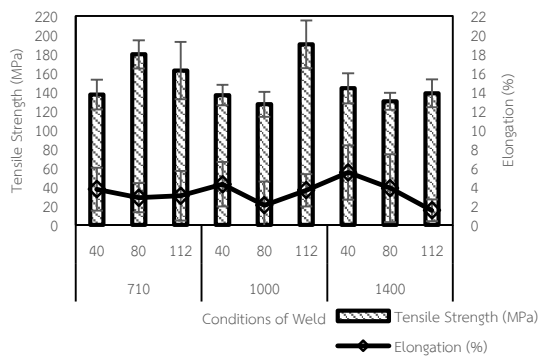
รูปที่ 13 การวิเคราะห์โครงสร้างด้วยเครื่องวิเคราะห์ EDX แบบ Mapping ของรอยเชื่อม

3.5 ค่าความต้านทานแรงดึงของรอยเชื่อม

ค่าความต้านทานแรงดึงของรอยเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อทิ้งของแข็ง 2024 กับ 6061 เป็นค่าเฉลี่ยของทั้งหมด 3 ชิ้น 12 ตัวอย่าง แสดงดังตารางที่ 3 และแสดงดังรูปที่ 14 แสดงค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของแต่ละปัจจัยการเชื่อม

ตารางที่ 3 ค่าความต้านทานแรงดึงของรอยเชื่อม

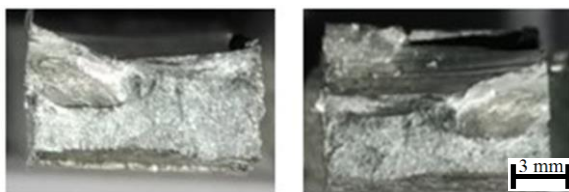
Rotation Speed (rpm)	Welding Speed (mm/min)	Tensile Strength (MPa)	Yield Strength (MPa)	Elongation (%)
710	40	137.4	114.3	3.8
	80	179.7	147.7	2.9
	112	162.6	129.7	3.1
1000	40	136.9	108.4	4.3
	80	127.2	107.7	2.1
	112	190.4	156.7	3.7
1400	40	144.1	119.7	5.5
	80	130.2	109.7	3.9
	112	138.7	94.1	1.5
Base SSM 2024		260.9	208.7	9.5
Base SSM 6061		164.0	131.2	3.9



รูปที่ 14 เปรียบเทียบค่าความต้านทานแรงดึงของรอยเชื่อม

วิเคราะห์ค่าความต้านทานแรงดึงของรอยเชื่อม กราฟค่าความต้านทานแรงดึงสูงสุดของแต่ละสภาวะการเชื่อม เมื่อเปรียบเทียบการทดลอง แสดงดังรูปที่ 14 พบว่า ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1000 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 112 มิลลิเมตรต่อนาที มีค่าความต้านทานแรงดึงมากที่สุดซึ่งมากที่สุดในการทดลองครั้งนี้ คือ 190.4 MPa เนื่องจากชิ้นงานนำมาเชื่อมด้วยตัวแปรที่เหมาะสม การหมุนวนของหัวพิน และการเดินกวนของแนวเชื่อมผสมเข้ากันได้ดี (Kanwer et al., 2010) ค่าความต้านทานแรงดึงต่ำที่สุดซึ่งน้อยที่สุดในการทดลองครั้งนี้ คือ 127.2 MPa ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1000 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 80 มิลลิเมตรต่อนาที เนื่องจากจะทำให้เกิดความร้อนต่ำจากการหมุนของหัวพิน และการหมุนวนของเนื้ออะลูมิเนียมเคลื่อนตัวเข้ากันได้ไม่ดี ส่งผลให้ค่าความต้านทานแรงดึงต่ำที่สุด

นอกจากนี้ลักษณะรอยขาดของรอยเชื่อมในการทดสอบความต้านทานแรงดึง แสดงดังรูปที่ 15 ซึ่งได้ผลที่ได้จากการตรวจสอบในระดับโครงสร้างมหภาค พบว่า พื้นผิวแตกหักแสดงให้เห็นว่ามีรอยบวมและกระจายอย่างสม่ำเสมอทั่วทั้งพื้นผิวพร้อมกับบางส่วน และรอยขาดของรอยเชื่อมในการทดสอบความต้านทานแรงดึงส่วนใหญ่จะขาดที่บริเวณ SZ



รูปที่ 15 ลักษณะรอยขาดของแนวเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1000 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 112 มิลลิเมตรต่อนาที

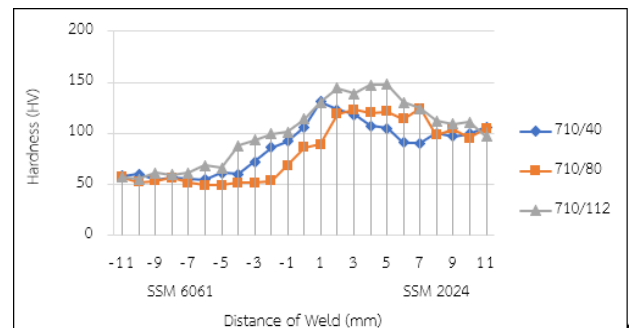
3.6 ค่าความแข็งของรอยเชื่อม

ค่าความแข็งรอยเชื่อมอะลูมิเนียมผสมหล่อกิ่งของแข็ง 2024 กับ 6061 เป็นค่าเฉลี่ยของทั้งหมดมีรายละเอียดดังนี้

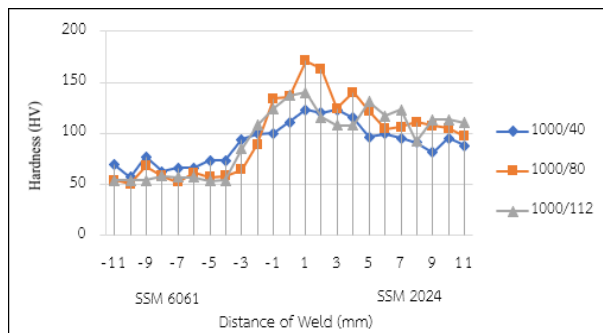
ค่าความแข็งของรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 40 80 และ 112 มิลลิเมตรต่อนาที แสดงดังรูปที่ 16 พบว่า ความแข็งของชิ้นทดสอบที่ความเร็วเดินเชื่อมที่ 112 มิลลิเมตรต่อนาที มีค่าความแข็งสูงสุดในบริเวณที่ถูกกวน (Stir Zone : SZ) ซึ่งมีความแข็งเท่ากับ 114 HV รองลงมาคือ ชิ้นทดสอบที่เชื่อมด้วยความเร็วเดินเชื่อมที่ 40 มิลลิเมตรต่อนาที มีความแข็งเท่ากับ 106 HV และชิ้นทดสอบที่เชื่อมด้วยความเร็วเดินแนวเชื่อมที่ 80 มิลลิเมตรต่อนาที มีความแข็งน้อยสุดเท่ากับ 86 HV

ค่าความแข็งของรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,000 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 40 80 และ 112 มิลลิเมตรต่อนาที แสดงดังรูปที่ 17 พบว่า ความแข็งของชิ้นทดสอบที่ความเร็วเดินเชื่อม 112 มิลลิเมตรต่อนาที มีค่าความแข็งสูงสุดในบริเวณที่ถูกกวน (Stir Zone : SZ) ซึ่งมีความแข็งเท่ากับ 137 HV รองลงมาคือ ชิ้นทดสอบที่เชื่อมด้วยความเร็วเดินเชื่อม 80 มิลลิเมตรต่อนาที มีความแข็งเท่ากับ 136 HV และชิ้นทดสอบที่เชื่อมด้วยความเร็วเดินเชื่อม 40 มิลลิเมตรต่อนาที มีความแข็งน้อยสุดเท่ากับ 111 HV

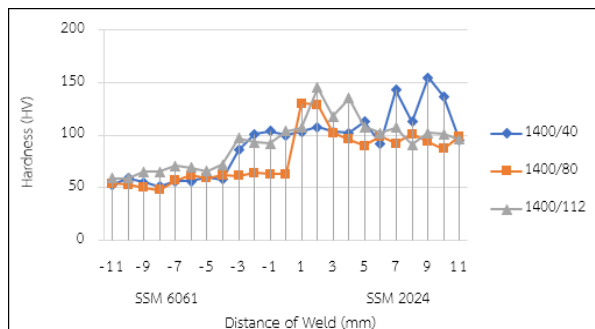
ค่าความแข็งของรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,400 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 40 80 และ 112 มิลลิเมตรต่อนาที แสดงดังรูปที่ 18 พบว่า ความแข็งของชิ้นทดสอบที่ความเร็วเดินเชื่อมที่ 112 มิลลิเมตรต่อนาที มีค่าความแข็งสูงสุดในบริเวณที่ถูกกวน (Stir Zone : SZ) ซึ่งมีความแข็งเท่ากับ 112 HV รองลงมาคือ ชิ้นทดสอบที่เชื่อมด้วยความเร็วเดินเชื่อม 40 มิลลิเมตรต่อนาที มีความแข็งเท่ากับ 100 HV และชิ้นทดสอบที่เชื่อมด้วยความเร็วเดินเชื่อม 80 มิลลิเมตรต่อนาที มีความแข็งน้อยสุดเท่ากับ 63 HV



รูปที่ 16 ค่าความแข็งรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 รอบต่อนาที



รูปที่ 17 ค่าความแข็งรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,000 รอบต่อนาที



รูปที่ 18 ค่าความแข็งรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,400 รอบต่อนาที

รูปแบบของค่าความแข็งสำหรับรอยเชื่อม คือ มีจุดเริ่มต้นจากค่าความแข็งของเนื้อโลหะเดิมในวัสดุอะลูมิเนียมหล่อทั้งของแข็ง 6061 จากนั้นเริ่มเพิ่มมากขึ้นเมื่อเข้าสู่บริเวณ TMAZ และมีค่าความแข็งสูงสุดในบริเวณ SZ และเริ่มลดลงเมื่อเข้าสู่บริเวณ TMAZ ของเนื้อโลหะเดิมในวัสดุอะลูมิเนียมหล่อทั้งของแข็ง 2024 และลดลงเมื่อเข้าสู่ค่าความแข็งของเนื้อโลหะเดิมวัสดุอะลูมิเนียมหล่อทั้งของแข็ง 2024 ในกรณีเดียวกันนี้มีผลคล้ายกันกับ (Caroline et al., 2013) เนื่องจากบริเวณ SZ มีอุณหภูมิสูงพอที่จะทำให้เกิดการตกตะกอนของเกรนละลายและผสมอยู่ในเนื้อวัสดุหลังจากเนื้อวัสดุเย็นตัวลงถึงอุณหภูมิห้อง ปรากฏการณ์เช่นนี้จะเพิ่มค่าความแข็งได้

นอกจากนี้ข้อสังเกตอีกประการซึ่งสอดคล้องกับผลด้านโครงสร้างจุลภาค พบว่า เกรนในบริเวณ TMAZ มีลักษณะที่ละเอียดเพิ่มมากขึ้นซึ่งย่อมส่งผลต่อสมบัติทางกลค่าความแข็งเพิ่มขึ้น และในบริเวณ SZ มีความละเอียดมากกว่าเนื้อโลหะเดิมตามขึ้นไป อันเนื่องมาจากความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานระหว่างวัสดุทดลองกับเครื่องมือที่บริเวณที่ปากกวนแผ่อิทธิพลของผลกระทบอันเนื่องมาจากความร้อนทางกลอย่างเห็นได้ชัด (Hasan et al., 2019)

4. สรุป

ลักษณะผิวหน้าด้านบนของรอยเชื่อม ที่ความเร็วหมุนเชื่อมสูงจะเกิดครีบมากกว่าที่ความเร็วหมุนเชื่อมต่ำ

โครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมที่ใช้ความเร็วหมุนเชื่อมสูงมีลักษณะรอยเชื่อมที่กว้างกว่ารอยเชื่อมที่ใช้ความเร็วหมุนเชื่อมต่ำ

โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อมต่ำมีความกว้างของบริเวณ SZ น้อยกว่าที่ความเร็วหมุนเชื่อมสูง

ค่าความต้านทานแรงดึงมากที่สุด คือ 190.4 MPa ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1000 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 112 มิลลิเมตรต่อนาที และค่าความต้านทานแรงดึงน้อยที่สุด คือ 127.2 MPa ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1000 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 80 มิลลิเมตรต่อนาที

ค่าความแข็งมากที่สุด คือ ความเร็วหมุนเชื่อมที่ 1000 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อมที่ 112 มิลลิเมตรต่อนาที ที่บริเวณ SZ เท่ากับ 137 HV

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณ ประจำปี 2562 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

6. เอกสารอ้างอิง

- Ali, A., Brown, M. W., Rodopoulos, C. A., & Gardiner, S. (2006). Characterization of 2024-T351 friction stir welding joints. *Journal of Failure Analysis and Prevention*, 6, 83-96.
- Amancio-Filho, S. T., Sheikhi, S., Dos Santos, J. F., & Bolfarini, C. (2008). Preliminary study on the microstructure and mechanical properties of dissimilar friction stir welds in aircraft aluminium alloys 2024-T351 and 6056-T4. *Journal of Materials Processing Technology*, 206, 132-142.
- Amancio-Filho, S.T., Sheikhi, S., Dos Santos, J.F., & Bolfarini, C. (2008). Preliminary study on the microstructure and mechanical properties of dissimilar friction stir welds in aircraft aluminium alloys 2024-T351 and 6056-T4. *Journal of Materials Processing Technology*, 206, 132-142.
- Babu, S., Janaki Ram, G.D., Venkitakrishnan, P.V., Madhusudhan Reddy, G. & Prasad Rao, K. (2011). Microstructure and Mechanical Properties of Friction Stir Lap Welded Aluminum Alloy AA2014. *Journal of Materials Processing Technology*, 28, 414-426.

- Boonchouytan, W., Cheewawuttipong, W., & Burapa, R. (2017). Microstructural Behavior and Mechanical Properties of Friction Stir Spot Welding of Dissimilar Aluminum Semi Solid Casting Sheets SSM2024 and SSM6061. *Srinakharinwirot Engineering Journal*, 12(2), 130-142.
- Booth, D. P. P., Starink, M. J., & Sinclair, I. (2007). Analysis of local microstructure and hardness of 13 mm gauge 2024-T351 AA friction stir welds. *Materials Science and Technology*, 23, 276-284.
- Caroline, J., Bruno de, M., Anne, D. & Aude, S. (2013). Torque, temperature and hardening precipitation evolution in dissimilar friction stir welds between 6061-T6 and 2014-T6 aluminum alloys. *Journal of Materials Processing Technology*, 213, 826-837.
- Chen, Z. W., & Cui, S. (2008). On the forming mechanism of banded structures in aluminium alloy friction stir welds. *Scripta Materialia*, 58, 417- 420.
- Ericsson, M. & Sandström, R. (2003). Influence of welding speed on the fatigue of friction stir welds, and comparison with MIG and TIG. *International Journal of Fatigue*, 25, 1379-1387.
- Golestaneh, A.F., Aidy, A., & Zadeh, M. (2009). Modeling the fatigue crack growth in friction stir welded joint of 2024-T351 Al alloy. *Materials and Design*, 30, 2928-2937.
- Gonçalo, S., Hao, W., Pedro, V., & Telmo, G.S. (2017). FSW of aluminum AA5754 to steel DX54 with innovative overlap joint. *Weld World*, 61, 257-268.
- Hasan, J., Hadi, M., & Mohammad, H. (2019). Investigation of residual stress distribution of dissimilar Al-7075-T6 and Al-6061-T6 in the friction stir welding process strengthened with SiO₂ nanoparticles. *Journal of Manufacturing Processes*, 43, 145-153.
- Heidarzadeh, A., Khodaverdizadeh, H., Mahmoudi, A., & Nazari, E. (2012). Tensile behavior of friction stir welded AA 6061-T4 aluminum alloy joints. *Materials and Design*, 37, 166-173.
- Kanwer, S., Arora, S. P., Michael, S., & Rajneesh, K. (2010). Effect of process parameters on friction stir welding of aluminum alloy 2219- T87. *International Journal of Advanced Manufacture Technology*, 50, 941-952.
- Krishnan, K. N. (2002). On the formation of onion rings in friction stir welds. *Materials Science and Engineering A*, 327, 246-251.
- Lockwood, W.D., Tomaz, B. & Reynolds, A.P. (2002). Mechanical response of friction stir welded AA 2024: Experiment and modelling. *Materials Science and Engineering A*, 323, 348-353.
- Sadeesh, P., Venkatesh, K. M., Rajkumar, V., Avinash, P., Arivazhagan, N., Devendranath, Ramkumar K. & Narayanan, S. (2014). Studies on friction stir welding of AA 2024 and AA 6061 dissimilar metals. *Procedia Engineering*, 75, 145-149.
- Shen, Z., Chen, Y., Haghshenas, M., & Gerlich, A. P. (2015). Role of welding parameters on interfacial bonding in dissimilar steel/aluminum friction stir welds. *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 18, 270-277.
- Shusheng, D., Xinqi, Y., Guohong, L., & Bo, J. (2006). Comparative study on fatigue properties between AA2024-T4 friction stir welds and base materials. *Materials Science and Engineering A*, 435-436, 389-395.
- Ying, L., Murr, L.E., & Mc Clure, J.C. (1999). Flow visualization and residual microstructures associated with the friction-stir welding of 2024 aluminum to 6061 aluminum. *Materials Science and Engineering: A*, 271, 213-223.
- Zhang, Z., Xiao, B. L., & Ma, Z. Y. (2012). Effect of welding parameters on microstructure and mechanical properties of friction stir welded 2219Al- T6 joints. *Journal of Materials Science*, 47, 4075-4086.

8. ชีวประวัติ



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วรพงศ์ บุญช่วยแทน
ผู้รับผิดชอบ
หลักสูตรสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต
สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย



อาจารย์รอมฎอน นูระพา
อาจารย์ผู้สอน
หลักสูตรสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรณพร ชีววุฒิ
พงศ์
ผู้รับผิดชอบ
หลักสูตรสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต
สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม
คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ขั้นตอนการปรับปรุงกระบวนการผลิตด้วยลีน ชิกส์ซิกม่า และลีนอัตโนมัติ Production Improvement Steps: Lean, Six Sigma and Lean Automation

ประภัสสร ตันติพันธุ์^{1*,2} อาณัติ ศิริปัญญา² พชรพงศ์ ปัญญาคุณานนท์² พศิษฐ์ ธนาโชติอนันต์กุล²

นันทชัย ว่องปฏิเวธ³ สุจินต์ พวงมาลัย³ และ สิริวัฒน์ ไวยนิตย³

Prapassorn Tantiphanwadi^{1*,2}, Anut Siripanya², Pacharappong Panyakunanon², Pasidth Thanachotanankul²

Nantachai Wongpatiwate³, Suchinda Phwngmalay³ and Siriwat Waiyanit³

¹สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน นครปฐม 73140

²LASI SI Designer (Warrior), Gen. 5 สถาบันไทย-เยอรมัน คล้ายน้ำไท กรุงเทพฯ 10110

³สถาบันไทย-เยอรมัน อ.เมือง ชลบุรี 20000

^{1*}Division of Industrial Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University, Nakhon Pathom 73140

²LASI SI Designer (Warrior), Gen. 5, Thai-German Institute, Klongnamtai, Bangkok 10110

³Thai-German Institute, Muang, Chonburi 20000

* Corresponding author e-mail: prapassorn.tan@ku.th

(Received: April 30, 2020, Revised: August 31, 2020, Accepted: November 15, 2020)

บทคัดย่อ

เพื่อลดต้นทุนการผลิตให้ต่ำลง โรงงานหลายแห่งต้องการปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิตให้เป็นแบบอัตโนมัติ เช่น นำหุ่นยนต์แขนกลมาใช้ในการกระบวนการผลิต ซึ่งไม่ได้ถูกนำมาใช้งานอย่างเต็มที่ก่อให้เกิดความสูญเสียเปล่า งานวิจัยฉบับนี้จึงออกแบบขั้นตอนการปรับปรุงกระบวนการผลิต เริ่มต้นด้วยกิจกรรมการผลิตแบบลีนซึ่งทำให้กระบวนการผลิตมีประสิทธิภาพและไหลอย่างต่อเนื่อง ต่อมา กิจกรรมชิกส์ซิกม่าซึ่งนำสถิติเข้ามาช่วยทำให้กระบวนการผลิตสามารถให้ผลผลิตที่มีความแปรปรวนต่ำและควบคุมได้เหมาะสมเพียงพอต่อการพัฒนาด้วยกิจกรรมลีนอัตโนมัติ ซึ่งต้องการทั้งการจัดการการผลิตที่ดีและอุปกรณ์ที่อยู่ในสภาพพร้อมรวมถึงวัตถุดิบที่ต้องอยู่ในข้อกำหนด โดยมีทั้งหมด 15 ขั้นตอนเพื่อใช้เป็นแนวทางในการดำเนินโครงการ ขั้นตอนนี้ได้นำไปใช้กับกรณีศึกษา กระบวนการขึ้นรูปแผ่นโลหะของชิ้นส่วนประกอบของรถยนต์ ซึ่งประกอบด้วยสามกระบวนการหลัก คือ การปั๊ม การขึ้นรูป และการเจาะ ผลลัพธ์ของการปรับปรุงได้ปรับเปลี่ยนเป็นกระบวนการผลิตแบบลีนกึ่งอัตโนมัติ ซึ่งเวลาที่ใช้ในการผลิตต่อชิ้นงานลดลง 55.1% และค่าประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องจักรของกระบวนการปั๊มเพิ่มขึ้น 15.2%

คำสำคัญ: การผลิตแบบลีน, ชิกส์ซิกม่า, ลีนอัตโนมัติ, ลีนกึ่งอัตโนมัติ

Abstract

With the effort of cost reduction, manufacturers attempted to be more automated. Some of them brought automated equipment, such as robot arm, into production line but were unable to gain successful implementation causing loss due to unused machine. The research is aimed to develop improvement steps based on activities of lean manufacturing that brings continuous and productive production line. Six sigma activity with statistical application brings production line to be less variability and more control enough for lean automation activity. The last activity requires smooth operations of production control, equipment maintenance and raw materials. The 15-steps assure for the projects that follow will be successful. A case study is implemented on three production processes, stamping, forming and piercing. Its result is the transformation into lean semi-automation processes that cycle time is reduced by 55.1% and overall equipment effectiveness index is increased by 15.2%.

Keywords: Lean manufacturing, Six Sigma, Lean automation, Lean semi-automation

1. บทนำ

ในการปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิตที่เป็นอยู่ให้เป็นแบบอัตโนมัติมากขึ้นซึ่งส่งผลให้ต้นทุนการผลิตลดลง โรงงานอุตสาหกรรมหลายแห่งได้ซื้ออุปกรณ์ทำงานแบบอัตโนมัติ เช่น หุ่นยนต์แขนกล มาทำหน้าที่แทนพนักงานในกระบวนการผลิต เช่น แขนกลสำหรับการเชื่อม แขนกลสำหรับการประกอบ ซึ่งค่อนข้างไม่สำเร็จเป็นส่วนใหญ่ การผลิตจึงยังคงเป็นแบบเดิมและอุปกรณ์เหล่านี้ ไม่ได้ถูกใช้งานหรือใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ ก่อให้เกิดความสูญเสียเปล่า เป็นต้น

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือออกแบบขั้นตอนการปรับปรุงกระบวนการผลิต โดยขั้นตอนจะเริ่มต้นด้วย กิจกรรมการปรับปรุงการผลิตแบบลีนซึ่งทำให้กระบวนการผลิตมีประสิทธิภาพและไหลอย่างต่อเนื่อง ตามด้วยกิจกรรมซิกส์ซิกม่า ซึ่งนำสถิติเข้ามาช่วยทำให้แต่ละกระบวนการย่อยมีความแปรปรวนต่ำและสามารถวัดความสามารถได้ส่งผลให้ผลิตผลที่ออกมาจากแต่ละกระบวนการมีคุณภาพตามข้อกำหนด ซึ่งเป็นการเตรียมความพร้อมให้กับการปรับเปลี่ยนกระบวนการไปเป็นแบบลีนอัตโนมัติที่ต้องการทั้งการจัดการการผลิตที่ดี การบำรุงรักษาอุปกรณ์และเครื่องจักรในสภาพพร้อมใช้งานเสมอ รวมถึงวัดดูและผลิตผลจากแต่ละกระบวนการก่อนหน้าต้องอยู่ในข้อกำหนดเสมอ

ในหัวข้อที่ 2 ได้นำเสนอแนวคิดและการทบทวนวรรณกรรมที่มีความเกี่ยวข้อง หัวข้อที่ 3 นำเสนอแนวคิดขั้นตอน กิจกรรมแบบลีน ซิกส์ซิกม่า และลีนอัตโนมัติ หัวข้อที่ 4 มีกรณีศึกษาที่โรงงานแห่งหนึ่ง จากนั้นในหัวข้อที่ 5 เป็นผลวิจัย และสรุปผลวิจัยในหัวข้อที่ 6

2. แนวคิดและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

แนวคิดของกิจกรรมในการปรับปรุงกระบวนการผลิตทั้งหมด เป็นไปเพื่อลดต้นทุนค่าใช้จ่ายในการผลิตให้ได้มากที่สุด แนวคิดที่จะกล่าวถึงมีอยู่ 3 แนวคิดใหญ่ๆ คือ การปรับปรุงการผลิตแบบลีน ซิกส์ซิกม่า และลีนอัตโนมัติ ซึ่งจะเริ่มต้นด้วยดัชนีตัววัด ดังต่อไปนี้

2.1 ดัชนีการวัด (Index) และแผนภูมิ

ในทุกๆกระบวนการผลิตในโรงงานอุตสาหกรรมทั่วโลก จะใช้ดัชนีวัดความสามารถที่มีสูตรการคำนวณและความหมายเหมือนกัน ซึ่งขอสรุปในส่วนที่นำมาใช้งาน (Dennis, 2015; Montgomery, 2013; LASI Trainers, 2020) ดังต่อไปนี้

Takt time คือ อัตราที่สินค้าต้องถูกผลิตเพื่อให้ทันต่อความต้องการของลูกค้า มีหน่วยเป็นเวลาต่อหน่วยสินค้า

$$T.T = \frac{\text{เวลาทำงานปกติสุทธิ}}{\text{จำนวนสินค้าที่ต้องการ}} \quad (1)$$

Cycle time คือ เวลาที่ใช้ในการผลิตหรือทำงานต่อชิ้นงานหนึ่งชิ้น มีหน่วยเป็นเวลา ซึ่งจะแตกต่างกันไปในแต่ละกระบวนการผลิต

Lead time คือ ระยะเวลาในการรอคอยสินค้า หลังจากที่ผู้ซื้อได้ตกลงสั่งซื้อสินค้าจากผู้ขายเรียบร้อยแล้ว มีหน่วยเป็นเวลา

WIP (Work-In-Process) คือ ผลิตภัณฑ์ในกระบวนการผลิตที่ยังไม่เสร็จสมบูรณ์ หรือสินค้าคงคลังที่อยู่ในกระบวนการผลิต

$$WIP = \text{Throughput rate} \times \text{Lead time} \quad (2)$$

เมื่อ Throughput rate คือ อัตราการไหลของจำนวนผลิตภัณฑ์ต่อหน่วยเวลาของกระบวนการนั้นๆ

ประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องจักร (Overall Equipment Effectiveness; OEE) คือ ตัวเลขที่ใช้บ่งบอกสมรรถนะของเครื่องจักรที่ใช้ผลิต ซึ่งประกอบไปด้วย 3 องค์ประกอบ ดังนี้

$$OEE = \text{Availability} \times \text{Performance rate} \times \text{Quality rate} \quad (3)$$

เมื่อ Availability (เวลาปฏิบัติงานที่มีอยู่) คือ สัดส่วนของเวลาที่ใช้ในการเดินเครื่องผลิต

$$A = \frac{(\text{เวลาเดินเครื่อง} - \text{เวลาที่เครื่องจักรหยุด})}{\text{เวลาเดินเครื่อง}} \times 100 \quad (4)$$

ต่อมา Performance rate (ประสิทธิภาพการเดินเครื่อง) คือ สัดส่วนของเวลาที่เครื่องสามารถทำงานได้

$$P = \frac{\text{เวลาทำงานสุทธิ}}{\text{เวลาทำงาน}} \times 100 \quad (5)$$

และ Quality rate (อัตราคุณภาพ) คือ สัดส่วนผลิตภัณฑ์ที่ดีที่เครื่องจักรผลิตได้

$$Q = \frac{\text{จำนวนผลิตภัณฑ์ที่ดี}}{\text{จำนวนผลิตภัณฑ์ที่เครื่องผลิตทั้งหมด}} \times 100 \quad (6)$$

ตารางงานมาตรฐานผสม (Standardized Work Combination Table) คือ ตารางระบุเวลางานมาตรฐานของคนและเครื่องจักร

แผนภูมิแท่งรวมงาน (Yamazumi chart) คือ แผนภูมิแท่งของงานย่อยที่กระทำโดยพนักงาน 1 คน โดยในแผนภูมิจะแสดงจำนวนแท่งของพนักงานทั้งหมดในการผลิตของแต่ละกระบวนการหลัก

ดัชนีวัดความสามารถกระบวนการ (Process capability; C_{pk}) คือ ความสามารถของกระบวนการผลิตเทียบกับข้อกำหนด (Specification) ความสามารถของกระบวนการที่ยอมรับได้ ควรมีค่า $C_{pk} \geq 1.33$ ขึ้นไป

$$C_{pk} = \min \left(\frac{\bar{x} - LSL}{3\sigma}, \frac{USL - \bar{x}}{3\sigma} \right) \quad (7)$$

Part per million; PPM คืออัตราส่วนของจำนวนของเสียต่อ 1 ล้านชิ้น เช่น ความสามารถของกระบวนการที่ $C_{pk} = 2$ จะเรียกเป็นกระบวนการ 6σ ซึ่งมีของเสีย 3.4 ppm หรือ 3.4 ชิ้นใน 1 ล้านชิ้น

2.2 การปรับปรุงการผลิตด้วยแนวคิดแบบลีน

เป็นแนวคิดหรือเทคนิคที่ใช้กำจัดความสูญเสียและความสูญเปล่าของกระบวนการผลิต (Dennis, 2015; LASI Trainers, 2020) ซึ่งเน้นไปที่ความเร็ว หรือเวลานำ (Lead time) ที่สั้นที่สุด รวมถึงแนวทางปรับปรุงกระบวนการอย่างต่อเนื่อง (ไคเซ็น) โดยไม่เน้นการลงทุนในเทคโนโลยีขั้นสูง แต่มุ่งเน้นการปรับปรุงโดยมีพนักงานเป็นตัวขับเคลื่อนสำคัญ และมุ่งเน้นการไหลของงานเป็นหลัก

2.2.1 คุณลักษณะการผลิตแบบลีน

เป็นการการผลิตแบบทันเวลาพอดี (Just-In-Time) ซึ่งผลิตหรือการส่งมอบสิ่งของที่ต้องการ ในเวลาที่ต้องการ ด้วยจำนวนที่ต้องการ ซึ่งประกอบด้วย

ก) การไหลของวัสดุเป็นแบบดึง (Pull Method) หมายถึง การผลิตสินค้าเมื่อมีความต้องการ ทำให้มีจำนวนสินค้าคงคลังต่ำ

ข) ผลิตจำนวนน้อยในแต่ละครั้ง (Small Lot Size Production) หมายถึง การกำหนดขนาดของการผลิตจำนวนน้อย ทำให้มีสินค้าคงคลังต่ำ

ค) ขจัดความสูญเปล่า (Waste; Muda) ในการผลิต 7 ประการ ได้แก่ การผลิตมากเกินไป การรอคอย การขนส่งระยะทางที่มากเกินไป กระบวนการผลิตที่ขาดประสิทธิภาพ การมีวัสดุหรือสินค้าคงคลังเก็บไว้มากเกินความจำเป็น การเคลื่อนไหวที่ไม่จำเป็น และ ของเสียที่เกิดในกระบวนการผลิต

ง) ต้องมีการจัดสมดุลการไหลในสายการผลิต โดยจัดให้แต่ละสถานีงานมีภาระงานเท่ากัน

จ) เป็นกระบวนการที่มีการไหลแบบต่อเนื่อง โดยมี WIP หรือบัฟเฟอร์น้อยที่สุด

ข) มีกิจกรรมการปรับปรุงอย่างต่อเนื่องเพื่อลดความสูญเสีย ที่เรียกว่ากิจกรรมไคเซ็น

2.2.2 การวางแผนการผลิตภายในโรงงาน ควรจะถูกปรับเรียบ (Level production) เพื่อลดความสูญเสีย โดยเฉพาะสินค้าคงคลัง

2.2.3 กระบวนการผลิตแบบเรียนรู้ด้วยตนเอง (Autonomous process) เป็นกระบวนการผลิตที่ถูกออกแบบให้มีการทำงานแบบหยุดได้ด้วยตนเอง (Automatic stop function) เพื่อสร้างและรักษาคุณภาพให้มีในผลิตภัณฑ์ในทุกขั้นตอนการผลิต

เครื่องมือที่นำมาใช้ในการปรับปรุงแบบลีน สามารถสรุปได้ในตารางที่ 1 ซึ่งเมื่อได้ดำเนินการปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง ก็จะสามารถลดความสูญเสียและความสูญเปล่าลงได้เหลือน้อยที่สุด กิจกรรมที่เหลืออยู่ก็จะเหลือประเภทมีคุณค่า (Value added) และไม่มีคุณค่า (Non-value added) แต่ยังคงต้องมี

ตารางที่ 1 เครื่องมือในการปรับปรุงแบบลีน

กิจกรรม	เครื่องมือ
การควบคุมการผลิต	Value Stream Mapping, Work- In- Process, Pull Operation, Production leveling, Mixed-Model Scheduling, Small lot size, Inventory Management
กระบวนการผลิต	Just- In- Time, Continuous production line, Kanban, Pokayoke (Mistake-Proofing), Muda & Waste reduction, Line Balancing, Standardized Combination Work, Yamazumi chart, Spaghetti chart, Work Study, Visual Control, Standard Work Instruction
คุณภาพในกระบวนการผลิต	กระบวนการผลิตแบบอัตโนมัติ (Autonomous Processes), ระบบแจ้งเตือนแบบอัตโนมัติ เช่น หลอดไฟ 3 สี แจ้งด้วยเสียง เป็นต้น ระบบตรวจสอบอัตโนมัติ หรือ Mistake-Proofing
เครื่องจักร	การปรับปรุง OEE, Muda & Waste reduction, Karakuri, Single Minute Exchange of Dies (SMED)
การปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง	กิจกรรม Kaizen, กิจกรรม QCC, กิจกรรม TPM, 5ส, QC 7 tools, Multi-Skilled Workforces

2.3 ซิกส์ซิกม่า (Six Sigma)

กิจกรรมซิกส์ซิกม่า เริ่มต้นจากการปรับปรุงคุณภาพในกระบวนการผลิตของบริษัทโมโตโรล่า สหรัฐอเมริกา (Montgomery, 2013; Sony Corporation, 2000) ซึ่งมีความพยายามนำสถิติมาใช้วิเคราะห์และตัดสินใจในการแก้ปัญหา และได้ตั้งเป้าหมายให้กระบวนการที่ได้รับการปรับปรุงมีความสามารถของกระบวนการเป็นซิกส์ซิกม่า ($c_{pk} = 2.0$) ซึ่งมีของเสียอยู่ที่ 3.4 ชิ้นจาก 1 ล้านชิ้น หรือ 3.4 ppm (Part per million) นอกเหนือจากการใช้เครื่องมือทางสถิติ แนวทางแก้ปัญหา ก็ได้ถูกจัดการขึ้นเป็นมาตรฐานผ่านทางวิธีการ DMAIC และมีเครื่องมือทางสถิติและการจัดการ ดังแสดงในตารางที่ 2 ดังในรายละเอียด ดังนี้

แนวทางแก้ปัญหาคุณภาพ DMAIC

2.3.1 Define (ระบุปัญหา)

เป็นขั้นตอนในการใช้เครื่องมือระบุหัวข้อหรือปัญหาที่จะนำมาทำโครงการ ซึ่งต้องเป็นหัวข้อที่มีผลกระทบสูงกับความต้องการของลูกค้าหรือความต้องการของบริษัท

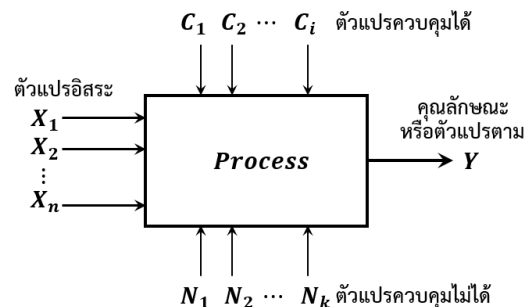
2.3.2 Measure (ตัววัด)

เป็นขั้นตอนในการใช้เครื่องมือระบุกระบวนการผลิตที่เป็นแหล่งกำเนิดของปัญหา และกระบวนการผลิตที่มีส่วนร่วมในปัญหา จากนั้นในกระบวนการที่เป็นแหล่งกำเนิด ให้ระบุตัววัดหรือตัวตอบสนอง (Response) ซึ่งมีสัญลักษณ์เป็น Y สามารถมีได้หลายตัว ต้องทำการวัดเก็บข้อมูล ดูการกระจาย ค่าเฉลี่ย ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน เปรียบเทียบกับข้อกำหนด (Specification) ซึ่งเป็นค่าที่จะสะท้อนความเป็นจริง ณ ปัจจุบัน (Baseline)

2.3.3 Analyze (วิเคราะห์)

เป็นการระบุตัวแปรหรือปัจจัยจากกระบวนการผลิตที่เป็นแหล่งของปัญหาและที่มีส่วนร่วมทั้งหมดที่ผลต่อตัวตอบสนอง จากนั้นหาวิธีการที่เป็นมาตรฐานควบคุมทุกปัจจัยปัจจัยที่ได้รับการควบคุมแล้วมีสัญลักษณ์เป็น c เมื่อกระบวนการผลิตอยู่ในการควบคุมแล้วก็ใช้วิธีการทางสถิติหรือเครื่องมืออื่นๆในการวิเคราะห์ คัดเลือกปัจจัยที่มีผลอย่างยิ่งยวด (Critical factors) ซึ่งควรจะมีย่านอยู่ประมาณ 3-5 ปัจจัยซึ่งมีสัญลักษณ์เป็น x จากปัจจัยที่ควบคุมได้ทั้งหมด และจะมีปัจจัยบางตัวที่ส่งผลเล็กน้อยต่อกระบวนการเราเรียกว่า สิ่งรบกวน (Noise) ซึ่งมีสัญลักษณ์ n เครื่องมือทางสถิติที่โดดเด่น ได้แก่ การออกแบบการทดลอง (Design of Experiment;

DOE) ซึ่งช่วยตัดสินใจการคัดกรองปัจจัย x ด้วยแนวทางสถิติ หลังจากการวิเคราะห์เสร็จสิ้น เราสามารถสรุปปัจจัยที่มีผลกระทบต่อกระบวนการโดยใช้แผนภูมิกระบวนการ IPO ได้ดังรูปที่ 1



รูปที่ 3 แผนภูมิ IPO แสดงความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยหรือตัวแปร

2.3.4 Improve (ปรับปรุงให้ดีขึ้น)

ในขั้นตอนนี้ เป็นการหาวิธีการแก้ปัญหา หรือเป็นการหาค่าเงื่อนไขที่เหมาะสม (Optimal Conditions) ใหม่ให้กับปัจจัย x ซึ่งจะต้องส่งผลให้ค่าตอบสนอง Y ดีขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ในการค้นหาค่าเงื่อนไขที่เหมาะสม เครื่องมือทางสถิติที่โดดเด่น ได้แก่ DOE การหาค่าที่เหมาะสม (Optimization) เป็นต้น นอกจากนี้ เมื่อได้เงื่อนไขที่เหมาะสมแล้ว ก็สามารถนำมาทำการจำลอง (Simulation) เพื่อดูความเป็นไปได้ ต่อมาทำการยืนยันผลการทดลอง เมื่อได้ผลลัพธ์ที่มั่นใจแล้วจึงค่อยนำไปใช้ในกระบวนการผลิตจริง

2.3.5 Control (ควบคุม)

ปัจจัยที่มีผลอย่างยิ่งยวด 3-5 ปัจจัยและตัววัดการตอบสนอง จำเป็นต้องได้รับการควบคุมซึ่งสามารถทำได้โดยใช้แผนภูมิควบคุม (Control charts) เพื่อดูอย่างต่อเนื่องเป็นอย่างน้อย 1-3 เดือน จึงถือได้ว่าเป็นกระบวนการที่ควบคุมได้

2.4 ลีนอัตโนมัติ (Lean Automation)

ก่อนจะเข้าสู่กระบวนการปรับปรุงแบบลีนอัตโนมัติ (LASI Trainers, 2020; Department of Industrial Promotion and Denso International Asia, 2019) การปรับปรุงแบบลีนและซิกส์ซิกม่า ควรทำให้ความสามารถของกระบวนการผลิตเป็นไปตามเป้าหมาย หรือมากกว่าหกซิกม่า ($c_{pk} \geq 2.0$) ความสูญเสีย และความสูญเสียที่ยังเหลือจะ

ตารางที่ 2 เครื่องมือในกิจกรรมซิกส์ซิกมา

ขั้นตอน	เครื่องมือ
Define	Project charter, Process map & Flow chart, QFD chart, Multivariate analysis
Measure	Process map & flow chart, Cause & effect analysis, Process capability analysis, Gage R&R, SPC and process control plans
Analyze	Hypothesis test, Confidential interval, Regression analysis, Other multivariate methods, Failure Mode and Effect Analysis, SPC and process control plans, Design of Experiments
Improve	Failure Mode and Effect Analysis, Design of Experiments, Simulation, Optimization
Control	SPC and process control plans

เป็นกิจกรรมที่ไม่มีคุณค่า (Non-value Added) ที่เกี่ยวกับเครื่องจักร เป็นส่วนใหญ่ การมองหาความสูญเสียเหล่านี้ กระบวนการผลิตจะถูกบูรณาการด้วยดิจิทัลเทคโนโลยี ซึ่งมีการใช้ระบบบอโตเมชัน รวมถึงการใช้อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Thing; IoT) เชื่อมโยงสัมพันธ์กัน ซึ่งเมื่อพบเจอ ก็จะถูกกำจัดด้วยกิจกรรมไคเซ็นอย่างต่อเนื่อง โดยมีจุดประสงค์สุดท้ายเป็นกระบวนการผลิตที่ใช้พลังงานและพนักงานดูแลน้อยที่สุด องค์ประกอบต่าง ๆ สำหรับระบบบูรณาการการผลิตแบบอัตโนมัติ ได้แก่

2.4.1 ความสูญเสีย (loss) ที่เกี่ยวเนื่องกับเครื่องจักร

ดัชนีชี้วัดที่โดดเด่นคือประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องจักร (Overall Equipment Effectiveness; OEE) ซึ่งมีความสูญเสีย 8 ประการที่เกี่ยวเนื่องกับค่า OEE ดังนี้

2.4.1.1 ความสูญเสียที่เกี่ยวเนื่องกับเวลาปฏิบัติงานที่มีอยู่ (Availability) ได้แก่ ความล้มเหลวของเครื่องจักร การเตรียมพร้อมและการปรับแต่ง การเปลี่ยนอุปกรณ์ขณะทำงาน การหยุดการทำงานของเครื่อง และการเริ่มต้นผลิต

2.4.1.2 ความสูญเสียที่เกี่ยวเนื่องกับประสิทธิภาพการเดินเครื่อง (Performance rate) ได้แก่ การหยุดเล็กน้อย และการลดความเร็วเครื่อง

2.4.1.3 ความสูญเสียที่เกี่ยวเนื่องกับอัตราคุณภาพ (Quality rate) ได้แก่ ของเสียและการซ่อม

2.4.2 อุปกรณ์ด้านเมคคาทรอนิกส์

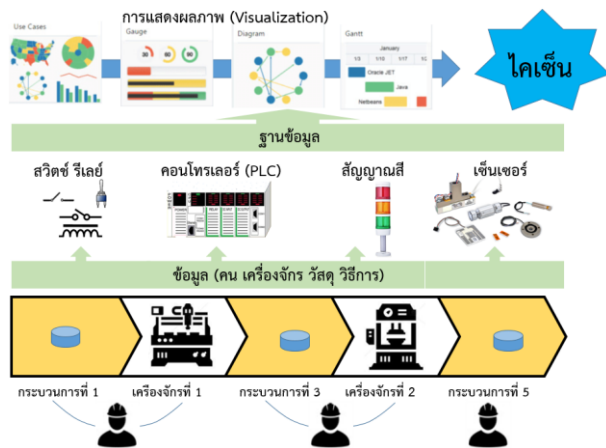
ซึ่งประกอบไปด้วยอุปกรณ์หลักๆ ได้แก่ เครื่องจักรต่างๆ อุปกรณ์ที่ใช้ลม อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ เซ็นเซอร์ อุปกรณ์แสดงผล อุปกรณ์ควบคุม และอุปกรณ์สนับสนุนอื่นๆ ดังในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เทคโนโลยีอัตโนมัติสำหรับกระบวนการผลิต

อุปกรณ์	เครื่องมือ
เครื่องจักร	เครื่องจักรที่สามารถซื้อได้ทั่วไปตามแคตตาล็อก เช่น เครื่อง CNC หรือเครื่องที่ถูกสร้างขึ้นตามสั่ง
อุปกรณ์	ใช้ลม ได้แก่ ระบายลม โซลินอยด์ ตัวกรอง ตัวควบคุม (Regulator) มอเตอร์ เป็นต้น ใช้ไฟฟ้า/ควบคุม ได้แก่ มอเตอร์ไฟฟ้า ระบายลม ไมโครคอนโทรลเลอร์ เป็นต้น อุปกรณ์ทำงาน ได้แก่ แขนกลประเภทต่างๆ หัวจับ หัวเจาะ หัวเชื่อม เป็นต้น ใช้แสดงผล ได้แก่ แผงการควบคุมการทำงาน สัญญาณแสง อุปกรณ์แสดงผล เป็นต้น
เคลื่อนย้าย/ลำเลียง	ได้แก่ ระบบรถอัตโนมัติ (AGV) ตัวเก็บข้อมูลผลิตภัณฑ์ ตัวลำเลียงวัตถุ สายพาน เป็นต้น
เซ็นเซอร์	ใช้ตรวจวัดหรือตรวจจับเพื่อเก็บรวบรวมข้อมูล ได้แก่ อุณหภูมิ ความดัน ความชื้น ตรวจการเปลี่ยนแปลงทางเคมี ตรวจคุณภาพของก๊าซ ตรวจคุณภาพคว้น อินฟราเรดเซ็นเซอร์ ตรวจวัดระดับ ตรวจจับภาพ ตรวจจับแสง ตรวจจับการเคลื่อนไหว เป็นต้น
การเชื่อมต่อ	เทคโนโลยีเชื่อมต่อ ได้แก่ อินเทอร์เน็ตไร้สาย (Wi-Fi) บลูทูธ (Bluetooth) เครือข่ายตาข่าย (Mesh networks) เครือข่ายเซลล์ลาร์ (Cellular networks) เทคโนโลยี LPWAN เป็นต้น
IoT	IoT แพลตฟอร์ม เป็นซอฟต์แวร์สำหรับการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้รับมา ซึ่งแพลตฟอร์มมีหลากหลาย เช่น Google Cloud, IRI Voracity, Particle, Salesforce IoT Cloud, ThinkWorx, IBM Watson IoT, Amazon AWS IoT Core, Microsoft Azure IoT Suite, Samsung Artik Cloud, Oracle IoT, Cisco IoT Cloud Connect, Altair SmartWorks เป็นต้น

2.4.3 อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

หรือ Internet of Things (IoT) คือการที่อุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ต่างๆ สามารถเชื่อมโยงหรือส่งข้อมูลถึงกันได้ด้วยอินเทอร์เน็ต โดยไม่ต้องป้อนข้อมูล ข้อมูลจากกระบวนการผลิตหรือสิ่ง (Things) ซึ่งประกอบไปด้วย คน (Man) เครื่องจักร (machine) วัสดุ (Material) วิธีการ (Method) นี้จะถูกนำเก็บในฐานข้อมูล (Data Storage) ซึ่งจะมีการประมวลผลออกมาเป็นแผนภูมิทางสถิติประเภทต่าง ๆ หรือวิเคราะห์ด้วยวิธีทางสถิติ การเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) เป็นต้น ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ก็สามารถนำมาแสดงเป็นภาพ (Visualization) ให้เห็นได้ตลอดเวลา ทำให้สามารถแก้ไขข้อผิดพลาดหรือนำไปปรับปรุงหรือไคเซ็นได้อย่างทันที แผนภูมิของการทำอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งเป็นไปดังรูปที่ 2 และในส่วนเทคโนโลยีการเชื่อมต่อ ได้ระบุไว้ในตารางที่ 3



รูปที่ 2 อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) ในกระบวนการผลิต
(Sony, 2018)

2.5 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

กิจกรรมการผลิตแบบลีนและซิกส์ซิกมา ได้ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายและทำให้อุตสาหกรรมยุค 3.0 เฟื่องฟูไปทั่วโลก อีกทั้งยังคงเป็นพื้นฐานให้การปรับปรุงการผลิตก่อนที่จะก้าวไปยังการผลิตแบบลีนอัตโนมัติ หรืออุตสาหกรรมยุค 4.0 ซึ่งการทบทวนวรรณกรรมนี้ จะเป็นการนำเอาแนวคิดและเทคโนโลยีใหม่ๆ ที่เพิ่งจะเกิดขึ้นที่นำมาใช้ในกิจกรรมเหล่านี้

การผลิตแบบลีนได้ถูกนำมาเรียบเรียงเพื่อนำไปใช้งานได้ง่าย (Dennis, 2015) ซึ่งนำไปใช้ในหลายๆ อุตสาหกรรม ด้านโรงงานอุตสาหกรรม (Issarapong et al., 2019) หรือการบริการ เช่น อุตสาหกรรมดูแลสุขภาพ (Healthcare) ที่นำไปใช้ได้อย่างโดดเด่นทั่วโลก (Antony et al., 2019) แนวคิดการปรับปรุงอย่างต่อเนื่องของลีนได้ถูกนำไปใช้ในการลดต้นทุนการดำเนินงานและอื่นๆ ตามเป้าหมายที่ผู้บริหารตั้งไว้นอกจากนี้การพัฒนาเครื่องมือเทคโนโลยีใหม่ๆ สำหรับการปรับปรุงแบบลีนมีเข้ามาอย่างต่อเนื่อง หนึ่งในเครื่องมือที่แพร่หลายคือสายธารคุณค่า (Value stream mapping; VSM) ซึ่งเป็นแผนภูมิการไหลของข้อมูล วัตถุดิบ และผลิตภัณฑ์ เริ่มตั้งแต่การวางใบสั่งซื้อจากลูกค้าจนกระทั่งลูกค้าได้รับผลิตภัณฑ์ กรณีศึกษาการใช้สายธารคุณค่าในการปรับปรุงแบบลีน มีทั้งการลดความสูญเสีย (Waste) (Kumar et al., 2018) การลด WIP (Nihlah & Immawan, 2018) ระหว่างกระบวนการผลิต การลดเวลานำ (Lead time) (Saraswat et al., 2015) และใช้เพิ่มประสิทธิภาพโดยรวมของเครื่องจักร (Overall Equipment Effectiveness; OEE) (Dadashnejad & Valmohammadi, 2019)

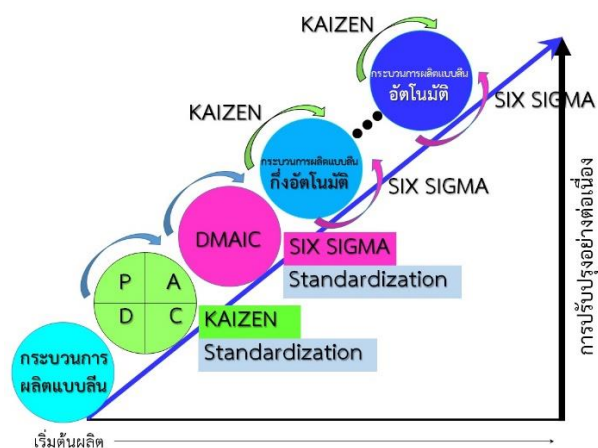
สำหรับกิจกรรมซิกส์ซิกมา ซึ่งเริ่มต้นที่บริษัทโมโตรล่าในสหรัฐอเมริกา ได้ถูกยอมรับและนำมาใช้อย่างแพร่หลาย เป็น

การนำเครื่องมือทางสถิติมาปรับปรุงคุณภาพในกระบวนการผลิต โดยล่าสุด (Hakimi et al., 2018) ได้นำ DMAIC ไปปรับปรุงคุณภาพในโรงงานผลิตโยเกิร์ตด้วยการใช้เครื่องมือ DOE ในปัจจุบันกิจกรรมได้ถูกขยายขอบเขตไปสู่สิ่งซึ่งเรียกว่า ลีนซิกส์ซิกมา (Montgomery, 2013) ซึ่งเป็นการผสมผสานแนวคิดแบบลีนและสถิติลงไปใน DMAIC และล่าสุดได้มีการพิจารณาแนวคิดด้านคุณภาพในยุคอุตสาหกรรมอัตโนมัติ (Park et al., 2017) จะมุ่งเน้นไปทางด้านการวิเคราะห์ข้อมูลขนาดใหญ่ (Big data) เช่น วิเคราะห์ข้อมูลขนาดใหญ่ในกิจกรรมโคเซ็น หรือการใช้ปัญญาประดิษฐ์ (AI) ในการตรวจสอบแบบอัตโนมัติ เป็นต้น

และในยุคอุตสาหกรรม 4.0 ได้มีการพูดถึงการทำกิจกรรมระบบอัตโนมัติ (Automation system) หลังจากทำกิจกรรมปรับปรุงกระบวนการผลิตแบบลีน (Lawton, 2007) มาตั้งแต่ต้นทศวรรษ 1990 แล้ว คำศัพท์ ลีนอัตโนมัติ (Kolberg & Zuhlke, 2015) ได้ถูกนิยามขึ้นว่าหมายถึงการบูรณาการร่วมกันระหว่างการผลิตแบบลีนและเทคโนโลยีอัตโนมัติ ซึ่งก่อให้เกิดการผลิตที่มีทั้งความยืดหยุ่นและมีประสิทธิภาพมากขึ้น การออกแบบระบบอัตโนมัติได้ถูกนำเสนอจากหลายบริษัท บริษัททางทวีปยุโรปมีแนวคิดการออกแบบเป็นของใหม่ที่น่าสนใจของเก่า ซึ่งจะมีค่าใช้จ่ายอย่างมหาศาล ในขณะที่บริษัทในประเทศญี่ปุ่น เช่นบริษัทเดนิโซ (Yamazaki et al., 2016) ได้นำเสนอเป็นการปรับปรุงจากกระบวนการผลิตที่มีอยู่แล้วโดยมุ่งเน้นลดความสูญเสียและสูญเสียของเครื่องจักรให้มากขึ้น โดยเป็นการออกแบบระบบการผลิตแบบลีนอัตโนมัติแทน ซึ่งค่าใช้จ่ายจะไม่สูงเท่ากับแนวคิดของทางยุโรป อย่างไรก็ตามแนวคิดของการออกแบบระบบการผลิตแบบลีนอัตโนมัตินี้ได้ถูกนำไปศึกษาในหลายประเทศเช่นกัน (Nafais, 2017; Sony, 2018) สำหรับในประเทศไทย กิจกรรมนี้ได้มีการถ่ายทอดความรู้ซึ่งเป็นความร่วมมือระหว่างกระทรวงเศรษฐกิจการค้าและอุตสาหกรรมของญี่ปุ่น (METI) และ กระทรวงอุตสาหกรรม (MOI) ผ่านทางการอบรมในหลักสูตร LASI SI Designer (Warrior) Training (LASI Trainers, 2020) ให้กับผู้ประกอบการในภาคอุตสาหกรรมในประเทศไทย

3. วิธีวิจัย

เป็นการสร้างขั้นตอนแนวคิดอย่างเป็นระบบในการปรับปรุงกระบวนการผลิตโดยเริ่มจาก ลีน ซิกส์ซิกมา ลีนกึ่งอัตโนมัติ และสุดท้ายลีนอัตโนมัติแบบเต็มรูปแบบ ตามลำดับ โดยมีแผนภูมิวงล้อเป็นดังในรูปที่ 3



รูปที่ 3 วงล้อการปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง

ขั้นตอนเริ่มดังนี้

ขั้นที่ 1 L-Define (ระบุคุณค่า)

แนวคิด 1.1 ระบุกระบวนการผลิตที่ต้องการปรับปรุงซึ่งสอดคล้องกับผลกำไรของบริษัทหรือความต้องการของลูกค้า

แนวคิด 1.2 ระบุกระบวนการย่อยที่ต้องปรับปรุงในสายธารคุณค่าสอดคล้องไปกับเป้าหมายทางตัวเลขของบริษัทหรือลูกค้า
เครื่องมือ: แผนภูมิทางสถิติ พาเรโต การวิเคราะห์หลายตัวแปร การวิเคราะห์ต้นทุน สายธารคุณค่า (Value Stream Mapping; VSM) ดัชนีตัววัดดังในหัวข้อ 2.1 การคำนวณการเงิน

ขั้นที่ 2 L-Measure (ดัชนีวัดค่าพื้นฐาน)

แนวคิด 2.1 ระบุดัชนีตัววัดในสายธารคุณค่า (VSM)

แนวคิด 2.2 ทวนสอบระบบการวัดทั้งคนและเครื่องมือวัด

แนวคิด 2.3 ทำการวัดดัชนีตัววัดในแต่ละกระบวนการย่อยใน VSM ซึ่งเป็นค่าพื้นฐาน (Baseline) และตั้งเป้าหมายให้สอดคล้องเป้าหมายของบริษัทหรือลูกค้า

เครื่องมือ: Gage R&R ดัชนีตัววัดดังในหัวข้อ 2.1 ซึ่งดัชนีหลัก ได้แก่ Lead time, Takt time, Cycle time, WIP, OEE, VSM ตารางงานมาตรฐานผสม (Standardized Work Combination Table) แผนภูมิแท่งรวมงาน (Yamazumi chart) และ แผนภูมิและข้อมูลทางสถิติต่างๆ

ขั้นที่ 3 L-Analyze (วิเคราะห์)

แนวคิด 3.1 วิเคราะห์หาความสูญเสียเปล่า (7 Wastes) และความสูญเสีย (8 losses) ของทุกกระบวนการใน VSM

เครื่องมือ: 7 Wastes, 8 losses, เครื่องมือวิเคราะห์ทางวิศวกรรม ได้แก่ แผนภูมิการไหล แผนภูมิสเปกตัม แผนผังก้างปลา, การศึกษางาน (Work study), การวางผังโรงงานและการขนถ่ายวัสดุ (Plant layout and material handling),

วิศวกรรมคุณค่า (Value engineering) การวิเคราะห์การดำเนินงาน เป็นต้น

แนวคิด 3.2 วิเคราะห์ตารางงานมาตรฐานผสมและสมดุลกระบวนการผลิต

เครื่องมือ: ตารางงานมาตรฐานผสม สมดุลกระบวนการผลิต

แนวคิด 3.3 วิเคราะห์ความสามารถของกระบวนการผลิตแบบลีน

เครื่องมือ: คุณลักษณะการผลิตแบบลีน ดังในหัวข้อที่ 2.2.1 ได้แก่ การไหลแบบดึง (Pull method) ผลิตจำนวนน้อย (Small lot size) สมดุลการไหล (Line balancing) สินค้าคงคลังน้อย (Small WIP) การผลิตแบบปรับเรียบ (Level Production) กระบวนการผลิตแบบเรียนรู้ด้วยตนเอง (Autonomous process) และ กิจกรรมการปรับปรุงอย่างต่อเนื่องหรือไคเซ็น

ขั้นที่ 4 L-Improve (แนวทางแก้ปัญหา)

แนวคิด 4.1 เสนอแนวทางแก้ปัญหาและเงื่อนไขที่เหมาะสมใหม่ที่ดัชนีตัววัดได้ตามเป้าหมาย

แนวคิด 4.2 ทำการจำลอง (Simulation) โดยการใช้ซอฟต์แวร์ เพื่อดูค่าดัชนีการวัดได้ตามเป้าหมายหรือไม่

เครื่องมือ: แผนการปรับปรุงไคเซ็น ดัชนีตัววัด ตารางงานมาตรฐานผสม แผนภูมิแท่งรวมงาน ซอฟต์แวร์สายธารคุณค่า เป็นต้น

แนวคิด 4.3 ทำการทดสอบและยืนยันในกระบวนการผลิตจริง

ขั้นที่ 5 L-Control (ควบคุม)

แนวคิด 5.1 นำไปปฏิบัติในกระบวนการผลิต

แนวคิด 5.2 สร้างระบบควบคุมด้วยข้อมูลและภาพสำหรับดัชนีตัววัดหรือตัวแปรหลักอื่นๆ

เครื่องมือ: คู่มือทำงานที่เป็นมาตรฐาน แผนภูมิควบคุม แผนภูมิแสดงด้วยภาพ

การปรับปรุงการผลิตแบบลีน จะสามารถลดความสูญเสียและความสูญเสียเปล่าได้เหลือน้อยที่สุด กิจกรรมที่เสียอยู่ก็จะเหลือประเภทที่มีคุณค่า (Value added) และไม่มีคุณค่า (Non-value added) เช่นการตรวจสอบ เป็นต้น ผลลัพธ์ที่ได้จะเป็นกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่องที่ได้ผลผลิต (Productivity) ตามเป้าหมาย เวลาที่ใช้ในการผลิตลดลง วัสดุคงคลังลดลง และของเสียในกระบวนการผลิตลดลง

อย่างไรก็ตามความแปรปรวน (Variance) ของกระบวนการผลิตเป็นสิ่งที่กำจัดได้ยากและต้องการเครื่องมือในการเฝ้าติดตาม โดยเฉพาะเมื่อต้องพัฒนาไปเป็นกระบวนการผลิตแบบอัตโนมัติ ความเที่ยงตรง (Accuracy) และความแม่นยำ

(Precision) ของกระบวนการเป็นสิ่งจำเป็นที่สุด จึงต้องจำกัดความแปรปรวนให้มากที่สุด ดังนั้นในขั้นตอนถัดมาจึงต้องใช้กิจกรรมซิกซ์ซิกม่าที่ใช้เครื่องมือทางสถิติในการแก้ปัญหาคุณภาพและลดความความแปรปรวนในทุกกระบวนการ ซึ่งขั้นตอนมีดังนี้

ขั้นที่ 6 Define (ระบุปัญหา)

แนวคิด 6.1 ระบุปัญหาคุณภาพ ได้แก่ ของเสียในกระบวนการผลิต ของเสียหรือปัญหาที่ร้องเรียนจากลูกค้า

แนวคิด 6.2 ระบุกระบวนการที่มีความสามารถน้อยกว่าหกซิกม่าหรือ $c_{pk} < 2.0$

เครื่องมือ: ข้อมูลและแผนภาพทางสถิติ c_p , c_{pk}

ขั้นที่ 7 Measure (ตัววัด)

แนวคิด 7.1 ระบุคุณลักษณะที่เป็นปัญหาหรือคำตอบสนอง (ตัวแปรตาม: Y)

แนวคิด 7.2 ทวนสอบระบบการวัด (Measuring System Analysis; MSA)

แนวคิด 7.3 ทำการวัดคุณลักษณะของตัวแปรตาม: Y เพื่อเป็นค่าพื้นฐาน (Baseline) และตั้งเป้าหมายที่สอดคล้องกับบริษัทหรือลูกค้า

เครื่องมือ: แผนภูมิการไหล (Process flow) แผนภูมิแกงปลา ข้อมูลและแผนภาพทางสถิติ แผนภูมิการกระจายแบบจำลองการถดถอย (Regression model) c_p , c_{pk} ฮิสโตแกรม ระบบการวัด (MSA)

ขั้นที่ 8 Analyze (วิเคราะห์)

แนวคิด 8.1 รวบรวมปัจจัยทั้งหมดในแผนภูมิการไหล ที่มีผลต่อความแปรปรวนของคุณลักษณะ Y

แนวคิด 8.2 วิเคราะห์ปัจจัยหลัก (ตัวแปรอิสระ: X 's) ที่มีผลต่อความแปรปรวนของคุณลักษณะ Y

เครื่องมือ: แผนภูมิการไหล แผนผังแกงปลา แผนภูมิ IPO (Input-process-output), FMEA (Failure mode effect analysis), ANOVA, DOE

ในขั้นตอนนี้ต้องทำให้ปัจจัยต่างๆในกระบวนการอยู่ในสถานะควบคุมได้ (ตัวแปรควบคุม: C) สำหรับตัวแปรที่ควบคุมไม่ได้ (Noise: N) ควรจะส่งผลกระทบต่อคุณลักษณะ Y น้อยที่สุด ดังในแผนภาพ IPO ในรูปที่ 1

ขั้นที่ 9 Improve (ปรับปรุง)

แนวคิด 9.1 หาความสัมพันธ์ระหว่างปัจจัยหลัก (X 's) และคุณลักษณะ Y

แนวคิด 9.2 หาเงื่อนไขที่เหมาะสม (Optimal conditions) ของปัจจัยหลัก (X 's)

แนวคิด 9.3 ทดสอบเพื่อยืนยันเงื่อนไขในกระบวนการผลิตจริง

เครื่องมือ: FMEA (Failure mode effect analysis), ANOVA, DOE, Optimization software, ข้อมูลและแผนภาพทางสถิติ

ในขั้นตอนนี้ เครื่องมือที่ได้กล่าวมาสามารถให้รูปแบบของความสัมพันธ์ได้ เช่น ความสัมพันธ์ถดถอยเชิงเส้นเชิงพหุ ซึ่งมีรูปแบบเป็นดังนี้

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_n X_n \quad (8)$$

สำหรับกรณีที่ใช้แผนภูมิ FMEA ในการวิเคราะห์หาปัจจัยหลัก (X 's) ในแผนภูมินี้มีค่าดัชนีลำดับความเสี่ยง (Risk Priority Number: RPN) เป็นตัวบ่งชี้บอกถึงลำดับที่ต้องแก้ไขก่อนหรือหลัง ปัจจัยหลัก (X 's) สามารถหาได้จากค่า RPN นี้

ขั้นที่ 10 Control (ควบคุม)

แนวคิด 10.1 นำไปปฏิบัติในกระบวนการผลิต

แนวคิด 10.2 สร้างระบบควบคุมด้วยข้อมูลและภาพสำหรับดัชนีตัววัดหรือตัวแปรหลักอื่นๆ

เครื่องมือ: คู่มือทำงานที่เป็นมาตรฐาน แผนภูมิควบคุม (Control charts) แผนภูมิแสดงด้วยภาพ

เมื่อมาถึงขั้นตอนนี้ทุกกระบวนการผลิตควรจะมีค่าดัชนีความสามารถของกระบวนการ $c_{pk} \geq 2.0$ ขึ้นไป รวมถึงทุกตัวแปรหลัก X 's และ ตัวแปรตาม Y ดังในรูปที่ 1 ควรได้รับการควบคุมและติดตามด้วยแผนภูมิควบคุม (Control Chart) กิจกรรมที่เหลืออยู่ก็จะเหลือประเภทที่มีคุณค่า (Value added) และไม่มีคุณค่า (Non-value added) แต่ยังคงต้องมี เช่น การตรวจสอบ เป็นต้น กระบวนการทั้งหมดจะเป็นต้นแบบของการออกแบบ กระบวนการผลิตแบบสลิ้อัตโนมติ ที่มีขั้นตอนเริ่มต้นดังนี้

ขั้นที่ 11 D-Define (กำหนด)

แนวคิด 11.1 กำหนดเป้าหมาย ค่าใช้จ่าย เวลาต้นทุน

เครื่องมือ: Takt time, Cycle time, OEE, VSM, ROI

ขั้นที่ 12 D-Measure (กำหนด)

แนวคิด 12.1 ระบุกระบวนการที่ต้องทำเป็นระบบอัตโนมัติ

แนวคิด: 12.2 ระบุขั้นตอนการทำงานอย่างกว้างๆ รวมถึงเป้าหมายของดัชนีตัววัดในกระบวนการนั้นๆ

เครื่องมือ: Takt time, Cycle time, OEE, VSM ตารางงานมาตรฐานผสม แผนภูมิแท่งรวมงาน

ขั้นที่ 13 D-Analyze (วิเคราะห์)

แนวคิด 13.1 ออกแบบขั้นตอนการทำงานย่อย

แนวคิด 13.2 เลือกสรรอุปกรณ์เครื่องจักรสำหรับแต่ละขั้นตอนย่อย

แนวคิด 13.3 ออกแบบการบูรณาการระบบผลิตแบบอัตโนมัติ (ทางด้านแมคคาทรอนิกส์และ IoT)

เครื่องมือ: เครื่องมือวิเคราะห์ทางวิศวกรรม Takt time, Cycle time อุปกรณ์ทางด้านแมคคาทรอนิกส์และ IoT

ขั้นที่ 14 D-Design (แนวคิดการออกแบบ)

แนวคิด 14.1 ได้แนวคิดการออกแบบ (Automated concept Design)

แนวคิด 14.2 ทดสอบด้วยการใช้ซอฟต์แวร์การจำลอง

แนวคิด 14.3 ทดสอบในกระบวนการผลิตจริง (Physical Simulation)

เครื่องมือ: ซอฟต์แวร์การจำลอง Takt time, Cycle time, OEE, VSM

ขั้นที่ 15 D-Implement (ปฏิบัติ)

แนวคิด 15.1 แบ่งแนวคิดการออกแบบ ออกเป็นการปฏิบัติ เป็นกระบวนการกึ่งอัตโนมัติหลายขั้นตอน

แนวคิด 15.2 ลงมือปฏิบัติในแต่ละขั้นตอน ตามด้วยกิจกรรมอื่น (ขั้นที่ 1-5) และซิกซ์ซิกมา (ขั้นที่ 6-10)

เครื่องมือ: Takt time, Cycle time, OEE, VSM

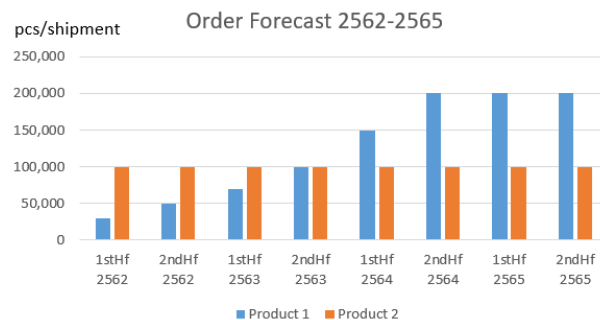
อย่างไรก็ตามในกระบวนการผลิตแบบอัตโนมัติซึ่งประกอบด้วยเครื่องจักรและอุปกรณ์ที่หลากหลายมาทำงานร่วมกัน ความสูญเสีย (Waste) และความสูญเสีย (Losses) ที่เกิดขึ้นก็จะเกี่ยวเนื่องกับการทำงานของอุปกรณ์และเครื่องจักรเหล่านี้เป็นส่วนใหญ่ ดังนั้นกิจกรรมด้านการบำรุงรักษาเครื่องจักรจึงเป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งสะท้อนผ่านดัชนีวัดประสิทธิผลโดยรวมของเครื่องจักร (Overall Equipment Effectiveness; OEE) ดังในหัวข้อ 2.4.1

4. กรณีศึกษา

เป็นการศึกษาชิ้นส่วนงานขึ้นรูป (Thanachotanankul et al., 2020) ซึ่งเป็นกระบวนการขึ้นรูปแผ่นโลหะชิ้นส่วนประกอบของรถยนต์ไฟฟ้าที่จะส่งต่อไปยังส่วนงานเชื่อมซึ่งเป็นส่วนงานถัดไป ผู้บริหารต้องการให้ปรับปรุงเพื่อเพิ่มผลผลิต (Productivity) และลดความสูญเสีย รองรับคำสั่งซื้อที่จะเพิ่มขึ้นในอนาคต ซึ่งทีมงานได้ใช้ขั้นตอนในการปรับปรุงดังต่อไปนี้

ขั้นที่ 1 L-Define (ระบุคุณค่า)

ลูกค้าของบริษัทผลิตรถยนต์ไฟฟ้าได้ส่งความต้องการของ Product 1 ล่วงหน้า 3 ปีดังในรูปที่ 4 เพื่อให้ทางโรงงานได้ปรับปรุงความสามารถของกระบวนการผลิต



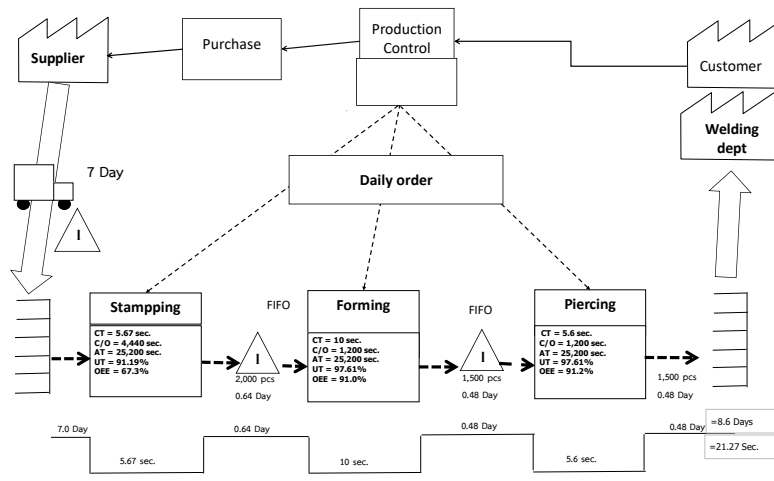
รูปที่ 4 ปริมาณการสั่งซื้อจากลูกค้า

ด้วยปริมาณคำสั่งซื้อที่มากขึ้น กระบวนการขึ้นรูปของ Product 1 ซึ่งประกอบด้วย 3 กระบวนการหลัก การปั๊ม (Stamping) การขึ้นรูป (Forming) และ การเจาะ (Piercing) ตามลำดับ จะต้องปรับเปลี่ยนค่าดัชนีการวัดใหม่ให้สอดคล้อง อันได้แก่ Lead time, Takt time, Cycle time, OEE เป็นต้น ขั้นที่ 2 L-Measure (ดัชนีวัดค่าพื้นฐาน)

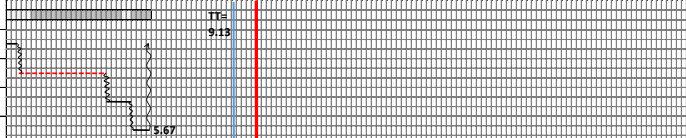
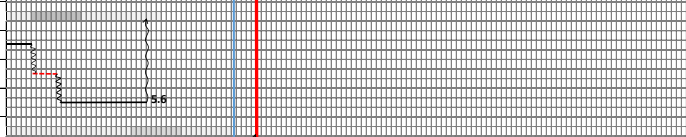
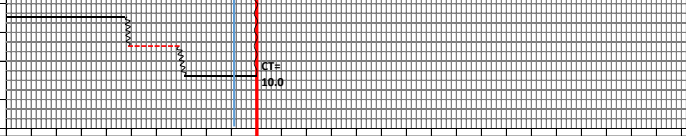
ทำการวัดดัชนีตัววัดในแต่ละกระบวนการย่อยใน VSM ดังในรูปที่ 5 ได้แก่ Lead time, Cycle time, WIP ระหว่างกระบวนการ และ OEE จากนั้นจัดทำตารางงานมาตรฐานผสมดังในรูปที่ 6 ที่มี Takt time 9.13 วินาที และ Cycle time 10.00 วินาที แผนภูมิแท่งรวมงาน ดังในรูปที่ 7 ซึ่ง Cycle time มีค่ามากกว่า Takt time และค่า OEE ดังในตารางที่ 4 ซึ่งกระบวนการปั๊มมีค่า 67.3% เป็นค่าพื้นฐาน (Baseline) และตั้งเป้าหมายการปรับปรุงให้สอดคล้องเป้าหมายของบริษัทหรือลูกค้า

ตารางที่ 4 ค่าดัชนีประสิทธิภาพเครื่องจักรก่อนปรับปรุง (OEE)

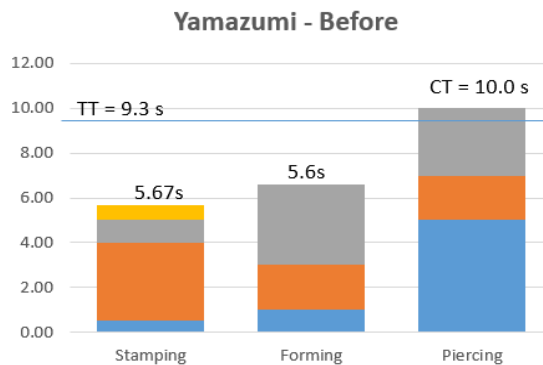
	Stamping	Forming	Piercing
A	67.7%	92.7%	92.9%
P	99.4%	98.1%	98.1%
Q	100%	100%	100%
OEE	67.3%	91.0%	91.2%



รูปที่ 5 สายธารคุณค่าก่อนปรับปรุง

LoGo		Before Standardized Work Combination Table																						
Part No.	Description	Needed Units per Shift			Unit	Date: December 20,2019	Required Units per Shift:			xxx sec	 Hand  Walk  Auto													
Process		Takt Time			Sec	Area:	Press	Line	Takt Time: 9.13 sec															
Sequence		Work Elements			Hand	Auto	Walk	Seconds																
1	Process Stamping																							
	1	กดปุ่มเพื่อเริ่มชิ้นงาน	0.5																					
	2	เครื่องปั๊มชิ้นงาน	3.5																					
	3	Operator รับชิ้นงานและ Visual Inspection	1																					
	4	นำชิ้นงานลงรถเข็น	0.67																					
3	Process forming 1																							
	1	หยิบชิ้นงานเข้าเครื่อง Forming1	1																					
	2	กดปุ่มให้เครื่อง Forming1 ทำงาน	1																					
	3	Operator หยิบชิ้นงานวางบนราว	3.6																					
2	Process Piercing 2																							
	1	หยิบชิ้นงานเข้าเครื่อง Piercing 2	5																					
	2	กดปุ่มให้เครื่อง Piercing2 ทำงาน	2																					
	3	Operator หยิบชิ้นงานวางเรียงลงกระบะ	3																					
Totals																								
			14.77	6.5																				
			29.97																					

รูปที่ 6 ตารางงานมาตรฐานผสมก่อนปรับปรุง



รูปที่ 7 แผนภูมิแท่งรวมงานก่อนปรับปรุง

ขั้นที่ 3 L-Analyze (วิเคราะห์)

วิเคราะห์คุณลักษณะการผลิตแบบสั้น หาความสูญเสีย (7 Wastes) ของทุกกระบวนการใน VSM วิเคราะห์ตารางงานมาตรฐานผสมและสมดุลกระบวนการผลิต

จากข้อมูล OEE พบว่ากระบวนการปั๊ม มีค่าต่ำสุดโดยเฉพาะค่าเวลาปฏิบัติงานที่มีอยู่ (Availability) 67.7% เมื่อนำข้อมูลการปฏิบัติงานดังในตารางที่ 5 มาวิเคราะห์พบว่าเวลาที่เครื่องจักรหยุด (Down time) คิดเป็น 80.9% ได้แก่ รอพนักงาน รอวัตถุดิบ เวลาเตรียมการเริ่มต้นผลิต และรอแผนผลิต ซึ่งต้องระดมสมองทำไคเซ็นต่อไป

ตารางที่ 5 ตารางเวลาที่เครื่องหยุดทำงาน
OEE analysis - Stamping

Down time	Time (s)	Down %	Accum %
รอพนักงาน	1,660	33.4	33.4
รอวัตถุดิบ	1,085	21.8	55.2
เวลา set up	770	15.5	70.7
รอแผนผลิต	510	10.3	80.9
รอภาชนะ	355	7.1	88.0
ของเสีย	285	5.7	93.8
การทำงาน	280	5.6	99.4
รอโพลีคลีฟ	15	0.3	99.7
เครื่องจักร	15	0.3	100.0
รวม	4,975	100.0	100.0

จากการลงพื้นที่ดูกระบวนการผลิตทั้ง 3 กระบวนการและเมื่อเปรียบเทียบการผลิต ณ ปัจจุบันกับคุณลักษณะแบบสั้นสามารถสรุปได้ดังในตารางที่ 6 ซึ่งพบว่าในหลายกิจกรรมที่ 2, 3, 4 และ 5 จำเป็นต้องได้รับการปรับปรุง ในขณะที่ความสูญเสีย (Wastes) ที่ตรวจพบสามารถสรุปได้ดังในตารางที่ 7 จะพบว่าในหลายหัวข้อ 2, 3, 4 และ 5 จำเป็นต้องได้รับการปรับปรุง ซึ่งต้องระดมสมองทำไคเซ็นต่อไป

ตารางที่ 6 ตารางเปรียบเทียบการผลิต ณ ปัจจุบันกับคุณลักษณะแบบสั้น

คุณลักษณะการผลิตแบบสั้น	ลักษณะการผลิต ณ ปัจจุบัน		
	Stamping	Forming	Piercing
1. ผลิตแบบทันเวลา	ไม่	ไม่	ไม่
2. จำนวนผลิต	มาก	มาก	มาก
3. ขจัดความสูญเสีย	มีค่อนข้างมาก	มีค่อนข้างมาก	มีค่อนข้างมาก
4. จัดสมดุลการไหล	5.67 s	5.60 s	10.0 s
5. กระบวนการไหลแบบต่อเนื่อง	ผลิตแล้วหยุดเป็นช่วงๆ	ผลิตแล้วหยุดเป็นช่วงๆ	ผลิตแล้วหยุดเป็นช่วงๆ
6. กิจกรรมไคเซ็น	1 ครั้ง / เดือน	1 ครั้ง / เดือน	1 ครั้ง / เดือน
7. มีการผลิตแบบปรับ	ใช่	ใช่	ใช่

ตารางที่ 7 ความสูญเสีย (7 Wastes)

Waste	กระบวนการผลิต ณ. ปัจจุบัน		
	Stamping	Forming	Piercing
1. การผลิตมากเกินไป	ใช่	ใช่	ใช่
2. การรอคอย	หยุดเครื่องเพื่อให้นักงานจัดเรียงชิ้นงาน	หยุดเครื่องเพื่อให้นักงานจัดเรียงชิ้นงาน	หยุดเครื่องเพื่อให้นักงานจัดเรียงชิ้นงาน
3. ระยะทางขนส่งมากเกินไป	สถานที่เก็บอยู่ไกล	สถานที่เก็บอยู่ไกล	สถานที่เก็บอยู่ไกล
4. กระบวนการขาดประสิทธิภาพ	มีหลายขั้นตอนการทำงานต้องหยุดเครื่อง	การไหลและเอาชิ้นงานเข้าออกต้องหยุดเครื่อง	การไหลและเอาชิ้นงานเข้าออกต้องหยุดเครื่อง
5. WIP มากเกินไป	2,000 ชิ้น	2,000 ชิ้น	2,000 ชิ้น
6. การเคลื่อนไหวยที่ไม่จำเป็น	สถานที่จัดเรียงอยู่ไกลจากจุดที่เครื่องทำงาน	ไม่มี	ไม่มี
7. ของเสีย	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี

ขั้นที่ 4 L-Improve (แนวทางแก้ปัญหา)

เสนอแนวทางแก้ปัญหาและเงื่อนไขที่เหมาะสมใหม่ ที่ดัชนีตัววัดได้ตามเป้าหมาย ทำการจำลอง ทำการทดสอบและยืนยันในกระบวนการผลิตจริง

จากการระดมสมอง แนวทางแก้ปัญหาแบบการปรับปรุง (Improvement) หรือระยะแรก ซึ่งเน้นสามารถทำได้ในทันที เพื่อเพิ่มผลผลิต (Productivity) ลดเวลาหยุดเครื่อง ลด WIP ระหว่างกระบวนการ ได้ถูกรวบรวมในแบบฟอร์มไคเซ็น ดังในตารางที่ 8

ขั้นที่ 5 L-Control (ควบคุม)

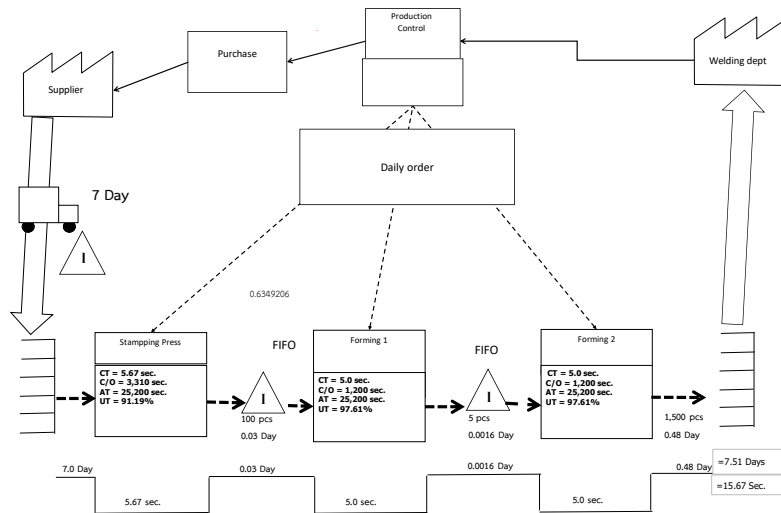
นำแนวความคิดการปรับปรุง (Improvement) ไปปฏิบัติในกระบวนการผลิตและสร้างระบบควบคุมด้วยข้อมูลและภาพ

ในขั้นตอนนี้ได้ทำการเขียนมาตรฐานการทำงาน และยืนยันดัชนีตัววัดและแผนภูมิต่างๆ ดังในรูปที่ 8, 9 และ 10 ตามลำดับ

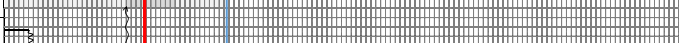
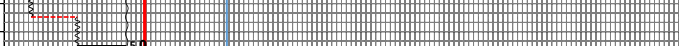
ในกระบวนการปั๊ม หลังจากทำการปรับปรุง ค่าดัชนีตัววัด Lead time ลดลงเหลือ 7.51 วัน Cycle time ลดลงเหลือ 5.67 วินาที, ค่า OEE ของกระบวนการปั๊ม เพิ่มขึ้นเป็น 73.39% WIP ระหว่างกระบวนการปั๊มและกระบวนการขึ้นรูป ลดลงเหลือ 100 ชิ้น และ ระหว่างกระบวนการขึ้นรูปและกระบวนการเจาะ ลดลงเหลือ 5 ชิ้น

ตารางที่ 8 แบบฟอร์ม Kaizen Action Plan

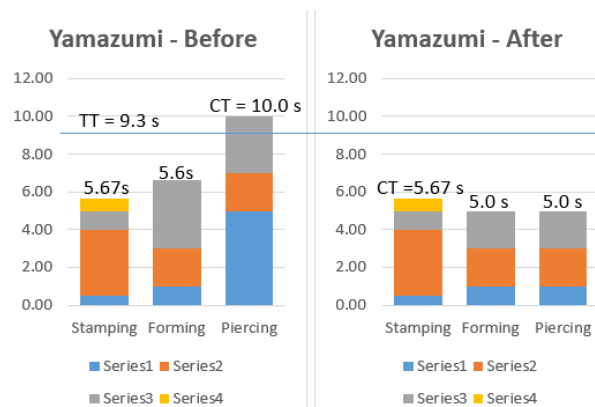
KAIZEN ACTION PLAN						Department: <u> Xxxxx </u>
						Person in charge: <u> Mr. Xxxxxx </u>
No.	Implement Date		Kaizen Action items		Person in charge	Remark
	Start	Finish	Problem	Countermeasure		
1	กพ. 2563	พค. 2563	เครื่อง 500 ต้น: เมื่อผลิตชิ้นงานครบ 30 ชิ้น พนักงานจะหยุดเครื่องเพื่อนำชิ้นงานใส่ตะกร้า 57 วินาที	1. ทำการเดินเครื่องโดยไม่มีการหยุดพัก 2. เพิ่มพนักงานในการรับและจัดเรียงชิ้นงาน	Mr. Xxxx	ปรับปรุงแบบสิ้น (Improvement)
	มีค. 2563	On-going		3. นำระบบรับชิ้นงานแทนพนักงาน, โหลดและอันโหลดแบบอัตโนมัติ 4. ติดตั้งสายพานลำเลียงให้ชิ้นงานไหลอัตโนมัติ	Mr. Xxxx	Semi- Automation
2	กพ. 2563	มีค. 2563	เครื่อง 500 ต้น: พนักงานใช้เวลาเปลี่ยนแม่พิมพ์ 75 นาที	1. ติดตั้ง Stopper ช่วยกำหนดตำแหน่งในการ Setting แม่พิมพ์บน Bolster	Mr. Xxxx	ปรับปรุงแบบสิ้น (Improvement)
	On-going	On-going		2. ออกแบบระบบการเปลี่ยนแม่พิมพ์แบบกึ่งอัตโนมัติ	Mr. Xxxx	Semi- Automation
3	กพ. 2563	พค. 2563	เครื่อง 500 ต้น: เครื่องต้องหยุดเนื่องจาก Scrap ไม่ไหลออกจากแม่พิมพ์ระหว่างทำงาน	เพิ่มอุปกรณ์ Vibrator เพื่อให้เกิดการเขย่าของถาดและชิ้นงาน	Mr. Xxxx	ปรับปรุงแบบสิ้น (Improvement)
4	มีค. 2563	On-going	มี WIP ระหว่างกระบวนการจำนวนมาก	1. ลดจำนวน WIP ลง 1.1 ระหว่าง Press และ Forming ลดจาก 1,500 เป็น 100 ชิ้น 1.2 ระหว่าง Forming และ Piercing ลดจาก 1,500 เป็น 5 ชิ้น 2. เพิ่มพนักงานและจำนวนรอบในการเคลื่อนย้าย WIP	Mr. Xxxx	ปรับปรุงแบบสิ้น (Improvement)
	On-going	On-going		3. ปรับกระบวนการผลิตให้มีการไหลแบบต่อเนื่อง 3.1 ออกแบบแผนผัง (Layout) ให้กระบวนการไหลแบบต่อเนื่อง จากเครื่อง Press, Forming, Piercing และลูกค้ำ Welding 3.2 ติดตั้งสายพานลำเลียงให้ชิ้นงานไหลอัตโนมัติ	Mr. Xxxx	Semi- Automation



รูปที่ 8 สายธารคุณค่าหลังปรับปรุง (Improvement)

LoGO		Before Standardized Work Combination Table																														
Part No.	Description	Needed Units per Shift	Unit	Date: December 20, 2019	Required Units per Shift	xxx	sec																									
Process		Takt Time Time(Sec.)	Sec	Area:	Press Line	Takt Time: 9.13	sec																									
Sequence	Work Elements	Hand	Auto	Walk	Seconds																											
Process Stamping																																
1	1 กดปุ่มเริ่มขึ้นงาน	0.5																														
	2 เครื่องขึ้นงาน	3.5																														
	3 Operator รับชิ้นงานและ Visual Inspection	1																														
	4 เก็บชิ้นงานลงรถเข็น	0.67																														
Process forming 1																																
3	1 หยิบชิ้นงานเข้าเครื่อง Forming1	1																														
	2 กดปุ่มให้เครื่อง Forming1 ทำงาน	1																														
	3 Operator หยิบชิ้นงานวางบนราง	3																														
Process Piercing 2																																
2	1 หยิบชิ้นงานเข้าเครื่อง Piercing 2	1																														
	2 กดปุ่มให้เครื่อง Piercing2 ทำงาน	2																														
	3 Operator หยิบชิ้นงานวางเรียงลงกระบะ	2																														
Totals		9.17	6.5																													
		15.67																														

รูปที่ 9 ตารางงานมาตรฐานผสมหลังปรับปรุง (Improvement)



รูปที่ 10 แผนภูมิแท่งรวมงานหลังปรับปรุง (Improvement)

สำหรับขั้นตอนการทำงานในกระบวนการขึ้นรูปและกระบวนการเจาะ มีการปรับปรุงโดยลดเวลาทำงานลงเหลือ 5.0 และ 5.0 วินาที ตามลำดับ ทำให้ Cycle time เดิมอยู่ที่กระบวนการเจาะ ย้ายไปอยู่ที่กระบวนการปั๊ม ที่เวลา 5.67 วินาที ทำให้เหลือช่องว่างเมื่อเทียบเวลากับ Takt time เป็น $9.13 - 5.67 = 3.46$ วินาที ซึ่งสามารถรองรับการเพิ่มยอดการผลิตได้ทันที

ในแผนภูมิแท่งรวมงานหลังปรับปรุง ดังในรูปที่ 10 ซึ่งมี Takt time และ Cycle time ต่างกันค่อนข้างมาก เนื่องจากเป็นเครื่องจักรขนาดใหญ่ ทางโรงงานยังคงต้องการให้คงไว้ที่ 3 กระบวนการเช่นเดิม แต่รอยอดสั่งผลิตที่เพิ่มขึ้นแทน

ขั้นตอนถัดไปจะต้องดูในเรื่องความสามารถของกระบวนการทั้ง 3 กระบวนการ ในกรณีนี้ ไม่มีของเสียที่เกิดจากทั้ง 3 กระบวนการ (OEE มี Quality = 100%) ค่าดัชนีกระบวนการ $C_{pk} \geq 2.0$ ในทุกกระบวนการ จึงมายังขั้นตอนสินอัตโนมัติ ขั้นที่ 11-15 ดังต่อไปนี้

ขั้นที่ 11 D-Define (กำหนด)

กำหนดเป้าหมาย เวลาต้นทุน

รองรับยอดคำสั่งซื้อที่จะเพิ่มในอีก 2 ปีข้างหน้า ด้วยเวลาต้นทุนภายใน 1 ปี

ขั้นที่ 12 D-Measure (ระบุ)

ระบุกระบวนการที่ต้องทำเป็นระบบอัตโนมัติ ระบุขั้นตอนการทำงานอย่างกว้างๆ รวมถึงเป้าหมายของดัชนีตัววัดในกระบวนการนั้นๆ

ลด Takt time ให้ห่างจาก Cycle time 9.3 วินาทีประมาณ 10-15% หรือ 7.5 วินาที ที่เพิ่ม OEE ด้วยการลดเวลาการเปลี่ยนแม่พิมพ์ ลดพนักงานที่ต้องเสริมเพื่อให้กระบวนการผลิตไหลอย่างต่อเนื่อง

ขั้นที่ 13 D-Analyze (วิเคราะห์)

ออกแบบขั้นตอนการทำงานย่อย เลือกสรรอุปกรณ์เครื่องจักรสำหรับแต่ละขั้นตอนย่อย ออกแบบการบูรณาการระบบผลิตแบบอัตโนมัติ

หลังจากที่ได้ปรึกษากับทางทีมบริหารถึงต้นทุนและความจำเป็น ตกผลึกได้ว่าควรจะเป็นเพียงกระบวนการผลิตแบบกึ่งอัตโนมัติ (Semi-Automation line) โดยจะมีพนักงานประจำเครื่องลดลงเหลือเพียงเครื่องละ 1 คน ลดการขนย้ายชิ้นงานในแต่ละกระบวนการ มีการผลิตที่ไหลอย่างต่อเนื่อง และสุดท้ายเพิ่มค่า OEE ของกระบวนการปั๊มด้วยการออกแบบการเปลี่ยนแม่พิมพ์แบบกึ่งอัตโนมัติ ซึ่งจะต้องลดเวลาเปลี่ยนให้เหลือ 24 นาที หรือเพิ่ม OEE ของกระบวนการนี้เป็น 82.5% ซึ่งแนวทางปฏิบัติปรับเปลี่ยนเป็นกระบวนการผลิตแบบกึ่งอัตโนมัติมีอยู่ในแบบฟอร์มไคเซ็น ดังในตารางที่ 8

ขั้นที่ 14 D-Design (แนวความคิดการออกแบบ)

ได้แนวความคิดการออกแบบ (Automated concept Design) ทดสอบด้วยการใช้ซอฟต์แวร์แบบจำลอง และทดสอบในกระบวนการผลิตจริง

หลังจากได้แนวความคิดการออกแบบของระบบบูรณาการของทั้ง 3 กระบวนการผลิตในมุมมองทางด้านแมคคาทรอนิกส์ ควรทดสอบด้วยการใส่พารามิเตอร์ เช่น Cycle time, WIP ระหว่างกระบวนการลงในซอฟต์แวร์การจำลอง ซึ่งในปรับปรุงนี้ได้ใช้ซอฟต์แวร์ Gdfindi ของสาขาวิศวกรรมอุตสาหการและระบบโลจิสติกส์ สถาบันเทคโนโลยีนานาชาติสิรินธร มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ได้ผลลัพธ์ดังในรูปที่ 11

Production Line Parameters

Process Name	Station Name	Work Time (sec)	Initial Input Inventory
Stamping	Stamping_1	5.00	0.00
Buffer 1	Stamp_WIP	0.00	100.00
Forming	Forming_2	3.00	0.00
Buffer 2	form_WIP	0.00	5.00
Piercing	Piercing_3	3.00	0.00

Production Rendering Result

Production Avg (/hour)	Production Min (/hour)	Production Max (/hour)
656.4	656.4	656.40

Station Name	Operation Rate Avg	Inventory Avg
Stamping_1	82.50	1.00
Stamp_WIP	0.00	0.00
Forming_2	91.05	12.92
form_WIP	0.00	0.00
Piercing_3	91.17	1.90

รูปที่ 11 ผลลัพธ์การจำลองการไหลด้วยซอฟต์แวร์ Gdfindi

ด้วยซอฟต์แวร์จำลอง เมื่อใส่ค่าพารามิเตอร์ Cycle time ของแต่ละกระบวนการ และค่า WIP เริ่มต้น จะได้ค่าประมาณยอดผลิตต่อชั่วโมงที่ 656.4 ชิ้นซึ่งเป็นไปตาม Takt time ค่าใหม่ที่ได้ปรับ รวมถึงค่า WIP เฉลี่ยระหว่างกระบวนการผลิตลดลงเป็น 1, 13 และ 2 ชิ้นตามลำดับ ซึ่งเราสามารถทำนายได้ก่อนลงมือปฏิบัติจริง ซึ่งกระบวนการปรับปรุงต่อจากนี้จะอยู่ในระหว่างดำเนินการ

ขั้นที่ 15 D-Implement (ปฏิบัติ)

แบ่งแนวความคิดการออกแบบ ออกเป็นการปฏิบัติเป็นกระบวนการกึ่งอัตโนมัติหลายขั้นตอน

จากแนวทางปฏิบัติปรับเปลี่ยนเป็นกระบวนการผลิตแบบกึ่งอัตโนมัติมีอยู่ 3 หัวข้อหลัก โดยเราสามารถแบ่งปฏิบัติเป็น 3 ช่วง จากตารางที่ 8 เริ่มด้วยในกระบวนการปั๊ม (Stamping) ในข้อ 3. นำระบบปรับชิ้นงานแทนพนักงาน, นำเข้า (Load) และนำออก (Unload) แบบอัตโนมัติ และ ข้อ 4. ติดตั้งสายพาน

ลำเลียงให้ชิ้นงานไหลอัตโนมัติ เมื่อกระบวนการนิ่งแล้วก็เริ่มปฏิบัติในหัวข้อที่ 3 ซึ่งเป็นการไหลอย่างต่อเนื่องของทั้ง 3 กระบวนการ ข้อ 3.1 ออกแบบแผนผัง (Layout) ให้กระบวนการไหลแบบต่อเนื่อง จากกระบวนการปั๊ม กระบวนการขึ้นรูป กระบวนการเจาะ และลูกค้ำซึ่งคือกระบวนการเชื่อม ข้อ 3.2 ติดตั้งสายพานลำเลียงให้ชิ้นงานไหลอัตโนมัติ และสุดท้าย หัวข้อที่ 2 ติดตั้งระบบการเปลี่ยนแม่พิมพ์แบบกึ่งอัตโนมัติสำหรับกระบวนการปั๊มซึ่งทำให้ค่าดัชนี OEE เพิ่มขึ้นเป็น 82.5%

5. ผลวิจัย

การดำเนินงานตามขั้นตอนที่ 1 ถึงขั้นตอนที่ 14 ได้เสร็จสิ้นอยู่ที่การทำการจำลองโดยซอฟต์แวร์สำหรับกระบวนการกึ่งอัตโนมัติ ขั้นตอนที่เหลือคือขั้นตอนที่ 14 และขั้นตอนที่ 15 ขึ้นอยู่กับความพร้อมของทางผู้ประกอบการในการดำเนินการต่อ แผนการปรับปรุงเป็นไปตามแบบฟอร์มไคเซ็นดังในตารางที่ 8 และผลลัพธ์ที่ได้ถูกสรุปดังในตารางที่ 9 ซึ่งสามารถสรุปได้ดังต่อไปนี้

จากการปรับปรุงการผลิตแบบสลับ ตามขั้นตอนที่ 1 ถึงขั้นตอนที่ 5 เป็นการลดความสูญเสียเปล่าให้มากที่สุด ซึ่งสรุปกิจกรรมได้ดังนี้

☐ ทำการเดินเครื่องปั๊มโดยไม่มีการวางแผนการหยุดระหว่างผลิต

☐ ลดจำนวน WIP ระหว่างกระบวนการปั๊ม การขึ้นรูปและการเจาะ

☐ เพิ่มพนักงานขนย้ายชิ้นงาน (WIP) ระหว่างกระบวนการทำให้การผลิตเกิดการไหลต่อเนื่อง

☐ ลดเวลาการเตรียม (Set-up time) ด้วยการติดตั้งตัวหยุด (Stopper) และแก้ไขการหยุดทำงานของเครื่องจักร (Breakdown time) ด้วยการเพิ่มอุปกรณ์การสั่น (Vibrator)

ผลลัพธ์ของการปรับปรุง (Improvement) สามารถลด Cycle time ลงจาก 10.00 วินาที เป็น 5.67 วินาที ลด WIP

ระหว่างกระบวนการลงจาก 2,000 ชิ้น เป็น 100 ชิ้น ค่าดัชนี OEE ของกระบวนการปั๊ม เพิ่มขึ้นจาก 67.3% เป็น 73.3% โดยการเคลื่อนชิ้นงานระหว่างกระบวนการจำเป็นต้องใช้พนักงานและทำให้มีผลผลิต (Productivity) เพิ่มขึ้น 44% โดยมีงบลงทุน 4.36 หมื่นบาท (ไม่ได้รวมค่าใช้จ่ายของพนักงานที่มาช่วยขนย้าย)

ต่อมาเป็นการปรับปรุงด้านคุณภาพ โดยการใช้ซิกส์ซิกม่ากับกระบวนการที่มีค่าดัชนีความสามารถ $C_{pk} < 2.0$ เนื่องจากทั้ง 3 กระบวนการมีของเสียเป็นศูนย์ จึงไม่ต้องทำขั้นตอนที่ 6 ถึงขั้นตอนที่ 10

ในการปรับปรุงกระบวนการผลิตให้เป็นแบบอัตโนมัติตามขั้นตอนที่ 11 ถึง ขั้นตอนี่15 ทางโรงงานเลือกตามค่าผลตอบแทนการลงทุน (ROI) ซึ่งปรับปรุงให้เป็นกระบวนการกึ่งอัตโนมัติที่มีการไหลแบบต่อเนื่องของผลิตภัณฑ์ ลดพนักงานที่ทำหน้าที่เคลื่อนย้ายผลิตภัณฑ์ แต่ยังคงพนักงานประจำเครื่องอยู่ และลดเวลาของการเปลี่ยนแม่พิมพ์ลง ทีมงานนำเสนอแผนปรับปรุงที่ผ่านการจำลองด้วยซอฟต์แวร์ดังในขั้นตอนที่ 14 ซึ่งสรุปกิจกรรมได้ดังนี้

☐ นำระบบรับชิ้นงานแบบนำเข้าและนำออกแบบอัตโนมัติ (Automated Karakuri) แทนการทำงานของพนักงาน

☐ ติดตั้งสายพานลำเลียงให้ชิ้นงานไหลอัตโนมัติ

☐ ออกแบบระบบเปลี่ยนแม่พิมพ์แบบกึ่งอัตโนมัติ

☐ ออกแบบแผนผัง (Layout) ให้เป็นกระบวนการไหลแบบต่อเนื่องทั้ง 3 กระบวนการ

ผลลัพธ์ของการปรับเปลี่ยนเป็นกระบวนการกึ่งอัตโนมัติสามารถลด Cycle time ลงจาก 5.67 วินาที เป็น 5.00 วินาที ค่าดัชนี OEE ของกระบวนการปั๊ม เพิ่มขึ้นจาก 73.3% เป็น 82.5% และทำให้มีผลผลิต (Productivity) เพิ่มขึ้นจาก 44% เป็น 79% โดยมีงบลงทุน 1.32 ล้านบาท

ตารางที่ 9 ผลลัพธ์ที่ได้ตามขั้นตอนที่ 1 ถึงขั้นตอนที่ 14

คุณลักษณะการผลิตแบบสลิ	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง	กึ่งอัตโนมัติ
1. ผลิตแบบทันเวลาพอดี	ผลิตตามแผน	ผลิตตามแผน	ผลิตตามแผน
2. จำนวนผลิตต่อล๊อตน้อย	เยอะ	เยอะ	เยอะ
3. ขจัดความสูญเปล่า	มีค่อนข้างมาก	ลดลง	ลดลง
4. จัดสมดุลการไหล	CT = 10 วินาที	CT = 5.67 วินาที	CT = 5.0 วินาที
5. กระบวนการไหลแบบต่อเนื่อง	ผลิตแล้วหยุดเป็นช่วงๆ	ผลิตต่อเนื่องแต่ยังไม่สม่ำเสมอ	ผลิตต่อเนื่องอย่างสม่ำเสมอ
6. กิจกรรมไคเซ็น	ทุกเดือน	ทุกเดือน	ทุกเดือน
7. มีการผลิตแบบปรับเรียบ	แบบปรับเรียบ	แบบปรับเรียบ	แบบปรับเรียบ
Waste / Loss	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง	กึ่งอัตโนมัติ
1. การผลิตมากเกินไป	ผลิตตามแผน	ผลิตตามแผน	ผลิตตามแผน
2. การรอคอย	หยุดเครื่องเพื่อให้พนักงาน จัดเรียงชิ้นงาน	พนักงานขนย้ายชิ้นงาน	ชิ้นงานถูกลำเลียงบนสายพาน
3. การขนส่งระยะทางมากเกินไป	สถานที่เก็บอยู่ไกล	สถานที่เก็บอยู่ไกล	ไม่มีเนื่องจากปรับ Layout และใช้สายพานลำเลียง
4. กระบวนการขาดประสิทธิภาพ	มีหลายขั้นตอนการทำงานที่ ต้องหยุดเครื่อง	ยังเหลือการลดเวลาในการ เปลี่ยนแม่พิมพ์	ลดเวลาโดยใช้การเปลี่ยน แม่พิมพ์แบบอัตโนมัติ
5. WIP มากเกินไป	2,000 ชิ้น	100 ชิ้น	100 ชิ้น
6. การเคลื่อนไหวที่ไม่จำเป็น	สถานที่จัดเรียงอยู่ไกลจากจุด Stamp	มีพนักงานเคลื่อนย้ายชิ้นงาน	ไม่มีโดยชิ้นงานถูกลำเลียงบน สายพาน
7. ของเสียในกระบวนการ	ไม่มี	ไม่มี	ไม่มี
ดัชนีวัด (หลัก)	ก่อนปรับปรุง	หลังปรับปรุง	กึ่งอัตโนมัติ
Cycle time	10 วินาที	5.67 วินาที	5.0 วินาที
Inventory (Avg)	2,000 ชิ้น	100 ชิ้น	100 ชิ้น
OEE (Stamping)	67.3%	73.3%	82.5%
เวลาปฏิบัติงาน (A)	67.7%	73.7%	83.0%
ประสิทธิภาพเครื่องจักร (P)	99.4%	99.4%	99.4%
คุณภาพ (Q)	100.0%	100.0%	100.0%

6. สรุปผลวิจัย

การปรับปรุงกระบวนการผลิตด้วยการใช้การผลิตแบบลีน ตามด้วยการปรับปรุงความสามารถของกระบวนการด้วยการใช้ชิกล่า ชิกม่า แล้วจึงออกแบบเป็นกระบวนการผลิตแบบอัตโนมัติ ได้ถูกส่งเคราะห์เพื่อนำไปปฏิบัติประกอบไปด้วย 15 ขั้นตอน ทั้งนี้ก็เพื่อให้เข้าไปเป็นกรอบแนวคิดในการปรับปรุงกระบวนการผลิตได้อย่างประสบความสำเร็จมากที่สุด ขั้นตอนนี้ได้นำไปประยุกต์ใช้กับกรณีศึกษาในกระบวนการขึ้นรูปแผ่นโลหะของชิ้นส่วนของส่วนประกอบของรถยนต์ไฟฟ้า ซึ่งประกอบไปด้วยกระบวนการหลัก 3 กระบวนการ ประกอบด้วย กระบวนการขึ้นรูป และการเจาะ ตามลำดับ ผลลัพธ์จากการนำขั้นตอนไปใช้แบ่งเป็น 2 ระยะ ในระยะแรก การปรับปรุงสามารถปรับเปลี่ยนให้กระบวนการผลิตมีการไหลอย่างต่อเนื่อง สามารถลดความสูญเสียและความสูญเปล่า เช่นการหยุดไลน์การผลิต ลด WIP ระหว่างกระบวนการลง 95% ลด Cycle time ลง 43.3% ค่าดัชนี OEE ของกระบวนการขึ้นรูป เพิ่มขึ้น 6.0% โดยมีงบลงทุน 4.36 ล้านบาท ในระยะถัดมา การปรับเปลี่ยนเป็นกระบวนการขึ้นรูปอัตโนมัติ ซึ่งเป็นการเสนอแผนงานที่ผ่านการจำลองด้วยซอฟต์แวร์ สามารถลด Cycle time ลงอีก 11.8% และค่าดัชนี OEE ของกระบวนการขึ้นรูปเพิ่มขึ้นอีก 9.2% โดยมีงบลงทุน 1.32 ล้านบาท

ขั้นตอนการปรับปรุงทั้ง 15 ขั้นตอนเป็นแนวทางหลักที่มีตัววัดในทุกขั้นตอน โดยเฉพาะดัชนีการวัดความสามารถของกระบวนการผลิต ซึ่งบ่งบอกถึงความแปรปรวนของกระบวนการที่ต้องมีให้น้อยที่สุด อย่างไรก็ตามในขั้นตอนการออกแบบระบบแบบอัตโนมัติ (ขั้นตอนที่ 12 ถึงขั้นตอนที่ 14) สามารถที่จะปรับปรุงให้มีรายละเอียดในขั้นตอนการออกแบบระบบบูรณาการ (System Integration) ได้มากขึ้นต่อไป

การปรับเปลี่ยนกระบวนการผลิตจากสถานะปัจจุบันหรือยุคอุตสาหกรรม 3.0 ไปเป็นกระบวนการผลิตแบบกึ่งอัตโนมัติหรือแบบอัตโนมัติเต็มรูปแบบ มีค่าใช้จ่ายค่อนข้างสูงและจะเป็นประโยชน์อย่างมากกับผลิตภัณฑ์ที่มีคำสั่งซื้อปริมาณมากและค่อนข้างคงที่ อีกทั้งบุคลากรทั้งวิศวกรและพนักงานประจำเครื่องจักรจำเป็นต้องมีความรู้ด้านเทคนิคค่อนข้างดี ผู้ประกอบจึงควรเตรียมความพร้อมในทุกๆด้านก่อนจะทำการปรับเปลี่ยน

7. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณความรู้และประสบการณ์ที่ได้รับจากการเข้าอบรมหลักสูตร LASI SI Designer (Warrior) รุ่นที่ 5 และขอขอบคุณประสบการณ์ที่ได้รับจากทีมกลุ่มที่ 1 ในหลักสูตรนี้เช่นกัน ซึ่งจัดอบรมโดยสถาบันไทย-เยอรมัน ศูนย์กล้วยน้ำไท กรุงเทพฯ

8. เอกสารอ้างอิง

- Antony, J., Suder, V.M., Sreedharan, R., Chakraborty, A. & Gunasekaran, A. (2019). A systematic review of lean in healthcare: a global prospective. *International Journal of Quality & Reliability Management*, 36, 1370-1391.
- Dadashnejad, A. & Valmohammadi, C. (2019). Investigating the effect of value stream mapping on overall equipment effectiveness: a case study. *Total Quality Management & Business Excellence*, 30, 466-482.
- Dennis, P. (2015). *Lean production simplified* (3rd ed.). CRC Press.
- Department of Industrial Promotion and Denso International Asia. (2019). *Primary Course of Lean Automation System Integrators (LASI)*. Industrial Promotion Center Region 9.
- Hakimi, S. Zahraee, S.M. & Rohani, J.M. (2018). Application of Six-Sigma DMAIC methodology in plain yogurt production process. *International Journal of Lean Six Sigma*, 9, 562-578.
- Issarapong, N., Taengphukieo, R., To-on, P., Chareatrachai, U. & Khumla, P. (2019). Production time reduction using lean manufacturing concepts: a case study of radial tire manufacturing. *Apheit Journals*, 1, 76-90.
- Kolberg, D. & Zuhlke, D. (2015). Lean automation enabled by industry 4.0 technologies. IFAC-PapersOnline, 1870-1875.
- Kumar, S., Kumar, A. & Singh, B. (2018). Process improvement through Lean-Kaizen using value stream map: a cause study in India. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 96, 2687-2698.
- LASI Trainers. (2020). *LASI SI Designer (Warrior) Training*, Gen. 5. Thai-German Institute (Bangkok center), Klongnamtai.

- Lawton, T. (2007). *Implementing automation after making lean improvements*. <https://ui.customsearch.ai/hosted?q=implement%20atuomation&customCoNfig=4165927293&market=en-us&safeSearch=moderate>.
- Montgomery, D. C. (2013). *Introduction to statistical quality control* (7th ed.). John Wiley & Sons.
- Nafais, S. (2017). *Automated lean manufacturing*. https://www.researchgate.net/publication/317042141_Automated_Lean_Manufacturing
- Nihlah, Z. & Immawan, T. (2018). Lean manufacturing: waste reduction using value stream mapping. *Proceedings of the 3rd international conference on energy, environmental, and information system held in Semarang* 14-15 August 2018 (pp. 1-6). Indonesia.
- Park, S.H., Shin, W.S., Park, Y.H. & Lee, Y. (2017). Building a new culture for quality management in the era of the fourth industrial revolution. *Total Quality Management & Business Excellence*, 28, 934-945.
- Saraswat, P., Kumar, D. & Sain, K.S. (2015). Reduction of work in process inventory and production lead time in a bearing industry using value stream mapping tool. *International Journal of Managing Value and Supply Chains*, 6, 27-35.
- Sony Corporation. (2000). *Sony Six Sigma Trainer Course*. Sony Corporation.
- Sony, M. (2018). Industry 4.0 and lean management: a proposed integration model and research propositions. *Production & Manufacturing Research*, 6, 416-432.
- Thanachotanankul, P., Siripanya, A., Panyakunanont, P. & Tantiphanwadi, P. (2020). *LASI SI Designer (Warrior), Gen. 5, Group 1's Paper*. Thai-German Institute (Bangkok center), Klongnamtai.
- Yamazaki, Y., Takata, S., Onari, H., Kojima, F & Kato, S. (2016). Lean automation system responding to the changing market. *Proceedings of the 49th CIRP conference on manufacturing systems held in Stuttgart* 25-27 May 2016, (pp. 201-206). Germany.

9. ประวัติผู้แต่ง

ดร.ประภัสสร ตันติพันธ์วดี



สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาเอก สาขา วิศวกรรมอุตสาหการ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ บางเขน ปัจจุบัน ดำรงตำแหน่งอาจารย์ประจำสาขาวิชา วิศวกรรมอุตสาหการ-โลจิสติกส์ คณะ วิศวกรรมศาสตร์กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กำแพงแสน งานวิจัยที่สนใจ การปรับปรุงแบบสินค้า ชิกม่า สินค้าอัตโนมัติ วิทยาศาสตร์ข้อมูล (Data Science) และการเรียนรู้เชิงลึก (Deep learning) ด้านการควบคุมคุณภาพและการ สุ่มตรวจสอบ การตรวจสอบแบบอัตโนมัติโดย ใช้การประมวลผลภาพทางดิจิทัล

ปัจจัยที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าชานอ้อยผสมเศษอะลูมิเนียม

Factors Affecting Compressive Strength of Geopolymer Concrete from Bagasse Ash Mixed with Aluminum Dust

พิพรรณ อินปลัด และ สหलग หอมวุฒิมังค์*
Pipat Inpalad and Sahalaph Homwuttivong*

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
Division of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University

*Corresponding author; E-mail address: sahalaph.h@msu.ac.th

(Received: May 7, 2020, Revised: October 2, 2020, Accepted: October 7, 2020)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีเป้าหมายที่จะใช้ประโยชน์จากเถ้าชานอ้อยซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากโรงงานน้ำตาลมาเป็นวัสดุตั้งต้นผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต เถ้าชานอ้อยจาก 2 แหล่ง ถูกนำมาปรับปรุงความละเอียดด้วยการบด เนื่องจากเถ้าชานอ้อยมีองค์ประกอบของอลูมินาที่ค่อนข้างต่ำ จึงนำเศษอะลูมิเนียมที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมก่อสร้างมาเติมอลูมินาในจีโอโพลิเมอร์ โดยแทนที่เถ้าชานอ้อยด้วยเศษอะลูมิเนียม ร้อยละ 0-1.0 โดยน้ำหนัก แปรผันอัตราส่วนสารละลายอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/BA) อยู่ในช่วง 0.50-0.65 โดยน้ำหนัก อุณหภูมิในการบ่มตัวอย่าง 60 80 และ 100 องศาเซลเซียส ผลการวิจัยพบว่าแหล่งของเถ้าชานอ้อยนั้นมีผลอย่างมากต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต การแทนที่เถ้าชานอ้อยด้วยเศษอะลูมิเนียมที่ร้อยละ 0.40 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีกำลังรับแรงอัดสูงสุด อัตราส่วน AL/BA ที่มีค่าต่ำมีแนวโน้มทำให้กำลังรับแรงอัดสูงแต่ค่าการยุบตัวของคอนกรีตต่ำลง และการบ่มที่อุณหภูมิสูงทำให้กำลังรับแรงอัดสูงในช่วงอายุต้น อย่างไรก็ตามเมื่ออายุคอนกรีตมากขึ้น จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มในระดับอุณหภูมิต่างๆ มีค่ากำลังรับแรงอัดในระดับใกล้เคียงกัน กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากงานวิจัยนี้มีกำลังสูงถึง 300 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

คำสำคัญ: เถ้าชานอ้อย, สารละลายอัลคาไลน์, จีโอโพลิเมอร์, กำลังรับแรงอัด

Abstract

The aim of this research is utilization the bagasse ash, a waste material from sugar factories, as a precursor to producing geopolymer concrete. According to the bagasse ash has a lot of silica elements but has little alumina therefore use aluminum dust as waste material to add alumina in the geopolymer with bagasse ash as raw materials. This research uses bagasse ash from 2 sources, replacing bagasse ash with aluminum dusts 0-1.0% by weight. Ratios of alkaline solution to source material (AL/BA) 0.50-0.65 by weight. Curing temperatures of sample were 60, 80 and 100 °C. From the research, the source of bagasse ash greatly affected the compressive strength of geopolymer concrete. The replacement of bagasse ash with suitable aluminum dusts was 0.40% by weight made the highest compressive strength. The low AL/BA ratios tended to give higher compressive strength but decreased the slump. The high temperature curing effected on the high compressive strength of concrete at early age. However, at any curing temperatures, the compressive strength were similar as the later age of concrete samples. The compressive strength of geopolymer concrete from this research reached to 300 ksc.

Keywords: bagasse ash, alkaline solution, geopolymer, compressive strength

1. บทนำ

งานก่อสร้างทั่วโลกนิยมใช้คอนกรีตเป็นส่วนประกอบหลัก คอนกรีตโดยทั่วไปมีปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นหนึ่งในองค์ประกอบหลัก การผลิตปูนซีเมนต์นั้นใช้พลังงานจำนวนมาก เริ่มตั้งแต่กระบวนการการระเบิดวัสดุต้นแหล่ง การย่อย การลำเลียง การเผา จนถึงการผลิตให้ละเอียด มีรายงานระบุว่า การผลิตปูนซีเมนต์ 1 ตัน จะก่อให้เกิดก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ออกมาประมาณ 1 ตันเช่นกัน (Rattanasak & Chindaprasirt, 2008) ปัจจุบันเหล่านักวิจัยจึงมีแนวคิดที่จะคิดค้นวัสดุมาทดแทนการใช้ปูนซีเมนต์และการผลิตคอนกรีตโดยไม่ใช้ปูนซีเมนต์ เช่น ปอซโซลานคอนกรีต (Pozzolanic concrete) จีโอโพลิเมอร์คอนกรีต (Geopolymer concrete) เป็นต้น สำหรับจีโอโพลิเมอร์ประกอบด้วยวัสดุปอซโซลานซึ่งเป็นวัสดุที่มีซิลิกา (SiO_2) และอลูมินา (Al_2O_3) เป็นองค์ประกอบหลัก ทำหน้าที่คล้ายปูนซีเมนต์ วัสดุปอซโซลานจะทำปฏิกิริยากับสารละลายอัลคาไลน์ที่มีสถานะความเป็นด่างสูง โดยอัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์ทำปฏิกิริยากับซิลิกาและอลูมินา ส่วนสารประกอบซิลิกेटเติมเพื่อช่วยเพิ่มปริมาณซิลิกาให้พร้อมทำปฏิกิริยา โพลิเมอร์ไรเซชัน ได้สารเชื่อมประสาน (Wongpa, 2009) เช่นเดียวกับปูนซีเมนต์กับน้ำ จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตปล่อยก๊าซคาร์บอน ไดออกไซด์น้อยกว่าคอนกรีตทั่วไปประมาณร้อยละ 9 (Turner & Collins, 2013) ในแง่ของการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม การพัฒนาจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเพื่อทดแทนคอนกรีตทั่วไปนั้นจำเป็นต้องใช้วัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม จำพวกวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น เถ้าลอย (Fly ash) เถ้าชานอ้อย (Bagasse ash) และเถ้าแกลบ (Rice husk ash) เป็นต้น การนำวัสดุเหล่านี้มาใช้ประโยชน์จะช่วยลดปัญหาข้างต้นได้และยังเป็นวัสดุทางเลือกที่กำลังนิยมในปัจจุบัน

หนึ่งในวัสดุเหลือทิ้งที่น่าสนใจที่จะนำมาเป็นวัสดุตั้งต้น จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตคือ เถ้าชานอ้อย โดยเถ้าชานอ้อยนั้นเป็นวัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมน้ำตาลและไฟฟ้า ในปี พ.ศ.2560 ประเทศไทย มีปริมาณอ้อยที่ใช้ในกระบวนการผลิตประมาณ 105 ล้านตันต่อปี (Office of the Cane and Sugar Board, Ministry of Industry Thailand, 2016) หลังจากกระบวนการผลิตน้ำตาลเกิดกากอ้อยนำไปเป็นเชื้อเพลิงในการผลิตพลังงานความร้อนและแปรรูปเป็นพลังงานไฟฟ้าเมื่อผ่านกระบวนการเผา จะเหลือเถ้าชานอ้อยร้อยละ 0.62 ของน้ำหนักอ้อย (Fairbairn et al., 2010) หรือประมาณ 651,000 ตันต่อปี และมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น เถ้าชานอ้อยที่เหลือนี้บางส่วนเกษตรกรนำไปค้อนภาพของดิน แต่ปริมาณยังน้อยเมื่อเทียบกับปริมาณที่เกิดขึ้น และส่วนใหญ่จะถูกนำไปกำจัดโดยการถม จากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีพบว่าเถ้าชานอ้อยมีสมบัติเป็นวัสดุปอซโซ

ลาน องค์ประกอบหลักทางเคมี คือ ซิลิกาและอลูมินา อยู่ในรูปออสฐาน (Witoteerasan et al., 2014) นำมาเป็นวัสดุตั้งต้นการผลิตวัสดุอัดประสานที่เรียกว่าจีโอโพลิเมอร์ได้ เถ้าชานอ้อยจากแหล่งแตกต่างกันมีองค์ประกอบธาตุที่แตกต่างกัน (Villar-Cocifta et al., 2008; Chusilp et al., 2009; Ganesan & Rajagopal, 2007)

งานวิจัยนี้มุ่งหมายที่จะผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตโดยใช้เถ้าชานอ้อยเป็นวัสดุตั้งต้น โดยนำมาบดละเอียดจะทำให้มีความเป็นวัสดุปอซโซลานที่ดีขึ้น (Singh et al., 2000; Cordeiro et al., 2008; Somna & Jaturapitakkul, 2011) แต่เถ้าชานอ้อยนั้นองค์ประกอบของซิลิกาสูงแต่มีอลูมินาน้อย อาจไม่เพียงพอต่อความสมบูรณ์ของเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน ที่จะเกิดเป็นโครงสร้าง 3 มิติ ของอลูมินตและซิลิกेटกลายเป็นวัสดุที่มีโครงสร้างแข็งแรง มีสมบัติด้านกำลังรับแรงอัดสูง (Chindaprasirt et al., 2008; Rukzon & Ngenprom, 2010; Zhou et al., 2016) จึงใช้เศษอะลูมิเนียมที่เป็นวัสดุเหลือทิ้งจากการก่อสร้างประตูและหน้าต่างอะลูมิเนียมเพื่อเติมอลูมินาในจีโอโพลิเมอร์ โดยอะลูมิเนียมสามารถละลายได้ในสถานะที่เป็นด่างเข้มข้น จึงใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่เป็นส่วนประกอบในการผลิตจีโอโพลิเมอร์มาเป็นสารละลายอะลูมิเนียมเพื่อให้ได้อลูมินาในจีโอโพลิเมอร์ ทั้งนี้ยังศึกษาปัจจัยอื่นที่อาจส่งผลต่อจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต ได้แก่ แหล่งที่มาของเถ้าชานอ้อย ปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ และอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่ม โดยมุ่งเน้นการพัฒนา กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

2. เครื่องมือและวิธีการศึกษา

2.1 วัสดุที่ใช้ในการผลิตตัวอย่างทดสอบ

2.1.1 วัสดุตั้งต้น

เถ้าชานอ้อยจากโรงงานอุตสาหกรรมน้ำตาล 2 แหล่ง ได้แก่ เถ้าชานอ้อยจากจังหวัดกาฬสินธุ์ (แหล่ง A) และเถ้าชานอ้อยจากจังหวัดมหาสารคาม (แหล่ง B) แสดงดังรูปที่ 1(ก) และ 1(ข) ตามลำดับ เถ้าชานอ้อยทั้ง 2 แหล่ง นำมาปรับปรุงโดยการบดเพื่อลดขนาด โดยบดให้มีความละเอียดค่าตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 325 น้อยกว่าร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก เถ้าชานอ้อยบดวิเคราะห์ด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (Scanning electron microscope, SEM) ภาพถ่ายขยายกำลังสูง แสดงให้เห็นขนาดและลักษณะรูปร่างที่มีเหลี่ยมมุมของเถ้าชานอ้อยจากแหล่ง A และ B แสดงในรูปที่ 2(ก) และ 2(ข) ตามลำดับ ผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติเบื้องต้นของเถ้าชานอ้อยจากแหล่ง A และ B แสดงดังตารางที่ 1

เศษอะลูมิเนียมจากงานก่อสร้างและตกแต่งอาคาร นำมา ร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 20 แสดงดังรูปที่ 1(ค)

2.1.2 วัสดุผสม

มวลรวมละเอียดใช้ทรายที่มีโมดูลัสความละเอียด 2.6-2.7 และมวลรวมหยาบใช้หินปูนย่อยขนาด 3/8 นิ้ว

2.1.3 สารละลายอัลคาไลน์

สารโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ชนิดเกล็ด มีความบริสุทธิ์ ร้อยละ 99 เตรียมให้มีความเข้มข้น 10 โมลาร์ โดยการละลาย ด้วยน้ำกลั่น โดยเตรียมก่อนการนำมาผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต เป็นเวลาอย่างน้อย 24 ชั่วโมง และสารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) องค์ประกอบทางเคมี Na_2O ร้อยละ 15.32 SiO_2 ร้อยละ 32.87 และ H_2O ร้อยละ 51.81 โดยน้ำหนัก



(ก)

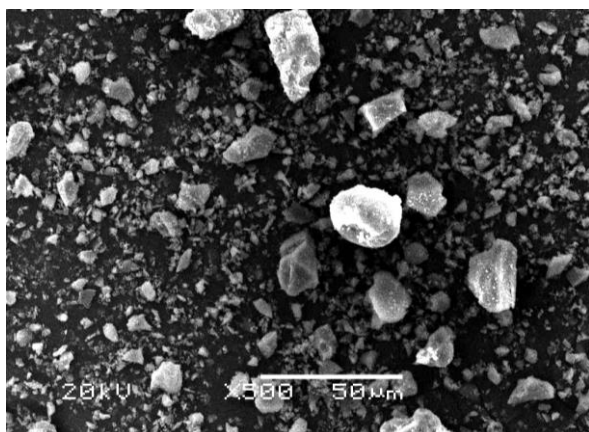


(ข)

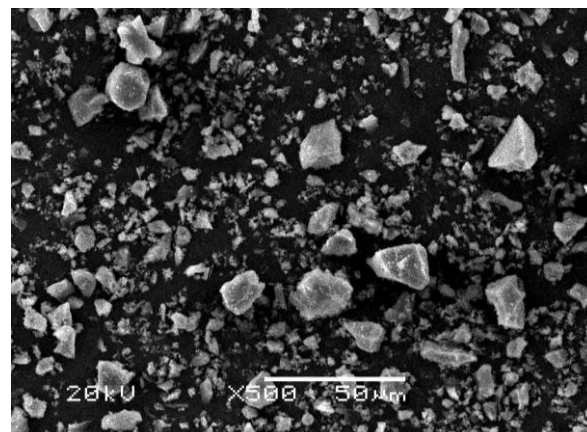


(ค)

รูปที่ 1 (ก) ถ้ำขานอ้อยแห้ง A (ข) ถ้ำขานอ้อยแห้ง B และ (ค) เศษอลูมิเนียมร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 20



(ก)



(ข)

รูปที่ 2 ภาพถ่ายขยายกำลังสูง ของถ้ำขานอ้อยบด (ก) แหล่ง A และ (ข) แหล่ง B

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติเบื้องต้นของถ้ำขานอ้อย แหล่ง A และ B

BA Source	Chemical composition						Specific gravity,		Absorption of BA after grinding	Loss on Ignition (%)
	SiO_2	Al_2O_3	Fe_2O_3	CaO	K_2O	SO_3	Before grinding	After grinding		
A	77.57	4.15	4.66	3.72	3.08	0.80	1.92	2.35	8.7	12.7
B	59.56	4.30	4.06	15.41	7.10	0.09	1.79	2.18	14.3	18.3

2.2 ส่วนผสมและการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

ถ้ำขานอ้อยจาก 2 แหล่ง นำมาเป็นวัสดุตั้งต้นในการผลิต ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต มีส่วนผสมต่อ 1 ลูกบาศก์เมตร โดยประมาณ คือ ถ้ำขานอ้อย 408 กิโลกรัม มวลรวมละเอียด

551 กิโลกรัม มวลรวมหยาบ 1,224 กิโลกรัม (อัตราส่วน ถ้ำขานอ้อย : มวลรวมละเอียด : มวลรวมหยาบ เท่ากับ 1.00 : 1.35 : 3.00 โดยน้ำหนัก)

การผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเริ่มต้นจากการนำอะลูมิเนียมมาทำปฏิกิริยากับสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (Leaching) แล้วนำไปผสมกับเถ้าขานอ้อยที่เตรียมไว้ในเครื่องผสมคอนกรีต จากนั้นเติมทราย สารละลายโซเดียมซิลิเกต และหิน ผสมต่อเนื่องให้เป็นเนื้อเดียวกัน จากนั้นนำไปหล่อในแบบทรงกระบอกขนาด 10x20 เซนติเมตร ปิดด้วยพลาสติกฟิล์มวางไว้ในห้องปฏิบัติการก่อนเข้าบ่ม 1 ชั่วโมง จากนั้นนำไปบ่มตามอุณหภูมิที่กำหนดในตู้อบเป็นเวลา 48 ชั่วโมง เมื่อนำออกจากตู้อบแล้ว นำมาบ่มในอุณหภูมิห้องจนครบอายุการทดสอบ ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเปรียบเทียบกับซีเมนต์คอนกรีตแสดงดังรูปที่ 3



(ซ้าย)จีโอโพลิเมอร์คอนกรีต (ขวา)ซีเมนต์คอนกรีต
รูปที่ 3 ก่อนตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

2.3 การศึกษาปัจจัยต่างๆที่ส่งผลต่อกำลังรับแรงอัด

ตารางที่ 2 แสดงปัจจัยและตัวแปรคาดว่าจะส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

การศึกษผลจากการใช้เถ้าขานอ้อยที่แตกต่างกัน 2 แหล่ง และศึกษผลของการแทนที่เถ้าขานอ้อยด้วยเศษอะลูมิเนียมร้อยละ 0 0.2 0.4 0.6 0.8 และ 1.0 โดยน้ำหนัก ตัวอย่างทดสอบลำดับที่ 1-6 พิจารณาเปรียบเทียบผลของการแทนที่เถ้าขานอ้อยด้วยเศษอะลูมิเนียมที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดจากเถ้าขานอ้อยแหล่ง A ส่วนผสมลำดับที่ 7-12 พิจารณาเปรียบเทียบผลของการแทนที่เถ้าขานอ้อยด้วยเศษอะลูมิเนียมที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดจากเถ้าขานอ้อยแหล่ง B ทั้งนี้ส่วนผสมที่ 1-12 ยังพิจารณาเปรียบเทียบผลของการใช้เถ้าขานอ้อยที่แตกต่างกันจาก 2 แหล่ง ที่มีส่วนผสมอื่น ๆ เท่ากัน เช่นตัวอย่างทดสอบที่ 1 เทียบกับ 7 เป็นต้น จากการทดลองส่วนแรกนี้พบว่าส่วนผสมลำดับที่ 3 ที่ใช้เถ้าขานอ้อยจากแหล่ง A มีกำลังรับแรงอัดสูงสุด จึงใช้ส่วนผสมลำดับที่ 3 นี้เป็นส่วนผสมหลักเพื่อเปรียบเทียบปัจจัยศึกษาอื่นๆ

ตัวอย่างทดสอบลำดับที่ 3 13 14 และ 15 เปรียบเทียบผลของปริมาณสารละลายอัลคาไลน์ที่มีต่อกำลังรับแรงอัด โดยเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนสารละลายอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/BA) เท่ากับ 0.50 0.55 0.60 และ 0.65 โดยน้ำหนัก สารละลายอัลคาไลน์ที่ใช้ในงานวิจัย ได้แก่ สารละลายโซเดียมซิลิเกต (Na_2SiO_3) และสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) อัตราส่วน $\text{Na}_2\text{SiO}_3 : \text{NaOH}$ เท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก

ตัวอย่างทดสอบลำดับที่ 3 16 และ 17 เปรียบเทียบผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่มโดยบ่มร้อนที่อุณหภูมิ 60 80 และ 100 องศาเซลเซียส

2.4 การทดสอบ

2.4.1 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของกรีต

คอนกรีตเป็นวัสดุที่สามารถรับแรงอัดได้ดี และยังเป็นสมบัติที่บ่งชี้ถึงคุณภาพของคอนกรีต ทั้งในด้านความแข็งแรง ความทนทาน และคุณสมบัติด้านอื่นๆ กำลังรับแรงอัดที่แสดงเป็นกำลังอัดสูงสุดที่ได้จากการทดสอบแบบทำลายแท่งตัวอย่างมาตรฐานซึ่งมีอยู่ 2 ลักษณะ คือ แบบหล่อทรงกระบอก (Cylinders) และแบบหล่อคอนกรีตทรงลูกบาศก์ (Cube) ตัวอย่างคอนกรีตจะต้องอยู่ในสภาพอิมมัวผิวแห้ง ปิดผิวส่วนด้านบนตัวอย่างให้เรียบ และวางตัวอย่างบนแท่นเครื่องทดสอบให้อยู่ตรงกลางเครื่องทดสอบแรงอเนกประสงค์ (Universal testing machine, UTM) กดตัวอย่างด้วยอัตราเร็ว 0.15-0.35 เมกะปาสกาลต่อวินาที (ASTM C-39/C39M) จนกระทั่งตัวอย่างแตกเสียหาย ทำการบันทึกค่าแรงกดและคำนวณหากำลังอัดของตัวอย่างโดยใช้ค่าแรงกดหารด้วยหน้าตัดการรับแรงของตัวอย่าง ลักษณะการวิบัติของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตทรงกระบอกหลังการทดสอบกำลังรับแรงอัดด้วยเครื่องทดสอบแรงอเนกประสงค์ ตัวอย่างแตกแบบผสม (Combination shear and splitting failure) ซึ่งเกิดจากการแตกออกเป็นรูปกรวยคู่ (Shear failure) กับการแตกแบบแยกออก (Splitting failure) แสดงดังรูปที่ 4

2.4.2 การทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีต

การทดสอบค่าการยุบตัวของคอนกรีต เพื่อตรวจสอบความสามารถได้ของคอนกรีต (Workability) ค่าการยุบตัวไม่ได้เป็นค่าที่วัดความสามารถได้ของคอนกรีตโดยตรง แต่เป็นการวัดความชื้นเหลวของคอนกรีต (Consistency) หรือลักษณะการไหลตัวของคอนกรีต (Flow characteristic) ชุดทดสอบความชื้นเหลวของคอนกรีตตามมาตรฐาน ASTM C 143 วิธีทดสอบการยุบตัวของคอนกรีตตาม มทข.(ท) 103 : มาตรฐานการทดสอบการยุบตัวของคอนกรีต การทดสอบทำโดยตักคอนกรีตใส่ลงในโคนที่มีลักษณะเป็นกรวยยอดตัดให้ได้

3 ชั้น โดยให้แต่ละชั้นมีปริมาตรเท่ากัน และกระทุ้งด้วยเหล็กที่ละชั้นแล้วจึงยกโคนขึ้นอย่างช้าๆ คอนกรีตจะยุบตัวลงด้วยน้ำหนักของตัวเอง ความสูงที่ยุบตัวของคอนกรีตที่วัดได้ถือว่าเป็นค่ายุบตัวของคอนกรีต ซึ่งเกณฑ์การตัดสินและความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับให้ค่าการยุบตัวของคอนกรีตให้เป็นไปตาม มทข. 101-2533 : มาตรฐานงานคอนกรีตและคอนกรีตเสริมเหล็ก

ตารางที่ 2 สรุปรายละเอียดการทดลอง

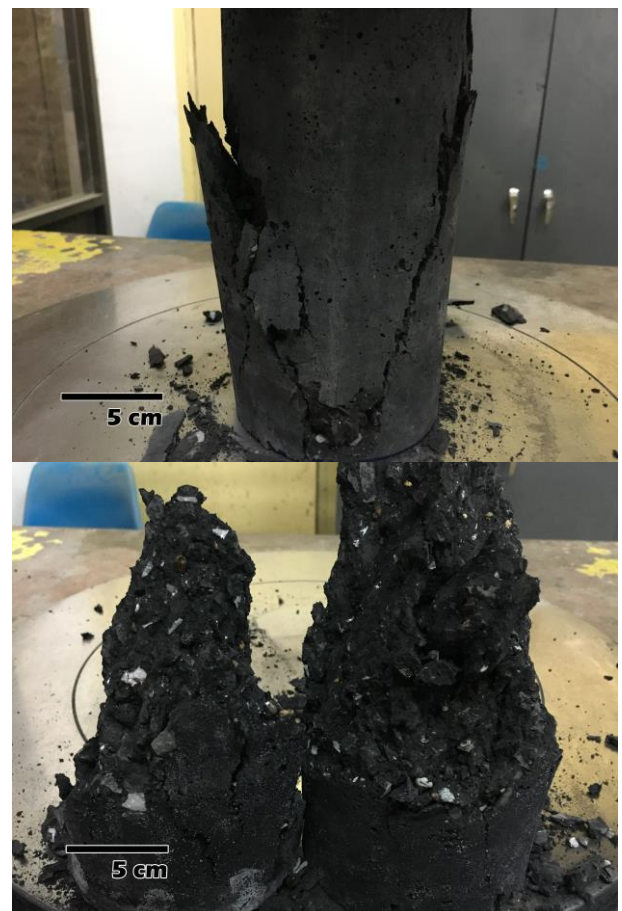
No.	BA Source	Replace bagasse ash with aluminum dust (%)	AL/BA	Curing temperature (°C)
1	A	0.00	0.60	60
2	A	0.20	0.60	60
3	A	0.40	0.60	60
4	A	0.60	0.60	60
5	A	0.80	0.60	60
6	A	1.00	0.60	60
7	B	0.00	0.60	60
8	B	0.20	0.60	60
9	B	0.40	0.60	60
10	B	0.60	0.60	60
11	B	0.80	0.60	60
12	B	1.00	0.60	60
13	A	0.4	0.50	60
14	A	0.4	0.55	60
15	A	0.4	0.65	60
16	A	0.4	0.60	80
17	A	0.4	0.60	100

3. ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผล

3.1 แหล่งของเถ้าขานอ้อย

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 3 7 และ 28 วัน จากการใช้เถ้าขานอ้อย 2 แหล่ง แสดงดังตารางที่ 3 และรูปที่ 5 เมื่อพิจารณาจากทั้ง 2 แหล่งที่มาของเถ้าขานอ้อย พบว่าในอัตราส่วนผสมเดียวกันจีโอโพลิเมอร์ที่ผลิตจากเถ้าขานอ้อยแหล่ง A มีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าจีโอโพลิเมอร์ที่ผลิตจากเถ้าขานอ้อยแหล่ง B ค่อนข้างมาก จากการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางกายภาพเบื้องต้นแสดงดังตารางที่ 1 ผลทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าขานอ้อยทั้ง 2 แหล่ง ด้วยเทคนิคการเรืองรังสีเอกซ์ (X-ray Fluorescence,

XRF) พบว่าองค์ประกอบของธาตุซิลิกา (SiO_2) ของเถ้าขานอ้อยแหล่ง A มากกว่าแหล่ง B โดยมีธาตุซิลิกา ร้อยละ 77.55 และ 59.56 ตามลำดับ ปริมาณของซิลิกามีผลต่อปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน โดยสารละลายอัลคาไลน์ไฮดรอกไซด์จะทำปฏิกิริยากับวัสดุที่มีองค์ประกอบซิลิกาและอลูมินาเป็นหลัก เกิดโครงสร้างจีโอโพลิเมอร์ทำหน้าที่เป็นสารเชื่อมประสาน (Wongpa, 2009) ปริมาณของซิลิกาของแหล่ง A ที่มากกว่าแหล่ง B จึงส่งผลให้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากเถ้าขานอ้อยแหล่ง A มีกำลังรับแรงอัดสูงกว่า จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากเถ้าขานอ้อยแหล่ง B



รูปที่ 4 ตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตหลังจากการทดสอบกำลังรับแรงอัดด้วยเครื่องทดสอบแรงกดแบบประสม

จากผลทดสอบค่าความถ่วงจำเพาะ พบว่าเถ้าขานอ้อยหลังผ่านการบดของแหล่ง A มีความถ่วงจำเพาะสูงกว่าแหล่ง B คือ 2.35 และ 2.18 ตามลำดับ เมื่อทำการทดสอบค่าการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผา โดยนำเถ้าขานอ้อยมาเผาที่อุณหภูมิ 800 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที พบว่าเถ้าขานอ้อยแหล่ง A มีค่าการสูญเสียมวลจากการเผาร้อยละ 12.7 ซึ่งน้อยกว่าเถ้าขานอ้อยจากแหล่ง B ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ

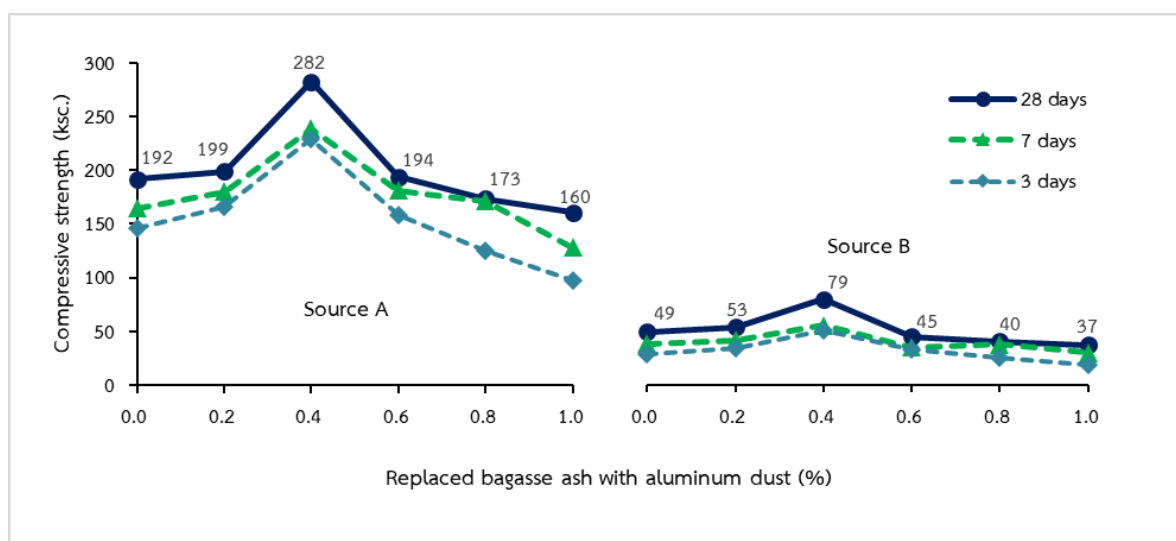
18.3 ทั้งนี้การที่เถ้าขานอ้อยแหล่ง B ที่มีค่าการสูญเสียมวลจากการเผาค่อนข้างสูงนั้นหมายถึง การมีปริมาณของคาร์บอนหรือกากขานอ้อยที่เผาไหม้ไม่หมดสูงกว่า ซึ่งเป็นผลมาจากการเผาไหม้ที่ไม่สมบูรณ์ของเถ้าขานอ้อย การเหลือของคาร์บอนหรือกากขานอ้อยก็จะส่งผลต่อการดูดน้ำและปริมาณน้ำที่เหลือจริงในส่วนผสม (Sujavanich, 2003) ค่าการดูดน้ำของเถ้าขานอ้อยแหล่ง A และ B มีค่าร้อยละ 8.7 และ 14.3 ตามลำดับ เถ้าขาน

อ้อยที่มีค่าการดูดซึมน้ำสูงส่งผลต่อเกิดปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชัน (Sujavanich, 2003) ทำให้โครงสร้างจีโอโพลิเมอร์จากเถ้าขานอ้อยแหล่ง B ไม่แข็งแรงเท่าแหล่ง A และเมื่อเปรียบเทียบกับกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 28 วัน จากทุกส่วนผสม พบว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าขานอ้อยแหล่ง A มีกำลังรับแรงอัดมากกว่าแหล่ง B มากกว่า 3.5 เท่า

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากเถ้าขานอ้อย 2 แหล่ง และผลของการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนการแทนที่เถ้าขานอ้อยด้วยเศษอะลูมิเนียม

No.	Source of bagasse ash	Replace bagasse ash with aluminum dust (%)	Slump (cm.)	Average compressive strength/Normalized		
				ksc./ (%)		
				3 days	7 days	28 days
1	A	0.0	5.5-8.5	146/(100)	164/(100)	192/(100)
2		0.2	5.0-7.5	166/(114)	180/(109)	199/(104)
3		0.4	4.5-7.5	229/(157)	238/(145)	282/(147)
4		0.6	4.5-7.0	158/(109)	181/(110)	194/(101)
5		0.8	4.0-5.5	124/(85)	171/(104)	173/(90)
6		1.0	2.5-3.5	98/(67)	128/(78)	160/(84)
7	B	0.0	5.5-9.0	28/(100)	38/(100)	49/(100)
8		0.2	5.0-8.5	34/(122)	41/(109)	53/(109)
9		0.4	5.0-7.5	50/(178)	55/(145)	79/(162)
10		0.6	4.5-7.5	32/(116)	35/(92)	45/(91)
11		0.8	4.5-6.0	25/(91)	37/(98)	40/(81)
12		1.0	3.0-4.0	19/(67)	29/(78)	37/(75)

*Maximum compressive strength at 28 days of age is 282 ksc.



รูปที่ 5 กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากผลของแหล่งที่มาเถ้าขานอ้อย และผลของการแทนที่เถ้าขานอ้อยด้วยเศษอะลูมิเนียม

3.2 การแทนที่ด้วยเศษอะลูมิเนียม

ผลของการแทนที่เถ้าขาน้อยด้วยเศษอะลูมิเนียมพิจารณาจากตารางที่ 3 และรูปที่ 5 กำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 3 7 และ 28 วัน โดยเปลี่ยนแปลงการแทนที่เถ้าขาน้อยด้วยเศษอะลูมิเนียม ร้อยละ 0-1 โดยน้ำหนัก จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดแสดงให้เห็นว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าขาน้อยทั้ง 2 แหล่ง สามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นตามอายุ มีแนวโน้มของกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเมื่อแทนที่เถ้าขาน้อยด้วยเศษอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0 และ 0.4 โดยน้ำหนัก และกำลังรับแรงอัดต่ำลงเมื่อการแทนที่เถ้าขาน้อยด้วยเศษอะลูมิเนียมเพิ่มขึ้นที่ร้อยละ 0.60 0.80 และ 1.00 และจากการทดลองพบว่าเมื่อการแทนที่เถ้าขาน้อยด้วยเศษอะลูมิเนียมมากขึ้นจะทำให้ส่วนผสมจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีความสามารถในการทำงานได้ลดลง (ส่วนผสมคอนกรีตมีความเหนียวมากขึ้น) ดังนั้นการแทนที่เถ้าขาน้อยด้วยเศษอะลูมิเนียมที่ร้อยละ 0.40 มีความเพียงพอ ทำให้กำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีค่าสูงที่สุด โดยจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตแหล่ง A แทนที่เถ้าขาน้อยด้วยเศษอะลูมิเนียมที่ร้อยละ 0.40 บ่มร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยที่อายุ 3 7 และ 28 วัน เท่ากับ 229 238 และ 282 กิโลกรัมต่อตารางที่เซนติเมตรตามลำดับ มีกำลังรับแรงอัดสูงกว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าขาน้อยที่ไม่เติมอะลูมิเนียมกว่าร้อยละ 145-157

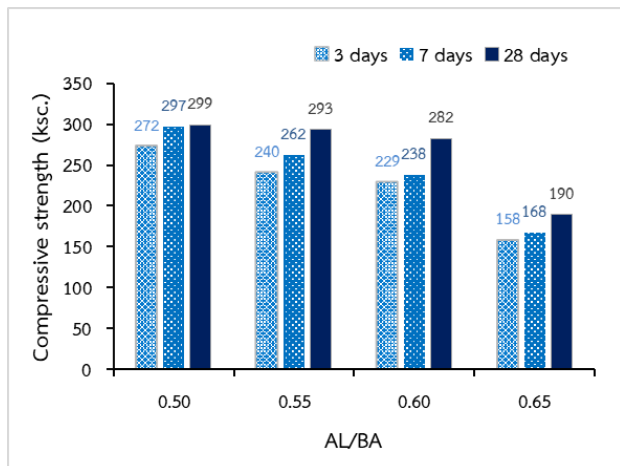
3.3 อัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/BA)

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 3 7 และ 28 วัน โดยเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน

สารอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/BA) เท่ากับ 0.50 0.55 0.60 และ 0.65 แสดงดังตารางที่ 4 และรูปที่ 6 กำลังรับแรงอัดทุกส่วนผสมเพิ่มขึ้นตามอายุคอนกรีต กำลังรับแรงอัดมีค่าแปรผกผันกับค่าอัตราส่วน AL/BA โดยกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีค่าสูงสุดเมื่อ AL/BA เท่ากับ 0.50 และมีค่ากำลังรับแรงอัดลดลงเมื่อ AL/BA เพิ่มขึ้นเป็น 0.55 0.60 และ 0.65 ตามลำดับ เช่นเดียวกับปริมาณน้ำในส่วนผสมซีเมนต์คอนกรีตทั่วไป (W/C) คือกำลังรับแรงอัดเพิ่มขึ้นเมื่อลดปริมาณน้ำในส่วนผสม (CPAC Concrete Academy, 2013) แต่ต้องไม่ลดลงเกินความต้องการน้ำในการทำปฏิกิริยาของปูนซีเมนต์ หากจีโอโพลิเมอร์ลดปริมาณสารละลายอัลคาไลน์มากเกินไปความต้องการก็จะทำให้ปฏิกิริยาโพลิเมอร์ไรเซชันไม่สมบูรณ์ ส่งผลให้โครงสร้างจีโอโพลิเมอร์ไม่แข็งแรง มีกำลังรับแรงอัดต่ำ จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากเถ้าขาน้อยผสมเศษอะลูมิเนียมมีกำลังรับแรงอัดสูงเมื่ออัตราส่วนสารอัลคาไลน์มีค่าต่ำนั้นอาจเป็นผลดีในแง่การประหยัดต้นทุนในการผลิต แต่ก็ยังพบว่าจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีอัตราส่วน AL/BA ต่ำ จะมีความสามารถในการทำงานได้ต่ำเช่นกัน โดยจากการทดสอบตัวอย่างจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่มีอัตราส่วน AL/BL เท่ากับ 0.50 มีค่าการยุบตัว (Slump) เพียง 0-0.5 เซนติเมตร ตัวอย่างทดสอบที่มีอัตราส่วน AL/BL เท่ากับ 0.55 ค่าการยุบตัวประมาณ 0.5-2.0 ซม. ดังนั้นในการผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจึงควรมีกระบวนการช่วยในการทำให้แน่น และตัวอย่างทดสอบที่มีอัตราส่วน AL/BA เท่ากับ 0.60 และ 0.65 มีค่าการยุบตัวประมาณ 4.0-7.5 ซม. และ 7.5-12.0 ซม.ตามลำดับ เกณฑ์มาตรฐานงานคอนกรีตและคอนกรีตเสริมเหล็ก มทข.101-53 กำหนดค่าการยุบตัวของคอนกรีตที่เหมาะสม 5.0-15.0 ซม. ขึ้นอยู่กับลักษณะของชิ้นส่วนคอนกรีต

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนสารอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น

No.	AL/BA	Slump (cm.)	Average compressive strength/Normalized		
			ksc./ (%)		
			3 days	7 days	28 days
13	0.50	0-0.5	272/(119)	297/(124)	299/(106)
14	0.55	0.5-2.0	240/(105)	262/(110)	293/(104)
3	0.60	4.0-7.5	229/(100)	238/(100)	282/(100)
15	0.65	7.5-12.0	158/(69)	168/(70)	190/(67)



รูปที่ 6 ผลจากการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วน สารอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/BA) ต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

3.4 อุณหภูมิบ่ม

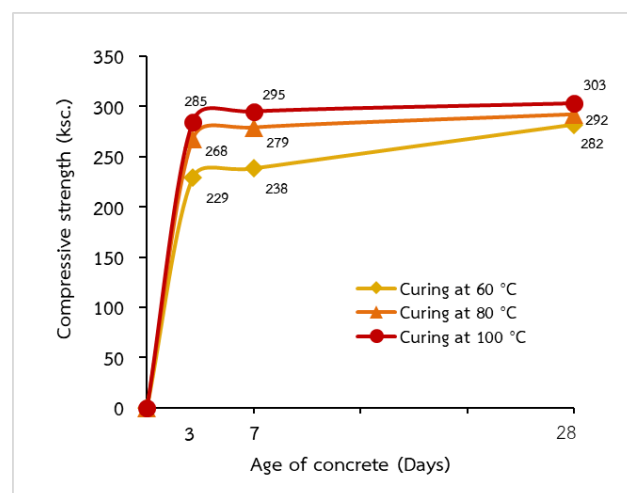
ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดเฉลี่ยของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุ 3 7 และ 28 วัน ที่เปลี่ยนแปลงอุณหภูมิการบ่ม 60 80 และ 100 องศาเซลเซียส แสดงดังตารางที่ 5 และรูปที่ 7 พบว่ากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ทุกส่วนผสมมีการพัฒนาเพิ่มขึ้นตามอายุคอนกรีตและแปรผันตรงกับอุณหภูมิที่ใช้ในการบ่ม หากพิจารณาในช่วงอายุต้น (อายุคอนกรีต 3 วัน) การบ่มจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อุณหภูมิสูงสามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตได้ดีกว่าการบ่มที่อุณหภูมิต่ำ (Dobrowolski, 2011) แต่เมื่ออายุคอนกรีตเพิ่มขึ้นการพัฒนา กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่บ่มด้วยอุณหภูมิต่ำกว่าจะเริ่มพัฒนากำลังรับแรงอัดได้ใกล้เคียงกับการบ่มที่อุณหภูมิสูงมากยิ่งขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับกำลังรับแรงอัดที่อายุ 28 วัน อุณหภูมิบ่มระหว่าง 60 และ 100 องศาเซลเซียส พบว่ากำลังรับแรงอัดจากการบ่มที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ใกล้เคียงกับการบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส โดยมีค่าประมาณร้อยละ 107 ของกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ที่บ่มด้วยอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณากำลังรับแรงอัดในแต่ละอุณหภูมิบ่มอย่างละเอียด ในรูปที่ 7 จากแผนภูมิเส้นแสดงแนวโน้มของกำลังรับแรงอัดและอายุคอนกรีต เส้นแนวโน้มการพัฒนากำลังรับแรงอัดที่อายุ 3 7 และ 28 วัน จากการบ่มร้อนที่อุณหภูมิ 100 และ 80 องศาเซลเซียส มีการพัฒนากำลังรับแรงอัดสูงตั้งแต่ในช่วงอายุต้น แต่ไม่ค่อยพัฒนาในช่วงอายุปลาย ส่วนจากการบ่มร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส การพัฒนากำลังรับแรงอัดไม่สูงมากนักในช่วงอายุต้น แต่จะพัฒนามากขึ้นในช่วงอายุปลาย ความชันของเส้นกราฟช่วง อายุ 7-28 วัน มีความชันมากกว่าการบ่มที่อุณหภูมิบ่มที่สูงกว่า เป็นผลดีต่อการนำไปพัฒนาเพื่อให้สามารถผลิตจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่สามารถ

แข็งตัวและให้กำลังรับแรงอัดได้โดยไม่ต้องใช้ความร้อนสูงในการบ่ม หากมีการนำไปศึกษาและพัฒนาต่อโดยการลดอุณหภูมิในการบ่มตัวอย่างลง ควรมีการพิจารณากำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่อายุมากกว่า 28 วัน

อุณหภูมิบ่มสูงสามารถเร่งปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน มีผลต่อการพัฒนากำลังอัดของคอนกรีตในช่วงอายุต้นมากกว่าการบ่มที่อุณหภูมิต่ำ แต่อุณหภูมิบ่มที่สูงนี้ทำให้เกิดการแตกร้าวเนื่องจากความร้อน (Thermal cracking) ในเนื้อคอนกรีต โดยคอนกรีตขยายตัวและเพิ่มปริมาตรที่บริเวณผิวที่สัมผัสกับความร้อนขณะทำการบ่ม การเหี่ยวรั้งของชิ้นส่วนคอนกรีตทำให้เกิดความเค้นเนื่องจากแรงอัด และหลังการบ่มด้วยความร้อน อัตราการเกิดความร้อนลดลงถึงจุดที่อัตราการสูญเสียความร้อนสูงกว่าอัตราการเกิดความร้อน นำไปสู่การหดตัวของคอนกรีตโดยที่การหดตัวจะทำให้เกิดความเค้นจากแรงดึงและทำให้เกิดการแตกร้าว (Dter, 2014) ส่งผลให้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่บ่มในอุณหภูมิสูงไม่พัฒนากำลังรับแรงอัดในช่วงอายุปลาย

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตจากผลการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบ่ม

No.	Curing temperature (°C)	Average compressive strength/Normalized ksc./(%)		
		ksc./(%)		
		3 days	7 days	28 days
3	60	229/(100)	238/(100)	282/(100)
16	80	268/(117)	279/(117)	292/(104)
17	100	285/(124)	295/(124)	303/(107)



รูปที่ 7 ผลจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิบ่มต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต

4. สรุปผลและอภิปรายผล

จากการศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อกำลังรับแรงอัดของ จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตที่ผลิตจากเถ้าขานอ้อยผสม เศษอะลูมิเนียม โดยใช้เถ้าขานอ้อยจาก 2 แหล่ง แทนที่เถ้าขาน อ้อยด้วยเศษอะลูมิเนียมร้อยละ 0-1 โดยน้ำหนัก ใช้สารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 10 โมลาร์ อัตราส่วนสารเร่งปฏิกิริยาต่อวัสดุตั้งต้น (LA/BA) เท่ากับ 0.50-0.65 อัตราส่วนระหว่างสารละลายโซเดียมซิลิเกตต่อสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Na}_2\text{SiO}_3:\text{NaOH}$) เท่ากับ 1:1 โดยน้ำหนัก และทำการบ่มด้วยความร้อนที่อุณหภูมิ 60-100 องศาเซลเซียส ทำการทดสอบกำลังรับแรงอัดที่อายุ 3 7 และ 28 วัน พบว่า ปัจจัยต่างๆ ทั้งแหล่งที่มาของเถ้าขานอ้อย การแทนที่เถ้าขาน อ้อยด้วยเศษอะลูมิเนียม อัตราส่วนสารละลายอัลคาไลน์ ต่อวัสดุตั้งต้น และอุณหภูมิในการบ่ม ส่งผลโดยตรงกับ การเกิดปฏิกิริยาจีโอโพลิเมอร์ไรเซชัน ทำให้สมบัติ การรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีตเปลี่ยนแปลง

แหล่งที่มาและองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าขานอ้อยมี ความสำคัญอย่างมากต่อกำลังรับแรงอัดของจีโอโพลิเมอร์ คอนกรีต เถ้าขานอ้อยที่มีการดูดซึมน้ำและการสูญเสียน้ำหนัก เนื่องจากการเผาต่อส่งผลให้กำลังรับแรงอัดสูงกว่าเถ้าขานอ้อย ที่มีการดูดซึมน้ำและการสูญเสียน้ำหนักเนื่องจากการเผาสูง

การแทนที่เถ้าขานอ้อยด้วยเศษอะลูมิเนียมที่เหมาะสม เท่ากับร้อยละ 0.4 โดยน้ำหนัก ทำให้จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมี กำลังรับแรงอัดสูงสุด

อัตราส่วนสารละลายอัลคาไลน์ต่อวัสดุตั้งต้น (AL/BA) ส่งผลต่อทั้งกำลังรับแรงอัดและความสามารถในการทำงานได้ ของจีโอโพลิเมอร์คอนกรีต โดย AL/BA ต่ำ กำลังรับแรงอัดของ จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีค่าสูงแต่ความสามารถในการทำงานได้ ต่ำ ตรงกันข้ามหาก AL/BA สูง กำลังรับแรงอัดของ จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตมีค่าต่ำแต่ความสามารถในการทำงานได้ เพิ่มขึ้น

การบ่มที่อุณหภูมิสูงมีผลต่อการพัฒนากำลังรับแรงอัดได้ ดีเฉพาะในช่วงอายุต้น แตกต่างจากการบ่มที่อุณหภูมิต่ำกว่าที่ สามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดเพิ่มมากขึ้นตามอายุของคอนกรีต ซึ่งที่อายุคอนกรีต 28 วัน การบ่มร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส มีกำลังรับแรงอัดใกล้เคียงกับการบ่มที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณ หน่วยวิจัยวิศวกรรมโครงสร้าง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ได้สนับสนุน อุปกรณ์ เครื่องมือ และสถานที่ในการทำวิจัยครั้งนี้ คุณมีศักดิ์ธนา พัวพิทยธร บุคลากรในห้องวิจัย และบุคลากร ของคณะวิศวกรรมศาสตร์ที่ได้ให้ความช่วยเหลือ และได้ร่วม ทำการศึกษา เก็บรวบรวมข้อมูลทำให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จ ลุล่วงด้วยดี

6. ข้อเสนอแนะ

ศึกษาและพัฒนาความสามารถที่ได้ควบคู่ไปกับ กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตให้เป็นไปตามมาตรฐานงาน คอนกรีตและคอนกรีตเสริมเหล็ก

ศึกษาการลดอุณหภูมิในการบ่มจีโอโพลิเมอร์หรือพัฒนาให้ จีโอโพลิเมอร์คอนกรีตสามารถพัฒนากำลังรับแรงอัดได้ ในสภาพแวดล้อมปกติ

7. เอกสารอ้างอิง

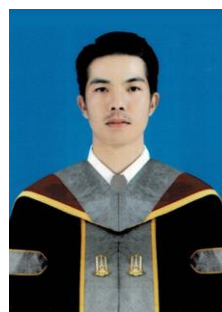
- Chindaprasit, P., Chareerat, T., & Khunawanakit, W. (2008). Geopolymer from Mae Moh fly Ash. *Engineering and Applied Science Research (EASR)*, 32(5), 715-724.
- Chusilp, N., Jaturapitakkul, C., & Kiattikomol, K. (2009). Effects of LOI of ground bagasse ash on the compressive strength and sulfate resistance of mortars. *Construct Build Mater* 23, 3523-3531.
- Cordeiro, G. C., Toledo Filho, R. D., Tavares, L. M., & Fairbairn, E. M. R. (2008). Pozzolanic activity and filler effect of sugar cane bagasse ash in Portland cement and lime mortars. *Cement and Concrete Composites*, 30(5), 410-418.
- CPAC Concrete Academy. (2013). *Concrete Technology. Chapter 18: Concrete Mixing Design*. <https://www.cpacacademy.com>
- Dobrowolski, T. (2011). The dynamics of the kink in curved large area josephson junction. *Discrete and Continuous Dynamical Systems - Series S*, 4 (5), 1095-1105. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.11.045>
- Dter, T. (2014). *Concrete durability*. Taylor & Francis Group.

- Fairbairn, E. M. R., Americano, B. B., Cordeiro, G. C., Paula, T. P., Toledo Filho, R. D., & Silvoso, M. M. (2010). Cement replacement by sugar cane bagasse ash: CO₂ emissions reduction and potential for carbon credits. *Journal of Environmental Management*, 91(9), 1864–1871. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.04.008>
- Ganesan, A., & Rajagopal, K. (2007). Evaluation of bagasse as corrosion resisting admixture for carbon steel in concrete. *Anti-Corros Methods Mater* 54, 230-236.
- Office of the Cane and Sugar Board, Ministry of Industry Thailand. (2016). *Report of sugar cane and sugar production*. <http://www.ocsb.go.th>
- Rattanasak, P. & Chindaprasit, P. (2008). Study of geopolymer from fly ash. *Journal of Industrial Technology*, 8(2), 1–8.
- Rukzon, S., & Ngenprom, N. (2010). The development of rice husk ash and bagasse ash based geopolymeric materials. Rajamangala University of Technology Phra Nakhon Intellectual Repository.
- Singh, N. B., Singh, V. D., & Sarita, R. (2000). Hydration of Bagasse Ash-blended Portland Cement. *Cement and Concrete Research*, 30, 1485-1488.
- Somna, R., & Jaturapitakkul, C. (2011). Use of Ground Bagasse Ash to Improve Compressive Strength, Water Permeability, and Chloride Resistance of Recycled Aggregate Concrete. *KMUTT Research and Development Journal*, 34(4), 369–381.
- Sujavanich, S. (2003). Effect of bagasse ash on binder characteristics. *Kasetsart Engineering Journal (Thailand)*, 48, 18-22.
- Turner, L. K., & Collins, F. G. (2013). Carbon dioxide equivalent (CO₂-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete. *Construction and Building Materials*, 43, 125–130. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2013.01.023>
- Villar-Cocifta, E., Frias, M., & Valencia, E. (2008). Sugar cane wastes as pozzolanic materials: application of mathematic model. *Aci Materials Journal*, 105, 258-264.
- Witoteerasan, W., Homwuttiwong, S., & Wongpa, J. (2014). Geopolymer Mortar Production from Waste Materials. *Engineering Journal Chiang Mai University*, 21(1), 1-9.

Wongpa, J. (2009). Development of ash from industrial plants to replace Portland cement. *Research community*, 85, 75–76.

Zhou, W., Yan, C., Duan, P., Liu, Y., Zhang, Z., Qiu, X., & Li, D. (2016). A comparative study of high- and low-Al₂O₃ fly ash based-geopolymers: The role of mix proportion factors and curing temperature. *Materials and Design*, 95, 63–74. <https://doi.org/10.1016/j.matdes.2016.01.084>

8. ประวัติผู้แต่ง



พิพรรณ อินปลัด สำเร็จการศึกษาวศ.บ. วิศวกรรมโยธา (2558) มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ปัจจุบันอยู่ระหว่างศึกษาต่อในระดับปริญญาโท สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม สนใจและทำงานวิจัยทางด้านวัสดุก่อสร้าง วัสดุพอลิเมอร์ จีโอโพลิเมอร์คอนกรีต เป็นต้น



รศ.ดร.สทลภ หอมวุฒิวงศ์ สำเร็จการศึกษาระดับ วศ.บ. วิศวกรรมเกษตร (2536) และระดับ วศ.ม. วิศวกรรมโครงสร้าง (2542) จากมหาวิทยาลัยขอนแก่น จากนั้นในปี 2550 ได้สำเร็จการศึกษาระดับ ปร.ด. วิศวกรรมโยธา จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ปัจจุบันดำรงตำแหน่งรองศาสตราจารย์ ประจำคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม สนใจและทำงานวิจัยทางด้านวัสดุก่อสร้าง วัสดุพอลิเมอร์ จีโอโพลิเมอร์คอนกรีต วัสดุถ่อน้ำ เป็นต้น

การเลือกที่ตั้งศูนย์หลบภัยชั่วคราวในช่วงภัยพิบัติมลพิษทางอากาศ PM 2.5 ด้วยกระบวนการ
วิเคราะห์ตามลำดับชั้น กรณีศึกษามหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Temporary Shelter-Site Selection During PM 2.5 Air Pollution Disaster Via Analytic
Hierarchy Process: A Case Study of Chiang Mai University

ชวิศ บุญมี* ศิวัช แจ่มจรรยา และ ภูริชญา อัสวโกวิทพงศ์
Chawis Boonmee, Siwach Chamchanya, and Purichaya Atsawakowitphong

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University
*Corresponding author. E-mail address: chawis.boonmee@cmu.ac.th

(Received May 25, 2020, Revised: September 13, 2020, Accepted: November 23, 2020)

บทคัดย่อ

งานวิจัยชิ้นนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะนำเสนอการเลือกที่ตั้งศูนย์หลบภัยชั่วคราวในช่วงภัยพิบัติมลพิษทางอากาศฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM 2.5) ด้วยกระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น (AHP) สำหรับกรณีศึกษามหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ในลำดับแรกได้เริ่มจากการกำหนดเกณฑ์ในการประเมินทางเลือก โดยได้ทำการสำรวจหาปัจจัยหลักและปัจจัยรองจากการสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญที่มีประสบการณ์เกี่ยวกับการสร้างศูนย์หลบภัย PM 2.5 และจากนั้นได้ทำการระบุตำแหน่งเบื้องต้นสำหรับการสร้างศูนย์หลบภัยชั่วคราว โดยได้จัดทำแบบสอบถามทั้งหมด 617 ชุด เพื่อที่จะค้นหาบริเวณที่มีความเหมาะสมตามความต้องการของผู้ใช้บริการ เมื่อทำการสำรวจบริเวณเบื้องต้นแล้วนั้น จึงได้ทำการค้นหาพื้นที่ที่มีความเป็นไปได้ในการสร้างศูนย์หลบภัยชั่วคราวออกมา 3 สถานที่ โดยทำการพิจารณาจากปัจจัยเบื้องต้นที่ได้มาจากการสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญและการเก็บข้อมูลของสถานที่ที่จำเป็นสำหรับการประเมินในปัจจัยต่าง ๆ ต่อมาได้ทำการประยุกต์ใช้ AHP สำหรับการเลือกที่ตั้งศูนย์หลบภัยชั่วคราว ท้ายสุดทำการวิเคราะห์ผลและจัดสร้างแนวทางในการจัดสร้างศูนย์หลบภัยชั่วคราวเบื้องต้นจากสถานที่ที่มีคะแนนสูงสุด จากผลลัพธ์ของงานวิจัยนี้พบว่า ปัจจัยที่มีผลต่อการคัดเลือกลำดับ คือ ฟังก์ชันของห้อง ค่าใช้จ่าย การเข้าถึง ลักษณะของห้อง และสาธารณูปโภค ตามลำดับ ซึ่งสถานที่ที่มีความเหมาะสมมากที่สุดภายในตัวเลือก 3 สถานที่นี้คือ หอสมุดกลางชั้น 4 จากการประยุกต์ใช้เทคนิค AHP พบว่า เทคนิคนี้สามารถที่จะช่วยผู้ตัดสินใจในการเลือกศูนย์หลบภัยพิบัติชั่วคราวได้อย่างเหมาะสมภายใต้เกณฑ์ที่กำหนดและสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับการเลือกสถานที่ตั้งในกรณีศึกษาอื่น ๆ ได้

คำสำคัญ: กระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น ภัยพิบัติมลพิษทางอากาศ ศูนย์หลบภัยชั่วคราว

Abstract

This research aims to present the temporary shelter-site selection during fine-particulate matter with a diameter of 2.5 microns (PM 2.5) air pollution disaster via the Analytic Hierarchy Process (AHP) for Chiang Mai University case study. Firstly, the main criteria and sub-criteria for the evaluation of alternatives were set by interviewing the experts who have experiences about PM 2.5 shelter construction. Then, a suitable area for temporary shelter-sites was identified by distributing the 617 questionnaires in order to seek a suitable area based on the demand for services. After the survey of the suitable area, the three-temporary shelter-site candidates were sought based on the consideration of the criteria from the interview of the experts, and the preliminary data of three candidates were collected. Next, the AHP was applied for selecting the temporary shelter-site. Finally, the results were analyzed and the primary guideline of the temporary shelter which obtained the highest score was proposed for constructing the temporary shelter. The results of this research found that the main criteria consist of room function, cost, accessibility, room character, and public utility, respectively. The most suitable temporary shelter-site based on three candidates was the room on the 4th floor at CMU's main library. Owing to the application of AHP, we found that this technique can help the decision-makers to select the suitable temporary shelter under the specified criteria and this research method can apply to other cases for the location selection.

Keywords: Analytic Hierarchy Process (AHP), Air pollution disaster, Temporary shelter

1. คำนำ

จากการศึกษาข้อมูลเบื้องต้นของภัยพิบัติมลพิษทางอากาศฝุ่นละอองขนาดเล็กไม่เกิน 2.5 ไมครอน (PM 2.5) นั้น ทำให้เห็นถึงความอันตรายที่จะเกิดกับประชาชนทั่วไปโดยเฉพาะ เด็ก ผู้สูงอายุ และผู้ป่วย พบว่ามลพิษทางอากาศ PM 2.5 หรือฝุ่นที่มีขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน มีขนาดเล็กมากพอที่จะหายใจเข้าไปสู่ปอดและซึมผ่านผนังปอดเข้าสู่กระแสเลือดดังนั้นแล้วผลที่เกิดขึ้นกับร่างกายจึงมีทั้งแบบ ‘เฉียบพลัน’ (เห็นผลใน 1 - 2 วัน) ซึ่งส่วนมากจะเกิดกับระบบทางเดินหายใจ คือ ไอ เจ็บคอ หายใจแล้วมีเสียงฟืดฟาด เลือดกำเดาไหล ซึ่งหากเลือดไหลลงคอก็จะทำให้เสมหะมีเลือดเจือปน หากเข้าตาจะทำให้เคืองตา ตาแดง และหากโดนผิวหนังก็จะทำให้เกิดผื่นคัน เป็นตุ่มได้ ส่วนผลแบบ ‘เรื้อรัง’ (ค่อย ๆ สะสม แล้วแสดงผลในระยะยาว) คือ เส้นเลือดหัวใจตีบตันทำให้หัวใจวาย หัวใจเต้นผิดปกติ เส้นเลือดไปเลี้ยงสมองตีบ ทำให้เกิดภาวะอัมพาตหรือเสียชีวิต การเป็นมะเร็งปอด เพราะฝุ่นขนาดเล็กจะมีสารก่อมะเร็ง Polycyclic Aromatic Hydrocarbon (PAH) เป็นต้น ซึ่งผลกระทบเหล่านี้มีการยืนยันที่ตรงกันจากงานวิจัยทั่วโลก ดังนั้นแล้วทุกคนจึงควรป้องกันการรับฝุ่น PM 2.5 เข้าสู่ร่างกาย โดยเฉพาะกลุ่มเสี่ยง คือ ผู้สูงอายุ

(อายุมากกว่า 60 ปี) รองลงมาคือเด็กอายุต่ำกว่า 10 ปี และอีกกลุ่มเสี่ยงที่ต้องระมัดระวังเป็นอย่างมากคือผู้ป่วยโรคปอดและโรคหัวใจ (Wiwatanadate, 2019)

จังหวัดเชียงใหม่เป็นอีกหนึ่งจังหวัดที่ต้องเผชิญกับปัญหาเหล่านี้ทุก ๆ ปีในช่วงเดือนธันวาคมถึงมีนาคม ถึงแม้ว่าประชากรช่วงวัยรุ่นไม่ได้เป็นช่วงอายุที่มีความเสี่ยงมากนัก แต่ก็ถือว่าหากได้รับฝุ่น PM 2.5 เข้าสู่ร่างกายในปริมาณที่มากแล้วนั้นก็สมารถทำให้เกิดอันตรายต่อชีวิตเช่นเดียวกัน ซึ่งในปี 2563 ที่ผ่านมา จุดตรวจค่า PM 2.5 ในจังหวัดเชียงใหม่ สามารถวัดค่าฝุ่นสูงสุดได้ถึง 412 ไมโครกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (IQAir, 2020) จึงทำให้หลากหลายภาคส่วนให้ความสำคัญเกี่ยวกับภัยพิบัติมลพิษทางอากาศ PM 2.5 เป็นอย่างมาก มหาวิทยาลัยเชียงใหม่เป็นอีกหนึ่งองค์กรที่ให้ความสำคัญเกี่ยวกับเรื่องนี้ ผู้บริหารจึงได้มีการรณรงค์ให้มีการป้องกันเกี่ยวกับภัยพิบัติที่เกิดขึ้น มีการหาแนวทางต่าง ๆ มากมายเพื่อป้องกันสุขภาพของบุคลากรและนักศึกษาในมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ห้องหรือศูนย์หลบภัยในช่วงภัยพิบัติมลพิษทางอากาศ PM 2.5 เป็นอีกหนึ่งแนวคิดที่จะช่วยป้องกันให้บุคลากรและนักศึกษาในมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ปลอดภัยจากภัยพิบัติมลพิษทางอากาศ PM 2.5 นี้ได้ ในปัจจุบันห้องปลอดฝุ่นได้

ถูกจัดตั้งขึ้นในพื้นที่แต่ละคณะเป็นจำนวนพอสมควรแล้ว หากแต่พื้นที่ดังกล่าวยังไม่มี ความเพียงพอต่อความต้องการของบุคลากร และนักศึกษาในมหาวิทยาลัยเชียงใหม่

ปัญหาการเลือกที่ตั้ง (Location problem) เป็นอีกหนึ่งปัญหาที่มีความยุ่งยากและซับซ้อน เนื่องจากผู้ตัดสินใจต้องทำการพิจารณาจากปัจจัยหลายอย่างร่วมกัน หลากหลายเทคนิคได้ถูกนำมาใช้ประยุกต์ในการแก้ไขปัญหา ดังกล่าว อาทิเช่น การใช้หลักการการหาค่าที่ดีที่สุด (Optimization) (Boonmee et al., 2017) การจำลองสถานการณ์ (Simulation) (Kim et al., 2018) และการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์ (Multiple criteria decision making) (Awasthi et al., 2011) เป็นต้น การใช้เทคนิคตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์ (Multiple criteria decision making) เป็นอีกหนึ่งวิธีการที่ได้รับความนิยมเป็นอย่างมากในการวิเคราะห์กระบวนการตัดสินใจ ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการตัดสินใจคัดเลือกสิ่งต่าง ๆ มากมายภายใต้หลักเกณฑ์ที่กำหนด กระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น (Analytic Hierarchy Process: AHP) เป็นหนึ่งในวิธีการตัดสินใจแบบหลายหลักเกณฑ์ ซึ่งจะใช้ในการตัดสินใจเลือกทางเลือก หรือจัดลำดับความสำคัญของทางเลือก เมื่อมีเกณฑ์ในการพิจารณาหลายเกณฑ์ การประยุกต์ใช้วิธีการกระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้นนี้ ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้ในปัญหาการเลือกที่ตั้งหลาย ๆ ด้าน อาทิ เช่น การเลือกที่ตั้งศูนย์กระจายสินค้า (Vieira et al., 2017) การเลือกที่ตั้งโรงงาน (Chang & Lin, 2015) การที่เลือกที่ตั้งโรงพยาบาลชั่วคราว (Chatterjee & Mukherjee, 2013) การเลือกที่ตั้งศูนย์อพยพ (Boonmee et al., 2017) เป็นต้น จากการทบทวนวรรณกรรม ยังไม่มีงานวิจัยใดเลยที่ทำการประยุกต์ใช้กระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้นในปัญหาการเลือกที่ตั้งศูนย์หลบภัยในช่วงภัยพิบัติมลพิษทางอากาศ PM 2.5 ดังนั้น ผู้วิจัยจึงมีวัตถุประสงค์ที่จะทำการประยุกต์ใช้วิธีการกระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้นในการเลือกที่ตั้งศูนย์หลบภัยในช่วงภัยพิบัติมลพิษทางอากาศ PM 2.5 เพิ่มเติมที่เหมาะสมสำหรับกรณีศึกษา มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ งานวิจัยชิ้นนี้จะทำให้ทราบถึงปัจจัยหรือเกณฑ์ที่มีความสำคัญต่อการคัดเลือกหรือพิจารณาศูนย์หลบภัยชั่วคราวในช่วงภัยพิบัติมลพิษทางอากาศ PM 2.5 และจะเป็นประโยชน์ต่อมหาวิทยาลัยที่จะช่วยในการพิจารณาในการสร้างศูนย์หลบภัยในช่วงภัยพิบัติมลพิษทางอากาศ PM 2.5 เพิ่มเติมให้นักศึกษาและบุคลากรสำหรับการป้องกันอันตรายที่อาจจะเกิดขึ้นต่อสุขภาพต่าง ๆ รวมถึงเป็นแนวทางเบื้องต้นในการเลือก

และจัดเตรียมศูนย์หลบภัยในช่วงภัยพิบัติมลพิษทางอากาศ PM 2.5 ให้กับกรณีศึกษาอื่น ๆ ต่อไป

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ส่วนนี้เป็นการอธิบายถึงทฤษฎีเบื้องต้นที่ได้นำมาประยุกต์ใช้ใน งานวิจัยชิ้นนี้ ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดต่อไปนี้

2.1 กระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น (Analytic Hierarchy Process : AHP)

AHP ได้ถูกคิดค้นและพัฒนาขึ้นเมื่อปลายปี คศ. 1970 โดย Thomas L. Saaty (Deng et al., 2014) วิธีการนี้เป็นอีกเทคนิคหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในกระบวนการตัดสินใจได้เป็นอย่างดี ซึ่งได้รับความนิยมอย่างมากและเป็นที่ยอมรับกันในระดับสากลอย่างแพร่หลาย โดยเทคนิคนี้จะทำการแบ่งองค์ประกอบของปัญหาออกเป็น ส่วนๆ ในรูปของแผนภูมิตามลำดับชั้น จากนั้นมีการให้ค่าน้ำหนักของแต่ละองค์ประกอบแล้วนำมาคำนวณค่าน้ำหนัก เพื่อนำไปสู่ค่าลำดับความสำคัญของแต่ละทางเลือก ว่าทางเลือกใดมีค่าสูงสุด ซึ่งจะสามารถนำมาประกอบการตัดสินใจได้เป็นอย่างดี เนื่องจากโครงสร้างของ AHP เป็นการเลียนแบบกระบวนการคิดของมนุษย์ ดังนั้นเทคนิคนี้จึงเหมาะสำหรับทั้งการตัดสินใจที่เป็นรายบุคคลและเป็นกลุ่ม ขั้นตอนของ AHP นั้น มีดังต่อไปนี้

1. ทำการจัดโครงสร้างลำดับชั้นในการวิเคราะห์ ประกอบไปด้วยเป้าหมาย, เกณฑ์หลัก, เกณฑ์ย่อยและทางเลือก

2. เปรียบเทียบความสำคัญของเกณฑ์ในการตัดสินใจด้วยวิธีการ Pairwise Comparison โดยทำการสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญเพื่อให้คะแนนในแต่ละเกณฑ์และทำการเปรียบเทียบหาความสำคัญของแต่ละเกณฑ์ เกณฑ์ในการให้คะแนนแบ่งออกเป็น 5 ระดับ คือ

- 1 ความสำคัญเท่ากัน (Equally Preferred)
- 2 ความสำคัญมากกว่าปานกลาง (Moderately Preferred)
- 3 ความสำคัญมากกว่าค่อนข้างมาก (Strongly Preferred)
- 4 ความสำคัญมากกว่ามาก (Very Strongly Preferred)
- 5 ความสำคัญมากกว่ามากที่สุด (Extremely)

3. หาค่าน้ำหนักเกณฑ์ โดยคำนวณหาค่า Eigenvector ของเมตริกในแต่ละแถวโดยการหา Normalized จากนั้นคำนวณหา ลำดับความสำคัญของระดับชั้นถัดไปลงมา

4. การคำนวณ ค่าความสอดคล้องกันของเหตุผล (Consistency Ratio: C.R) โดยการคำนวณค่าดัชนีวัดความสอดคล้อง (consistency Index: C.I.) ดังสมการที่ 1

$$C.I. = (\lambda_{\max} - n)/(n - 1) \quad (1)$$

จากนั้นเปิดตารางค่าดัชนีความสอดคล้องเชิงสุ่ม (Random Consistency Index: R.I.) ดังตารางที่ 1 และคำนวณค่าความสอดคล้องกันของเหตุผล โดยคำนวณได้จากอัตราส่วนเปรียบเทียบระหว่างค่าดัชนีวัดความสอดคล้องกับค่าดัชนีความสอดคล้องเชิงสุ่ม ดังสมการที่ 2 ถ้า $C.R. \leq 0.1$ แสดงว่าค่าปัจจัยมีความสอดคล้องกัน สามารถนำค่า Eigenvector ไปใช้เป็นค่าน้ำหนักได้ ถ้า $C.R. > 0.1$ แสดงว่าค่าปัจจัยไม่มีความสอดคล้องกัน ต้องปรับหรือให้ค่าปัจจัยใหม่ เพื่อคำนวณค่า $C.R. \leq 0.1$ ถึงจะนำค่า Eigenvector ไปใช้งานได้

$$C.R. = C.I./R.I. \quad (2)$$

ตารางที่ 1 ค่าดัชนีความสอดคล้องเชิงสุ่ม (Random Consistency Index:)

N	1	2	3	4	5	6	7	8
R.I.	0.00	0.00	0.58	0.90	1.12	1.24	1.32	1.42

5. หาค่าน้ำหนักของเกณฑ์รองและทำการประเมินทางเลือกให้สอดคล้องกับเกณฑ์ที่กำหนดมาเบื้องต้น ด้วยวิธีการดังขั้นตอนที่ 2 ถึง 4

2.2 การวิเคราะห์ความเที่ยงตรงด้วยวิธีการวิเคราะห์ดัชนีความสอดคล้องแบบ IOC

การวิเคราะห์ความเที่ยงตรงด้วยวิธีการวิเคราะห์ดัชนีความสอดคล้องแบบ IOC เป็นวิธีการที่ใช้ในการประเมินแบบสอบถามเบื้องต้นว่ามีความเหมาะสมกับวัตถุประสงค์ในการสร้างแบบสอบถามหรือไม่ (Turner & Carlson, 2003) โดยผู้ประเมินจะทำการให้คะแนนในหัวข้อคำถามต่าง ๆ โดยที่ (+1) หมายความว่าแน่ใจว่าคำถามของแบบสอบถามนั้นสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ (1) หมายความว่าไม่แน่ใจว่าคำถามของแบบสอบถามนั้นสอดคล้องกับวัตถุประสงค์และ (-1) หมายความว่าแน่ใจว่าคำถามของแบบสอบถามนั้นไม่สอดคล้องกับ

วัตถุประสงค์ เมื่อทำการให้คะแนนแล้วนั้นก็ให้นำคะแนนมาคำนวณดังสมการที่ 3

$$IOC = \Sigma R/n \quad (3)$$

โดยที่

IOC แทนดัชนีความสอดคล้องระหว่างแบบสอบถามกับวัตถุประสงค์

ΣR แทนผลรวมของคะแนนความคิดเห็นจากผู้เชี่ยวชาญ

n แทนจำนวนผู้เชี่ยวชาญ

กรณีที่ผู้ผู้เชี่ยวชาญ 3 ท่านจะใช้ค่า IOC ตั้งแต่ 0.5 ขึ้นไป หากการประเมินในข้อใดที่ค่า IOC ต่ำกว่าที่กำหนดก็จะถูกตัดทิ้งออกไปจากแบบสอบถาม

2.3 การกำหนดขนาดกลุ่มจำนวนประชากร

การกำหนดขนาดกลุ่มจำนวนประชากรมีหลากหลายวิธีที่จะสามารถใช้ในการคำนวณหาขนาดกลุ่มจำนวนประชากรได้ ซึ่งวิธีการของทาโร ยามาเน เป็นอีกหนึ่งวิธีการที่นิยมเป็นอย่างมาก (Singh & Masuku, 2014) โดยสามารถทำการคำนวณดังสมการที่ 4

$$n = N/(1+Ne^2) \quad (4)$$

โดยที่

n ขนาดของกลุ่มตัวอย่างที่ต้องการ

N ขนาดของประชากร

e ความคลาดเคลื่อนของการสุ่มตัวอย่างที่ยอมรับได้

3. วิธีการศึกษา

ในการประยุกต์ใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์สำหรับการเลือกที่ตั้งศูนย์หลบภัยชั่วคราวในช่วงภัยพิบัติมลพิษทางอากาศ PM 2.5 ประกอบไปด้วยทั้งหมด 6 ขั้นตอนหลักๆ ซึ่งสามารถแสดงรายละเอียดได้ดังต่อไปนี้

3.1 การศึกษาข้อมูลของภัยพิบัติมลพิษทางอากาศ PM 2.5 และกรณีศึกษามหาวิทยาลัยเชียงใหม่เบื้องต้น

ทำการศึกษาปัญหาที่ทำให้เกิดมลพิษทางอากาศ PM 2.5 แนวทางเบื้องต้นสำหรับการรับมือกับภัยพิบัติมลพิษทางอากาศ

PM 2.5 วิธีการสร้างศูนย์หลบภัยเบื้องต้น รวมถึงทำการศึกษาค้นคว้าที่ของมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ทั้งลักษณะความสามารถในการจัดตั้งศูนย์หลบภัยชั่วคราวและความต้องการของผู้ใช้ศูนย์หลบภัยชั่วคราวในช่วงภัยพิบัติมลพิษทางอากาศ PM 2.5 เป็นต้น

3.2 การกำหนดเกณฑ์ในการประเมิน

ศึกษาเกณฑ์ที่มีความจำเป็นต่อการประเมินสำหรับการเลือกที่ตั้งศูนย์หลบภัยในช่วงภัยพิบัติมลพิษทางอากาศ PM 2.5 โดยเกณฑ์เหล่านี้จะได้ออกมาจากการสอบถามและสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญผู้มีประสบการณ์ด้านการจัดการมลพิษทางอากาศ PM 2.5 ผู้เชี่ยวชาญการสร้างห้องปลอดฝุ่นและผู้เชี่ยวชาญด้านสุขภาพ เป็นต้น โดยเกณฑ์ที่กำหนดจะแบ่งออกเป็น 2 ส่วนคือเกณฑ์ปัจจัยหลัก (Main criteria) และเกณฑ์ปัจจัยย่อย (Sub-criteria)

3.3 การระบุตำแหน่งเบื้องต้นสำหรับการสร้างศูนย์หลบภัยชั่วคราว

ทำการสำรวจบริเวณพื้นที่เบื้องต้น เพื่อให้ทราบถึงบริเวณความต้องการของการใช้พื้นที่เพิ่มเติมของกรณีศึกษา โดยพื้นที่ที่จะถูกคัดเลือกมาเพื่อใช้ในการสำรวจนั้นจะต้องถูกคัดกรองมาเบื้องต้นว่ามีความเป็นไปได้ในการสร้างศูนย์หลบภัยชั่วคราวตามปัจจัยเบื้องต้นในหัวข้อที่ 3.2 แบบสอบถามได้ถูกสร้างขึ้นและถูกทำการประเมินถึงความสอดคล้องระหว่างคำถามรายข้อกับวัตถุประสงค์ที่ต้องการ โดยใช้การวิเคราะห์ความเที่ยงตรงด้วยวิธีการวิเคราะห์ดัชนีความสอดคล้องแบบ IOC หลังจากประเมินแบบสอบถามเสร็จเรียบร้อยแล้วจะทำการสำรวจโดยการสุ่มสัมภาษณ์นักศึกษาและบุคลากร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ โดยอ้างอิงการกำหนดขนาดของกลุ่มตัวอย่างประชากรจากสูตรหาขนาดกลุ่มตัวอย่างที่เหมาะสมกรณีทราบขนาดของประชากรของมหาวิทยามาเน่ จากนั้นทำการสรุปบริเวณพื้นที่ที่มีความต้องการให้สร้างศูนย์หลบภัยพิบัติมลพิษทางอากาศ PM 2.5 ในพื้นที่มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ท้ายสุดทำการค้นหาพื้นที่ที่มีความเป็นไปได้ในการสร้างศูนย์หลบภัยชั่วคราวในบริเวณดังกล่าว โดยทำการพิจารณาจากปัจจัยที่ได้รับจากการสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญตามหัวข้อที่ 3.2 เป็นเกณฑ์ในการคัดกรองเบื้องต้น และทำการเก็บข้อมูลของสถานที่ที่จำเป็นสำหรับการประเมินในปัจจัยต่าง ๆ เพื่อใช้ในการเปรียบเทียบแต่ละสถานที่

3.4 การประยุกต์ใช้ AHP สำหรับการเลือกที่ตั้งศูนย์หลบภัยชั่วคราว

วิธีการของการใช้เทคนิคกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์นั้นประกอบไปด้วย 5 ขั้นตอนหลัก ซึ่งจะถูกนำมาประยุกต์ใช้ในการหาค่าน้ำหนักของแต่ละเกณฑ์ทั้งเกณฑ์หลักและเกณฑ์รอง รวมไปถึงการประเมินทางเลือกของศูนย์หลบภัยชั่วคราว โดยมีขั้นตอนดังข้อมูลที่กล่าวไปในหัวข้อที่ 2.1

3.5 การวิเคราะห์ผลและจัดสร้างแนวทางในการจัดสร้างศูนย์หลบภัยชั่วคราวเบื้องต้น

วิเคราะห์ผลจากการประยุกต์ใช้เทคนิคกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ โดยสถานที่ที่มีค่าคะแนนสูงที่สุดจะแสดงให้เห็นถึงพื้นที่ที่มีความเหมาะสมมากที่สุดในการจัดตั้งเป็นศูนย์หลบภัยชั่วคราวในช่วงภัยพิบัติมลพิษทางอากาศ PM 2.5

3.6 สรุปผลการศึกษา

สรุปผลการดำเนินงานและเสนอข้อเสนอแนะสำหรับการพัฒนางานวิจัยในอนาคต

4. ผลการศึกษา

จากที่ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาข้อมูลของภัยพิบัติมลพิษทางอากาศ PM 2.5 และกรณีศึกษามหาวิทยาลัยเชียงใหม่เบื้องต้นแล้วนั้น จึงได้ทำการดำเนินงานวิจัยตามขั้นตอนที่กำหนดไว้ ซึ่งสามารถแสดงผลลัพธ์ของการศึกษางานวิจัยออกมาได้ดังต่อไปนี้

4.1 การกำหนดเกณฑ์ในการประเมิน

การกำหนดเกณฑ์ในการประเมินครั้งนี้ ผู้วิจัยได้ทำการกำหนดเกณฑ์จากการทบทวนวรรณกรรมและการสัมภาษณ์จากผู้เชี่ยวชาญ ที่มีประสบการณ์ด้านการจัดการภัยพิบัติมลพิษทางอากาศ PM 2.5 โดยได้รับความกรุณาจากผู้เชี่ยวชาญที่มีความรู้ทั้งในด้านการจัดทำห้องปลอดฝุ่น ผู้วิเคราะห์ถึงผลกระทบ PM 2.5 และผู้มีความรู้ด้านสุขภาพเกี่ยวมลพิษทางอากาศ PM 2.5 โดยผู้ทำวิจัยได้ทำการสอบถามผู้เชี่ยวชาญทั้ง 5 ท่านเกี่ยวกับปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเลือกห้องที่เหมาะสมสำหรับจัดทำที่ตั้งศูนย์หลบภัยในช่วงสถานการณ์มลพิษทางอากาศ PM 2.5

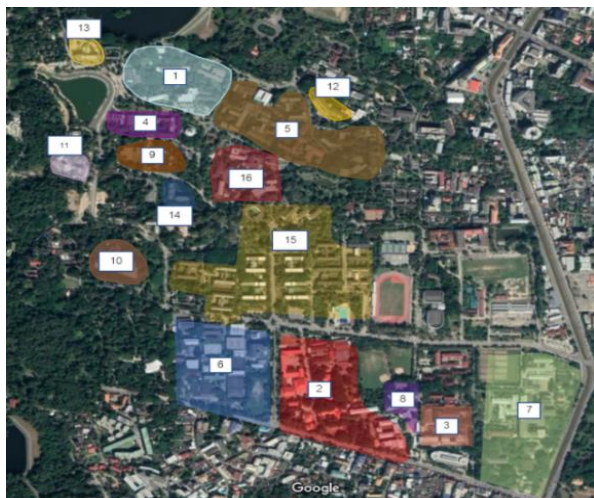
หลังจากทำการสอบถามผู้เชี่ยวชาญครบทั้ง 5 ท่าน สามารถสร้างปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อการเลือกห้องสำหรับจัดทำที่ตั้งศูนย์หลบภัยชั่วคราวในช่วงสถานการณ์มลพิษทางอากาศ PM. 2.5 มีดังนี้ (1) ฟังก์ชันของห้อง (2) ลักษณะของห้อง (3) ค่าใช้จ่าย (4) การเข้าถึง และ (5) สาธารณูปโภค โดยในแต่ละปัจจัยหลักก็จะมีปัจจัยรองดังนี้ ปัจจัยรองของปัจจัยหลักฟังก์ชันของห้องได้แก่ ความจุ ความสะดวกสบายและเครื่องปรับอากาศ ปัจจัยรองของปัจจัยหลักลักษณะของห้องได้แก่ ขนาดของห้องและความสว่าง ปัจจัยรองของปัจจัยหลักค่าใช้จ่ายได้แก่ ค่าติดตั้งและค่าเครื่องกรองอากาศ ปัจจัยรองของปัจจัยหลักการเข้าถึงได้แก่ การเดินทางด้วยการขับรถการเดินทางด้วยการเดินและที่จอดรถ และปัจจัยรองของปัจจัยหลักสาธารณูปโภคได้แก่ ห้องน้ำและร้านสะดวกซื้อ ซึ่งคำนียามเกณฑ์ต่าง ๆ เหล่านี้ได้แสดงดังตารางที่ 2

4.2 การระบุตำแหน่งที่มีความเป็นไปได้ในการสร้างศูนย์หลบภัยชั่วคราวเพิ่มเติม

จากนั้นผู้วิจัยได้ทำการสำรวจหาบริเวณที่บุคคลากรและนักศึกษามีความประสงค์ที่ต้องการจัดสร้างศูนย์หลบภัยชั่วคราวเพิ่มเติมในช่วงมลพิษทางอากาศ PM. 2.5 โดยได้ทำการออกแบบสำรวจสำหรับบุคคลากรและนักศึกษามหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ถึงความต้องการดังกล่าวโดยทำการแบ่งพื้นที่ภายในมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ออกเป็น 16 ส่วนโดยแบ่งตามคณะต่าง ๆ พื้นที่ส่วนกลางและพื้นที่ส่วนหอพักนักศึกษา ดังรูปที่ 1 การออกแบบแบบสอบถามเพื่อในการสำรวจนี้ได้ใช้หลักการวิเคราะห์ความเที่ยงตรงด้วยวิธีการวิเคราะห์ดัชนีความสอดคล้องแบบ IOC โดยใช้ผู้เชี่ยวชาญในการตรวจสอบแบบสอบถามทั้งหมด 3 ท่าน หลังจากการประเมินและการคำนวณตามสมการที่ 1 พบว่า ในแต่ละส่วนนั้นมีค่า IOC มากกว่า 0.5 ทั้งหมด ดังนั้นแบบสอบถามที่ได้ทำการออกแบบมานั้นสามารถนำไปใช้ในการสำรวจได้อย่างเหมาะสม จำนวนในการสำรวจครั้งนี้สามารถทำการคำนวณมาจากสูตรสมการที่ 2 โดยได้ทำการกำหนดขนาดประชากรมีค่าเท่ากับ 47,252 คน และค่าความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้อยู่ที่ร้อยละ 4 จากการคำนวณพบว่า จำนวนที่ต้องทำการสำรวจมีทั้งสิ้น 617 คน ซึ่งวิธีการสำรวจทำโดยการแจกแบบสอบถามทั้งแบบออนไลน์และแบบสอ โดยตรงกับนักศึกษาและบุคลากรภายในมหาวิทยาลัยเชียงใหม่

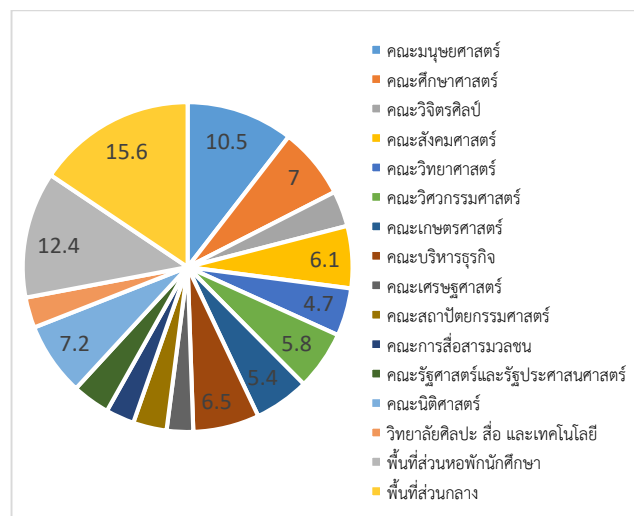
ตารางที่ 2 คำนียามเกณฑ์การเลือกศูนย์หลบภัยชั่วคราว

เกณฑ์หลัก	เกณฑ์ย่อย	คำนียาม
ฟังก์ชันของห้อง	ความจุ	ความสามารถในการรองรับผู้ใช้งานห้องหลบภัย (จำนวนที่นั่ง)
	ความสะดวกสบาย	ลักษณะโต๊ะ เก้าอี้ และ สิ่งอำนวยความสะดวกอื่น ๆ ภายในห้อง เช่น คอมพิวเตอร์ เป็นต้น
	เครื่องปรับอากาศ	เครื่องปรับอากาศภายในห้อง
ลักษณะของห้อง	ขนาดของห้อง	ความกว้าง ความยาว และความสูงของห้อง
	ความสว่าง	ความสามารถในการให้แสงสว่างของอุปกรณ์ภายในห้องที่ทำให้สามารถมองเห็นสิ่งต่าง ๆ ภายในห้องได้อย่างปกติ
ค่าใช้จ่าย	ค่าติดตั้ง	ค่าอุปกรณ์ต่าง ๆ ที่ใช้ในการติดตั้งเพื่อให้ผู้คนสามารถเข้าไปในห้องได้และเพื่อกรองฝุ่น
	ค่าเครื่องกรองอากาศ	ค่าจัดซื้อเครื่องกรองอากาศสำหรับกรองฝุ่นภายในห้อง
การเข้าถึง	การเดินทางด้วยการขับรถ	ความสามารถในการเข้าถึงห้องหลบภัยโดยรถต่าง ๆ
	การเดินทางด้วยการเดิน	ความสามารถในการเข้าถึงห้องหลบภัยโดยการเดินทางของผู้ใช้ที่ไม่มีรถในการเข้าถึงห้องหลบภัยจึงจำเป็นต้องเดินมา
	ที่จอดรถ	ที่จอดรถสำหรับผู้ใช้งานห้องหลบภัยรวมถึงที่จอดรถสำหรับบุคลากรทางการแพทย์ที่จำเป็น
สาธารณูปโภค	ห้องน้ำ	ระยะทางระหว่างห้องน้ำบริเวณใกล้เคียงกับห้องหลบภัยรวมถึงจำนวนห้องน้ำและความสามารถในการใช้งานของห้องน้ำ
	ร้านสะดวกซื้อ	ระยะทางระหว่างร้านขายของบริเวณใกล้เคียงกับห้องหลบภัย



พื้นที่ 1 - คณะมนุษยศาสตร์ พื้นที่ 2 - คณะศึกษาศาสตร์ พื้นที่ 3 - คณะวิศวกรรมศาสตร์
พื้นที่ 4 - คณะสังคมศาสตร์ พื้นที่ 5 - คณะวิทยาศาสตร์ พื้นที่ 6 - คณะศิลปกรรมศาสตร์
พื้นที่ 7 - คณะเกษตรศาสตร์ พื้นที่ 8 - คณะบริหารธุรกิจ พื้นที่ 9 - คณะเศรษฐศาสตร์
พื้นที่ 10 - คณะสถาปัตยกรรมศาสตร์ พื้นที่ 11 - คณะการสื่อสารมวลชน
พื้นที่ 12 - คณะรัฐศาสตร์และรัฐประศาสนศาสตร์ พื้นที่ 13 - คณะนิติศาสตร์
พื้นที่ 14 - วิทยาลัยศิลปะ สื่อและเทคโนโลยี พื้นที่ 15 - พื้นที่ส่วนหอพักนักศึกษา
พื้นที่ 16 - พื้นที่ส่วนกลาง

รูปที่ 1 พื้นที่ภายในมหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ส่วน 16



รูปที่ 2 สัดส่วนความต้องการการเพิ่มศูนย์หลบภัย PM 2.5 ในแต่ละพื้นที่

จากการสำรวจพบว่า บริเวณที่นักศึกษาและบุคลากรต้องการเพิ่มเติมพื้นที่สำหรับสร้างศูนย์หลบภัยในช่วงสถานการณ์มลพิษทางอากาศ PM 2.5 นั้น พื้นที่อันดับหนึ่งอยู่ในบริเวณพื้นที่ 16

คือพื้นที่ส่วนกลาง (15.6%) อันดับสองอยู่ในบริเวณพื้นที่ 15 คือพื้นที่ส่วนหอพักนักศึกษา (12.4%) และอันดับสามอยู่ในบริเวณพื้นที่ 1 คือพื้นที่คณะมนุษยศาสตร์ (10.5%) ซึ่งแสดงดังรูปที่ 2 ทำให้เห็นได้ว่านักศึกษาและบุคลากรส่วนใหญ่ให้ความสนใจกับพื้นที่ส่วนกลางของมหาวิทยาลัยเป็นอันดับหนึ่ง และให้ความสนใจหอพักนักศึกษาเป็นอันดับสอง ก่อนที่จะเลือกพื้นที่ในคณะต่าง ๆ เป็นอันดับต่อมา หลังจากนั้นได้ทำการสำรวจพื้นที่ส่วนกลางเพื่อทำการค้นหาห้องที่มีความสามารถในการสร้างเป็นศูนย์หลบภัยในช่วงสถานการณ์มลพิษทางอากาศ PM 2.5 จากทำการสำรวจพบว่าห้องที่มีความเหมาะสมในเบื้องต้นนั้นมีทั้งหมด 3 พื้นที่ได้แก่ หอสมุดกลางชั้น 4 ITSC Conner และ AIS Playground ซึ่งแต่ละพื้นที่มีคุณสมบัติที่แตกต่างกันออกไปดังต่อไปนี้

1. หอสมุดกลางชั้น 4

มีความกว้าง 13 เมตร ความยาว 29 เมตร ความสูง 3 เมตร ปริมาตรของห้อง 1,131 ลูกบาศก์เมตร จากจำนวนที่นั่งภายในสามารถจุคนได้ประมาณ 100 – 120 คน มีความสว่างที่ต่ำที่สุดเมื่อวัดจากโต๊ะเท่ากับ 159 ลักซ์ (Lux) และมีความสว่างที่สูงที่สุดเมื่อวัดจากโต๊ะเท่ากับ 419 ลักซ์ (Lux) ถ้าหากเครื่องกรองอากาศสามารถครอบคลุมพื้นที่ได้ 35 ตารางเมตรโดยอ้างอิงจากเครื่องกรองอากาศที่ขายตามท้องตลาดทั่วไป จะใช้เครื่องกรองอากาศทั้งหมด 11 เครื่อง เมื่อเครื่องกรองมีราคาเครื่องละประมาณ 5,000 จะมีค่าใช้จ่ายในการจัดซื้อเครื่องกรองอากาศอยู่ที่ 55,000 บาท ในส่วนของระยะห่างจากห้องถึงถนนเส้นหลักจะมีระยะทางอยู่ที่ 50 เมตร ระยะห่างจากห้องถึงที่จอดรถโดยมหาวิทยาลัยอยู่ที่ 50 เมตร และที่จอดรถมีพื้นที่ 600 ตารางเมตรสำหรับห้องน้ำของห้องที่หอสมุดชั้น 4 มีห้องน้ำอยู่ภายในในส่วน of ร้านสะดวกซื้อบริเวณใกล้เคียงภายในหอสมุดชั้น 4 จะมีร้านกาแฟ ทรูคอฟฟี่ (True Coffee) อยู่ภายในชั้น 1 ของห้องกลางหอสมุดชั้น 4 ข้อจำกัดของหอสมุดกลางชั้น 4 คือสภาพเครื่องปรับอากาศค่อนข้างที่จะเก่าดังนั้นอาจจะต้องมีอุปกรณ์เสริมเพื่อช่วยในการกรองอากาศให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น รวมถึงการโยกย้ายชั้นหนังสืออาจจะต้องหาพื้นที่รองรับชั้นหนังสือดังกล่าวเพื่อให้พื้นที่สามารถใช้การได้มากยิ่งขึ้น โดยภาพรวมของสถานที่ หอสมุดกลางชั้น 4 ได้แสดงดังรูปที่ 3

2. ITSC Corner

มีความกว้าง 17 เมตร ความยาว 20 เมตร ความสูง 5.2 เมตร ปริมาตรของห้อง 1768 ลูกบาศก์เมตร จากจำนวนที่นั่งภายในสามารถจุคนได้ประมาณ 120 – 150 คน มีความสว่างที่ต่ำที่สุดเมื่อวัดจากโต๊ะเท่ากับ 125 ลักซ์ (Lux) และมีความสว่างที่สูงที่สุดเมื่อวัดจากโต๊ะเท่ากับ 325 ลักซ์ (Lux) ถ้าหากเครื่องกรองอากาศสามารถครอบคลุมพื้นที่ได้ 35 ตารางเมตรโดยอ้างอิงจากเครื่องกรองอากาศที่ขายตามท้องตลาดทั่วไป จะใช้เครื่องกรองอากาศทั้งหมด 10 เครื่อง หากเครื่องกรองมีราคาเครื่องละประมาณ 5,000 จะมีค่าใช้จ่ายในการจัดซื้อเครื่องกรองอากาศอยู่ที่ 50,000 บาท ในส่วนของระยะห่างจากห้องถึงถนนเส้นหลัก ITSC Corner จะอยู่ติดกับถนนเส้นหลักระยะห่างจากห้องถึงที่จอดรถโดยสารมหาวิทยาลัยอยู่ที่ 40 เมตร และที่จอดรถมีพื้นที่ 600 ตารางเมตร สำหรับห้องน้ำของ ITSC Corner มีห้องน้ำอยู่ติดกับ ITSC Corner แต่ต้องเดินออกสู่ภายนอกเพื่อเข้าใช้งาน ในส่วนของร้านสะดวกซื้อบริเวณใกล้เคียง ภายใน ITSC Corner จะมีร้านกาแฟ คาเฟ่ อเมซอน (Cafe Amazon) โดยมีประตูเชื่อมสู่ ITSC Corner ส่วนข้อจำกัดคือโต๊ะทุกตัวมีคอมพิวเตอร์ติดตั้งอยู่ ซึ่งจะทำให้การใช้พื้นที่ในโถ่นั้น ๆ ไม่สะดวกเท่าที่ควรหากต้องการย้ายคอมพิวเตอร์ทั้งหมดอาจจะต้องหาพื้นที่สำรองที่จะรองรับคอมพิวเตอร์เหล่านั้นได้อย่างเพียงพอ เนื่องจากโต๊ะต่าง ๆ เป็นโต๊ะที่สร้างขึ้นแบบถาวรทำให้ไม่สามารถจัดผังห้องได้ใหม่ได้โดยภาพรวมของสถานที่ ITSC Corner ได้แสดงดังรูปที่ 4

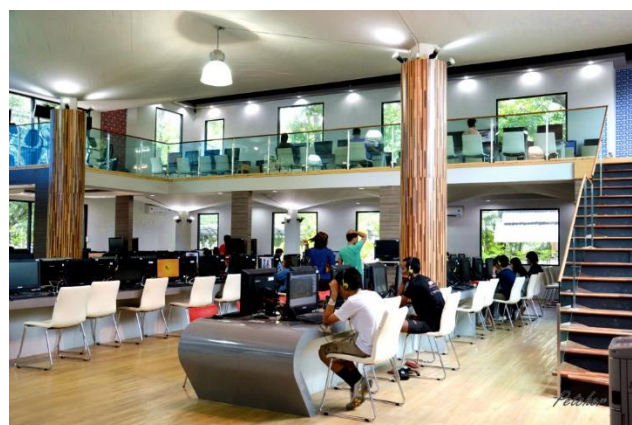
3. AIS Playground

มีความกว้าง 5.5 เมตร ความยาว 22 เมตร ความสูง 3 เมตร ปริมาตรของห้อง 363 ลูกบาศก์เมตร จากจำนวนที่นั่งภายในสามารถจุคนได้ประมาณ 40 – 50 คน มีความสว่างที่ต่ำที่สุดเมื่อวัดจากโต๊ะเท่ากับ 1,000 ลักซ์ (Lux) และมีความสว่างที่สูงที่สุดเมื่อวัดจากโต๊ะเท่ากับ 1,400 ลักซ์ (Lux) ถ้าหากเครื่องกรองอากาศสามารถครอบคลุมพื้นที่ได้ 35 ตารางเมตร โดยอ้างอิงจากเครื่องกรองอากาศที่ขายตามท้องตลาดทั่วไป จะใช้เครื่องกรองอากาศทั้งหมด 4 เครื่อง เมื่อมีราคาเครื่องละประมาณ 5,000 บาท จะมีค่าใช้จ่ายในการจัดซื้อเครื่องกรองอากาศอยู่ที่ 20,000 บาท ในส่วนของระยะห่างจากห้องถึงถนนเส้นหลักอยู่ที่ 70 เมตร ระยะห่างจากห้องถึงที่จอดรถโดยสารมหาวิทยาลัยอยู่ที่ 90 เมตร และที่จอดรถมีพื้นที่ 600 ตารางเมตร สำหรับห้องน้ำ

ของ AIS Playground ไม่มีห้องน้ำในตัวจำเป็นต้องไปใช้ห้องน้ำบริเวณใกล้เคียง โดยห้องน้ำที่มีระยะใกล้ที่สุดมีระยะห่างประมาณ 40 เมตร และไม่มีร้านสะดวกซื้อที่ใกล้ที่สุดมีระยะห่าง 30 เมตร ข้อจำกัดของ AIS Playground มีพื้นที่ขนาดเล็ก และมีอุปกรณ์ค่อนข้างมากรวมถึงมีห้องขนาดเล็กจำนวนมากในพื้นที่ดังกล่าว ทำให้การจัดสรรพื้นที่ห้องอาจจะไม่สะดวกมากนัก โดยภาพรวมของสถานที่ดังกล่าวได้แสดงดังรูปที่ 5 จากการสำรวจสถานที่ทั้ง 3 สถานที่เบื้องต้นแล้วนั้น ทั้ง 3 สถานที่ที่มีความเหมาะสมที่จะเป็นตัวเลือกในการสร้างเป็นศูนย์หลบภัยชั่วคราวสำหรับภัยพิบัติมลพิษทางอากาศ PM 2.5 จากการสำรวจนี้จะนำไปสู่การประยุกต์ใช้ AHP เพื่อทำการคัดเลือกสถานที่ต่อไป



รูปที่ 3 ลักษณะสถานที่หอสมุดกลางชั้น 4



รูปที่ 4 ลักษณะสถานที่ ITSC Corner

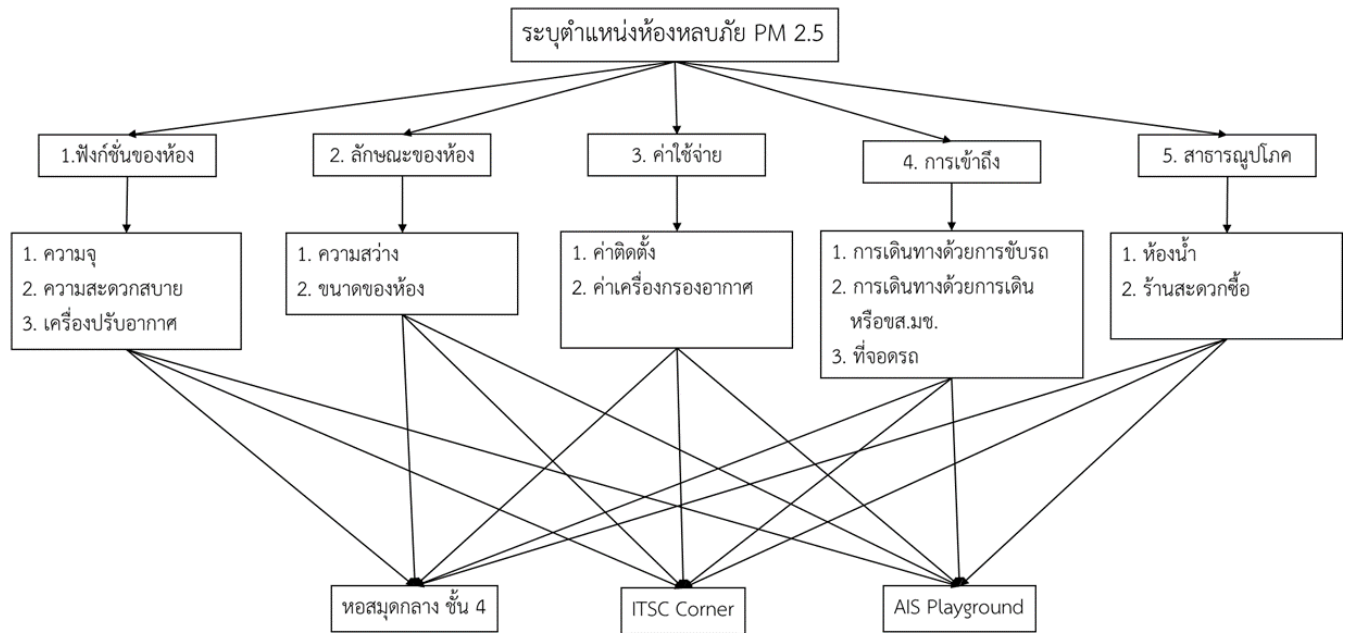


รูปที่ 5 ลักษณะสถานที่ AIS Playground

4.3 การประยุกต์ใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์สำหรับการเลือกที่ตั้งศูนย์หลบภัยชั่วคราว

หลังจากที่ได้ทำการสำรวจหาบริเวณและพื้นที่ที่มีความเหมาะสมในการตั้งศูนย์หลบภัยในช่วงสถานการณ์มลพิษทางอากาศ PM. 2.5 แล้ว งานวิจัยชิ้นนี้ได้ทำการประยุกต์ใช้กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์สำหรับการเลือกที่ตั้งศูนย์หลบภัยดังกล่าว ลำดับแรกได้ทำการจัดโครงสร้างลำดับชั้นในการวิเคราะห์โดยเป้าหมายในการตัดสินใจคือการระบุตำแหน่งห้องหลบภัย ในช่วงสถานการณ์มลพิษทางอากาศ PM. 2.5 ซึ่งเกณฑ์ที่มีอิทธิพลต่อเป้าหมายในการตัดสินใจได้แสดงดังหัวข้อที่ 3.2 ซึ่งจะนำไปสู่ทางเลือกทั้งหมด 3 แห่งได้แก่ (1) หอสมุดกลางชั้น 4 (2)

ITSC Conner (3) AIS Playground ดังรูปที่ 6 จากนั้นได้ทำการประเมินปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อการคัดเลือกทางเลือก โดยให้ผู้เชี่ยวชาญแต่ละท่านทำการประเมินด้วยการทำการเปรียบเทียบหาความสำคัญของแต่ละเกณฑ์ตามระดับความสำคัญ 5 ระดับที่ได้กล่าวไปในเบื้องต้นในหัวข้อที่ 2.4 จากนั้นทำการคำนวณหาค่า Eigenvector ของเมตริกในแต่ละแถวโดยการหา Normalized จากตารางที่ 3 ได้ทำการแสดงผลการคำนวณค่า Eigenvector ของการประเมินของผู้เชี่ยวชาญที่ 1 ท้ายสุดได้ทำการตรวจสอบค่าความสอดคล้องกันของเหตุผลดังสมการที่ 3 และ 4 ตามลำดับ เมื่อทำการคำนวณหาค่า Eigenvector ของการประเมินของผู้เชี่ยวชาญทุกท่านมาแล้ว ก็จะสามารถแสดงผลการประเมินปัจจัยหลักที่มีอิทธิพลต่อการคัดเลือกสำหรับสร้างศูนย์หลบภัยชั่วคราวในช่วงสถานการณ์มลพิษทางอากาศ PM. 2.5 ได้ดังตารางที่ 4 จาก ตารางดังกล่าวจะเห็นได้ว่าการประมวลผลจากอัตราความสอดคล้อง ได้แสดงความสอดคล้องทุก ๆ ค่า้น้อยกว่า 0.10 ทำให้สรุปได้ว่าผู้ตัดสินใจได้ทำการเปรียบเทียบเป็นรายคู่ของปัจจัยต่าง ๆ ได้อย่างสอดคล้องกัน จากผลลัพธ์เห็นว่าปัจจัยหลักที่มีความสำคัญอันดับหนึ่งคือ ฟังก์ชันของห้อง มีค่าน้ำหนักอยู่ที่ 0.317 อันดับสองคือค่าใช้จ่าย มีค่าน้ำหนักอยู่ที่ 0.258 อันดับสามคือการเข้าถึง มีค่าน้ำหนักอยู่ที่ 0.165 อันดับสี่คือลักษณะของห้อง มีค่าน้ำหนักอยู่ที่ 0.163 ส่วนอันดับสุดท้ายคือสาธารณูปโภค มีค่าน้ำหนักอยู่ที่ 0.098



รูปที่ 6 การแสดงรายละเอียดในแผนภูมิลำดับชั้น

ตารางที่ 3 ตัวอย่างผลการคำนวณปัจจัยหลักของผู้ประเมินคนที่ 1

	ฟังก์ชันห้อง	ลักษณะของห้อง	ค่าใช้จ่าย	การเข้าถึง	สาธารณูปโภค	Pi	Eigenvector	ผลคูณ	สัดส่วน
ฟังก์ชันของห้อง	1	4	2	4	2	2.297	0.398	2.06	5.18
ลักษณะของห้อง	1/4	1	1/2	2	2	0.871	0.151	0.81	5.37
ค่าใช้จ่าย	1/2	2	1	2	2	1.320	0.229	1.17	5.13
การเข้าถึง	1/4	1/2	1/2	1	1/3	0.461	0.080	0.42	5.21
สาธารณูปโภค	1/2	1/2	1/2	3	1	0.822	0.142	0.77	5.41
อัตราความสอดคล้อง Consistency Ratio: CR						0.092			

ตารางที่ 4 ผลการประเมินปัจจัยหลักจากผู้เชี่ยวชาญทั้ง 5 ท่าน

ลำดับ	ปัจจัยหลัก	ผู้เชี่ยวชาญ					ผลรวม	ค่าเฉลี่ย Eigenvalue	ลำดับ
		คนที่ 1	คนที่ 2	คนที่ 3	คนที่ 4	คนที่ 5			
1	ฟังก์ชันของห้อง	0.398	0.182	0.477	0.266	0.260	1.583	0.317	1
2	ลักษณะของห้อง	0.151	0.108	0.265	0.162	0.127	0.813	0.162	4
3	ค่าใช้จ่าย	0.229	0.365	0.087	0.412	0.197	1.290	0.258	2
4	การเข้าถึง	0.080	0.277	0.049	0.096	0.323	0.825	0.165	3
5	สาธารณูปโภค	0.142	0.068	0.121	0.065	0.094	0.490	0.098	5
อัตราความสอดคล้อง Consistency Ratio : CR		0.092	0.089	0.093	0.098	0.048	ผลรวม	1.000	

ตารางที่ 5 สรุปผลการประเมินความสำคัญของปัจจัยที่มีอิทธิพลในการคัดเลือกที่ตั้งศูนย์หลบภัยชั่วคราว

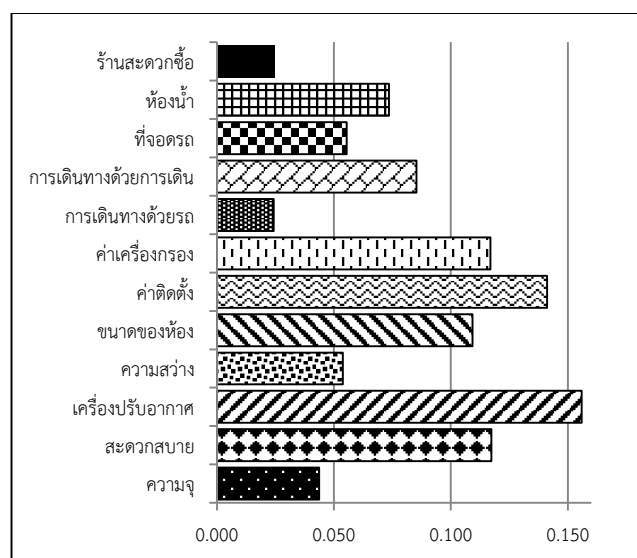
ปัจจัยหลัก	คะแนน (ปัจจัยหลัก) A	ปัจจัยรอง	คะแนน (ปัจจัยรอง) B	คะแนน (ปัจจัยหลักและรอง) C = A x B	ผลการประเมินทางเลือก		
					หอสมุดกลาง ชั้น 4	ITSC Conner	AIS Playground
ฟังก์ชันของห้อง	0.317	ความจุ	0.138	0.044	0.020	0.014	0.010
		สะดวกสบาย	0.370	0.117	0.042	0.050	0.025
		เครื่องปรับอากาศ	0.492	0.156	0.036	0.075	0.045
ลักษณะของห้อง	0.163	ความสว่าง	0.330	0.054	0.019	0.011	0.024
		ขนาดของห้อง	0.670	0.109	0.061	0.035	0.013
ค่าใช้จ่าย	0.258	ค่าติดตั้ง	0.547	0.141	0.059	0.037	0.045
		ค่าเครื่องกรอง	0.453	0.117	0.036	0.037	0.043
การเข้าถึง	0.165	การเดินทางด้วยรถ	0.147	0.024	0.007	0.010	0.008
		การเดินทางด้วยเดิน	0.517	0.085	0.030	0.030	0.026
		ที่จอดรถ	0.336	0.055	0.018	0.018	0.018
สาธารณูปโภค	0.098	ห้องน้ำ	0.750	0.074	0.040	0.022	0.011
		ร้านสะดวกซื้อ	0.250	0.025	0.005	0.012	0.008
ผลรวมค่าถ่วงน้ำหนัก					0.38	0.35	0.27
ลำดับ					1	2	3

ต่อจากนั้นก็ได้ทำการหาค่าน้ำหนักของปัจจัยย่อยในแต่ละเกณฑ์หลัก ซึ่งมีลักษณะขั้นตอนเช่นเดียวกับการหาค่าน้ำหนักของปัจจัยหลัก ท้ายที่สุดก็จะสามารถสรุปผลค่าน้ำหนักคะแนนของปัจจัยที่มีอิทธิพลในการคัดเลือกที่ตั้งศูนย์หลบภัยชั่วคราวในช่วงสถานการณ์มลพิษทางอากาศ PM. 2.5 ได้ผลตามที่แสดงในตารางที่ 5 (คอลัมน์ที่ 1-5) สุดท้ายเป็นการประเมินเปรียบเทียบปัจจัยทางเลือกสำหรับที่ตั้งศูนย์หลบภัยชั่วคราวที่ได้ทำการจัดหามาเบื้องต้นทั้ง 3 สถานที่ โดยการประเมินในครั้งนี้ ได้ใช้ผู้ประเมินทั้งหมด 5 ท่าน ในการประเมิน โดยวิธีการประเมินได้ใช้หลักการเดียวกันกับการประเมินค่าคะแนนของปัจจัยหลักและปัจจัยย่อย โดยผลลัพธ์ได้แสดงดังตารางที่ 5 (คอลัมน์ที่ 6-8) จากการคำนวณลำดับความสำคัญของแต่ละทางเลือก พบว่าพื้นที่ที่มีความเหมาะสมในการสร้างเป็นศูนย์หลบภัยชั่วคราวในช่วงภัยพิบัติมลพิษทางอากาศ PM. 2.5 อันดับหนึ่งคือห้องในหอสมุดกลางชั้น 4 มีระดับคะแนน 0.373 อันดับสองคือ ITSC Conner มีระดับคะแนน 0.351 และอันดับสาม คือ AIS Playground มีระดับคะแนน 0.276 ตามลำดับ

4.4 การวิเคราะห์ผลและจัดสร้างแนวทางในการจัดสร้างศูนย์หลบภัยชั่วคราวเบื้องต้น

จากน้ำหนักของปัจจัยหลักนั้น จะเห็นได้ว่าผู้เชี่ยวชาญให้ความสำคัญกับฟังก์ชันของห้องเป็นอันดับแรก เนื่องจากผู้เชี่ยวชาญให้คำนึงถึงการใช้งานของห้องเป็นหลัก ทำให้คะแนนในส่วนฟังก์ชันของห้องเป็นอันดับหนึ่ง ต่อจากนั้นผู้เชี่ยวชาญจะให้ความสำคัญกับปัจจัยในเรื่องของค่าใช้จ่าย การเข้าถึง และลักษณะของห้อง ตามลำดับ โดยที่จะให้ความสำคัญกับสาธารณูปโภคเป็นอันดับสุดท้ายเนื่องจากผู้เชี่ยวชาญเห็นว่าสาธารณูปโภคมีความจำเป็นแต่ไม่ได้ส่งผลกับการใช้งานศูนย์หลบภัยชั่วคราวเท่ากับปัจจัยหลักอื่น ๆ เมื่อทำการพิจารณาถึงปัจจัยย่อยในแต่ละเกณฑ์หลัก จากการสรุปผลเกณฑ์รองดังรูปที่ 7 จะเห็นได้ว่าผู้เชี่ยวชาญให้ความสำคัญของปัจจัยรองเครื่องปรับอากาศ เป็นปัจจัยรองที่มีความสำคัญที่สุด เนื่องจากในการสร้างศูนย์หลบภัยชั่วคราวหรือห้องหลบภัย PM 2.5 นั้น เครื่องปรับอากาศ จะเป็นองค์ประกอบหลักในการทำให้ห้อง ๆ นั้นมีอากาศที่ดีขึ้นในระดับหนึ่งและส่งผลให้ห้องหลบภัยมี

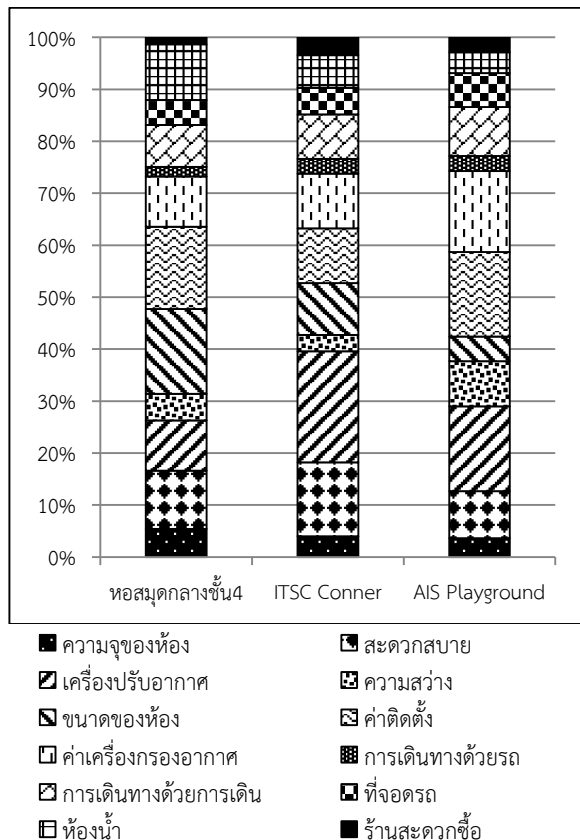
อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการอาศัยอยู่ของผู้พลภัยฝุ่น PM 2.5 ส่วนเกณฑ์ที่รองลงมา คือ ค่าติดตั้งและค่าเครื่องกรองอากาศภายในศูนย์หลบภัย ซึ่งปัจจัยนี้ค่อนข้างมีความสำคัญ เนื่องจากการติดตั้งแต่ละครั้งนั้นอาจจะต้องทำการติดตั้งด้วยต้นทุนที่สูงพอควร และจากนั้นก็จะเป็นตามมาด้วยเกณฑ์เกี่ยวกับความสะดวกสบาย การเดินทางด้วยการเดิน ตามลำดับ ส่วนการเดินทางด้วยรถถือว่าเป็นเกณฑ์ที่ถูกให้ความสำคัญเป็นลำดับสุดท้าย เนื่องจากผู้เชี่ยวชาญคิดว่ายังไม่มีความจำเป็นมากเท่าไรต่อการเลือกศูนย์หลบภัยมลพิษทางอากาศ PM. 2.5



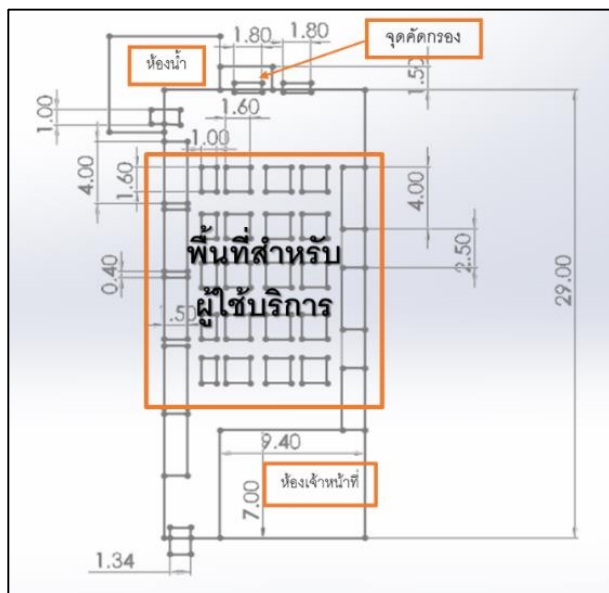
รูปที่ 7 สรุปผลเกณฑ์ย่อยที่มีอิทธิพลในการคัดเลือกที่ตั้งศูนย์หลบภัยชั่วคราวในช่วงภัยพิบัติมลพิษทางอากาศ PM. 2.5

หลังจากที่ผู้เชี่ยวชาญได้ทำการประเมินคะแนนทางเลือกทั้ง 3 พื้นที่แล้วนั้น จะเห็นได้ว่าแต่ละพื้นที่จะมีข้อเด่นและข้อด้อยที่แตกต่างกันออกไป โดยได้แสดงดังรูปที่ 8 จากกราฟดังกล่าวแสดงให้เห็นได้ว่า หอสมุดกลางชั้น 4 มีจุดเด่นในส่วนของการปัจจัยเรื่อง

ของความจุ ขนาดห้อง ค่าติดตั้งอุปกรณ์ การเดินทางด้วยการเดินถึง ที่จอดรถและห้องน้ำ ซึ่งห้องสมุดกลางชั้น 4 นี้ มีพื้นที่ห้องกว้างสามารถรองรับคนได้จำนวนมาก จำนวนโต๊ะ เก้าอี้และปลั๊กไฟมีหลายจุดทำให้ผู้ใช้บริการมีความสะดวกสบายในการใช้งาน มีแสงสว่างที่เพียงพอต่อการใช้งาน ห้องอยู่ติดกับห้องน้ำในขณะที่มีข้อด้อยในส่วนของการปัจจัยเครื่องปรับอากาศ ค่าเครื่องกรองอากาศ การเดินทางด้วยรถและร้านสะดวกซื้อ ซึ่งเครื่องปรับอากาศภายในห้องนั้นเป็นแบบท่อทำให้ง่ายต่อการปรับปรุง เนื่องจากห้องมีเนื้อที่มากทำให้ต้องมีการลงทุนเครื่องกรองอากาศที่จำนวนมากและร้านสะดวกซื้อนั้นก็อยู่ไกลจากพื้นที่ดังกล่าว ในส่วนพื้นที่ ITSC Conner มีจุดเด่นคือ ปัจจัยความสะดวกสบาย เครื่องปรับอากาศ การเดินทางด้วยทางเท้าและรถที่จอดรถและร้านสะดวกซื้อ ซึ่งภายใน ITSC Conner มีขนาดห้องที่ค่อนข้างกว้าง มีคอมพิวเตอร์ที่ผู้ใช้บริการสามารถใช้งานได้ มีเครื่องปรับอากาศหลายตัวทำให้ห้องมีระบบถ่ายเทอากาศที่ดีห้องอยู่ติดกับร้านสะดวกซื้อ ส่วนจุดด้อยนั้นมีเพียงแค่ความสว่างและค่าติดตั้งเพียงเท่านั้น โดยที่ห้องใช้ไฟหลอดเล็กในการให้แสงสว่างจึงทำให้ความสว่างในห้องน้อย และในส่วนของ AIS Playground จะมีจุดเด่นคือ ความสว่าง ค่าเครื่องกรองอากาศและที่จอดรถ พื้นที่นี้เป็นห้องกระจกทำให้ได้รับแสงจากภายนอกห้องจึงสว่างกว่าทั้ง 2 ห้อง เนื่องจากห้องมีขนาดเล็กทำให้สามารถดูแลเรื่องการควบคุมฝุ่นและเครื่องกรองอากาศได้ง่าย ในขณะที่จุดด้อยคือ ความจุ ความสะดวกสบาย ขนาดห้อง การเดินทางด้วยทางเดินและห้องน้ำ โดยพื้นที่ดังกล่าวจะสามารถรองรับคนได้น้อยมีพื้นที่ใช้สอยน้อยเนื่องจากขนาดห้องที่เล็กและไม่มีห้องน้ำในตัวจำเป็นต้องเดินทางไปใช้ห้องน้ำที่ตึกอื่นแทน แต่สุดท้ายแล้ว เมื่อทำการพิจารณาร่วมกับค่าคะแนนน้ำหนักในแต่ละเกณฑ์แล้วนั้นห้องสมุดกลางชั้น 4 ถือว่าเป็นห้องที่มีความเหมาะสมมากที่สุดในการสร้างเป็นศูนย์หลบภัยชั่วคราวในช่วงภัยพิบัติมลพิษทางอากาศ PM. 2.5 ภายใต้เกณฑ์พิจารณาที่ได้กล่าวไปนี้



รูปที่ 8 สรุปผลการประเมินความสำคัญของปัจจัยที่มีอิทธิพลในการคัดเลือกที่ตั้งศูนย์หลบภัยชั่วคราวในช่วงภัยพิบัติมลพิษทางอากาศ PM. 2.5



รูปที่ 9 แผนผังจัดพื้นที่ภายในห้องสมุดชั้น 4 เบื้องต้น

แนวทางในการปรับปรุงพื้นที่ห้องสมุดกลางชั้น 4 ให้เป็นศูนย์หลบภัยชั่วคราวในช่วงภัยพิบัติมลพิษทางอากาศ PM. 2.5 พื้นที่ดังกล่าวควรทำการอุดรอยรั่วและปิดช่องบริเวณประตู เพื่อไม่ให้ฝุ่นสามารถเข้าได้หรือเข้าไปได้น้อยที่สุด และปิดกระจกหน้าต่างที่มีติดจนไม่พบเจอรอยรั่ว นอกจากประตูที่พบว่ามีความสูงจากพื้นห้องทำให้ฝุ่นสามารถเข้ามาภายในห้องได้ควรทำการซื้อเทปซีลติดช่องว่างประตูมาติดตั้งสำหรับประตูทางเข้าและประตูที่เชื่อมไปถึงพื้นที่อื่น ๆ ทั้งนี้ควรจำกัดทางเข้าออก ซึ่งจะช่วยให้ลดโอกาสในการเข้าของฝุ่น PM 2.5 เนื่องจากการเข้าออกหลายทางของผู้เข้าใช้บริการ เมื่อทำการปิดรอยรั่วต่าง ๆ เรียบร้อยแล้วควรจะมีการทดลองนำเครื่องฟอกอากาศเข้าไปที่ละเครื่องแล้วทำการวัดค่าฝุ่น PM 2.5 จนกว่าค่าฝุ่น PM 2.5 จะอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสมซึ่งหากคำนวณจากพื้นที่ภายในห้องแล้ว ถ้าหากเครื่องกรองอากาศสามารถครอบคลุมพื้นที่ได้ 35 ตารางเมตร โดยอ้างอิงจากเครื่องกรองอากาศที่ขายตามท้องตลาดทั่วไป จะใช้เครื่องกรองอากาศทั้งหมด 11 เครื่อง ซึ่งจะเสียต้นทุนประมาณ 55,000 บาท (กำหนดราคาประมาณเครื่องละ 5,000 บาท) ทั้งนี้จำนวนเครื่องกรองอากาศอาจจะมีค่าไม่คงคงที่ ซึ่งจะขึ้นอยู่กับปริมาณฝุ่นภายในห้องในขณะนั้น การดูแลห้อง ควรหมั่นเช็คค่าฝุ่นภายในห้องทุกเช้าก่อนทำการเปิดใช้งานเครื่องกรองฝุ่น PM 2.5 หากพบว่าค่าฝุ่น PM 2.5 สูงขึ้นเกินกว่าที่ยอมรับได้ให้ทำการตรวจสอบรอยรั่วห้องอีกครั้ง เนื่องจากอาจมีจุดรอยรั่วเกิดขึ้น

5. สรุปผล

งานวิจัยชิ้นนี้เป็นศึกษาการประยุกต์ใช้วิธีการกระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับขั้น (AHP) สำหรับการเลือกที่ตั้งศูนย์หลบภัยชั่วคราวในช่วงภัยพิบัติมลพิษทางอากาศ PM 2.5 กรณีศึกษา มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ การศึกษาดังกล่าวทำให้ทราบถึงปัจจัยต่างๆ ที่มีความสำคัญต่อการคัดเลือกศูนย์หลบภัยชั่วคราวในช่วงภัยพิบัติมลพิษทางอากาศ PM 2.5 ซึ่งปัจจัยที่มีผลต่อการกระบวนการคัดเลือกล้วน ประกอบไปด้วย ความจุ สะดวกสบาย เครื่องปรับอากาศ ความสว่าง ขนาดของห้อง ค่าติดตั้ง ค่าเครื่องกรองการเดินทางด้วยรถ การเดินทางด้วยการเดิน ที่จอดรถ ห้องน้ำและร้านสะดวกซื้อ จากกรณีศึกษา มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ สามารถที่จะทำการประยุกต์ใช้วิธีการ AHP ได้อย่างมีประสิทธิภาพ จากทางเลือกทั้ง 3 ทางเลือก สถานที่ที่เหมาะสมมากที่สุดภายใต้การประเมินของผู้เชี่ยวชาญและเกณฑ์การพิจารณา คือ ห้องสมุดกลางชั้น 4

สถานที่ดังกล่าวเป็นสถานที่ที่มีพื้นที่ห้องกว้างขวางสามารถรองรับคนได้จำนวนมาก จำนวนโต๊ะ เก้าอี้และปลั๊กไฟมีหลายจุดทำให้ผู้ใช้บริการมีความสะดวกสบายในการใช้งาน มีแสงสว่างที่เพียงพอการใช้งาน รวมไปถึงสามารถเข้าห้องน้ำได้อย่างสะดวกสบายอีกด้วย ทั้งนี้ยังได้นำเสนอแนวทางการปรับปรุงสถานที่เบื้องต้น ให้มีลักษณะเป็นห้องปลอดฝุ่นมากยิ่งขึ้น เพื่อเป็นการพัฒนางานวิจัยในอนาคต ควรที่จะมีการระบุวัตถุประสงค์ที่ชัดเจนเกี่ยวข้องข้อกำหนดที่สำคัญของศูนย์หลบภัยชั่วคราวต้องการในลักษณะใดก่อน เพื่อเป็นการจำแนกกระหว่างคุณลักษณะของสถานที่ที่จำเป็นต้องมี กับคุณลักษณะที่จะใช้เปรียบเทียบเพื่อหาสถานที่ที่มีความเหมาะสมมากที่สุด เพื่อเป็นการจำกัดขอบเขตของสถานที่ที่จะใช้เป็นทางเลือกให้เหลือเฉพาะที่มีลักษณะตรงตามข้อกำหนดเท่านั้นก่อน หลังจากนั้นจึงเข้าสู่กระบวนการการคัดเลือกและเปรียบเทียบต่อไป แต่อย่างไรก็ตามการดำเนินการตามวิธีการของงานวิจัยนี้ก็สามารถทำได้ หากสามารถพิจารณาแล้วว่าสถานที่ทุกส่วนของมหาวิทยาลัยมีสถานที่ที่เหมาะสมกับคุณลักษณะเบื้องต้นในการตั้งศูนย์หลบภัยชั่วคราว งานวิจัยชิ้นนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้ตัดสินใจที่จะช่วยในการตัดสินใจเลือกสถานที่ในการสร้างศูนย์หลบภัยชั่วคราวในช่วงภัยพิบัติมลพิษทางอากาศ PM 2.5 ได้ และสามารถนำไปประยุกต์กับการคัดเลือกศูนย์หลบภัยชั่วคราวกับพื้นที่ประสบปัญหาภัยพิบัติมลพิษทางอากาศ PM 2.5 ในสถานที่อื่น ๆ ได้

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนวิจัย Murata Science Foundation ประจำปี 2562 ในการสนับสนุนงานวิจัยครั้งนี้

7. เอกสารอ้างอิง

- Awasthi, A., Chauhan, S. S., & Goyal, S. K. (2011). A multi-criteria decision-making approach for location planning for urban distribution centers under uncertainty. *Mathematical and Computer Modelling*, 53(1-2), 98-109.
- Boonmee, C., Arimura, M., & Asada, T. (2017). Facility location optimization model for emergency humanitarian logistics. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, 24, 485-498.
- Boonmee, C., Ikutomi, N., Asada, T., & Arimura, M. (2017). An integrated multi-model optimization and fuzzy AHP for shelter site selection and evacuation planning. *Journal of Japan Society of Civil Engineers, Ser. D3 (Infrastructure Planning and Management)*, 73(5), 225-240.
- Chang, P. Y., & Lin, H. Y. (2015). Manufacturing plant location selection in logistics network using Analytic Hierarchy Process. *Journal of Industrial Engineering and Management (JIEM)*, 8(5), 1547-1575.
- Chatterjee, D., & Mukherjee, B. (2013). Potential hospital location selection using AHP: a study in rural India. *International Journal of Computer Applications*, 71(17).
- Deng, X., Hu, Y., Deng, Y., & Mahadevan, S. (2014). Supplier selection using AHP methodology extended by D numbers. *Expert Systems with Applications*, 41(1), 156-167.
- IQAir. (2020, May 24). *Chiang Mai air quality and weather daily forecast*. <https://www.iqair.com/thailand/chiang-mai>
- Kim, S., Kim, S., & Kiniry, J. R. (2018). Two-phase simulation-based location-allocation optimization of biomass storage distribution. *Simulation Modelling Practice and Theory*, 86, 155-168.
- Singh, A., & Masuku, M. (2014). Sampling Techniques & Determination of Sample Size in Applied Statistics Research: an Overview *International Journal of Commerce and Management*, 2(11), 1-22.
- Turner, R. C., & Carlson, L. (2003). Indexes of item-objective congruence for multidimensional items. *International journal of testing*, 3(2), 163-171.
- Vieira, J. G. V., Toso, M. R., da Silva, J. E. A. R., & Ribeiro, P. C. C. (2017). An AHP-based framework for logistics operations in distribution centres. *International Journal of Production Economics*, 187, 246-259.
- Wiwatanadate, P. (2019, May 24). *The Effect of PM 2.5*. <http://healthydee.moph.go.th>

8 .ประวัติ



ชวิต บุญมี

อาจารย์ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่



ศิริชัช แจ่มจรรยา

นักศึกษาภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่



อุไรชญา อัสวโกวิทพงศ์

นักศึกษาภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

การกำหนดตารางงานและเส้นทางวิ่งของพาหนะลำเลียงงานอัตโนมัติ: กรณีศึกษาอุตสาหกรรมการผลิต

Approach to Scheduling and Routing for Automated Guided Vehicles: A Case Study in the Manufacturing Industry

โพธิ์งาม สมกุล*, จิรัฏฐิภรณ์ ลอยลม และ อนุวัต หม่องเขียว
Po-ngarm Somkun*, Jirattiphorn Loylom and Anuwat Mhongkiew

ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
Department of Industrial Engineering, Naresuan University
*Corresponding author e-mail: pongarmr@nu.ac.th

(Received: May 31, 2020, Revised: November 5, 2020, Accepted: November 30, 2020)

บทคัดย่อ

การกำหนดตารางงานและเส้นทางของพาหนะลำเลียงงานอัตโนมัติ (Automated Guided Vehicle - AGV) โดยพิจารณาปัญหาของโรงงานซึ่งฝ่ายผลิตมีระบบการผลิตทั้งแบบเดิมและแบบใหม่ร่วมกัน ทั้งนี้ 2 ระบบนี้มีความต้องการด้านการลำเลียงวัสดุที่ต่างกัน และมีความต้องการขนย้ายอุปกรณ์ขนถ่ายหลายครั้งในแต่ละกะการทำงาน หากการขนย้ายล่าช้าจะทำให้สายการผลิตต้องหยุดการทำงานชั่วคราว วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้เพื่อหาจำนวน AGV ที่เหมาะสมที่สุด ที่ทำให้เวลารวมของสถานีงาน และ AGV ต่ำที่สุด

กฎการกำหนดงานถูกออกแบบเพื่อใช้เป็นหลักเกณฑ์ในการกำหนดตารางงานของ AGV และใช้แผนภูมิคนกับเครื่องจักรเพื่อพิจารณาความสัมพันธ์ของการทำงานระหว่างสถานีงาน และ AGV ปัญหาวิธีสิ้นสุดกำหนดเส้นทางวิ่งของ AGV จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งโดยใช้เวลาน้อยที่สุด ทั้งนี้พิจารณาทั้งเวลาการวิ่ง เวลาการนำของลงและยกของขึ้นของ AGV ตลอดจนการกีดขวางของรถคันอื่นบนเส้นทางวิ่ง

ข้อมูลจากกรณีศึกษาในอุตสาหกรรมการผลิตถูกนำมาทำการวิเคราะห์เส้นทางวิ่งของ AGV โดยพิจารณาทั้งแบบทิศทางวิ่งรถทิศทางเดียวและสองทิศทาง สำหรับจำนวน AGV ที่ต่างกัน และกฎการกำหนดงานทั้งเชิงรับและเชิงรุก ผลการทดลองสามารถสรุปได้ว่าควรใช้กฎการกำหนดงานเชิงรุก และกำหนดเส้นทางวิ่งของ AGV แบบสองทิศทาง โดยใช้ AGV เพียงคันเดียว จะทำให้เกิดอัตราการใช้งานโดยรวมของทั้งสถานีงาน และ AGV น้อยที่สุดที่ร้อยละ 2.98

คำสำคัญ: การกำหนดตารางการทำงาน, การกำหนดเส้นทางวิ่งของพาหนะ, พาหนะลำเลียงงานอัตโนมัติ, เวลารวมงาน, จำนวนพาหนะ

Abstract

The focus of this article is a proposed scheduling and routing approach for automated guided vehicles (AGVs). This approach could be applied in a factory that has both old and new production systems in action. Both systems require different material handling processes. High frequency transportation is required to avoid idling the production line due

to required handling equipment being unavailable. The purpose of this study was to calculate the optimum number of the AGVs required to ensure the lowest total idle time at production line work stations and of the AGVs.

Several dispatching rules were analyzed to achieve the best AGV scheduling rule. Man-machine charts were used to check the working relationships between work stations and AGVs. The shortest path model was applied to find the best route for an AGV to transport handling equipment from one point to another in the shortest time. Constraints on the model included velocity and load/unloading-time of the AGV and the conflict-free routing.

Actual data from a manufacturing plant were analyzed for the AGV routes in both unidirectional and bidirectional flow paths. The effect of different numbers of AGVs and proactive and reactive types of dispatching rules were analyzed and modelled. The lowest work station idle time, calculated for a single AGV operated in bidirectional flow paths applying the proactive dispatching rule that could achieve, was 2.98%.

Keywords: Scheduling, Routing, Automated Guided Vehicle (AGV), Idle time, Number of vehicles

1. ศัพท์เฉพาะ

AGV – Automated Guided Vehicle คือ พาหนะลำเลียงงานอัตโนมัติ

IR – Idle Rate คือ อัตราการว่างงานของสถานีงาน และ AGV

PDR – Proactive Dispatching Rule คือ กฎการกำหนดงานเชิงรุก

RDR – Reactive Dispatching Rule คือ กฎการกำหนดงานเชิงรับ

SPP – Shortest Path Problem คือ ปัญหาวิถีสั้นสุด

TIT – Total Idle Time คือ เวลารวมของการว่างงานทั้งของสถานีงาน และ AGV

2. บทนำ

การคาดการณ์ทางเศรษฐกิจของสำนักงานเศรษฐกิจอุตสาหกรรม ปี พ.ศ. 2561 (Office of Industrial Economics, 2018) ชี้ว่าแนวโน้มดัชนีความเชื่อมั่นภาคอุตสาหกรรมของประเทศไทยจะปรับตัวดีขึ้น เนื่องด้วยการลงทุนในโครงการขนาดใหญ่ของภาครัฐ อาทิ โครงการพัฒนาเศรษฐกิจพิเศษภาคตะวันออกและการลงทุนด้านโครงสร้างพื้นฐานได้ขยายตัวอย่างต่อเนื่อง เช่น รถไฟความเร็วสูง และรถไฟรางคู่ จึงส่งผลให้โรงงาน

อุตสาหกรรมต่างๆ เริ่มมีการวางแผนพัฒนาและขยายการผลิตเพื่อให้สามารถแข่งขันกับคู่แข่งในภาคอุตสาหกรรมได้และเพื่อให้ได้ประสิทธิภาพเพียงพอต่อการตอบสนองความต้องการของผู้บริโภค ปัจจุบันนี้เป็นยุคของเทคโนโลยีในการผลิตสมัยใหม่ภาคอุตสาหกรรมต่างๆ เริ่มมีการเล็งเห็นถึงแนวโน้มของการนำเทคโนโลยีหรือระบบอัตโนมัติเข้ามามีบทบาทมากขึ้นในระบบอุตสาหกรรม โดยเฉพาะบทบาทในส่วนของการระบบโลจิสติกส์ภาคอุตสาหกรรมและในหลายบริษัทได้เริ่มให้ความสนใจและนำเทคโนโลยีพาหนะลำเลียงงานอัตโนมัติ (Automated Guided Vehicle - AGV) มาเพื่อสนับสนุนการทำงานภายในสายการผลิตและพื้นที่คลังสินค้า เพื่อลดข้อผิดพลาดหรือปัญหาที่อาจเกิดขึ้นจากการใช้แรงงานมนุษย์ ทั้งในด้านความปลอดภัยจากอุบัติเหตุที่อาจเกิดขึ้นจากความประมาท ความเมื่อยล้า และการหยุดพักหรือลางาน นอกจากนี้ AGV ช่วยให้เกิดความแม่นยำในการขนส่งและสามารถควบคุมตารางการทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Fazlollahtabar & Saidi-Mehrabad, 2015; Xiao et al., 2020)

งานวิจัยนี้ได้นำความต้องการของโรงงานในอุตสาหกรรมการผลิตที่กำลังขยายตัวเพื่อให้สามารถแข่งขันในได้ภาวะเศรษฐกิจปัจจุบัน โดยพิจารณากรณีที่โรงงานต้องการปรับปรุงแผนการผลิตที่มีกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่อง โดยการขยายพื้นที่การผลิต เพิ่มจำนวนเครื่องจักรและนำเครื่องจักรที่ทันสมัยกว่าเดิมเข้ามาใช้

ร่วมกับเครื่องจักรที่มีอยู่แล้ว ทั้งนี้ระบบการผลิตแบบเดิมและแบบใหม่มีความต้องการลำเลียงอุปกรณ์ขนถ่ายที่ไม่เหมือนกัน และมีความถี่มากกว่า 230 ครั้งในแต่ละกะการทำงาน AGV ถูกนำเข้ามาใช้ในงานขนย้ายแทนแรงงานคน เพื่อลดต้นทุนและเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมตารางการผลิต หากขนย้ายล่าช้ากว่าเวลาที่กำหนดจะทำให้สถานงานนั้นต้องหยุดการผลิตชั่วคราว จนกว่าการขนย้ายที่จัดตั้งกล่าวสำเร็จ จากจำนวนสถานงานและความต้องการการขนย้ายดังกล่าวทำให้มีทางเลือกมากมายในการจัดตารางการทำงานของ AGV ในแต่ละกะการทำงาน

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดตารางการทำงานและเส้นทางการวิ่งของ AGV ที่มีความสัมพันธ์กับกระบวนการผลิตนั้นมีจำนวนไม่น้อย Fazlollahtabar and Saidi-Mehrabad (2015) ได้ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการจัดตารางและการจัดเส้นทางวิ่งของ AGV และพบว่างานวิจัยส่วนใหญ่ศึกษาสองเรื่องนี้แยกจากกัน มีงานวิจัยจำนวนน้อยมากที่พิจารณาทั้งการจัดตารางและเส้นทางวิ่งของ AGV พร้อมกัน เนื่องด้วยความซับซ้อนของโจทย์และคำตอบที่มีจำนวนมาก โดยเฉพาะเมื่อขนาดของปัญหามีขนาดใหญ่ขึ้น ดังเช่นในงานวิจัยของ Smolic-Rocak et al. (2010) ซึ่งพิจารณาเส้นทางวิ่งโดยใช้ทฤษฎีเส้นทางวิ่งที่สั้นที่สุด (Shortest path problem: SPP) เพื่อไม่ให้เกิดการทับเส้นทางวิ่งกันของรถ AGV มากกว่าหนึ่งคัน โดยกำหนดให้การตัดสินใจในแต่ละครั้งเปลี่ยนไปเป็นไปตามข้อมูลนำเข้าของเวลานั้น ส่วนในงานวิจัยของ Lacomme et al. (2013) พิจารณาการจัดตารางการทำงานของทั้ง AGV หลายคัน และเครื่องจักรในกระบวนการผลิตแบบแบบไม่ต่อเนื่อง โดยไม่ได้พิจารณาเส้นทางวิ่งเช่นเดียวกันกับงานวิจัยของ Bocewicz et al. (2014) ซึ่งพิจารณาการจัดตารางการทำงานของ AGV ให้ประสานกับวงจรการทำงานของเครื่องจักรในสายการผลิตให้มากที่สุด

เครื่องมือที่ใช้ในการหาคำตอบถูกแบ่งเป็น 4 กลุ่มใหญ่ๆ (Fazlollahtabar & Saidi-Mehrabad, 2015) คือ การหาค่าเหมาะที่สุดเชิงคณิตศาสตร์ (Mathematical optimization) เมตาฮิวริสติก (Meta-heuristic) ปัญญาประดิษฐ์ (Artificial intelligence) และ การจำลอง (Simulation) ในส่วนของการจัด

ตารางงาน งานวิจัยส่วนใหญ่มีการกำหนดตัวชี้วัดความสำเร็จของผลการทดลองไว้ 5 ลักษณะ (Fazlollahtabar & Saidi-Mehrabad, 2015) ได้แก่ ช่วงกว้างของเวลาทั้งหมด (Makespan) เวลาเสร็จงานทั้งหมดที่ถูกถ่วงน้ำหนัก (Total weighted completion time) เวลาไหลเฉลี่ยของงานที่ถูกถ่วงน้ำหนัก (Weighted Mean Flow Time) เวลารอคอยเฉลี่ย (Mean waiting time) เวลาสายเฉลี่ย (Mean Lateness) การส่งงานไม่ทันกำหนด (Tardiness)

งานวิจัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกับโจทย์ปัญหาในงานวิจัยฉบับนี้ ซึ่งพิจารณาทั้งสองเรื่องควบคู่กัน ได้แก่ Xiao et al. (2020) นำเสนอวิธีจัดตารางการทำงานสำหรับระบบการผลิตแบบยืดหยุ่น (Flexible manufacturing system) พร้อมทั้งจัดตารางการทำงานของ AGV ในเวลาเดียวกัน เพื่อให้ทำให้ช่วงกว้างของเวลาทั้งหมดน้อยที่สุด ภายใต้ข้อจำกัดของเงื่อนไขลำดับงาน ทิศทางการวิ่งของ AGV กำหนดให้วิ่งได้ทิศทางเดียว และจำนวน AGV คงที่ตามที่กำหนด ส่วน Lyu et al. (2019) ศึกษาการจัดตารางการทำงานของเครื่องจักร และ AGV ในระบบการผลิตแบบยืดหยุ่น ตลอดจนเส้นทางวิ่งที่สั้นที่สุดของ AGV ทั้งนี้ต้องไม่ให้เกิดการชนกันของ AGV โดยมีเป้าหมายเพื่อหาจำนวน AGV ที่เหมาะสม ผู้วิจัยใช้วิธีเมตาฮิวริสติกโดยเลียนแบบขั้นตอนทางพันธุกรรม (Genetic algorithm) ในการหาคำตอบ ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มจำนวน AGV มากขึ้นทำให้ช่วงกว้างของเวลาทั้งหมดลดลงอย่างมากในช่วงแรก แต่เมื่อเพิ่มจำนวน AGV มากขึ้นเรื่อย ๆ อัตราการลดลงของช่วงกว้างของเวลาทั้งหมดก็จะน้อยลง ในงานวิจัยดังกล่าวจึงเลือกที่จะเพิ่มจำนวน AGV ก็ต่อเมื่ออัตราการลดลงของเวลาเสร็จงานไม่น้อยกว่าร้อยละ 5 งานวิจัยของ Lee et al. (2020) พิจารณาการกำหนดตารางการทำงานและเส้นทางการวิ่งของ AGV หลายคัน โดยหาคำตอบของโจทย์โดยใช้ตัวแบบทางคณิตศาสตร์สำหรับปัญหขนาดเล็ก และใช้วิธีเมตาฮิวริสติกโดยเลียนแบบขั้นตอนทางพันธุกรรมเช่นเดียวกัน แต่วัตถุประสงค์แตกต่างออกไป คือ ค่าใช้จ่ายของและความยืดหยุ่นของเส้นทางวิ่ง Umar et al. (2015) ประยุกต์ใช้วิธีเมตาฮิวริสติกโดยเลียนแบบขั้นตอนทางพันธุกรรม โดยมีวัตถุประสงค์หลาย

อย่าง ได้แก่ ช่วงกว้างของเวลาทั้งหมด เวลาวิ่งของ AGV และ ค่าปรับจากการเสร็จงานล่าช้า

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบกระบวนการในการ กำหนดจำนวน AGV ที่เหมาะสมสำหรับการขนย้ายอุปกรณ์ขน ถ่ายในอุตสาหกรรมการผลิต โดยระบบการผลิตประกอบด้วย ระบบแบบเดิมร่วมกับระบบการผลิตแบบใหม่ที่มีความต้องการ ต่างกันในการขนย้ายวัสดุเพื่อป้อนเข้าสู่กระบวนการ และจาก สถานการณ์ที่อาจมีสถานการณ์งานต้องหยุดการผลิตชั่วคราวหากไม่ สามารถทำการขนย้ายได้ทันเวลา วัตถุประสงค์ของงานวิจัยฉบับนี้ ต่างจากงานที่ผ่านมา โดยพิจารณาการลดเวลารวมของการ วางงานของทั้งพนักงานที่สถานีงานและของ AGV (Total Idle Time - TIT) ทั้งนี้เวลาการวางงานของสถานีงานกับ AGV นั้นมี ความสัมพันธ์กัน หากฝ่ายหนึ่งลด อีกฝ่ายหนึ่งก็จะเพิ่ม วัตถุประสงค์นี้จึงเหมาะสำหรับการหาจำนวน AGV ที่ดีที่สุด โดยการออกแบบกฎการกำหนดงาน (Dispatching rule) ที่เข้าใจ ได้ง่ายและสามารถนำมาประยุกต์ใช้บนโปรแกรมตารางทำการ เช่น ไมโครซอฟท์เอกเซล เพื่อให้ผู้ประกอบการสามารถนำไป ประยุกต์ใช้ได้จริงได้ นอกจากนี้ในส่วนของการหาเส้นทางวิ่งของ AGV งานวิจัยนี้จะประยุกต์ใช้ตัวแบบทางคณิตศาสตร์จาก SPP สำหรับการเคลื่อนที่ในแต่ละครั้งของ AGV มาหาคำตอบบน โปรแกรมตารางทำการเช่นเดียวกัน

3. วิธีดำเนินการวิจัย

วิธีดำเนินการวิจัยมีองค์ประกอบสำคัญ 2 ส่วน คือ การ ออกแบบกฎการกำหนดงานเพื่อใช้เป็นหลักเกณฑ์ในการกำหนด ตารางงานของ AGV และการกำหนดเส้นทางวิ่งของรถ AGV ทั้งนี้ แผนภูมิคนกับเครื่องจักร (Man-machine chart) ซึ่งสร้างบน โปรแกรมตารางทำการได้ถูกนำมาใช้ในการตรวจสอบ ความสัมพันธ์ในการทำงานระหว่างสถานีงาน และ AGV ที่เกิดขึ้น บนแกนเวลา โดยทำการวิเคราะห์เปรียบเทียบกฎการกำหนดงาน ทั้งเชิงรับ (Reactive Dispatching Rule - RDR) และ กฎการ กำหนดงานเชิงรุก (Proactive Dispatching Rule - PDR) ตลอดจนการวิเคราะห์เส้นทางวิ่งของ AGV

โดยลำดับการทดลองเริ่มต้นจากการพิจารณาทิศทางการวิ่งรถ อย่างง่ายก่อน โดยกำหนดให้วิ่งรถทางเดียว (Unidirectional flow path) จากนั้นจึงพิจารณาเส้นทางวิ่งที่มีความซับซ้อน มากขึ้น คือ การวิ่งรถแบบสองทิศทาง (Bidirectional flow path) โดยในแต่ละแบบจะทดลองที่จำนวน AGV ที่ต่างกัน ทั้งนี้ตั้ง สมมุติฐานไว้ว่าจำนวน AGV ควรจะน้อยที่สุดเท่าที่เป็นไปได้เพราะ AGV แต่ละตัวมีราคาสูง จึงเริ่มจากจำนวน AGV ที่น้อยที่สุดคือ 1 คัน แล้วทำการเก็บค่า TIT จากนั้นทดลองเพิ่มจำนวน AGV ทีละ 1 คัน โดยทำการทดลองจนกว่าจะพบว่าการเพิ่มจำนวน AGV ทำให้ค่า TIT เพิ่มขึ้น จึงยุติการทดลอง ดังแสดงรายละเอียดวิธีและ ผลการทดลองไว้ในหัวข้อ 4.2 และ 4.3

3.1 คำนิยามของเวลาวางงานและอัตราการวางงาน

เวลาวางงานของสถานีงาน คือ เวลาที่พนักงานว่างจากการ ทำงานในสถานีงานของตนเอง ซึ่งเป็นเวลาที่ไม่ก่อให้เกิดงานหรือ ผลิตภัณฑ์ ซึ่งในที่นี้เวลาวางงานของพนักงานที่แต่ละสถานีงานจะ เกิดขึ้นเมื่อพนักงานต้องรอการเปลี่ยนรถขึ้นโดย AGV

เวลาวางงานของ AGV คือ เวลาที่ AGV ว่างจากการทำงาน โดยจะเกิดขึ้นเมื่อ AGV จอดรอที่ศูนย์รวมเพื่อรอเวลาไปเปลี่ยน รถขึ้นให้กับสถานีงาน หรือกรณีที่มี AGV หลายคัน AGV อาจ จำเป็นต้องหยุดอยู่ที่สถานีงานใดๆ เพื่อรอให้ AGV คันอื่นสามารถใช้เส้นทางได้ เป็นการป้องกันไม่ให้เกิดการชนกัน

เวลารวมของการวางงานทั้งของสถานีงานและ AGV (TIT) คือ ผลรวมของเวลาวางงานของสถานีงาน และ AGV

เวลาทำงานในหนึ่งกะของสถานีทุกสถานีงาน และ AGV ทั้งหมด (Total Time - TT)

อัตราการวางงานของสถานีงาน และ AGV (IR) คือ สัดส่วน ระหว่างเวลาวางจากการทำงานของสถานีงาน และ AGV กับเวลา ทำงานทั้งหมด สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$IR = TIT \div TT \quad (1)$$

3.2 การออกแบบกฎการกำหนดงาน

กฎการกำหนดงาน คือ กระบวนการหาคำตอบของลำดับการทำงานและตารางเวลาการทำงานของ AGV ในงานวิจัยนี้กฎการกำหนดงานถูกกำหนดโดยทฤษฎีการจัดตารางงานและลำดับงาน (Scheduling and sequencing) ซึ่งเป็นทฤษฎีที่มีการนำเสนอในตำราและงานวิจัยจำนวนมาก (Baker & Trietsch, 2009; Leung, 2004; Pinedo, 2009) ในที่นี้การออกแบบกฎการกำหนดงานต้องสามารถรองรับระบบการผลิต 2 แบบ คือ แบบเดิมที่ยังต้องป้อนวัสดุเข้ากระบวนการโดยการขนย้ายมาเติม และแบบใหม่ที่มีวัสดุป้อนเข้าอัตโนมัติ เพื่อให้สามารถตอบสนองต่อความต้องการขนย้ายของสถานีงานเดิม ซึ่งอาจมีการออกแบบระบบไว้นานแล้ว ทำให้สถานีเดิมเหล่านี้ต้องถูกป้อนวัสดุที่ขนถ่ายจากจุดศูนย์รวม หากไม่ได้รับวัสดุก็ไม่สามารถเริ่มงานได้ จึงใช้หลักการ “ให้ความสำคัญก่อน” (Priority) สำหรับสถานีเดิม นอกจากนี้เมื่อนำรถเข็นป้อนวัสดุมาส่งแล้ว จะได้รถเข็นเปล่าไปส่งในสถานีปลายทางที่คู่กัน ซึ่งส่วนของการ “ให้ความสำคัญก่อน” นั้นจะเหมือนกันทั้งกฎการกำหนดงาน RDR และ PDR

สำหรับสถานีงานใหม่ทั้งหมด ได้ถูกออกแบบระบบโดยไม่ต้องมีการป้อนวัสดุ สำหรับวิธีเชิงรับ RDR จะใช้หลักการ First-come-first-served (FCFS) หรือ “รถเข็นที่เต็มก่อนได้รับบริการก่อน” และหากมีรถเข็นในหลายสถานีงานที่เต็มพร้อมกันก็ใช้หลักการ “ระยะทางที่ไกลที่สุดก่อน”

ในกรณีของวิธีเชิงรุก PDR ก็จะใช้หลักการ FCFS หรือ “รถเข็นที่เต็มก่อนได้รับบริการก่อน” เช่นเดียวกัน แต่ส่วนแตกต่างหลักคือ หากไม่มีรถเข็นที่เต็มเลย จะกำหนดให้ AGV เริ่มนำรถเข็นเปล่าไปเปลี่ยนให้กับสถานีที่ “ระยะทางที่ไกลที่สุด” แม้ว่ารถเข็นจะยังไม่เต็ม เหตุผลเพื่อลดเวลาว่างงานของ AGV นั้นเอง กฎการกำหนดงานในแต่ละกรณีจะแสดงโดยผังงาน (Flow chart) ดังนำเสนอต่อไปในหัวข้อ 4.2 และ 4.3

3.3 แผนภูมิสถานีงาน และ AGV บนตารางทำการ

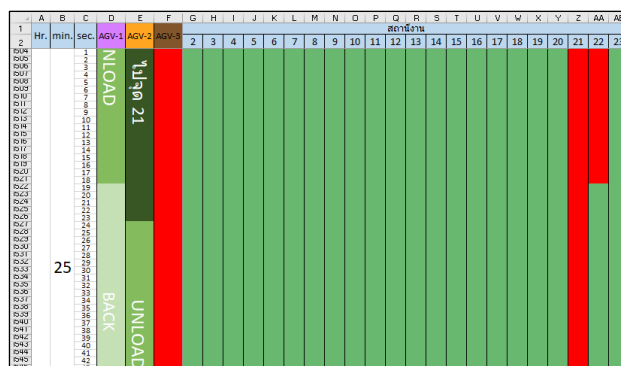
เพื่อตรวจสอบความสัมพันธ์บนแกนเวลาของพนักงานที่สถานีงาน และ AGV ให้ถูกต้อง และแสดงเป็นภาพที่ชัดเจน โปรแกรม

ตารางทำการได้ถูกนำมาใช้เพื่อสร้างแผนภูมิคนและเครื่องจักร (โดยในที่นี้เป็นแผนภูมิระหว่างสถานีงาน กับ AGV) เพราะโปรแกรมลักษณะนี้มีการเก็บข้อมูลในรูปแบบตาราง สามารถใช้ประโยชน์จากสีและการจัดรูปแบบเซลล์เพื่อให้เห็นภาพความสัมพันธ์ของการทำงานและเวลาระหว่างองค์ประกอบต่างๆของระบบได้สะดวก นอกจากนี้ยังสามารถเขียนคำสั่งเพื่อตรวจสอบความถูกต้อง และสามารถคำนวณค่าของตัววัดประสิทธิภาพของระบบ (ซึ่งในที่นี้คือ TIT) ได้อย่างรวดเร็วและแม่นยำ รูปที่ 1 แสดงตัวอย่างของแผนภูมิสถานีงานและ AGV ซึ่งแต่ละบรรทัด (Row) จะแทนช่วงเวลา 1 วินาที โดยจะพิจารณาช่วงเวลาการทำงาน 1 กะ คือ 8 ชั่วโมง แต่ละหลัก (Column) แสดงการทำงานของ AGV ทุกคัน และทุกสถานีงาน โดยใช้สีที่ต่างกันของเซลล์แสดงถึง “กำลังทำงาน” กับ “กำลังว่างงาน”

3.4 การหาเส้นทางวิ่งที่ใช้เวลาสั้นที่สุดของ AGV

กำหนดให้

1. AGV ที่นำมาใช้ในการออกแบบการเคลื่อนที่ สามารถลำเลียงสิ่งของได้สูงสุด 300 กิโลกรัม มีความเร็วในการเคลื่อนที่ 52.2 เมตรต่อนาที และสามารถหมุนได้รอบคัน
2. เวลาในการบรรจุสิ่งของ (Load) และเวลาในการถ่ายสิ่งของ (Unload) โดย AGV มีค่าเท่ากัน คือ 30 วินาที
3. การเคลื่อนที่ของ AGV แต่ละคัน ต้องมีระยะห่างกันอย่างน้อย 30 วินาที



รูปที่ 1 ตัวอย่างของแผนภูมิสถานีงาน และ AGV บนโปรแกรมตารางทำการ

การกำหนดเส้นทางวิ่งของ AGV ที่จะเคลื่อนที่จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่ง ต้องพิจารณาข้อมูล ณ.ช่วงเวลาขณะนั้น โดยหาเส้นทางวิ่งรถที่ใช้เวลาสั้นที่สุด โดยมองผังโรงงานเป็นโครงข่าย (Network) ซึ่งประกอบไปด้วยโหนด (Node) คือ จุดสถานีงานและจุดสำคัญอื่นๆ และ เส้นเชื่อม (Arc) ซึ่งเชื่อมโยงโหนด และด้วยข้อจำกัดของพื้นที่ทำให้เส้นทางวิ่งกว้างพอสำหรับ AGV เพียงหนึ่งคัน ดังนั้นเมื่อพิจารณาเวลาในการวิ่งจะนับรวมเวลาหลบหลีกเพื่อรอให้รถอีกคันวิ่งไปก่อนด้วย ข้อมูลเวลาบนแต่ละเส้นเชื่อมโยงโหนดจะถูกนำไปหาเส้นทางวิ่งที่ใช้เวลาสั้นที่สุด

โดยในงานวิจัยนี้ใช้กำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็มทวิภาค (Binary Integer Linear Programming) ของปัญหาวิถีสั้นที่สุดดังนี้

$$\text{Minimize } z = \sum_i \sum_j W_{ij} X_{ij} \quad (2)$$

s. t.

$$\sum_j X_{ij} - \sum_j X_{ji} = \begin{cases} 1, & \text{ถ้า } i = \text{ต้นทาง} \\ -1, & \text{ถ้า } i = \text{ปลายทาง} \\ 0, & \text{อื่นๆ} \end{cases} \quad (3)$$

$$X_{ij}, X_{ji} \in \{0,1\} \quad (4)$$

เมื่อ W_{ij} คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการเคลื่อนที่ระหว่างโหนด i และโหนด j ณ.ช่วงเวลาขณะนั้น

$$X_{ij} = \begin{cases} 1, & \text{เมื่อใช้เส้นเชื่อมระหว่างโหนด } i \text{ กับโหนด } j \\ 0, & \text{เมื่อไม่ใช่เส้นที่เชื่อมระหว่างโหนด } i \text{ กับโหนด } j \end{cases}$$

ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ดังสมการที่ (2) ถึง (4) มีตัวแปรตัดสินใจคือ X_{ij} ซึ่งตัดสินใจว่าจะเลือกใช้เส้นที่เชื่อมระหว่างโหนด i กับ j หรือไม่ ถ้าเลือกจะมีค่าเท่ากับ 1 แต่ถ้าไม่เลือกจะมีค่าเท่ากับ 0 สำหรับทุกคู่ของ i กับ j บนโครงข่าย ดังสมการที่ (4) เมื่อเลือกเส้นทางวิ่งผ่าน i กับ j ใดใด เวลาที่ใช้วิ่งบน i กับ j นั้น จะถูกนำมาบวกรวมกันในฟังก์ชันเป้าหมาย ดังฟังก์ชันที่ (2) ภายใต้เงื่อนไขว่าสามารถเลือกเส้นที่เชื่อมระหว่างโหนดที่เข้าและออกจากโหนดใดๆได้เพียงเส้นเดียวเท่านั้น ดังสมการที่ (3)

ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ของปัญหาวิถีสั้นที่สุดได้ถูกนำไปหาคำตอบที่ดีที่สุดบนโปรแกรมตารางทำการ MS Excel โดยใช้เครื่องมือ Solver ดังแสดงในรูปที่ 2 ซึ่งข้อมูลเวลาที่ใช้นบนแต่ละ Arc จะต้องอัปเดตทุกครั้งที่ต้องการหาเส้นทางวิ่งของ AGV ในขณะหนึ่ง

4. ผลการดำเนินการวิจัย

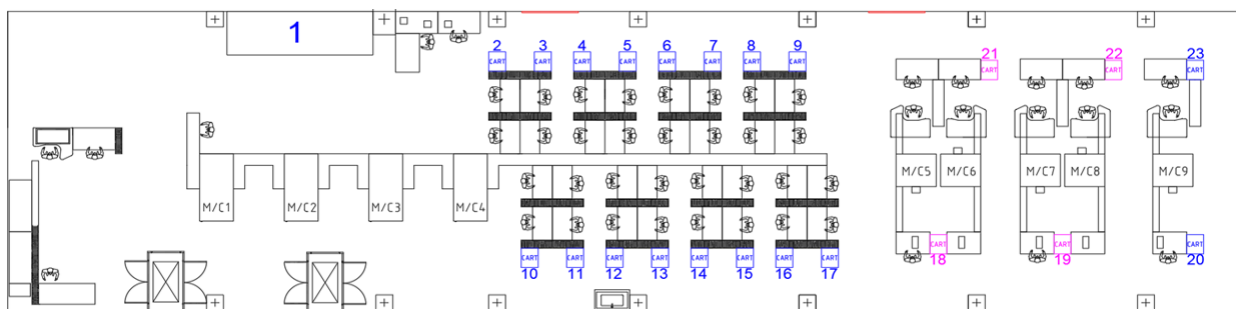
4.1 กรณีศึกษาจากอุตสาหกรรมการผลิต

โรงงานกรณีศึกษาต้องการเพิ่มกำลังการผลิตโดยการขยายพื้นที่แผนกผลิตภายในโรงงานจากขนาดกว้าง 11.5 เมตร ยาว 16 เมตร เป็น กว้าง 11.5 เมตร ยาว 44 เมตร และเพิ่มเครื่องจักรจำนวน 4 เครื่อง จากเดิมมีเพียง 5 เครื่อง จึงรวมเป็น 9 เครื่อง ส่งผลให้มีสถานีงานที่ต้องการลำเลียงอุปกรณ์ขนถ่ายถึง 23 จุด ดังรูปที่ 3 จุดดังกล่าวประกอบไปด้วยจุดศูนย์รวม (Hub) (ตำแหน่งหมายเลข 1 ในรูปที่ 3) สถานีจึงมี 2 ประเภท คือ สถานีงานที่เพิ่มขึ้นจากการขยายการผลิต (จุดที่ 2 ถึง 17) และสถานีงานเดิม (จุดที่ 18 ถึง 23)

อุปกรณ์ขนถ่ายคือ ถาด (Tray) ที่มีขนาดกว้าง 23 เซนติเมตร ยาว 26 เซนติเมตร และสูง 5.5 เซนติเมตร ซึ่งในการขนย้ายถาดจะใช้รถเข็น (Cart) ขนาดกว้าง 60 เซนติเมตร ยาว 75 เซนติเมตร และสูง 75 เซนติเมตร พนักงานจะนำถาดที่บรรจุงานระหว่างทำ

=SUMPRODUCT(C2:C55,D2:D55)												
	A	B	C	D	E	G	H	I	J	K	L	M
1	From	To	On route	Distance	Node	Net flow			Supply/Demand	Total		36239
2	1	2	1	7051	1	1	=	1				
3	1	10	0	28094	2	0	=	0				
4	2	1	0	7051	3	0	=	0				
5	2	3	1	1610	4	0	=	0				
6	3	2										
7	3	4										
8	4	3										
9	4	5										
10	5	4										
11	5	6										
12	6	5										
13	6	7										
14	7	6										
15	7	8										
16	8	7										

รูปที่ 2 การใช้ Solver หาคำตอบของปัญหาวิถีสั้นสุดบน MS Excel



รูปที่ 3 ผังโรงงาน สถานีนงานเดิม และสถานีนงานใหม่

แล้ววางไว้ที่รถเข็น โดยรถเข็นแต่ละคันสามารถรับได้สูงสุดจำนวน 60 ถาด ในแต่ละกะของการทำงานเวลา 8 ชั่วโมง จะมีการขนย้ายระหว่างจุดศูนย์รวมกับสถานีนงานต่างๆไม่ต่ำกว่า 230 ครั้ง ทางบริษัทนำ AGV เข้ามาใช้ในงานขนย้ายดังกล่าวแทนการใช้แรงงานคน เพื่อลดต้นทุนและเพิ่มประสิทธิภาพในการควบคุมตารางการผลิต

ทั้งนี้จากการวางระบบเดิมและอัตราการทำงานของเครื่องจักรเดิมจะทำให้สถานีนงานเดิมจุดที่ 18 และ 19 ต้องถูกต้องป้อนวัสดุที่ขนถ่ายจากจุดศูนย์รวมและสลับกับรถเข็นเดิมทุก 22 นาที และจุดที่ 20 ต้องถูกต้องป้อนวัสดุที่ขนถ่ายจากจุดศูนย์รวมทุก 44 นาที ส่วนสถานีนงานจุดที่ 21 และ 22 ต้องมีการนำรถเข็นเปล่ามาแทนที่รถเข็นเดิมทุกๆ 22 นาที ในขณะที่เครื่องจักรใหม่ที่สถานีนงานใหม่จุดที่ 2 ถึง 17 ไม่ต้องมีการป้อนวัสดุ เพียงแต่ต้องนำรถเข็นเปล่ามาสลับกับรถเข็นเดิม ภายในระยะเวลา 44 นาที เช่นเดียวกับจุดที่ 23

การขนย้ายสามารถเกิดขึ้นก่อนเวลาที่กำหนด ซึ่งหมายความว่ารถเข็นยังไม่เต็ม แต่หากการขนย้ายล่าช้ากว่าเวลาที่กำหนดจะทำให้สถานีนงานนั้นต้องหยุดการผลิตชั่วคราวจนกว่าจะมีการขนย้ายที่จุดดังกล่าวสำเร็จ

4.2 กรณีวิธีรถทางเดียว (Unidirectional flow path)

ด้วยข้อจำกัดของความกว้างของทางวิ่งของรถ AGV ทำให้มีเลนวิ่งเพียงเลนเดียว ในกรณีแรกนี้กำหนดให้ AGV วิ่งรถทิศทางเดียว ทิศทางแสดงโดยลูกศร ดังรูปที่ 4

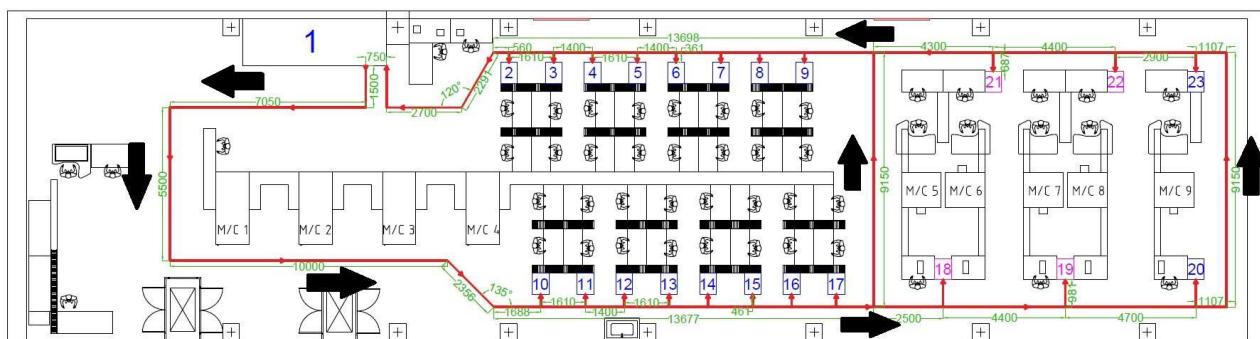
4.2.1 AGV จำนวน 1 คัน

4.2.1.1 กฎการกำหนดงานเชิงรับ (RDR)

กำหนดให้มีความสำคัญกับสถานีนงานเดิม ได้แก่ สถานีนงานที่ 18, 19 และ 20 ก่อนสถานีนงานอื่นๆ โดยตรวจสอบว่ามีการดำเนินงานอยู่หรือไม่ ถ้าหากไม่มีการดำเนินงาน ให้ AGV นำรถเข็นที่บรรจุงานไปให้สถานีนงานนั้น แล้วนำรถเข็นเปล่าที่ได้จากสถานีนงานนั้นไปเปลี่ยนกับรถเข็นที่บรรจุถาดของสถานีนตรงข้าม ดังนี้ เช่น ส่งรถเข็นวัสดุให้สถานีนจุดที่ 18 จะได้รับรถเข็นเปล่าจากสถานีนที่ 18 ไปสลับกับรถเข็นที่เต็ม (หรืออาจจะไม่เต็ม) ที่สถานีนจุดที่ 21 อีกสองคู่คือ สถานีนจุดที่ 19 กับ 22 และสถานีนจุดที่ 20 กับ 23 กรณีที่สถานีนงานยังไม่มีกรดำเนินงานพร้อมกันหลายสถานีน ให้พิจารณาเลือกสถานีนงานที่อยู่ไกลสุดก่อน

ถ้าพิจารณาสถานีนงานเดิมแล้ว พบว่าทั้ง 3 สถานีนงานมีการดำเนินงานอยู่แล้ว ให้พิจารณาสถานีนงานใหม่ ได้แก่ สถานีนงานที่ 2-17 ว่า รถเข็นของแต่ละสถานีนงานมีการบรรจุถาดจนเต็มความสามารถของรถเข็นแล้วหรือไม่ หากมีรถเข็นของสถานีนงานใดสถานีนงานหนึ่งบรรจุถาดจนเต็มความสามารถของรถเข็นแล้ว ให้ AGV นำรถเข็นเปล่าไปเปลี่ยนให้สถานีนงานนั้น กรณีที่มีรถเข็นบรรจุถาดจนเต็มความสามารถอยู่หลายสถานีนงาน ให้พิจารณาเลือกไปสถานีนงานที่มีรถเข็นเต็มก่อน เมื่อเสร็จสิ้นทุกการพิจารณาและปฏิบัติงาน เป็นการจบกระบวนการ แล้วเริ่มต้นพิจารณาใหม่ต่อไป โดยสามารถเขียนผังงานของกระบวนการได้ดังรูปที่ 5 ซึ่งผังงานนี้สามารถใช้ได้ในกรณี RDR สำหรับ AVG มากกว่าหนึ่งคันในกรณีวิธีรถทางเดียวได้เช่นกัน

ทั้งนี้ในแต่ละครั้งของการตัดสินใจเลือกเส้นทางวิ่งของ AGV จะใช้ Solver หาคำตอบที่ดีที่สุดของปัญหาวิถีสั้นที่สุด ที่ใช้เวลา



รูปที่ 4 เส้นทางและทิศทางวิ่งรถทางเดียวของ AGV

ในการวิ่งสั้นที่สุดเป็นสมการเป่าประสงค์ ดังที่ได้แสดงรายละเอียดในหัวข้อ 3.4

ผลการทดลองพบว่า เวลาว่างงานของ AGV คือ 0.47 ชั่วโมง เวลาว่างงานของพนักงานที่สถานีงาน คือ 36.91 ชั่วโมง ดังนั้น TIT คือ 37.38 ชั่วโมง จะเห็นว่าเวลาว่างงานของสถานีงานมากถึง 98.7% ของเวลาว่างงานโดยรวม

4.2.1.2 กฎการกำหนดงานเชิงรุก (PDR)

กฎแบบ PDR นี้จะต่างจาก RDR ตรงที่ เมื่อพิจารณาสถานีงานใหม่ ได้แก่ สถานีงานที่ 2-17 แล้วพบว่ารถเข็นของทุกสถานีงานแม้จะยังบรรจุได้ไม่เต็มความสามารถของรถเข็น ให้ AGV นำรถเข็นเปล่าไปเปลี่ยนกับรถเข็นที่สถานีงานที่อยู่ไกลสุดก่อนตามลำดับ โดยสามารถเขียนผังงานของกระบวนการ ดังรูปที่ 6 ซึ่งผังงานนี้สามารถใช้ได้ในกรณี PDR สำหรับ AVG มากกว่าหนึ่งคันเช่นกัน

ผลการทดลองพบว่า เวลาว่างงานของ AGV คือ 0 ชั่วโมง เวลาว่างงานของพนักงานที่สถานีงาน คือ 31.25 ชั่วโมง ดังนั้น TIT คือ 31.25 ชั่วโมง ซึ่งดีกว่ากรณี RDR 6.13 ชั่วโมง โดยในกรณีนี้ทั้ง RDR และ PDR จะเกิดเวลาว่างเกือบทั้งหมดที่สถานีงาน จึงควรมีการทดลองเพิ่มจำนวน AGV ต่อไป

4.2.2 AGV จำนวน 2 คัน

4.2.2.1 กฎการกำหนดงานเชิงรับ (RDR)

เมื่อมี AGV จำนวน 2 คัน (หรือมากกว่า) ยังคงสามารถใช้ผังงานตามรูปที่ 5 แต่เนื่องจาก AGV มีจำนวนเพิ่มขึ้น ดังนั้นกำหนดให้ AGV คันใดก็ได้ที่ว่างอยู่ที่จุดที่ 1 ออกปฏิบัติงาน

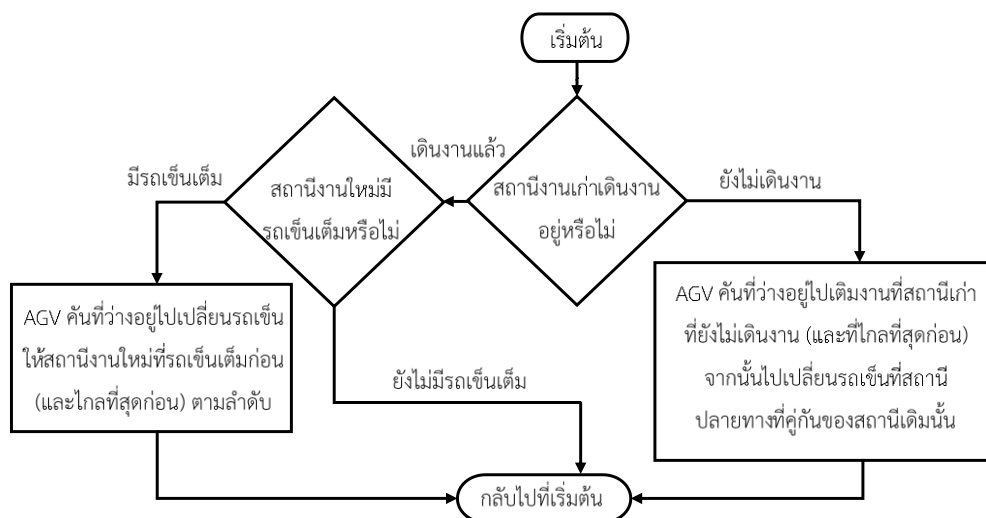
ผลการทดลองพบว่า เวลาว่างงานของ AGV คือ 7.08 ชั่วโมง เวลาว่างงานของพนักงานที่สถานีงาน คือ 12.48 ชั่วโมง ดังนั้น TIT คือ 19.56 ชั่วโมง ซึ่งเวลาลดลงจากกรณีที่มี AGV คันเดียว 11.69 ถึง 17.82 ชั่วโมง โดยเวลาว่างส่วนใหญ่ยังคงเกิดที่สถานีงาน ในขณะเดียวกันเวลาว่างของ AGV เพิ่มขึ้นจากเดิมเพราะจำนวน AGV ที่เพิ่มขึ้น

4.2.2.2 กฎการกำหนดงานเชิงรุก (PDR)

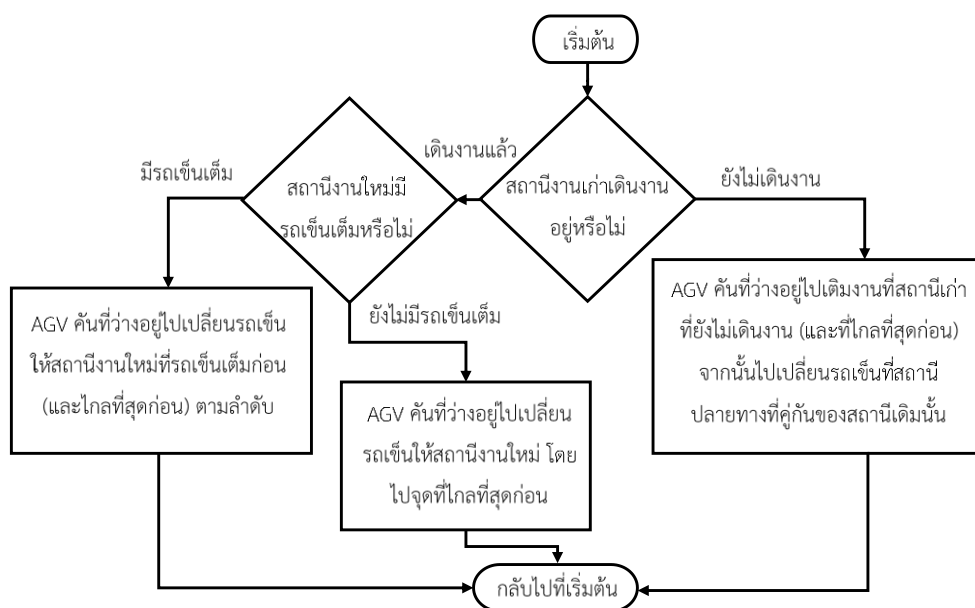
เมื่อมี AGV จำนวน 2 คัน (หรือมากกว่า) ยังสามารถใช้ผังงานตามรูปที่ 6 โดยกำหนดให้ AGV คันใดก็ได้ที่ว่างอยู่ที่จุดที่ 1 ออกปฏิบัติงาน

ผลการทดลองพบว่า เวลาว่างงานของ AGV คือ 6.77 ชั่วโมง เวลาว่างงานของพนักงานที่สถานีงาน คือ 6.60 ชั่วโมง ดังนั้น TIT คือ 13.37 ชั่วโมง ซึ่งลดเวลาลงจากกรณี RDR 6.19 ชั่วโมง

PDR กำหนดให้ AGV ทำงานเชิงรุก โดยเริ่มทำการสับรถเข็นเลยแม้ว่ารถเข็นจะยังไม่เต็ม จึงทำให้ลดเวลาว่างงานโดยรวมได้มากกว่า RDR อย่างชัดเจน และเมื่อเพิ่ม AGV จาก 1 คัน เป็น 2 คัน ก็สามารถลด TIT ลงได้มากกว่า 24 ชั่วโมง จากแนวโน้มการลดลงของ TIT เมื่อจำนวน AGV เพิ่มขึ้น ผู้วิจัยจึงทำการทดลองโดยเพิ่มจำนวน AGV เป็น 3 คันต่อไป เพื่อหาจำนวน AGV ที่เหมาะสมที่ทำให้ TIT ต่ำที่สุด



รูปที่ 5 RDR สำหรับการจัดการงานของ AGV



รูปที่ 6 PDR สำหรับการจัดการงานของ AGV

4.2.3 AGV จำนวน 3 คัน

4.2.3.1 กฎการกำหนดงานเชิงรับ (RDR)

ผลการทดลองพบว่า เมื่อจำนวน AGV เท่ากับ 3 คัน เวลาว่างงานของ AGV คือ 14.76 ชั่วโมง เวลาว่างงานของพนักงานที่สถานีงาน คือ 8.63 ชั่วโมง ดังนั้น TIT คือ 23.39 ชั่วโมง เพิ่มขึ้น

จากกรณีที่มี AGV 2 คัน โดยเวลาว่างงานของ AGV มากกว่าของสถานีงาน ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของ AGV ทำให้เวลาว่างงานของสถานีงานลดลงและเวลาว่างของ AGV เพิ่มขึ้น แต่อัตราการลดลงของเวลาว่างของสถานีงานมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 49% ในขณะที่อัตราการเพิ่มขึ้นของเวลาว่างงานของ AGV มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 757% ทำให้โดยภาพรวมแล้วการเพิ่มขึ้นของจำนวน

AGV ที่มากกว่า 2 คัน ทำให้เวลาว่างงานโดยรวมเพิ่มขึ้นสำหรับกรณีของ RDR และเดินรถทิศทางเดียว ดังแสดงในรูปที่ 7

4.2.3.2 กฎการกำหนดงานเชิงรุก (PDR)

ผลการทดลองพบว่า เวลาว่างงานของ AGV คือ 14.27 ชั่วโมง เวลาว่างงานของพนักงานที่สถานีงาน คือ 0.29 ชั่วโมง ดังนั้น TIT คือ 14.56 ชั่วโมง เพิ่มขึ้นจากกรณีที่มี AGV 2 คัน โดยเวลาว่างของ AGV มากกว่าของสถานีงาน เช่นเดียวกับกรณีของ RDR การเพิ่มขึ้นของ AGV ทำให้เวลาว่างงานของสถานีงานลดลงและเวลาว่างของ AGV เพิ่มขึ้น แต่อัตราการลดลงของเวลาว่างของสถานีงานมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 87% ในขณะที่อัตราการเพิ่มขึ้นของเวลาว่างงานของ AGV มีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 3 พันกว่าเปอร์เซ็นต์ ทำให้โดยรวมแล้วการเพิ่มขึ้นของจำนวน AGV ที่มากกว่า 2 คัน ทำให้เวลาว่างงานโดยรวมเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกันสำหรับกรณีของ RDR และเดินรถทิศทางเดียว ดังแสดงในรูปที่ 8

เมื่อพิจารณา อัตราการว่างงานของสถานีงานและ AGV (IR) ของ PDR เปรียบเทียบกันระหว่างกรณี AGV 1 ถึง 3 คัน จะเห็นได้ว่า IR ลดลงจากร้อยละ 16.98 เป็นร้อยละ 6.96 เมื่อเพิ่มจำนวน AGV จาก 1 คันเป็น 2 คัน แต่เมื่อเพิ่มจำนวน AGV เป็น 3 คัน IR กลับเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เป็นร้อยละ 7.28

ดังนั้นสามารถสรุปเบื้องต้นได้ว่าสำหรับกรณีวิ่งรถทางเดียว PDR เป็นกฎที่ดีกว่า และจำนวน AGV 2 คันเป็นจำนวนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับกฎการกำหนดงานทั้งสองแบบ

4.3 กรณีวิ่งรถสองทิศทาง (Bidirectional flow path)

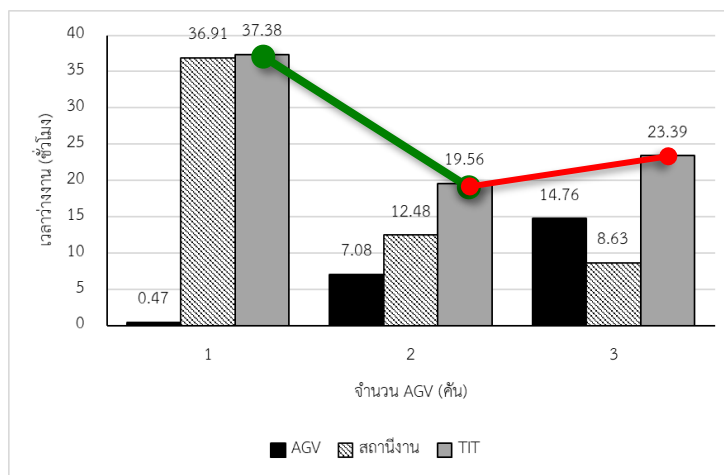
เพื่อให้ได้การจัดตารางงานและเส้นทางวิ่งรถที่เหมาะสมที่สุดของ AGV ผู้วิจัยทำการทดลองกรณีวิ่งรถสองทิศทาง ซึ่งทำให้การกำหนดเส้นทางวิ่งมีความซับซ้อนมากกว่ากรณีวิ่งรถทางเดียว กำหนดให้เส้นทางวิ่งที่เป็นไปได้ของ AGV เส้นทางที่วิ่งได้เหมือนดังเช่นในกรณีวิ่งทิศทางเดียว แต่ทิศทางการวิ่งจะสามารถวิ่งได้ 2 ทิศทาง ดังแสดงในรูปที่ 9 ลำดับการทดลองจะเป็นเช่นเดียวกับในหัวข้อ 4.2 โดยเริ่มจาก AGV 1 คัน และเพิ่มทีละ 1 คัน เพื่อทำการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงค่า TIT ว่ามีแนวโน้มเป็นอย่างไร

ทั้งนี้ในกรณีของการวิ่งรถสองทิศทาง กฎการกำหนดงานทั้ง RDR และ PDR ยังคงเหมือนเดิม ดังแสดงในรูปที่ 5 และ 6 ดังนั้นจะไม่อธิบายซ้ำในหัวข้อนี้

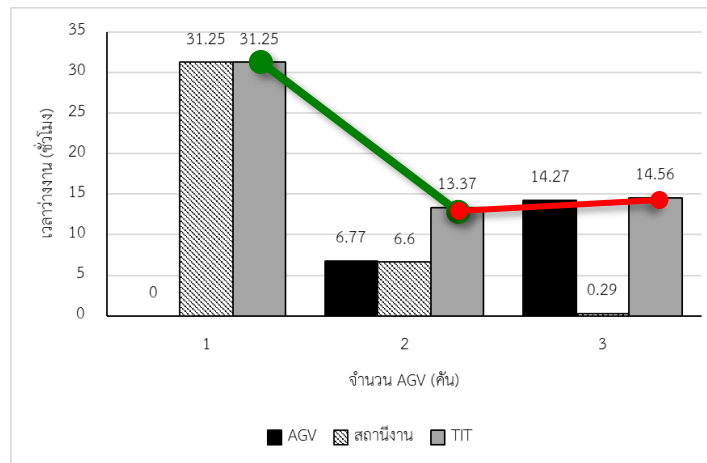
4.3.1 AGV จำนวน 1 คัน

4.3.1.1 กฎการกำหนดงานเชิงรับ (RDR)

ผลการทดลองพบว่า เวลาว่างงานของ AGV คือ 0.89 ชั่วโมง เวลาว่างงานของพนักงานที่สถานีงาน คือ 17.26 ชั่วโมง ดังนั้น TIT คือ 18.15 ชั่วโมง



รูปที่ 7 เปรียบเทียบเวลาการว่างงาน กรณี RDR สำหรับ AGV



รูปที่ 8 เปรียบเทียบเวลาการว่างงาน กรณี PDR สำหรับ AGV จำนวน 1 ถึง 3 คัน วิ่งรถทางเดียว

4.3.1.2 กฎการกำหนดงานเชิงรุก (PDR)

ผลการทดลองพบว่า เวลาว่างงานของ AGV คือ 0 ชั่วโมง เวลาว่างงานของพนักงานที่สถานีงาน คือ 5.48 ชั่วโมง ดังนั้น TIT คือ 5.48 ชั่วโมง ซึ่งในภาพรวมดีกว่าทุกกรณีที่ได้นำมาวิเคราะห์

4.3.2 AGV จำนวน 2 คัน

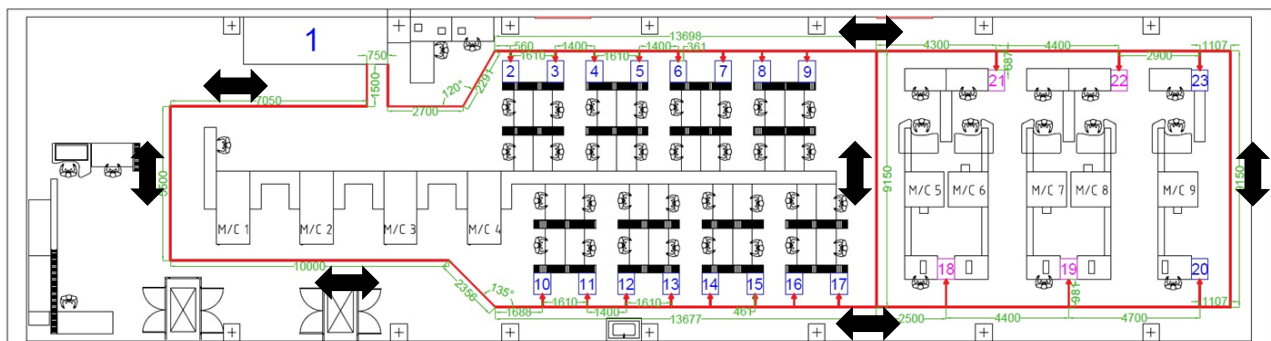
4.3.2.1 กฎการกำหนดงานเชิงรับ (RDR)

ผลการทดลองพบว่า เวลาว่างงานของ AGV คือ 8.47 ชั่วโมง เวลาว่างงานของพนักงานที่สถานีงาน คือ 10.71 ชั่วโมง ดังนั้น TIT คือ 19.18 ชั่วโมง ซึ่งมีเวลาว่างเพิ่มขึ้นเล็กน้อยจากกรณี RDR

ที่มี AGV คันเดียว ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มขึ้นของ AGV ทำให้ เวลาว่างงานของสถานีงานลดลงและเวลาว่างของ AGV เพิ่มขึ้น แต่อัตราการลดลงของเวลาว่างของสถานีงานอยู่ที่ 38% ในขณะที่อัตราการเพิ่มขึ้นของเวลาว่างงานของ AGV อยู่ที่ 852% ทำให้โดยภาพรวมแล้วการเพิ่มขึ้นของจำนวน AGV ส่งผลให้เวลาว่างงานโดยรวมเพิ่มขึ้นสำหรับกรณีของ RDR และเดินรถสองทิศทาง ดังแสดงในรูปที่ 10

4.3.2.2 กฎการกำหนดงานเชิงรุก (PDR)

ผลการทดลองพบว่า เวลาว่างงานของ AGV คือ 7.92 ชั่วโมง เวลาว่างงานของพนักงานที่สถานีงาน คือ 0.33 ชั่วโมง ดังนั้น TIT คือ 8.25 ชั่วโมง เช่นเดียวกับกรณีของ RDR การเพิ่มขึ้นของ AGV



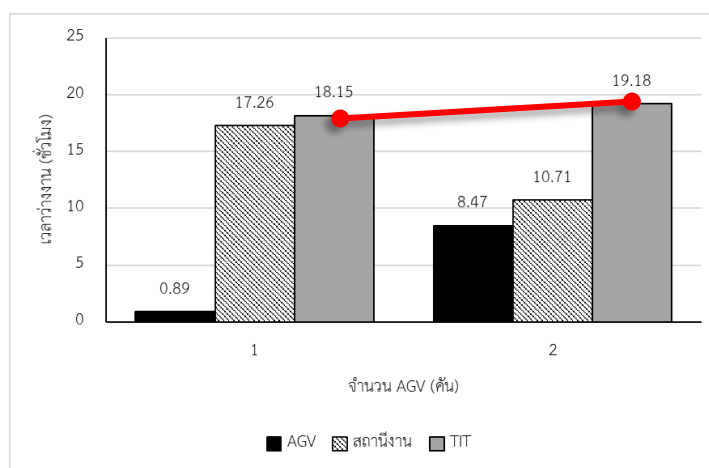
รูปที่ 9 เส้นทางและทิศทางของ AGV กรณีวิ่งรถสองทิศทาง

ทำให้เวลาว่างงานของสถานีงานลดลงและเวลาว่างของ AGV เพิ่มขึ้น แต่อัตราการลดลงของเวลาว่างของสถานีอยู่ที่ 94% ในขณะที่อัตราการเพิ่มขึ้นของเวลาว่างงานของ AGV สูงถึงประมาณ 7 พันกว่าเปอร์เซ็นต์ ทำให้โดยภาพรวมแล้วการเพิ่มขึ้นของจำนวน AGV ทำให้เวลาว่างงานโดยรวมเพิ่มขึ้นเหมือนในกรณีของ RDR และเดินรถสองทิศทาง ดังแสดงในรูปที่ 11

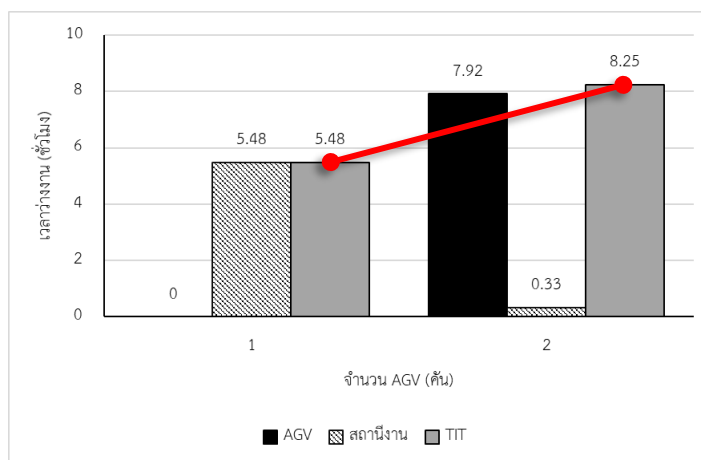
โดยสรุปแล้วในกรณีทิศทางการเดินรถสองทิศทาง เมื่อเพิ่ม AGV จาก 1 คัน เป็น 2 คัน ค่า IR มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ทั้งในกรณีของ RDR และ PDR ดังนั้นจึงยุติการทดลอง เพราะการเพิ่มจำนวน AGV ทำให้ค่า TIT และ IR มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น

5. อภิปรายผล

โดยภาพรวมแล้วกฎการจัดตารางงานของ AGV แบบเชิงรุก ทำให้การทำงานของทั้ง AGV และพนักงานที่สถานีงานมีประสิทธิภาพมากกว่าเมื่อวัดจาก TIT หากเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างกฎเชิงรับกับเชิงรุก กฎเชิงรุกทำให้ TIT ลดเฉลี่ย 42.52% เช่นเดียวกัน การวิ่งรถสองทิศทางที่ทำให้การทำงานของทั้ง AGV และพนักงานที่สถานีงานมีประสิทธิภาพมากกว่าการวิ่งรถทางเดียว เมื่อวัดจาก TIT หากเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างการกำหนดทิศทางวิ่งรถ AGV แบบทางเดียวกับสองทิศทาง การวิ่งรถสองทิศทางทำให้ TIT ลด 43.54% โดยเฉลี่ย



รูปที่ 10 เปรียบเทียบเวลาการว่างงาน กรณี RDR สำหรับ AGV จำนวน 1 และ 2 คัน วิ่งรถสองทิศทาง



รูปที่ 11 เปรียบเทียบเวลาการว่างงาน กรณี PDR สำหรับ AGV จำนวน 1 และ 2 คัน วิ่งรถสองทิศทาง

จากผลการทดลองในกรณีวิ่งรถทางเดียว พบว่า AGV จำนวน 2 คัน ใช้กฎการจัดตารางงานของ AGV แบบเชิงรุก จะทำให้อัตราการว่างงานของพนักงานที่สถานีงาน และ AGV (IR) ต่ำที่สุดที่ 6.96% ส่วนในกรณีวิ่งรถสองทิศทาง การใช้รถ AGV เพียง 1 คัน และใช้กฎการจัดตารางงานของ AGV แบบเชิงรุก จะทำให้ IR ต่ำที่สุด โดยมีค่า IR เพียง 2.98%

ผลสรุปจากการทดลองในตารางที่ 1 และ 2 แสดงให้เห็นทางเลือกของการนำกฎการจัดตารางงานของรถ AGV และทิศทางการวิ่งรถ เพื่อเลือกจำนวนรถ AGV ให้เหมาะสม ตามความต้องการของแต่ละบริษัท หากบริษัทต้องการประสิทธิภาพสูงสุดของการทำงานของ AGV สามารถประยุกต์ใช้ทางเลือกที่เวลาว่างงานของ AGV ต่ำ ได้แก่ ทางเลือกลำดับที่ 2 ในตารางที่ 1 และ ลำดับที่ 2 ในตารางที่ 2 ซึ่งเป็นการใช้กฎการจัดตารางงานเชิงรุก และใช้ AGV จำนวน 1 คัน โดยทิศทางการวิ่งรถอาจเป็นแบบทิศทางเดียวหรือสองทิศทางก็ได้ จะให้ผลในเรื่องของเวลาว่างของ AGV เหมือนกัน คือ AGV ไม่มีเวลาว่างงานเลย อัตราการใช้ประโยชน์ (Utilization rate) 100% ทั้งนี้ในเชิงปฏิบัติต้องเลือกใช้ AGV ที่ไม่ต้องการพักเครื่องหรือชาร์จพลังงานตลอดเวลา 8 ชั่วโมงของกะการทำงาน

หากบริษัทต้องการประสิทธิภาพสูงสุดของสายการผลิต ไม่ต้องการให้สายการผลิตหยุดรอ สามารถใช้ทางเลือกที่ลำดับที่ 6 ในตารางที่ 1 ซึ่งทำให้สถานีงานหยุดรอานเพียง 0.29 ชั่วโมง หรือ 17.4 นาที โดยกำหนดให้มีการวิ่งรถทางเดียว และใช้กฎการจัดตารางงานของ AGV แบบเชิงรุก แต่ใช้จำนวน AGV ถึง 3 คัน ถ้าหากต้องการใช้จำนวน AGV ที่น้อยกว่านี้สามารถใช้ทางเลือกลำดับที่ 4 ในตารางที่ 2 ที่มีเวลาหยุดรอของสถานีใกล้เคียงกันคือ 0.33 ชั่วโมง หรือ 19.8 นาที แต่ใช้จำนวนรถ AGV 2 คัน และกำหนดให้วิ่งรถสองทิศทาง

ท้ายที่สุด หากบริษัทให้ความสำคัญของการลดเวลาว่างงานของทั้ง AGV และสายการผลิต ควรพิจารณาเวลาว่างงานของทั้งสองส่วนพร้อมกัน ดังเช่นวัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้ นั่นคือ

พิจารณาจาก TIT ที่น้อยที่สุด สามารถประยุกต์ใช้ทางเลือกลำดับที่ 2 ในตารางที่ 2 ซึ่งใช้รถ AGV 1 คัน โดยกำหนดตารางงานเชิงรุก และวิ่งรถสองทิศทาง จะทำให้ TIT ต่ำที่สุดที่ 5.48 ชั่วโมง และเมื่อเทียบกับเวลาการทำงานทั้งหมดใน 1 กะการทำงานของทั้ง AGV และสถานีงาน จะมี IR 2.98%

6. บทสรุป

งานวิจัยนี้ตอบสนองความต้องการของโรงงานในอุตสาหกรรมการผลิต ที่มีระบบการผลิตทั้งแบบเก่าและแบบใหม่อยู่ภายใต้โรงงานเดียวกันและนำเทคโนโลยีพาหนะลำเลียงงานอัตโนมัติเข้ามาใช้ในการลำเลียงอุปกรณ์ขนถ่ายในสายการผลิต วัตถุประสงค์หลักคือการหาจำนวน AGV ที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้เวลาว่างงานโดยรวมของทั้ง AGV และสถานีงาน (TIT) ต่ำที่สุด ผู้วิจัยได้ใช้วิธีการหาคำตอบที่สะดวกต่อการประยุกต์ใช้โดยผู้ประกอบการ โดยการออกแบบกฎการกำหนดงานสำหรับการกำหนดตารางงานของ AGV ทั้งนี้ได้ทดสอบกฎการกำหนดงาน 2 แบบ คือ เชิงรับและเชิงรุก ผลการทดสอบพบว่ากฎการจัดตารางงานเชิงรุกทำให้เกิด TIT น้อยกว่าถึง 42.52% โดยเฉลี่ย

เครื่องมือหลักที่ใช้งานวิจัยนี้คือ โปรแกรมตารางทำการซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้งานอย่างแพร่หลายในองค์กรต่างๆ จึงจะเพิ่มความสะดวกต่อผู้ประกอบการหากต้องการประยุกต์ใช้วิธีการที่ได้นำเสนอในงานวิจัยนี้ โดยผู้วิจัยใช้โปรแกรมตารางทำการในการสร้างตารางงานของ AGV และสถานีงาน และใช้คำนวณตัววัดประสิทธิภาพของระบบ ตลอดจนคำนวณเส้นทางวิ่งรถที่ใช้เวลาน้อยที่สุดในแต่ละครั้งของการวิ่งรถ และใช้ตรวจสอบความถูกต้องของผลลัพธ์อีกด้วย

ซึ่งในการกำหนดเส้นทางวิ่งรถนั้นอ้างอิงจากปัญหาวิถีสั้นสุด โดยได้ทำการเปรียบเทียบการกำหนดทิศทางวิ่งของ AGV แบบทิศทางเดียวกับสองทิศทาง พบว่าการวิ่งสองทิศทางทำให้เกิด TIT น้อยกว่าถึง 43.54% โดยเฉลี่ย

ตารางที่ 1 สรุปผลการทดลองสำหรับกรณีวิ่งรถทิศทางเดียว

ลำดับ	กฎการจัดตารางงาน ของ AGV	จำนวน AGV (คัน)	เวลาว่างงาน (ชั่วโมง) ของ			IR
			AGV	สถานีงาน	TIT	
1	เชิงรับ	1	0.47	36.91	37.38	20.32
2	เชิงรุก	1	0.00	31.25	31.25	16.98
3	เชิงรับ	2	7.08	12.48	19.56	10.19
4	เชิงรุก	2	6.77	6.60	13.37	6.96
5	เชิงรับ	3	14.76	8.63	23.39	11.70
6	เชิงรุก	3	14.27	0.29	14.56	7.28

ตารางที่ 2 สรุปผลการทดลองสำหรับกรณีวิ่งรถสองทิศทาง

ลำดับ	กฎการจัดตารางงาน ของ AGV	จำนวน AGV (คัน)	เวลาว่างงาน (ชั่วโมง) ของ			IR
			AGV	สถานีงาน	TIT	
1	เชิงรับ	1	0.89	17.26	18.15	9.86
2	เชิงรุก	1	0.00	5.48	5.48	2.98
3	เชิงรับ	2	8.47	10.71	19.18	9.99
4	เชิงรุก	2	7.92	0.33	8.25	4.30

การทดลองเปรียบเทียบจำนวน AGV ที่เหมาะสม แสดงให้เห็นว่าจำนวน AGV ที่มากขึ้น ไม่ได้ส่งผลให้ TIT น้อยลงเสมอไป เพราะขึ้นอยู่กับการกำหนดทิศทางการวิ่ง และกฎของการจัดตารางงานด้วย ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดเกิดขึ้นเมื่อกำหนดทิศทางการวิ่งสองทิศทาง และกฎการจัดตารางงานเชิงรุก โดยใช้ AGV เพียงคันเดียวแต่ทำให้เกิด TIT เพียง 5.48 ชั่วโมง และมีอัตราการใช้งานทั้งหมดเพียง 2.98%

อย่างไรก็ตามผลการทดลองเปิดโอกาสให้ผู้ใช้งานเลือกประยุกต์ใช้แนวทางที่เหมาะสมกับสถานประกอบการมากที่สุด ไม่ว่าจะเน้นที่ใช้ประโยชน์ของ AGV ให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุดหรือให้ความสำคัญกับประสิทธิภาพของสายการผลิตมากกว่า

ผลลัพธ์จากกรณีศึกษาจากงานวิจัยนี้แม้จะเฉพาะเจาะจงสำหรับข้อมูลของสถานประกอบการแห่งหนึ่ง แต่กระบวนการและวิธีการในการหาคำตอบสามารถประยุกต์ใช้กับสถานประกอบการแห่งอื่นได้ ถ้ามีการปรับใช้อย่างเหมาะสม

7. กิตติกรรมประกาศ

Many thanks to Mr. Roy Morien of the Naresuan University Graduate School for his editing assistance and advice on English expression in this document.

8. เอกสารอ้างอิง

- Baker, K. R., & Trietsch, D. (2009). *Principles of sequencing and scheduling*. John Wiley.
- Bocewicz, G., Nielsen, I., & Banaszak, Z. (2014). Iterative multimodal processes scheduling. *Annual Reviews in Control*, 38, 113–122.
- Fazlollahtabar, H., & Saidi-Mehrabad, M. (2015). Methodologies to optimize automated guided vehicle scheduling and routing problems: A review study. *Journal of Intelligent and Robotic Systems*, 77, 525–545.
- Lacomme, P., Larabi, M., & Tchernev, N. (2013). Job-shop based framework for simultaneous scheduling of machines and automated guided vehicles. *International Journal of Production Economics*, 143, 24–34.
- Lee, C. W., Wong, W. P., Ignatius, J., Rahmana, A., & Tseng, M.-L. (2020). Winner determination problem in multiple automated guided vehicle considering cost and flexibility. *Computers & Industrial Engineering*, 142, 106337.
- Leung, J. Y-T. (2004). *Handbook of scheduling: algorithms, models, and performance analysis*. Chapman & Hall/CRC.
- Lyu, X., Song, Y., He, C., Lei, Q., & Guo, W. (2019). Approach to integrated scheduling problems considering optimal number of automated guided vehicles and conflict-free routing in flexible manufacturing systems. *IEEE Access*, 7, 74909–74924. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2919109>.
- Office of Industrial Economics. (2018). *Report on industrial economics 2018 and trends for 2019*. Ministry of Industry Thailand.
- Pinedo, M. L. (2009). *Planning and scheduling in manufacturing and services*. Springer.
- Smolic-Rocak, N., Bogdan, S., Kovacic, Z., & Petrovic, T. (2010). Time windows based dynamic routing in multi-AGV Systems. *IEEE Transactions on Automation Science and Engineering*, 7(1), 151–155.
- Umar, U. A., Ariffin, M. K. A., Ismail, N., & Tang, S. H. (2015). Hybrid multiobjective genetic algorithms for integrated dynamic scheduling and routing of jobs and automated-guided vehicle (AGV) in flexible manufacturing systems (FMS) environment.

International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 81, 2123–2141.

- Xiao, H., Wu, X., Zeng, Y., & Zhai, J. (2020). A CEGA-Based optimization approach for integrated designing of a unidirectional guide-path network and scheduling of AGVs. *Mathematical Problems in Engineering*, 2020, 1–16. <https://doi.org/10.1155/2020/3961409>.

9. ประวัติผู้แต่ง



นางสาว จิรัชฎิกรณ์ ลอยยม
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร สำเร็จการศึกษาปี พ.ศ. 2563



นาย อนุวัต หม่องเขียว
วิศวกรรมศาสตรบัณฑิต สาขาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร สำเร็จการศึกษาปี พ.ศ. 2563



ผศ.ดร. โพธิ์งาม สมกุล
อาจารย์ประจำที่ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร งานวิจัยที่สนใจเป็นพิเศษ คือ การประยุกต์ใช้การจำลองบนตารางทำการสำหรับแก้ปัญหาต่างๆในโซ่อุปทาน เช่น การลดอาหารที่ถูกทิ้ง โลจิสติกส์ในกระบวนการผลิต การถ่ายเทด้านข้าง โครงการกระจายสินค้า และปรากฏการณ์แล้มา เป็นต้น

วิธีการหาบุเลิร์ชสำหรับแบบจำลองระบบพัสดุดังคลังโลหิตเมื่อพิจารณาความต้องการสองประเภท Tabu Search Method for Model of Blood Inventory System with Two Priorities

สุรัสวดี ไยยานร¹ และ กัญชลลา สุตตาชาติ^{2*}
Suratsawadee Naiyanart¹ and Kanchala Sudtachat^{2*}

^{1,2*}สาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี, จังหวัดนครราชสีมา, 30000

^{1,2*}School of Manufacturing Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology Nakhon Ratchasima, 30000

* corresponding author e-mail: kanchala@g.sut.ac.th

(Received: June 16, 2020, Revised: October 20, 2020, Accepted: November 13, 2020)

บทคัดย่อ

พัสดุดังโลหิตแดงเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีความสำคัญสำหรับการรักษาผู้ป่วยและยังจัดเป็นพัสดุ ที่เน่าเสียง่าย การขาดแคลนพัสดุดังโลหิตแดงในคลังโลหิตอาจส่งผลกระทบต่อเกิดการสูญเสียชีวิตของผู้ป่วยได้ งานวิจัยฉบับนี้จึงนำเสนอวิธีการหาบุเลิร์ชเพื่อใช้ในการจัดการระบบพัสดุดังโลหิตแดง พาสุดังโลหิตแดง วัตถุประสงค์เพื่อกำหนดนโยบายการสั่งซื้อโลหิต (หน่วย) ในแต่ละช่วงเวลาและปริมาณระดับพัสดุดังโลหิตสำรองที่เหมาะสม อีกทั้งเพื่อให้ได้ค่าคาดหวังค่าใช้จ่ายรวมที่ต่ำที่สุด โดยพิจารณาให้เกิดการขาดโลหิตน้อยที่สุดภายใต้สภาวะความต้องการที่ไม่แน่นอน และมีสมมติฐานคือ ความต้องการโลหิตมี 2 กรณี คือ ผู้ป่วยปกติและผู้ป่วยฉุกเฉิน พิจารณาการจ่ายโลหิตที่มีอายุการจัดเก็บน้อยกว่าให้แก่ผู้ป่วยก่อน โดยพิจารณาให้ผู้ป่วยฉุกเฉินได้รับโลหิต 100% โดยทำการทดลองเปรียบเทียบปริมาณการสั่งซื้อที่เหมาะสมโดยใช้ข้อมูลความต้องการโลหิตที่เกิดขึ้นจริงของโรงพยาบาล การทดลองนโยบายที่เหมาะสมพบว่านโยบายปัจจุบันมีค่าคาดหวังค่าใช้จ่ายรวมมากที่สุดและมีร้อยละของการให้บริการที่น้อย นโยบายการสั่งซื้อแบบกำหนดระดับของพัสดุดังโลหิตและเวลาแปรผัน และนโยบายการสั่งซื้อแบบกำหนดระดับของพัสดุดังโลหิตและเวลาคงที่ โดยวิธีการหาบุเลิร์ชมีค่าคาดหวังค่าใช้จ่ายรวมและร้อยละของการให้บริการที่ใกล้เคียงกันและมีค่าคาดหวังค่าใช้จ่ายรวมที่น้อยกว่าวิธีอื่นๆ

คำสำคัญ: พาสุดังโลหิต, ความต้องการสองประเภท, ความต้องการไม่แน่นอน, วิธีการหาบุเลิร์ช

Abstract

Red bloods are an important product for treating patients and are considered as perishable inventory. The shortage of red blood cells in the blood vessels may result in the loss of patients' lives. This research proposes the tabu search (TS) method to use to manage the inventory system for red blood parcels. The objectives are to determine a blood ordering policy (unit) for each period, quantity of the appropriate blood inventory level and obtained the lowest expected total cost by considering the smallest shortage of blood occurring under uncertain conditions. We assume that there are two types of blood demands from regular patient and emergency patient demands. The blood transfusion policy will supply the blood with a shorter shelf life first to the patients (first come first serve). We assume that allocate the blood units to the emergency patients with 100 percent services level. The comparison of the appropriate order quantity units obtained from the tabu search (TS) method and from the current purchase policy are experimented by using the actual blood demand data from a hospital. Considering the appropriate policy, the results show that the current policy provides the highest total cost and the smallest percentage of service level. The results show that the inventory up to level policies with non-fixed period and the fixed period by using the TS search method provide the similar results of expected total costs and a percentage of service levels, and the lower expected total cost than other methods.

Keywords: Blood inventory, Two demand classes, Uncertainty demands, Tabu Search Method

1. ที่มาและความสำคัญ

ปัญหาการจัดการพัสดुकงคลังโลหิตนั้นเป็นปัญหาที่ซับซ้อน การตัดสินใจเกี่ยวกับปริมาณการเก็บพัสดุกงคลัง และปริมาณที่ระดับปลอดภัยซึ่งจะต้องมีสำรองไว้ในคลังเก็บโลหิตมีความสำคัญ ให้มีปริมาณโลหิตที่เพียงพอต่อการใช้งานโดยไม่เกิดการขาดโลหิต เพราะการขาดโลหิตมีผลต่อความรุนแรงของอาการผู้ป่วยเป็นอย่างมาก และจากการเข้าถึงข้อมูลจริงของการให้บริการโลหิตของ 2 โรงพยาบาลพบว่า การให้บริการโลหิตมีเปอร์เซ็นต์การให้บริการโลหิตที่สามารถตอบสนองต่อความต้องการสูงถึง 99 % ซึ่งในทางสถิติอาจจะเป็นค่าที่สูงและดูน่าพอใจ แต่ในทางกลับกันนั้น 1% ที่ไม่สามารถให้บริการได้นั้นอาจหมายถึงโอกาสในการรักษาหรืออาจหมายถึงชีวิตของผู้ป่วย งานวิจัยฉบับนี้จึงสนใจที่พิจารณาปัญหาการจัดการพัสดुकงคลังโลหิต และเพื่อในการวิเคราะห์และหาแนวทางในการจัดการพัสดुकงคลังโลหิต เป็นไปตามสภาพของปัญหาที่เกิดขึ้นจริง (Real problem) เราจึงได้นำเสนอวิธีการ สโตแคสติกส์สำหรับแบบจำลองพัสดुकงคลังโลหิต (Stochastic blood inventory model) ร่วมกับเงื่อนไขของพัสดुकงคลังโลหิตซึ่งมีการหมดอายุตามกำหนดเวลา (Perishable product) โดยวิเคราะห์ด้วยวิธีการทาบูลารีซ พิจารณาแหล่งที่สั่งซื้อพัสดุกงคลังโลหิตจากสภากาชาดไทย พิจารณาหมู่โลหิตประเภทเดียว (Single blood type) วิธีการดำเนินงานวิจัย ผู้วิจัยได้พิจารณาช่วงเวลาวางแผนเป็นแบบช่วง (Periodic review) แบ่งช่วงเวลาออกเป็นหน่วยสัปดาห์ (Week) เนื่องจากความซับซ้อนของปัญหาซึ่งต้องพิจารณาหลากหลายปัจจัยที่ส่งผลกระทบต่อตัดสินใจ การสร้างแบบจำลองจึงต้องมีความรอบคอบเป็นอย่างมาก การตัดสินใจเรื่องปริมาณโลหิตที่ต้องการจากการสั่งซื้อพัสดุกงคลังโลหิต (Replenishment decision) ต้องมีการตัดสินใจก่อนที่จะทราบปริมาณความต้องการโลหิตของผู้ป่วย (Before demand is realized) หากว่าปริมาณสั่งซื้อพัสดุกงคลังโลหิตจากสภากาชาดไทยและปริมาณการรับบริจาคไม่เพียงพอ จะกระทบต่อการรักษาผู้ป่วย แต่หากซื้อมากเกินไปในคลังโลหิตมากเกินไปโดยไม่ใช้งานจะเสียตามอายุ ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้จึงเป็นงานวิจัยที่น่าสนใจเป็นอย่างมากในการไปใช้แก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นจริง ผู้วิจัยได้พิจารณาการจัดการพัสดुकงคลังโลหิตหมู่ O เพียงเท่านั้น เนื่องจากหมู่โลหิต O มีความต้องการมากและนับว่าเป็นหมู่โลหิตที่ขาดแคลนโดยแยกประเภทความต้องการโลหิตเป็น 2 ประเภท ตามประเภทของโลหิต หมู่ Rh- และ หมู่ Rh+ งานวิจัยฉบับนี้พิจารณาเฉพาะความต้องการหมู่โลหิต หมู่ Rh+ ซึ่งเป็นหมู่โลหิตที่พบมากในประเทศไทย

สำหรับงานวิจัยฉบับนี้ เราสร้างแบบจำลองระบบจัดการพัสดुकงคลังโลหิต โดยพิจารณาปัญหาที่เกิดขึ้นจริงโดยพิจารณา

ทุกขั้นตอนการจัดการพัสดุกงคลังโลหิตภายในคลังพัสดุกงคลังโลหิตและวิเคราะห์ทุกความไม่แน่นอนที่เกิดขึ้นในระบบการจัดการพัสดुकงคลังโลหิต โดยมีเป้าหมายการวิเคราะห์ต้นทุนของคลังพัสดุกงคลังโลหิตเพื่อให้ได้นโยบายที่เหมาะสมที่สุดในการจัดการระบบพัสดुकงคลัง ตัวชี้วัดระบบพัสดुकงคลังได้แก่ ค่าคาดหวังค่าใช้จ่ายรวม (The expected total cost) และ เปอร์เซ็นต์การให้บริการโลหิตกับผู้ป่วย (Percentage of service level)

2. งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เริ่มต้นงานวิจัยเกี่ยวกับพัสดुकงคลังประเภทหมดอายุตามเวลาที่กำหนด (Perishable inventory) ศึกษาพัสดุกงคลังประเภทเดียว โดยเริ่มจากงานวิจัยของ Piaraskalla (1972) ศึกษาพัสดुकงคลังประเภทหมดอายุตามเวลาที่กำหนด (Perishable inventory) พิจารณาการตัดสินใจแบบช่วง มีสมมติฐานความต้องการคงที่พิจารณาทั้งกรณีขาดพัสดุกงคลังแล้วสามารถทดแทนได้ (Backlogging) และกรณีขาดพัสดุกงคลังแล้วไม่สามารถทดแทนได้ (Lost sales) ต่อมา Nahmais (1975) วิเคราะห์แบบจำลองกรณีหนึ่งช่วงเวลาและกรณีขาดพัสดุกงคลังแล้วสามารถทดแทนได้ (backlogging) สำหรับ Cohen (1976) ศึกษาว่าวิกฤตค่าเดียวเพื่อกำหนดนโยบายพัสดुकงคลังประเภทหมดอายุตามช่วงเวลากำหนด เมื่อช่วงอายุพัสดุกงคลัง เป็น m ช่วงเวลา และพิจารณากรณีขาดพัสดุกงคลังแล้วสามารถทดแทนได้ (Backlogging) ต่อมาแบบจำลองมาร์คอฟเชน (Markovian) สำหรับพัสดुकงคลังประเภทหมดอายุตามเวลานำเสนอโดย Chazan and Gal (1977) ผู้ซึ่งวิเคราะห์การแจกแจงอายุของพัสดุกงคลังโดยใช้มาร์คอฟเชน เมื่อช่วงเวลาจำกัด (Finite markov chain) งานวิจัยฉบับนี้มีสมมติฐานความต้องการเป็นแบบปัวซอง (Poisson) โดยกำหนดจำนวนพัสดुकงคลังเหลือเก็บคงที่ จุดประสงค์ คือ เพื่อหาค่าคาดหวังค่าใช้จ่ายที่ต่ำที่สุดของค่าใช้จ่ายการหมดอายุของพัสดุกงคลังเสียตามกำหนดเวลา (Perishable inventory) ร่วมกับความต้องการแบบสุ่มและช่วงอายุพัสดุกงคลังแบบสุ่มกรณีขาดพัสดุกงคลังแล้วสามารถทดแทนได้ (Backlogging) และ Nahmias and Schmidt (1986) วิเคราะห์พิจารณาพัสดुकงคลังเสียตามกำหนดเวลา (Perishable inventory) โดยพิจารณาปัญหาทฤษฎี คอนเวอร์เจนซ์ (Convergence) สำหรับความต้องการมีการแจกแจงแบบช่วง ต่อมา Williams and Pattuwo (1999) พิจารณาพัสดुकงคลังเสียตามกำหนดเวลา (Perishable inventory) กรณีช่วงเวลานำ (Lead time) มากกว่าศูนย์ เมื่อมีสมมติฐานช่วงเวลาวางแผนพัสดุกงคลังหนึ่งช่วงเวลา ขณะที่ช่วงอายุพัสดุกงคลังสอง ผู้วิจัยได้พิจารณากรณีขาดพัสดุกงคลังแล้วไม่สามารถทดแทนได้ (lost sales) ต่อมา Haijema et al. (2007)

พิจารณาแบบจำลองพัสดุดังกล่าวแล้วพบว่าความต้องการ
เกิดใหม่และเกิดเก่าที่เก็บรักษาไว้เพื่อใช้งาน โดย
มีสมมติฐานว่าจะมีการเบิกใช้เกิดใหม่ที่มีอายุมากที่สุดก่อน
ต่อมา Kouki et al. (2010) ศึกษาแบบจำลองพัสดุดังกล่าวแบบ
ช่วงเมื่อช่วงอายุพัสดุเป็นแบบสุ่มกรณีขาดพัสดุแล้วไม่สามารถ
ทดแทนได้ (Lost sales) และช่วงเวลานำ (Lead Time) คงที่
ต่อมา Minner and Transchel (2010) พิจารณาพัสดุดังกล่าวแบบ
แบบช่วง (Periodic review) สำหรับพัสดุดังกล่าวเสียตาม
กำหนดเวลา (Perishable inventory) ภายใต้นโยบายที่ให้
ระดับการให้บริการตามเงื่อนไขและกำหนดช่วงเวลานำมากกว่า
ศูนย์ ผู้วิจัยได้วิเคราะห์นโยบายระดับสั่งซื้อที่ประหยัดสุด
(Order-up-to-level policy) ต่อมา Puranam et al. (2017)
เสนอวิธีการแก้ปัญหาที่สามารถนำไปใช้ในทางปฏิบัติได้อย่าง
ง่ายดายและแก้ปัญหาการลดต้นทุนแบบหลายช่วงเวลาโดยใช้
โปรแกรมแบบพลวัต ต่อมา Yates et al. (2017) ได้ศึกษา
ติดตามระดับของพัสดุดังกล่าวและอัตราการสูญเสียของ
พัสดุในโรงพยาบาล โดยใช้วิธีการจำลองสถานการณ์เพื่อหาทาง
แก้ปัญหาการขาดแคลนพัสดุและการสูญเสียของพัสดุ Diabat et
al. (2016) เสนองานวิจัยเกี่ยวกับการจัดเส้นทางและการ
กระจายสินค้าของสินค้าที่เน่าเสียง่าย โดยเริ่มศึกษาจากแหล่ง
ผลิตที่มีศูนย์กระจายสินค้าและรถขนส่งที่มีความจุขนาดเท่ากัน
และศึกษาไปถึงผู้ค้าปลีกที่ยังมีสินค้าคงคลังค้างในคลังสินค้า
โดยใช้วิธี tabu ในการจัดเส้นทางขนส่งสินค้าที่ศึกษาของ
พื้นที่ในการหาคำตอบที่อาจจะมีคำตอบที่ดีที่สุดในรอบการ
กระทำซ้ำถัดไป ซึ่งหลักการนี้มีการใช้อย่างแพร่หลายในเมตาฮิว
ริสติกที่พัฒนาในปัจจุบัน

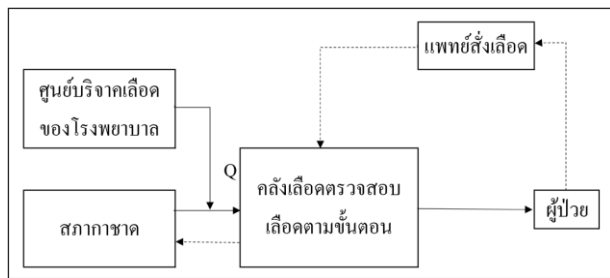
จากสรุปงานวิจัยที่เกี่ยวข้องข้างต้น สามารถระบุแนวทาง
และกรอบในการทำวิจัยได้ โดยการสร้างแบบจำลองทาง
คณิตศาสตร์และใช้วิธีฮิวริสติกมาเพื่อกำหนดนโยบายการสั่ง
พัสดุจากสถานพยาบาลโดยใช้วิธีการสร้างกฎและเงื่อนไขในการ
ตัดสินใจ ซึ่งงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจัดการพัสดุที่เน่าเสียง่าย
ทั้งหมดข้างต้น ส่วนใหญ่จะมุ่งเน้นไปที่การแก้ปัญหาเรื่องการ
ขนส่ง การตั้งศูนย์กระจายสินค้าและงานวิจัยที่ศึกษาปริมาณ
การสั่งจะใช้วิธีในการสั่ง โดยวิธีทางคณิตศาสตร์ที่เป็นการ
แก้ปัญหาซับซ้อนมากกว่า ซึ่งต้องคำนึงถึงความเข้ากันได้ของ
ผู้ให้และผู้รับ อายุของพัสดุ และความต้องการพัสดุที่มีความไม่
แน่นอน จึงมีความซับซ้อนกว่าในหลายๆ ด้าน ดังนั้น งานวิจัยนี้
มีวัตถุประสงค์เพื่อกำหนดนโยบายที่ใช้ในการสั่งพัสดุเข้ามา
จัดเก็บในคลังพัสดุเพื่อให้เพียงพอต่อความต้องการ ที่อาจมีการ
เปลี่ยนแปลงของค่าความต้องการที่ไม่แน่นอน ค่าใช้จ่ายในการ
จัดเก็บ ค่าขนส่ง และค่าใช้จ่ายกรณีขาดพัสดุ เพื่อกำหนด
จำนวนการสั่งพัสดุเข้าคลังที่เหมาะสม หรือกำหนดระดับคลัง

พัสดุดังกล่าวที่เหมาะสม ที่ทำให้ค่าการขาดพัสดุ, ต้นทุนต่ำที่สุด
และร้อยละของการให้บริการมากที่สุด วิธีฮิวริสติกที่เหมาะสม
กับงานวิจัยนี้ ทางผู้วิจัยได้เลือกใช้วิธีการต้องห้ามหรือวิธีการ
ทาบูลัวร์ อันเนื่องมาจากวิธีนี้เป็นวิธีที่จะจำกัดค่าที่สามารถ
เป็นคำตอบที่เหมาะสมก่อนหน้าและไม่ทำให้เกิดการเลือกค่านั้น
ซ้ำซ้อน ช่วยในการค้นหาคำตอบที่เหมาะสมได้รวดเร็วยิ่งขึ้น

3. แบบจำลองระบบพัสดุดังกล่าวแบบช่วง

3.1 อธิบายสภาพปัญหาที่พบ

งานวิจัยฉบับนี้พิจารณาแบบจำลองผลิตภัณฑ์พัสดุ หมู
พัสดุ O และ $Rh+$ โดยมีกำหนดช่วงระยะเวลาการเสียของผลิตภัณฑ์
พัสดุแบบคงที่ (Fixed lifetime) ศูนย์รับบริการพัสดุของ
สถานพยาบาลเป็นแหล่งให้หน่วยของพัสดุเพื่อเติมในคลังพัสดุ
พัสดุ (Replenish orders) ของโรงพยาบาลเทคโนโลยีสุรนารี
ซึ่งเป็นโรงพยาบาลกรณีศึกษา โดยกำหนดการสั่งซื้อพัสดุเป็น
แบบช่วง ในแต่ละช่วงเวลาหน่วยของพัสดุที่อยู่ในคลังเก็บพัสดุ
หากไม่มีการใช้รักษาผู้ป่วยจะหมดอายุ (Zero remaining
lifetime: Outdated) ผู้วิจัยพิจารณาต้นทุนการหมดอายุ
(Outdated cost) ต่อหน่วย นอกจากนี้แล้วแบบจำลอง
พิจารณาความต้องการของผู้ป่วย สามารถหารูปแบบการแจก
แจงได้ และรู้ค่าพารามิเตอร์ มีลักษณะเป็นการแจกแจงแบบช่วง
ความต้องการหน่วยพัสดุของผู้ป่วยมีการจัดลำดับความสำคัญ
(Priority) โดยความต้องการของผู้ป่วยที่มีความสำคัญมากกว่า
คือ ผู้ป่วยฉุกเฉิน (Emergency patients) และ ลำดับ
ความสำคัญรองลงมา คือ ผู้ป่วยปกติ (Regular patients)
แผนภาพแสดงการไหลการกระบวนการจัดการพัสดุดังกล่าว
แสดงดังรูปที่ 1 พิจารณาการเคลื่อนไหวของระบบ เราพิจารณา
พัสดุดังกล่าวเหลือค้างที่เริ่มต้นระบบ (Initial stock on-hand)
มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับศูนย์ได้ ที่สิ้นสุดช่วงเวลาของระบบ เรา
จะคำนวณค่าใช้จ่ายในการเก็บพัสดุ (Holding cost) ต่อ
หน่วยพัสดุ, ค่าใช้จ่ายเนื่องจากพัสดุหมดอายุก่อนใช้งาน
(Outdate cost) ต่อหน่วยพัสดุ และค่าใช้จ่ายในการสั่งพัสดุ
จากศูนย์สถานพยาบาล (Ordering cost) ต่อครั้ง ค่าใช้จ่ายใน
การขาดพัสดุ (Shortage cost) โดยมีสมมติฐานว่า
สามารถหาทดแทนได้ทันที ในกรณีที่เกิดการขาดพัสดุทางคลัง
พัสดุจะทำการยืม/แลกเปลี่ยนจากโรงพยาบาลใกล้เคียงหรือทำ
การเปิดรับบริจาค เราสร้างแบบจำลองระบบพัสดุพัสดุ
พิจารณาช่วงเวลาของระบบที่จำกัด (Finite horizon) ด้วย
วิธีการทาบูลัวร์ (Tabu search method) พิจารณาช่วงเวลา
ทั้งหมดของระบบ (N) ต้องมากกว่า ช่วงเวลาที่หน่วยพัสดุ
หมดอายุ (m) เพราะฉะนั้น $N \geq m$ ช่วงเวลา



รูปที่ 1 แผนภาพการจำลองการสั่งโลหิตของงานวิจัย

$i=1$	$i=2$	$i=m$	$i=M$	
x_1^1	x_2^1	x_m^1	x_{m+1}^1	x_M^1
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
x_1^2	x_2^2	x_m^2	x_{m+1}^2	x_M^2
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
x_1^n	x_2^n	x_m^n	x_{m+1}^n	x_M^n
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$
x_1^N	x_2^N	x_m^N	x_{m+1}^N	x_M^N

Blood stock of the hospital with FIFO

รูปที่ 2 แสดงการเปลี่ยนแปลงของสถานะของระบบพัสดุกงคลังโลหิต

(1) พิจารณาการจัดการพัสดุกงคลังโลหิตหมู่ O เพียงเท่านั้น เนื่องจากหมู่โลหิต O โดยพิจารณาความต้องการ หมู่โลหิต Rh+ โดยมีความต้องการจากผู้ป่วยฉุกเฉิน (Emergency patients) ซึ่งมีซึ่งมีความสำคัญมากกว่า และผู้ป่วยปกติ (Regular patients)

(2) พิจารณาจำกัดการวางแผนพัสดุกงคลังแบบช่วง (Discrete) โดยที่แต่ละช่วงเวลาเป็น 7 วัน (1 สัปดาห์) จำนวนช่วงเวลาทั้งหมดจำกัดในการตัดสินใจนโยบายการจัดการระบบ (M weeks)

(3) ความต้องการพัสดุกงคลังโลหิตเป็นแบบสุ่ม (Random Variable) มีลักษณะเป็นแบบช่วง (Discrete) ในแต่ละวัน เราสามารถประมาณความน่าจะเป็นของความต้องการพัสดุกงคลังโลหิตและความแจ่มแจ้งความน่าจะเป็นนี้

(4) เริ่มต้นระบบมีจำนวนพัสดุกงคลังโลหิต มากกว่าหรือเท่ากับศูนย์ได้ และทราบจำนวนพัสดุกงคลังโลหิต ที่เริ่มต้นช่วงเวลารวบรวม

(5) นโยบายการจัดการพัสดุกงคลังโลหิตอนุญาตให้เกิดการขาดพัสดุกงคลังโลหิต เฉพาะผู้ป่วยปกติ แต่สามารถสั่งพัสดุกงคลังโลหิตฉุกเฉินจากโรงพยาบาลใกล้เคียงได้ และไม่อนุญาตให้เกิดการขาดพัสดุกงคลังโลหิตสำหรับผู้ป่วยฉุกเฉิน

(6) ไม่พิจารณาช่วงเวลานำในการหาพัสดุกงคลังโลหิตมาเติมที่คลังพัสดุกงคลัง

(7) จะทำการนำโลหิตจากการบริจาคเข้ามาที่คลังเลือดก็ต่อเมื่อมีการสั่งโลหิตเข้ามา เพื่อป้องกันโลหิตล้นคลัง

3.1.1 ศึกษาบริบทในการจัดการพัสดุกงคลังโลหิตของโรงพยาบาลมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

การศึกษารายละเอียดในการจัดการพัสดุกงคลังโลหิต ได้ทำการศึกษาที่งานคลังโลหิตของโรงพยาบาลมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี และพบว่าการจัดการพัสดุกงคลังโลหิตยังไม่มีวิธีการที่เหมาะสม โดยปัจจุบันการสั่งโลหิตเข้ามาในคลังโลหิตจะใช้ค่าเฉลี่ยของความต้องการโลหิตในช่วงเวลานั้นของเมื่อปีก่อนหน้า และเมื่อระดับของการใช้โลหิตลดระดับถึงค่าเฉลี่ยจึงจะทำการสั่งจากสภากาชาด และในกรณีที่เกิดการขาดโลหิตทางคลังโลหิตจะทำการยืม/แลกเปลี่ยนจากโรงพยาบาลใกล้เคียงหรือทำการเปิดรับบริจาค แต่ในบางกรณีก็ไม่สามารถยืม/แลกเปลี่ยนหรืออาจจะไม่มีโลหิตของผู้บริจาคที่ตรงกัน ซึ่งส่งผลต่อการได้รับการรักษาของผู้ป่วย ในทางกลับกันหากมีการสั่งโลหิตจากสภากาชาดเข้ามาในปริมาณที่มากเกินไปจนความจำเป็นโลหิตที่มีอายุครบ 35 วันที่ไม่ได้ใช้งานจะต้องถูกกำจัดทิ้ง ซึ่งกระบวนการที่กล่าวมาข้างต้นล้วนเป็นค่าใช้จ่ายที่ทางโรงพยาบาลต้องรับผิดชอบ และเป็นการสูญเสียของโลหิตแทนที่สภากาชาดจะสามารถกระจายโลหิตให้กับโรงพยาบาลที่มีความต้องการโลหิต

3.1.2 ศึกษาวิธีการเตรียมโลหิตให้ผู้ป่วยทั้งในภาวะปกติและในภาวะฉุกเฉิน

ผู้วิจัยได้ทำการสัมภาษณ์เจ้าหน้าที่ที่รับผิดชอบในส่วนงานคลังโลหิตของโรงพยาบาลมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี เพื่อกำหนดระยะเวลาในการให้บริการ ซึ่งระยะเวลาในการให้บริการที่เกิดขึ้นนี้ส่งผลต่ออายุของโลหิตด้วยเช่นกัน จากการศึกษาพบว่าในกรณีความต้องการโลหิตฉุกเฉินจะทำการส่งจ่ายโลหิตในหมู่โลหิต O แก่ผู้ป่วยก่อน และจะทำการตรวจความเข้ากันของโลหิตกับผู้ป่วยควบคู่กันไป หากทำการตรวจความเข้ากันแล้วไม่สามารถเข้ากันได้ ทางแพทย์จะทำการหยุดให้โลหิตทันที และทำการสั่งโลหิตชุดใหม่เข้ามาแทนที่ ซึ่งจากกรณีข้างต้นหากไม่สามารถหาโลหิตที่เข้ากันได้อาจส่งผลกระทบต่อการรักษาชีวิตของผู้ป่วยด้วยเช่นกัน โดยการศึกษาวิธีการเตรียมโลหิตให้ผู้ป่วยในภาวะปกติและวิธีการเตรียมโลหิตให้ผู้ป่วยในภาวะฉุกเฉิน ของโรงพยาบาลมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.1.3 เครื่องหมายและสัญลักษณ์ตัวบ่งชี้

i, j บ่งชี้อายุที่เหลืออยู่เพื่อใช้ประโยชน์ของพัสดุกงคลัง (useful lifetime)

- m บ่งชี้อายุที่เหลืออยู่ของพัสดุโลหิตที่ช่วงเวลาใดๆ (สัปดาห์)
- E บ่งชี้ความต้องการสำหรับผู้ป่วยฉุกเฉิน (emergency type of demand)
- R บ่งชี้ความต้องการสำหรับผู้ป่วยปกติ (regular type of demand)
- n บ่งชี้ช่วงเวลาใดๆ (สัปดาห์) $n = 1, 2, 3, \dots, N$
- N จำนวนช่วงเวลามากสุดที่พิจารณาการวางแผนพัสดุโลหิต (สัปดาห์)
- M จำนวนอายุที่มากที่สุดของพัสดุโลหิต (สัปดาห์)

พารามิเตอร์

- Sc ต้นทุนการขาดพัสดุโลหิตต่อหน่วย ต้องหาทดแทนจากโรงพยาบาลใกล้เคียง (Shortage cost per unit) สำหรับผู้ป่วยปกติ
- B ค่าใช้จ่ายเมื่อมีการสั่งโลหิตเข้ามาในสัปดาห์นั้นจากสภากาชาดไทยต่อ ครั้ง (Ordering cost per time)
- Ma ค่าใช้จ่ายของเครื่องตรวจโลหิตเมื่อมีการจ่ายโลหิตไปให้บริการแก่ผู้ป่วย ต่อหน่วย
- T ค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการขนส่งต่อครั้งเมื่อมีการสั่งโลหิตเข้ามา
- I ค่าใช้จ่ายในการเก็บพัสดุโลหิตต่อหน่วย ต่อสัปดาห์ (Holding cost per unit per week)
- O ค่าใช้จ่ายของพัสดุโลหิตที่หมดอายุโดยไม่ได้ใช้งานต่อหน่วย (Outdate cost per unit)
- d_D^n ปริมาณพัสดุโลหิตที่รับบริจาคได้ในช่วงเวลา n ใดๆ
- $P_D(d_D^n)$ ความน่าจะเป็นแบบช่วงของปริมาณพัสดุโลหิตที่ได้รับบริจาคในช่วงเวลา n มีการแจกแจงแบบช่วงที่รู้ความน่าจะเป็น $P_D(d_D^n)$
- d_E^n ความต้องการพัสดุโลหิตสำหรับผู้ป่วยฉุกเฉินในช่วงเวลา n ใดๆ มีการแจกแจงแบบช่วงที่รู้ความน่าจะเป็น $P_E(d_E^n)$
- $P_E(d_E^n)$ ความน่าจะเป็นแบบช่วงของความต้องการพัสดุโลหิตสำหรับผู้ป่วยฉุกเฉินในช่วงเวลา n
- d_R^n ความต้องการพัสดุโลหิตสำหรับผู้ป่วยปกติในช่วงเวลา n ใดๆ มีการแจกแจงแบบช่วงที่รู้ความน่าจะเป็น $P_R(d_R^n)$
- $P_R(d_R^n)$ ความน่าจะเป็นแบบช่วงของความต้องการพัสดุโลหิตสำหรับผู้ป่วยปกติในช่วงเวลา n
- $F^n(Q^n, x_i^n)$ ค่าคาดหวังค่าใช้จ่ายสำหรับแต่ละ Q^n และ x_i^n ที่ช่วงเวลา n ใดๆ

ตัวแปรแสดงสถานะของระบบ

- x_i^n ปริมาณพัสดुकคงคลังโลหิตที่มีการเก็บสต็อกไว้แบ่งเป็นพัสดุโลหิตที่เหลืออายุใช้งาน i สัปดาห์ เมื่อพิจารณาที่ช่วงเวลา n
- $z_{E,i}^n$ ปริมาณพัสดุโลหิตที่มีการจัดสรรให้กับผู้ป่วยฉุกเฉินแบ่งเป็นพัสดุโลหิตที่เหลืออายุใช้งาน i สัปดาห์ เมื่อพิจารณาที่ช่วงเวลา n
- $z_{R,i}^n$ ปริมาณพัสดุโลหิตที่มีการจัดสรรให้กับผู้ป่วยปกติแบ่งเป็นพัสดุโลหิตที่เหลืออายุใช้งาน i สัปดาห์ เมื่อพิจารณาที่ช่วงเวลา n

ตัวแปรที่ได้จากการคำนวณ

- s, r, ROP ระดับพัสดุโลหิตที่เหลือในคลังพัสดุ ณ จุดสั่งพัสดุโลหิตจากสภากาชาดไทย
- SS ระดับพัสดุโลหิตที่ปลอดภัย
- d ความต้องการโลหิตเฉลี่ยตามช่วงเวลา
- $L\text{-bar}$ ช่วงเวลานำเฉลี่ยตั้งแต่สั่งพัสดุนจนกระทั่งได้รับพัสดุโลหิต
- $Z_d(\sigma_L)$ ความต้องการพัสดุที่แปรปรวนในช่วงเวลานำ

ตัวแปรตัดสินใจ

- $t^n = 1$ เมื่อมีการตัดสินใจสั่งพัสดุโลหิตจากสภากาชาดไทย ที่อย่างน้อย 1 หน่วยในช่วงเวลา $n = 0$ คือ อื่นๆ
- Q ปริมาณตัดสินใจสั่งพัสดุโลหิตจากสภากาชาดไทย พาส์โลหิตที่ได้รับจะมีอายุเหลือใช้งานสูงสุด M เมื่อพิจารณาที่ช่วงเวลา n ใดๆ
- S ปริมาณตัดสินใจสั่งพัสดุโลหิตจากสภากาชาดไทย จากระดับปัจจุบันเพื่อให้พัสดุโลหิตถึงระดับ S เมื่อพิจารณาที่ช่วงเวลา n ใดๆ ขณะที่พัสดุโลหิตที่ได้รับจะมีอายุเหลือใช้งานสูงสุด M
- s ปริมาณตัดสินใจสั่งพัสดุโลหิตจากสภากาชาดไทย เมื่อระดับปัจจุบันของพัสดุโลหิตอยู่ระดับ s หน่วยจะพิจารณาสั่งพัสดุโลหิต เมื่อพิจารณาที่ช่วงเวลา n ใดๆ

3.2 การประเมินการสั่งโลหิตด้วยอัลกอริทึม

การประเมินการสั่งโลหิตด้วยอัลกอริทึมที่มาจากชุดข้อมูลจำนวน 12 เดือน เพื่อประเมินอัตราความต้องการโลหิต โดยใช้ข้อมูลที่ตามคาบเวลา ซึ่งแสดงสูตรในการคำนวณในงานวิจัยเพื่อหาค่าคาดหวังค่าใช้จ่ายรวม อัตราการขาดแคลน อัตราการหมดอายุ และร้อยละของการให้บริการ ดังนี้

3.2.1 ค่าคาดหวังค่าใช้จ่ายรวม

ค่าคาดหวังค่าใช้จ่ายรวมเท่ากับผลรวมค่าใช้จ่ายในการสั่งซื้อ, ค่าใช้จ่ายในการจัดเก็บ, ค่าใช้จ่ายในกรณีขาดแคลน, ค่าใช้จ่ายของการเครื่องจักรที่ใช้ในการเตรียมวัสดุโลหิตเพื่อการถ่ายโลหิตและค่าใช้จ่ายในการขนส่ง โดยมีเงื่อนไขดังนี้

$$x_{m-1}^{n+1} = Q^n + d_D^n - z_{E,m}^n - z_{R,m}^n \quad (1)$$

$$x_{i-1}^{n+1} = x_i^n - z_{E,i}^n - z_{R,i}^n \quad \forall i=1,2,3,...,m-1 \quad (2)$$

(1) เมื่อมีการสั่งโลหิตเข้ามาในสัปดาห์จะพิจารณาจำนวนโลหิตที่มีอยู่ในคลังคงเหลืออยู่ที่จำนวน x_{m-1}^{n+1} ถัง ดังแสดงในสมการที่ 1 คือ เมื่อมีการสั่งเข้ามาในจำนวนที่ Q^n ถัง มีอัตราการบริการจาก d_D^n ถัง และมีการจ่ายให้ผู้ป่วยปกติ $z_{R,m}^n$ ถัง และผู้ป่วยฉุกเฉิน $z_{E,m}^n$ ถัง

(2) เมื่อในรอบสัปดาห์นั้นไม่มีการสั่งจะมีจำนวนที่มีโลหิตที่มีอยู่ในคลังจำนวน x_{i-1}^{n+1} ถัง โดยแสดงในสมการที่ 2 เมื่อโลหิตในคลังปัจจุบันมีจำนวน x_i^n ถังและมีการจ่ายให้ผู้ป่วยปกติ $z_{R,i}^n$ ถัง และผู้ป่วยฉุกเฉิน $z_{E,i}^n$ ถัง

$$(z_{E,j}^n - [d_E^n - \sum_{i=1}^{j-1} z_{E,i}^n]^+)^+ = 0 \quad (3)$$

$j = 2, 3, \dots, m$

$$(z_{R,j}^n - [d_R^n - \sum_{i=1}^{j-1} z_{R,i}^n]^+)^+ = 0 \quad (4)$$

$j = 2, 3, \dots, m$

(3) การจ่ายโลหิตในผู้ป่วยในแต่สัปดาห์ของผู้ป่วยปกติและผู้ป่วยฉุกเฉินจะเลือกใช้โลหิตที่มีอายุเหลือน้อยที่สุดออกไปก่อน ดังสมการที่ 3 และสมการที่ 4

$$Q^n + d_D^n - z_{E,m}^n \geq z_{R,m}^n \quad (5)$$

$$x_i^n - z_{E,i}^n \geq z_{R,i}^n \quad (6)$$

(4) ทำการจ่ายโลหิตให้แก่ผู้ป่วยฉุกเฉินก่อน และหากโลหิตในคลังมีไม่พอถึงจะทำการสั่งโลหิตเข้ามา ดังสมการที่ 5 และสมการที่ 6

$$d_D^n - \sum_{i=1}^n z_{E,i}^n = 0 \quad (7)$$

(5) เพื่อไม่ให้เกิดการขาดโลหิตในผู้ป่วยฉุกเฉินจะทำการเปิดรับบริจาค ดังสมการที่ 7

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^N F^n(Q^n, x_i^n) = & \sum_{n=1}^N [P_E(d_E^n) P_R(d_R^n) P_D(d_D^n)] [BQ^n \\ & + I \left(\sum_{i=2}^{n-1} x_i^n + \left(Q^n + d_D^n - \sum_{i=2}^n z_{R,i}^n - \sum_{i=2}^n z_{E,i}^n \right) \right)^+ \\ & + O(x_1^n - z_{E,1}^n - z_{R,1}^n)^+ + Sc \left(d_R^n - \sum_{i=1}^m z_{R,i}^n \right) \\ & + Ma \left(\sum_{i=1}^m z_{R,i}^n + \sum_{i=1}^m z_{E,i}^n \right) + T(\sum t^n)] \end{aligned} \quad (8)$$

จากสมการที่ 8 สามารถแสดงวิธีการคำนวณหาค่าคาดหวังค่าใช้จ่ายรวมที่เกิดขึ้น ดังต่อไปนี้

- 1) $\sum_{n=1}^N [P_E(d_E^n) P_R(d_R^n) P_D(d_D^n)]$ คือ พจน์ที่แสดงความต้องการโลหิตกับค่าความน่าจะเป็นของความต้องการโลหิต
- 2) BQ^n คือ ค่าใช้จ่ายเมื่อมีการสั่งโลหิตเข้ามาในสัปดาห์นั้น
- 3) $I \left(\sum_{i=2}^{n-1} x_i^n + \left(Q^n + d_D^n - \sum_{i=2}^n z_{R,i}^n - \sum_{i=2}^n z_{E,i}^n \right) \right)^+$ คือ ค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการจัดเก็บ
- 4) $O(x_1^n - z_{E,1}^n - z_{R,1}^n)^+$ คือ ค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการสูญเสียหรือการหมดอายุของโลหิต โดยไม่มีการนำไปใช้
- 5) $Sc \left(d_R^n - \sum_{i=1}^m z_{R,i}^n \right)$ คือ ค่าใช้จ่ายในกรณีโลหิตในคลังไม่เพียงพอต่อการให้บริการ
- 6) $Ma \left(\sum_{i=1}^m z_{R,i}^n + \sum_{i=1}^m z_{E,i}^n \right)$ คือ ค่าใช้จ่ายของเครื่องตรวจโลหิตเมื่อมีการจ่ายโลหิตไปให้บริการแก่ผู้ป่วย
- 7) $T(\sum t^n)$ คือ ค่าใช้จ่ายที่เกิดจากการขนส่ง กล่าวคือ มีค่าเท่ากับ 0 เมื่อไม่มีการสั่งโลหิต และจะมีค่าเท่ากับ 1 คูณด้วยค่าขนส่ง เมื่อมีการสั่งโลหิตเข้ามา

3.2.2 อัตราการขาดแคลน

อัตราการขาดแคลน = จำนวนความต้องการโลหิต -
จำนวนการให้บริการโลหิตจริง

$$= d_R^n - \sum_{i=1}^m Z_{R,i} \quad (9)$$

3.2.3 อัตราการหมดอายุ

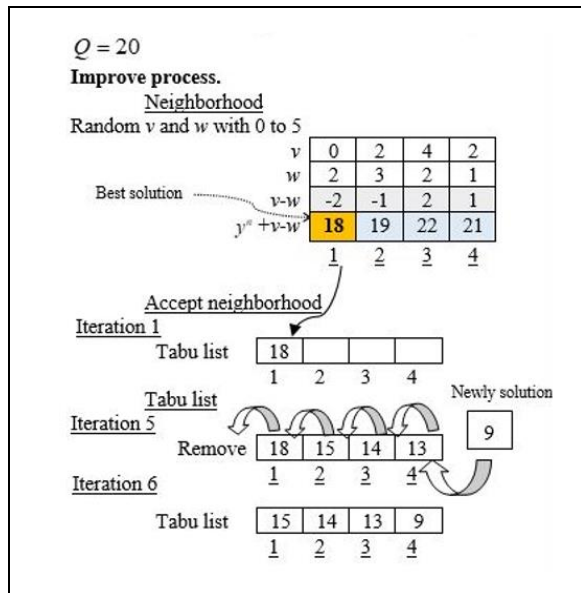
อัตราการหมดอายุ = จำนวนโลหิตที่หมดอายุในช่วงเวลา
(อายุศูนย์วัน)

$$= x_1^n - Z_{E,1}^n - Z_{R,1}^n \quad (10)$$

3.2.4 ร้อยละของการให้บริการ

ร้อยละของการให้บริการ = (อัตราการขาดแคลน/จำนวน
ความต้องการโลหิต) * 100

(11)

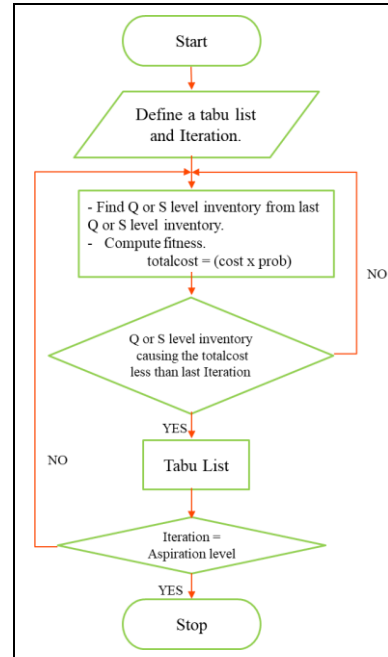


รูปที่ 3 วิธีการทาบูลิสต์

3.3 วิธีดำเนินงาน

3.3.1 สร้างวิธีทาบูลิสต์สำหรับการจัดการคลังพัสดุเม็ด
โลหิตแดง

สร้างวิธีทาบูลิสต์และนำไปใช้กับแบบจำลองทาง
คณิตศาสตร์ที่ใช้นโยบายฮิวริสติก ดังรูปที่ 3 และรูปที่ 4 แสดง
แผนภาพกระบวนการวิเคราะห์ด้วยวิธีทาบูลิสต์ โดยมีขั้นตอน
ดังนี้



รูปที่ 4 แผนภาพแสดงวิธีทาบูลิสต์ในการทดสอบของงานวิจัย

กำหนดให้

- 1) Q^n ที่ช่วงเวลา n ใดๆ เท่ากันหมด ดังนั้นจะได้ว่า $Q^n = Q$
- 2) S^n ที่ช่วงเวลา n ใดๆ เท่ากันหมด ดังนั้นจะได้ว่า $S^n = S$

ขั้นตอนของอัลกอริทึม

- 1) กำหนดค่าเริ่มต้น Q/S
- 2) ทำการหา Neighborhood โดยการสุ่มค่า 2 ค่า ที่มีช่วงการสุ่ม 0-5 แล้วนำมาที่ได้มาลบกัน
- 3) นำ Q/S มาลบผลลัพธ์ที่ได้ในขั้นตอนที่ 2
- 4) นำผลลัพธ์ที่ได้จากขั้นตอนที่ 3 มาหา Fitness และทำการเลือกค่า Q/S ที่ทำให้ Fitness มีค่าน้อยที่สุด ดังรูปที่ 4
- 5) นำค่า Q/S เก็บไว้ใน Tabu List ตำแหน่งที่ 1 ดังรูปที่ 3 กำหนดให้ Tabu List มีทั้งหมด 4 ตำแหน่ง
- 6) ทำซ้ำขั้นตอนที่ 2-5 จนครบตามรอบที่กำหนด
- 7) เมื่อ Tabu List ครบ 4 ตำแหน่ง และมีค่า Q/S ที่จะนำเข้ามาเก็บใน Tabu List ให้ทำการนำค่าที่อยู่ใน Tabu List ตำแหน่งที่ 1 ออก และเลื่อนตำแหน่งใน Tabu List ขึ้น


```

int y=0;
int Bst=1000000;
outloop:
while(inte<0){
    into=rand_inredint(5);
    int m=rand_inredint(5);
    y=y*(m*o);
    Mx=y;
    If (y>188&y<tab(0)&&y<tab(1)&&y<tab(2)&&y<tab(3)&&y<tab(4)){
        ans=comp น้อย/ได้ค่า Fitness
    }
    If (ans<Bst){ หาค่าที่น้อยกว่าค่า Bst ให้ข้อนี้
        Bst=ans;
    }
    If (inte<1){
        tab(0)=0; tab(1)=0; tab(2)=0; tab(3)=0; tab(4)=y;
    }
    If (inte>0){ เมื่อไม่เจอวิธีที่น้อยกว่าใน List
        tab(0)=tab(1); tab(1)=tab(2); tab(2)=tab(3); tab(3)=tab(4);
    }
    inte++;
}
if (inte>20000){
    break;
}
    
```

รูปที่ 5 อัลกอริทึมของการหาค่า Q/S ด้วยวิธีทาบูเสิร์ช

3.3.2 การสร้างวิธีทาบูเสิร์ช

ทดสอบวิธีการทาบูเสิร์ชกับปัญหาขนาดใหญ่ ด้วยการทดสอบกับข้อมูลจริงโดยใช้วิธีการทดสอบ 4 แบบ คือ

1. นโยบายปัจจุบัน (Current policy)

2. นโยบายการสั่งซื้อแบบกำหนดระดับของพัสดุคงคลัง

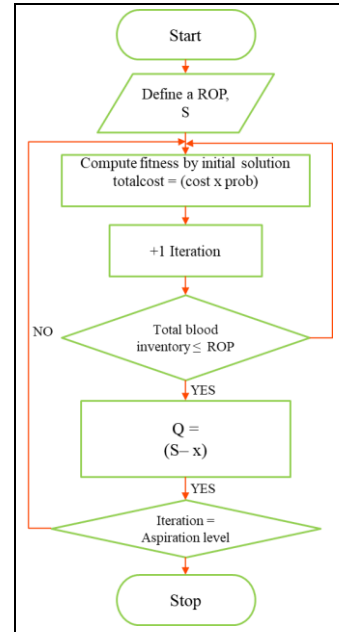
และเวลาแปรผัน โดยใช้วิธีการทาบูเสิร์ช (TS-Up to level-No Fixed time policy)

3. นโยบายการสั่งซื้อแบบจำนวนการสั่งซื้อคงที่และเวลาแปรผัน โดยใช้วิธีการทาบูเสิร์ช (TS-Fixed Q-No Fixed time policy)

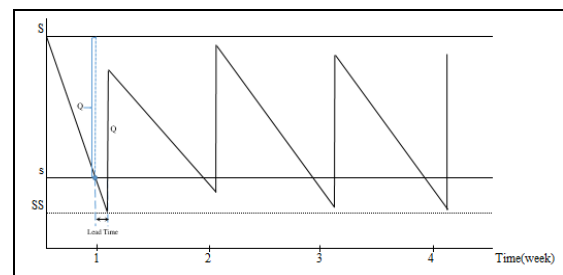
4. นโยบายการสั่งซื้อแบบกำหนดระดับของพัสดุคงคลังและเวลาคงที่ โดยใช้วิธีการทาบูเสิร์ช (TS-Up to level- Fixed time policy)

3.3.2.1 นโยบายปัจจุบัน (Current policy)

เป็นวิธีที่ทางโรงพยาบาลใช้อยู่ในปัจจุบัน กำหนดระดับการสั่งซื้อ โดยระดับการสั่งซื้อหาได้จากค่าเฉลี่ยของความต้องการโลหิตต่อเดือน โดยใช้ข้อมูลความต้องการโลหิตในช่วงเดือนเดียวกันของปีก่อนหน้า ซึ่งระดับการสั่งซื้อของนโยบายปัจจุบันหาได้จากค่าเฉลี่ยความต้องการโลหิตในเดือนนั้นๆ โดยข้อมูลที่น่ามาหาเฉลี่ยใช้ข้อมูลจากปีก่อนหน้ามาคำนวณ



รูปที่ 6 วิธีการหาจำนวนการสั่งโลหิตในนโยบายปัจจุบัน



รูปที่ 7 ระดับพัสดุคงคลังของนโยบายการสั่งโลหิตในนโยบายปัจจุบัน (s, S)

วัตถุประสงค์ (Objective): ให้บริการโลหิตให้เพียงพอต่อความต้องการ

เงื่อนไข (Rule-based decision) :

(1) กำหนดร้อยละของการให้บริการผู้ป่วยฉุกเฉิน คือ ร้อยละ 100

(2) ในภาวะฉุกเฉินจะทำการส่งจ่ายโลหิตหมู่ O ควบคู่กับการตรวจสอบความเข้ากันของโลหิต หากไม่เข้ากันจะทำการระงับการให้โลหิต และทำการส่งจ่ายใหม่

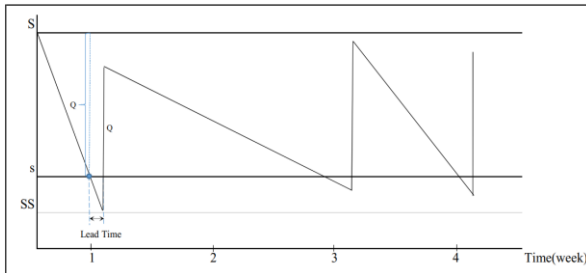
3.3.2.2 นโยบายการสั่งซื้อแบบกำหนดระดับของพัสดุคงคลังและเวลาแปรผัน โดยใช้วิธีการทาบูเสิร์ช (TS-Up to level-No Fixed time policy)

กำหนดระดับการสั่งซื้อ โดยระดับการสั่งซื้อสามารถหาได้จากสมการที่ 12

$$s = (d \times \bar{L}) + Zd(\sigma_L) \quad (12)$$

$$SS = Zd\sigma_L \quad (13)$$

เมื่อระดับของโลहितในคลังลดลงถึง s จะทำการสั่งโลहितเป็นจำนวน $S -$ (จำนวนโลहितที่เหลือในคลัง) เพื่อรักษาระดับโลहितในคลังให้อยู่ที่ระดับสูงสุด ซึ่งรอบของการสั่งอาจไม่แน่นอน โดยจะแปรผันกับระดับของโลहितในคลัง

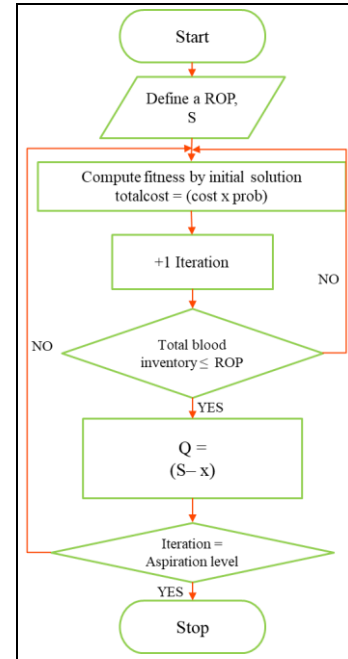


รูปที่ 8 ระดับพัสดุคงคลังนโยบายการสั่งซื้อแบบระดับของพัสดุคงคลังและเวลาแปรผันโดยใช้วิธีการทาบูเสิร์ซ (s, S)

เงื่อนไข (Rule-based decision) :

วัตถุประสงค์ (Objective) : ให้บริการโลहितให้เพียงพอต่อความต้องการมีค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นน้อยที่สุด มีการขาดแคลนน้อยที่สุด และร้อยละของการบริการสูงสุด

- (1) กำหนดร้อยละของการให้บริการ คือ ร้อยละ 100 สำหรับผู้ป่วยฉุกเฉิน
- (2) ทำการจ่ายโลहितให้ผู้ป่วยกรณีฉุกเฉินก่อน
- (3) กำหนด ROP และ SS
- (4) ค่าคาดหวังค่าใช้จ่ายรวมน้อยที่สุด
- (5) ทุกรอบสั่งซื้อ จำนวนโลहितที่ทำการสั่งจะทำให้ระดับของโลहितในคลังถึงระดับสูงสุด (S)



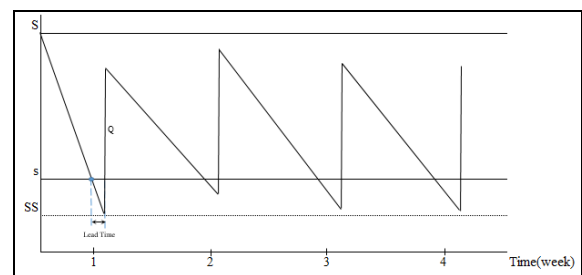
รูปที่ 9 วิธีการสั่งโลहितนโยบายการสั่งซื้อแบบกำหนดระดับของพัสดุคงคลังและเวลาแปรผันโดยใช้วิธีการทาบูเสิร์ซ

3.3.2.2 นโยบายการสั่งซื้อแบบจำนวนการสั่งซื้อคงที่และเวลาแปรผัน โดยใช้วิธีการทาบูเสิร์ซ (TS-Fixed Q-No Fixed time policy)

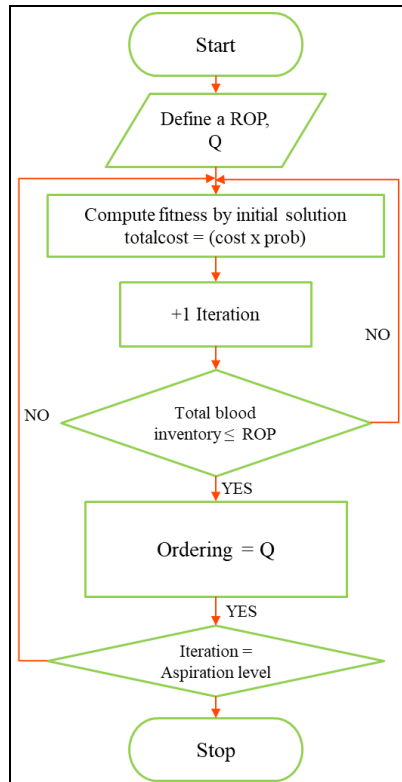
เมื่อระดับของโลहितในคลังลดลงถึง s จะทำการสั่งโลहितเป็นจำนวน Q ซึ่งจำนวน Q หาได้จากการใช้วิธีการทาบูและการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ในการคำนวณเพื่อให้ได้ค่า Q ตรงตามความต้องการ ซึ่งรอบของการสั่งอาจไม่แน่นอน โดยจะแปรผันกับระดับของโลहितในคลัง

$$s = (d \times \bar{L}) + Zd(\sigma_L) \quad (14)$$

$$SS = Zd(\sigma_L) \quad (15)$$



รูปที่ 10 ระดับพัสดุคงคลังของนโยบายการสั่งซื้อแบบจำนวนการสั่งซื้อคงที่และเวลาแปรผันโดยใช้วิธีการทาบูเสิร์ซ (r, Q)



รูปที่ 11 วิธีการหาจำนวนการสั่งโลติดนโยบายการสั่งซื้อแบบจำนวนการสั่งซื้อคงที่และเวลาแปรผันโดยใช้วิธีการทาบูเสิร์ช

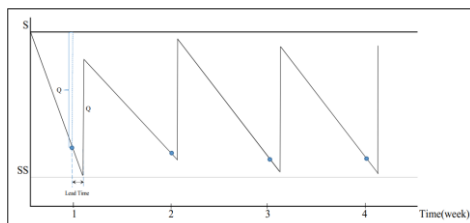
วัตถุประสงค์ (Objective): ให้บริการโลหิตให้เพียงพอต่อความต้องการ มีค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นน้อยที่สุด มีการขาดแคลนน้อยที่สุด และร้อยละของการบริการสูงสุด

เงื่อนไข (Rule-based decision):

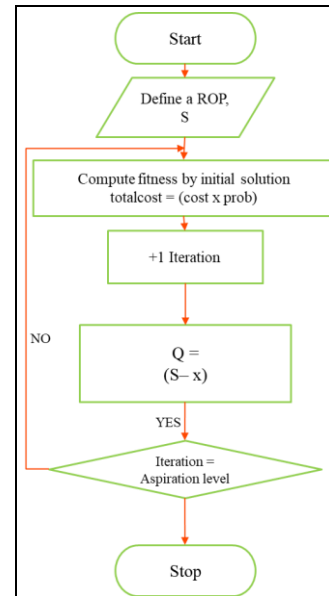
- (1) กำหนดร้อยละของการให้บริการ คือ ร้อยละ 100 สำหรับผู้ป่วยฉุกเฉิน
- (2) ทำการจ่ายโลหิตให้ผู้ป่วยกรณีฉุกเฉินก่อน
- (3) กำหนด ROP และ Safety Stock
- (4) ค่าคาดหวังค่าใช้จ่ายรวมน้อยที่สุด

3.3.2.4 นโยบายการสั่งซื้อแบบกำหนดระดับของพัสดุดังคลังและเวลาคงที่ โดยวิธีการทาบูเสิร์ช (TS-Up to level-Fixed time policy)

จะทำการสั่งซื้อทุกรอบสั่งซื้อ โดยจำนวนโลหิตที่ทำการสั่งจะทำให้ระดับของโลหิตในคลังถึงระดับสูงสุด (S)



รูปที่ 12 ระดับพัสดุดังคลังของนโยบายการสั่งซื้อแบบกำหนดระดับของพัสดุดังคลังและเวลาคงที่โดยวิธีการทาบูเสิร์ช (t, S)



รูปที่ 13 วิธีการหาจำนวนการสั่งโลติดในวิธีการทาบูเสิร์ชแบบการกำหนดระดับของพัสดุดังคลังและเวลาคงที่

วัตถุประสงค์ (Objective) : ให้บริการโลหิตให้เพียงพอต่อความต้องการ มีค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นน้อยที่สุด มีการขาดแคลนน้อยที่สุด และร้อยละของการบริการสูงสุด

เงื่อนไข (Rule-based Decision):

- (1) กำหนดร้อยละของการให้บริการ คือ ร้อยละ 100 ของทั้งสองกรณี
- (2) ทำการสั่งเลือด โดยจะทำการสั่งทุกอาทิตย์
- (3) ให้บริการแก่ผู้ป่วยภาวะฉุกเฉินก่อน ผู้ป่วยภาวะปกติ
- (4) ทำการสั่งซื้อทุกรอบสั่งซื้อ โดยจำนวนโลหิตที่ทำการสั่งจะทำให้ระดับของโลหิตในคลังถึงระดับสูงสุด (S)

3.4 การเก็บข้อมูล

ทำการเก็บข้อมูลเชิงปริมาณที่ต้องการในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ซึ่งประกอบไปด้วยชุดข้อมูลความต้องการโลหิตของหมู่โลหิต O จำนวนโลหิตที่ได้รับบริจาคและค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นในการจัดการพัสดุดังคลังโลหิตของโรงพยาบาลมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

3.5 วิเคราะห์ข้อมูลเพื่อสร้างชุดข้อมูลสำหรับการสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์

การวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อทดสอบการกระจายตัวของความน่าจะเป็นของข้อมูล ความต้องการโลหิตของโรงพยาบาลมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี โดยใช้การวิเคราะห์สถิติพื้นฐานพบว่า การกระจายตัวของข้อมูลเป็นแบบความน่าจะเป็นแบบช่วง (Discrete probability) แสดงข้อมูลการทดสอบดังตาราง

ที่ 1 โดยทำการแยกข้อมูลเป็น 2 ภาวะ คือ ภาวะความต้องการปกติและภาวะความต้องการฉุกเฉิน และกำหนดให้โลหิตในกลุ่มที่มีอายุคงเหลือ 1-7 วัน มีจำนวนเท่ากับค่าความต้องการโลหิตสูงสุดสำหรับผู้ป่วยปกติของแต่ละเดือน เนื่องจากในความเป็นจริงแล้ว ทางคลังโลหิตจะทราบปริมาณความต้องการโลหิตของผู้ป่วยปกติล่วงหน้ามาก่อนแล้ว และสามารถสำรองโลหิตในคลังโลหิตได้เพียงพอต่อความต้องการวิเคราะห์ข้อมูลค่าคาดหวังค่าใช้จ่ายรวมทั้งที่เกิดขึ้นในการจัดการคลังโลหิตของโรงพยาบาลมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ซึ่งได้แก่ค่าใช้จ่ายในการจัดเก็บ, ค่าใช้จ่ายจากการสั่งซื้อ, ค่าใช้ภายในในการขนส่ง, ค่าใช้ภายในกรณีเกิดการขาดของโลหิต ดังตารางที่ 2 โดยค่าใช้จ่ายที่เกิดขึ้นในกรณีเกิดการขาดจะมีค่าขนส่ง ซึ่งจะคิดค่าขนส่งจากระยะจากโรงพยาบาลที่ทำการยืมโลหิต ซึ่งอาจจะมีความเป็นไปได้ว่าอาจจะต้องทำการยืมหรือแลกเปลี่ยนโลหิตไกลออกไป จึงทำการคิดค่าขนส่งตามระยะของโรงพยาบาลที่ไกลที่สุด

ตารางที่ 1 ความต้องการโลหิตและความน่าจะเป็นของความต้องการโลหิตของโรงพยาบาลมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี (Unit) ตั้งแต่เดือน ตุลาคม 2561-กันยายน 2562

เดือน	ความต้องการโลหิต (หน่วย)							
	ผู้ป่วยปกติ				ผู้ป่วยฉุกเฉิน			
	Dem R1	Prob R1	Dem. R2	Prob. R2	Dem. E1	Prob. E1	Dem. E2	Prob. E2
ต.ค.	66	0.50	72	0.50	6	0.50	8	0.50
พ.ย.	48	0.50	51	0.50	4	0.50	5	0.50
ธ.ค.	48	0.50	51	0.50	4	0.50	5	0.50
ม.ค.	48	0.50	51	0.50	4	0.50	5	0.50
ก.พ.	48	0.50	51	0.50	4	0.50	5	0.50
มี.ค.	66	0.50	72	0.50	6	0.50	8	0.50
เม.ย.	66	0.50	72	0.50	6	0.50	8	0.50
พ.ค.	48	0.50	51	0.50	4	0.50	5	0.50
มิ.ย.	66	0.50	72	0.50	6	0.50	8	0.50
ก.ค.	48	0.50	51	0.50	4	0.50	5	0.50
ส.ค.	48	0.50	51	0.50	4	0.50	5	0.50
ก.ย.	48	0.50	51	0.50	4	0.50	5	0.50

หมายเหตุ

- 1) Dem. คือ ความต้องการโลหิตของผู้ป่วย และ Prob. คือ ความน่าจะเป็นของความต้องการ (โอกาสเกิดความต้องการ)
- 2) R1 หรือ R2 คือ ช่วงความต้องการโลหิตของผู้ป่วยปกติ ที่มีโอกาสต้องการเท่ากับ R1 หรือ R2 หน่วย
- 3) E1 หรือ E2 คือ ช่วงความต้องการโลหิตของผู้ป่วยปกติ ที่มีโอกาสต้องการเท่ากับ E1 หรือ E2 หน่วย

ตารางที่ 2 ค่าใช้จ่ายที่เกี่ยวข้องกับการบริการโลหิตของโรงพยาบาลมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

รายการ	ค่าใช้จ่าย
การส่ง	โลหิต 700 บาท/หน่วย
	ค่าขนส่ง 100 บาท/รอบ
การจัดเก็บ	พนักงาน 108 บาท/หน่วย
	ตู้แช่ 2 บาท/หน่วย/วัน
การใช้	ค่าเครื่องตรวจ 570 บาท/หน่วย/การใช้
การขาดแคลน	*ค่าขนส่ง 2000 บาท/รอบ
หมดอายุ	กำจัด 4 บาท/หน่วย

หมายเหตุ *ค่าขนส่ง ณ มกราคม 2562

4. ผลการดำเนินงานวิจัย

4.1 ผลการทดสอบความเท่ากัน (Equivalence testing) ของอัลกอริทึม

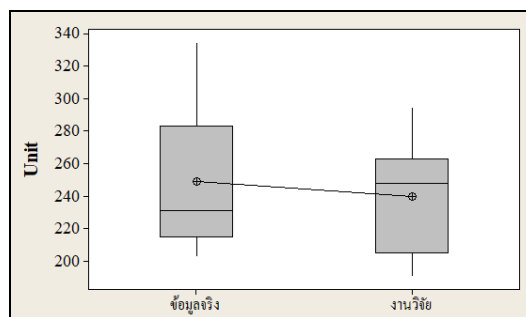
การศึกษาข้อมูลที่เกิดขึ้นจากโรงพยาบาลมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีซึ่งมีความต้องการโลหิตในปริมาณที่สามารถระบุปัญหาที่เกิดขึ้นจากโรงพยาบาลกรณีศึกษาไว้ในหัวข้อ 3.1.1 และหัวข้อ 3.1.2 เพื่อความถูกต้องของผลการวิจัยทางผู้วิจัยได้ทำการทดสอบอัลกอริทึมจากงานวิจัย โดยนำจำนวนโลหิตที่ทำการส่งโลหิตที่ได้จากการใช้อัลกอริทึมในงานวิจัยของนโยบายปัจจุบันกับจำนวนการส่งโลหิตที่เกิดขึ้นจริงมาทำการทดสอบความเท่ากัน (Equivalence testing)

Two-Sample T-Test and CI: ข้อมูลจริง(Unit), งานวิจัย(Unit)

```
Two-sample T for ข้อมูลจริง(Unit) vs งานวิจัย(Unit)
N    Mean    StDev    SE Mean
ข้อมูลจริง(Unit)  12  248.9    43.9      13
งานวิจัย(Unit)   12  239.9    33.4      9.6

Difference = mu (ข้อมูลจริง(Unit)) - mu (งานวิจัย(Unit))
Estimate for difference:  9.0
95% CI for difference: (-24.2, 42.2)
T-Test of difference = 0 (vs not =): T-Value = 0.57 P-Value = 0.578 DF = 20
```

รูปที่ 14 ผลการทดสอบความเท่ากัน (Equivalence testing) ของอัลกอริทึม



รูปที่ 15 บล็อกพล็อตของผลการทดสอบความเท่ากัน (Equivalence testing) ของอัลกอริทึม

ผลการทดสอบสมมติฐานของโรงพยาบาลมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี หลังจากได้ผลการรันด้วยโปรแกรมแล้วจึงนำค่าที่ได้มาทดสอบความเท่ากัน (Equivalence testing) ของอัลกอริทึมโดยใช้โปรแกรม Minitab ซึ่งผลที่ได้คือยอมรับได้ว่าผลของปริมาณการสั่งโลหิตที่ได้จากอัลกอริทึม มีค่าเท่ากับผลของการสั่งโลหิตที่ได้จากข้อมูลโรงพยาบาลเทคโนโลยีสุรนารีจริง อย่างมีนัยสำคัญ ที่ได้จากงานวิจัยเนื่องจาก ค่า P-Value ที่แสดงในรูปที่ 14 และรูปที่ 15 โรงพยาบาลมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีมีค่า P-Value เท่ากับ 0.57

4.2 ผลการประเมินนโยบายการสั่งโลหิตเมื่อความต้องการโลหิตมีการเปลี่ยนแปลงกรณีศึกษาโรงพยาบาลมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

พิจารณาณนโยบายทั้งหมด 4 นโยบาย

(1) นโยบายการดำเนินงานปัจจุบัน (Current policy)

(2) นโยบายการสั่งซื้อแบบกำหนดระดับของพัสดุคงคลังและเวลาแปรผัน โดยใช้วิธีการทาบูเลิร์ซ (TS-Up to level-No Fixed time policy)

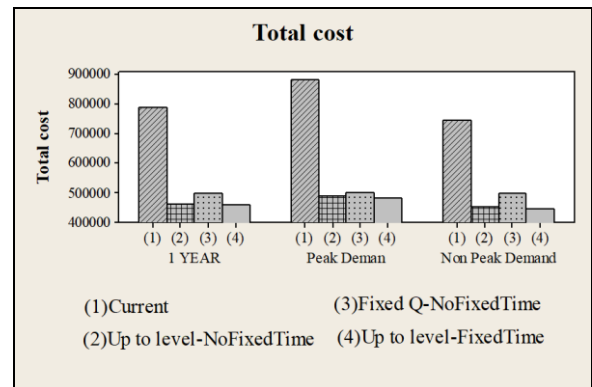
(3) นโยบายการสั่งซื้อแบบจำนวนการสั่งซื้อคงที่และเวลาแปรผัน โดยใช้วิธีการทาบูเลิร์ซ (TS-Fixed Q-No Fixed time policy)

(4) นโยบายการสั่งซื้อแบบกำหนดระดับของพัสดุคงคลังและเวลาคงที่ โดยใช้วิธีการทาบูเลิร์ซ (TS-Up to level- Fixed time policy)

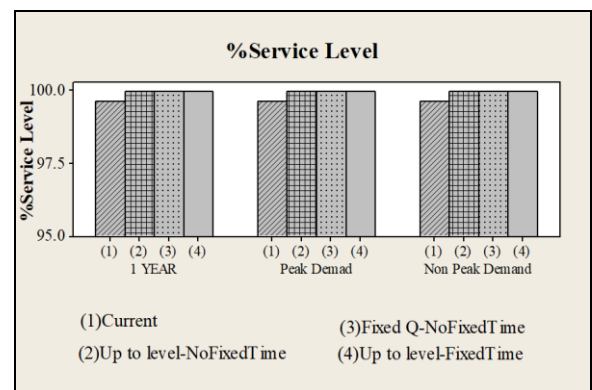
4.2.1 ผลการประเมินนโยบายการสั่งโลหิต

ความต้องการโลหิตจากข้อมูลจริง โดยจะทำการประเมินแบ่งเป็น 3 กลุ่ม คือ ผลการประเมินที่เกิดจากความต้องการรวมทั้งปี, ผลการประเมินในช่วงที่มีความต้องการโลหิตสูงและผลการประเมินในช่วงที่มีความต้องการโลหิตต่ำ จากรูปที่ 16 ผลการประเมินเปรียบเทียบกันของ 3 ช่วงเวลา นโยบายที่ 1 นโยบายการดำเนินงานปัจจุบัน มีค่าใช้จ่ายที่มากที่สุดที่คือ 2,545,870.75 บาท และนโยบายที่ 4 นโยบายการสั่งซื้อแบบกำหนดระดับของพัสดุคงคลังและเวลาคงที่ โดยใช้วิธีการทาบูเลิร์ซ (TS-Up to level- Fixed time policy) มีค่าใช้จ่ายที่น้อยที่สุดคือ 1,835,471.25 บาท จากรูปที่ 17 ผลการประเมินเปรียบเทียบกันของ 3 ช่วงเวลา นโยบายที่ 4 มีร้อยละของการให้บริการมากที่สุดคือร้อยละ 99.98 และนโยบายที่ 1 มีร้อยละของการให้บริการต่ำที่สุดคือร้อยละ 99.19 จากรูปที่ 18 จะเห็นได้ว่าในช่วงที่มีความต้องการโลหิตสูงจะเห็นได้ว่านโยบายที่ 2, 3 และ 4 มีค่าที่ใกล้เคียงกัน และในช่วงที่มีการใช้งานต่ำจะ

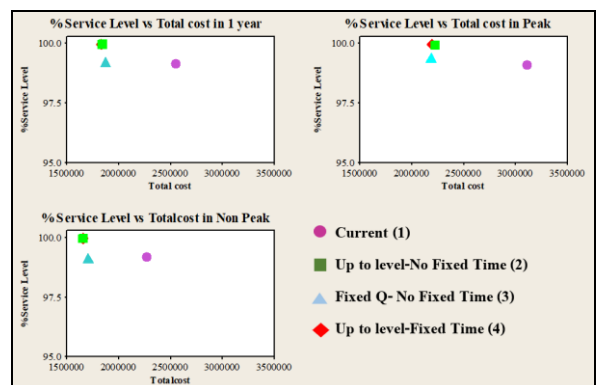
เห็นความแตกต่างกันได้อย่างชัดเจน ยกเว้นนโยบายที่ 4 และ 2 ที่มีค่าที่ใกล้เคียงกัน แต่เมื่อมองในภาพรวมแล้ว นโยบายที่ 4 จะมีร้อยละการให้บริการที่สูงและค่าคาดหวังค่าใช้จ่ายรวมที่น้อยที่สุด



รูปที่ 16 ค่าคาดหวังค่าใช้จ่ายรวมที่ใช้ข้อมูลความต้องการโลหิตจากข้อมูลจริง โรงพยาบาลมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



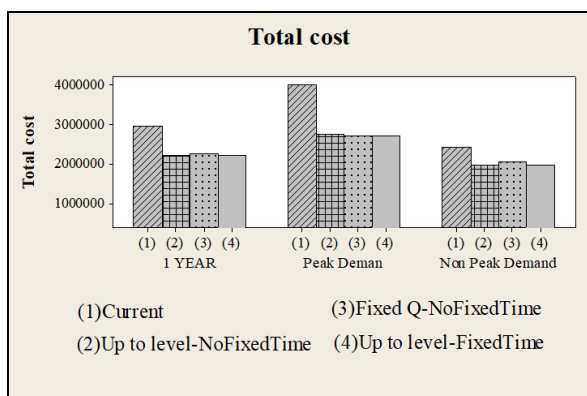
รูปที่ 17 ร้อยละของการให้บริการที่ใช้ข้อมูลความต้องการโลหิตจากข้อมูลจริง



รูปที่ 18 ร้อยละของการให้บริการเทียบกับค่าคาดหวังค่าใช้จ่ายรวมของทั้งสามช่วงเวลาโดยใช้ข้อมูล

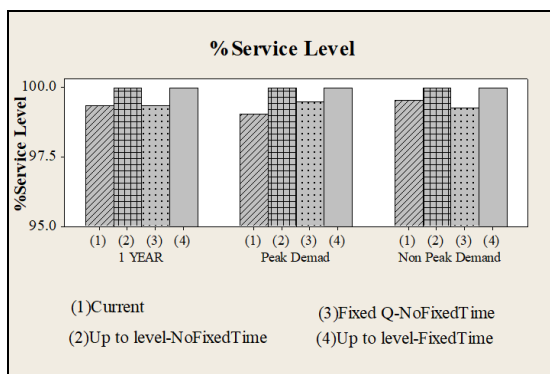
4.2.2 เมื่อความต้องการโลหิตมีความต้องการเพิ่มขึ้น 25%

โดยจะทำการประเมินแบ่งเป็น 3 กลุ่ม คือผลการประเมินที่เกิดจากความต้องการรวมทั้งปี, ผลการประเมินในช่วงที่มีความต้องการโลหิตสูงและผลการประเมินในช่วงที่มีความต้องการโลหิตต่ำ จากรูปที่ 19 ผลการประเมินเปรียบเทียบกันของ 3 ช่วงเวลา นโยบายที่ 1 มีค่าใช้จ่ายที่มากที่สุดที่คือ 2,957,609.21 บาท และนโยบายที่ 4 มีค่าใช้จ่ายที่น้อยที่สุดคือ 2,227,83.83 บาท จากรูปที่ 20 ผลการประเมินเปรียบเทียบกันของ 3 ช่วงเวลา นโยบายที่ 4 มีร้อยละของการให้บริการมากที่สุดคือร้อยละ 99.98 และนโยบายที่ 1 มีร้อยละของการให้บริการต่ำที่สุดคือร้อยละ 99.04

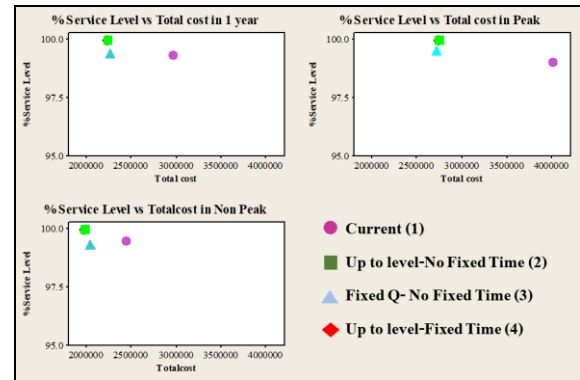


รูปที่ 19 ค่าคาดหวังค่าใช้จ่ายรวมเมื่อความต้องการโลหิตเพิ่มขึ้น 25%

จากรูปที่ 21 เมื่อค่าความต้องการโลหิตมีการเพิ่มขึ้น 25% จะเห็นได้ว่าในช่วงที่มีความต้องการโลหิตสูงนโยบายที่ 2 และ 4 มีค่าที่ใกล้เคียงกัน และในช่วงที่มีการใช้งานต่ำจะเห็นว่านโยบายที่ 2 และ 4 มีค่าเท่ากัน แต่เมื่อมองในภาพรวมแล้วนโยบายที่ 4 จะมีร้อยละการให้บริการที่สูงและค่าคาดหวังค่าใช้จ่ายรวมที่น้อยที่สุด



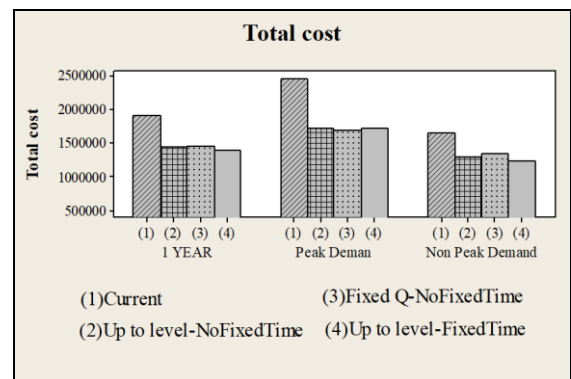
รูปที่ 20 ร้อยละของการให้บริการเมื่อความต้องการโลหิตเพิ่มขึ้น 25% ของ โรงพยาบาลมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี



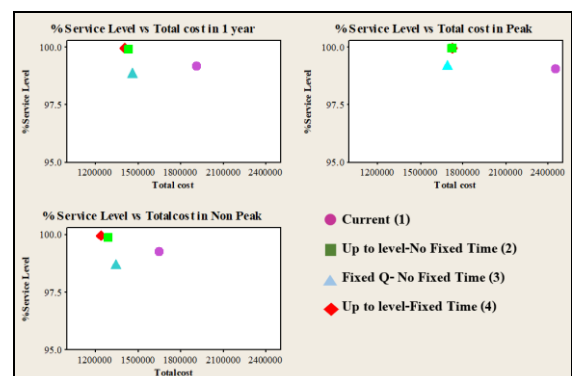
รูปที่ 21 ร้อยละของการให้บริการเทียบกับค่าคาดหวังค่าใช้จ่ายรวมของทั้งสามช่วงเวลาโดยใช้ข้อมูลความต้องการโลหิตเพิ่มขึ้น 25%

4.2.3 เมื่อความต้องการโลหิตมีความต้องการลดลง 25%

โดยจะทำการประเมินแบ่งเป็น 3 กลุ่ม คือผลการประเมินที่เกิดจากความต้องการรวมทั้งปี, ผลการประเมินในช่วงที่มีความต้องการโลหิตสูงและผลการประเมินในช่วงที่มีความต้องการโลหิตต่ำ



รูปที่ 22 ค่าคาดหวังค่าใช้จ่ายรวมเมื่อความต้องการโลหิตลดลง 25%



รูปที่ 23 ร้อยละของการให้บริการเทียบกับค่าใช้จ่ายรวมของทั้งสามช่วงเวลาโดยใช้ข้อมูลความต้องการโลหิตลดลง 25%

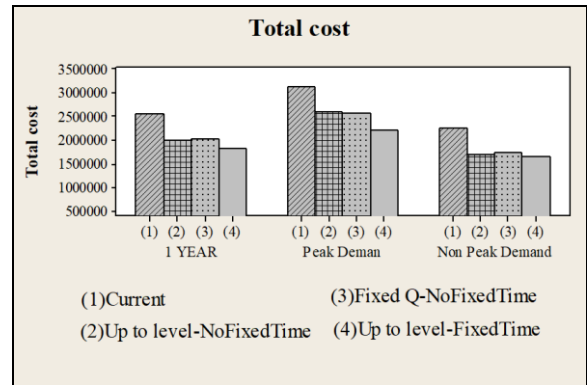
จากรูปที่ 22 ผลการประเมินเปรียบเทียบกันของ 3 ช่วงเวลานโยบายที่ 1 มีค่าใช้จ่ายที่มากที่สุดคือ 759,532.04 บาท และนโยบายที่ 4 มีค่าใช้จ่ายที่น้อยที่สุดคือ 325,986.10 บาท จากรูปที่ 23 ผลการประเมินเปรียบเทียบกันของ 3 ช่วงเวลา นโยบายที่ 4 มีร้อยละของการให้บริการมากที่สุดคือร้อยละ 99.99 และนโยบายที่ 1 มีร้อยละของการให้บริการต่ำที่สุดคือร้อยละ 99.55 จากรูปที่ 24 เมื่อค่าความต้องการโลหิตมีการลดลงขึ้น 25% จะเห็นได้ว่าในช่วงที่มีความต้องการโลหิตสูงนโยบายที่ 2 และนโยบายที่ 4 มีค่าเท่ากัน นโยบายที่ 3 จะมีค่าคาดหวังค่าใช้จ่ายรวมที่ต่ำที่สุดแต่มีร้อยละของการให้บริการต่ำกว่านโยบายที่ 2 และ 4 และในช่วงที่มีการใช้งานต่ำจะเห็นว่านโยบายที่ 2 และ 4 มีค่าใกล้เคียงกัน แต่เมื่อมองในภาพรวมแล้ว นโยบายที่ 4 จะมีร้อยละการให้บริการที่สูงและค่าคาดหวังค่าคาดหวังที่น้อยที่สุด

4.3 การประเมินนโยบายการสั่งโลหิตเมื่อค่าการจัดเก็บมีการเปลี่ยนแปลง

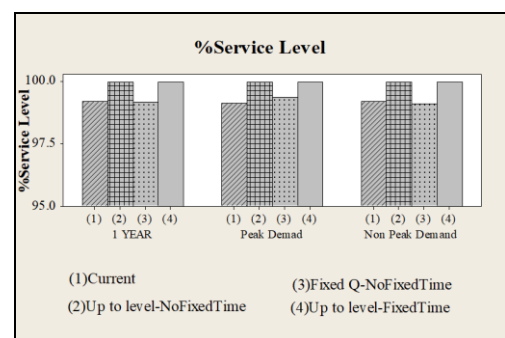
งานวิจัยนี้ศึกษาและพัฒนานโยบายทั้งสิ้น 4 นโยบายด้วยกัน ตามที่ระบุไว้ในวิธีดำเนินการวิจัย ทั้งนี้เพื่อให้สามารถประเมินผลได้จากชัดเจนและใกล้เคียงค่าที่ดีที่สุด จึงต้องทำการศึกษาในกรณีที่ค่าการจัดเก็บมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นและลดลง ซึ่งได้ประเมินว่าค่าการเปลี่ยนแปลงที่เป็นไปได้อยู่ที่ค่าประมาณ $\pm 10\%$

4.3.1 ผลการประเมินนโยบายการสั่งโลหิตเมื่อค่าการจัดเก็บมีการเปลี่ยนแปลงโรงพยาบาลมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

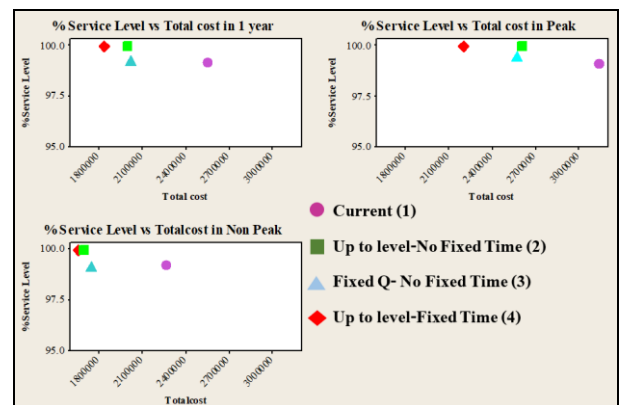
เมื่อค่าการจัดเก็บมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น 10% โดยจะทำการประเมินแบ่งเป็น 3 กลุ่ม คือ ผลการประเมินที่เกิดจากความต้องการรวมทั้งปี, ผลการประเมินในช่วงที่มีความต้องการโลหิตสูงและผลการประเมินในช่วงที่มีความต้องการโลหิตต่ำ จากรูปที่ 25 ผลการประเมินเปรียบเทียบกันของ 3 ช่วงเวลานโยบายที่ 1 มีค่าใช้จ่ายที่มากที่สุดคือ 2,549,327.67 บาท และนโยบายที่ 4 มีค่าใช้จ่ายที่น้อยที่สุดคือ 1,838,512.90 บาท จากรูปที่ 26 ผลการประเมินเปรียบเทียบกันของ 3 ช่วงเวลานโยบายที่ 4 มีร้อยละของการให้บริการมากที่สุดคือร้อยละ 99.98 และนโยบายที่ 1 มีร้อยละของการให้บริการต่ำที่สุดคือร้อยละ 99.19



รูปที่ 24 ค่าคาดหวังค่าใช้จ่ายรวมเมื่อค่าการจัดเก็บมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น 10%



รูปที่ 25 ร้อยละของการให้บริการเมื่อค่าการจัดเก็บมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น 10%



รูปที่ 26 ร้อยละของการให้บริการเทียบกับค่าคาดหวังค่าใช้จ่ายรวมของทั้งสามช่วงเวลาเมื่อค่าจัดเก็บมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น 10%

จากรูปที่ 26 เมื่อค่าการจัดเก็บมีการเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้น 10% จะเห็นได้ว่าในช่วงที่มีความต้องการโลหิตสูง นโยบายที่ 4 มีค่าที่ดีที่สุด และในช่วงที่มีการใช้งานต่ำจะเห็นว่านโยบาย ที่ 2 และ 4 มีใกล้เคียงกัน แต่เมื่อมองในภาพรวมแล้ว นโยบายที่ 4 จะมีร้อยละการให้บริการที่สูงและค่าใช้จ่ายรวมที่น้อยที่สุด

ตารางที่ 3 แสดงค่าคาดหวังค่าใช้จ่ายรวมทั้งปีแยกตามประเภทค่าใช้จ่ายของโรงพยาบาลมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

กรณี	นโยบาย	ค่าใช้จ่าย(บาท)					
		โลหิต	เครื่องจักร	ค่าขนส่ง	โลหิตขาด	จัดเก็บ	โลหิตหมดอายุ
ความต้องการ โลหิตปกติ	Current (1)	986,309	803,137	2,896	320,333	427,680	5,515
	Up to level-NoFixedTime (2)	757,344	616,694	2,224	12,333	451,000	4,233
	Fixed Q-NoFixedTime (3)	592,780	482,693	1,740	315,232	472,120	3,307
	Up to level-FixedTime (4)	785,329	639,482	2,306	8,833	395,120	4,401
ความต้องการ โลหิต เพิ่มขึ้น	Current (1)	1,149,742	936,218	2,728	328,333	534,160	6,428
	Up to level-NoFixedTime (2)	914,484	744,651	2,170	16,750	557,040	5,111
	Fixed Q-NoFixedTime (3)	749,869	610,608	1,779	319,648	578,160	4,185
	Up to level-FixedTime (4)	949,761	773,377	2,253	9,750	487,520	5,323
ความต้องการ โลหิต ลดลง	Current (1)	629,185	512,337	2,492	229,500	534,160	3,467
	Up to level-NoFixedTime (2)	470,672	383,261	1,864	19,500	557,040	2,591
	Fixed Q-NoFixedTime (3)	306,192	249,328	1,213	322,398	578,160	1,682
	Up to level-FixedTime (4)	499,146	406,447	1,977	5,500	487,520	2,761
ค่าจัดเก็บ เพิ่มขึ้น	Current (1)	964,743	785,576	2,833	320,333	470,448	5,394
	Up to level-NoFixedTime (2)	813,405	662,344	2,388	12,446	501,424	4,545
	Fixed Q-NoFixedTime (3)	647,682	527,398	1,902	315,345	524,656	3,613
	Up to level-FixedTime (4)	762,401	620,812	2,238	8,833	439,956	4,272
ค่าจัดเก็บ ลดลง	Current (1)	1,011,232	823,432	2,969	320,333	384,912	5,654
	Up to level-NoFixedTime (2)	863,420	703,070	2,535	12,446	410,256	4,824
	Fixed Q-NoFixedTime (3)	700,015	570,012	2,055	315,345	429,264	3,905
	Up to level-FixedTime (4)	805,849	656,191	2,366	8,833	359,964	4,515

5. สรุปผลการดำเนินงาน

สรุปผลการวิจัยของการจัดการคลังโลหิตของโรงพยาบาลมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารีมีวัตถุประสงค์เพื่อให้สามารถกำหนดนโยบายการสั่งซื้อโลหิต (หน่วย) ในแต่ละช่วงเวลาและปริมาณระดับพัสดุคลังโลหิตสำรองที่เหมาะสมโดยวิธีการทาบูลี่รีช พบว่านโยบายการสั่งซื้อแบบกำหนดระดับของพัสดุดังกล่าวและเวลาคงที่โดยวิธีการทาบูลี่รีช (TS-Up to level-Fixed time policy) ทำให้ได้ค่าคาดหวังค่าใช้จ่ายรวมน้อยที่สุด และมีร้อยละของการให้บริการสูงที่สุด ซึ่งแต่ละนโยบายมีเงื่อนไขที่จะต้องมีการเลือกใช้โลหิตที่มีอายุเหลือน้อยที่สุดก่อน และจะต้องจัดสรรโลหิตให้กับผู้ป่วยฉุกเฉินก่อนเป็นกรณีแรก ผลการประเมินเปรียบเทียบร้อยละของการให้บริการ และค่าคาดหวังค่าใช้จ่ายรวมที่เกิดขึ้น โดยทำการแยกพิจารณา ดังนี้

(1) การประเมินนโยบายการสั่งซื้อโลหิตเมื่อความต้องการโลหิตมีการเปลี่ยนแปลง พบว่าเมื่อค่าความต้องการโลหิตไม่มีการเปลี่ยนแปลง นโยบายที่ดีที่สุดคือนโยบายนโยบายการสั่งซื้อแบบกำหนดระดับของพัสดุดังกล่าวและเวลาคงที่โดยวิธีการทาบูลี่รีช (TS-Up to level- Fixed time policy) และเมื่อค่า

ความต้องการโลหิตมีการเปลี่ยนแปลงที่เพิ่มขึ้นหรือลดลงก็ไม่ส่งผลต่อนโยบายที่ดีที่สุด

(2) ผลการประเมินเปรียบเทียบร้อยละของการให้บริการ และค่าคาดหวังค่าใช้จ่ายรวมที่เกิดขึ้น โดยทำการแยกพิจารณาเป็น 2 กรณี คือ พิจารณาในช่วงที่มีความต้องการสูงและช่วงที่มีความต้องการต่ำ พบว่า ในช่วงที่มีความต้องการสูง นโยบายการสั่งซื้อแบบกำหนดระดับของพัสดุดังกล่าวและเวลาแปรผันโดยใช้วิธีการทาบูลี่รีช (TS-Up to level-No Fixed time policy) และนโยบายการสั่งซื้อแบบกำหนดระดับของพัสดุดังกล่าวและเวลาคงที่โดยวิธีการทาบูลี่รีช (TS-Up to level-Fixed time policy) มีค่าที่ใกล้เคียงกัน และในช่วงที่มีความต้องการต่ำ นโยบายการสั่งซื้อแบบกำหนดระดับของพัสดุดังกล่าวและเวลาคงที่โดยวิธีการทาบูลี่รีช (TS-Up to level-Fixed time policy) เป็นนโยบายที่มีแนวโน้มดีที่สุด สาเหตุที่นโยบายการสั่งซื้อแบบกำหนดระดับของพัสดุดังกล่าวและเวลาแปรผันโดยใช้วิธีการทาบูลี่รีช (TS-Up to level-No Fixed time policy) และนโยบายการสั่งซื้อแบบกำหนดระดับของพัสดุดังกล่าวและเวลาคงที่โดยวิธีการทาบูลี่รีช (TS-Up to level- Fixed time policy) มีค่าที่ใกล้เคียงกันสืบเนื่องมาจาก

นโยบายของทั้งมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน กล่าวคือ นโยบายการสั่งซื้อแบบกำหนดระดับของพัสดุคงคลังและเวลาแปรผันโดยใช้วิธีการทาบูเสิร์ช (TS-Up to level-No Fixed time policy) และนโยบายการสั่งซื้อแบบกำหนดระดับของพัสดุคงคลังและเวลาคงที่โดยวิธีการทาบูเสิร์ช (TS-Up to level- Fixed time policy) จะทำการสั่งซื้อสินค้ามาเติมคลังจนถึงระดับสูงสุดแตกต่างกันตรงที่นโยบายการสั่งซื้อแบบกำหนดระดับของพัสดุคงคลังและเวลาแปรผันโดยใช้วิธีการทาบูเสิร์ช (TS-Up to level-No Fixed time policy) จะทำการสั่งซื้อเมื่อระดับโลहितในคลังลดถึงค่าที่กำหนด แต่นโยบายการสั่งซื้อแบบกำหนดระดับของพัสดุคงคลังและเวลาคงที่โดยวิธีการทาบูเสิร์ช (TS-Up to level- Fixed time policy) จะทำการสั่งซื้อทุกสัปดาห์ และจากสาเหตุนี้จึงทำให้นโยบายการสั่งซื้อแบบกำหนดระดับของพัสดุคงคลังและเวลาแปรผันโดยใช้วิธีการทาบูเสิร์ช (TS-Up to level-No Fixed time policy) มีร้อยละของการให้บริการน้อยกว่า นโยบายการสั่งซื้อแบบกำหนดระดับของพัสดุคงคลังและเวลาคงที่โดยวิธีการทาบูเสิร์ช (TS-Up to level- Fixed time policy) จึงส่งผลให้นโยบายการสั่งซื้อแบบกำหนดระดับของพัสดุคงคลังและเวลาคงที่โดยวิธีการทาบูเสิร์ช (TS-Up to level- Fixed time policy) เป็นนโยบายที่เหมาะสมกับการใช้เป็นนโยบายในการจัดการพัสดุคงคลังโลหิต

การประยุกต์ผลงานวิจัย นโยบายที่ได้ทำการวิเคราะห์ออกมานั้น ทางผู้วิจัยได้ทำการสร้างโปรแกรมสำเร็จรูปขึ้นมาเพื่อให้ทางโรงพยาบาลสามารถนำไปใช้งานตามการใช้งานของแต่ละโรงพยาบาล ซึ่งในตัวโปรแกรมยังสามารถตรวจสอบสมมติฐานของระบบได้อีกด้วย

รูปที่ 27 แสดงผลลัพธ์การวางแผนส่งวัสดุ เมื่อมีการรันโปรแกรมเสร็จสิ้น

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนโครงการวิจัย โครงการสนับสนุนทุนนักวิจัยใหม่ วท. ประจำปี 2560 ศูนย์ประสานงานนักเรียนทุนรัฐบาลทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) ภายใต้ชื่อโครงการ แบบจำลองการจัดการระบบพัสดุคงคลังสำหรับพัสดุโลหิต (An Inventory Management Model for Blood Inventory) รหัสโครงการ FDA-CO-2561-5670-TH และได้รับการสนับสนุนในด้านสถานที่ดำเนินงานวิจัยและอุปกรณ์เครื่องมือต่างๆ จากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี ขอขอบคุณโรงพยาบาลมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี แผนกห้องปฏิบัติการทางการแพทย์ ที่ให้การสนับสนุนข้อมูลวิธีการดำเนินงาน ข้อมูลความต้องการโลหิตและข้อมูลสำคัญอื่นๆ

7. เอกสารอ้างอิง

- Chazan, D., & Gal, S. (1977). A markovian model for a perishable product inventory. *Management science*, 23(5), 512-521.
- Cohen, M. A. (1976). Analysis of single critical number ordering policies for perishable inventory. *Operations research*, 24(4), 726-741.
- Diabat, A., Abdallah, T., & Le, T. (2016). A hybrid tabu search based heuristic for the periodic distribution inventory problem with perishable goods. *Annals of Operations Research*, 242(2), 373-398. <https://doi.org/10.1007/s10479-014-1640-4>
- Haijema, R., van der Wal, J., & van Dijk, N. M. (2007). Blood platelet production: Optimization by dynamic programming and simulation. *Computers and operations research*, 34(3), 760-779.
- Kouki, C., Sahin, E., Jemai, Z., & Dallery, Y. (2010, May 10-12). *Periodic review inventory policy for perishables with random lifetime* [Conference presentation]. 8th International conference of modeling and simulation, Hammamet, Tunisia. <https://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/download?doi=10.1.1.167.965&rep=rep1&type=pdf>

- Minner, S., & Transchel, S. (2010). Periodic review inventory- control for perishable products under service-level constraints. *OR Spectrum*, 32(4), 979-996.
- Nahmias, S. (1975). Ordering policies for perishable inventory II. *Operations research*, 23(4), 735-749.
- Nahmias, S. (1977). On ordering perishable inventory when both demand and lifetime are random. *Management science*, 24(1), 82-90.
- Nahmias, S., & Schmidt, C.P. (1986). An application of the theory of weak convergence to the dynamic perishable inventory. *Mathematics of operations research*, 11(1), 62-69.
- Pierskalla, W. P. (1972). Optimal issuing policies for perishable inventory. *Management science*, 18(11), 603-614.
- Puranam, K., Novak, D. C., Lucas, M. T., & Fung, M. (2017). Managing blood inventory with multiple independent sources of supply. *European Journal of Operational Research*. Elsevier, 259(2), 500-511.
- Williams, C. L., & Patuwo, B. E. (1999). A perishable inventory model with positive order lead times. *European journal of operational research*, 116(2), 352-373.

- Yates, N., Stanger, S., Wilding, R., & Cotton, S. (2017). Approaches to assessing and minimizing blood wastage in the hospital and blood supply chain. *ISBT Science Series*, 12(1), 91-98.

8. ประวัติผู้วิจัย

นางสาวสุรัสวดี นัยนารณ



ปริญญาโท: วิศวกรรมศาสตร
มหาบัณฑิต (วิศวกรรมเครื่องกลและ
ระบบกระบวนการ)



ผศ.ดร.กัญชลา สุดตาชาติ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร., สาขา
วิศวกรรมการผลิต, สำนักวิชา
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัย
เทคโนโลยีสุรนารี

ปริญญาเอก: Doctor of Philosophy
(Ph.D.), Industrial Engineering,
Clemson University, USA

การศึกษาพารามิเตอร์ของความลาดดินที่เพิ่มเสถียรภาพด้วยถุงจีโอเทกซ์ไธล์บรรจุทราย
โดยอาศัยการทบทวนวรรณกรรมและการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์
The Parametric Study of Soil Slope Stabilized with Geotextile Sand Container
Based on Review Works and Finite Element Analysis

จิตินันต์ พรหมรินทร์^{1,*}, พีรพงศ์ จิตเสงี่ยม², และ ธวัชชัย ตันชัยสวัสดิ์³
Jitinun Prommarin^{1,*}, Peerapong Jitsangiam², and Tawatchai Tanchaisawat³

^{1,2,3}ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
^{1,2,3}Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University
*Corresponding author e-mail: jitinun_pr@cmu.ac.th

(Received: September 30, 2020, Revised: November 12, 2020, Accepted: November 17, 2020)

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีเป้าประสงค์ในการประเมินอิทธิพลของลักษณะถุงจีโอเทกซ์ไธล์บรรจุทรายที่มีผลต่อความเค้นกดและแรงยึดเหนี่ยวปรากฏ เพื่อนำไปใช้ในการเพิ่มเสถียรภาพความลาด โดยการประเมินนี้ได้ใช้ความสัมพันธ์อย่างง่ายตามสมการความสัมพันธ์ของ Matsuoka et al. (2000) โดยผลที่ได้จากการคำนวณเป็นค่ากำลังรับแรงกดและค่าแรงยึดเหนี่ยวปรากฏที่เกิดขึ้นจากการรับแรงดึงของจีโอเทกซ์ไธล์ ซึ่งมีปัจจัยจากกำลังดึงของจีโอเทกซ์ไธล์ (ตามชนิดและความหนาของจีโอเทกซ์ไธล์), ค่ามุมเสียดทานภายในของวัสดุบรรจุ (ตามชนิดวัสดุ, กำลัง, และความหนาแน่น), ความสูงและความกว้างของถุงเดี่ยวเริ่มต้น ผลการศึกษาพบว่า การเพิ่มขึ้นของกำลังรับแรงดึงของจีโอเทกซ์ไธล์และค่ามุมเสียดทานภายในของวัสดุบรรจุ ทำให้กำลังรับแรงกดและค่าแรงยึดเหนี่ยวปรากฏสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด เช่นเดียวกับการลดความสูงของถุงเดี่ยวลงทำให้กำลังรับแรงกดสูงขึ้นอย่างมาก แต่ในการเพิ่มความกว้างของถุงเดี่ยวกลับสามารถเพิ่มกำลังรับแรงกดได้เพียงเล็กน้อย ส่วนการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินจากการประยุกต์ใช้งานถุงจีโอเทกซ์ไธล์บรรจุทรายด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าถุงบรรจุทรายสามารถพัฒนาเสถียรภาพลาดดินได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยต้องมีการพิจารณาถึงปัจจัยที่มีผลต่อเสถียรภาพประกอบด้วยวิธีการเรียงถุงบรรจุทราย, ความสูงของถุงบรรจุทรายแต่ละชั้น, และความเอียงของระบบกำแพงกันดิน

คำสำคัญ: ถุงจีโอเทกซ์ไธล์บรรจุทราย, กำลังรับแรงกด, แรงยึดเหนี่ยวปรากฏ, ไฟไนต์เอลิเมนต์, เสถียรภาพลาดดิน

Abstract

This study aimed to evaluate influential characteristics of the so-called geotextile sand container (GSC), affecting to an increase of its maximum compressive strength and apparent cohesion for applying slope stability improvement. This evaluation was based upon an established relationship (Matsuoka et al., 2000) between the capacities of geotextile tensile strength and filled sand properties. The influential factors used in this study were geotextile tensile strength depending upon types and thicknesses and the internal friction angle of filled sand depending upon types, strength, and density, and width and depth of GSC. Study results revealed higher geotextile tensile strength, and filled sand internal friction angle, better shear strength of GSC. Besides, a decrease of the geotextile container depth resulted in a significant increase in the GSC strength. However, an increase in the geotextile container width showed a slight increase in the GSC strength. For the slope stability improvement with GSC through the finite element simulation, study results demonstrated that GSC could enhance better slope stability than that of one without GSC. However, the slope stability improvement with GSC

must consider the affecting factors of GSC arrangement patterns on a slope, a depth of a GSC stack layer, and an inclination degree of a slope.

Keywords: Geotextile Sand Container, Compressive Strength, Apparent Cohesion, Finite Element, Slope Stability

1. บทนำ

ถุงจีโอเท็กซ์ไทล์บรรจุดินเป็นองค์ประกอบร่วมกันระหว่างแผ่นใยสังเคราะห์และวัสดุที่ใช้บรรจุภายใน ซึ่งสามารถเป็นกรวด, ดิน, ทราย, หรือวัสดุจากการก่อสร้างและการรื้อทำลาย (Hataf & Sayadi, 2018) โดยถุงจีโอเท็กซ์ไทล์บรรจุทรายถูกใช้กันอย่างแพร่หลายสำหรับการรับมือกับภัยน้ำท่วมหรือคลื่นทะเลมานานหลายทศวรรษ (Akter et al., 2012) และถูกนำมาใช้ในงานทางธรณีเทคนิคเช่น การเสริมเสถียรภาพในฐานรากดินอ่อน (Matsuoka & Liu, 2003) การปรับปรุงปัญหาดินบวมตัว (Xu et al., 2008; Liu et al., 2015; Wang et al., 2015), ชั้นหน่วงสำหรับลดแรงสั่นสะเทือนที่เกิดจากการจราจร (Matsuoka & Liu, 2003; Liu et al., 2014) การเสริมฐานรากของชั้นหินโรยทางรถไฟ (Liu et al., 2017) การติดตั้งเป็นผิวหน้าของกำแพงเสริมกำลังด้วยแผ่นใยสังเคราะห์ (Liu et al., 2017) และการเสริมกำลังกำแพงกันดิน (Xu et al., 2008; Wang et al., 2015; Wen et al., 2016) โดยที่ถุงจีโอเท็กซ์ไทล์บรรจุทรายมีความสามารถในการเพิ่มกำลังรับแรงกด และมีความสะดวกในการก่อสร้างโดยไม่ต้องเครื่องจักรขนาดใหญ่หรือความเชี่ยวชาญของผู้ก่อสร้างมากนัก อีกทั้งยังสามารถใช้วัสดุในท้องถิ่นบรรจุภายในถุงได้ ทำให้เป็นระบบที่มีค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างที่ต่ำและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้ยังสามารถประยุกต์ใช้ได้หลายรูปแบบของการเสริมกำลังดินโดยอิทธิพลที่มีผลต่อเฉพาะเสถียรภาพลาดดินจะอยู่ในรูปแบบการเสียรูปของถุงจีโอเท็กซ์ไทล์และการเคลื่อนตัวจากการเลื่อนไถล (Sliding) หรือการถูกดึงออก (Pullout) และพบว่ามุมเสียดทานของผิวจีโอเท็กซ์ไทล์ที่มาก มีผลทำให้เสถียรภาพในการต้านทานการเลื่อนไถลได้ดีกว่า (Recio & Oumeraci, 2009)

การศึกษาในประเด็นเรื่องพฤติกรรมการรับแรงของถุงจีโอเท็กซ์ไทล์บรรจุทราย โดยทั่วไปของการห่อหุ้มวัสดุชนิดเม็ดด้วยวัสดุที่มีความเหนียวจะแสดงในรูปแบบผสมผสานกันระหว่างแรงยึดเหนี่ยวจากคุณสมบัติความสามารถในการรับแรงดึงของจีโอเท็กซ์ไทล์เมื่อถูกให้รับแรง และแรงขัดกันระหว่างอนุภาคของวัสดุที่บรรจุภายใน (Matsuoka & Liu, 2003) อย่างไรก็ตามยังไม่มีการศึกษาที่เกี่ยวกับอิทธิพลของคุณลักษณะของถุงจีโอ

เท็กซ์ไทล์บรรจุทรายที่มีผลต่อความสามารถในการรับแรงกดของถุงเดี่ยว

ปัจจุบันมีการศึกษาจำนวนมากที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบในภาคสนาม และการทดสอบในห้องปฏิบัติการของถุงจีโอเท็กซ์ไทล์บรรจุดิน แต่การศึกษาเชิงตัวเลขของถุงจีโอเท็กซ์ไทล์บรรจุดินภายใต้สถานการณ์การรับแรงที่แตกต่างกันกลับค่อนข้างมีจำนวนน้อย (Tantono & Bauer, 2008; Ansari et al., 2011; Wu et al., 2020). เนื่องจากความซับซ้อนจากการจำลองรูปทรงเรขาคณิตของถุงจีโอเท็กซ์ไทล์บรรจุดินให้ได้ตรงตามความเป็นจริง บวกกับการให้ข้อจำกัดในการประกอบถุงตามความเป็นจริง อย่างไรก็ตามการวิเคราะห์เชิงตัวเลขสามารถนำไปใช้ตรวจสอบพฤติกรรมของถุงจีโอเท็กซ์ไทล์บรรจุดินที่คาดการณ์ไว้ภายใต้เงื่อนไขการให้น้ำหนักที่ซับซ้อนได้ (Ansari et al., 2011) จากการศึกษาของ Ansari et al. (2011) ได้ทำการวิเคราะห์เชิงตัวเลขด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์สำหรับถุงจีโอเท็กซ์ไทล์บรรจุทรายแบบถุงเดี่ยวภายใต้การรับแรงกดในแนวดิ่ง โดยทำการจำลององค์ประกอบของถุงจีโอเท็กซ์ไทล์บรรจุทรายเป็น 3 ชนิดประกอบด้วย (1) วัสดุทรายภายในที่ถูกจำลองด้วยแบบจำลองวัสดุของมอร์-คูลอมบ์ (2) วัสดุถุงกำหนดใช้แบบจำลองวัสดุแบบยืดหยุ่นเชิงเส้น-พลาสติกสมบูรณ์ และ (3) แผ่นรับแรงกดชนิดแข็งที่เป็นตัวรับแรงกดในแนวดิ่งลงบนถุง และในแต่ละส่วนผิวสัมผัสระหว่างวัสดุถูกจำลองแบ่งออกเป็น 2 ส่วนได้แก่ ส่วนผิวสัมผัสระหว่างวัสดุถุงและดินภายในและส่วนผิวสัมผัสระหว่างถุงและแผ่นกดให้แรง โดยใช้ค่าสัมประสิทธิ์แรงเสียดทานระหว่างวัสดุ โดยผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลขพบว่ากำลังการรับแรงกดของถุงบรรจุทรายโดยรวมสูงขึ้นเมื่อกำลังรับแรงเฉือนของวัสดุภายในถุงและความหนาวัสดุถุงเพิ่มขึ้น

งานวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้ถุงจีโอเท็กซ์ไทล์บรรจุดินในงานเสริมเสถียรภาพแก่ลาดดิน มีการสร้างแบบจำลองทั้งในเชิงกายภาพ (Wen et al., 2016) และเชิงตัวเลข (Wu et al., 2020) โดยพบว่าเมื่ออัตราส่วนความลาดชันเพิ่มขึ้น การวิบัติของลาดดินที่รองรับด้วยถุงจีโอเท็กซ์ไทล์บรรจุด้วยวัสดุเหลือทิ้งจากการก่อสร้าง จะเปลี่ยนจากการเลื่อนวิบัติเป็นการเลื่อนและล้มคว่ำ จากนั้นจะกลายเป็นการล้มคว่ำและไถล และค่าเคลื่อนตัวในแนวราบของกำแพงกันดินที่สร้าง

จากถุงบรรจุดินมีปริมาณน้อยที่ด้านล่างและบนสุดของลาดดิน แต่จะมีปริมาณมากในช่วงกึ่งกลางลาดดิน หรือกล่าวได้ว่า กำแพงกันดินจากระบบการใช้ถุงดินมีโหมดการเสียรูปโดยรวม เป็นแบบยืดหยุ่น (Flexible Mode) อย่างไรก็ตามในปัจจุบันยังขาดแคลนการศึกษาที่เกี่ยวกับอิทธิพลของลักษณะของถุงจีโอเทกซ์ไทล์บรรจุทรายที่ผลต่อเสถียรภาพและการเคลื่อนตัวของลาดดินอย่างแน่ชัด

บทความงานวิจัยนี้จึงต้องการศึกษาอิทธิพลของคุณลักษณะถุงจีโอเทกซ์ไทล์บรรจุทรายโดยแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ประกอบด้วย การศึกษาอิทธิพลของคุณลักษณะถุงบรรจุทรายแบบถุงเดี่ยวที่มีผลต่อกำลังรับแรงกด จากการวิเคราะห์ความสัมพันธ์อย่างง่ายของ Matsuoka et al. (2000) และส่วนที่สองเป็นการศึกษาถึงปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อเสถียรภาพลาดดินจากการเสริมด้วยถุงจีโอเทกซ์ไทล์บรรจุทราย โดยอาศัยการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องและการวิเคราะห์ด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ซึ่งงานวิจัยนี้สามารถเป็นประโยชน์ในการสร้างแนวทางการออกแบบถุงจีโอเทกซ์ไทล์บรรจุทรายสำหรับงานเสริมเสถียรภาพลาดดินอย่างมีประสิทธิภาพต่อไปในอนาคต

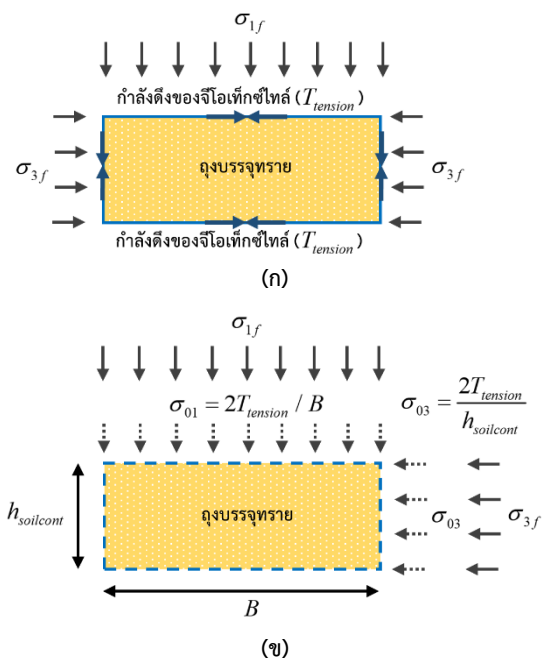
2. พฤติกรรมการรับแรงกดของถุงจีโอเทกซ์ไทล์บรรจุทราย

การท่อน้ำวัสดุชนิดเม็ดด้วยวัสดุถุงจะแสดงคุณลักษณะทั่วไปในรูปแบบผสมผสานกันระหว่างวัสดุที่มีแรงยึดเหนี่ยวและแรงขัดกันระหว่างอนุภาค โดย Matsuoka and Liu (2003) และ Liu et al. (2017) ได้ทำการศึกษาพฤติกรรมเชิงกลของถุงจีโอเทกซ์ไทล์บรรจุทรายถุงเดี่ยวภายใต้การรับแรงกดในแนวตั้ง และได้เสนอในรูปแบบการวิเคราะห์ความสัมพันธ์อย่างง่าย โดยวิธีการที่นำเสนอได้รับการตรวจสอบความถูกต้องผ่านการทดสอบการรับแรงอัดสองแกน (Biaxial Compression Test) และการทดสอบแรงกดแบบไม่จำกัดแรงดันด้านข้าง (Unconfined Compression Test) ซึ่งให้ผลค่ามุมเสียดทานภายในของวัสดุที่ใช้บรรจุเมื่อบรรจุในถุงจีโอเทกซ์ไทล์มีค่าเท่าเดิมกับเมื่อทดสอบวัสดุที่ใช้บรรจุโดยตรง โดยปรากฏเป็นค่าแรงยึดเหนี่ยวขึ้นในการทดสอบ หรือกล่าวได้ว่าค่าแรงยึดเหนี่ยวที่ปรากฏเกิดจากการกระทำของถุงจีโอเทกซ์ไทล์ โดยที่ถุงจีโอเทกซ์ไทล์เป็นวัสดุที่มีคุณสมบัติในการรับแรงดึงเมื่อถูกให้รับแรง

ความสัมพันธ์ของความเค้นตามแนวของถุงจีโอเทกซ์ไทล์บรรจุทรายมีความเกี่ยวข้องกับเสถียรภาพของระบบ จากการศึกษาของ Matsuoka and Liu (2000) และ Liu et al. (2017) ในการทดสอบการรับแรงอัดสองแกนและการทดสอบแรงกดแบบไม่จำกัดแรงดันด้านข้างของถุงจีโอเทกซ์ไทล์บรรจุ

ทราย ได้สรุปเป็นความสัมพันธ์ของความเค้นที่เกิดขึ้นในทรายภายในถุง ดังแสดงในรูปที่ 1

โดยถุงบรรจุทรายในรูป 2 มิติ ที่อยู่ภายใต้ความเค้นหลักคือ σ_{1f} และ σ_{3f} และภายใต้การประยุกต์ใช้ σ_{01} และ σ_{03} ตามที่แสดงในสมการที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ซึ่งความเค้นนี้เกิดจากเส้นรอบวงทั้งหมดของภาชนะที่มักจะเกิดการเสียรูป แบบขยายตัวขึ้นตามกำลังรับแรงดึงของจีโอเทกซ์ไทล์ ($T_{tension}$) และสร้างเป็นความเค้นเพิ่มเติมที่ทำกับอนุภาคทรายที่อยู่ภายในถุง



รูปที่ 1 ความเค้นที่เกิดขึ้น; (ก) บนถุงจีโอเทกซ์ไทล์บรรจุทราย, (ข) ภายในทราย (ปรับปรุงจาก Liu et al., 2017)

$$\sigma_{01} = \frac{2T_{tension}}{B} \quad (1)$$

$$\sigma_{03} = \frac{2T_{tension}}{h_{soilcont}} \quad (2)$$

โดยที่ B และ $h_{soilcont}$ คือ ความกว้างและความสูงของถุงบรรจุทราย ตามลำดับ และ $T_{tension}$ คือ กำลังรับแรงดึงของจีโอเทกซ์ไทล์

ดังนั้นความเค้นที่กระทำต่ออนุภาคทรายภายในถุงจะเป็นผลรวมของความเค้นภายนอกและความเค้นที่เกิดขึ้นจากกำลังรับแรงดึงของจีโอเทกซ์ไทล์ ($T_{tension}$) ภายใต้แรงกระทำ ดัง

แสดงในรูปที่ 1(b) โดยที่สภาวะเกิดการวิบัติ จะมีความสัมพันธ์ดังสมการที่ 3 (Matsuoka et al., 2000)

$$\sigma_{1f} + \frac{2T_{tension}}{B} = K_p \left(\sigma_3 + \frac{2T_{tension}}{h_{soilcont}} \right) \quad (3)$$

โดยที่ ϕ คือ มุมเสียดทานภายในของทรายและ K_p คือสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างแบบแพชชีฟ ดังสมการที่ 4

$$K_p = \frac{1 + \sin \phi}{1 - \sin \phi} \quad (4)$$

จากการเปรียบเทียบสมการที่ 3 กับการแสดงกำลังสำหรับวัสดุที่มีความเหนียว และค่ามุมเสียดทานภายใน ได้เป็นสมการเพื่ออธิบายแรงยึดเหนี่ยวปรากฏ (Apparent Cohesion, c) ของทรายเนื่องจากกำลังรับแรงดึงของวัสดุที่รับได้สรุปเป็นความสัมพันธ์ดังสมการที่ 5

$$c = \frac{T_{tension}}{B\sqrt{K_p}} \left(\frac{B}{h_{soilcont}} K_p - 1 \right)$$

โดยความสัมพันธ์เหล่านี้มีการใช้สมมติฐานอย่างง่ายในการพิจารณาในการวิเคราะห์ สมมติฐานเหล่านี้ประกอบด้วย วัสดุที่ใช้บรรจุไม่มีแรงยึดเหนี่ยวระหว่างมวลดินและไม่มีน้ำหนักระหว่างดินและถุงเป็นแบบไม่มีแรงเสียดทาน, และความหนาของถุงไม่มีการเปลี่ยนแปลงเนื่องจากการเสียรูป นอกจากนี้ยังใช้สมมติฐานการวิเคราะห์อื่น ๆ ตัวอย่างเช่น อัตราส่วนความเค้นหลักของดินจะถือว่าเป็นไปตามฟังก์ชันเอกซ์โพเนนเชียล

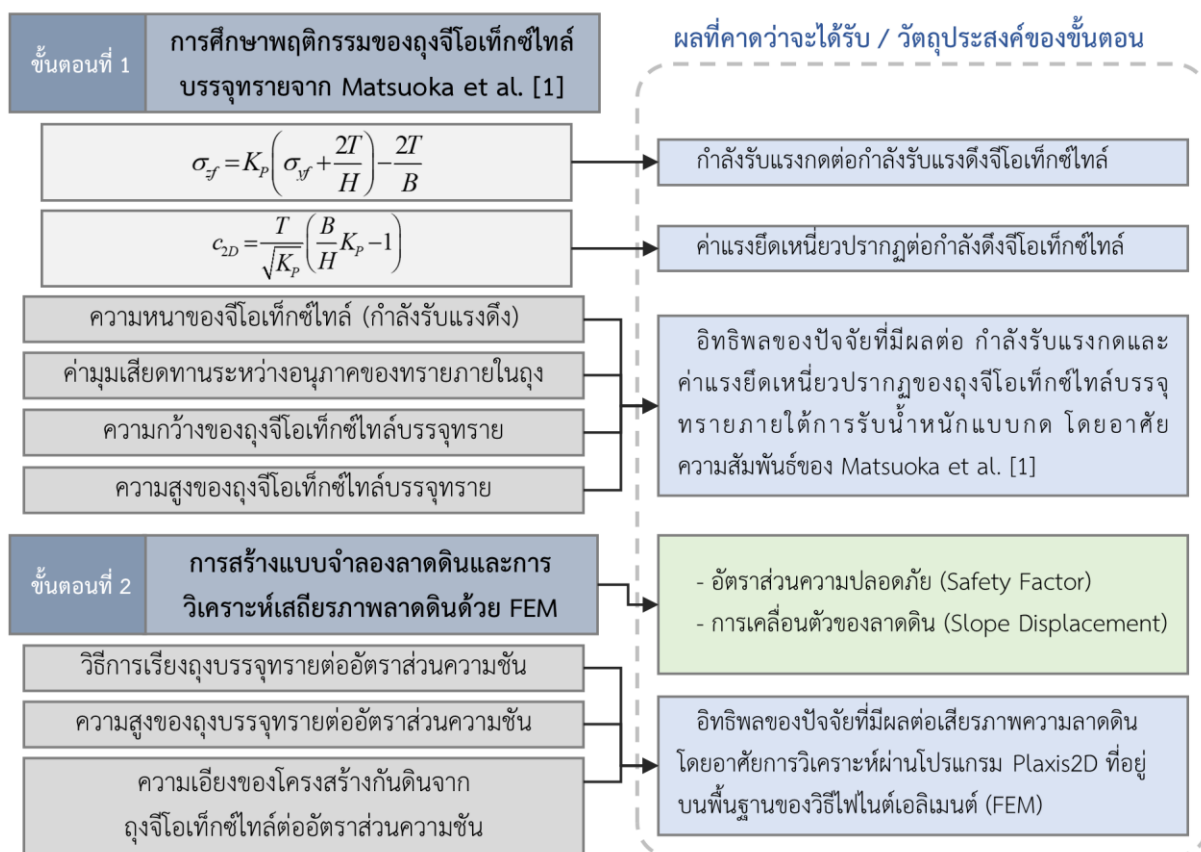
(Exponential Function) และความเครียดเชิงปริมาตรของถุงถูกละเลย (โดยจะขึ้นอยู่กับผลการทดสอบ) (Liu et al., 2017)

3. วิธีการดำเนินงาน

งานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 2 ส่วนหลัก ได้แก่ การกำหนดแบบจำลองถุงจีโอเทกซ์ไทล์บรรจุทรายและการวิเคราะห์กำลังรับแรงกดของถุงเดี่ยวด้วยความสัมพันธ์อย่างง่ายของ Matsuoka et al. (2000) และการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ ดังแสดงแผนการดำเนินงานวิจัยใน 0

ขั้นตอนแรกเป็นการศึกษาอิทธิพลที่มีผลกำลังการรับแรงกดของถุงจีโอเทกซ์ไทล์บรรจุทรายถุงเดี่ยวจากการรับน้ำหนักแบบกด โดยอาศัยความสัมพันธ์ระหว่างคุณลักษณะของถุงบรรจุทรายภายใต้การรับแรงกดของ Matsuoka et al. (2000) ในการคาดการณ์กำลังรับแรงกด ภายใต้อิทธิพลของการเปลี่ยนแปลงค่ามุมเสียดทานระหว่างอนุภาคของทรายภายในถุง, ความหนาของจีโอเทกซ์ไทล์, และความสูงของถุงบรรจุทราย

ขั้นตอนที่ 2 เป็นการสร้างแบบจำลองลาดดินจากการประยุกต์ใช้ถุงจีโอเทกซ์ไทล์บรรจุทรายในการเสริมเสถียรภาพลาดดิน บนพื้นฐานของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ โดยใช้โปรแกรม Plaxis2D ในการสร้างแบบจำลองลาดดินและการวิเคราะห์อัตราส่วนความปลอดภัย (Safety Factor) โดยเป็นการศึกษาอิทธิพลของวิธีการเรียงถุงบรรจุทรายต่ออัตราส่วนความชัน, ความสูงของถุงบรรจุทรายต่ออัตราส่วนความชัน, และความเอียงของโครงสร้างกันดินจากถุงจีโอเทกซ์ไทล์ต่ออัตราส่วนความชัน ที่จะมีผลต่อเสถียรภาพลาดดินโดยรวม โดยการกำหนดพารามิเตอร์ค่าแรงยึดเหนี่ยวปรากฏในการแสดงคุณสมบัติของถุงจีโอเทกซ์ไทล์จากสมการความสัมพันธ์ความสามารถในการรับแรงของถุงบรรจุทรายภายใต้การรับแรงกดของ Matsuoka et al. (2000) จากขั้นตอนที่ 1



รูปที่ 2 แผนการดำเนินงานวิจัยและผลที่คาดว่าจะได้รับ

ส่วนที่ 1: อิทธิพลที่มีผลต่อกำลังรับแรงกดของถุงเดี่ยว

ส่วนนี้เป็นการศึกษาอิทธิพลที่มีผลต่อกำลังรับแรงกดของถุงเดี่ยว ประกอบไปด้วยการกำหนดแบบจำลองถุงจีโอเทกซ์ไทล์บรรจุทรายต้นแบบ, การวิเคราะห์กำลังการรับแรงกดของถุงเดี่ยวด้วยความสัมพันธ์ของ Matsuoka et al. (2000) และผลการวิเคราะห์ด้วยความสัมพันธ์อย่างง่าย ดังแสดงรายละเอียดต่อไปนี้

3.1 การกำหนดแบบจำลองถุงจีโอเทกซ์ไทล์บรรจุทรายต้นแบบ

การกำหนดแบบจำลองของถุงจีโอเทกซ์ไทล์บรรจุทรายประกอบด้วย รูปทรง, ขนาด, และวัสดุ โดยที่รูปทรงถุงจีโอเทกซ์ไทล์บรรจุทรายในงานวิจัยนี้ ถูกกำหนดให้มีลักษณะเป็นทรงสี่เหลี่ยมมุมฉากเพื่อให้ง่ายต่อการสร้างแบบจำลองและให้เป็นไปตามสมมติฐานความสัมพันธ์อย่างง่ายของ Matsuoka et al. (2000) โดยขนาดความกว้างและความสูงของถุงจีโอเทกซ์ไทล์ต้นแบบถูกกำหนดเท่ากับ 1.00 ม. แบบจำลองต้นแบบกำหนดให้ใช้จีโอเทกซ์ไทล์ชนิดไม่ถักทอขึ้นรูปด้วยการปักทะลุด้วยเข็ม (Needle-Punched Non-Woven Geotextile)

โดยคุณสมบัติด้านกำลังหรือกำลังรับแรงดึงของวัสดุจะขึ้นอยู่กับความหนาของแผ่นจีโอเทกซ์ไทล์ ส่วนวัสดุบรรจุภายในถุงกำหนดใช้ทรายแห้งซึ่งมีค่ามุมเสียดทานภายในระหว่างอนุภาคเป็นคุณสมบัติด้านกำลัง ซึ่งโดยหลักจะขึ้นอยู่กับขนาดมวลรวมคละและความหนาแน่นของทราย ซึ่งค่านี้จะมีผลต่อค่าสัมประสิทธิ์แรงดันดินด้านข้างในสภาวะแพชซีฟ ของ Rankine (Rankine's Passive Lateral Earth Pressure Coefficient)

3.2 การวิเคราะห์กำลังการรับแรงกดของถุงเดี่ยวด้วยความสัมพันธ์ของ Matsuoka et al. (2000)

การคาดการณ์กำลังรับแรงกดของถุงบรรจุทรายจากความสัมพันธ์ของ Matsuoka et al. (2000) ดังสมการที่ 1 ถึงสมการที่ 5 ต้องการอินพุตพารามิเตอร์ในการคำนวณได้แก่ กำลังรับแรงดึงของจีโอเทกซ์ไทล์, $T_{tension}$, ความกว้าง (B) และความสูง ($h_{soilcont}$) ของถุงบรรจุทราย, และค่ามุมเสียดทานภายในระหว่างอนุภาค (ϕ) ของทรายที่ใช้บรรจุภายในถุง

ตารางที่ 1 ค่าอินพุตพารามิเตอร์ของถุงจีโอเทกซ์ไทล์บรรจุทรายในการคำนวณความสัมพันธ์ของ (Matsuoka et al., 2000)

Bag	Initial Value	Value	Unit
Tensile Strength of Geotextile	0.00 – 30.00	0.00 – 30.00	kN/m
Width of Container	1.00	1.00 – 0.25	m
Height of Container	1.00	1.00 – 2.00	m
Fill Material	Dry sand	Dry sand	
Friction Angle of Fill Sand	35.0	20.0 – 40.0	Degree

การกำหนดช่วงของค่าอินพุตพารามิเตอร์ในการคำนวณความสัมพันธ์ถูกแบ่งออกตามกรณีศึกษาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการรับแรงของถุงบรรจุทราย (กำลังรับแรงเฉือนของทราย, ความกว้างของถุง, และความสูงของถุง) โดยในการคำนวณอิทธิพลกรณีใด ๆ ที่นอกเหนือจากอิทธิพลที่ต้องการศึกษาจะถูกกำหนดให้ใช้ค่าเริ่มต้น และสำหรับปัจจัยที่จะทำการศึกษากำหนดให้ใช้ค่าเริ่มต้นตามที่กำหนดไว้ตามที่ได้แสดงใน 0

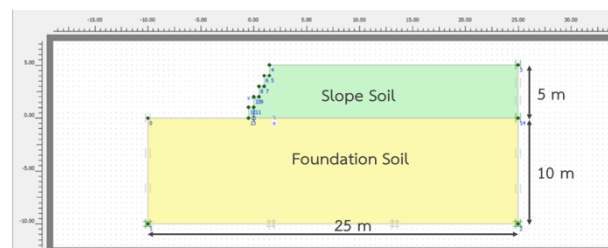
ส่วนที่ 2: เสถียรภาพลาดดินด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

การจำลองเสถียรภาพลาดดินโดยการประยุกต์ใช้ถุงจีโอเทกซ์ไทล์บรรจุทราย โดยการใช้โปรแกรมวิเคราะห์เสถียรภาพ Plaxis2D ซึ่งอยู่บนพื้นฐานของการวิเคราะห์วิธีไฟไนต์เอลิเมนต์เพื่อหาอัตราส่วนความปลอดภัย, การเคลื่อนตัวของลาดดิน, และอื่น ๆ โดยเป็นการวิเคราะห์ที่เชิงเปรียบเทียบในกรณีที่มีและไม่มี การปรับปรุงเสถียรภาพความลาดด้วยถุงบรรจุทราย จากนั้นจะเป็นการวิเคราะห์กรณีที่มีผลต่อเสถียรภาพลาดดินจากการใช้ถุงบรรจุทราย ประกอบด้วยวิธีในการเรียงถุงบรรจุทรายต่ออัตราส่วนความลาดชัน, ความสูงของถุงบรรจุทรายในแต่ละชั้นต่ออัตราส่วนความลาดชัน, และความเอียงของระบบกำแพงกันดินต่ออัตราส่วนความลาดชัน

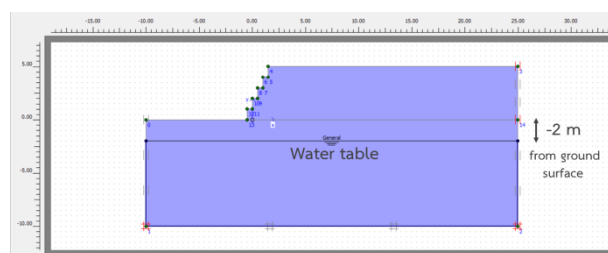
3.3 แบบจำลองลาดดินเดิมสำหรับการวิเคราะห์โปรแกรม

แบบจำลองลาดดินของทุกกรณีที่ทำการศึกษาวิเคราะห์เสถียรภาพถูกกำหนดการตั้งค่าง่อนการวิเคราะห์สำหรับโปรแกรม Plaxis2D โดยการวิเคราะห์แบบจำลองในแนวระนาบการเฉือน (Plane Strain) และใช้จำนวนโนดของเอลิเมนต์เท่ากับ 15 โหนด สำหรับทุกกรณีกำหนดให้รูปร่างและขนาดแบบจำลองลาดดินเดิมที่ใช้ และระดับน้ำใต้ดินที่ตำแหน่ง -2.00 เมตรจากระดับพื้นผิวดิน ดังแสดงตัวอย่างในรูปที่ 3 และรูปที่ 4 ตามลำดับ คุณสมบัติของดินฐานรากและลาดดินกำหนดใช้ข้อมูลคุณสมบัติดินโดยทั่วไป ดังแสดงใน 0

ในขั้นตอนการคำนวณเสถียรภาพของลาดดินในโปรแกรม Plaxis2D มีขั้นตอนการคำนวณ 2 เฟส ประกอบด้วย เฟสที่ 1 เป็นการวิเคราะห์ตามขั้นตอนการก่อสร้าง (Stage Construction) โดยกำหนดให้ลาดดินที่ใช้เป็นลาดดินตามธรรมชาติ และในกรณีที่มิระบบเสริมด้วยกำแพงกันดินจะวิเคราะห์ที่ระยะที่การก่อสร้างกำแพงกันดินนั้นแล้วเสร็จ และเฟสที่ 2 เป็นการคำนวณหาอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดดิน โดยวิธีการลดกำลังวัสดุ (c/phi Reduction) ผลจากการวิเคราะห์ที่ถูกนำเสนอในบทความนี้ ประกอบไปด้วย ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยและค่าการเคลื่อนตัวของลาดดิน



รูปที่ 3 แบบจำลองลาดดินในการวิเคราะห์โปรแกรม



รูปที่ 4 แบบจำลองเส้นระดับน้ำใต้ดินในการวิเคราะห์โปรแกรม

3.4 อิทธิพลของวิธีการเรียงถุงจีโอเทกซ์ไทล์บรรจุทรายต่ออัตราส่วนความชัน

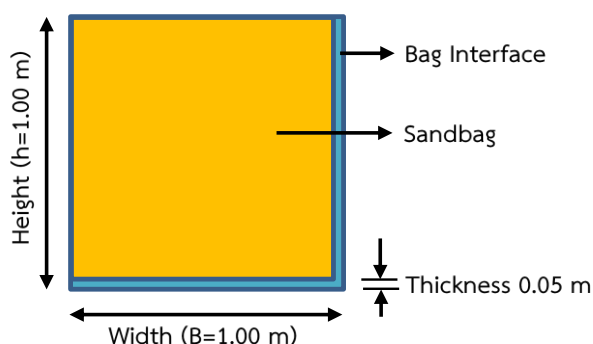
ส่วนนี้เป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพของการใช้และไม่ใช้งานถุงบรรจุทรายในการเสริมเสถียรภาพ และการเปรียบเทียบในกรณีของวิธีการเรียงถุงบรรจุทรายที่ใช้ต่อการเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชัน

ตารางที่ 2 ค่าอินพุตพารามิเตอร์ของวัสดุลาดดินเดิมในการวิเคราะห์เสถียรภาพ

Detail	Unit	Foundation Soil	Slope Soil
Material model	-	Mohr's-Coulomb model	Mohr's-Coulomb model
Material type	-	Drained condition	Drained condition
Interfaces	-	Strength – Rigid	Strength – Rigid
Depth of soil	m	0.00 – -10.00	5.00 – 0.00
Unsaturated Unit weight	kN/m ³	17.0	17.0
Saturated Unit weight	kN/m ³	21.0	20.0
Permeability	m/day	0.500	1.000
Elastic modulus	kN/m ²	120,000	40,000
Poisson's ratio	-	0.30	0.30
Cohesion	kN/m ²	50.00	5.00
Friction Angle	Degree	35.00	30.00
Dilation Angle	Degree	5.00	0.00

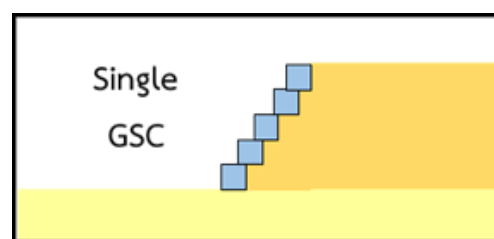
ในการจำลองลาดดินใช้ข้อมูลพารามิเตอร์ตามแสดงใน 0 และในการจำลองถุงจีโอเทกซ์ไทล์บรรจุทราย ใช้อินพุตพารามิเตอร์ที่ได้จากการคำนวณความสัมพันธ์อัตราค่าแรงยึดเหนี่ยวปรากฏบนทรายที่บรรจุในถุงของ Matsuoka et al. (2000) ซึ่งเป็นผลที่คำนวณได้ตามสมการที่ 5 ตามที่ได้อธิบายไว้ในหัวข้อที่ 3.2 โดยกำหนดให้กำลังดึงของจีโอเทกซ์ไทล์เท่ากับ 30 kN/m ในการสร้างแบบจำลองกำหนดให้แบ่งคุณสมบัติของถุงบรรจุทรายออกเป็น 2 ส่วน ประกอบด้วย ถุงบรรจุทราย และส่วนผิวสัมผัสระหว่างวัสดุถุงแต่ละชั้น ดังแสดงภาพกราฟฟิกในรูปที่ 5 และแสดงรายละเอียดของอินพุตพารามิเตอร์โปรแกรมใน 0

การวิเคราะห์แบบจำลองตามกรณีของวิธีการเรียงถุงบรรจุทรายถูกกำหนดไว้ 3 กรณี ประกอบด้วย การเรียงแถวเดี่ยว (Single GSC Arrangement), การเรียงเป็นสองแถว (Double GSC Arrangement), การเรียงเป็นรูปสามเหลี่ยม (Triangular Shape Arrangement) ดังแสดงภาพกราฟฟิกในรูปที่ 6

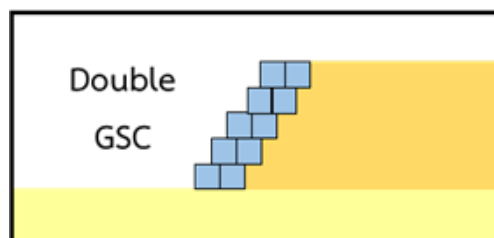


รูปที่ 5 กราฟฟิกแสดงการสร้างแบบจำลองถุงจีโอเทกซ์ไทล์บรรจุทราย

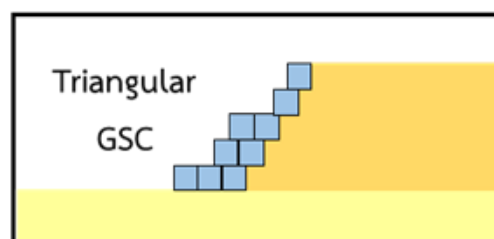
การดำเนินการวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดของทั้งสามกรณีทุกอัตราส่วนความลาดชัน โดยลาดดินกำหนดให้ความสูงที่ 5 เมตร และในแต่ละกรณีจะเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชันแนวราบต่อแนวตั้งเป็น 1:5, 2:5, 3:5, 4:5, และ 6:5 ตามลำดับ



(ก)



(ข)



(ค)

รูปที่ 6 กราฟฟิกแสดงกรณีวิเคราะห์วิธีการจัดเรียงระบบถุงบรรจุทราย

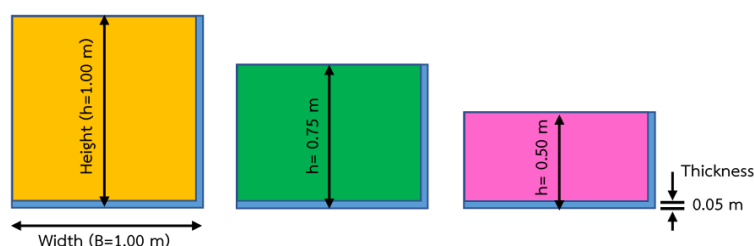
ตารางที่ 3 อินพุตพารามิเตอร์ของวัสดุประกอบถุงจีโอเทกซ์ไพล์บรรจุทรายในการวิเคราะห์เสถียรภาพ

Detail	Unit	Sandbag	Bag Interface
Material model	-	Mohr's-Coulomb model	Mohr's-Coulomb model
Material type	-	Drained condition	Drained condition
Interfaces Reduction	-	1.00	0.84
B x H	m x m	0.95 x 0.95	Thk. 0.05
Unsaturated Unit weight	kN/m ³	17.0	1.2
Saturated Unit weight	kN/m ³	20.0	1.3
Permeability	m/day	0.864	1.000
Elastic modulus	kN/m ²	80,000	13,000
Poisson's ratio	-	0.30	0.30
Cohesion	kN/m ²	42.00	1.00
Friction Angle	Degree	35.00	25.00
Dilation Angle	Degree	0.00	0.00

3.5 อิทธิพลของความสูงของถุงจีโอเทกซ์บรรจุทรายต่ออัตราส่วนความชัน

การกำหนดคุณสมบัติของดินฐานรากและลาดดินจากข้อมูลคุณสมบัติดินโดยทั่วไปตาม 0 โดยทำการวิเคราะห์เสถียรภาพของกรณีความสูงของถุงบรรจุทรายแตกต่างกันไปได้แก่ 1.00, 0.75, และ 0.50 เมตร ดังแสดงภาพกราฟฟิกในรูปที่ 7 โดยอินพุตพารามิเตอร์แรงยึดเหนี่ยวปรากฏของทั้งสามความสูงถุง

บรรจุทรายจะมีความต่างกันไป ตามผลที่ได้จากการคำนวณสมการที่ 5 เช่นเดียวกับหัวข้อที่ 3.2 โดยมีค่าเป็น 42.00, 61.00, และ 99.00 kN/m² ตามลำดับ จากการคำนวณโดยกำหนดให้กำลังดึงของจีโอเทกซ์ไพล์เท่ากับ 30 kN/m, ค่ามุมเสียดทานภายในของทรายเท่ากับ 35 องศา, และความกว้างของถุงบรรจุทรายถูกจำกัดไว้ที่ 1.00 เมตร ดังแสดงอินพุตพารามิเตอร์ของทั้งสามความสูงถุงบรรจุทรายใน 0



รูปที่ 7 กราฟฟิกแสดงกรณีการวิเคราะห์ความสูงของถุงบรรจุทรายเดี่ยว

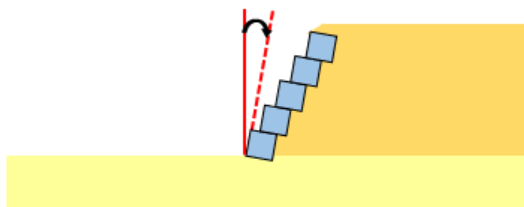
ตารางที่ 4 อินพุตพารามิเตอร์ของวัสดุประกอบถุงจีโอเทกซ์ไพล์บรรจุทรายตามกรณีความสูงของถุงต่าง ๆ

Detail	Unit	h = 1.00 m	h = 0.75 m	h = 0.50 m
Material model	-	Mohr's-Coulomb	Mohr's-Coulomb	Mohr's-Coulomb
Material type	-	Drained condition	Drained condition	Drained condition
Interfaces Reduction	-	1.00	1.00	1.00
B x H	m x m	0.95 x 0.95	0.95 x 0.70	0.95 x 0.45
Unsaturated Unit weight	kN/m ³	17.0	17.0	17.0
Saturated Unit weight	kN/m ³	20.0	20.0	20.0
Permeability	m/day	0.864	0.864	0.864
Elastic modulus	kN/m ²	80,000	80,000	80,000
Poisson's ratio	-	0.30	0.30	0.30
Cohesion	kN/m ²	42.00	61.00	99.00
Friction Angle	Degree	35.00	35.00	35.00
Dilation Angle	Degree	0.00	0.00	0.00

การวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดของทั้งสามความสูงของ
อุ้งบรรจุทรายในทุกอัตราส่วนความลาดชัน โดยลาดดินถูก
กำหนดความสูงไว้ที่ 5 เมตร และในแต่ละกรณีจะเปลี่ยนแปลง
อัตราส่วนความชันแนวราบต่อแนวตั้งเป็น 1:5, 2:5, 3:5, 4:5,
และ 6:5 ตามลำดับ

3.6 อิทธิพลของความเอียงของระบบกำแพงกันดินด้วยอุ้งบรรจุ ทรายต่ออัตราส่วนความชัน

ส่วนนี้เป็นการวิเคราะห์เสถียรภาพของการใช้อุ้งบรรจุทราย
ในการเสริมเสถียรภาพลาดดิน โดยมีการกำหนดคุณสมบัติของ
ดินฐานรากและลาดดินจากข้อมูลคุณสมบัติดินโดยทั่วไปตาม
ตารางที่ 1 โดยในส่วนนี้เป็นการวิเคราะห์กรณีความเอียงของ
ระบบกำแพงกันดินด้วยอุ้งบรรจุทรายในกรณีมุมที่กำแพง
กระทำต่อแนวตั้งแตกต่างกันไป ได้แก่ 0.0, 6.0, และ 10.0
องศา ดังแสดงภาพกราฟฟิกในรูปที่ 8



รูปที่ 8 กราฟฟิกแสดงกรณีวิเคราะห์ความเอียงของระบบอุ้งบรรจุทราย

โดยอินพุตพารามิเตอร์ในโปรแกรมได้จากการคำนวณ
สมการที่ 5 เช่นเดียวกับส่วนก่อนหน้า โดยมีการคำนวณตาม
กำลังดึงของจีโอเทกซ์ไทล์เท่ากับ 30 kN/m, ค่ามุมเสียดทาน
ระหว่างอนุภาคของทรายเท่ากับ 35 องศา, ความกว้างและ

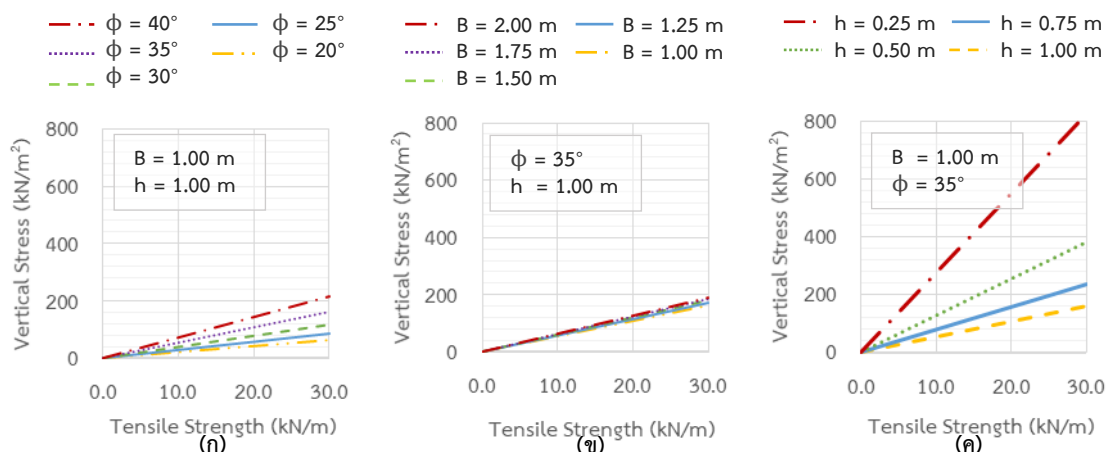
ความสูงของอุ้งบรรจุทรายถูกกำหนดไว้ที่ 1.00 เมตร ดังแสดงใน
0 การวิเคราะห์เสถียรภาพความลาดของมุมเอียงทั้ง 3 ค่าที่
กำแพงกระทำต่อแนวตั้งแตกต่างกันไปในทุกอัตราส่วนความ
ลาดชัน โดยลาดดินถูกกำหนดความสูงไว้ที่ 5 เมตร และในแต่ละ
กรณีจะเปลี่ยนแปลงอัตราส่วนความชันแนวราบต่อแนวตั้ง
เป็น 1:5, 2:5, 3:5, 4:5, และ 6:5 ตามลำดับ

4. ผลและการอภิปรายผล

ส่วนที่ 1: อิทธิพลที่มีผลต่อการรับแรงกดของอุ้งเดี่ยว

4.1 ผลการวิเคราะห์ด้วยความสัมพันธ์

จากการคำนวณความสัมพันธ์ของ Matsuoka et al.
(2000) กำลังการรับแรงกดของอุ้งบรรจุทรายที่สภาวะเกิดการ
วิบัติตามสมการที่ 3 ผลแสดงในรูปกราฟความสัมพันธ์ระหว่าง
ความเค้นกดในแนวตั้งที่สภาวะวิบัติและกำลังดึงของจีโอเทกซ์
ไทล์ดังรูปที่ 9 จะเห็นได้ว่าเมื่อค่ากำลังดึงของจีโอเทกซ์ไทล์
สูงขึ้นจะสามารถรับแรงกดก่อนการวิบัติได้มากขึ้น เมื่อพิจารณา
ในกรณีการเปลี่ยนแปลงกำลังวัสดุทรายภายในที่เมื่อค่ามุมเสียด
ทานระหว่างวัสดุมากขึ้นจะสามารถรับความเค้นแนวตั้งได้มาก
ขึ้นเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 9(ก) และในกรณีความกว้างของอุ้ง
บรรจุทรายที่มีค่ามากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 9(ข) จะเห็นได้ว่า
ความกว้างอุ้งที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อการรับแรงกดที่เพิ่มขึ้นเพียง
เล็กน้อย แต่ในกรณีของความสูงของอุ้งบรรจุทรายที่มีค่าน้อยลง
จะส่งผลให้สามารถรับน้ำหนักกดทับได้มากขึ้นมากอย่างมี
นัยสำคัญ ดังแสดงในรูปที่ 9(ค)



รูปที่ 9 ผลของความเค้นแนวตั้งที่สภาวะวิบัติและกำลังดึงจีโอเทกซ์ไทล์ในกรณีต่าง ๆ; (ก) กำลังรับแรงเฉือนของทรายที่ใช้บรรจุ, (ข) ความกว้างของอุ้งบรรจุทราย, (ค) ความสูงของอุ้งบรรจุทราย

ผลการคำนวณค่าแรงยึดเหนี่ยวปรากฏของอุ้งบรรจุทรายที่เกิดจากแรงดึงของจีโอเท็กซ์ไทล์ที่สภาวะเกิดการวิบัติตามสมการที่ 5 ดังกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าแรงยึดเหนี่ยวปรากฏและกำลังดึงของจีโอเท็กซ์ไทล์ดังรูปที่ 10 จะเห็นว่าเมื่อค่ากำลังดึงของจีโอเท็กซ์ไทล์สูงขึ้นจะให้ค่าแรงยึดเหนี่ยวที่สูงขึ้น และในกรณีกำลังวัสดุทรายภายในที่มากขึ้นจะทำให้ค่าแรงยึดเหนี่ยวที่สูงขึ้นเช่นเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 10(ก) และในกรณีความกว้างของอุ้งบรรจุทรายที่มีค่ามากขึ้น ดังแสดงในรูปที่ 10(ข) จะเห็นได้ว่าความกว้างของอุ้งบรรจุทรายที่มีค่ามากขึ้นจะมีผลต่อค่าแรงยึดเหนี่ยวที่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่ในกรณีความสูงของอุ้งบรรจุทรายที่ลดลง จะให้ค่าแรงยึดเหนี่ยวที่เพิ่มขึ้นอย่างมากดังแสดงในรูปที่ 10(ค) โดยอิทธิพลของคุณสมบัติของดินเข้าเหล่านี้มีแนวโน้มของกำลังรับแรงของอุ้งบรรจุทรายในทิศทางเดียวกันทั้งในกรณีของความสามารถในการรับแรงกดและค่าแรงยึดเหนี่ยวปรากฏ

4.2 การอภิปรายผลการวิเคราะห์ด้วยความสัมพันธ์

จากการคำนวณความสัมพันธ์อธิบายกำลังการรับแรงกดของอุ้งบรรจุทรายจาก Matsuoka et al. [1] สามารถคำนวณกำลังของอุ้งบรรจุทรายออกมาในเทอมของแรงกดตามแนวดิ่งที่สภาวะเกิดการวิบัติและค่าแรงยึดเหนี่ยวปรากฏเนื่องจากกำลังดึงของวัสดุจีโอเท็กซ์ไทล์ จะเห็นได้ว่าเมื่อค่ากำลังดึงของจีโอเท็กซ์ไทล์ที่สูงขึ้นและค่ามุมเสียดทานระหว่างอนุภาคของทราย

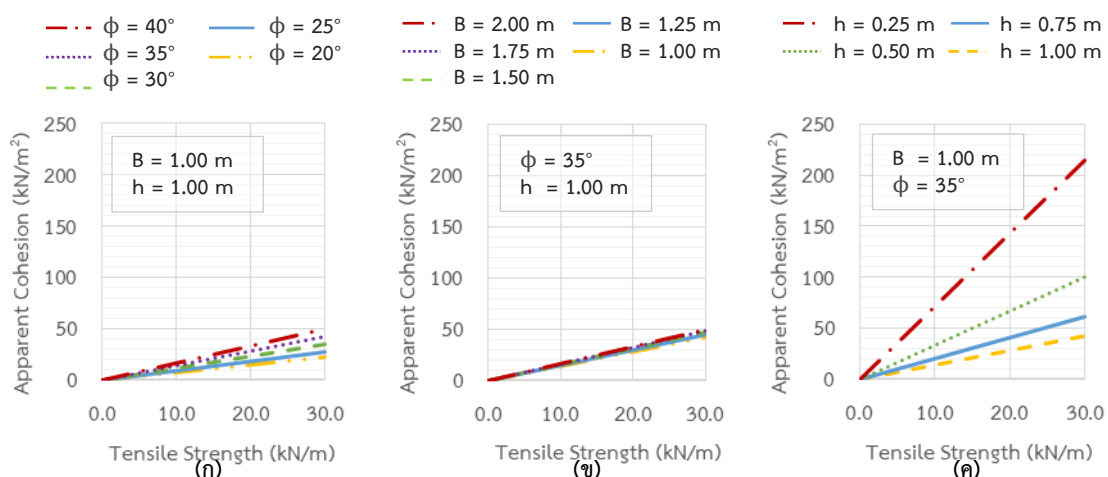
ภายในที่มากขึ้น อุ้งบรรจุทรายจะสามารถรับแรงกดก่อนการวิบัติและมีกำลังยึดเหนี่ยวปรากฏมากขึ้น ในกรณีอิทธิพลของความกว้างของอุ้งบรรจุทรายที่เพิ่มขึ้นมีผลต่อกำลังรับแรงกดที่เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย แต่กรณีความสูงของอุ้งบรรจุทรายที่น้อยลง เห็นได้ว่าจะส่งผลให้สามารถรับน้ำหนักกดทับและค่าแรงยึดเหนี่ยวปรากฏได้มากขึ้นมากอย่างมีนัยสำคัญ หรือกล่าวได้ว่าการเพิ่มความกว้างของอุ้งบรรจุทรายค่อนข้างไม่มีผลต่อกำลังที่เพิ่มขึ้นมากนัก แต่การลดความสูงของอุ้งบรรจุทรายกลับมีผลต่อกำลังการรับแรงกดอย่างมาก

ส่วนที่ 2: เสถียรภาพลาดดินด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์

4.3 ผลการวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินด้วยโปรแกรม

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ประกอบด้วยอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดดิน และค่าการเคลื่อนตัวของลาดดินสูงสุดต่ออัตราส่วนความชันที่เปลี่ยนแปลงไป โดยตารางแสดงผลอัตราส่วนความปลอดภัยที่น่าเสนอ จะแสดงผลเป็นสีแดงเมื่ออัตราส่วนความปลอดภัยมีค่าน้อยกว่า 1

การพิจารณากรณีศึกษาอิทธิพลทั้ง 3 กรณี ประกอบด้วยกรณีวิเคราะห์วิธีการจัดเรียงระบบอุ้งบรรจุทรายทั้ง 3 วิธี ดังแสดงใน 0 และ 0, กรณีวิเคราะห์ความสูงของอุ้งบรรจุทรายเดี่ยว ดังแสดงใน 0 และ 0, และกรณีวิเคราะห์ความเอียงของระบบอุ้งบรรจุทราย ดังแสดงใน 0 และ 0 ตามลำดับ



รูปที่ 10 ผลของค่าแรงยึดเหนี่ยวปรากฏและกำลังดึงจีโอเท็กซ์ไทล์ในกรณีต่าง ๆ; (ก) กำลังรับแรงเฉือนของทรายที่ใช้บรรจุ, (ข) ความกว้างของอุ้งบรรจุทราย, (ค) ความสูงของอุ้งบรรจุทราย

ตารางที่ 5 อัตราส่วนความปลอดภัยของลาดดินกรณีวิเคราะห์วิธีการจัดเรียงระบบอุ้งบรรจุทราย

Slope Ratio (X:Y)	Safety Factor			
	Non-Structure	Single GSC	Double GSC	Triangular Shape
1:5	0.70	1.00	1.00	1.33
2:5	0.83	1.00	1.34	1.37
3:5	1.00	1.00	0.93	1.39
4:5	1.02	0.91	1.06	1.32
6:5	1.24	1.47	1.48	1.72

ตารางที่ 6 ค่าการเคลื่อนตัวของลาดดินสูงสุดกรณีวิเคราะห์วิธีการจัดเรียงระบบอุ้งบรรจุทราย

Slope Ratio (X:Y)	Extreme Total Displacement, (mm)			
	Non-Structure	Single GSC	Double GSC	Triangular Shape
1:5	3.40	7.44	4.16	3.50
2:5	3.83	8.95	3.61	3.11
3:5	3.75	3.89	3.08	2.94
4:5	3.18	2.99	3.70	2.86
6:5	2.85	2.84	2.73	2.54

ตารางที่ 7 อัตราส่วนความปลอดภัยของลาดดินกรณีวิเคราะห์ความสูงของอุ้งบรรจุทรายเดี่ยว

Slope Ratio (X:Y)	Safety Factor			
	Non-Structure	h = 1.00 m	h = 0.75 m	h = 0.50 m
1:5	0.70	1.00	0.98	0.97
2:5	0.83	1.00	1.03	1.02
3:5	1.00	1.00	0.99	1.03
4:5	1.02	0.91	1.09	1.14
6:5	1.24	1.47	1.35	1.38

ตารางที่ 8 ค่าการเคลื่อนตัวของลาดดินสูงสุดกรณีวิเคราะห์ความสูงของอุ้งบรรจุทรายเดี่ยว

Slope Ratio (X:Y)	Extreme Total Displacement, (mm)			
	Non-Structure	h = 1.00 m	h = 0.75 m	h = 0.50 m
1:5	3.40	7.44	7.90	16.39
2:5	3.83	8.95	7.89	11.92
3:5	3.75	3.89	4.04	4.13
4:5	3.18	2.99	3.40	3.13
6:5	2.85	2.84	2.91	2.97

ตารางที่ 9 อัตราส่วนความปลอดภัยของลาดดินกรณีวิเคราะห์ความเอียงของระบบอุ้งบรรจุทราย

Slope Ratio (X:Y)	Safety Factor			
	Non-Structure	Rotation = 0 deg	Rotation = 6 deg	Rotation = 10 deg
1:5	0.70	1.00	1.00	1.21
2:5	0.83	1.00	1.15	1.25
3:5	1.00	1.00	1.15	1.25
4:5	1.02	0.91	1.15	1.29
6:5	1.24	1.47	1.61	1.68

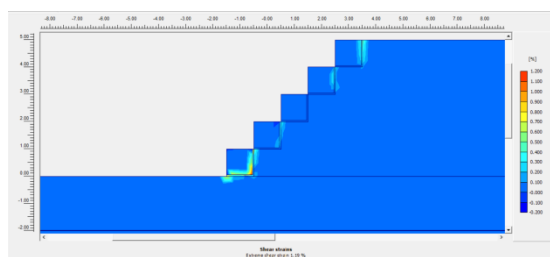
ตารางที่ 10 ค่าการเคลื่อนตัวของลาดดินสูงสุดกรณีวิเคราะห์ความเอียงของระบบอุ้งบรรจุทราย

Slope Ratio (X:Y)	Extreme Total Displacement, (mm)			
	Non-Structure	Rotation = 0 deg	Rotation = 6 deg	Rotation = 10 deg
1:5	3.40	7.44	5.61	5.32
2:5	3.83	8.95	3.54	3.44
3:5	3.75	3.89	3.54	3.44
4:5	3.18	2.99	3.24	3.14
6:5	2.85	2.84	2.77	2.74

4.4 การอภิปรายอิทธิพลของวิธีการเรียงอุ้งจีโอเท็กซ์ไทล์บรรจุทรายต่ออัตราส่วนความชัน

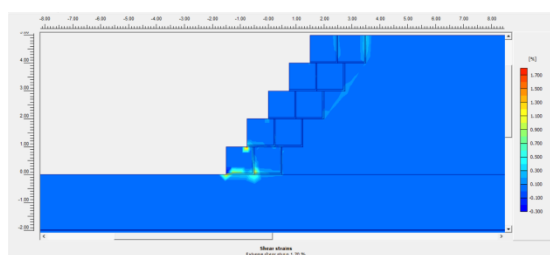
จากผลการวิเคราะห์ ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่วิเคราะห์ได้มีความแปรปรวนอย่างมาก เมื่อความชันของลาดดินมีค่าลดลง จะเห็นได้ว่าวิธีการเรียงอุ้งบรรจุทราย (วิธีเรียงแบบแถวเดี่ยว, การเรียงสองแถว, และการเรียงเป็นรูปสามเหลี่ยม) มีผลอย่างมากต่อเสถียรภาพซึ่งสามารถทำให้ความสามารถในการต้านทานการวิบัติลดลงได้ โดยปัจจัยของวิธีการเรียงอุ้งที่มีผลต่อเสถียรภาพ ได้แก่

1. การเรียงอุ้งบรรจุทรายแบบขอบต่อขอบ ตัวอย่างในรูปที่ 11 (กรณีความชัน 4:5) การเรียงอุ้งบรรจุทรายแบบดังกล่าวทำให้เสถียรภาพลาดดินลดลงจากกรณีที่ลาดดินไม่มีระบบเสริมเสถียรภาพอย่างมีนัยสำคัญ โดยจะเห็นได้ว่าการเกิดความเครียดเฉือนที่เกิดขึ้นที่บริเวณขอบต่อขอบของอุ้งบรรจุทราย ทำให้ลาดดินเกิดการวิบัติ และถึงแม้จะมีการเสริมด้วยอุ้งบรรจุทรายเป็นแบบสองแถว แต่การเรียงอุ้งบรรจุทรายเช่นนี้ยังส่งผลให้ลาดดินมีเสถียรภาพที่ต่ำดังเดิม



รูปที่ 11 ความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้น ในกรณีการเรียงธงบรรจุทรายในวิธี ขอบต้อขอบ

2. การเรียงธงบรรจุทรายแบบสองแถว ไม่ได้เพิ่ม เสถียรภาพแก่ลาดดินอย่างที่ควรจะเป็น ในกรณีที่ลาดดินเริ่มมี ความชันลดลง การเพิ่มน้ำหนักกดทับจากธงบรรจุทรายเป็นบน มากขึ้น ส่งผลให้ธงบรรจุทรายบริเวณด้านล่างเกิดการเลื่อนไถล ออกอย่างมีนัยสำคัญ ดังในรูปที่ 12 จะเห็นได้ว่าลาดดินบริเวณ ด้านล่างและตามแนวการวิบัติเกิดความเค้นเฉือนในปริมาณ มาก



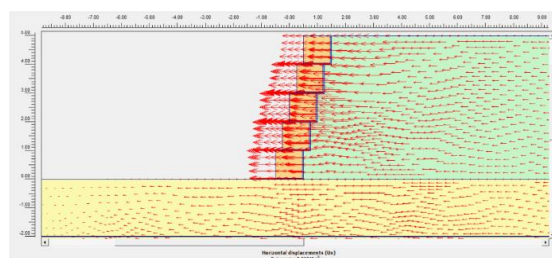
รูปที่ 12 ความเค้นเฉือนที่เกิดขึ้น ในกรณีการเรียงธงบรรจุทรายในวิธี เรียงสองแถว

3. การเรียงธงบรรจุทรายในรูปแบบสามเหลี่ยม การเรียง แบบนี้เป็นการลดน้ำหนักด้านบนลาดดินลงและยังเป็นการเพิ่ม แรงต้านทานการเลื่อนไถลบริเวณด้านล่าง ทำให้เสถียรภาพ โดยรวมของลาดดินสูงขึ้น

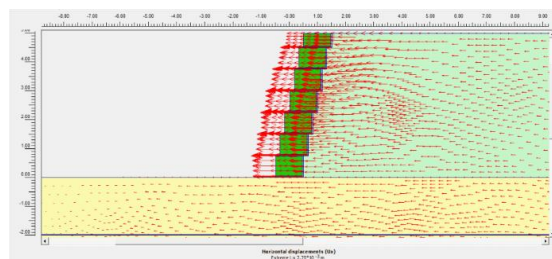
4.5 การอภิปรายอิทธิพลของความสูงของธงจีโอเทกซ์ไทล์บรรจุ ทรายต่ออัตราส่วนความชัน

จากผลการวิเคราะห์ในกรณีที่ลดความสูงของธงบรรจุทราย เดียวลง ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดดินที่ได้จากการ วิเคราะห์ให้ค่าที่ไม่แน่นอน โดยเมื่อทำการลดความสูงของธง บรรจุทรายลง ซึ่งเป็นที่ทราบดีว่าการลดลงของความสูงธงบรรจุ ทรายจะทำให้ได้กำลังการรับแรงกดที่สูงขึ้น จากผลการคำนวณ ความสัมพันธ์ของ Matsuoka et al. (2000) ในหัวข้อที่ 4.1 (ค่าแรงยึดเหนี่ยวปรากฏเนื่องจากแรงดึงของธงจีโอเทกซ์ไทล์ ของธงบรรจุทรายสูง 1.00, 0.75, และ 0.50 เมตร มีค่าเป็น 42.00, 61.00, 99.00 kN/m² ตามลำดับ) แต่เมื่อนำมาเสริม เสถียรภาพแก่ลาดดินกลับพบว่า ที่กรณีความชันของลาดดิน

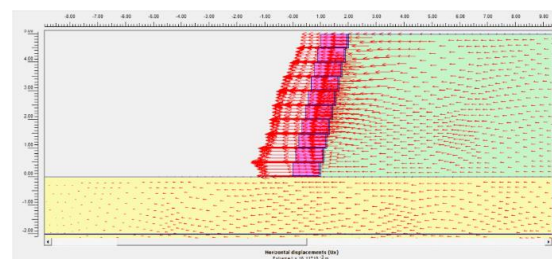
มาก การลดความสูงของธง กลับทำให้เสถียรภาพของลาดดิน ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ สาเหตุมาจากการเลื่อนไถลเนื่องแรง เสียดทานระหว่างธงบรรจุทรายแต่ละธงที่มีปริมาณน้อย ดัง แสดงในรูปที่ 13 จากรูปแสดงเวกเตอร์การเคลื่อนตัวโดยรวม ของลาดดินของทั้งสามตัวอย่างกรณีความสูงธงบรรจุทรายจาก ขนาดความสูงจากมากไปน้อยตามลำดับ ซึ่งจะเห็นได้ว่าบริเวณ ที่เชื่อมต่อระหว่างธงต่อธงจะเกิดการเคลื่อนที่ที่มากกว่าที่ ตำแหน่งอื่น และในกรณีธงบรรจุทรายความสูง 0.50 เมตร จะ เกิดการเคลื่อนตัวออกไปทางด้านข้างในปริมาณที่มากที่สุด แต่ กลับกันในกรณีที่ความชันของลาดดินเริ่มมีค่าลดลง ทำให้ระยะ การวางเหลื่อมธงบรรจุทรายแต่ละธงลดลง ทำให้เสถียรภาพ ลาดดินโดยรวมสูงขึ้นเล็กน้อย ซึ่งเป็นผลมาจากกำลังรับแรงกด ของธงบรรจุทรายที่เพิ่มขึ้นจากการลดความสูงธงบรรจุทราย



(ก) กรณีความชัน 1:5 ความสูงธงบรรจุทราย H = 1.00 m



(ข) กรณีความชัน 1:5 ความสูงธงบรรจุทราย H = 0.75 m



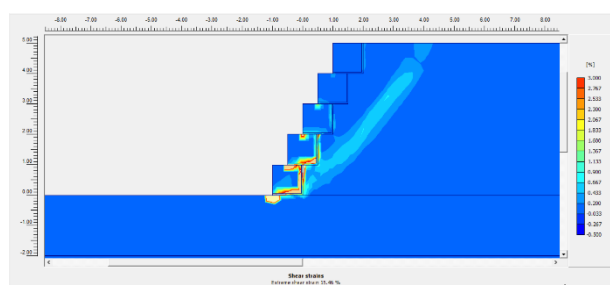
(ค) กรณีความชัน 1:5 ความสูงธงบรรจุทราย H = 0.50 m

รูปที่ 13 เวกเตอร์การเคลื่อนตัวในแนวราบของลาดดิน

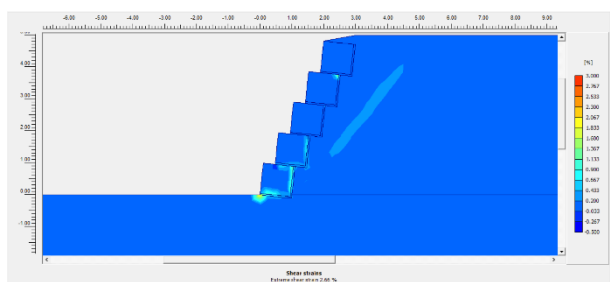
4.6 การอภิปรายอิทธิพลของความเอียงของระบบกำแพงกันดิน ด้วยธงบรรจุทรายต่ออัตราส่วนความชัน

จากผลการวิเคราะห์ในกรณีที่เพิ่มความเอียงของระบบ กำแพงกันดินด้วยธงบรรจุทราย ค่าอัตราส่วนความปลอดภัยที่

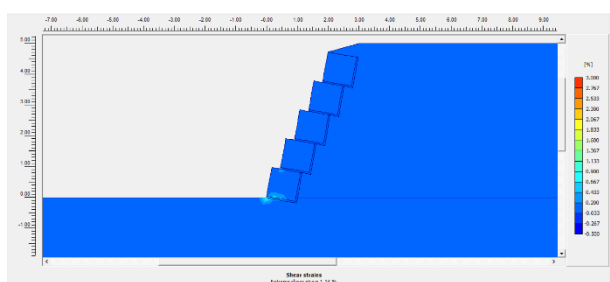
วิเคราะห์ได้มีผลเพิ่มขึ้นตามมุมที่กระทำต่อแนวตั้งเพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากการเพิ่มแรงต้านทานการเลื่อนไถลออกของระบบ กำแพงกันดินที่เกิดจากแรงเสียดทานระหว่างถุงและถุงที่มีปริมาณน้อย ในรูปที่ 14 แสดงความเครียดเฉือนที่เกิดขึ้นในลาดดินของกรณีที่มีการทำมุมของกำแพงกันดิน 0, 6, และ 10 องศาตามลำดับ จะเห็นได้ว่าในกรณีที่มีการเอียงของกำแพงกันดิน ทำให้ความเครียดเฉือนบริเวณด้านล่างของลาดดินลดลงอย่างมาก



(ก) กรณีความชัน 2:5 ความเอียงกำแพงกันดิน 0 องศาตามแนวดิ่ง



(ข) กรณีความชัน 2:5 ความเอียงกำแพงกันดิน 6 องศาตามแนวดิ่ง



(ค) กรณีความชัน 2:5 ความเอียงกำแพงกันดิน 10 องศาตามแนวดิ่ง

รูปที่ 14 ความเครียดเฉือนที่ปรากฏ กรณีศึกษาอิทธิพลของความเอียงกำแพงกันดิน

5. สรุป

กำลังการรับแรงกดของถุงบรรจุทรายถุงเดียว ที่ได้จากการคำนวณสมการความสัมพันธ์ของ Matsuoka et al. (2000) โดยผลที่ได้จากการคำนวณเป็นค่ากำลังการรับแรงกด และค่าแรงยึดเหนี่ยวปรากฏที่เกิดขึ้นจากการรับแรงดึงของจีโอเท็กซ์ไทล์ (ตาม

ชนิดและความหนาของจีโอเท็กซ์ไทล์), ค่ามมเสียดทานภายในของวัสดุบรรจุ (ตามชนิดวัสดุ, กำลัง, และความหนาแน่น), และความสูงและความกว้างของถุงเดี่ยวเริ่มต้น จากการคำนวณสมการดังกล่าว สรุปได้ว่า

1. การเพิ่มขึ้นของกำลังการรับแรงดึงของจีโอเท็กซ์ไทล์และค่ามมเสียดทานภายในของวัสดุบรรจุ ทำให้กำลังการรับแรงกดและค่าแรงยึดเหนี่ยวปรากฏสูงขึ้นอย่างเห็นได้ชัด

2. การลดความสูงของถุงเดี่ยวลงทำให้กำลังการรับแรงกดสูงขึ้นอย่างมาก แต่ในการเพิ่มความกว้างของถุงเดี่ยวกลับมีแนวโน้มที่เพิ่มขึ้นได้เพียงเล็กน้อย

การวิเคราะห์เสถียรภาพลาดดินโดยโปรแกรม Plaxis2D บนพื้นฐานของวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ พบว่าการเสริมด้วยถุงจีโอเท็กซ์ไทล์บรรจุทรายสามารถพัฒนาเสถียรภาพลาดดินโดยรวมได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเมื่อพิจารณาอิทธิพลที่ใช้วิเคราะห์ประกอบด้วย วิธีการเรียงถุงบรรจุทรายต่ออัตราส่วนความชัน, ความสูงของกระสอบบรรจุทรายต่ออัตราส่วนความชัน, และความเอียงของระบบกำแพงกันดินต่ออัตราส่วนความชัน พบว่าค่าอัตราส่วนความปลอดภัยมีความไม่แน่นอน สรุปได้ดังต่อไปนี้

1. วิธีการเรียงถุงบรรจุทรายต่ออัตราส่วนความชัน การเรียงถุงจีโอเท็กซ์ไทล์ให้เหลื่อมกันแบบขบต่อขบ ทำให้เสถียรภาพลาดดินลดลงจากกรณีไม่มีการเสริมด้วยถุงบรรจุทราย เนื่องจากทำให้เกิดความเครียดเฉือนที่บริเวณต่อขบกันดังกล่าว จนทำให้เกิดการวิบัติ, และการเรียงถุงบรรจุทรายแบบสองแถวตลอดความสูงลาดดินทำให้ลาดดินเสียเสถียรภาพเนื่องจากการให้น้ำหนักกดทับแก่ระบบกำแพงกันดินในปริมาณมากเกินไป ทำให้เกิดแรงที่ทำให้กำแพงเลื่อนไถลออกด้านข้างได้ง่ายขึ้น โดยการเสริมถุงบรรจุทรายเพิ่มเป็นแถวที่สามในบริเวณด้านล่างลาดดินจะเพิ่มเสถียรภาพโดยรวมได้ดีขึ้นเนื่องจากการเสริมการต้านทานบริเวณเชิงลาดดินต่อการเลื่อนไถลออกด้านข้าง

2. กรณีความสูงของถุงบรรจุทรายแต่ละชั้นต่ออัตราส่วนความชัน พบว่าในกรณีที่ลาดดินมีความชันมาก การลดความสูงของถุงบรรจุทรายลงทำให้เสถียรภาพโดยรวมที่เกิดจากการเลื่อนไถลของถุงบรรจุทราย แต่ในกรณีที่ลาดดินมีความชันน้อยทำให้การเรียงถุงบรรจุทรายที่มีความสูงถุงเดียวน้อยถูกละเลยเล็กน้อยเป็นระยะน้อยไปด้วย กรณีนี้ทำให้เสถียรภาพลาดดินสูงขึ้นเนื่องจากถุงที่มีความสูงน้อยมีกำลังการรับแรงกดที่มากกว่าและเกิดการเลื่อนไถลในบริเวณผิวสัมผัสระหว่างถุงที่น้อยกว่า

3. กรณีความเอียงของระบบกำแพงกันดินต่ออัตราส่วนความชัน สรุปผลได้ว่าการเพิ่มมุมการเอียงต่อระนาบแนวดิ่งของระบบถุงบรรจุทรายเข้าหาลาดดิน ทำให้เสถียรภาพของลาดดิน

โดยรวมสูงขึ้น เนื่องจากการเอียงของถุงบรรจุทรายเป็นการกระจายแรงเลื่อนไถลออกให้มีความน้อยลง และความเอียงของกำแพงกันดิน 10 องศาให้เสถียรภาพลาดดิน ดีกว่าทำมุมเอียงเป็นมุม 6 องศา

6. ประโยชน์ที่จะได้รับ

งานวิจัยนี้สามารถนำเอาแนวโน้มของกำลังรับแรงกดและแรงยึดเหนี่ยวปรากฏของถุงจีโอเท็กซ์ไทล์บรรจุทรายจากการคำนวณความสัมพันธ์ของ Matsuoka et al., (2000) จากอิทธิพลของปัจจัยต่าง ๆ มาพิจารณาในการออกแบบถุงบรรจุทรายเบื้องต้นได้ และสามารถใช้แนวทางวิเคราะห์เสถียรภาพของความลาดด้วยวิธีไฟไนต์เอลิเมนต์ในงานวิจัยนี้สำหรับการประเมินอัตราส่วนความปลอดภัยของลาดดินได้

7. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้คำปรึกษาแนะนำในด้านวิชาการ, ด้านการดำเนินงานวิจัย, และให้การสนับสนุนค่าใช้จ่ายในการทำวิจัยให้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดี มา ณ โอกาสนี้

8. เอกสารอ้างอิง

- Akter, A., Crapper, M., Pender, G., Wright, G., & Wong, W. S. (2012). Modelling the failure modes in geobag revetments. *Water Science and Technology*, 65(3), 418–425.
- Ansari, Y., Merifield, R., Yamamoto, H., & Sheng, D. (2011). Numerical analysis of soilbags under compression and cyclic shear. *Computers and Geotechnics*, 38, 659–668.
- Hataf, N., & Sayadi, M. (2018). Experimental and numerical study on the bearing capacity of soils reinforced using geobags. *Journal of Building Engineering*, 15, 290–297.
- Liu, H. B., Yang, G. Q., Wang, H., & Xiong, B. L. (2017). A large-scale test of reinforced soil railway embankment with soilbag facing under dynamic loading. *Geomechanics and Engineering*, 12(4), 579–593.
- Liu, S.-H., Gao, J. J., Wang, Y. Q., & Weng, L. P. (2014). Experimental study on vibration reduction by using soilbags. *Geotextiles and Geomembranes*, 42(1), 52–62.
- Liu, S.-H., Lu, Y., Weng, L. P., & Bai, F. Q. (2015). Field study of treatment for expansive soil/ rock channel slope with soilbags. *Geotextiles and Geomembranes*, 43(4), 283–292.
- Matsuoka, H., & Liu, S. H., (2003). New earth reinforcement method by soilbags (“donow”). *Soils and Foundations*, 43(6), 173–188.
- Matsuoka, H., Chen, Y., Kodama, H., Yamaji, Y., & Tanaka, R. (2000). Mechanical properties of soilbags and unconfined compression tests on model and real soilbags. *Proceedings Of the 35th Japan National Conf. on Geotech. Engrg* (pp. 1075–1076). Japanese.
- Recio, J., & Oumeraci, H. (2009). Processes affecting the hydraulic stability of coastal revetments made of geotextile sand containers. *Coastal Engineering*, 56(3), 260–284.
- Tantono, S. F., & Bauer, E. (2008). Numerical simulation of a soilbag under vertical compression. *The 12th international conference of International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics (IACMAG)* (pp. 433–439). Goa, India.
- Wang, L. J., Liu, S.-H., & Zhou, B. (2015). Experimental study on the inclusion of soilbags in retaining walls constructed in expansive soils. *Geotextiles and Geomembranes*, 43(1), 89–96.
- Wen, H., Wu, J. J., Zou, J. L., Luo, X., Zhang, M., & Gu, C. (2016). Model tests on the retaining walls constructed from geobags filled with construction waste. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2016, 1–13. <https://doi.org/10.1155/2016/4971312>
- Wu, J., Hesham El Naggar, M., Li, X., & Wen, H. (2020). DEM analysis of geobag wall system filled with recycled concrete aggregate. *Construction and Building Materials*, 238, 117684.
- Xu, Y. F., Huang, J., Du, Y. J., & Sun, D. A. (2008). Earth reinforcement using soilbags. *Geotextiles and Geomembranes*, 26(3), 279–289.

การพัฒนาเครื่องรับรู้สำหรับตรวจวัดพฤติกรรมหินโรยทางรถไฟ Development of Prototype for Monitoring the Railway Ballast Behavior

กฤษฎา ชีโนวัง^{1,*} และ พีรพงศ์ จิตเสงี่ยม²
Kidsada Cheenowang^{1,*} and Peerapong Jitsangiam²

^{1,2} ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่

^{1,2} Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Chiang Mai University

* Corresponding author e-mail: Kidsada_Chee@cmu.ac.th

(Received: September 30, 2020, Revised: November 9, 2020, Accepted: November 17, 2020)

บทคัดย่อ

การวิเคราะห์และประเมินพฤติกรรมชั้นหินโรยทางรถไฟ ในอดีตได้ประเมินพฤติกรรมความเค้นและความเครียดของวัสดุโดยอาศัยวิธีการทางตัวเลขของสมการเชิงประจักษ์ ซึ่งผลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยวิธีนี้ไม่สามารถอธิบายพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงได้ ต่อมาได้มีการพัฒนาให้มีการตรวจวัดพฤติกรรมด้วยการติดตั้งเครื่องมือทดสอบในสนามเพื่อประเมินพฤติกรรมที่เกิดขึ้นขณะใช้งานแต่การตรวจวัดพฤติกรรมนี้ยังมีข้อจำกัดในเรื่องของการรับ-ส่งข้อมูลและการที่เครื่องมือทดสอบส่งสัญญาณผ่านสายจะทำให้เครื่องมือตรวจวัดขาดอิสระการเคลื่อนตัวซึ่งทำให้การตรวจวัดพฤติกรรมมีความคลาดเคลื่อน ดังนั้น การศึกษานี้จึงมีเป้าประสงค์ในการสร้างเครื่องมือการตรวจวัดที่แม่นยำและสามารถอธิบายพฤติกรรมจริงที่เกิดขึ้นขณะใช้งาน โดยเครื่องมือตรวจวัดต้องมีลักษณะเหมือนอนุภาคหินโรยทางจำลองที่สามารถตรวจวัดพฤติกรรมและส่งข้อมูลที่ไต่ไปยังฐานข้อมูลเพื่อประมวลผลด้วยเทคโนโลยีไร้สายสามารถวัด ความเค้น และการเคลื่อนตัว ได้ในขณะเดียวกัน ผลจากการศึกษาวิจัย สามารถสร้างต้นแบบของเครื่องวัดดังกล่าวได้ โดยใช้การตรวจวัดความเค้นด้วย Flex Sensor รุ่น RP-S40-ST ตรวจวัดการเคลื่อนตัวด้วย Gyro Sensor รุ่น GY-521 (MPU6050) และประมวลผลด้วย ไมโครคอนโทรลเลอร์ รุ่น Wemos D1 mini ที่สามารถส่งสัญญาณแบบไร้สายได้ และใช้วงจรแผ่นพิมพ์เพื่อลดขนาดของเครื่องตรวจวัด ซึ่งเมื่อมีการเชื่อมต่อพบว่าเครื่องตรวจวัดสามารถใช้งานได้จริงและส่งข้อมูลที่ตรวจวัดได้ไต่ไปยังฐานข้อมูลบน google platform

คำสำคัญ: เครื่องรับรู้, หินโรยทางรถไฟ, พฤติกรรมชั้นหินโรยทาง

Abstract

The analysis and evaluation of ballast behavior, in the past, were relied upon the estimation of stress and strain of a material through a numerical method of empirical formulas. By doing this, a scientific link between real material behavior and calculated results did not exist. Consequently, in-field monitoring systems were established to evaluate such ballast behavior based on the electrical and wire measurement technologies. However, for the long-term performance of the rail ballast track, data collection and transmission of the in-field monitoring system following such wire technologies were not precise and persistent due to the degree of freedom of installed measuring devices was incompatible with ballast movement characteristics under the in-service train conditions. This study aimed to create a single unit of the measuring device with a sensor system following the wireless technologies capable of capturing the stress and the movement of the ballast under the in-service rail condition. Study findings showed that such a single unit of the wireless measuring device could be functionally fabricated using a steel frame with a flexible cover. The wireless sensor system of flex sensor (RP-S40-ST) for the stress measurement and the gyro sensor (GY-521 MPU6050) for the movement measurement was set up inside a

fabricated unit. The data processing system relied on the microcontroller of Wemos D1 mini. This single unit of the measuring device with a wireless sensor system could be used functionally to measure the stress and the movement as expected.

Keywords: Sensor, Ballast, Ballast Behaviors

1. บทนำ

โครงสร้างถนนและระบบรางเป็นโครงสร้างส่วนที่มีการก่อสร้างเพิ่มเติมบนชั้นดินเดิม (Additional Layer) ทำหน้าที่หลักเป็นโครงสร้างส่วนที่ทำหน้าที่ในการรับแรงกระทำที่มาจากการใช้งานถนน/ราง และเป็นตัวกลางในการถ่ายแรงลงสู่ชั้นดินเดิมเพื่อป้องกันการพังเสียหายของชั้นดิน โดยเมื่อพิจารณาถึงพฤติกรรมที่ตอบสนองต่อแรงกระทำนี้ คือ พฤติกรรมที่แรงกระทำทำให้เกิดความเค้นขึ้นภายในโครงสร้าง และพฤติกรรมการเคลื่อนตัวของอนุภาคภายใน ซึ่งพฤติกรรมเหล่านี้ส่งผลต่อการวิเคราะห์การออกแบบโครงสร้าง ที่สัมพันธ์กับการใช้งานที่เกิดขึ้น ดังนั้นการวิเคราะห์เพื่อให้ได้ความถูกต้องและแม่นยำ จำเป็นต้องมีการตรวจวัดพฤติกรรมของโครงสร้างที่รองรับถนนและรางที่แม่นยำด้วย

การตรวจวัดพฤติกรรมของโครงสร้างที่รองรับถนนและรางรถไฟนั้น ในอดีตที่ผ่านมาได้มีการตรวจวัดพฤติกรรมของโครงสร้างหลายวิธี เช่น การวิเคราะห์และประเมินพฤติกรรมจากข้อมูลที่ได้จากการเก็บตัวอย่างในสนามแล้วประเมินเชิงตัวเลขบนพื้นฐานทางทฤษฎี และการตรวจวัดพฤติกรรมจากการประเมินจากค่าข้อมูลที่ได้ในสนามที่เกิดจากการใช้งานจริง เป็นต้น แต่การตรวจวัดในอดีตที่ผ่านมา ยังไม่สามารถตอบสนองต่อข้อจำกัดที่เกิดขึ้นจริงในสนามได้ และในบางกรณีการตรวจวัดในสนามก็ยังไม่สามารถทำการตรวจวัดได้อย่างต่อเนื่องสม่ำเสมอ จากหนังสือความรู้เบื้องต้นวิศวกรรมรถไฟ ของ เจน บุญเชื้อ (วิศวกรใหญ่ ฝ่ายการช่างโยธา การรถไฟแห่งประเทศไทย) (Boonsue, 2011) ได้แสดงทฤษฎีและการวิเคราะห์โครงสร้างทางรถไฟ โดยได้แสดงการคำนวณเพื่อให้ได้มาซึ่งการทรุดตัวในชั้นหินโรยทางและแรงที่กระทำแล้วถ่ายแรงมายังชั้นโครงสร้างต่าง ๆ โดยคำนวณบนสมมติฐานทฤษฎีคานายาวบนพื้นอีลาสติก แล้วกำหนดค่าตัวแปรจากสภาพทาง, น้ำหนักเพลา, ขนาดไม้หมอน, ระยะไม้หมอน, ความหนาหินของหินโรยทาง, ความเร็วของรถไฟ และลักษณะรูปร่างของราง จากการประเมินจากตัวแปรที่ได้จากตัวอย่างในสนามแล้ววิเคราะห์ในเชิงตัวเลข ข้อมูลที่ได้จากการประเมินเป็นข้อมูลที่แม่นยำในเชิงตัวเลขและการคำนวณ แต่ไม่สามารถอนุมานค่าที่ได้จากการประเมินเหล่านั้นเป็นตัวแทนของพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงในสนามได้ อีก

ทั้งการประเมินในเชิงตัวเลขนี้ถูกจำกัดขึ้นบนสมมติฐานที่ ซึ่งหมายความว่าพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงในสนามอาจมีเหตุปัจจัยที่มากกว่าสมมติฐานเหล่านั้นได้ โดยการวิเคราะห์นั้นไม่ได้ให้ความสำคัญเรื่องความถี่และคาบของแรงกระทำ ซึ่งจะส่งผลถึงระยะการทรุดตัวของหินโรยทางในแนวตั้งอีกด้วย โดยการทดสอบที่ความถี่ต่ำ จะให้ค่าการทดสอบต่ำกว่าค่าที่ประเมินไว้ประมาณ 50% แต่เมื่อทดสอบที่ความถี่สูง จะให้ค่าการทดสอบที่ต่ำกว่าการประเมินเพียง 21% (Zhang, Zhao, Zhai, 2019) โดยทั้งนี้ ได้แนะนำการทดสอบว่าควรให้มีการทดสอบที่ให้น้ำหนักกระทำจากรถไฟ ความถี่ และความเร็วของรถไฟจากการใช้งานของรถไฟจริงเข้ามามีส่วนร่วมในการประเมินด้วย การตรวจวัดด้วยการค่าที่ได้จากการทดสอบในสนาม เป็นการประเมินพฤติกรรมโดยการออกแบบเครื่องและอุปกรณ์การตรวจวัดแล้วนำไปติดตั้งในสนาม ซึ่งอาจใช้วิธีติดตั้งที่หลากหลาย เช่น การตรวจวัดโดยการติดตั้งไปพร้อมกับการก่อสร้าง การติดตั้งหลังจากการก่อสร้างแล้วเสร็จ เป็นต้น ซึ่งการทดสอบเพื่อประเมินพฤติกรรมด้วยวิธีเหล่านี้จะช่วยให้ได้ข้อมูลที่เป็นตัวแทนของพฤติกรรมที่เกิดขึ้นจริงในสนามได้ จากงานวิจัยของ Blanc et al. (2017) และ Duong et al. (2016) ได้ทำการวิจัยเพื่อทำการตรวจวัดพฤติกรรมโดยติดตั้ง Geophones เพื่อตรวจวัด Vertical Displacement velocity และ Stain gauge เพื่อตรวจวัดการเคลื่อนตัวของโครงสร้าง ซึ่งจะตรวจสอบทั้งในแนวตั้งในชั้นดินเดิมและตรวจสอบแนวราบในชั้นที่มีการปรับปรุงโครงสร้างใหม่ ส่วน Temperature sensors จะถูกติดตั้งในรอยต่อระหว่างชั้น Asphalt cement แล้วส่งสัญญาณที่ได้จากการตรวจวัดผ่านสายสัญญาณมายังหน่วยรับค่าและประมวลผลเก็บไว้ในฐานข้อมูลในสนาม แล้วจึงส่งข้อมูลที่ตรวจวัดได้ผ่านระบบไร้สายสัญญาณไปยังหน่วยประมวลผลกลาง แต่การตรวจวัดพฤติกรรมด้วยวิธีนี้มีข้อจำกัดคือ ชุดเครื่องรับรู้ตรวจวัดที่ทำการติดตั้งในสนามจะถูกยึดโยงด้วยสายสัญญาณทำให้การเคลื่อนตัวของเครื่องรับรู้ที่ใช้ตรวจวัดไม่มีความอิสระต่อการเคลื่อนตัว อีกทั้งค่าที่ได้จากการตรวจวัดยังทำการตรวจวัดและแสดงผลได้เพียงการเคลื่อนตัว ยังไม่สามารถตรวจวัดพฤติกรรมความเค้นที่เกิดขึ้นจากแรงกระทำเมื่อมีการใช้งานได้ จากการวิจัยของ Stith (2004) ได้ทำ

การตรวจวัดพฤติกรรมที่เกิดขึ้นต่อทางรถไฟแต่มุ่งเน้นไปยังการตรวจวัดพฤติกรรมของรางด้วย Tekscan Sensor ซึ่งเป็นเครื่องรับรู้ที่ตรวจวัดการกระจายแรงดันโดยตรงที่เกิดขึ้นต่อรางและความเค้นที่เกิดจากล้อที่สัมผัสต่อโครงสร้างรางรถไฟ ซึ่งการตรวจวัดพฤติกรรมนี้จะทำการติดตั้ง Tekscan Sensor ไว้ที่รอยต่อระหว่างไม้มอนรถไฟและรางรถไฟแล้วจึงทำการอ่านค่าที่ได้จากการตรวจวัดซึ่งถึงแม้ว่าการตรวจวัดนี้จะเป็นการวัดในสนามที่ให้ค่าข้อมูลการตรวจวัดจริงที่เกิดขึ้นและยังมีการทดสอบเพื่อเทียบความถูกต้องในห้องปฏิบัติการ แต่การตรวจวัดนี้ไม่สามารถใช้งานในการตรวจวัดชั้นโครงสร้างชั้นอื่นได้ เนื่องจาก Tekscan Sensor เป็นเครื่องรับรู้ที่มีลักษณะเป็นแผ่นโดยจะทำงานเมื่อมีการสัมผัสเครื่องรับรู้ทั้ง 2 ด้านและรับค่าจาก Pressure Sensitive Material ส่งไปยังตัวนำสัญญาณและเข้าสู่หน่วยประมวล ซึ่งการสัมผัสเครื่องรับรู้ทั้ง 2 ด้านนี้เมื่อต้องการนำไปประยุกต์ใช้ในโครงสร้างชั้นดินหรือหินโรยทางอาจไม่สามารถตอบสนองต่อพฤติกรรมความเค้นของแรงที่เกิดขึ้นในชั้นดินหรือหินโรยทาง ในทุกทิศทางได้

จากข้อจำกัดที่เกิดขึ้นในการตรวจวัดที่ผ่านมาในอดีตงานวิจัยนี้จึงศึกษาและมุ่งเน้นที่จะประดิษฐ์เครื่องตรวจวัดเพื่อประเมินพฤติกรรมของโครงสร้างถนนและรางรถไฟบนพื้นฐานของเครื่องรับรู้ทดสอบที่มีความสามารถในการรับ-ส่งข้อมูลผ่านระบบไร้สายสัญญาณ (WiFi) เพื่อให้สามารถติดตั้ง/ฝังเครื่องตรวจวัดหรือ Prototype ไว้ภายในโครงสร้างที่รองรับถนนหรือทางรถไฟ ซึ่งจะทำให้การตรวจวัดพฤติกรรมนั้นคือค่าที่ได้จากการใช้งานจริง และเพื่อลดข้อจำกัดในการตรวจวัดในด้านความเป็นอิสระของอุปกรณ์ตรวจวัดกับอนุภาคไม่ให้ถูกยึดโยงด้วยระบบสายสัญญาณ อีกทั้งยังทำให้ข้อจำกัดในการรับ-ส่งข้อมูลที่ยังขาดความต่อเนื่อง (Real Time) ลดลง ด้วยการสร้างชุด Prototype ที่มีลักษณะรูปร่างสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ขนาด $7 \times 7 \times 7$ ลบ.ซม. เนื่องจาก Unland and Al-Khasawneh (2009) ได้แนะนำให้พิจารณาเรื่องปัจจัยรูปร่างของอนุภาคหินโรยทางที่ส่งผลต่อพฤติกรรมชั้นหินโรยทางด้วย ซึ่งพบว่ารูปร่างของอนุภาคหินโรยทางควรมีรูปร่างเกือบกลม หรือทรงลูกบาศก์ที่มีขนาดกว้าง : ยาว : สูง ที่มีสัดส่วนประมาณ 1 : 1 : 1 เนื่องจากจะให้ค่าแรงสัมผัส (Contact Force) และการถ่ายพลังงาน (Transferred Energy) ได้สูงที่สุด ในส่วนการประเมินพฤติกรรมความเค้นที่เกิดขึ้นในโครงสร้างจะใช้พื้นฐานจาก flex sensor แบบสี่เหลี่ยม รุ่น RP-S40-ST และใช้ร่วมกับ gyro sensor รุ่น GY-521 (MPU6050) เพื่อประเมินลักษณะการเคลื่อนไหว/เคลื่อนตัวของ Prototype ที่เกิดขึ้นในชั้นโครงสร้างที่รองรับถนนและรางรถไฟ และใช้ ไมโครคอนโทรลเลอร์ รุ่น

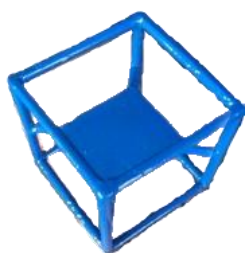
Wemos D1 mini ที่เปรียบเสมือนสมองกลของระบบในการประมวลผลและรับ-ส่งข้อมูลผ่านระบบไร้สายสัญญาณ เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปแสดงผลยังฐานข้อมูลที่สร้างขึ้นใน Google Platform เนื่องจากเป็นฐานข้อมูลแบบเปิด (Open Source) ที่สามารถใช้งานอย่างทั่วไประยะต่อการเข้าถึงฐานข้อมูล

2. การออกแบบเครื่องตรวจวัด

การออกแบบรูปร่าง/รูปทรง เพื่อใช้เป็นต้นแบบเครื่องตรวจวัดพฤติกรรม (ซึ่งต่อไปจะเรียกเครื่องตรวจวัดพฤติกรรมนี้ว่า Prototype) จะคัดเลือกบนพื้นฐานที่สามารถตอบสนองกับการทดสอบในสภาพการใช้งานจริง และสามารถตรวจวัดได้ค่าที่ถูกต้อง โดยที่รูปร่าง/รูปทรงจะต้องส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมของชั้นหินโรยทางรถไฟให้น้อยที่สุด

การหารูปร่างที่เหมาะสมโดยยึดถือขนาดที่เหมาะสม ซึ่งจะพิจารณาลักษณะทางกายภาพของขนาดหินโรยทางเป็นหลัก โดยขนาดอนุภาคของหินโรยทางที่ใช้ในการทำงานโครงสร้างทางรถไฟ จะอยู่ในช่วงขนาด 20 มม ถึง 60 มม อ้างอิงจาก BS812 Part 1 : (1975) ดังนั้นขนาดของเครื่องมือตรวจวัดพฤติกรรมนี้ควรมีขนาดไม่เกิน 6 ซม. แต่เนื่องจากการทำเครื่องตรวจวัดที่ขนาด 6 ซม. จะทำให้ flex sensor หรือเครื่องรับรู้สำหรับตรวจวัดความเค้นที่เกิดขึ้นต่อ Prototype เหลือพื้นที่การโค้งงอน้อยเกินไป จึงทำให้ขนาดที่กำหนดไว้เพื่อให้สอดคล้องกับขนาดอนุภาคของหินโรยทางมากที่สุด คือ รูปร่างไม่เกิน 7 ซม

เมื่อได้ขนาดของรูปร่างที่กำหนดขึ้นว่ามีขนาดโดยประมาณที่ 7 ซม. รูปทรงที่เหมาะสมที่สุดในการจัดทำเครื่องมือทดสอบคือรูปทรงที่มีความเหลี่ยมมุมต่าง ๆ เพราะจะทำให้การเคลื่อนตัวของหินโรยทางรถไฟมีอิสระต่อกันและทำให้ได้ค่าจากการวัดที่แม่นยำ แต่ในความเป็นจริงในปัจจุบันยังไม่สามารถออกแบบขึ้นรูปวัสดุเป็นเหลี่ยมมุมให้ใกล้เคียงกับอนุภาคหินโรยทางธรรมชาติได้มากนัก เหตุผลอีกประการหนึ่งคือ ถึงแม้ว่าจะสามารถทำการขึ้นรูปทรงให้เหมือนอนุภาคหินโรยทางได้ เครื่องมือตรวจวัดนี้อาจไม่สามารถใช้งานได้จริงเนื่องจากไม่สามารถเทียบวัดค่าความถูกต้องของการทำงานเครื่องรับรู้ได้แม่นยำและจะส่งผลให้การสอบวัดความถูกต้องจากการวัดทำได้ยากมากยิ่งขึ้น ดังนั้นจึงเลือกที่จะใช้รูปทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ที่มีขนาด $7 \times 7 \times 7$ ลบ.ซม. เพื่อให้มีขนาดที่เหมาะสมกับการทดสอบ และยังสามารถทำการสอบเทียบค่าความถูกต้องจากการวัดได้อีกด้วย ดังแสดงรูปที่ 1

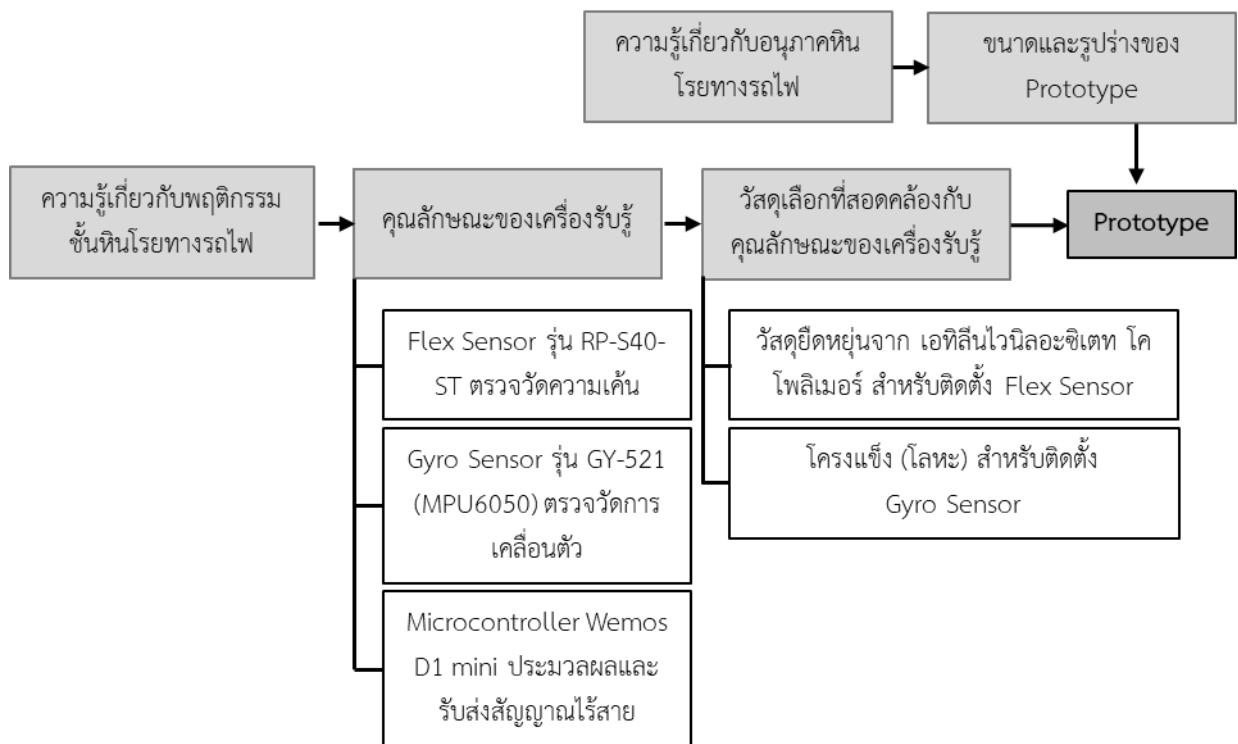


รูปที่ 1 โครงสร้างหลักของ Prototype รูปทรงลูกบาศก์ ขนาด
7x7x7 ลูกบาศก์เซนติเมตร (cm³)

นอกจากขนาดของเครื่องตรวจวัดหรือ Prototype แล้ว สิ่งที่สำคัญต่อมา คือ วัสดุที่เหมาะสมกับการใช้งาน ซึ่งข้อจำกัดและการใช้งานของ Prototype นี้จะขึ้นอยู่กับชนิดของเครื่องรับรู้ที่จะนำมาใช้ เนื่องจากเครื่องรับรู้ที่จะนำมาใช้ประกอบเป็นเครื่องตรวจวัดหรือ Prototype นี้จะมีพฤติกรรมและหลักการทำงานที่แตกต่างกัน โดย flex sensor จะมีพฤติกรรมโดยอาศัยการแปลงค่าเนื่องจากการเปลี่ยนรูปร่าง การอ่านค่าจากการโค้งงอ โดยจะนำมาใช้เพื่อการตรวจวัดค่าความเค้นที่กระทำที่ผิวของเครื่องตรวจวัด ดังนั้นวัสดุที่จะนำมาใช้ต้องเป็นวัสดุที่มีความยืดหยุ่นสูง แข็งแรง และทนทาน ส่วน gyro sensor รุ่น GY-521 (MPU6050) เป็นเครื่องรับรู้ที่จะนำมาใช้เพื่อตรวจวัดมุมที่เปลี่ยนไปของเครื่องตรวจวัดและความเร่งของ Prototype นี้ไม่สามารถยึดติดกับวัสดุที่ผิวของ Prototype นี้ได้เนื่องจากจะทำให้ค่าตรวจวัดนี้เกิดการคาดเคลื่อน ที่เกิดจากการเคลื่อนตัวของโครง Prototype

การเลือกวัสดุเพื่อประกอบเป็น Prototype เพื่อใช้ทดสอบพฤติกรรมนี้ จากที่กล่าวไปคือ เมื่อมีแรงมากระทำที่ผิวของ Prototype จะทำให้วัสดุที่ผิวที่มีความยืดหยุ่นเกิดการเคลื่อนตัว อันเนื่องมาจากแรงกระทำ ซึ่งในบางกรณี Prototype หรือรวมไปถึงอนุภาคหินรอยทางของโครงสร้างทางรถไฟจริงอาจไม่เคลื่อนตัวเนื่องจากแรงกระทำไม่ได้ ดังนั้น gyro sensor รุ่น GY-521 (MPU6050) จึงต้องมีวัสดุและการทำงานที่เป็นอิสระต่อ flex sensor และวัสดุที่จะนำมาใช้ในการประกอบ Prototype นี้ต้องมีลักษณะ โครงสร้างข้างในแข็งแรงเพื่อป้องกันไม่เกิดการเคลื่อนโดยไม่จำเป็น หรือให้เกิดการเคลื่อนตัวเสมือนอนุภาคหินรอยทาง อีกทางหนึ่งวัสดุที่มาห่อหุ้มที่ผิวต้องมีลักษณะยืดหยุ่นเพื่อให้สอดคล้องกับการทำงานของ flex sensor ซึ่ง Prototype นี้จึงมีลักษณะ “อ่อนนอก แข็งใน”

จากหลักการที่ต้องการผิวของ Prototype ที่มีความยืดหยุ่นและโครงสร้างข้างในที่แข็งแรง จึงเลือกที่จะสร้างโครงสร้างภายในจากวัสดุหลักเพื่อคงรูปร่าง ซึ่งจะทำการเป็นลักษณะโครงเหล็กเส้นที่เชื่อมติดจนเป็นรูปร่างสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ที่เปิดพื้นที่ตรงกลางแต่ละด้านไว้ ซึ่งพื้นที่ผิวข้างที่เปิดพื้นที่ไว้จะใช้วัสดุชนิด เอทิลีนไวโนลอะซิเตท โคลิเลเมอร์ มาห่อหุ้ม เพื่อให้มีความยืดหยุ่นและพร้อมสำหรับติดตั้ง flex sensor ภายในช่องว่างภายในของทรงลูกบาศก์จะมีการทำฐานที่แบ่งพื้นที่เป็น 2 ส่วน ส่วนที่ 1 ใช้สำหรับติดตั้งชุดเครื่องรับรู้ gyro sensor และพื้นที่ส่วนที่ 2 จะมีไว้สำหรับพื้นที่เพื่อติดตั้งแหล่งจ่ายพลังงานให้แก่บอร์ดและ sensor



รูปที่ 2 แผนภาพแสดงขั้นตอนการออกแบบ Prototype สำหรับตรวจวัดอุบัติเหตุบนรางรถไฟ

3. คุณสมบัติของเครื่องรับรู้

การตรวจสอบอุบัติเหตุของชั้นหินรอยทางรถไฟ ที่ต้องการตรวจวัดมี 3 พหุติกรรม คือ พหุติกรรมของความเค้นที่เกิดขึ้นภายในชั้นหินรอยทาง พหุติกรรมการเคลื่อนตัวของชั้นหินรอยทาง และพหุติกรรมการพลิกตัว/การหมุนของหินในชั้นหินรอยทางรถไฟ ซึ่งมีเครื่องรับรู้ที่จำเป็นดังนี้

3.1 Flex sensor แบบสี่เหลี่ยม รุ่น RP-S40-ST (40*40 ตารางมิลลิเมตร (mm²))

การตรวจวัดพหุติกรรมความเค้นที่เกิดขึ้นภายในของชั้นหินรอยทาง จะอาศัยการทำงานของ flex sensor แบบสี่เหลี่ยม รุ่น RP-S40-ST (40*40 ตารางมิลลิเมตร) โดยอาศัยหลักการการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่เกิดจากแรงกระทำ แล้วเกิดการแบ่งแรงดันจากตัวต้านทาน จึงอ่านค่าที่ได้จากการทดสอบ โดยหลักการในการเลือก flex รุ่นนี้ เนื่องจากเป็นเครื่องรับรู้ที่มีรูปร่างเป็นแผ่น 4 เหลี่ยมซึ่งเมื่อนำมาใช้ร่วมกับ Prototype ที่มีลักษณะเป็นทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ ตามที่ได้ออกแบบไว้จะทำให้ flex รุ่นนี้ สามารถใช้งานได้แม่นยำกว่า flex แบบเส้น ซึ่งจะทำให้ผลการทดสอบใกล้เคียงกับความเค้นที่เกิดขึ้นต่อ Prototype นี้



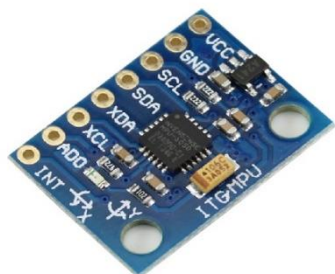
รูปที่ 3 flex sensor แบบสี่เหลี่ยม รุ่น RP-S40-ST

3.2 Gyro Sensor รุ่น GY-521 (MPU6050)

การตรวจวัดพหุติกรรมการเคลื่อนตัวของชั้นหินรอยทางรถไฟ จะอาศัยการทำงานของ gyro sensor รุ่น GY-521 (MPU6050) ดังรูปที่ 4 โดยอาศัยหลักการการทำงานของเครื่องรับรู้ซึ่งเป็นการทำงานที่ตรวจวัดพหุติกรรมจากฟังก์ชันที่มีอยู่แล้วในเครื่องรับรู้รุ่นนี้ ทำให้การตรวจวัดพหุติกรรมนี้สามารถตรวจวัดได้เลยหากมีการเชื่อมต่อกับระบบและแหล่งพลังงาน และหน่วยที่ตรวจวัดได้จะแสดงในหน่วยของความเร่งเชิงเส้น คือ เมตรต่อวินาทีกำลังสอง

การตรวจวัดพหุติกรรมการพลิกตัวหรือการบิดทำมุมของหินรอยทางรถไฟ จะอาศัยการทำงานของ gyro sensor รุ่น GY-

521 (MPU6050) ดังรูปที่ 4 เช่นเดียวกัน ซึ่งเป็นการตรวจวัดพฤติกรรมของหินโรยทางรถไฟจากฟังก์ชันการทำงานของเครื่องรับรู้ได้โดยตรง ทำให้สามารถเชื่อมต่อระบบและอ่านค่าที่ได้ทันที และค่าที่ได้จะแสดงในหน่วยของ องศา



รูปที่ 4 Gyro Sensor รุ่น GY-521 (MPU6050)

3.3 ไมโครคอนโทรลเลอร์ รุ่น Wemos D1 mini

ไมโครคอนโทรลเลอร์ รุ่น Wemos D1 mini ดังรูปที่ 5 เปรียบเสมือนสมองกลของระบบที่ออกแบบ ทำหน้าที่รับและส่งข้อมูล และประมวลผลค่าที่ได้ ซึ่ง WeMos D1 Mini เป็นบอร์ดพัฒนา ESP8266 บนบอร์ดมีชิปสำหรับ USB to TTL อยู่บนบอร์ดแล้ว ทำให้ WeMos D1 Mini สามารถเชื่อมต่อเข้ากับคอมพิวเตอร์ผ่านพอร์ต USB ได้โดยตรง โดยที่ WeMos D1 Mini เป็นบอร์ดที่สามารถใช้ Arduino IDE และ syntax สำหรับ Arduino ในตัวบอร์ดได้มีส่วนส่งสัญญาณ Wifi เพื่อเชื่อมต่อกับระบบและรับส่งข้อมูลแบบไร้สายได้



รูปที่ 5 ไมโครคอนโทรลเลอร์ รุ่น Wemos D1 mini

3.4 ตัวขยายสัญญาณอนาล็อก รุ่น MCP3008

การติดตั้ง flex sensor เข้ากับ Prototype ที่มีรูปทรงลูกบาศก์ทำให้มีพื้นที่สำหรับการตรวจวัดด้วย flex sensor มีทั้งหมด 6 ด้าน แต่มีข้อจำกัดในช่องสัญญาณสำหรับรับค่าอนาล็อกจาก flex sensor บน ไมโครคอนโทรลเลอร์ รุ่น Wemos D1 mini ที่มีช่องเพื่อแปลงค่าสัญญาณอนาล็อกเพียง 1 ช่อง จึงต้องติดตั้ง ตัวขยายสัญญาณอนาล็อก รุ่น MCP3008 เพื่อขยายสัญญาณอนาล็อกให้รองรับค่าที่ได้จาก flex sensor ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ตัวขยายสัญญาณอนาล็อก รุ่น MCP3008

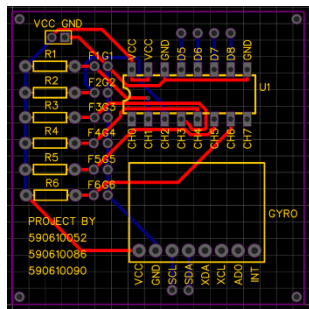
MCP3008 (Microchip) เป็น Chip แปลงสัญญาณ Analog ให้เป็นสัญญาณ Digital ด้วยจำนวน 8 Channels 10 Bit ADC โดยต่อผ่าน SPI interface MCP3008 นี้สามารถต่อใช้งานร่วมกับบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ซึ่งตัวบอร์ด Raspberry Pi สามารถรับได้แต่สัญญาณ Digital เท่านั้น แต่สัญญาณที่เข้ามาเป็น Analog จึงต้องใช้ MCP3008 แปลงสัญญาณก่อนเนื่องจากขา Analog Read ของ NodeMCU มีเพียงขาเดียวคือขา A1 เราจึงไม่สามารถอ่านค่า Analog จากเครื่องรับรู้ได้มากกว่า 1 ช่อง ด้วยข้อจำกัดนี้จึงแก้ไขได้โดยใช้ IC MCP3008 ซึ่งเป็น IC สำหรับอ่านค่า Analog ใช้สายสัญญาณเพียง 4 เส้นสามารถอ่านได้ถึง 8 ช่องในตัวเดียว ค่าที่อ่านได้มีความละเอียด 10 bit คือ ค่าระหว่าง 0-1023 ต่อวงจร ESP8266 MCP3008

โดยเมื่อกำหนดเครื่องรับรู้ที่ต้องการใช้ในการจัดทำเครื่องตรวจวัดพฤติกรรมแล้ว จำเป็นต้องมีการออกแบบเขียนคำสั่งเพื่อรับค่า ประมวลผล และแสดงค่าที่ได้จากการอ่าน โดยการเขียนคำสั่งจะใช้คำสั่งพื้นฐานของเครื่องรับรู้ เพื่อความสะดวกต่อการเรียกใช้งานจากเว็บของ Arduino แล้วจึงออกแบบการเชื่อมต่อวงจร ระหว่างเครื่องรับรู้กับฮาร์ดแวร์อื่นๆ เนื่องจาก Prototype นี้ ประกอบด้วยเครื่องรับรู้หลายตัวทำให้ค่าที่อ่านได้มีจำนวนมาก ซึ่งจำเป็นต้องใช้บอร์ดที่รองรับพอร์ตที่มากขึ้นประกอบกับการใช้งานกับบอร์ดใหม่เพื่อให้สอดคล้องกับความต้องการในการใช้งาน และเพื่อให้ขนาดของ Prototype มีขนาดเล็กมากที่สุด ที่สามารถบรรจุในรูปทรงลูกบาศก์ขนาด 7x7x7 ลูกบาศก์เซนติเมตรได้ จึงต้องทำการเขียนวงจรขึ้นใหม่ในรูปแบบพิมพ์เพื่อลดขนาดของวงจรการต่อเครื่องรับรู้ในกล่อง

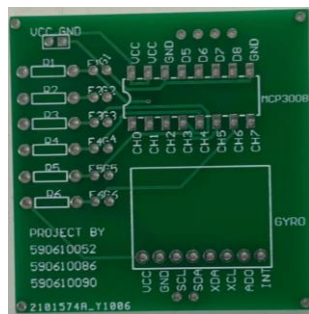
3.5 แผ่นวงจรพิมพ์ PCB

แผ่นวงจรพิมพ์ PCB แบบเขียนเอง ดังรูปที่ 7 เปรียบเสมือนการต่อวงจรทั้งหมดเข้าด้วยกัน ซึ่งโดยปกติแล้วการต่อวงจรจะ

ประกอบไปด้วยเครื่องรับรู้หลักที่ใช้งาน แหล่งพลังงาน หน่วยประมวลผล พอร์ตรับ-ส่งออกข้อมูล ตัวต้านทานและสายไฟ ซึ่งพบว่าวงจรเหล่านี้มีองค์ประกอบของการทำงานที่มาก ทำให้ขนาดของวงจรมีขนาดใหญ่ และทำให้มีข้อจำกัดในการทำงาน จึงเขียนวงจรขึ้นใหม่และสังเคราะห์แผ่นวงจรพิมพ์สำเร็จรูปขึ้นมาใหม่เพื่อลดขนาดของวงจรให้เล็กลงและสามารถประกอบเข้าไปข้างในพื้นที่ยาวของโครง Prototype ได้



รูปที่ 7a แผ่นวงจรพิมพ์ PCB (แบบสำหรับผลิต)



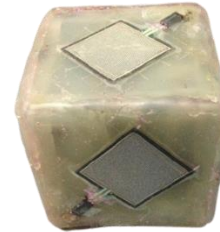
รูปที่ 7b แผ่นวงจรพิมพ์ PCB (แบบสำหรับการใช้งาน)

4. การประกอบชุดเครื่องรับรู้

4.1 โครงหลักและการขึ้นรูปพื้นผิวยืดหยุ่นโดยรอบของ Prototype

โครงร่างหลักของ Prototype ทำขึ้นจากโครงเหล็กเส้นที่มีขนาดเล็ก เป็นทรงสี่เหลี่ยมลูกบาศก์ และถูกแบ่งพื้นที่ภายในไว้เป็น 2 ส่วน เพื่อรองรับกับบอร์ดและแหล่งจ่ายพลังงาน ดังรูปที่

1 และเมื่อได้โครงหลักของ Prototype แล้วจึงนำมาประกอบร่วมกับชุดหล่อแบบผิวของ Prototype จาก เอทิลีนไวไนลอะซีเตท โพลีเมอร์ จึงได้ลักษณะของ Prototype ดังรูปที่ 8



รูปที่ 8 ลักษณะโครงสร้างของ Prototype

4.1.1 เชื่อมต่อเครื่องรับรู้เข้ากับแผ่นวงจรพิมพ์ PCB

4.1.2 เชื่อมต่อแผ่นพิมพ์ PCB เข้ากับไมโครคอนโทรลเลอร์

4.1.3 เชื่อมต่อแผ่นวงจร PCB เข้ากับ flex sensor

4.1.4 ติดตั้งแหล่งจ่ายพลังงาน (ถ่านไฟฉายขนาด 9V)

5. การเขียนคำสั่งสำหรับการใช้งาน Prototype

การได้ชุดเครื่องตรวจวัดหรือ Prototype จำเป็นต้องมีการเขียนคำสั่งเพื่อใช้ในการออกคำสั่งการทำงานให้กับเครื่องตรวจวัดที่ประกอบขึ้นจาก Prototype และเครื่องรับรู้ โดยเลือกใช้ Arduino ซึ่งเป็นบอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ตระกูล AVR ที่พัฒนาแบบ Open Source ตัวบอร์ดถูกออกแบบให้ใช้งานง่าย จึงเหมาะสำหรับผู้ที่ต้องการศึกษาถึงรูปแบบการใช้งานที่ง่าย แต่สามารถได้เครื่องตรวจวัดที่สามารถทำงานได้จริง

การเขียนคำสั่งเพื่อใช้สำหรับงานวิจัยนี้จำเป็นต้องทำการติดตั้งไลบรารีหลัก 3 ส่วนคือ ไลบรารีเพื่อการใช้งานของ ESP8266, ไลบรารีเพื่อการใช้งาน MCP3008 และไลบรารีเพื่อการใช้งาน WIFI Manager และทำการเขียนคำสั่งเพื่อใช้สำหรับเครื่องรับรู้ต่าง ๆ ดังรูปที่ 9

```
Civil_Project | Arduino 1.8.13 Hourly Build 2020/02/19 03:33
File Edit Sketch Tools Help

Civil_Project
1 #include <ESP8266WiFi.h> // เรียกใช้ไลบรารี ESP8266WiFi ไลบรารี Wemos D1 Mini ในการเชื่อมต่อ WiFi
2 #include <WiFiClientSecure.h> // เรียกใช้ไลบรารี WiFiClientSecure ในการจัดการ https กับ server
3 #include <DNSServer.h> // เรียกใช้ไลบรารี DNSServer ในการจัดการ DNS Server เพื่อจัดการกับนามแฝง IP
4 #include <ESP8266WebServer.h> // เรียกใช้ไลบรารี ESP8266WebServer ในการสื่อสารกับ WebServer แทนหมายเลข IP
5 #include <WiFiManager.h> // เรียกใช้ไลบรารี WiFiManager เพื่อจัดตั้งสัญญาณเป็น Access point ในโหมด SmartConfig
6
7 #include <Wire.h> // เรียกใช้ไลบรารี Wire ในการสื่อสารผ่าน I2C ของ MPU6050
8 #include <MCP3008.h> // เรียกใช้ไลบรารี MCP3008 ในการสื่อสารผ่าน SPI ของ MCP3008
9 #define CS_PIN D8 // กำหนดขา D8 ให้เป็นขาเลือกชิป (เป็นสายควบคุมสัญญาณที่เลือกการเชื่อมต่อ)
10 #define CLOCK_PIN D5 // กำหนดขา D5 ให้เป็นขาเลือกชิป (เป็นสายควบคุมสัญญาณที่เลือกการเชื่อมต่อ - สัญญาณ)
11 #define MOSI_PIN D7 // กำหนดขา D7 ให้เป็นขาเลือกชิป (เป็นสายที่เชื่อมต่อสัญญาณข้อมูลจากตัวโมดูลไปยังตัวลูก)
12 #define MISO_PIN D6 // กำหนดขา D6 ให้เป็นขาเลือกชิป (เป็นสายที่เชื่อมต่อสัญญาณจากตัวลูก)
13
14
15 MCP3008 adc(CLOCK_PIN, MOSI_PIN, MISO_PIN, CS_PIN); // เริ่มต้นการตั้งค่า MCP3008 และให้ MCP3008 อ่านค่าจากขา D5, D6, D7, D8
16
17 // MPU6050 Slave Device Address
18 const uint8_t MPU6050SlaveAddress = 0x68; // เรียกอ่านค่า MPU6050 ผ่านที่อยู่อุปกรณ์ที่กำหนด
19
20 // Select SDA and SCL pins for I2C communication
21 const uint8_t scl = D3; // กำหนดขา D3 ให้เป็นขาเลือกชิป (เป็นสายที่เชื่อมต่อสัญญาณ)
22 const uint8_t sda = D4; // กำหนดขา D4 ให้เป็นขาเลือกชิป (เป็นสายที่เชื่อมต่อสัญญาณ)
23
24 int minVal=265; // กำหนดค่า minVal เท่ากับ 265
25 int maxVal=402; // กำหนดค่า maxVal เท่ากับ 402
26 double Angle_x; // เรียกใช้การเชื่อมต่อสัญญาณค่าของ Angle_x
27 double Angle_y; // เรียกใช้การเชื่อมต่อสัญญาณค่าของ Angle_y
28 double Angle_z; // เรียกใช้การเชื่อมต่อสัญญาณค่าของ Angle_z
```

รูปที่ 9 ตัวอย่างคำสั่งของโปรแกรม Arduino

สำหรับการใช้งานส่วนที่สำคัญที่สุด คือการทำให้เครื่องตรวจวัดที่ประดิษฐ์สามารถใช้งานและรับส่งข้อมูลแบบไร้สายได้ ซึ่งถือเป็นส่วนที่สำคัญที่สุดในการวิจัยครั้งนี้ โดยได้เลือกใช้เครื่องรับรู้ ไมโครคอนโทรเลอร์ (Wemos D1 Mini) เนื่องจากมีฟังก์ชันในการรับส่งข้อมูลด้วยสัญญาณ WIFI ให้มีการรับส่งข้อมูลผ่านระบบไร้สายซึ่งจะนำไปแสดงผลบนระบบ Google platform บนระบบ Google Software เนื่องจากเป็นการใช้งานบนระบบซอฟต์แวร์ที่ง่ายและสะดวกต่อการเข้าถึงของผู้คนโดยทั่วไป โดยข้อมูลที่ได้จากแสดงผลบนฐานข้อมูลซึ่งสามารถตรวจสอบได้จากรูปที่ 10

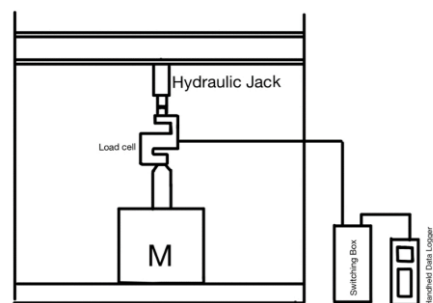


รูปที่ 10 คิวอาร์โค้ดเพื่อใช้สำหรับเข้าถึงแหล่งข้อมูลที่ Prototype ตรวจวัดได้

6. การทดสอบการใช้งาน Prototype และอภิปรายผลการศึกษา

6.1 การทดสอบการใช้งานเพื่อตรวจวัดค่าความเค้นที่เกิดขึ้นต่อผิวนอกของ Prototype

การทดสอบการทำงานของ flex sensor ที่ถูกประกอบติดอยู่กับผิวนอกของ Prototype ที่มีความยืดหยุ่นสูงจะอาศัยหลักการทดสอบโดยการให้น้ำหนักที่ทราบค่าและทำการอ่านค่าที่เครื่องรับรู้ได้ โดยการทดสอบจะออกแบบให้เครื่องทดสอบวางนิ่งอยู่บนพื้นราบแข็งและทำการให้น้ำหนักกระทำที่ผิว ซึ่งการให้น้ำหนักที่ทราบค่าจะใช้เครื่องมือแม่แรงไฮดรอลิกทำหน้าที่ให้น้ำหนักที่ต้องการ ผสมกับการใช้เครื่องมือวัดค่าที่เรียกว่า “Load Cell” รุ่น 101BH แล้วประมวลผลด้วยเครื่องมืออ่านค่า (Datalogger รุ่น TC-32K TypeS2770) การทดสอบแสดงดังรูปที่ 11

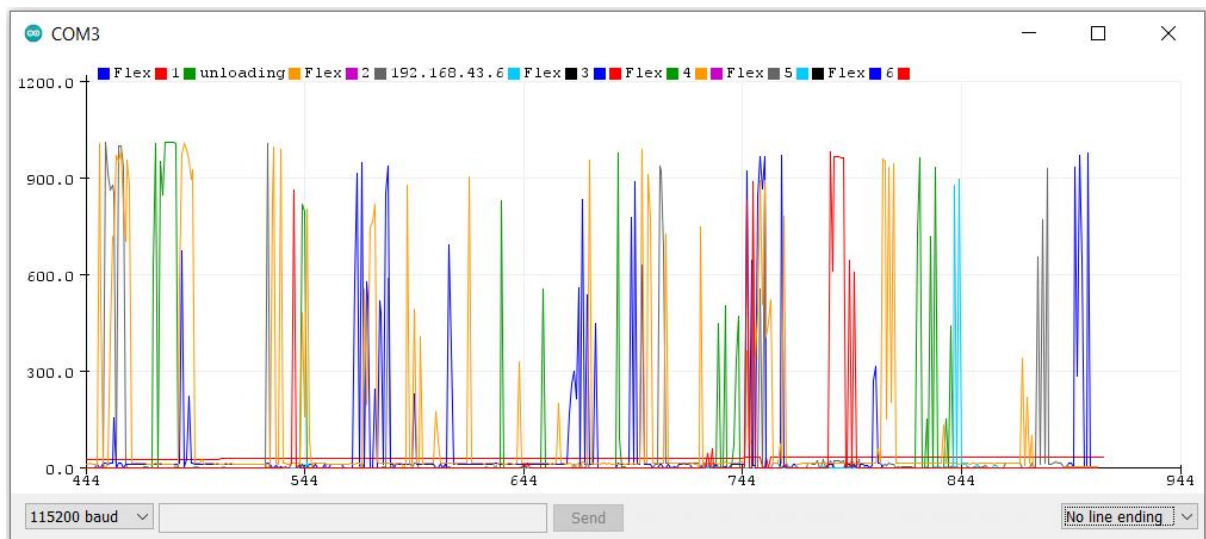


รูปที่ 11 a การออกแบบการทดสอบเพื่อประเมินค่าความเค้นที่เกิดขึ้นต่อผิวนอกของ Prototype เมื่อมีแรงกระทำ



รูปที่ 11b การทดสอบเพื่อประเมินค่าความเค้นที่กระทำต่อผิวนอกของ Prototype เมื่อมีแรงกระทำ

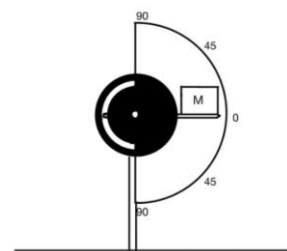
การทดสอบจะกำหนดให้แรงกระทำที่ผิวของ Prototype โดยเพิ่มแรงให้เพิ่มขึ้นเป็นเชิงเส้นแล้วอ่านค่าที่ได้จาก flex sensor ซึ่งจากการที่ผิวของ Prototype มีความยืดหยุ่นเมื่อมีแรงกระทำจะทำให้ผิวของ Prototype เกิดการเปลี่ยนแปลง ซึ่งเมื่อมีการทดสอบการทำงานจะพบว่าเมื่อผิวนอกของเครื่องตรวจวัดหรือ Prototype มีการยุบตัวจะพบว่า flex sensor มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างการโค้งงอและส่งค่าที่อ่านได้มาแสดงผล ดังรูปที่ 12 ซึ่งกราฟที่แสดงแต่ละเส้น แสดงถึงแรงที่กระทำต่อ Flex ในแต่ละด้าน



รูปที่ 12 ตัวอย่างแสดงค่าที่ตรวจวัดได้จากการใช้งานของ flex sensor

6.2 การทดสอบการใช้งานเพื่อตรวจวัดค่าการหมุนรอบแกน

การออกแบบเพื่อใช้ในการทดสอบการอ่านค่ามุมของ Prototype จะกำหนดให้เครื่องตรวจวัดหรือ Prototype วางอยู่บนเครื่องทดสอบที่ติดตั้งจานอ่านค่าองศา โดยมีแขนเหวี่ยงและตัวปรับค่ามุมที่ต้องการ เมื่อทำการติดตั้งเครื่องตรวจวัดหรือ Prototype เข้ากับแขนเหวี่ยง แล้วจึงทำการปรับมุมมองค่าเปลี่ยนค่า แล้วจึงอ่านค่าที่ได้จากเครื่องตรวจเพื่อนำมาหาความสัมพันธ์ โดยการทดสอบจะเป็นไปดังรูปที่ 13



รูปที่ 13a การออกแบบการทดสอบเพื่ออ่านค่ามุมของ gyro sensor



รูปที่ 13b การทดสอบเพื่ออ่านค่าการทำงานของ gyro sensor

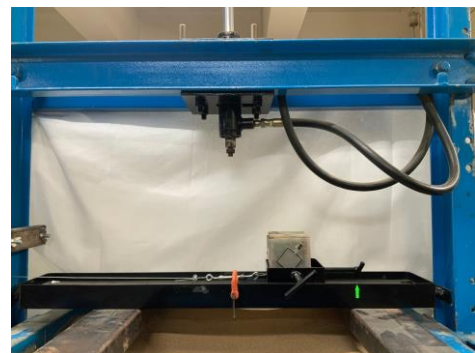
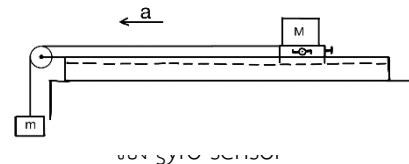
เมื่อทดสอบการหมุนรอบแกนของ Prototype พบว่า Prototype สามารถทำงานได้เมื่อมีการใช้งาน แต่ตรวจวัดมุมมีหน่วยที่ตรวจวัดได้ คือ องศา

6.3 การทดสอบการใช้งานเพื่อตรวจวัดค่าความเร่งอันเนื่องมาจากการเคลื่อนที่

ในการทดสอบเพื่อให้ได้มาซึ่งความเร่งที่อ่านค่าได้จากการเคลื่อนที่ของเครื่องทดสอบหรือ Prototype อาศัยหลักการการเคลื่อนที่จากกฎทางฟิสิกส์ของนิวตันข้อที่ 2 ตามสมการที่ 1 คือ การให้แรงในขนาดคงที่จะทำให้วัตถุเคลื่อนที่ด้วยความเร่ง ทำการออกแบบการทดสอบโดยการให้แรงแก่ Prototype ด้วยการให้น้ำหนักที่ทราบค่ากระทำแก่เส้นเชือกที่คล้องผ่านรอกแล้วปล่อยให้ Prototype เกิดการเคลื่อนที่ตามรางในแนวแกน

$$\sum F = ma \quad (1)$$

การออกแบบการทดสอบ ได้ออกแบบให้ Prototype เคลื่อนที่ตามรางเส้นตรง เนื่องจากต้องการทราบค่าความเร่งในแนวแกนที่ละแกน แล้วจึงทำการให้น้ำหนักกระทำแล้วปล่อยให้วัตถุเคลื่อนที่ ดังแสดงดังรูปที่ 14 เพื่ออ่านค่าความเร่งที่ได้การแสดงผลของข้อมูลเครื่องรับรู้



รูปที่ 14b การทดสอบเพื่ออ่านค่าความเร่งของ gyro sensor

เมื่อทำการทดสอบการเคลื่อนที่ของ Prototype แล้วค่าที่ได้จากการตรวจวัดแสดงในรูปของความเร่งซึ่งแสดงดังรูปที่ 15



รูปที่ 15 ตัวอย่างการแสดงผลค่าจากการทดสอบด้วย Gyro Sensor

จากกราฟที่แสดงดังรูปที่ 15 แสดงผลที่ได้จากการเคลื่อนไหว/ขยับ ของเครื่องตรวจวัดต้นแบบซึ่งกราฟแต่ละเส้นแสดงค่าความเร่งที่เกิดขึ้นในแนวแกน X, Y และ Z

7. สรุป

การประดิษฐ์เครื่องตรวจวัดพฤติกรรมของชั้นหินรอยทางบนพื้นฐานการรับ-ส่งข้อมูลแบบไร้สายสัญญาณ ได้ข้อสรุป ดังนี้

1. เครื่องตรวจวัดพฤติกรรมชั้นหินรอยทางสามารถทำงานและตรวจวัดพฤติกรรมความเค้นที่กระทำต่อ Prototype ได้ โดยอาศัยการตรวจวัดจาก flex sensor แบบสี่เหลี่ยม รุ่น RP-S40-ST โดยเมื่อมีแรงกระทำต่อพื้นผิว flex sensor จะเปลี่ยนรูปร่างให้มีการโค้งงอและแสดงผลการตรวจวัดได้ในรูปของความถี่นาฬิกา

2. เครื่องตรวจวัดพฤติกรรมชั้นหินรอยทางสามารถทำงานและตรวจวัดพฤติกรรมการหมุนรอบแกนและการเคลื่อนตัวของ Prototype ได้ โดยอาศัยการตรวจวัดจาก gyro sensor รุ่น GY-521 (MPU6050) ในการตรวจวัดมุมที่เกิดการหมุน/พลิกตัวและความเร่งที่เกิดขึ้นเมื่อมีการเคลื่อนที่ของ Prototype

3. เครื่องตรวจวัดพฤติกรรมชั้นหินรอยทางสามารถส่งข้อมูลผ่านระบบไร้สายสัญญาณมายังฐานข้อมูล Google sheet ซึ่งสามารถตรวจสอบได้ดังรูปที่ 10

8. ข้อเสนอแนะ

การประดิษฐ์เครื่องตรวจวัดพฤติกรรมชั้นหินรอยทางรถไฟพบว่าสามารถตรวจวัดและแสดงค่าการทำงานผ่านระบบรับส่งข้อมูลแบบไร้สายได้จริง แต่ยังมีข้อของความต้องการของการอ่านค่าที่ได้จากการทดสอบ อาทิเช่น ค่ามุมที่ได้จากการอ่านค่าของ gyro sensor การแปลงค่าความโค้งงอของ flex sensor เป็นน้ำหนักที่กระทำเป็นค่าความเค้นที่เกิดขึ้นต่อผิวของ Prototype ดังนั้นสิ่งที่จำเป็นต้องพัฒนาต่อไป คือการพัฒนาการอ่านค่าความถูกต้องของเครื่องตรวจวัดซึ่งควรมีการทดสอบเพื่อสอบเทียบความถูกต้องให้แก่เครื่องทดสอบ โดยควรอ้างอิง/กำหนดค่าการทดสอบจากค่าจริงที่ประเมินไว้ให้อยู่ในช่วงของการทดสอบของ Prototype

9. กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณบัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ที่ให้คำปรึกษาแนะนำในด้านวิชาการ, ด้านการดำเนินงานวิจัย และให้การสนับสนุนค่าใช้จ่ายในการทำวิจัยให้สำเร็จสมบูรณ์ได้ด้วยดีมา ณ โอกาสนี้

10. เอกสารอ้างอิง

- Blanc, J., Hornych, P., Duong, N. S., Blanchard, J.-Y., & Nicollet, P. (2017). Monitoring of an experimental motorway section. *Road Materials and Pavement Design*, 20(1), 74-89. <https://doi.org/10.1080/14680629.2017.1374997>
- Boonsue, J. (2011). *Basic Knowledge of Rail Engineering*. Phangthai Part.
- Duong, N. S., Blanc, J., & Hornych, P. (2016). Instrumentation of an Innovative Pavement Section on Motorway A10. In J. Aguiar-Moya, A. Vargas-Nordcbeck, F. Leiva-Villacorta, & L. Loria-Salazar (Eds.), *The Roles of Accelerated Pavement Testing in Pavement Sustainability* (pp. 701-714). Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-319-42797-3_46
- Stith, J. C. (2004). Pressure Measurements in Railroad Trackbeds at the Rail/Tie Interface Using Tekscan Sensors (Corpus ID: 53496627) [Master's thesis]. Semantic Scholar.
- Unland, G., & A-Khasawneh, Y. (2009). The influence of particle shape on parameters of impact crushing. *Minerals Engineering*, 22(3), 220-228. <https://doi.org/10.1016/j.mineng.2008.08.008>
- Zhang, X., Zhao, C., & Zhai, W. (2019). Importance of load frequency in applying cyclic loads to investigate ballast deformation under high-speed train loads. *Soil Dynamics and Earthquake Engineering*, 120, 28-38. <https://doi.org/10.1016/j.soildyn.2019.01.023>