

UTK

RESEARCH JOURNAL

Vol.16 No.1 January - June 2022

วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ

ปีที่ 16 เล่มที่ 1 มกราคม - มิถุนายน 2565

ISSN (Online) 2651 - 2130

ISSN 1906 - 0874

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

Rajamangala University of Technology Krungthep



วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
Rajamangala University of Technology Krungthep Research Journal
ปีที่ 16 ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน 2565 Vol 16 No.1 January - June 2021

เจ้าของ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ที่ปรึกษากองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.พิชัย จันทน์มณี

ศาสตราจารย์ ดร.ชัยยุทธ ชินณะราศรี

ศาสตราจารย์สมชาย วงศ์วิเศษ

ดร.สิริเบญญา ก่อพัฒนา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นพรัตน์ ภัยวิมุตติ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สายชล ชุตติเจื้อจัน

ประภาพร ร้อยพรมมา

นางสาวรุ่งทิพา วงศ์ไพศาลฤทธิ์

รักษาราชการแทน อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยี
ราชมงคลกรุงเทพ

กรรมการสภาวิชาการมหาวิทยาลัย

กรรมการสภามหาวิทยาลัย

กรรมการสภามหาวิทยาลัย

รองอธิการบดี

ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา

รองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา

รองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา

บรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุธรรม ศิวารุช

รองผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา

ผู้ช่วยบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.กนกวรรณ จ้าวสุวรรณ

ดร.กฤษณ์ สงวนพวง

ผู้ช่วยผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา

ผู้ช่วยผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.โกสินทร์ จันทน์ไทย

ศาสตราจารย์กิตติคุณ ดร.อจธรา จันทน์ฉาย

รองศาสตราจารย์ ดร.นเรศเรษฐ พัฒนเดช

รองศาสตราจารย์ ดร.บวรโชค ผู้พัฒน์

รองศาสตราจารย์ ดร.วรพจน์ ศรีวงศ์กุล

รองศาสตราจารย์ ดร.ชาญชัย ทองโสภะ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประยูร สุรินทร์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุราษฎร์ พรหมจันทร์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กมล จิระเสรีอมรกุล

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คมกริช ละวรรณวงศ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีรพล จิระจิต

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรนาล ไกรภู

ดร.ประกอบ ขาติภักดิ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

มหาวิทยาลัยมหิดล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

เจ้าหน้าที่ประจำวารสาร

นางสาวเกตุวดี อุเทน

นางนาฏนภา จรเชื้อ

นางสาวขวัญใจ ยุกศิริรัตน์

นางสาวอัจฉรา จินดาจ้านง

นายวันนิวัติ วันทนา

นางวิไรรัตน์ ราษฎร์สภา

นางจันทนา สังข์อู่

นางสาวกนกวรรณ วอนเพียร

นางสาววันทนา ประดิธนาธรรม

นายวีระวัฒน์ ราษฎร์สภา

บทความที่ลงตีพิมพ์ในวารสารเป็นความคิดเห็นของผู้เขียน กองบรรณาธิการไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป

ความเป็นมา

วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ISSN 1906 - 0874 เป็นวารสารวิชาการของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ โดยสถาบันวิจัยและพัฒนา ได้มีการจัดทำวารสารอย่างต่อเนื่องตั้งแต่พ.ศ. 2550 จนถึงปัจจุบัน ซึ่งเป็นวารสารที่อยู่ในฐานข้อมูลของศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารไทย (TCI) กลุ่มที่ 2 ด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยเผยแพร่เป็นราย 6 เดือน ซึ่งตีพิมพ์ปีละ 2 ฉบับ (ฉบับละ 10-12 บทความ) และมีการดำเนินงาน จัดพิมพ์บทความประเภทต่าง ๆ ได้แก่ บทความวิจัย (Research paper) และ บทความวิชาการ (Academic paper)

บทความที่ได้รับการตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ เป็นบทความที่สร้างองค์ความรู้และมีคุณภาพในทางวิชาการสามารถนำไปใช้ประโยชน์เพื่อการอ้างอิงได้ เพราะผ่านการพิจารณาถ่วงถ่วงและประเมินคุณภาพจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้อง จากหลากหลายสถาบัน 3 ท่าน ซึ่งเป็นการประเมินแบบไม่แสดงชื่อผู้แต่งและผู้ประเมิน (Double blinded) ก่อนที่จะเผยแพร่สู่สาธารณชน จึงทำให้วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ เป็นวารสารวิชาการที่มีคุณภาพ

กองบรรณาธิการ วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ จัดทำวารสารเป็นรูปเล่มฉบับสมบูรณ์และเผยแพร่ให้กับสถาบันการศึกษาต่าง ๆ ทั่วประเทศไทย นอกจากนี้ยังสามารถสืบค้นเพื่ออ้างอิงหรืออ่านบทความที่เปี่ยมด้วยองค์ความรู้ได้ที่ <https://www.tci-thaijo.org/index.php/rmutk>

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเผยแพร่บทความวิจัย (Research paper) และบทความวิชาการ (Academic paper) ที่มีคุณภาพของอาจารย์นักวิจัย นักวิชาการทั้งภายในและภายนอกมหาวิทยาลัย ในสาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สาขาอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง และสาขาต่าง ๆ ที่มีการบูรณาการข้ามศาสตร์ที่เกี่ยวข้องกับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีเพื่อให้เกิดองค์ความรู้ใหม่ที่ทันสมัย ได้แก่
 - 1.1. Environment Chemistry
 - 1.2 General Engineering
 - 1.3. Applied Mathematics
 - 1.4 Renewable Energy, Sustainability and the Environment
 - 1.5 Biomaterials

2. เพื่อส่งเสริมและเป็นกลไกการขับเคลื่อนงานวิจัย ทำให้เกิดผลงานวิจัยที่เข้าไปสู่การพัฒนาต่อภาคสังคม ชุมชน และนำไปประยุกต์ใช้ในการเรียนการสอนเพื่อต่อยอด และเกิดความเชื่อมโยงระหว่างงานวิจัย งานวิชาการ ซึ่งนำมาสู่การเกิดประโยชน์ต่อมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ และตอบสนอง ต่อการพัฒนาเทคโนโลยีของประเทศไทย

นโยบายการรับบทความ

กองบรรณาธิการวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ มีความยินดีที่จะรับบทความจากอาจารย์ นักวิจัย นักวิชาการทั้ง ภายในและภายนอกมหาวิทยาลัย ที่เขียนเป็นภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษ ซึ่งผลงานที่ส่งมาขอตีพิมพ์ต้องไม่เคย เผยแพร่ในสิ่งพิมพ์อื่นใดมาก่อน และต้องไม่อยู่ในระหว่างการพิจารณาของวารสารอื่น

การละเมิดลิขสิทธิ์ถือเป็นความรับผิดชอบของผู้ส่งบทความโดยตรง บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ต้องผ่านการพิจารณาจากคณะกรรมการคุณภาพจากผู้ทรงคุณวุฒิ และได้รับความเห็นชอบจากกองบรรณาธิการ

ข้อความที่ปรากฏอยู่ในแต่ละบทความที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการเล่มนี้ เป็นความคิดเห็นส่วนตัวของผู้เขียนแต่ละ ท่าน ไม่เกี่ยวข้องกับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพแต่อย่างใด ความรับผิดชอบด้านเนื้อหา และการตรวจร่างบทความแต่ละบทความเป็นของผู้เขียนแต่ละท่าน หากมีความผิดพลาดใด ๆ ผู้เขียน แต่ละท่านจะต้องรับผิดชอบต่อบทความของตนเองแต่ผู้เดียว

กองบรรณาธิการขอสงวนสิทธิ์มิให้นำเนื้อหา หรือข้อคิดเห็นใด ๆ ของบทความในวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ ไป เผยแพร่ก่อนได้รับอนุญาตจากกองบรรณาธิการ อย่างเป็นลายลักษณ์อักษร ผลงานที่ได้รับการตีพิมพ์ถือเป็น ลิขสิทธิ์ของวารสาร

ผู้ประสงค์จะส่งบทความกรุณาอ่านรายละเอียดการส่งบทความที่คำแนะนำสำหรับผู้เขียนบทความ ซึ่งได้ระบุไว้ในเล่มวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ หรือ <https://www.tci-thaijo.org/index.php/rmutk> และสามารถส่ง Online ได้โดยกรอกรายละเอียดให้ครบถ้วนในระบบการส่งบทความ Online หากต้องการ สอบถามข้อมูลเพิ่มเติม ติดต่อได้ที่

สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
เลขที่ 2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ 10120
โทร. 0 2286 9600 ต่อ 1177 โทรสาร 0 2287 9684
E-mail: utk_research_journal@mail.rmutk.ac.th
www.rdi.rmutk.ac.th

กำหนดการเผยแพร่

ปีละ 2 ฉบับ (ทุก 6 เดือนต่อฉบับ)

ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม – มิถุนายน

ฉบับที่ 2 เดือนกรกฎาคม – ธันวาคม

การเผยแพร่

เผยแพร่ผ่านระบบออนไลน์

<https://www.tci-thaijo.org/index.php/rmutk>

สารบัญ

	หน้า
การประยุกต์การแจกแจงอค์สองพารามิเตอร์สำหรับแผนการสุ่มตัวอย่างเพื่อการยอมรับ Application of Two-Parameter Akash distribution for Acceptance Sampling Plan.....	1
กิตติพงศ์ กลิ่นจันทร์, กนิษฐา ยี่มนาค, รังสฤษฎ์ อินทรโม	
ฟังก์ชันฤดูกาลและแนวโน้มในตัวแบบเบย์แบบอนุกรมเวลาที่เหมาะสมสำหรับวิเคราะห์ผลผลิตและราคาข้าว ในประเทศไทยอย่างมีประสิทธิภาพ A Functions for Seasonality and Trend in Optimal Time Series Bayesian Models for the Efficient Analysis of Rice Price and Yield in Thailand.....	14
พรพิศ ศิริมา, พิษณุ ทองขาว, สุณีย์ สัมมาทัด, พรณิการ์ มีอ่อน, สุทธิพงษ์ จำรูญรัตน์	
อัลกอริทึมของ Dijkstra สำหรับการแก้ปัญหาเส้นทางที่สั้นที่สุดบนเครือข่ายภายใต้ตัวเลขฟัซซี่สี่เหลี่ยมคางหมู Dijkstra's Algorithm for Solving the Fuzzy Shortest Path Problem on Networks under Trapezoidal Fuzzy Number.....	30
ดรุณี หันวิสัย	
การจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคโดยโปรแกรม VISSIM เพื่อปรับปรุงมาตรการควบคุมการจราจร บริเวณจุดตัดผ่านทางรถไฟด้วยสัญญาณไฟจราจรแบบพรีเอมชัน Traffic Microsimulation Using VISSIM to Improve Traffic Control Measures at Railway Intersection by Preemption System.....	42
ธวัชชัย ปัญญาคิด, อำพล การุณสุนทวงษ์	
การควบคุมธาตุอาหารสำหรับการปลูกเมล่อนระบบไฮโดรโปนิิกส์แบบดาวกระจายด้วยอินเทอร์เน็ทของสรรพ สิ่งและโครงข่ายประสาทเทียม A Fertilizer Control for Mellon in Star-Topology Hydroponic System using IOT and Artificial Neuron Network.....	55
อภิศักดิ์ พรหมฝาย, ดอนสัน ปงผาบ, สุดาพรรค์ อริยพฤกษ์	

การพัฒนาระบบสืบค้นที่มาของลายผ้าย้อนกรมด้วยเทคนิคการเรียนรู้เชิงลึก

A Development of Information Retrieval System of Indigo Fabric Pattern with Deep Learning Techniques.....

68

ชารินทร์ ไชยชนะ, สิตลา วงษ์ภาพสินธุ์, ฉัตรชัย เจียมรัมย์

An Analysis of Customer Satisfaction for Bus Air Conditioning Service Centers by Multiple Linear Regression.....

84

Tara Khonglumtan, Parinya Srisattayakul

การกำจัดไอออนสังกะสีจากน้ำเสียเส้นด้ายยางโดยใช้เทคนิคการตกตะกอนทางเคมี

Removal of Zinc Ions from Rubber Thread Wastewater using Chemical Precipitation Techniques.....

99

ชนิษฐา เจริญลาภ, ฉันทมนิ พูลเจริญศิลป์

อิทธิพลเถ้าขานอ้อยต่อความแข็งแรงอัดในการขึ้นรูปคอนกรีต

Influence of Cane Bagasse Ash to Compression Strength on Concrete Forming..... 111

ณัฐพงษ์ ศรีสุภา

การพัฒนาเทคนิคการติดตั้งแบบหล่อสำหรับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดใหญ่

Development of Formwork Installation Techniques for Large rectangular Cross-section Reinforced Concrete Columns.....

120

ชำนาญ น้อยพิทักษ์, สนธยา ทองอรุณศรี, วันดี พูนพจน์มาศ

การปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อลดความสูญเสียในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์

Improvement of production process for waste reduction in auto parts manufacturing industry.... 132

การประยุกต์การแจกแจงอค์สองพารามิเตอร์สำหรับแผนการสุ่มตัวอย่าง
เพื่อการยอมรับ
Application of Two-Parameter Akash distribution for Acceptance
Sampling Plan

กิตติพงษ์ กลิ่นจันทร์^{1,*} กนิษฐา ยิ้มนาค¹ รุ่งสฤษฎ์ อินทรโม²
Kittipong Klinjan^{1*}, Kanittha Yimnak², Rungsarit Intaramo²

¹ภาควิชาคณิตศาสตร์และวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี

²สาขาวิชาคณิตศาสตร์และสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ จังหวัดพัทลุง

¹Department of Applied Statistics, Faculty of Science and Technology,
Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathum Thani, Thailand

²Department of Mathematics and Statistics, Faculty of Science, Thaksin University, Phatthalung, Thailand

Corresponding Author: Tel: 0 2549 4137-8, E-mail: kittipong_k@rmutt.ac.th

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาแผนการสุ่มตัวอย่างเพื่อการยอมรับภายใต้การแจกแจงอค์สองพารามิเตอร์และการทดสอบอายุการใช้งานที่กำหนด โดยนำเสนอการคำนวณขนาดตัวอย่างต่ำสุดสำหรับการทดสอบอายุการใช้งานของสินค้า ฟังก์ชันลักษณะเฉพาะปฏิบัติการ ค่าความเสี่ยงของผู้ผลิตสำหรับแผนการสุ่มตัวอย่างที่พัฒนาขึ้น การประยุกต์กับข้อมูลจริง พร้อมเปรียบเทียบแผนการสุ่มตัวอย่างเพื่อการยอมรับที่พัฒนาขึ้นกับแผนการสุ่มตัวอย่างเพื่อการยอมรับภายใต้การแจกแจงอค์พารามิเตอร์เดียว ผลการศึกษาพบว่าแผนการสุ่มตัวอย่างที่พัฒนาขึ้นมานั้นมีประสิทธิภาพในการตัดสินใจที่จะยอมรับหรือปฏิเสธสินค้า

คำหลัก : แผนการสุ่มตัวอย่างเพื่อการยอมรับ การแจกแจงอค์สองพารามิเตอร์ ฟังก์ชันลักษณะเฉพาะปฏิบัติการ

ABSTRACT

In this study, an acceptance sampling plan (ASP) is proposed under a two-parameter Akash distribution and truncated life test. The research represents the minimum sample sizes for the lifetime testing, operating characteristic function, producer's risk for the developed sampling plan and the application for a real data set. In addition, the developed method is

compared with an ASP based on one-parameter Akash distribution. The results showed that the proposed ASP is effective in deciding whether to accept or reject the product lot.

Keywords : Acceptance sampling plan, Two-parameters Akash distribution, Operating characteristic function

1.บทนำ

แผนการสุ่มตัวอย่างเพื่อการยอมรับ (Acceptance sampling plan หรือ ASP) เป็นกระบวนการทางสถิติในการตรวจสอบคุณภาพของผลิตภัณฑ์หรือสินค้า เพื่อเป็นข้อมูลในการตัดสินใจที่จะยอมรับหรือปฏิเสธของผลิตภัณฑ์หรือสินค้าก่อนส่งมอบสินค้าให้กับลูกค้าหรือผู้บริโภค แผนการสุ่มตัวอย่างเป็นการตรวจสอบคุณภาพสินค้าโดยการสุ่มตัวอย่างของสินค้าเพียงบางส่วนเพื่อเป็นตัวแทนของสินค้าทั้งหมด เนื่องจากสินค้าบางชนิดไม่สามารถตรวจสอบคุณภาพของสินค้าทุก ๆ ชิ้นได้ ขนาดตัวอย่างของสินค้าที่สุ่มมาควรมีขนาดตัวอย่างที่เหมาะสม กล่าวคือ ไม่มากหรือน้อยเกินไป สินค้าบางชิ้นที่เป็นสินค้าที่ไม่มีมาตรฐานหรือไม่มีคุณภาพอาจจะปะปนไปในล็อตสินค้าเมื่อลูกค้าทำการตัดสินใจยอมรับหรือปฏิเสธสินค้านั้น ๆ ซึ่งสามารถแบ่งความเสี่ยงออกได้เป็นสองชนิดได้แก่ ความเสี่ยงของผู้บริโภค คือ ความเสี่ยงที่ลูกค้าจะยอมรับสินค้าทั้งที่ควรจะปฏิเสธสินค้า และ ความเสี่ยงของผู้ผลิต คือ ความเสี่ยงที่ควรจะถูกปฏิเสธสินค้าจากลูกค้าทั้งที่ควรจะยอมรับสินค้า [1] การยอมรับล็อตสินค้า คือ การยอมรับจำนวนของสินค้าหรือผลิตภัณฑ์ในล็อตนั้นที่จะเสื่อมสภาพหรือหมดอายุการใช้งานก่อนเวลาที่กำหนดไว้ โดยกระบวนการดังกล่าวจึงเริ่มจากการคำนวณหาขนาดตัวอย่างน้อยที่สุดสำหรับการทดสอบอายุการใช้งานของสินค้า ที่จะหมดอายุภายในเวลาที่กำหนดหรือ

คาดการณ์ไว้ (Truncated lifetime test) ซึ่งแผนการสุ่มตัวอย่างเพื่อการยอมรับจะต้องทำการศึกษาในประเด็นของ จำนวนตัวอย่าง (n) ที่น้อยที่สุดสำหรับ ASP จำนวนสินค้าหรือผลิตภัณฑ์ที่เสื่อมคุณภาพก่อนระยะเวลาที่กำหนด (c) ระยะเวลามากที่สุดในการทดสอบอายุการใช้งานของสินค้า (t) อัตราส่วนของค่า t/μ_0 เมื่อ μ_0 คืออายุการใช้งานเฉลี่ยของผลิตภัณฑ์ที่กำหนดไว้ ASP ภายใต้ การตัดปลายของอายุการใช้งานของสินค้ามีการพัฒนาอย่างแพร่หลาย เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการในการตรวจสอบคุณภาพสินค้า ตัวอย่างเช่น Sobel และ Tischendorf [2] พัฒนา ASP ภายใต้การแจกแจงแบบเลขชี้กำลัง (Exponential distribution) Kantam และคณะ[3] พัฒนา ASP ภายใต้การแจกแจงลอจิสติก-โลจิสติก (Log-logistic model) Al-Omari และคณะ [4] พัฒนา ASP ภายใต้การแจกแจงอค์ซพารามิเตอร์เดียว (One-parameter Akash distribution หรือ OAD) สำหรับการแจกแจงอค์ซพารามิเตอร์เดียวนำเสนอครั้งแรกโดย Shanker [5] ต่อมา Shanker และ Shukla [6] ได้พัฒนาการแจกแจง อค์ซสองพารามิเตอร์ (Two-parameters Akash distribution; TAD) ซึ่งการแจกแจงดังกล่าวมีลักษณะยืดหยุ่นและมีรูปร่างที่หลากหลายใกล้เคียงกับข้อมูลจริงเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเพิ่มจำนวนพารามิเตอร์ งานวิจัยในครั้งนี้จึงนำเสนอ ASP ภายใต้การแจกแจง TAD และสมบัติทางสถิติบางประการ การดำเนินการศึกษาจะ

ทำการคำนวณขนาดตัวอย่างที่น้อยที่สุด สำหรับ ASP ภายใต้ TAD ฟังก์ชันลักษณะเฉพาะปฏิบัติการ (Operating characteristic function : OCF) ความเสี่ยงของผู้ผลิต (Producer's risk) การประยุกต์ ASP ที่พัฒนาขึ้นกับข้อมูลจริง และการสรุปผลการศึกษา

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

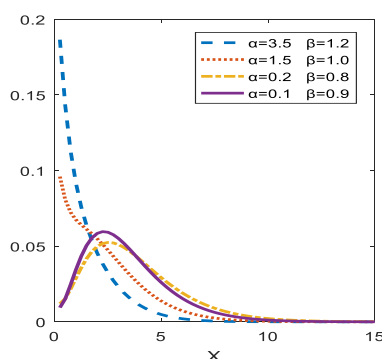
2.1 การแจกแจงอักษสองพารามิเตอร์

(Two-parameters Akash distribution : TAD)

Shanker และ Shukla [6] เสนอ TAD โดยกำหนดให้ X เป็นตัวแปรสุ่มและมีการแจกแจงแบบ TAD ด้วยค่าพารามิเตอร์ α และ β ($X \sim TAD(\alpha, \beta)$) ฟังก์ชันความหนาแน่นความน่าจะเป็น (Probability density function: PDF) และฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นสะสม (Cumulative distribution function: CDF) แสดงดังสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ

$$f(x; \alpha, \beta) = \frac{\beta^3}{\alpha\beta^2 + 2} (\alpha + x^2) e^{-\beta x} \quad (1)$$

$$F(x; \alpha, \beta) = 1 - \left[1 + \frac{\beta x (\beta x + 2)}{\alpha\beta^2 + 2} \right] e^{-\beta x} \quad (2)$$



เมื่อ $x > 0$ และ $\alpha, \beta > 0$ ฟังก์ชันการรอดชีพ (Survival function : $S(x)$) และฟังก์ชันพิบัติ (Hazard function : $H(x)$) ของ TAD แสดงดังสมการที่ (3) และ (4) ตามลำดับ

$$S(x) = \left[1 + \frac{\beta x (\beta x + 2)}{\alpha\beta^2 + 2} \right] e^{-\beta x} \quad (3)$$

$$H(x) = \frac{\beta^3 (\alpha + x^2)}{\beta x (\beta x + 2) + (\alpha\beta^2 + 2)} \quad (4)$$

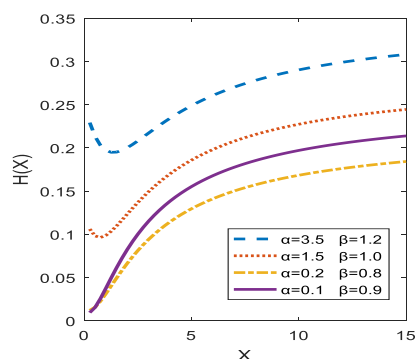
เมื่อ $x > 0$ และ $\alpha, \beta > 0$ กราฟแสดงลักษณะของ PDF และ $H(x)$ แสดงดังภาพที่ 1 โมเมนต์รอบที่ r ของ TAD แสดงดังสมการที่ (5)

$$E(x^r) = \int_0^\infty x^r \frac{\beta^3}{\alpha\beta^2 + 2} (\alpha + x^2) e^{-\beta x} dx$$

$$E(x^r) = \frac{r! \{ \alpha\beta^2 + (r+1)(r+2) \}}{\beta^r (\alpha\beta^2 + 2)} ; r = 1, 2, 3, \dots \quad (5)$$

ค่าเฉลี่ย (Mean) ของการแจกแจงดังกล่าวแสดงดังสมการที่ (6)

$$E(x) = \frac{\{ \alpha\beta^2 + 6 \}}{\beta (\alpha\beta^2 + 2)} \quad (6)$$



ภาพที่ 1 PDF และ $H(x)$ ของ TAD เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ α และ β ที่แตกต่างกัน

2.2 แผนการสุ่มตัวอย่างเพื่อการยอมรับภายใต้การแจกแจงอค์สองพารามิเตอร์

กำหนดให้อายุการใช้งาน (Lifetime) ของสินค้าหรือผลิตภัณฑ์มีการแจกแจงแบบ TAD ดังสมการที่ (1) และกำหนดตัวแปรและสัญลักษณ์ดังนี้

t คือ ระยะเวลามากที่สุดในการทดสอบอายุการใช้งานของสินค้า

t_0 คือ ระยะเวลาในการทดสอบอายุการใช้งานของสินค้าที่คาดการณ์ไว้

c คือ จำนวนสินค้าที่เสื่อมสภาพการใช้งานก่อนกำหนด

μ คือ อายุการใช้งานเฉลี่ยของสินค้าที่แท้จริง

μ_0 คือ อายุการใช้งานเฉลี่ยของสินค้าที่คาดการณ์ไว้

ในการทดสอบอายุการใช้งานของสินค้าและผลิตภัณฑ์จะหมดอายุการใช้งาน ณ เวลา t_0 เมื่ออายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์มีค่าอยู่ในช่วง $[0, t]$ ลอทสินค้าที่จะนำมาทดสอบจะได้รับการยอมรับหากจำนวนสินค้าที่เสื่อมสภาพการใช้งานก่อน

กำหนดมีจำนวนไม่เกินไปกว่าจำนวนที่กำหนด (c) ภายใต้สมมติฐานว่า ลอทสินค้ามีขนาดใหญ่ กำหนดให้ ASP จะใช้ภายใต้การแจกแจงความน่าจะเป็นแบบทวินาม หากกำหนดให้ $1 - P^*$ เป็นความเสี่ยงที่ลูกค้าหรือผู้ซื้อจะได้รับลอทสินค้าที่เป็นของเสียภายใต้สมมติฐาน $\mu < \mu_0$ กล่าวคืออายุเฉลี่ยของสินค้าที่แท้จริง (μ) มีค่าไม่เกินอายุการใช้งานที่กำหนด (μ_0) ซึ่งความน่าจะเป็นดังกล่าวจะน้อยกว่า $1 - P^*$ การทดสอบสมมติฐานดังกล่าว จำเป็นต้องคำนวณหาขนาดตัวอย่าง (n) ที่น้อยที่สุด ที่เหมาะสม ซึ่งการคำนวณหาขนาดตัวอย่างที่เหมาะสมดังสมการที่ (7)

$$\sum_{i=0}^c \binom{n}{i} p^i (1-p)^{n-i} \leq 1 - P^* \quad (7)$$

เมื่อ c คือ จำนวนผลิตภัณฑ์ที่ชำรุดก่อนกำหนด โดยที่ $P^* \in (0,1)$ และ $p = F(t; \mu_0)$ คือความน่าจะเป็นที่สินค้าหรือผลิตภัณฑ์จะชำรุดภายในเวลา t ซึ่งจะสัมพันธ์กับอัตราส่วน t / μ_0 ค่าของ p แสดงดังสมการที่ (8)

$$p = 1 - \left[1 + \frac{\beta \left(\frac{\alpha\beta^2 + 6}{\beta(\alpha\beta^2 + 2)} \left(\frac{d}{\mu / \mu_0} \right) \right) \left(\beta \left(\frac{\alpha\beta^2 + 6}{\beta(\alpha\beta^2 + 2)} \left(\frac{d}{\mu / \mu_0} \right) \right) + 2 \right)}{\alpha\beta^2 + 2} \right] e^{-\beta \left(\frac{\alpha\beta^2 + 6}{\beta(\alpha\beta^2 + 2)} \left(\frac{d}{\mu / \mu_0} \right) \right)} \quad (8)$$

เมื่อกำหนดให้ $\mu_0 = \frac{\{\alpha_0\beta_0^2 + 6\}}{\beta_0(\alpha_0\beta_0^2 + 2)}$ หากผลิตภัณฑ์ชำรุด ภายในเวลา t มีจำนวนไม่เกิน c หรืออาจกล่าวได้ว่า $F(t; \mu) < F(t; \mu_0)$

การคำนวณหาขนาดตัวอย่างที่มีขนาดน้อยที่สุดเพื่อการยอมรับภายใต้สมการที่ (7) คำนวณโดยกำหนด $t / \mu_0 = 0.628, 0.942, 1.257, 1.571, 2.356, 3.141, 3.927, 4.712$ และ $P^* = 0.75, 0.90, 0.95$

และ 0.99 ตามลำดับ ค่าของ t/μ_0 และ P^* กำหนดโดยการอ้างอิงจาก Al-Nasser และ Al-Omari [7] Baklizi และ Masri [8] แล Kantam, Rosaiah และ Rao [3] สำหรับฟังก์ชันลักษณะเฉพาะปฏิบัติการ (Operating characteristic function) ของ ASP $(n, c, t/\mu_0)$ หรือความน่าจะเป็นในการยอมรับล็อตสินค้า เมื่อ μ/μ_0 ดังสมการที่ (9)

$$\begin{aligned} OC(p) &= P(\text{Accepting a lot} | \mu < \mu_0) \\ &= \sum_{i=0}^c \binom{n}{i} p^i (1-p)^{n-i} \end{aligned} \quad (9)$$

เมื่อ $p = F(t_0; \mu)$ ส่วนความเสี่ยงของผู้ผลิต หรือ ความเสี่ยงที่ควรจะถูกปฏิเสธสินค้าจากลูกค้าทั้งที่ควรจะยอมรับสินค้า $\mu > \mu_0$ ดังสมการที่ (10)

$$p = 1 - \left[1 + \frac{\beta \left(\frac{\alpha\beta^2 + 6}{\beta(\alpha\beta^2 + 2)} \left(\frac{d}{\mu/\mu_0} \right) \right) \left(\beta \left(\frac{\alpha\beta^2 + 6}{\beta(\alpha\beta^2 + 2)} \left(\frac{d}{\mu/\mu_0} \right) \right) + 2 \right)}{\alpha\beta^2 + 2} \right] e^{-\beta \left(\frac{\alpha\beta^2 + 6}{\beta(\alpha\beta^2 + 2)} \left(\frac{d}{\mu/\mu_0} \right) \right)} \quad (12)$$

หากกำหนดให้ λ คือ ค่าความเสี่ยงของผู้ผลิตภายใต้แผนการสุ่มตัวอย่างที่พัฒนาขึ้น ค่าของ μ/μ_0 คือ อัตราส่วนน้อยที่สุดที่ยืนยันได้ว่าค่าเสี่ยงของผู้ผลิตมีค่าไม่เกิน λ เมื่อ λ คือ จำนวนเต็มบวกที่มีค่าน้อยที่สุดที่ทำให้ค่า

$$p = F\left(\frac{t}{\mu_0} \frac{\mu_0}{\mu}\right) \text{ สอดคล้องกับสมการที่ (13)}$$

$$\begin{aligned} PR &= P(\text{Reject a lot}) \\ &= \sum_{i=c+1}^n \binom{n}{i} p^i (1-p)^{n-i} \end{aligned} \quad (10)$$

เนื่องจาก $p = F\left(\frac{t}{\mu_0} \frac{\mu_0}{\mu}\right)$ คือ ฟังก์ชันของ μ/μ_0 ซึ่ง μ/μ_0 คือ จำนวนบวกน้อยที่สุดที่จะทำให้ p มีความสัมพันธ์ตามสมการที่ (11)

$$\sum_{i=c+1}^n \binom{n}{i} p^i (1-p)^{n-i} \leq \mathfrak{R} \quad (11)$$

เมื่อ $\mathfrak{R}$ คือ ค่าความเสี่ยงของผู้ผลิต และ p แสดงดังสมการที่ (12)

$$\sum_{i=c+1}^n \binom{n}{i} p^i (1-p)^{n-i} \leq \lambda \quad (13)$$

3. วิธีการดำเนินการวิจัย

3.1 ศึกษาประสิทธิภาพของแผนการสุ่มตัวอย่างเพื่อการยอมรับโดยการกำหนดให้อายุการใช้งานของสินค้ามีการแจกแจงเป็นแบบ TAD เมื่อกำหนดพารามิเตอร์ในการศึกษาครั้งนี้ คือ $\alpha = 3.5$ และ $\beta = 1.2$

3.1.1) คำนวณค่าขนาดตัวอย่างที่เหมาะสม
เมื่อกำหนด $t / \mu_0 = 0.628, 0.942, 1.257, 1.571,$
2.356, 3.141, 3.927, 4.712 และ $P^* = 0.75, 0.90,$
0.95 และ 0.99 ตามลำดับ

3.1.2) คำนวณค่าฟังก์ชันลักษณะเฉพาะ
ปฏิบัติการ ของ ASP ($n, c, t / \mu_0$) ดังสมการที่ (9)

3.1.3) คำนวณ μ / μ_0 ที่มีค่าน้อยที่สุด
สำหรับการยอมรับลอตสินค้าเมื่อกำหนดค่าความ
เสี่ยงของผู้ผลิต 0.05

3.2) นำแผนการสุ่มตัวอย่างเพื่อการยอมรับที่
พัฒนาได้มาประยุกต์ใช้กับข้อมูลจริง

ตารางที่ 1 ขนาดตัวอย่างน้อยที่สุดสำหรับการทดสอบอายุการใช้งานของสินค้า เมื่อกำหนดค่าความน่าจะเป็น
 P^* จำนวนสินค้าที่เสื่อมสภาพก่อนกำหนด (c) ซึ่งอยู่ภายใต้สมมติฐาน $\mu \geq \mu_0$ และ กำหนด $\alpha = 3.5$ และ
 $\beta = 1.2$ สำหรับ TAD

P^*	c	t / μ_0							
		0.628	0.942	1.257	1.571	2.356	3.141	3.927	4.712
0.75	0	3	2	2	2	1	1	1	1
0.75	1	6	5	4	3	2	2	2	2
0.75	2	9	7	5	5	4	3	3	3
0.75	3	12	9	7	6	5	4	4	4
0.75	4	15	11	9	8	6	6	5	5
0.75	5	17	13	11	9	7	7	6	6
0.9	0	5	3	3	2	2	1	1	1
0.9	1	8	6	5	4	3	3	2	2
0.9	2	12	8	7	6	4	4	3	3
0.9	3	15	11	9	7	6	5	4	4
0.9	4	19	13	11	9	7	6	6	5
0.9	5	21	15	12	11	8	7	7	6
0.95	0	6	4	3	3	2	2	1	1
0.95	1	10	7	6	5	3	3	2	2
0.95	2	14	10	8	6	5	4	4	3
0.95	3	17	12	10	8	6	5	5	4
0.95	4	20	15	12	10	7	6	6	5
0.95	5	23	17	14	11	9	8	7	7
0.99	0	9	6	5	4	3	2	2	1
0.99	1	14	10	7	6	4	3	3	3
0.99	2	18	12	10	8	6	5	4	4
0.99	3	21	15	12	10	7	6	5	5
0.99	4	25	18	15	12	10	7	6	6
0.99	5	28	20	16	13	10	8	8	7

ตารางที่ 2 ฟังก์ชันลักษณะเฉพาะปฏิบัติการ (OCF) สำหรับแผนการสุ่มตัวอย่าง $(n, c = 2, t / \mu_0)$ เมื่อกำหนด $\alpha = 3.5$ และ $\beta = 1.2$ สำหรับ TAD และค่าความน่าจะเป็น P^* ที่แตกต่างกัน

P^*	n	t / μ_0	μ / μ_0					
			2	4	6	8	10	12
0.75	9	0.628	0.6286	0.8945	0.9577	0.9791	0.9882	0.9927
0.75	7	0.942	0.5772	0.8707	0.9462	0.9729	0.9845	0.9903
0.75	5	1.257	0.6671	0.9066	0.9621	0.9811	0.9893	0.9933
0.75	5	1.571	0.5416	0.8535	0.9370	0.9675	0.9811	0.9881
0.75	4	2.356	0.49	0.8319	0.9257	0.9608	0.9769	0.9852
0.75	3	3.141	0.6126	0.891	0.9542	0.9763	0.9862	0.9912
0.75	3	3.927	0.4661	0.8303	0.9255	0.9604	0.9763	0.9847
0.75	3	4.712	0.3384	0.7617	0.8910	0.9406	0.9639	0.9763
0.9	12	0.628	0.4222	0.7944	0.9098	0.9532	0.9728	0.9829
0.9	8	0.942	0.4753	0.8211	0.9222	0.9598	0.9767	0.9853
0.9	7	1.257	0.4007	0.7765	0.8984	0.9461	0.9682	0.9797
0.9	6	1.571	0.3863	0.7677	0.8930	0.9427	0.9659	0.9781
0.9	4	2.356	0.4900	0.8319	0.9257	0.9608	0.9769	0.9852
0.9	4	3.141	0.2976	0.7202	0.8659	0.9257	0.9546	0.9703
0.9	3	3.927	0.4661	0.8303	0.9255	0.9604	0.9763	0.9847
0.9	3	4.712	0.3384	0.7617	0.8910	0.9406	0.9639	0.9763
0.95	14	0.628	0.3108	0.7194	0.8695	0.9303	0.9587	0.9736
0.95	10	0.942	0.3059	0.7114	0.8635	0.9262	0.9559	0.9717
0.95	8	1.257	0.2971	0.7028	0.8574	0.9221	0.9531	0.9697
0.95	6	1.571	0.3863	0.7677	0.8535	0.9427	0.9659	0.9781
0.95	5	2.356	0.2835	0.6994	0.893	0.9186	0.9503	0.9675
0.95	4	3.141	0.2976	0.7202	0.8659	0.9257	0.9546	0.9703
0.95	4	3.927	0.1638	0.6031	0.7959	0.8820	0.9257	0.9502
0.95	3	4.712	0.3384	0.7617	0.891	0.9406	0.9639	0.9763
0.99	18	0.628	0.1569	0.5668	0.7756	0.8726	0.9216	0.9486
0.99	12	0.942	0.1866	0.5983	0.7944	0.8838	0.9286	0.9532
0.99	10	1.257	0.1534	0.5553	0.7638	0.8633	0.9147	0.9435
0.99	8	1.571	0.1757	0.5844	0.7824	0.8749	0.9221	0.9485
0.99	6	2.356	0.1527	0.5647	0.7678	0.8642	0.9143	0.9427
0.99	5	3.141	0.1269	0.5418	0.7526	0.8536	0.9067	0.9370
0.99	4	3.927	0.1638	0.6031	0.7959	0.8820	0.9257	0.9502
0.99	4	4.712	0.0831	0.4900	0.7202	0.8319	0.8913	0.9257

ตารางที่ 3 ค่า μ / μ_0 น้อยที่สุด สำหรับการยอมรับลอสสินค้า เมื่อกำหนดค่าความเสี่ยงของผู้ผลิต 0.05 และค่าพารามิเตอร์ $\alpha = 3.5$ และ $\beta = 1.2$ สำหรับ TAD

P^*	c	t / μ_0							
		0.628	0.942	1.257	1.571	2.356	3.141	3.927	4.712
0.75	0	34.5486	34.4529	45.9738	57.4581	42.732	56.97	71.2261	85.4641
0.75	1	8.9621	10.9238	11.2058	9.7671	8.1786	10.9036	13.6321	16.3571
0.75	2	5.5900	6.1929	5.3220	6.6514	7.1863	5.7681	7.2115	8.6531
0.75	3	4.35	4.5577	4.3234	4.2974	4.7694	4.0598	5.0757	6.0903
0.75	4	3.7093	3.7463	3.7821	3.9637	3.6321	4.8423	4.0495	4.859
0.75	5	3.0888	3.2639	3.4399	3.1515	2.9854	3.9801	3.4528	4.1431
0.9	0	57.7096	51.8229	69.1522	57.4581	86.1689	56.97	71.2261	85.4641
0.9	1	12.3149	13.4432	14.5767	14.005	14.6475	19.528	13.6321	16.3571
0.9	2	7.7764	7.2899	8.2638	8.4939	7.1863	9.5807	7.2115	8.6531
0.9	3	5.6584	5.8699	6.0817	5.4034	6.4448	6.3586	5.0757	6.0903
0.9	4	4.9185	4.6558	4.999	4.7269	4.7941	4.8423	6.0541	4.859
0.9	5	4.0003	3.9488	3.8978	4.2992	3.8608	3.9801	4.9761	4.1431
0.95	0	69.2902	69.1935	69.1522	86.4265	86.1689	114.88	71.2261	85.4641
0.95	1	15.6636	15.9589	17.9385	18.218	14.6475	19.528	13.6321	16.3571
0.95	2	9.2322	9.479	9.7276	8.4939	9.975	9.5807	11.9782	8.6531
0.95	3	6.5298	6.5249	6.9578	6.5038	6.4448	6.3586	7.9497	6.0903
0.95	4	5.2206	5.5639	5.6061	5.4881	4.7941	4.8423	6.0541	4.859
0.95	5	4.4558	4.6331	4.8124	4.2992	4.7263	5.1472	4.9761	5.9708
0.99	0	104.032	103.935	115.511	115.396	129.612	114.88	143.627	85.4641
0.99	1	22.3562	23.4955	21.2954	22.4196	21.003	19.528	24.4147	29.2951
0.99	2	12.1418	11.6646	12.6487	12.1575	12.7382	13.2986	11.9782	14.3726
0.99	3	8.2715	8.4876	8.7068	8.6959	8.1034	8.5921	7.9497	9.5389
0.99	4	6.7304	6.9245	7.4244	7.0065	8.2303	6.3915	6.0541	7.2643
0.99	5	5.594	5.6587	5.726	5.4433	5.5878	5.1472	6.4353	5.9708

4. ผลการดำเนินการวิจัยและอภิปรายผล

จากตารางที่ 1 แสดงขนาดตัวอย่างน้อยที่สุด สำหรับการทดสอบ ค่าเฉลี่ยอายุการใช้งาน (μ_0)

ภายใต้การกำหนดความน่าจะเป็นมากกว่าหรือเท่ากับ P^* เมื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ของ TAD เป็น $\alpha = 3.5$ และ $\beta = 1.2$ ผลการศึกษาสามารถ

อธิบายได้ว่า หากกำหนดอายุการใช้งานของสินค้าหรือผลิตภัณฑ์มากกว่าหรือเท่ากับ 1,000 ชั่วโมง (μ_0) และกำหนดให้การทดสอบอายุการใช้งานของผลิตภัณฑ์จะสิ้นสุดลงที่เวลา $t_0 = 942$ ชั่วโมง

ดังนั้นขนาดตัวอย่างน้อยที่สุดสำหรับการทดสอบ ดังกล่าว เมื่อกำหนด $P^* = 0.95$ $d = t_0 / \mu_0 = 0.942$ และ $c = 2$ จะเท่ากับ 10 หน่วย หรืออาจกล่าวได้ว่าขนาดตัวอย่าง 10 หน่วยที่สุ่มมาควรจะมีสินค้าที่จะเสื่อมสภาพหรือหมดอายุก่อนกำหนดก่อน 942 ชั่วโมงควรจะไม่เกิน 2 หน่วย ASP ที่พัฒนาขึ้นมาสามารถแสดงให้เห็น

ว่าอายุการใช้งานเฉลี่ยของสินค้าที่แท้จริง (μ) ซึ่งควรจะใช้ได้อย่างน้อย 1,000 ชั่วโมง เมื่อกำหนดความเชื่อมั่นในการทดสอบ 95% ฟังก์ชันลักษณะเฉพาะปฏิบัติการสำหรับ ASP ภายใต้ TAD เมื่อกำหนดค่าความน่าจะเป็น P^* ที่แตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 2 ซึ่งจากตารางที่ 2 อธิบายได้ว่า หากพิจารณาจากค่า $P^* = 0.95$ $c = 2$ $t_0 / \mu_0 = 0.942$ $\mu / \mu_0 = 4$ พบว่ามีค่าฟังก์ชันลักษณะเฉพาะปฏิบัติการเป็น 0.7114

ตารางที่ 4 ค่าฟังก์ชันลักษณะเฉพาะปฏิบัติการ (OCF) ค่าความเสี่ยงของผู้ผลิต เมื่อกำหนด μ / μ_0 แตกต่างกัน

μ / μ_0	2	4	6	8	10	12
OCF	0.3059	0.7114	0.8635	0.9262	0.9559	0.9717
Producer's risk	0.6941	0.2886	0.1365	0.0738	0.0441	0.0283

หากพิจารณาตารางที่ 4 จะเห็นว่าค่าความเสี่ยงของผู้ผลิต (Procedure's risk) จะมีค่าลดลงเมื่อ μ / μ_0 มีค่ามากขึ้น ส่วนตารางที่ 3 แสดงค่า μ / μ_0 น้อยที่สุด เมื่อกำหนดค่าความเสี่ยงของผู้ผลิต $\alpha = 0.05$ ซึ่งอธิบายได้ว่าหากพิจารณาที่ $P^* = 0.95$ (หรือกำหนดให้ความเสี่ยงของผู้ผลิตเท่ากับ 0.05) $n = 10$ $c = 2$ $d = t_0 / \mu_0 = 0.942$ $\mu / \mu_0 = 9.479$ อธิบายได้ว่าหาก $\mu \geq 9.479 \times (t_0 / 0.942) = 10.063 t_0 = 9,479$ ชั่วโมง ลอทสินค้าจะถูกปฏิเสธด้วยความน่าจะเป็นน้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.05 หรือสินค้าจะได้รับการยอมรับเมื่อค่าความน่าจะเป็นมากกว่าหรือเท่ากับ 0.7114

ผลการวิจัยดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Al-Omari และคณะ [4] ซึ่งพัฒนา ASP ภายใต้การแจกแจง อคัสพารามิเตอร์เดียว (OAD) กล่าวคือ ถ้า c เพิ่มขึ้นขนาดตัวอย่างน้อยที่สุดสำหรับการทดสอบอายุการใช้งานของสินค้าก็จะมากขึ้นและถ้าอัตราส่วน t / μ_0 เพิ่มขึ้นก็จะใช้ขนาดตัวอย่างน้อยที่สุดสำหรับการทดสอบอายุการใช้งานของสินค้าจะลดลงตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตาม ขนาดตัวอย่างน้อยที่สุดสำหรับการทดสอบอายุการใช้งานของสินค้าของ ASP ภายใต้ TAD มีค่าน้อยกว่า ASP ภายใต้ OAD โดยกำหนดเงื่อนไขเดียวกัน (เมื่อค่า c และ t / μ_0 เท่ากัน) แต่หากพิจารณาค่า OCF จะเห็นว่าเมื่อ μ / μ_0 มีค่าเพิ่มขึ้น OCF ก็จะมีค่าเพิ่มขึ้น

อย่างไรก็ตาม OCF สำหรับ ASP ภายใต้ TAD มีค่าน้อยกว่า ASP ภายใต้ OAD เล็กน้อย

5. การประยุกต์กับข้อมูลจริง

แผนการสุ่มตัวอย่างที่พัฒนานี้ นำมาประยุกต์กับข้อมูลจริงซึ่งเป็นข้อมูลอายุการใช้งาน (หน่วย: เดือน) ของรถเข็นไฟฟ้าที่ใช้สำหรับการขนส่งสินค้าในโรงงานขนาดใหญ่ จำนวน 20 คัน ดังนี้ 0.9, 1.5, 2.3, 3.2, 3.9, 5, 6.2, 7.5, 8.3, 10.4, 11.1, 12.6, 15, 16.3, 19.3, 22.6, 24.8, 31.5, 38.1, 53 (ข้อมูลอ้างอิงมาจาก [9],[10],[11]) โดยนำข้อมูลดังกล่าวมาประมาณค่าพารามิเตอร์ดังนี้

การประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีภาวะน่าจะเป็นสูงสุด (Maximum likelihood estimation)

ให้ $x_1, x_2, \dots, x_n$ เป็นค่าสังเกตตัวอย่างสุ่มขนาด n จาก TAD ฟังก์ชันภาวะน่าจะเป็น (Likelihood function) ของ TAD แสดงดังสมการ (14)

$$L(x|\alpha, \beta) = \prod_{i=1}^n \left[\frac{\beta^3}{\alpha\beta^2 + 2} (\alpha + x_i^2) e^{-\beta x_i} \right], \quad (14)$$

ฟังก์ชันล็อกภาวะน่าจะเป็น (Log-likelihood function: $\log(L)$ หรือ LL) ของ TAD เขียนดังสมการที่ (15)

$$LL(x|\alpha, \beta) = n \log \left(\frac{\beta^3}{\alpha\beta^2 + 2} \right) + \sum_{i=1}^n \log(\alpha + x_i^2) - \beta \sum_{i=1}^n x_i \quad (15)$$

ค่าพารามิเตอร์ α และ β สามารถคำนวณได้จาก $\frac{\partial LL}{\partial \alpha} = 0$ และ $\frac{\partial LL}{\partial \beta} = 0$ การหาคำตอบของ

สมการดังกล่าวโดยใช้ระเบียบวิธีนิวตัน-ราฟสัน (Newton-Raphson) [12]

การทดสอบประสิทธิภาพการประมาณค่าพารามิเตอร์ของ TAD พิจารณาจากค่า $-Log(L)$, เกณฑ์ข้อสนเทศของอาไคเคะ (Akaike information criterion: AIC) เกณฑ์ข้อมูลของเบย์ (Bayesian information criterion : BIC) และการทดสอบโคลโมโกรอฟ-สไมร์นอฟ (Kolmogorov-Smirnov :K-S) สูตรการคำนวณแสดงดังสมการ (16), (17) และ (18)

$$AIC = -2\log(L) + 2p \quad (16)$$

$$BIC = -2\log(L) + p\log(n) \quad (17)$$

$$K - S = \sup_x |F_n(x) - F_0(x)| \quad (18)$$

เมื่อ n คือจำนวนตัวอย่าง p คือ จำนวนพารามิเตอร์ $F_n(x)$ คือ ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของตัวอย่าง และ $F_0(x)$ คือ ฟังก์ชันการแจกแจงสะสมของประชากรที่คาดไว้ ตารางที่ 5 แสดงค่าพารามิเตอร์ของ TAD ที่สอดคล้องกับข้อมูลจริงคือ $\alpha = 235.3651$ และ $\beta = 0.1193$ ด้วยค่า $AIC = 151.3931$ และ $BIC = 153.3845$ ตามลำดับค่าสถิติทดสอบ $K-S = 0.0638$ และมีค่า $p\text{-value} = 0.9997$ แสดงว่า TAD มีความสอดคล้องกับข้อมูลจริงเมื่อคำนวณค่าเฉลี่ยของอายุการใช้งานของรถไฟฟ้าขนาดเล็กดังกล่าวมีค่าเท่ากับ

$$\mu = \frac{\{\alpha\beta^2 + 6\}}{\beta(\alpha\beta^2 + 2)} = \frac{(235.3651 \times 0.1193^2 + 6)}{0.1193(235.3651 \times 0.1193^2 + 2)} = 14.6503$$

ตารางที่ 6 แสดง การเปรียบเทียบขนาดตัวอย่างน้อยสุด สำหรับการทดสอบ เมื่อกำหนด $d = t / \mu_0 = 0.628$ และ $P^* = 0.75$ ของ OAD

และ TAD สำหรับอายุการใช้งานของรถไฟฟ้าขนาดเล็ก พบว่าขนาดตัวอย่างน้อยที่สุดสำหรับ ASP ภายใต้ TAD คือ เท่ากับ 18 เมื่อ $c=4$ ซึ่งน้อยกว่า ASP ภายใต้ OAD ซึ่งใช้ขนาดตัวอย่างเท่ากับ 20 เมื่อ $c=4$ กล่าวคือ หากกำหนดค่า $\mu_0 = 14.6503$ จะได้ค่า $t = 9.2004$ ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยของ Al-Omari และคณะ [4] ที่พัฒนา ASP ภายใต้ OAD สามารถอธิบายได้ว่า หากค่าของ c หรือ จำนวนสินค้าที่จะเสื่อมสภาพหรือหมดอายุก่อนเวลา $t=9.2004$ เดือนมีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับ 4 จะ

สามารถยอมรับลอสสินค้านั้นได้ และอายุการใช้งานเฉลี่ยของสินค้าดังกล่าวมีค่าประมาณ 14.65 เดือน ตารางที่ 7 แสดงค่าฟังก์ชัน OC สำหรับ ASP ภายใต้ OAD และ TAD ส่วนตารางที่ 8 แสดงค่า μ / μ_0 น้อยที่สุด สำหรับการยอมรับลอสสินค้า เมื่อกำหนดค่าความเสี่ยงของผู้ผลิต 0.05 $P^* = 0.75$ และ $c=4$ ของแผนการสุ่มตัวอย่างเพื่อการยอมรับภายใต้ OAD และ TAD

ตารางที่ 5 การประมาณค่าพารามิเตอร์ AIC BIC และการทดสอบ K-S ของข้อมูลรถเข็นไฟฟ้า

ค่าพารามิเตอร์	ค่าประมาณพารามิเตอร์	AIC	BIC	K-S (P-value)
α	235.3651	151.3931	153.3845	0.0638 (0.99997)
β	0.1193			

ตารางที่ 6 การเปรียบเทียบขนาดตัวอย่างน้อยที่สุด เมื่อกำหนด $t / \mu_0 = 0.628$ และ $P^* = 0.75$ ของ ASP ภายใต้ OAD และ TAD ของข้อมูลรถเข็นไฟฟ้า

c	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
n (OAD, $\beta=0.2017$) [4]	4	9	13	13	20	24	28	32	35	39	43
n(TAD)	4	8	11	15	18	22	25	29	32	35	39
$\alpha=235.3651$ $\beta=0.1193$											

ตารางที่ 7 การเปรียบเทียบ OCF ค่าความเสี่ยงของผู้ผลิต สำหรับ ASP ภายใต้ OAD ($n=20, c=4, t/\mu_0=0.628$) และ ASP ภายใต้ TAD ($n=18, c=4, t/\mu_0=0.628$) เมื่อกำหนด $P^* = 0.75$ ของข้อมูลรถเข็นไฟฟ้า

μ/μ_0		2	4	6	8	10	12
OAD β =0.2017 [4]	OC	0.9828	0.9999	0.99999	0.9999	1.0000	1.0000
	Producer's risk	0.0172	0.0001	0.0001	0.0001	0	0
TAD α =235.3651 β =0.1193	OC	0.7845	0.9735	0.9942	0.9982	0.9993	0.9997
	Producer's risk	0.2155	0.0265	0.0058	0.0018	0.0007	0.0003

ตารางที่ 8 การเปรียบเทียบค่า μ / μ_0 น้อยที่สุด สำหรับการยอมรับลอสลินค่า เมื่อกำหนดค่าความเสี่ยงของผู้ผลิต 0.05 $P^* = 0.75$ และ $c=4$ ของแผนการสุ่มตัวอย่างเพื่อการยอมรับภายใต้ OAD และ TAD ของข้อมูลรถเข็นไฟฟ้า

t / μ_0	0.628	0.942	1.257	1.571	2.356	3.141	3.927	4.712
OAD , $\beta = 0.2017$ [4]	1.746	1.877	2.032	2.008	2.452	3.269	4.087	4.903
TAD	3.3141	4.9709	6.6335	8.2906	12.4333	16.5758	20.7237	24.8666

$\alpha = 235.3651$ $\beta = 0.1193$

6. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้พัฒนาแผนการสุ่มตัวอย่างเพื่อการยอมรับภายใต้การแจกแจงอค์ชสองพารามิเตอร์ และการทดสอบอายุการใช้งานที่กำหนด โดยการนำเสนอขนาดตัวอย่างน้อยที่สุดสำหรับการทดสอบ ฟังก์ชันลักษณะเฉพาะปฏิบัติการค่า μ / μ_0 ที่มีค่าน้อยที่สุดสำหรับการยอมรับลอสลินค่ากับค่าความเสี่ยงของผู้ผลิต และการประยุกต์แผนการสุ่มตัวอย่างเพื่อการยอมรับที่พัฒนาขึ้นกับข้อมูลจริงพร้อมเปรียบเทียบผลการทดสอบที่ได้กับการแจกแจงอค์ชพารามิเตอร์เดียว ซึ่งผลการศึกษาพบว่า แผนการสุ่มตัวอย่างที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพตัดสินใจที่จะยอมรับหรือปฏิเสธลอสลินค่า และจะให้ขนาดตัวอย่างเพื่อการทดสอบน้อยกว่า แผนการสุ่มตัวอย่างเพื่อการยอมรับภายใต้การแจกแจงอค์ชพารามิเตอร์เดียว แต่จะให้ค่า μ / μ_0 มากกว่าแผนการสุ่มตัวอย่างเพื่อการยอมรับภายใต้การแจกแจงอค์ชพารามิเตอร์เดียว

เอกสารอ้างอิง

- [1] Aslam M, Azam M, Jun C-H. A mixed repetitive sampling plan based on

process capability index. Appl Math Model. 2013 ;37(24) : 10027–35.

- [2] Sobel M, Tischendorf JA. Acceptance Sampling with new life test objectives. Proceedings of fifth National Symposium on Reliability and Quality Control. Philadelphia Pennsylvania.1959; 108-18.
- [3] Kantam RRL, Rosaiah K. Rao GS. Acceptance sampling based on life tests: log- logistic model. J. Appl. Statist. 2001; 28:121-8.
- [4] Al-Omari AIF, Koyuncu N, Alanzi ARA. New acceptance sampling plans based on truncated life tests for Akash distribution with an application to electric carts data. IEE Access. 2020: 201393-403.
- [5] Shanker R. Akash distribution and its applications. Int j probab stat. 2015; 4(3): 65–75.

- [6] Shanker R, Shukla KK. On two-parameter akash distribution. *Biom. biostat. Int j.* 2017; 6(5):416-25.
- [7] Al-Nasser AD, Al-Omari AI. Acceptance sampling plan based on truncated life tests for exponentiated Frechet distribution. *J Statist Manage Syst.* 2013; 16(1):13-24.
- [8] Baklizi A, El Masri AEQ. Acceptance sampling based on truncated life tests in the Birnbaum Saunders model. *Risk Anal.* 2004; 24(6):1453-7.
- [9] Zimmer WJ, Keats JB, Wang FK. The burr XII distribution in reliability analysis. *J Qual Technol.* 1998; 30(4): 386-94.
- [10] Gui W, Aslam M. Acceptance sampling plans based on truncated life tests for weighted exponential distribution. *Commun Statist Simul Comput.* 2017; 46(3): 2138-51.
- [11] Lio YL, Tsai T.-R., Wu S.-J. Acceptance sampling plans from truncated life tests based on the burr type XII percentiles. *J Chin Inst Ind Engineers.* 2010; 27(4): 270-80.
- [12] Pushpa Gupta L, Gupta RC, Lvin SJ. Numerical methods for the maximum likelihood estimation of Weibull parameters. *J Stat Comput Simul.* 1998; 62(1-2):1-7.

ฟังก์ชันฤดูกาลและแนวโน้มในแบบเบย์แบบอนุกรมเวลาที่เหมาะสมสำหรับวิเคราะห์ ผลผลิตและราคาข้าวในประเทศไทยอย่างมีประสิทธิภาพ

A Functions for Seasonality and Trend in Optimal Time Series Bayesian Models for the Efficient Analysis of Rice Price and Yield in Thailand

พรพิศ ศิริมา¹, พิษณุ ทองขาว¹, สุนีย์ สัมมาทต², พรรณิการ์ มีอ่อน², สุทธิพงษ์ จำรูญรัตน์^{1*}

Pornpit Sirima¹, Pitsanu Tongkhaw¹, Sunee Sammatat², Phannika Mee-on²,

*

¹สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

²หมวดวิชาคณิตศาสตร์และสถิติ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

¹Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, , Rajamangala University of Technology
Phra Nakhon, Thailand

²Department of Mathematics and Statistics, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of
Technology Phra Nakhon , Thailand

*Corresponding Author. E-mail: suttipong.j@rmutp.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อใช้หลักการของกระบวนการสโตแคสติกสำหรับสร้างตัวแบบและประมาณค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ด้วยวิธีของเบย์ กับข้อมูลราคาจริง ของราคาข้าวเปลือกเจ้าความชื้น 15% และผลผลิตข้าวนาปี เฉลี่ยรายเดือนในประเทศไทย ซึ่งจากการวิเคราะห์ข้อมูลราคา และผลผลิตของข้าวจะเป็นข้อมูลอนุกรมเวลาโดยมีส่วนประกอบของค่าอัตโนมัติสัมพันธ์ แนวโน้มแบบเอกซ์โพเนนเชียล ค่าผิดปกติ และค่าฤดูกาลที่แตกต่างกันสองรูปแบบได้แก่ฟังก์ชันของฤดูกาลแบบดัมมี่กับฟังก์ชันของฤดูกาลแบบฟูเรียร์ โดยเขียนอัลกอริทึมและโปรแกรม OpenBUGS และประเมินประสิทธิภาพของตัวแบบต่าง ๆ จากการเขียนโปรแกรมจำลองสถานการณ์ด้วยโปรแกรม R หลังจากนั้นนำตัวแบบเบย์ที่มีฟังก์ชันของฤดูกาลแบบดัมมี่กับแบบเบย์ที่มีฟังก์ชันของฤดูกาลแบบฟูเรียร์ มาเปรียบเทียบกัน โดยดูจากค่า RMSE MSE และ MAE ผลการวิจัยพบว่าตัวแบบเบย์ที่มีฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นเหมาะสมสำหรับแนวโน้มแบบเอกซ์โพเนนเชียลและมีฟังก์ชันฤดูกาลเป็นแบบดัมมี่ ให้ค่า RMSE MSE และ MAE รายเดือนเฉลี่ยต่ำสุดทั้งหมดทั้งการหาตัวแบบที่เหมาะสม (Model fitting) และการตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบ (Model validation)

คำสำคัญ : ฟังก์ชันสำหรับฤดูกาล อนุกรมเวลา อัตตสัมพันธ์ ตัวแบบเบย์ วิธีการจำลองสถานการณ์แบบลูกโซ่มาร์คอฟมอนติคาร์โล

ABSTRACT

This research aims to apply the principle of stochastic process for modeling. The parameters are estimated using Bayesian methods. The monthly average real price of 15% paddy rice and yield of paddy rice in Thailand were studied. The price and the yield of paddy rice which are time series data consisting of four components, autocorrelation, an exponential cumulative distribution function for trend, outliers, and two different types of seasons: the dummy seasons and Fourier function seasons. Writing algorithms, programming in OpenBUGS and evaluating the performance of models from simulation programming in R were conducted. After that, Bayesian methods with dummy seasons and Fourier function seasons were compared using RMSE, MSE and MAE as the criteria. The results showed that the Bayesian model with an exponential cumulative distribution function for trend and dummy seasons provided the lowest RMSE, MSE and MAE for both model fitting and model validating.

Keyword: Seasonal function, Time series, Autoregression, Bayesian model, Markov chain Monte Carlo simulation

1. บทนำ

ข้อมูลอนุกรมเวลาที่มีความผันผวนส่วนใหญ่จะแบ่งไปด้วยอิทธิพลจาก แนวโน้ม (Trend) ฤดูกาล (Seasonal) วัฏจักร (Cycle) และเหตุการณ์ผิดปกติ (Irregular variation) ปัจจุบันมีการใช้ตัวแบบหลากหลายวิธีที่จะสอดคล้องตามติดข้อมูลเหล่านี้เพื่อที่จะพยากรณ์ให้ใกล้เคียงและแม่นยำมากที่สุด เช่น วิธีปรับเรียบแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล (Exponential smoothing; EXPS), วิธี Autoregressive integrated moving average (ARIMA) และวิธี Seasonal autoregressive integrated moving average (SARIMA) วิธีโครงข่ายประสาทเทียม (Artificial neural network; ANN) วิธีจีเนติก อัลกอริทึม (Genetic algorithms; GA) วิธีตรรกศาสตร์คลุมเครือ (Fuzzy logic) [1] เป็นต้น

นอกจากวิธีที่กล่าว [2] ได้เสนอตัวแบบการพยากรณ์ที่มีความซับซ้อน ประกอบด้วย

แนวโน้มที่มีฟังก์ชันเป็น Cumulative weibull ค่าผิดปกติ (Outliers) เป็นแบบ Binary selection อัตตสหสัมพันธ์ (Auto correlation) สำหรับใช้พยากรณ์ปริมาณความต้องการซื้อชิ้นส่วนอุปกรณ์คอมพิวเตอร์ ประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการของเบย์ และเมื่อเปรียบเทียบกับตัวแบบมาตรฐานอื่นๆ ได้แก่ Exponential smoothing (EXPS) และ Judgmental methods (Judg) พบว่าวิธีที่นำเสนอมีความเหมาะสมมากกว่าวิธี [3-4] และขยายตัวแบบของ [1] โดยประยุกต์ใช้กับข้อมูลราคาผักในประเทศไทย โดยเพิ่มอิทธิพลของฤดูกาลแบบ Regression ที่มีตัวแปรหุ่น (Dummy variable) เข้าไปในตัวแบบและประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธีการของเบย์วิธีการของเบย์สามารถนำไปใช้ในการประมาณค่าพารามิเตอร์กับข้อมูลที่มีความผันผวนที่มีหลายส่วนประกอบของข้อมูลอนุกรมเวลา ทำให้ตัวแบบที่มีความซับซ้อนในการวิเคราะห์ วิธีการดั้งเดิม

Maximum likelihood ไม่สามารถประมาณได้พบว่าตัวแบบที่มีฤดูกาลมีความเหมาะสมมากขึ้น จากที่กล่าวมาผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะนำมาสร้างตัวแบบสำหรับวิเคราะห์ข้อมูลผลผลิต และราคาข้าวของไทยให้มีความเหมาะสมมากยิ่งขึ้น เนื่องจากข้าวเป็นพืชเศรษฐกิจที่มีความสำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทย และของโลก ซึ่งประเทศไทยเป็นผู้ผลิตข้าวอันดับต้น ๆ ของโลก [5] และมีการส่งออกข้าวมากที่สุดของโลกอย่างต่อเนื่องยาวนาน อีกทั้งยังเป็นสินค้าเกษตรที่มีการซื้อขายล่วงหน้าในตลาดสินค้าเกษตรล่วงหน้าแห่งประเทศไทย (AFET) ตั้งแต่วันที่ 26 สิงหาคม 2547 ถึงปัจจุบัน [6] เพื่อให้ผู้ที่เกี่ยวข้องไม่ว่าจะโดยตรงหรือโดยอ้อมสามารถเข้ามาใช้ประโยชน์ ไม่ว่าจะเป็นการซื้อขายล่วงหน้าเพื่อป้องกันความเสี่ยงด้านราคาหรือเพื่อการลงทุนตลอดจนการนำข้อมูลราคาล่วงหน้าไปใช้วางแผนการผลิต การค้า และด้านอื่น ๆ ทั้งในอุตสาหกรรมหลักและอุตสาหกรรมต่อเนื่อง (สำนักงานคณะกรรมการกำกับการซื้อขายสินค้าเกษตรล่วงหน้า) และตัวแบบที่ได้จากงานวิจัยนี้ก็สามารถนำไปใช้ในการประมาณการเพื่อวิเคราะห์ และพยากรณ์ข้อมูลราคาจริง และราคาในตลาดล่วงหน้าของข้าวในประเทศไทย เนื่องจากข้าวเป็นพืชที่เก็บเกี่ยวตามฤดูกาล ผู้วิจัยจึงสนใจหารูปแบบของอิทธิพลของฤดูกาลที่เหมาะสมเพื่อนำไปใช้ในตัวของ [4] ที่ประกอบด้วยแนวโน้ม อัตตสัมพันธ์ ค่าผิดปกติ และฤดูกาล เพื่อได้ตัวแบบที่เหมาะสมมากยิ่งขึ้น

2. วิธีดำเนินการวิจัย

การวิเคราะห์ผลผลิต และราคาข้าวในประเทศไทยอย่างมีประสิทธิภาพโดยใช้ฟังก์ชันฤดูกาล และแนวโน้มในตัวแบบอนุกรมเวลา

เหมาะสมในครั้งนี้นำข้อมูลราคาข้าวเปลือกเจ้าความชื้น 15% รายเดือนที่เกษตรกรขายได้ที่ไร่นาทั้งประเทศ ปี 2544 – 2564 จำนวน 240 เดือน และข้อมูลผลผลิตข้าวนาปี เฉลี่ยรายเดือน ตั้งแต่ปี 2550-2563 จำนวน 168 เดือนจากสำนักงานสถิติการเกษตร [7] โดยตัวแปรสำหรับการวิจัยมีตัวแปรต้นคือแนวโน้ม (Trend) ฤดูกาล (Seasonal) ค่าผิดปกติ (Irregular variation) ค่าอัตสหสัมพันธ์ (Autocorrelation) ตัวแปรตามคือราคาข้าวเปลือกเจ้ารายเดือนและผลผลิตข้าวนาปี รายเดือน [8] อธิบายกระบวนการสโตแคสติกจากตัวแบบพยากรณ์ข้อมูลอนุกรมเวลาด้วยวิธีการของเบย์ และใช้การประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี Markov chain Monte Carlo (MCMC) โดยสุ่มตัวอย่างแบบกิบส์ (Gibbs sampling) ที่มีตัวแปรตามมีค่าต่อเนื่อง ดังนั้นผู้วิจัยจึงกำหนดให้มีการแจกแจงแบบปกติ และตัวแปรต้นเป็นฟังก์ชันต่าง ๆ มีรายละเอียดของตัวแบบคือ

$$Y_t \sim N\left(\gamma(\Delta W(t|\alpha, \delta) + A_t) + \sum_{i=1}^{s-1} \omega_i S_{it}, [\gamma(1 + \zeta_i) \sigma_Y]^2\right)$$

ซึ่ง ค่าเฉลี่ยของ Y_t แสดงในสมการที่ (1)

$$E(Y_t) = \gamma(\Delta W(t|\alpha, \delta) + A_t) + \sum_{i=1}^{s-1} \omega_i S_{it} \quad (1)$$

ค่าความแปรปรวนของ Y_t แสดงในสมการที่ (2)

$$Var(Y_t) = [\gamma(1 + \zeta_i) \sigma_Y]^2 \quad (2)$$

เมื่อ γ ค่าคาดหวังของ Z ซึ่งค่า Z คือผลรวมของข้อมูลอนุกรมเวลาในช่วงเวลาที่ศึกษา $W(t|\alpha, \delta)$ คือการแจกแจงสะสมของแนวโน้ม ได้แก่ เอ็กซ์โพเนนเชียล (Exponential) A_t ค่าอัตสหสัมพันธ์ที่ซ่อนเร้นอยู่ ณ เวลา t เมื่อ

ζ_t เป็นค่าผิดปกติ ณ เวลา t $\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_{s-1}$ เป็นค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของตัวแปรตามมีของฤดูกาล $S_{1t}, \dots, S_{s-1t}$ เป็นค่าฤดูกาล ณ เวลา t และ σ_Y^2 คือค่าความแปรปรวนโดยทั่วไปของ Y_t และฤดูกาลที่เป็นแบบฟูเรียร์พื้นฐาน ที่อยู่ในรูปดังนี้

$$\omega_1 \sin(2\pi t/12) + \omega_2 \cos(2\pi t/12)$$

สำหรับการกำหนดค่าการแจกแจงของความน่าจะเป็นก่อน (Prior) ต่างๆ ในตัวแบบด้วยวิธีการของเบย์

$$\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_{s-1} \sim N(0, 1.0E06)$$

$$p(\sigma_Y^2) \sim \text{InvGamma}(0.1, 0.0001)$$

มีแนวโน้มคือ

$$\Delta W(t | \alpha, \delta) = W(t | \alpha, \delta) - W(t-1 | \alpha, \delta)$$

เมื่อ

$$\alpha \sim N_{[0, \infty)}(\mu_\alpha, \sigma_\alpha^2), p(\mu_\alpha) \sim N(0, 1.0E06),$$

$$p(\sigma_\alpha^2) \sim \text{InvGamma}(0.1, 0.0001)$$

$$\delta \sim N_{[0, \infty)}(\mu_\delta, \sigma_\delta^2), p(\mu_\delta) \sim N(0, 1.0E06),$$

$$p(\sigma_\delta^2) \sim \text{InvGamma}(0.1, 0.0001)$$

$CDF(\exp)$ เป็นฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นสะสมของเอ็กซ์โพเนนเชียลดังสมการที่ (3)

$$F(y; \alpha) = \begin{cases} 1 - e^{-\alpha y}, & y \geq 0 \\ 0, & y < 0 \end{cases} \quad (3)$$

และ แสดงด้วยภาพกราฟเมื่อกำหนดให้พารามิเตอร์มีค่าต่างๆ กันดังภาพที่ 1 โดยมีค่าอัตราตอสัมพันธ์ที่ซ่อนเร้นอยู่: AR(i) คือ

$$A_i \sim N(\lambda A_{i-1}, \sigma_A^2), p(\sigma_A^2) \sim \text{InvGamma}(0.1, 0.001)$$

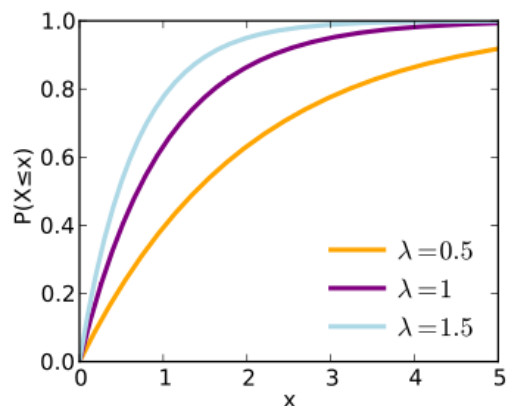
$$\lambda \sim N(0, 1.0E06), A_0 = 0$$

ค่าผิดปกติคือ $\zeta_t \sim \text{Bern}(0.05)$

ค่าคาดหวังของผลรวมของข้อมูลอนุกรมเวลาในช่วงเวลาที่ศึกษาคือ

$$\gamma \sim N_{[0, \infty)}(\mu_\gamma, \sigma_\gamma^2), p(\mu_\gamma) \sim N(0, 1.0E06)$$

$$p(\sigma_\gamma^2) \sim \text{InvGamma}(0.1, 0.0001)$$



ภาพที่ 1 กราฟฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นสะสมของเอ็กซ์โพเนนเชียล เมื่อกำหนดค่าต่างๆ ของพารามิเตอร์ (ค่า $\lambda = \alpha$ สำหรับในงานวิจัยนี้

มีผลรวมของข้อมูลอนุกรมเวลาในช่วงเวลาที่ศึกษาคือ

$$Z \sim N(\gamma, \sigma_Z^2), p(\sigma_Z^2) \sim \text{InvGamma}(0.1, 0.0001)$$

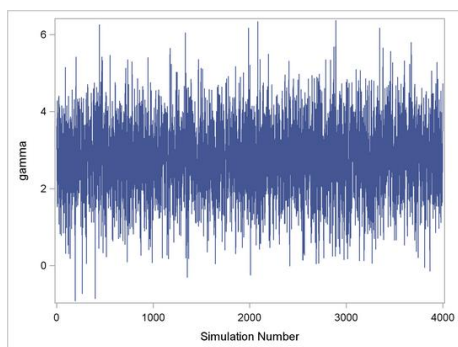
ได้สมการพยากรณ์ข้อมูลในอนาคตสามารถอธิบายในรูปของฟังก์ชันการแจกแจงของโพสเทียเรีย (posterior) คือ

$$p(Y_{t+1} | Y_t, Y_{t-1}, \dots, Y_1) = \int \dots \int p(Y_{t+1} | \theta) p(\theta | Y_t, Y_{t-1}, \dots, Y_1) d\theta$$

หรือ

$$p(Y_{t+1} | Y_t, Y_{t-1}, \dots, Y_1) \propto \int \dots \int p(Y_{t+1} | \theta) p(Y_t, Y_{t-1}, \dots, Y_1 | \theta) p(\theta) d\theta$$

สำหรับสมการพยากรณ์ข้อมูลไปข้างหน้า โดยการอินทิเกรตซึ่งทำการประมาณค่าคำตอบโดยใช้ MCMC แบบ Gibbs sampling ซึ่งจะได้ค่าประมาณของ $\hat{Y}_{t+1}$ สำหรับการประเมินประสิทธิภาพของตัวแบบ [9] เมื่อค่า MSE (Mean squared error) MAPE (Mean absolute percentage error) และ MAE (Mean absolute error) มีค่าต่ำ แสดงถึงวิธีการพยากรณ์นั้นมีความถูกต้องมาก สำหรับการตรวจสอบการลู่เข้าของ MCMC โดยดูที่ Trace plots เป็นตัวชี้วัดตัวหนึ่งที่สามารถตรวจสอบการลู่เข้าของ MCMC ซึ่งจะสามารถบอกได้ว่า chain ของพารามิเตอร์แต่ละตัวลู่เข้าหรือไม่ลู่เข้าสู่ Stationary distribution และยังเป็นตัวช่วยบอกระยะเวลาในการลู่เข้า Trace plots และยังสามารถบอกแนวโน้มการจะลู่เข้าได้อีกด้วย ดังตัวอย่างในภาพที่ 1 ที่แสดง Trace plots ที่ลู่เข้าสู่ Stationary distribution ที่ดี [10] ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 Trace plots ที่ลู่เข้าสู่ Stationary distribution ที่ดีของ Gamma

ประสิทธิภาพของตัวประมาณจะถูกประเมินจาก 3 ตัว ที่นิยมใช้กันอยู่ทั่วไปซึ่งได้แก่ Relative bias (RB) Mean squared error (MSE) และ the Coverage probability (CP) ซึ่งตัวประเมินแต่ละตัวจะคำนวณจากเซตของข้อมูลที่เป็นอิสระกันจากการจำลองสถานการณ์ที่มาจากการกระบวนการของ MCMC โดยที่ มี T เซต โดยที่ $T = T_1, \dots, T_B$ และ S มีจำนวนที่ใหญ่พอ สามารถแสดงสูตรของตัวประเมินแต่ละตัวดังสมการ (4-6)

$$RB(\hat{\mu}_Y) = \frac{1}{B} \sum_{b=1}^B \frac{\hat{\mu}_Y^{(b)} - \mu}{\mu} \quad (4)$$

$$MSE(\hat{\mu}_Y) = \frac{1}{B} \sum_{b=1}^B (\hat{\mu}_Y^{(b)} - \mu)^2 \quad (5)$$

$$CP(\hat{\mu}_Y) = \frac{1}{B} \sum_{b=1}^B I(\hat{\mu}_L^{(b)} < \mu < \hat{\mu}_U^{(b)}) \quad (6)$$

การวัดความถูกต้องแม่นยำของการพยากรณ์ [11] นั้นเลือกวิธีการพยากรณ์ที่เหมาะสมกับข้อมูลอนุกรมเวลาในแต่ละชุด วิธีวัดความถูกต้องแม่นยำของการพยากรณ์นั้นมีหลายวิธีแต่วิธีที่ใช้กันมากก็คือเราจะใช้การพิจารณาจากค่าวัดความถูกต้อง ซึ่งต่างเป็นฟังก์ชันของค่าความคลาดเคลื่อน e_t โดยที่ e_t เป็นผลต่างของค่าจริง (Y_t) กับค่าพยากรณ์ ($\hat{Y}_t$) ณ เวลา t จากสมการต่าง ๆ ดังนี้

$$\begin{aligned} & \text{วิธี Root mean squared error (RMSE)} \\ & = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n e_t^2}{n}} = \sqrt{\frac{\sum_{t=1}^n (Y_t - \hat{Y}_t)^2}{n}} \quad (7) \end{aligned}$$

วิธี Mean Squared Error (MSE)

$$= \frac{\sum_{t=1}^n e_t^2}{n} = \frac{\sum_{t=1}^n (Y_t - \hat{Y}_t)^2}{n} \quad (8)$$

วิธี MSE เป็นวิธีที่ใช้กันทั่วไป ข้อเสียของวิธีนี้คือไม่มีฐานการเปรียบเทียบ และถ้า MSE มีค่าสูงอาจเป็นเพราะมีความคลาดเคลื่อนสูง หรือขึ้นอยู่กับขนาดของข้อมูล

วิธี Mean Absolute Error (MAE)

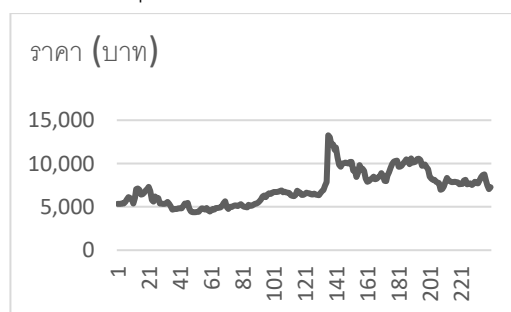
$$= \frac{\sum_{t=1}^n |e_t|}{n} = \frac{\sum_{t=1}^n |Y_t - \hat{Y}_t|}{n} \quad (9)$$

วิธี MAE เป็นหนึ่งในวิธีที่ถูกรับรอง และที่ใช้ในการเปรียบเทียบมากสำหรับอนุกรมเวลาเหมือนกัน

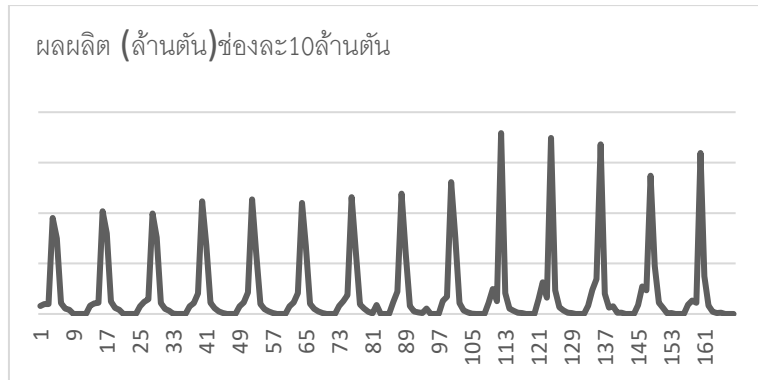
3. ผลการวิจัย

ผลการศึกษาการวิเคราะห์ผลผลิต และราคาข้าวในประเทศไทยอย่างมีประสิทธิภาพโดยใช้ฟังก์ชันฤดูกาล และแนวโน้มในตัวแบบอนุกรมเวลาที่เหมาะสมโดยใช้หลักการทางกระบวนการสโตแคสติกด้วยวิธีการของเบย์ในการประมาณค่าพารามิเตอร์วิธี Markov chain monte carlo (MCMC) และสุ่มตัวอย่างแบบก๊ิบส์ Sampling ที่มีตัวแปรตามมีค่าต่อเนื่อง จึงกำหนดให้มีการแจกแจงแบบปกติ และตัวแปรต้นเป็นฟังก์ชันต่าง ๆ และประมาณค่าพารามิเตอร์ดังที่ได้แสดงต่อจากนี้ เมื่อได้ค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ แล้ว จึงนำมาใช้พยากรณ์ไปข้างหน้ากับข้อมูลที่เก็บไว้จำนวนอีก 12 เดือนสุดท้าย เพื่อเปรียบเทียบกับข้อมูลจริงด้วยวิธีการโดยใช้หลักการทางกระบวนการสโตแคสติก แบบเบย์ในตัว

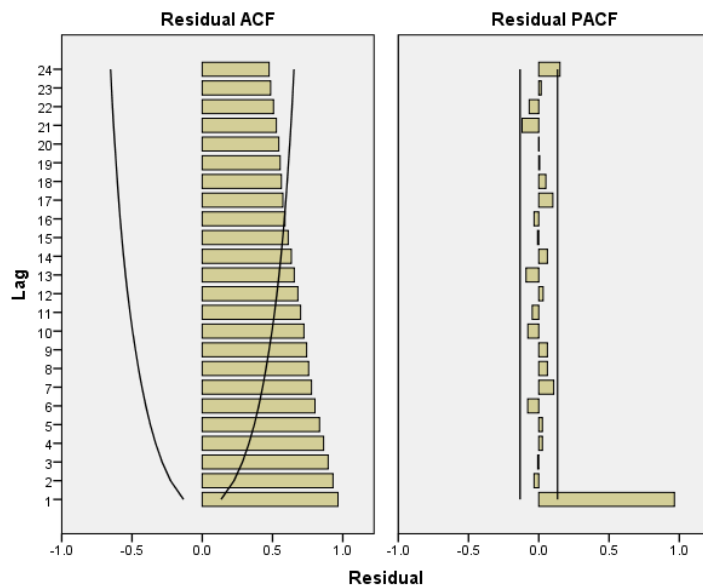
แบบการพยากรณ์แบบเบย์ที่มีฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นสะสมสำหรับแนวโน้มแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลที่ได้จากงานวิจัยก่อนหน้านี้มาแล้ว และมีฤดูกาลที่นำมาเปรียบเทียบกับ 2 ตัวแบบ ได้แก่ ฤดูกาลแบบคัมมีกับฤดูกาลแบบฟูเรียร์ ซึ่งผลต่าง ๆ มีรายละเอียดดังนี้ ภาพที่ 3-6 แสดงกราฟลักษณะแนวโน้มของข้อมูลราคาข้าวเปลือกเจ้าความชื้น 15% เฉลี่ยรายเดือน ตั้งแต่ปี 2544-2564 จำนวน 240 เดือน และแนวโน้มของข้อมูลผลผลิตข้าวนาปี เฉลี่ยรายเดือน ตั้งแต่ปี 2550-2563 จำนวน 168 เดือน ภาพที่ 6-7 แสดง



ภาพที่ 3 กราฟราคาข้าวเปลือกเจ้าความชื้น 15% เฉลี่ยรายเดือน



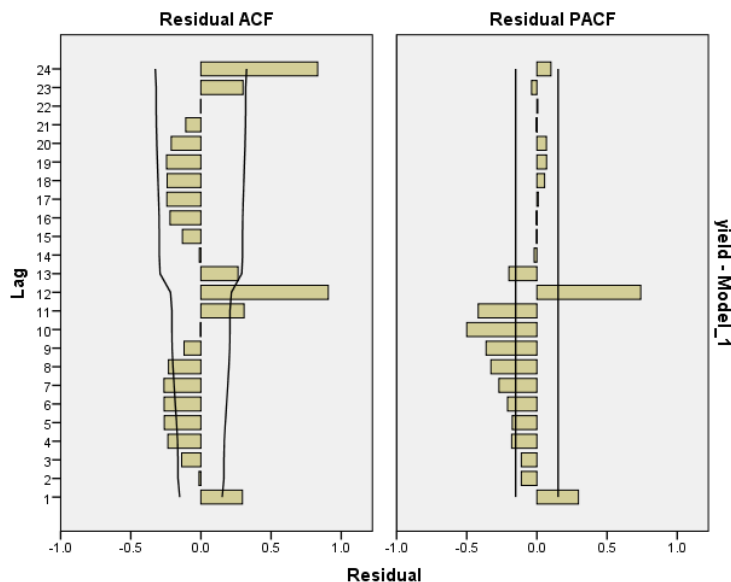
ภาพที่ 4 กราฟข้อมูลผลผลิตข้าวหน้าปี เฉลี่ยรายเดือน



ภาพที่ 5 การวัดสหสัมพันธ์ราคาข้าวเปลือกเจ้าความชื้น 15% เฉลี่ยรายเดือน

ดังนั้นจึงนำลักษณะของข้อมูลที่ได้ไปใช้หลักการทางกระบวนการสโตแคสติก สร้างตัวแบบตามที่ได้ออกแบบไว้ในวิธีดำเนินการวิจัย โดยมีส่วนประกอบต่างๆดังนี้คือ มีแนวโน้ม (Trend) ฤดูกาล (Seasonal) ทั้งสองแบบ ค่าผิดปกติ

(Irregular variation) ค่า อัต ต ส ห สัม พันธ์ (Autocorrelation) สำหรับค่าอัตตสหสัมพันธ์ จะเลือกใช้ AR1 lag ของราคาและผลผลิตข้าว



ภาพที่ 6 การวัดสหสัมพันธ์ของข้อมูลผลผลิตข้าวนาปี เฉลี่ยรายเดือน

ผลที่ได้จากการวิเคราะห์ข้อมูลข้างต้นมา
สร้างตัวแบบเพื่อวิเคราะห์ข้อมูลราคาและผลผลิตข้าว
แต่ละตัว มีรายละเอียดดังนี้

$$Y_t \sim N\left(\gamma(\Delta W(t|\alpha, \delta) + A_t) + \sum_{i=1}^{s-1} \omega_i S_{it}, [\gamma(1 + \zeta_t)\sigma_Y]^2\right)$$

เมื่อ t คือราคาและผลผลิตเฉลี่ยของข้าวแต่ละ
ตัวที่เก็บมาตามเวลา โดยที่ $t = 1, 2, \dots, n$ ซึ่ง
ค่าเฉลี่ยของ Y_t ดังสมการ (10)

$$E(Y_t) = \gamma(\Delta W(t|\alpha, \delta) + A_t) + \sum_{i=1}^{s-1} \omega_i S_{it} \quad (10)$$

ค่าความแปรปรวนของ Y_t ดังสมการ (11)

$$\text{Var}(Y_t) = [\gamma(1 + \zeta_t)\sigma_Y]^2 \quad (11)$$

กำหนดค่าการแจกแจงความน่าจะเป็นก่อน
หน้า (prior) ในตัวแบบด้วยวิธีการของเบย์ คือ

$$\text{ฟังก์ชันฤดูกาลแบบดัมมี่} = \sum_{i=1}^{s-1} \omega_i S_{it} \text{ และ}$$

ฟังก์ชันฤดูกาลแบบฟูเรียร์ คือ

$$= \omega_1 \sin(2\pi t / 12) + \omega_2 \cos(2\pi t / 12)$$

เมื่อ

$$\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_{s-1} \sim N(0, 1.0E06)$$

$$p(\sigma_Y^2) \sim \text{InvGamma}(0.1, 0.0001)$$

ฟังก์ชันแนวโน้มคือ

$$\Delta W(t|\alpha, \delta) = W(t|\alpha, \delta) - W(t-1|\alpha, \delta)$$

เมื่อ

$$\alpha \sim N_{[0, \infty)}(\mu_\alpha, \sigma_\alpha^2), p(\mu_\alpha) \sim N(0, 1.0E06),$$

$$p(\sigma_\alpha^2) \sim \text{InvGamma}(0.1, 0.0001)$$

$$\delta \sim N_{[0, \infty)}(\mu_\delta, \sigma_\delta^2), p(\mu_\delta) \sim N(0, 1.0E06),$$

$$p(\sigma_\delta^2) \sim \text{InvGamma}(0.1, 0.0001)$$

ฟังก์ชันค่าอัตโนมัติสหสัมพันธ์ที่ซ่อนเร้นอยู่: AR(i)
จะเลือกใช้ที่ lag 1 คือ

$$A_i \sim N(\lambda A_{i-1}, \sigma_A^2), p(\sigma_A^2) \sim \text{InvGamma}(0.1, 0.001) \\ \lambda \sim N(0, 1.0E06), A_0 = 0$$

ฟังก์ชันค่าผิดปกติคือ

$$\zeta_t \sim \text{Bern}(0.05)$$

และค่าคาดหวังของผลรวมของข้อมูลอนุกรม
เวลาในช่วงเวลาที่ศึกษาคือ

$$\gamma \sim N_{[0, \infty)}(\mu_\gamma, \sigma_\gamma^2), p(\mu_\gamma) \sim N(0, 1.0E06) \\ p(\sigma_\gamma^2) \sim \text{InvGamma}(0.1, 0.0001)$$

ซึ่งผลรวมของข้อมูลอนุกรมเวลาในช่วงเวลาที่
ศึกษา

$$Z \sim N(\gamma, \sigma_Z^2), p(\sigma_Z^2) \sim \text{InvGamma}(0.1, 0.0001)$$

จากตัวแบบข้างต้น และกำหนด priors ให้กับ
พารามิเตอร์ทั้งหมดแล้ว เราจะใช้วิธี Markov chain
monte carlo (MCMC) สำหรับประมาณ
ค่าพารามิเตอร์ โดยใช้วิธีการสุ่มตัวอย่างแบบกิบส์
(Gibb sampling) ซึ่งวิธีการสุ่มตัวอย่างแบบกิบส์ นี้
จะเหมาะสมกับฟังก์ชันการแจกแจงแบบมีเงื่อนไข
เมื่อจำนวนรอบของการสุ่มตัวอย่างมาก ๆ มันก็จะลู่
เข้าสู่ฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นร่วมของ
Posterior ใด ๆ (Joint posterior distribution)
สามารถเขียน likelihood ของตัวแบบได้ดังสมการที่ (12)

$$f(Y_1, \dots, Y_n | \gamma, w(t), \alpha, \delta, A_1, \dots, A_n, \omega_1, \dots, \omega_{s-1}, \xi_1, \dots, \xi_n, \sigma_Y^2, \\ \lambda, \mu_\alpha, \sigma_\alpha^2, \mu_\delta, \sigma_\delta^2, \mu_\gamma, \sigma_\gamma^2, \sigma_Z^2) \\ = \prod_{t=1}^n f(Y_t | \gamma, w(t), \alpha, \delta, A_1, \dots, \omega_{s-1}, \xi_t, \sigma_Y^2, \lambda, \mu_\alpha, \sigma_\alpha^2, \\ \mu_\delta, \sigma_\delta^2, \mu_\gamma, \sigma_\gamma^2, \sigma_Z^2) \quad (12)$$

สำหรับผลของการประเมินประสิทธิภาพของ
ตัวแบบในการประมาณค่าพารามิเตอร์ด้วยวิธี
MCMC โดยใช้อัลกอริทึมของการสุ่มตัวอย่างแบบ
กิบส์ โดยทำการเขียนอัลกอริทึมในโปรแกรม
OpenBUGS [12-13] จากค่าพารามิเตอร์ที่ประมาณ
ได้จากข้อมูลจริงมาแล้วจากอัลกอริทึมในโปรแกรม
OpenBUGS หลังจากนั้นจะใช้ค่าพารามิเตอร์ทุกตัว
มาทำการจำลองสถานการณ์สร้างชุดข้อมูลมาใหม่อีก
500 ชุดโดยเขียนอัลกอริทึมในโปรแกรม R [14] และ
ประเมินประสิทธิภาพของตัวแบบโดยการประเมิน
จากพารามิเตอร์ที่สำคัญของแต่ละตัวของฟังก์ชันการ
แจกแจงความน่าจะเป็นสะสมของแนวโน้มแบบเอ็กซ์
โพเนนเชียลที่มีฤดูกาลเป็นแบบคัมมีและแบบฟูเรียร์
ได้ผลดังตารางที่ 1-4

จากตารางที่ 1-4 พบว่าค่า RB และค่า MSE
ของพารามิเตอร์แต่ละตัวของฟังก์ชันการแจกแจง
ความน่าจะเป็นสะสมแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลที่มี
ฤดูกาลเป็นแบบคัมมี และฤดูกาลเป็นแบบฟูเรียร์ มี
ค่าต่ำมาก และพบว่าค่า CP ของพารามิเตอร์แต่ละตัว
มีค่าสูงมาก ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าประสิทธิภาพของตัว
แบบทั้งสองตัวแบบในงานวิจัยนี้อยู่ในเกณฑ์ที่ดีมาก

ตารางที่ 1 การประเมินประสิทธิภาพของตัวแบบจากพารามิเตอร์ของราคาข้าวเปลือกเจ้าความชื้น 15% ที่มีฤดูกาลเป็นแบบคัมมี

P	RB	MSE	CP	P	RB	MSE	CP
σ_Y^2	0.024	0.453	0.978	μ_γ	0.024	0.844	0.952
σ_z^2	0.028	0.549	0.968	σ_γ^2	0.021	0.375	0.945
γ	0.023	0.49	0.955	μ_α	0.025	0.95	0.984
λ	0.025	0.654	0.997	σ_α^2	0.025	0.546	0.9379
α	0.02	0.725	0.946	μ_δ	0.024	0.451	0.997
δ	0.022	0.394	0.977	σ_δ^2	0.022	0.542	0.989

ตารางที่ 2 การประเมินประสิทธิภาพของตัวแบบจากพารามิเตอร์ของผลผลิตข้าวนาปี ที่มีฤดูกาลเป็นแบบคัมมี

P	RB	MSE	CP	P	RB	MSE	CP
σ_Y^2	0.032	0.411	0.432	μ_γ	0.009	0.414	0.975
σ_z^2	0.035	0.533	0.788	σ_γ^2	0.006	0.423	0.976
γ	0.012	0.148	0.765	μ_α	0.024	0.32	0.969
λ	0.011	0.763	0.946	σ_α^2	0.017	0.345	0.963
α	0.007	0.906	0.953	μ_δ	0.014	0.613	0.976
δ	0.018	0.674	0.678	σ_δ^2	0.012	0.487	0.977

ส่วนผลของการประมาณพารามิเตอร์เมื่อทำการสร้างค่าพารามิเตอร์ที่ประมาณได้จากข้อมูลจริงของราคาข้าวเปลือกเจ้าความชื้น 15% รายเดือนเฉลี่ยจำนวน 240 วันและ ผลผลิตข้าวนาปี เฉลี่ยรายเดือนจำนวน 168 วัน ตัวอย่างผลของ Trace plot ที่แสดงการการลู่เข้าสู่การแจกแจงใดการแจกแจงหนึ่ง

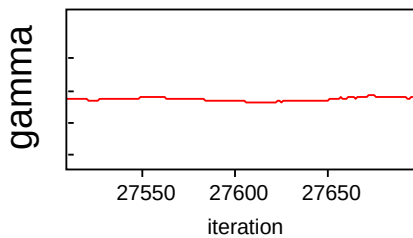
(Stationary distribution) ของพารามิเตอร์บางตัว (γ) ของราคาและผลผลิตข้าวทั้งสองตัวแบบแสดงได้ดังภาพที่ 7-12 ส่วนพารามิเตอร์ตัวอื่นที่ไม่ได้นำมาแสดงก็จะมีลู่เข้าสู่การแจกแจงใดการแจกแจงหนึ่ง เช่นกัน

ตารางที่ 3 การประเมินประสิทธิภาพของตัวแบบจากพารามิเตอร์ของราคาข้าวเปลือกเจ้าความชื้น 15% ที่มีฤดูกาลเป็นแบบฟูเรียร์

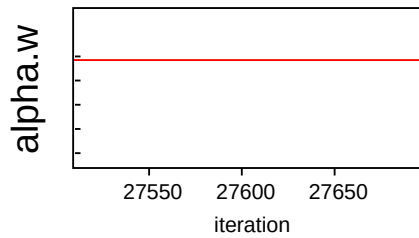
P	RB	MSE	CP	P	RB	MSE	CP
σ_Y^2	0.012	0.444	0.983	μ_γ	0.013	0.212	0.975
σ_z^2	0.002	0.549	0.975	σ_γ^2	0.031	0.329	0.994
γ	0.011	0.155	0.968	μ_α	0.016	0.872	0.975
λ	0.017	0.266	0.92	σ_α^2	0.015	0.253	0.967
α	0.012	0.387	0.95	μ_δ	0.02	0.262	0.989
δ	0.003	0.178	0.929	σ_δ^2	0.019	0.483	0.92

ตารางที่ 4 การประเมินประสิทธิภาพของตัวแบบจากพารามิเตอร์ของผลผลิตข้าวนาปี ที่มีฤดูกาลเป็นแบบฟูเรียร์

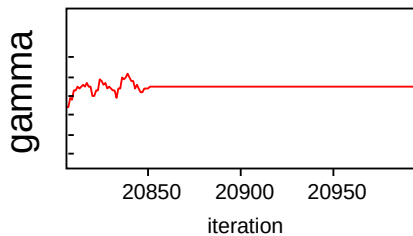
P	RB	MSE	CP	P	RB	MSE	CP
σ_Y^2	0.12	0.476	0.943	μ_γ	0.115	0.788	0.921
σ_z^2	0.118	0.598	0.954	σ_γ^2	0.111	0.658	0.973
γ	0.106	0.198	0.957	μ_α	0.113	0.854	0.928
λ	0.131	0.894	0.957	σ_α^2	0.116	0.178	0.983
α	0.017	0.839	0.964	μ_δ	0.112	0.964	0.906
δ	0.014	0.779	0.952	σ_δ^2	0.018	0.456	0.936



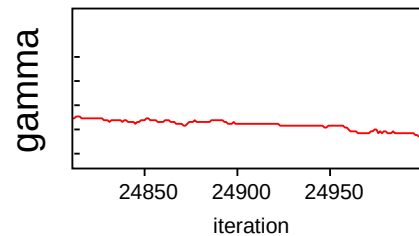
ภาพที่ 7 Trace ของ γ ของราคาข้าวเปลือกเจ้า ความชื้น 15% เฉลี่ยรายเดือนของตัวแบบที่มีฤดูกาล เป็นแบบคัมมี



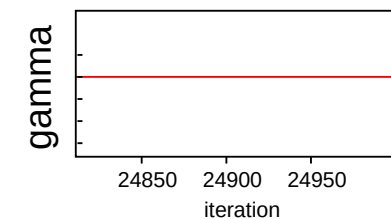
ภาพที่ 8 Trace ของ α ของราคาข้าวเปลือกเจ้า ความชื้น 15% เฉลี่ยรายเดือนของตัวแบบที่มีฤดูกาล เป็นแบบคัมมี



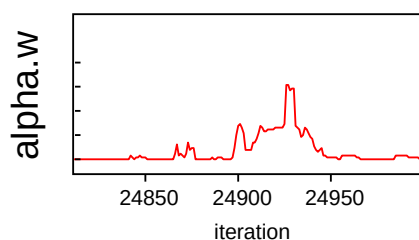
ภาพที่ 9 Trace ของ γ ของผลผลิตข้าวนาปี เฉลี่ย รายเดือนของตัวแบบที่มีฤดูกาลเป็นแบบคัมมี



ภาพที่ 10 Trace ของ γ ของราคาข้าวเปลือกเจ้า ความชื้น 15% เฉลี่ยรายเดือนของตัวแบบที่มีฤดูกาล เป็นแบบฟูเรียร์



ภาพที่ 11 Trace ของ γ ของผลผลิตข้าวนาปี เฉลี่ย รายเดือนของตัวแบบที่มีฤดูกาลเป็นแบบฟูเรียร์



ภาพที่ 12 Trace ของ α ของผลผลิตข้าวนาปี เฉลี่ย รายเดือนของตัวแบบที่มีฤดูกาลเป็นแบบฟูเรียร์

จากภาพที่ 7-12 แสดงการลู่เข้าของ MCMC โดยพิจารณาจากกราฟของ Trace plot พบว่า MCMC ลู่เข้าสู่การแจกแจงใดการแจกแจงหนึ่งเมื่อมีการสุ่มตัวอย่างแบบกิบส์ เกินจำนวน 20000 รอบ

โดยตัด 10000 รอบแรกทิ้ง ดังนั้น Trace plot ของ ราคาและผลผลิตข้าว แต่ละตัวแสดงถึงการลู่เข้าของ ทุกพารามิเตอร์ ของตัวแบบทั้งสองตัว ส่วน Trace plot ตัวอื่นๆของทั้งสองตัวแบบที่ไม่ได้นำมาแสดง

พบว่า MCMC ลู่เข้าสู่การแจกแจงใดการแจกแจงหนึ่ง เช่นเดียวกัน ส่วนผลการประมาณค่าพารามิเตอร์ แสดงได้ดังตารางที่ 5-8 และตัวอื่นๆที่ไม่ได้นำมาแสดง เพื่อนำไปใช้พยากรณ์ค่า y_t ของราคาและผลผลิต ข้าวเฉลี่ยรายเดือนแต่ละตัวต่อไปจากตารางที่ 5-8 แสดงถึงตัวอย่างของค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญบางตัวของทั้งสองตัวแบบที่ลู่เข้าสู่การแจกแจงใดแจกแจงหนึ่ง แต่ค่าพารามิเตอร์ตัวอื่นๆที่ไม่ได้แสดงในงานวิจัยนี้ก็ได้อู่เข้าสู่การแจกแจงใดแจกแจงหนึ่ง เหมือนอย่างในภาพที่ 8-15 เช่นกัน ที่ประมาณ 30000 รอบขึ้นไป เช่นกัน ซึ่งสรุปได้ว่าค่าพารามิเตอร์แต่ละตัวจะมีค่าที่ไม่เปลี่ยนแปลงแล้วจึงยอมรับผลของการประมาณค่าพารามิเตอร์ที่ได้ในตารางที่ 5-8

ตารางที่ 5 ค่าพารามิเตอร์ของราคาข้าวเปลือกเจ้า ความชื้น 15% เฉลี่ยรายเดือนของตัวแบบที่มีฤดูกาลเป็นแบบคัมมี

Parameter	Value	Parameter	Value
α	0.0118	μ_γ	-2.192
λ	0.9991	σ_λ^2	96100
δ	0.0699	σ_α^2	50.69
γ	468100	σ_δ^2	52.68
μ_α	-10.41	σ_γ^2	14.62
μ_δ	21.17	σ_z^2	8.752E+09

ตารางที่ 6 ค่าพารามิเตอร์ของผลผลิตข้าวนาปี เฉลี่ยรายเดือนของตัวแบบที่มีฤดูกาลเป็นแบบคัมมี

Parameter	Value	Parameter	Value
α	14580	μ_γ	857500
λ	0.9977	σ_λ^2	176.9
δ	5578	σ_α^2	3.042
γ	1401000	σ_δ^2	22.79
μ_α	145.3	σ_γ^2	22.14
μ_δ	155.1	σ_z^2	8.028E+10

ผลของการเปรียบเทียบตัวแบบเมื่อได้ตัวแบบที่เหมาะสมแล้วจึงเลือกใช้ค่าพารามิเตอร์ที่ประมาณได้จากข้อมูลจริง ของราคาข้าวเปลือกเจ้าความชื้น 15% รายเดือนเฉลี่ย จำนวน 228 เดือน และผลผลิตข้าวนาปี เฉลี่ยรายเดือนจำนวน 156 เดือน มาเปรียบเทียบกัน คือตัวแบบเบย์ที่มีฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นสะสมสำหรับแนวโน้มแบบเอกซ์โพเนนเชียลและมีฟังก์ชันฤดูกาลเป็นแบบคัมมี กับตัวแบบเบย์ที่มีฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นสะสมสำหรับแนวโน้มแบบเอกซ์โพเนนเชียลและมีฟังก์ชันฤดูกาลเป็นแบบฟูเรียร์เพื่อหาตัวแบบที่เหมาะสม (Fitting model) และเปรียบเทียบเพื่อตรวจสอบความถูกต้อง ของตัวแบบ (Validation model)

ตารางที่ 7 ค่าพารามิเตอร์ของราคาข้าวเปลือกเจ้าความชื้น 15% เฉลี่ยรายเดือนของตัวแบบที่มีฤดูกาลเป็นแบบฟูเรียร์

Parameter	Value	Parameter	Value
α	3364	μ_γ	208
λ	1.001	σ_λ^2	0.311
δ	13620	σ_α^2	30.4
γ	236.1	σ_δ^2	32.65
μ_α	155.8	σ_γ^2	49.35
μ_δ	140.3	σ_z^2	2233

ตารางที่ 8 ค่าพารามิเตอร์ของผลผลิตข้าวนาปี เฉลี่ยรายเดือนของตัวแบบที่มีฤดูกาลเป็นแบบฟูเรียร์

Parameter	Value	Parameter	Value
α	282300	μ_γ	35.72
λ	0.4689	σ_λ^2	1.088E-10
δ	9607	σ_α^2	23.76
γ	39.22	σ_δ^2	31.4
μ_α	130	σ_γ^2	54.43
μ_δ	130	σ_z^2	61.54

จากข้อมูลที่เหลืออีก 12 เดือนของราคาและผลผลิตของข้าว แสดงได้ดังตารางที่ 9-12

ตารางที่ 9 การเปรียบเทียบหาตัวแบบที่เหมาะสมของราคาข้าวเปลือกเจ้าความชื้น 15% เฉลี่ยรายเดือน

ข้อมูล	ตัวแบบ	การวัดค่าความผิดพลาด		
		RMSE	MSE	MAE
228	1. วิธีเบย์แบบคัมมี	0.967	0.934	0.294
	2. วิธีเบย์แบบฟูเรียร์	201.2	40496	54.27

ตารางที่ 10 การเปรียบเทียบหาตัวแบบที่เหมาะสมของผลผลิตข้าวนาปี เฉลี่ยรายเดือน

ข้อมูล	ตัวแบบ	การวัดค่าความผิดพลาด		
		RMSE	MSE	MAE
156 เดือน	1. วิธีเบย์แบบคัมมี	285.3	1.484	187.6
	2. วิธีเบย์แบบฟูเรียร์	488	2E+05	193.7

ตารางที่ 11 การเปรียบเทียบเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบของราคาข้าวเปลือกเจ้าความชื้น 15% รายเดือนเฉลี่ย

ข้อมูล	ตัวแบบ	การวัดค่าความผิดพลาด		
		RMSE	MSE	MAE
12	1. วิธีเบย์แบบคัมมี	502.3	3E+05	409.1
	2. วิธีเบย์แบบฟูเรียร์	588.2	3E+05	440.3

ตารางที่ 12 การเปรียบเทียบเพื่อตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบของผลผลิตข้าวนาปี เฉลี่ยรายเดือน

ข้อมูล	ตัวแบบ	การวัดค่าความผิดพลาด		
		RMSE	MSE	MAE
12	1. วิธีเบย์แบบคัมมี	4E+06	1.926	2E+06
	2. วิธีเบย์แบบฟูเรียร์	5E+06	2.281	2E+06

จากตารางที่ 9-12 ได้จากการที่นำข้อมูลจริงของราคาข้าวเปลือกเจ้าความชื้น 15% รายเดือนเฉลี่ย จำนวน 228 เดือน และผลผลิตข้าวนาปี เฉลี่ยรายเดือนจำนวน 156 เดือน มาประมาณค่าพารามิเตอร์เพื่อการเปรียบเทียบหาตัวแบบที่เหมาะสมและนำข้อมูลจริงของราคาข้าวเปลือกเจ้าความชื้น 15% รายเดือนเฉลี่ย จำนวน 12 เดือน และผลผลิตข้าวนาปี เฉลี่ยรายเดือนจำนวน 12 เดือน จาก

การประมาณค่าพารามิเตอร์ที่ได้เพื่อทำการเปรียบเทียบการตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบจากค่าพยากรณ์ของทั้งสองวิธี กับข้อมูลจริง พบว่าตัวแบบเบย์ที่มีฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นเหมาะสมสำหรับแนวโน้มแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลและมีฟังก์ชันฤดูกาลเป็นแบบคัมมี ให้ค่า RMSE MSE และ MAE รายเดือนเฉลี่ยต่ำสุดทั้งหมด

4. สรุปผลการวิจัยและอภิปรายผล

ข้อมูลที่ใช้ศึกษา คือ ข้อมูลราคาราคาข้าวเปลือกเจ้าความชื้น 15% เฉลี่ยรายเดือน ตั้งแต่ปี 2540-2560 จำนวน 240 เดือน และข้อมูลผลผลิตข้าวนาปี เฉลี่ยรายเดือน ตั้งแต่ปี 2545-2558 จำนวน 168 เดือน จากการพล็อตกราฟของข้อมูลตามเวลาเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูล ณ เวลาปัจจุบันกับ ข้อมูล ณ เวลา ก่อนหน้า ด้วยกราฟ Autocorrelation function (ACF) และ Partial autocorrelation function (PACF) พบว่าข้อมูลมีแนวโน้ม ข้อมูลมีบางตัวเป็นข้อมูลที่ผิดปกติ ข้อมูลมีความสัมพันธ์กันอย่างน้อย 1 lag แต่ lag 1 มีความสัมพันธ์กันมากกว่า lag อื่นๆ ดังนั้นจึงนำลักษณะของข้อมูลที่ได้ไปใช้หลักการทางกระบวนการสโตแคสติก โดยมีส่วนประกอบต่างๆ ดังนี้คือ มีแนวโน้ม (Trend) ฤดูกาล (Seasonal) ค่าผิดปกติ (Irregular variation) ค่าอัตโนมัติสัมพันธ์ (Autocorrelation) สำหรับค่าอัตโนมัติสัมพันธ์ จะเลือกใช้ AR1 lag ของราคาและผลผลิตของข้าว

หลักการของกระบวนการสโตแคสติกเพื่อสร้างตัวแบบการพยากรณ์ข้อมูลอนุกรมเวลาด้วยวิธีของเบย์ที่มีฟังก์ชันของฤดูกาลที่มีความแตกต่างกัน สำหรับการสร้างตัวแบบในงานวิจัยนี้เริ่มจากตรวจสอบลักษณะของข้อมูลจากการพล็อตกราฟของ

ข้อมูลตามเวลา เพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูล ณ เวลาปัจจุบัน กับข้อมูล ณ เวลา ก่อนหน้า ด้วยกราฟ Autocorrelation function (ACF) และ Partial autocorrelation function (PACF) เพื่อหาองค์ประกอบต่าง ๆ ของข้อมูลอนุกรมเวลา ซึ่งพบว่ามีองค์ประกอบของแนวโน้ม มีค่าผิดปกติ และอัตโนมัติสัมพันธ์ หลังจากนั้นนำส่วนประกอบต่าง ๆ ไปออกแบบสร้างตัวแบบโดยวิธีของเบย์ โดยกำหนดให้แนวโน้มมีรูปแบบเดียวกันคือ มีรูปแบบเป็นฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลที่ได้จากงานวิจัยก่อนหน้าแต่มีรูปแบบของฟังก์ชันของฤดูกาลที่แตกต่างกันคือ ฤดูกาลแบบคัมมีกับฤดูกาลแบบฟูเรียร์

การประเมินประสิทธิภาพของตัวแบบใช้ค่า RB MSE และค่า CP เมื่อได้ค่าประมาณพารามิเตอร์ที่ประมาณด้วยวิธีการของเบย์ จากข้อมูลจริงมาแล้ว จะใช้ค่าประมาณพารามิเตอร์ทุกตัวมาทำการจำลองสถานการณ์ สร้างชุดข้อมูลมาใหม่อีก 1000 ชุด ประเมินประสิทธิภาพของตัวแบบโดยดูจากค่า RB ค่า MSE และค่า CP ของพารามิเตอร์แต่ละตัว ซึ่งค่า RB และค่า MSE มีค่าต่ำมาก และค่า CP ของพารามิเตอร์แต่ละตัวมีค่าสูงมาก สรุปได้ว่าประสิทธิภาพของตัวแบบในงานวิจัยนี้อยู่ในเกณฑ์ที่ดีมาก

ตัวแบบที่นำมาเปรียบเทียบในงานวิจัยนี้ได้แก่ตัวแบบเบย์ที่มีค่าฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นเหมาะสมสำหรับแนวโน้มแบบเอ็กซ์โพเนนเชียล และมีฟังก์ชันของฤดูกาลแบบคัมมีกับฟังก์ชัน กับตัวแบบเบย์ที่มีค่าฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นเหมาะสมสำหรับแนวโน้มแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลและมีฟังก์ชันของฤดูกาล แบบฟูเรียร์ โดยเปรียบเทียบจากค่า RMSE, MSE และ MAE ซึ่งทำการเปรียบเทียบสองส่วนคือ ส่วนที่ 1 คือ ส่วนของข้อมูลใช้สำหรับ

การหาตัวแบบที่เหมาะสม (Fitting model) และ ส่วนที่ 2 คือส่วนของข้อมูลที่ใช้ตรวจสอบความถูกต้องของตัวแบบ (Validation model) ผลการวิจัยพบว่า ตัวแบบเบย์ที่มีฟังก์ชันการแจกแจงความน่าจะเป็นเหมาะสมสำหรับแนวโน้มแบบเอ็กซ์โพเนนเชียลและมีฟังก์ชันฤดูกาลเป็นแบบคัมมีให้ค่า RMSE, MSE และ MAE รายเดือนเฉลี่ยต่ำสุดทั้งหมด

ตัวแบบที่นำเสนอสามารถพยากรณ์ข้อมูลราคาและผลผลิตข้าวได้อย่างดีเพราะว่าตัวแบบที่นำเสนอมีองค์ประกอบต่าง ๆ ที่ประกอบกันขึ้นเป็นอนุกรมเวลาไว้ในตัวแบบ ทั้งค่าแนวโน้ม ฤดูกาล อัตตสหสัมพันธ์ และค่าผิดปกติ ค่าแนวโน้ม เป็นการเปลี่ยนแปลงข้อมูลมีลักษณะเป็นเส้นโค้งในทิศทางเพิ่มขึ้นหรือลดลง มีลักษณะของฤดูกาล เป็นการเปลี่ยนแปลงข้อมูลมีลักษณะการเพิ่มขึ้น และลดลงในลักษณะเดียวกันหลาย ๆ คาบ ของรอบระยะเวลาหนึ่งที่แน่นอน เรียกว่า การเปลี่ยนแปลงตามฤดูกาล มีค่าอัตตสหสัมพันธ์ ซึ่งเป็นค่าที่แสดงความสัมพันธ์ของข้อมูล ณ เวลาปัจจุบัน กับข้อมูล ณ เวลาก่อนหน้า 1 lag และมีค่าผิดปกติของข้อมูลอนุกรมเวลาที่เกิดจากเหตุการณ์ที่เราไม่สามารถคาดการณ์ได้ล่วงหน้า เช่น ภัยแล้ง หรือเหตุการณ์การเปลี่ยนแปลงทางด้านนโยบายทางการเกษตรทั้งในประเทศและต่างประเทศ สำหรับการประมาณค่าพารามิเตอร์ใช้วิธีการของเบย์ ข้อดีของวิธีการประมาณค่าพารามิเตอร์แบบเบย์คือ สามารถใช้กับตัวอย่างขนาดเล็ก ในขณะที่การประมาณค่าแบบอื่นเช่น วิธี Maximum likelihood ตัวอย่างต้องมีขนาดใหญ่ การประมาณค่าจึงจะแม่นยำ วิธีการของเบย์ สามารถประมาณค่าพารามิเตอร์ หรือฟังก์ชันของพารามิเตอร์ได้โดยตรง โดยไม่ต้องประมาณ

ค่าพารามิเตอร์บางตัวมาก่อน และประการสำคัญที่สุดคือวิธีการของเบย์สามารถใช้กับข้อมูลที่มีองค์ประกอบหลาย ๆ ด้าน และสามารถเพิ่มลดองค์ประกอบต่าง ๆ ในรูปแบบของฟังก์ชันต่าง ๆ ได้

5. กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยเรื่องนี้สำเร็จลงด้วยดี ด้วยความช่วยเหลือจากหลายหน่วยงาน คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์ และสถาบันวิจัยและพัฒนา ที่ให้การสนับสนุนการทำงานวิจัยของอาจารย์ในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร มาตั้งแต่เริ่มต้นทำเรื่องนี้คณะผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนครที่ได้ให้ทุนสนับสนุน จนกระทั่งงานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลงได้ด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Montgomery D C, Jennings C L, Kulahci M. Introduction to Time Series Analysis and Forecasting A. John Wiley & Sons. Inc.2015.
- [2] Yelland P M, Bayesian Forecasting of Part Demand. Int J Forecast. 2010;26:374-96.
- [3] Tongkhaw P, Kantanantha N. Bayesian model for time series with trend, autoregression and outliers. Tenth International Conference on ICT and Knowledge Engineering; November 21-23, Bangkok, Thailand. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE); 2012:90-4.

- [4] Tongkhaw P, Kantanantha N. Bayesian models for time series with covariates, trend, seasonality, autoregression and outliers. J Comput Sci, 2013;9(3):291-8.
- [5] มองแนวโน้มราคาข้าวไทย, ศูนย์วิจัยธนาคาร
กสิกรไทย [อินเทอร์เน็ต]. [updated 2021
Aug 18; cited 2021 Aug 9]. Available
from: <http://www.ryt9.com/s/iq03/2685248>
- [6] สิ้นค้าเกษตรล่วงหน้า, AFET [อินเทอร์เน็ต].
[updated 2021 Aug 19; cited 2021 Aug 9].
Available from: https://www.settrade.com/C03_03_AFET_Intraday.jsp
- [7] ราคาและผลผลิตข้าว, สำนักงานสถิติการเกษตร
[อินเทอร์เน็ต]. [updated 2021 Aug 15;
cited 2021 Aug 5]. Available from:
<https://www.oae.go.th>
- [8] Congdon P, Bayesian statistical
modelling . 2nd ed , John Wiley & Sons.
2007.
- [9] Bisgaard S, Kulahci M. Time Series
Analysis and Forecasting by Example.
John Wiley & Sons. Inc. 2011.
- [10] Tutorial SAS 2021 [Internet]. [updated
2021 Aug 29; cited 2021 Aug 30].
Available from: https://www.sas.com/el_gr/training/overview.html.
- [11] Najafi B, Tarazkar M. Forecasting the
quantity of pistachio export in Iran,
Application of neural network, IJTS.
2006; 39: 191-214.
- [12] OpenBUGS user manual: The open
source program for Bayesian
modelling[Internet]. 2014. [updated
2021 May 18; cited 2021 Jul 1] Available
from: <https://www.mrc-bsu.cam.ac.uk/software/bugs/openbugs/>
- [13] Cowles M K. Applied Bayesian statistics:
with R and OpenBUGS, New York,
springer. 2013.
- [14] R Core Team. R: A Language and
Environment for Statistical Computing
[Internet]. 2014. [updated 2021 May 19;
cited 2021 Jul 30] Available form:
<http://www.R-project.org>

อัลกอริทึมของ Dijkstra สำหรับการแก้ปัญหาเส้นทางที่สั้นที่สุดบนเครือข่าย ภายใต้ตัวเลขฟัซซี่สี่เหลี่ยมคางหมู

Dijkstra's Algorithm for Solving the Fuzzy Shortest Path Problem on Networks under Trapezoidal Fuzzy Number

ดร.ณิ หันวิสัย

Darunee Hunwisai

สาขาวิชาคณิตศาสตร์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์
Department of Applied Mathematics, Faculty of Science and Technology, Valaya Alongkorn Rajabhat University
under the Royal Patronage, Pathum Thani, Thailand
Corresponding author. Tel. 08 3056 5113, E-mail: darunee.hun@vru.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาวิธีการแก้ปัญหาหาเส้นทางที่สั้นที่สุดแบบตัวเลขฟัซซี่สี่เหลี่ยมคางหมู เมื่อค่าใช้จ่ายในการเดินทางมีความไม่แน่นอนหรือมีความคลุมเครือ ผู้วิจัยได้เสนอแนวทางการแก้ปัญหาเส้นทางที่สั้นที่สุดภายใต้ตัวเลขฟัซซี่สี่เหลี่ยมคางหมู (Trapezoidal fuzzy number) โดยใช้วิธีใช้เทคนิคการจัดอันดับที่แข็งแกร่ง (Robust ranking technique) ในการหาค่าที่เป็นตัวแทนของตัวเลขฟัซซี่สี่เหลี่ยมคางหมู จากนั้นใช้อัลกอริทึมของ Dijkstra เพื่อหาค่าใช้จ่ายในการเดินทางน้อยที่สุด (เส้นทางที่สั้นที่สุด) ผลการศึกษาพบว่าวิธีที่นำเสนอภายใต้สภาพแวดล้อมที่มีความคลุมเครือ สามารถหาคำตอบที่ถูกต้องและเหมาะสมได้

คำสำคัญ: ปัญหาหาเส้นทางที่สั้นที่สุด อัลกอริทึมของไดคส์ตรา ตัวเลขฟัซซี่ เทคนิคการจัดอันดับที่แข็งแกร่ง

Abstract

This objective of research is to find a solution to the shortest path problem with trapezoidal fuzzy numbers when travel expenses are uncertain or ambiguous. The researcher proposed a solution to the shortest path problem under trapezoidal fuzzy numbers by using the Robust's ranking technique to find representative values of trapezoidal fuzzy numbers. After that, the shortest path was founded using the Dijkstra algorithm. The results of the study showed that this method can find the right answer in an ambiguous environment.

Keywords: Shortest path problems, Dijkstra's algorithm, fuzzy numbers, Robust's ranking-technique

1. บทนำ

ในปัจจุบันการเดินทางไปยังสถานที่ต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นเส้นทางใด จะต้องมีการกำหนดเส้นทางในการเดินทางให้สั้นที่สุดเพื่อที่จะไปถึงยังจุดหมายโดยเร็วที่สุดและที่สำคัญคือจะต้องเสียค่าใช้จ่ายในการเดินทางให้น้อยที่สุด โดยเฉพาะอย่างยิ่งภาคการขนส่งที่ต้องการจะลดต้นทุนในการขนส่งสินค้าให้น้อยที่สุดเท่าที่จะเป็นไปได้

ปัญหาเส้นทางที่สั้นที่สุด (Shortest path problem) เป็นปัญหาหนึ่งในทฤษฎีกราฟที่ต้องการหาเส้นทางที่สั้นที่สุดในการเดินทางในโครงสร้างข้อมูลแบบกราฟระหว่างจุดยอดต้นทาง a และจุดยอดปลายทาง z โดยจะระบุตัวเลขที่แสดงน้ำหนักบนเส้นทางที่เชื่อมจุดยอดสองจุดใด ๆ ในกราฟซึ่งอาจเป็นตัวเลขแสดงระยะทาง เวลา หรือค่าใช้จ่ายในการเดินทาง เป็นต้น ในปัจจุบันจะพบว่ามีหลายสถานการณ์ที่จำเป็นต้องค้นหาเส้นทางที่สั้นที่สุด เช่น การกำหนดเส้นทางของการขนส่งสินค้าเพื่อลดต้นทุนการใช้เวลาในการเดินทางให้น้อยที่สุด การจ่ายเงินในการเดินทางที่น้อยที่สุด เป็นต้น ซึ่งการแก้ปัญหาเส้นทางที่สั้นที่สุด ข้อมูลที่จะนำมาแก้ปัญหานี้จะเป็นข้อมูลที่มีความแน่นอนแม่นยำ จึงจะส่งผลให้การตัดสินใจเป็นไปได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตาม ในการใช้งานจริงส่วนใหญ่ข้อมูลที่ได้มีความคลุมเครือหรือมีความไม่แน่นอน เช่น ความไม่แน่นอนของค่าใช้จ่ายในการขนส่งหรือในการเดินทางอาจเนื่องมาจากสภาพการจราจร สภาพอากาศ ความผันผวนของราคาน้ำมัน และระยะทางของการขนส่ง เป็นต้น จึงอาจถือได้ว่าข้อมูลมีความคลุมเครือ ในกรณีเช่นนี้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์แบบเดิมไม่สามารถนำมาใช้ในการแก้ปัญหาได้ การหาเส้นทางที่เหมาะสมที่สุดภายใต้สภาวะการณ์ที่

ไม่แน่นอนหรือมีความคลุมเครือจึงได้รับความสนใจจากนักวิจัยเป็นอย่างมาก จากงานวิจัยที่ผ่านมา นักวิจัยได้แก้ปัญหาในสถานการณ์ที่กล่าวมาข้างต้นโดยใช้แนวคิดของ Bellman RE และ Zadeh LA [1] ซึ่งเป็นการตัดสินใจในสภาพแวดล้อมที่คลุมเครือหรือที่เรียกว่าฟัซซี่ นักวิจัยจำนวนมากได้ให้ความสนใจในการศึกษาวิธีการจัดการกับปัญหาเส้นทางที่สั้นที่สุดแบบฟัซซี่ คนแรกที่กล่าวถึงปัญหานี้คือ Dubois D และ Prade H [2] ได้นำเสนออัลกอริทึมสำหรับปัญหาเส้นทางที่สั้นที่สุดแบบฟัซซี่ ซึ่งเป็นการดัดแปลงอัลกอริทึมแบบคลาสสิก Ford Moore Bellman หลังจากนั้นได้มีนักวิจัยได้ให้ความสนใจและศึกษาในประเด็นดังกล่าวเพิ่มมากขึ้น Takahashi MT และ Yamakami A [3] ได้นำเสนอการแก้ปัญหาเส้นทางที่สั้นที่สุดเมื่อข้อมูลเป็นพารามิเตอร์แบบฟัซซี่ และได้ขยายวิธีของ Okada S [4] และนำเสนออัลกอริทึมทางพันธุกรรมเพื่อใช้ในการประมาณค่าผลลัพธ์สำหรับปัญหาที่ขนาดของพารามิเตอร์มีขนาดใหญ่ขึ้นได้ Nayeem SMA และ Pal M [5] ได้ศึกษาอัลกอริทึมในการแก้ปัญหาเส้นทางที่สั้นที่สุดที่ความยาวของเส้นขอบแสดงด้วยตัวเลขฟัซซี่สามเหลี่ยมและแสดงตัวเลขแบบช่วง เขาได้ทำการเปรียบเทียบจากค่าเฉลี่ยของเส้นทางที่สั้นที่สุดแบบฟัซซี่จากจุดยอดทั้งหมดเพื่อหาระยะทางที่สั้นที่สุด โดยผลลัพธ์จากอัลกอริทึมที่นำเสนอนี้สามารถช่วยหาเส้นทางที่สั้นที่สุดแบบฟัซซี่สามเหลี่ยมและตัวเลขแบบช่วงได้ Hernandez F และคณะ [6] ได้แก้ปัญหาเส้นทางที่สั้นที่สุดบนเครือข่ายที่มีค่าพารามิเตอร์แบบฟัซซี่ โดยนำเสนออัลกอริทึมแบบวนซ้ำเพื่อเปรียบเทียบตัวเลขฟัซซี่ นอกจากนี้ได้ใช้อัลกอริทึม Ford–Moore–Bellman สำหรับกราฟทั่วไป และกราฟที่มีพารามิเตอร์เป็นลบ

และได้พัฒนาความสัมพันธ์แบบเรียงลำดับอัลกอริทึมเพื่อเป็นเครื่องมือช่วยให้ผู้มีอำนาจในการตัดสินใจสามารถเลือกเส้นทางที่สั้นที่สุดได้ Deng Y และคณะ [7] ได้นำเสนออัลกอริทึมเกี่ยวกับการแก้ปัญหาระยะทางที่สั้นที่สุดแบบฟิชชี สองวิธีคือวิธีที่หนึ่งการเพิ่มเส้นขอบสองเส้นเข้าไปกราฟ และวิธีที่สองคือแสดงการรวมค่าเฉลี่ยของตัวเลขฟิชชี และทำการหาระยะทางที่สั้นที่สุดโดยใช้อัลกอริทึมของ Dijkstra ผลจากการศึกษาพบว่าทั้งสองวิธีสามารถนำไปใช้ในการแก้ปัญหาระยะทางที่สั้นที่สุดที่เป็นแบบฟิชชีได้ และ Lin L, Wu C และ Ma L [8] ได้ศึกษาวิธีการแก้ปัญหาโดยใช้อัลกอริทึมทางพันธุกรรมสำหรับปัญหาเส้นทางที่สั้นที่สุดของฟิชชีในฟิชชีเครือข่ายในขั้นแรกเขาได้คำนวณความยาวของเส้นทางแบบฟิชชีโดยใช้เทคนิคการรวมค่าเฉลี่ยของตัวเลขฟิชชีสามเหลี่ยมและในขั้นต่อมาได้ทำการเปรียบเทียบเส้นทางที่สั้นที่สุดโดยใช้อัลกอริทึมทางพันธุกรรมจากจุดต้นทางไปยังจุดปลายทาง วิธีการนี้สามารถใช้แก้ปัญหาข้อมูลที่เป็นตัวเลขฟิชชีสามเหลี่ยมได้

อัลกอริทึมของ Dijkstra เป็นวิธีการสำหรับแก้ปัญหาระยะทางที่สั้นที่สุดและนิยมใช้มากอีกวิธีหนึ่ง วิธีการนี้ถูกสร้างขึ้นโดย Dijkstra EW [9] ในปี ค.ศ. 1956 และตีพิมพ์ในปี ค.ศ. 1959 อัลกอริทึมนี้ใช้ในการคำนวณหาเส้นทางที่สั้นที่สุดระหว่าง 2 โหนด (หรือจุด) ใด ๆ ในกราฟ โดยที่ค่าน้ำหนักของทุกโหนดจะต้องมีค่าเป็นบวก อย่างไรก็ตามในการใช้อัลกอริทึมของ Dijkstra ตัวเลขที่ใช้ต้องมีความแน่นอน ซึ่งหากตัวเลขไม่ชัดเจนมีความคลุมเครือหรืออาจกล่าวได้ว่าข้อมูลเป็นแบบฟิชชี จำเป็นต้องปรับตัวเลขที่คลุมเครือ ให้มีความชัดเจนก่อนการนำไปใช้

ในบทความวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ศึกษาวิธีแก้ปัญหาระยะทางที่สั้นที่สุด โดยกำหนดให้ข้อมูลค่าใช้จ่ายในการเดินทางแสดงด้วยตัวเลขฟิชชีสี่เหลี่ยมคางหมู เนื่องจากปัญหาที่พบจะอยู่ในรูปของตัวเลขฟิชชีสี่เหลี่ยมคางหมู และนอกจากนี้ยังสามารถใช้ได้ครอบคลุมไปถึงข้อมูลที่เป็นแบบฟิชชีสามเหลี่ยมซึ่งเป็นกรณีเฉพาะของฟิชชีสี่เหลี่ยมคางหมูอีกด้วย ในการวิเคราะห์ข้อมูลจะกล่าวถึงในสองประเด็น คือ ประเด็นแรกจะเป็นการนำข้อมูลที่เป็นตัวเลขฟิชชีสี่เหลี่ยมคางหมูมาทำการวิเคราะห์เพื่อหาค่าที่เป็นตัวแทนของตัวเลขฟิชชี โดยจะใช้เทคนิคการจัดอันดับที่แข็งแกร่ง (Robust ranking technique) ประเด็นที่สองหลังจากได้ค่าที่เป็นตัวแทนของตัวเลขฟิชชีแล้วจะใช้อัลกอริทึมของ Dijkstra เพื่อคำนวณค่าใช้จ่ายในการเดินทางน้อยที่สุด (เส้นทางที่สั้นที่สุด) **วัตถุประสงค์ของการวิจัย**

เพื่อหาวิธีการแก้ปัญหาระยะทางที่สั้นที่สุดแบบตัวเลขฟิชชีสี่เหลี่ยมคางหมู

2. วิธีดำเนินการวิจัย

ผู้วิจัยได้ดำเนินการวิจัย ดังนี้

- 1) ศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการแก้ปัญหาระยะทางสั้นที่สุดแบบฟิชชี
- 2) ศึกษาอัลกอริทึมของ Dijkstra เพื่อหาระยะทางสั้นที่สุด
- 3) แสดงการวิเคราะห์ข้อมูลที่เป็นตัวแทนของตัวเลขฟิชชีสี่เหลี่ยมคางหมู ใช้เทคนิคการจัดอันดับที่แข็งแกร่ง
- 4) การนำเสนอขั้นตอนและแสดงการหาผลลัพธ์สำหรับปัญหาเส้นทางที่สั้นที่สุดแบบฟิชชีโดยใช้อัลกอริทึมของ Dijkstra
- 5) สรุปผลการดำเนินงานและข้อเสนอแนะ

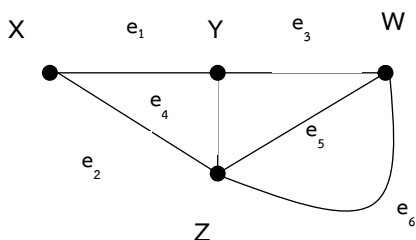
3.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

ทฤษฎีกราฟ

ทฤษฎีกราฟ เป็นคณิตศาสตร์แขนงหนึ่งที่สามารถนำความรู้ไปใช้ในการแก้ปัญหาต่าง ๆ เช่น ปัญหาการวางสายโทรศัพท์ การเดินทาง การจราจร การวางผังเมือง เป็นต้น

ส่วนประกอบของกราฟ (G) ประกอบด้วย

เซตของจุดยอด (Vertex) หรือโหนดที่ไม่เป็นเซตว่างแทนด้วย $V(G)$ เซตของเส้นเชื่อม (Edge) ที่แต่ละเส้นเชื่อมมีจุดยอดหนึ่งจุดหรือสองจุดที่เกี่ยวข้องกัน แทนด้วย $E(G)$ เส้นทางหรือวิถี (path) คือลำดับของเส้นเชื่อมในกราฟที่จุดยอดทั้งหมดแตกต่างกัน [10] แสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ตัวอย่างกราฟ

$$G = (V, E)$$

$$V(G) = \{W, X, Y, Z\}$$

$$E(G) = \{e_1, e_2, e_3, e_4, e_5, e_6\}$$

รูปแบบหนึ่งของวิถีหรือเส้นทาง X-W คือ X, e_1 , Y, e_3 , W

ฟัซซีเซต (Fuzzy set)

แนวคิดพื้นฐานของฟัซซีเซต ถูกคิดค้นขึ้นในปี ค.ศ. 1965 โดย Zadeh LA [11] เพื่อจัดการกับข้อมูลที่มีความไม่แน่นอน มีความคลุมเครือ

ฟัซซีเซตเป็นเซตที่มีขอบเขตแบบคลุมเครือ โดยที่ฟัซซีเซตมีการกำหนดค่าระดับความเป็นสมาชิกในเซต (Degree of membership) อยู่ระหว่าง 0 และ 1 ซึ่งแตกต่างจากเซตแบบฉบับ (Classical set) ที่มีการกำหนดค่าความเป็นสมาชิกเพียง 2 ค่า เท่านั้น คือ 0 หมายถึงไม่เป็นสมาชิกในเซต และ 1 หมายถึงเป็นสมาชิกในเซต และการกำหนดค่าระดับความเป็นสมาชิกนั้นต้องอาศัยฟังก์ชันความเป็นสมาชิกสำหรับฟัซซีเซต ฟังก์ชัน $\mu_{\tilde{A}}$ เรียกว่าฟังก์ชันความเป็นสมาชิก (Membership function) ของฟัซซีเซต $\tilde{A}$ นิยามดังต่อไปนี้

นิยาม 1 [11] ฟัซซีเซต $\tilde{A}$ ใน X คือคู่อันดับ $(X, \mu_{\tilde{A}})$ เมื่อ X เป็นเซตไม่ว่าง และ $\mu_{\tilde{A}} : X \rightarrow [0, 1]$ เรียก $\mu_{\tilde{A}}(x)$ ว่าระดับความเป็นสมาชิกของ x ในฟัซซีเซต $\tilde{A}$ ดังนั้นค่า $[0, 1]$ คือระดับความเป็นสมาชิกของ x ในฟัซซีเซต $\tilde{A}$

นิยาม 2 [12] กำหนดให้ฟัซซีเซต $\tilde{A}$ เป็นฟัซซีเซตบนจำนวนจริง R จะเรียก $\tilde{A}$ ว่าเป็นตัวเลขฟัซซี ถ้ามีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเป็นดังนี้ คือ

$$1) \mu_{\tilde{A}} : R \rightarrow [0, 1] \text{ มีความต่อเนื่อง}$$

$$2) \mu_{\tilde{A}}(x) = 0,$$

$$\text{ทุก } x \in (-\infty, u_1] \cup [u_r, \infty)$$

$$3) \mu_{\tilde{A}}(x) \text{ เพิ่มขึ้นอย่างสม่ำเสมอบนช่วง } [u_1, u_1] \text{ และลดลงอย่างสม่ำเสมอบนช่วง } [u_2, u_r]$$

$$4) \mu_{\tilde{A}}(x) = w,$$

$$\text{ทุก } x \in [u_1, u_2], 0 < w \leq 1$$

เมื่อ u_1, u_1, u_2, u_r เป็นจำนวนจริงบวก

ตัวเลขฟัซซี่มีหลายชนิด ชนิดที่นักวิจัยใช้มากคือตัวเลขฟัซซี่สี่เหลี่ยมคางหมู เนื่องจากสามารถใช้ได้ครอบคลุมไปถึงข้อมูลที่เป็นแบบฟัซซี่สามเหลี่ยม ในนิยามต่อไปนี้จะกล่าวถึงตัวเลขฟัซซี่สี่เหลี่ยมคางหมู α -เซตตัด และเทคนิคการจัดอันดับที่แข็งแกร่งเพื่อนำไปใช้ในการหาค่าที่เป็นตัวแทนของตัวเลขฟัซซี่ นิยามดังนี้

นิยาม 3 [2] ตัวเลขฟัซซี่ $\tilde{\mu} = (u_l, u_1, u_2, u_r)$ จะเรียกว่าเป็นตัวเลขฟัซซี่สี่เหลี่ยมคางหมู ถ้ามีฟังก์ชันความเป็นสมาชิกเป็นดังนี้

$$\mu_{\tilde{\mu}}(x) = \begin{cases} 0 & , \quad x < u_l \\ \frac{(x-u_l)}{(u_1-u_l)} & , \quad u_l \leq x \leq u_1 \\ 1 & , \quad u_1 \leq x \leq u_2 \\ \frac{(u_r-x)}{(u_r-u_2)} & , \quad u_2 \leq x \leq u_r \\ 0 & , \quad x > u_r \end{cases} \quad (1)$$

เมื่อ $u_l \leq u_1 \leq u_2 \leq u_r$

ข้อสังเกต จากนิยาม 3 ตัวเลขฟัซซี่สี่เหลี่ยมคางหมู $\tilde{\mu} = (u_l, u_1, u_2, u_r)$ ถ้า $u_1 = u_2 = p$ แล้ว $\tilde{\mu} = (u_l, p, u_r)$ จะได้ว่า $\tilde{\mu} = (u_l, p, u_r)$ เป็นฟัซซี่สามเหลี่ยมซึ่งเป็นกรณีเฉพาะของตัวเลขฟัซซี่สี่เหลี่ยมคางหมู

นิยาม 4 [13] α -เซตตัด ของตัวเลขฟัซซี่สี่เหลี่ยมคางหมู $\tilde{\mu} = (u_l, u_1, u_2, u_r)$ นิยามโดย $\tilde{\mu}_\alpha = \{x | \mu_{\tilde{\mu}}(x) \geq \alpha\}$ และ $\alpha \in [0, 1]$ เมื่อ X เป็นเซตของเอกภพสัมพัทธ์

จากนิยาม 4 จะได้ว่าเซตตัดของ $\tilde{\mu}$ คือ

$\tilde{\mu}_\alpha = [\tilde{\mu}_\alpha^L, \tilde{\mu}_\alpha^U]$ และจากสมการที่ (1) สามารถนำมาจัดรูป α -เซตตัด ของตัวเลขฟัซซี่สี่เหลี่ยมคางหมู $\tilde{\mu} = (u_l, u_1, u_2, u_r)$ ได้ดังนี้

$$\frac{u_l \alpha - u_l}{u_1 - u_l} = \alpha \quad \text{และ} \quad \frac{u_r - u_2 \alpha}{u_r - u_2} = \alpha$$

จะได้ว่า $\tilde{\mu}_\alpha^L = u_l + (u_1 - u_l)\alpha$ และ

$\tilde{\mu}_\alpha^U = u_r - (u_r - u_2)\alpha$ ดังนั้น

$$\tilde{\mu}_\alpha = [u_l + (u_1 - u_l)\alpha, u_r - (u_r - u_2)\alpha]$$

3.2 เทคนิคการจัดอันดับที่แข็งแกร่ง (Robust's ranking technique)

ต่อไปจะนำเสนอเทคนิคการจัดอันดับที่แข็งแกร่ง คิดค้นโดย Yager RR [12]

นิยาม 5 [12] กำหนดให้ $\tilde{\mu}$ เป็นตัวเลขฟัซซี่คอนเวกซ์ (Convex fuzzy number) ดัชนีการจัดอันดับที่แข็งแกร่ง (Robust's Ranking Index) นิยามโดย

$$R(\tilde{\mu}) = \frac{1}{2} \int_0^1 [\tilde{\mu}_\alpha^L, \tilde{\mu}_\alpha^U] d\alpha \quad (2)$$

เมื่อ $[\tilde{\mu}_\alpha^L, \tilde{\mu}_\alpha^U]$ เป็น α -เซตตัดของตัวเลขฟัซซี่ $\tilde{\mu}$ จากนิยามที่ 3, 6 และสมการที่ (2) จะได้

$$\begin{aligned} R(\tilde{\mu}) &= \frac{1}{2} \int_0^1 [\tilde{\mu}_\alpha^L, \tilde{\mu}_\alpha^U] d\alpha \\ &= \frac{1}{2} \int_0^1 [u_l + (u_1 - u_l)\alpha + u_r - (u_r - u_2)\alpha] d\alpha \quad (3) \end{aligned}$$

สัญลักษณ์ $R(\tilde{\mu})$ แทนดัชนีค่าของตัวเลขฟัซซี่ $\tilde{\mu}$ ในงานวิจัยนี้จะใช้สัญลักษณ์ $R(\tilde{\mu}_{ij})$ แทนดัชนีค่าเดินทางฟัซซี่จากโหนดต้นทางที่ i ไปยังโหนดปลายทางที่ j

3.3 อัลกอริทึมของ Dijkstra สำหรับการแก้ปัญหาเส้นทางที่สั้นที่สุดแบบฟัซซี่

วิธีการแก้ปัญหาเส้นทางที่สั้นที่สุดแบบฟัซซี่ (Fuzzy shortest path problem) ในที่นี้เมื่อได้ค่าของข้อมูลที่เป็นตัวแทนของตัวเลขฟัซซี่แล้ว จะใช้อัลกอริทึมของ Dijkstra [9] ในการแก้ปัญหา ซึ่งจะดำเนินการตามขั้นตอนดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 : พิจารณากราฟ/เส้นทางที่กำหนดที่เป็นตัวเลขฟัซซี่ นำตัวเลขที่ได้จากวิธีการจัดการจัดอันดับที่แข็งแกร่ง ที่เป็นตัวแทนของตัวเลขฟัซซี่ ใส่แทนลงในค่าน้ำหนักในแต่ละเส้นทางให้ครบทุกเส้นทาง

ขั้นตอนที่ 2 : ในครั้งแรกกำหนดโหนดต้นทาง (Source node) และกำหนดโหนดปลายทาง (Destination node) ที่ต้องการหาเส้นทางที่น้อยที่สุด/ระยะทางที่สั้นที่สุด

ขั้นตอนที่ 3 : กำหนดค่าระยะทางให้กับทุกโหนด ตั้งค่าเป็นศูนย์สำหรับโหนดต้นทาง และโหนดอื่นมีค่าเป็นอนันต์

ขั้นตอนที่ 4 : ทำเครื่องหมายโหนดทั้งหมดว่าไม่ได้สำรวจ ตั้งค่าโหนดเริ่มต้นเป็นปัจจุบัน

ขั้นตอนที่ 5 : ให้โหนดที่เลือกมาแล้วนี้ มีสถานะสำรวจแล้ว พิจารณาโหนดที่อยู่ติดกับโหนดที่เลือกทุกโหนด จากนั้นเลือกโหนดที่มีน้ำหนักที่น้อยที่สุด/ระยะทางที่สั้นที่สุด ให้เป็นโหนดที่มีการสำรวจแล้ว และคำนวณค่าน้ำหนักรวมของเส้นทางที่มีสถานะสำรวจแล้ว ซึ่งโหนดที่ถูกเลือกจะมีค่าระยะทางรวมน้อยกว่าโหนดที่ไม่ถูกเลือกอื่น ๆ

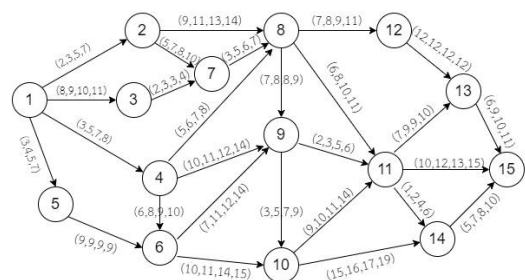
ขั้นตอนที่ 6 : ทำการสำรวจโหนดอื่นเช่นนี้ต่อไปเรื่อย ๆ จนได้โหนดที่ต้องการครบทุกโหนดทำเครื่องหมายว่ามีสถานะสำรวจแล้ว โหนดที่สำรวจแล้วจะไม่ถูกตรวจสอบอีก

ขั้นตอนที่ 7 : คำนวณค่าน้ำหนักจากตัวเลขที่ได้รวมทุกเส้นทาง

4. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

หัวข้อนี้จะนำเสนอวิธีการแก้ปัญหาค่าใช้จ่ายในการเดินทางที่น้อยที่สุด ภายใต้ความไม่แน่นอนของค่าใช้จ่ายในการเดินทาง ซึ่งจะเป็นการประมาณค่าใช้จ่าย ในสถานการณ์จริงทั่วไปข้อมูลที่น่ามาคำนวณจะได้มาจากการเก็บข้อมูลค่าใช้จ่ายในการเดินทางซึ่งเป็นการนำข้อมูลย้อนหลังมาพิจารณาว่าตัวเลขที่เกิดขึ้นอยู่ในช่วงใด แล้วจึงนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ ในตัวอย่างนี้กำหนดปัญหาให้อยู่ภายใต้สมมติฐานที่ว่า ค่าใช้จ่ายในการเดินทางเป็นแบบฟัซซี่สี่เหลี่ยมคางหมู ดังตัวอย่างต่อไปนี้

ตัวอย่างที่ 1 กำหนดให้การเดินทางจากจุดเริ่มต้นที่ 1 ไปยังจุดหมายปลายทาง 15 จะต้องมียค่าใช้จ่ายที่น้อยที่สุด กำหนดให้ตัวเลขที่อยู่บนเส้นขอบ (หรือเส้นเชื่อม) จากจุดหนึ่งไปยังอีกจุดหนึ่งที่แตกต่างกันนั้นเป็นตัวเลขค่าใช้จ่ายในการเดินทางแบบฟัซซี่สี่เหลี่ยมคางหมู ดังตารางที่ 1 และภาพแสดงค่าเดินทางไปยังจุดต่าง ๆ แสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 การแสดงค่าเดินทางที่มีความยาวเส้นขอบแบบฟัซซี่

ตารางที่ 1 แสดงข้อมูลค่าเดินทางแบบฟิชชีส์เหลี่ยมคางหมู (หน่วยเป็นบาท)

เส้นขอบ	ค่าเดินทาง	เส้นขอบ	ค่าเดินทาง	เส้นขอบ	ค่าเดินทาง
(1,2)	(2,3,5,7)	(4,9)	(10,11,12,14)	(9,11)	(2,3,5,6)
(1,3)	(8,9,10,11)	(5,6)	(9,9,9,9)	(10,11)	(9,10,11,14)
(1,4)	(3,5,7,8)	(6,9)	(7,11,12,14)	(10,14)	(15,16,17,19)
(1,5)	(3,4,5,7)	(6,10)	(10,11,14,15)	(11,13)	(7,9,9,10)
(2,7)	(5,7,8,10)	(7,8)	(3,5,6,7)	(11,14)	(1,2,4,6)
(2,8)	(9,11,13,14)	(8,9)	(7,8,8,9)	(11,15)	(10,12,13,15)
(3,7)	(2,3,3,4)	(8,11)	(6,8,10,11)	(12,13)	(12,12,12,12)
(4,6)	(6,8,9,10)	(8,12)	(7,8,9,11)	(13,15)	(6,9,10,11)
(4,8)	(5,6,7,8)	(9,10)	(3,5,7,9)	(14,15)	(5,7,8,10)

จากตารางที่ 1 จะเห็นว่าค่าเดินทางแสดงเป็นตัวเลขฟิชชีส์เหลี่ยมคางหมู ดังนั้นหากต้องการหาค่าใช้จ่ายในการเดินทางที่น้อยที่สุด จำเป็นต้องหาค่าที่เป็นตัวแทนของตัวเลขฟิชชีส์เหลี่ยมคางหมูก่อน ในที่นี้ใช้เทคนิคการจัดอันดับที่แข็งแกร่งเพื่อหาค่าใช้จ่ายในการเดินทางใหม่ ดังนี้ พิจารณาเส้นขอบ(1,2) จากโหนดที่ 1 ไปยังโหนดที่ 2 ค่าเดินทางคือ (2,3,5,7) จัดรูปตัวเลขค่าเดินทางใหม่โดยใช้นิยามที่ 3 และ 4 ดังนี้

เส้นขอบ (1,2) ค่าเดินทางคือ (2,3,5,7) โดยใช้นิยามที่ 3 และ 4 จะได้ว่า

$$\frac{2\alpha - 2}{3 - 2} = \alpha \quad \text{และ} \quad \frac{7 - 5\alpha}{7 - 5} = \alpha$$

นั่นคือ

$$\begin{aligned} \tilde{\alpha}^L &= 2 + (3 - 2)\alpha \\ &= 2 + \alpha \end{aligned}$$

และ

$$\begin{aligned} \tilde{\alpha}^U &= 7 - (7 - 5)\alpha \\ &= 7 - 2\alpha \end{aligned}$$

$$\text{ดังนั้น} \quad \tilde{\alpha} = [2 + \alpha, 7 - 2\alpha]$$

$$\text{โดยนิยามที่ 5 แทนค่า} \quad \tilde{\alpha} = [2 + \alpha, 7 - 2\alpha]$$

ในสมการ (3) ดังนี้

$$\begin{aligned} R(\tilde{\alpha}_{(1,2)}) &= \frac{1}{2} \int_0^1 [(2 + \alpha) + (7 - 2\alpha)] d\alpha \\ &= \frac{1}{2} \int_0^1 (9 - \alpha) d\alpha \\ &= 4.25 \end{aligned}$$

ดังนั้นค่าเดินทางใหม่จากโหนด 1 ไปยังโหนด 2 โดยใช้เทคนิคการจัดอันดับที่แข็งแกร่ง ได้เท่ากับ 4.25 ในทำนองเดียวกันในเส้นทางอื่น ๆ จะได้ค่าเดินทางใหม่ดังนี้ คือ

$R(\tilde{u}_{1,2}) = 4.25, R(\tilde{u}_{1,3}) = 9.5, R(\tilde{u}_{1,4}) = 5.75,$
 $R(\tilde{u}_{1,5}) = 4.75, R(\tilde{u}_{2,7}) = 7.5, R(\tilde{u}_{2,8}) = 10.75,$
 $R(\tilde{u}_{3,7}) = 3, R(\tilde{u}_{4,6}) = 8.25, R(\tilde{u}_{4,8}) = 6.5,$
 $R(\tilde{u}_{4,9}) = 11.75, R(\tilde{u}_{5,6}) = 9, R(\tilde{u}_{6,9}) = 11,$
 $R(\tilde{u}_{6,10}) = 12.5, R(\tilde{u}_{7,8}) = 5.25, R(\tilde{u}_{8,9}) = 8,$
 $R(\tilde{u}_{8,11}) = 8.75, R(\tilde{u}_{8,12}) = 8.75, R(\tilde{u}_{9,10}) = 6,$
 $R(\tilde{u}_{9,11}) = 4, R(\tilde{u}_{10,11}) = 11, R(\tilde{u}_{10,14}) = 16.75,$

$R(\tilde{u}_{11,13}) = 8.75, R(\tilde{u}_{11,14}) = 3.25, R(\tilde{u}_{11,15}) = 12.5$
 $R(\tilde{u}_{12,13}) = 12, R(\tilde{u}_{13,15}) = 9, R(\tilde{u}_{14,15}) = 7.5$

ค่าเดินทางใหม่แสดงดังตารางที่ 2 และ
 ภาพแสดงค่าเดินทางใหม่ที่ถูกรับค่าแล้วแสดงดัง
 ภาพที่ 3

ตารางที่ 2 ข้อมูลค่าเดินทางที่ถูกปรับค่าโดยใช้เทคนิคการจัดอันดับที่แข็งแกร่ง

เส้นขอบ	ค่าเดินทาง	เส้นขอบ	ค่าเดินทาง	เส้นขอบ	ค่าเดินทาง
(1,2)	4.25	(4,9)	11.75	(9,11)	4
(1,3)	9.5	(5,6)	9	(10,11)	11
(1,4)	5.75	(6,9)	11	(10,14)	16.75
(1,5)	4.75	(6,10)	12.5	(11,13)	8.75
(2,7)	7.5	(7,8)	5.25	(11,14)	3.25
(2,8)	10.75	(8,9)	8	(11,15)	12.5
(3,7)	3	(8,11)	8.75	(12,13)	12
(4,6)	8.25	(8,12)	8.75	(13,15)	9
(4,8)	6.5	(9,10)	6	(14,15)	7.5

ต่อไปจะแสดงการหาระยะทางที่สั้นที่สุดโดยใช้
 อัลกอริทึมของ Dijkstra สำหรับการแก้ปัญหา
 เส้นทางที่สั้นที่สุดแบบฟิชชี ดำเนินการตามขั้นตอน
 ดังนี้

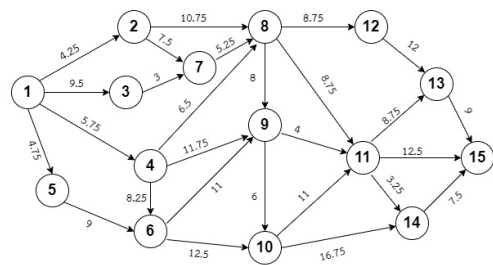
ขั้นตอนที่ 1 : พิจารณากราฟ/เส้นทางที่
 กำหนดที่เป็นฟิชชีดังตารางที่ 1 จากนั้นใช้วิธีเทคนิค
 การจัดอันดับที่แข็งแกร่ง เพื่อหาค่าที่เป็นตัวแทนของ
 ตัวเลขฟิชชี แสดงได้ดังตารางที่ 2 และแทนค่า
 น้ำหนักในแต่ละเส้นทาง ให้ครบทุกเส้นทางดัง
 ภาพที่ 2

ขั้นตอนที่ 2 : กำหนดโหนด 1 เป็นโหนดต้น
 ทาง และกำหนดโหนด 15 เป็นโหนดปลายทาง

ขั้นตอนที่ 3 : ให้โหนด 1 มีค่าเริ่มต้นเป็น
 ศูนย์ และโหนด 2 ถึง 15 มีค่าเป็นอนันต์

ขั้นตอนที่ 4 : พิจารณาโหนดที่อยู่ติดกับโหนด
 1 ซึ่งมีโหนด 2, 3, 4 และ 5 เลือกโหนดที่มีค่าเดินทาง
 น้อยที่สุด นั่นคือโหนด 2 ให้เป็นโหนดที่มีการสำรวจ
 แล้ว และคำนวณค่าน้ำหนักรวมของเส้นทางที่มี
 สถานะสำรวจแล้ว ซึ่งโหนดที่ถูกเลือกจะมีค่า
 ระยะทางรวมน้อยกว่าโหนดที่ไม่ถูกเลือกอื่น ๆ

ขั้นตอนที่ 5 : ทำการสำรวจโหนดอื่นเช่นนี้
ต่อไปเรื่อย ๆ จนได้โหนดที่ต้องการครบทุกโหนด
ขั้นตอนที่ 6 : คำนวณค่าน้ำหนักจากตัวเลขที่
ได้รวมทุกเส้นทาง



ภาพที่ 3 การแสดงค่าเดินทางที่ถูกปรับค่าโดยใช้
เทคนิคการจัดอันดับที่แข็งแกร่ง

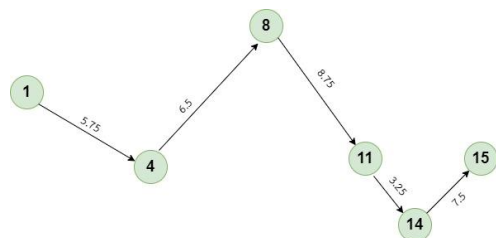
ตารางที่ 3 ลำดับการหาระยะทางที่สั้นที่สุดโดยอัลกอริทึมของ Dijkstra

ลำดับ ขั้นตอน (step)	เส้นทางที่สำรวจแล้ว (Explored)	เส้นทางที่ยังไม่ได้สำรวจ (Unexplored)
1		$1^0, 2^\infty, 3^\infty, 4^\infty, 5^\infty, 6^\infty, 7^\infty, 8^\infty, 9^\infty, 10^\infty, 11^\infty, 12^\infty, 13^\infty, 14^\infty, 15^\infty$
2	1^0	$2^{4.25(1)}, 3^{9.5(1)}, 4^{5.75(1)}, 5^{4.75(1)}, 6^\infty, 7^\infty, 8^\infty, 9^\infty, 10^\infty, 11^\infty, 12^\infty, 13^\infty, 14^\infty, 15^\infty$
3	$1^0, 2^{4.25(1)}$	$3^{9.5(1)}, 4^{5.75(1)}, 5^{4.75(1)}, 6^\infty, 7^{11.75(2)}, 8^{15(2)}, 9^\infty, 10^\infty, 11^\infty, 12^\infty, 13^\infty, 14^\infty, 15^\infty$
4	$1^0, 2^{4.25(1)}, 5^{4.75(1)}$	$3^{9.5(1)}, 4^{5.75(1)}, 6^{13.75(5)}, 7^{11.75(2)}, 8^{15(2)}, 9^\infty, 10^\infty, 11^\infty, 12^\infty, 13^\infty, 14^\infty, 15^\infty$
5	$1^0, 2^{4.25(1)}, 5^{4.75(1)}, 4^{5.75(1)}$	$3^{9.5(1)}, 6^{13.75(5)}, 7^{11.75(2)}, 8^{12.25(4)}, 9^{17.5(4)}, 10^\infty, 11^\infty, 12^\infty, 13^\infty, 14^\infty, 15^\infty$
6	$1^0, 2^{4.25(1)}, 5^{4.75(1)}, 4^{5.75(1)}, 3^{9.5(1)}$	$6^{13.75(5)}, 7^{11.75(2)}, 8^{12.25(4)}, 9^{17.5(4)}, 10^\infty, 11^\infty, 12^\infty, 13^\infty, 14^\infty, 15^\infty$
7	$1^0, 2^{4.25(1)}, 5^{4.75(1)}, 4^{5.75(1)}, 3^{9.5(1)}, 7^{11.75(2)}$	$6^{13.75(5)}, 8^{12.25(4)}, 9^{17.5(4)}, 10^\infty, 11^\infty, 12^\infty, 13^\infty, 14^\infty, 15^\infty$
8	$1^0, 2^{4.25(1)}, 5^{4.75(1)}, 4^{5.75(1)}, 3^{9.5(1)}, 7^{11.75(2)}, 8^{12.25(4)}$	$6^{13.75(5)}, 9^{17.5(4)}, 10^\infty, 11^{21(8)}, 12^{21(8)}, 13^\infty, 14^\infty, 15^\infty$

ตารางที่ 3 (ต่อ) ลำดับการหาระยะทางที่สั้นที่สุดโดยอัลกอริทึมของ Dijkstra

ลำดับ ขั้นตอน (step)	เส้นทางที่สำรวจแล้ว (Explored)	เส้นทางที่ยังไม่ได้สำรวจ (Unexplored)
9	$1^0, 2^{4.25(1)}, 5^{4.75(1)}, 4^{5.75(1)}, 3^{9.5(1)}, 7^{11.75(2)}, 8^{12.25(4)}, 6^{13.75(5)}$	$9^{17.5(4)}, 10^{26.25(6)}, 11^{21(8)}, 12^{21(8)}, 13^\infty, 14^\infty, 15^\infty$
10	$1^0, 2^{4.25(1)}, 5^{4.75(1)}, 4^{5.75(1)}, 3^{9.5(1)}, 7^{11.75(2)}, 8^{12.25(4)}, 6^{13.75(5)}, 9^{17.5(4)}$	$10^{23.5(9)}, 11^{21(8)}, 12^{21(8)}, 13^\infty, 14^\infty, 15^\infty$
11	$1^0, 2^{4.25(1)}, 5^{4.75(1)}, 4^{5.75(1)}, 3^{9.5(1)}, 7^{11.75(2)}, 8^{12.25(4)}, 6^{13.75(5)}, 9^{17.5(4)}, 11^{21(8)}$	$10^{23.5(9)}, 12^{21(8)}, 13^{29.75(11)}, 14^{24.25(11)}, 15^{33.5(11)}$
12	$1^0, 2^{4.25(1)}, 5^{4.75(1)}, 4^{5.75(1)}, 3^{9.5(1)}, 7^{11.75(2)}, 8^{12.25(4)}, 6^{13.75(5)}, 9^{17.5(4)}, 11^{21(8)}, 12^{21(8)}$	$10^{23.5(9)}, 13^{29.75(11)}, 14^{24.25(11)}, 15^{33.5(11)}$
13	$1^0, 2^{4.25(1)}, 5^{4.75(1)}, 4^{5.75(1)}, 3^{9.5(1)}, 7^{11.75(2)}, 8^{12.25(4)}, 6^{13.75(5)}, 9^{17.5(4)}, 11^{21(8)}, 12^{21(8)}, 10^{23.5(9)}$	$13^{29.75(11)}, 14^{24.25(11)}, 15^{33.5(11)}$
14	$1^0, 2^{4.25(1)}, 5^{4.75(1)}, 4^{5.75(1)}, 3^{9.5(1)}, 7^{11.75(2)}, 8^{12.25(4)}, 6^{13.75(5)}, 9^{17.5(4)}, 11^{21(8)}, 12^{21(8)}, 10^{23.5(9)}, 14^{24.25(11)}$	$13^{29.75(11)}, 15^{31.75(14)}$
15	$1^0, 2^{4.25(1)}, 5^{4.75(1)}, 4^{5.75(1)}, 3^{9.5(1)}, 7^{11.75(2)}, 8^{12.25(4)}, 6^{13.75(5)}, 9^{17.5(4)}, 11^{21(8)}, 12^{21(8)}, 10^{23.5(9)}, 14^{24.25(11)}, 13^{29.75(11)}$	$15^{31.75(14)}$
16	$1^0, 2^{4.25(1)}, 5^{4.75(1)}, 4^{5.75(1)}, 3^{9.5(1)}, 7^{11.75(2)}, 8^{12.25(4)}, 6^{13.75(5)}, 9^{17.5(4)}, 11^{21(8)}, 12^{21(8)}, 10^{23.5(9)}, 14^{24.25(11)}, 13^{29.75(11)}, 15^{31.75(14)}$	

จากตารางที่ 3 แสดงลำดับขั้นตอนในการหา
ระยะทางที่สั้นที่สุดแบบพีชคณิตได้คำตอบที่น้อยที่สุด
โดยเริ่มต้นจากโหนดที่ 1 จนถึงโหนดที่ 15 เส้นทาง
ที่ได้จะเริ่มต้นเดินทางจากโหนดที่ 1 ไปยังโหนดที่ 4
ต่อไปยังโหนดที่ 8 ไปยังโหนดที่ 11 ไปยังโหนดที่ 14
และสุดท้ายไปยังโหนดที่ 15 แสดงเส้นทางดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 การแสดงระยะทางที่สั้นที่สุด

จากตารางที่ 3 ระยะทางจากโหนดที่ 1 ไปยังโหนดอื่น ๆ แสดงได้ดังนี้

จากโหนดที่ 1 ไปยังโหนดที่ 2 : $1 \rightarrow 2 = 4.25$

จากโหนดที่ 1 ไปยังโหนดที่ 3 : $1 \rightarrow 3 = 9.51$

จากโหนดที่ 1 ไปยังโหนดที่ 4 : $1 \rightarrow 4 = 5.75$

จากโหนดที่ 1 ไปยังโหนดที่ 5 : $1 \rightarrow 5 = 4.75$

จากโหนดที่ 1 ไปยังโหนดที่ 6 : $1 \rightarrow 5 \rightarrow 6 = 13.75$

จากโหนดที่ 1 ไปยังโหนดที่ 7 : $1 \rightarrow 2 \rightarrow 7 = 11.75$

จากโหนดที่ 1 ไปยังโหนดที่ 8 : $1 \rightarrow 4 \rightarrow 8 = 12.25$

จากโหนดที่ 1 ไปยังโหนดที่ 9 : $1 \rightarrow 4 \rightarrow 9 = 17.5$

จากโหนดที่ 1 ไปยังโหนดที่ 10 : $1 \rightarrow 4 \rightarrow 9 \rightarrow 10 = 23.5$

จากโหนดที่ 1 ไปยังโหนดที่ 11 : $1 \rightarrow 4 \rightarrow 8 \rightarrow 11 = 21$

จากโหนดที่ 1 ไปยังโหนดที่ 12 : $1 \rightarrow 4 \rightarrow 8 \rightarrow 12 = 21$

จากโหนดที่ 1 ไปยังโหนดที่ 13 : $1 \rightarrow 4 \rightarrow 8 \rightarrow 11 \rightarrow 13 = 29.75$

จากโหนดที่ 1 ไปยังโหนดที่ 14 : $1 \rightarrow 4 \rightarrow 8 \rightarrow 11 \rightarrow 14 = 24.25$

จากโหนดที่ 1 ไปยังโหนดที่ 15 : $1 \rightarrow 4 \rightarrow 8 \rightarrow 11 \rightarrow 14 \rightarrow 15 = 31.75$

จากผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าใช้จ่ายทางในทุกเส้นทาง พบว่าเส้นทางที่ทำให้ค่าใช้จ่ายน้อยที่สุดคือเริ่มต้นเดินทางจากโหนดที่ 1 ไปยังโหนด

ที่ 4, 8, 11, 14 และ 15 ตามลำดับ ซึ่งค่าใช้จ่ายในการเดินทางที่มีค่าน้อยที่สุดคือ 31.75 บาท

5. สรุปผลการวิจัย

ปัญหาเส้นทางที่สั้นที่สุดแบบฟัซซี่ เป็นปัญหาการเพิ่มประสิทธิภาพเครือข่ายแบบผสมผสานที่ได้รับคามนิยมอย่างมากในด้านทฤษฎีกราฟแบบฟัซซี่จากการศึกษาวิจัยของนักวิจัยหลายคน ที่กล่าวมาแล้วข้างต้น ซึ่งได้ใช้วิธีการหรือเครื่องมือในการหาระยะทางที่สั้นที่สุดด้วยวิธีการต่าง ๆ ที่แตกต่างกันภายใต้ข้อจำกัดที่ข้อมูลมีความไม่แน่นอนหรือมีความคลุมเครือ ดังนั้นในบทความวิจัยนี้ได้แสดงถึงวิธีการแก้ปัญหาดังกล่าว โดยกำหนดให้ค่าใช้จ่ายในการเดินทางแสดงด้วยตัวเลขฟัซซี่สี่เหลี่ยมคางหมู จากนั้นวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้เทคนิคการจัดอันดับที่แข็งแกร่งในการหาค่าที่เป็นตัวแทนของตัวเลขฟัซซี่ และแก้ปัญหาระยะทางที่สั้นที่สุด เพื่อหาค่าเดินทางที่น้อยที่สุดโดยใช้อัลกอริทึมของ Dijkstra แนวทางในการแก้ปัญหาที่กล่าวมาในบทความนี้ จะทำให้ผู้ตัดสินใจมีเครื่องมือที่ช่วยในการตรวจสอบและแก้ปัญหภายใต้สถานการณ์ที่ข้อมูลมีความคลุมเครือได้อีกทางหนึ่ง นอกจากนี้ยังสามารถนำวิธีการนี้ไปประยุกต์ใช้ได้กับสถานการณ์ปัญหาในชีวิตจริงในลักษณะเดียวกันนี้ได้ เช่น ปัญหาการคมนาคม การขนส่ง การเดินทางท่องเที่ยว เป็นต้น

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Bellman RE, Zadeh LA. Decision making in a fuzzy environment. Manage Sci. 1970; 17(4):141-64.

- [2] Dubois D, Prade H. Theory and Applications: Fuzzy Sets and Systems, New York:Academic Press;1980.
- [3] Takahashi MT, Yamakami A. On fuzzy shortest path problems with fuzzy parameters: an algorithmic approach. Fuzzy Logic Control for an Autonomous Robot. 2005 Annual meeting of the North American fuzzy information processing society; 26-28 June 2005; Detroit, MI, USA. IEEE; 2005.
- [4] Okada S. Fuzzy shortest path problems incorporating interactivity among paths. Fuzzy Sets Syst. 2004; 142(3):335–57.
- [5] Nayeem SMA, Pal M. Shortest path problem on a network with imprecise edge weight. Fuzzy Optim Decis Mak. 2005;4(4):293–312
- [6] Hernandez F, Lamata MT, Verdegay JL, Yamakami A. The shortest path problem on networks with fuzzy parameters. Fuzzy Sets Syst. 2007; 158(14):1561–70
- [7] Deng Y, Chen Y, Zhang Y, Mahadevan S. Fuzzy Dijkstra algorithm for shortest path problem under uncertain environment. Appl Soft Comput. 2012; 12(3):1231–7.
- [8] Lin L, Wu C, Ma L. A genetic algorithm for the fuzzy shortest path problem in a fuzzy network. Complex Intell Systems. 2021; 7:225–34
- [9] Dijkstra EW. A note on two problems in connexion with graphs. Numer Math (Heidelb). 1959;1:269–71.
- [10] Rosen KH. Graphs. Discrete mathematics and its applications. 7th ed. New York: McGraw-Hill; 2012. p. 641-79.
- [11] Zadeh LA. Fuzzy sets . Inf Control. 1965; 8(3):338-56.
- [12] Yager RR. A procedure for ordering fuzzy subsets of the unit interval. Information Science. 1981; 24:143–61.
- [13] Mateos A, Jiménez A. A trapezoidal fuzzy numbers-based approach for aggregating group preferences and ranking decision alternatives in MCDM. Evolutionary Multi-Criterion Optimization. Berlin: Heidelberg; 2009. p. 365–79.

การจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคโดยโปรแกรม VISSIM เพื่อปรับปรุงมาตรการควบคุม
การจราจรบริเวณจุดตัดผ่านทางรถไฟด้วยสัญญาณไฟจราจรแบบพรีเอมชัน
Traffic Microsimulation Using VISSIM to Improve Traffic Control Measures at
Railway Intersection by Preemption System

ธวัชชัย ปัญญาคิด^{1*}, อัมพล การุณสุนทวงษ์¹

Thawatchai Phanyakit^{1*}, Ampol Karoonsoontawong¹

¹ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

¹Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Thailand

*Corresponding author. E-mail: thawatchai.enkku@gmail.com

บทคัดย่อ

การศึกษานี้เป็นการศึกษาเพื่อหามาตรการปรับปรุงระบบควบคุมระยะเวลาของเครื่องกั้นทางรถไฟบริเวณสถานีหนองแขมกว้างตัดกับทางหลวงหมายเลข 216 (วงแหวนด้านทิศตะวันออก) จังหวัดอุดรธานี เนื่องจากบริเวณดังกล่าวเกิดปัญหาการติดขัดของการจราจรในช่วงเวลาเร่งด่วนเนื่องจากมีปริมาณจราจรที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในแต่ละปี แต่ในกรณีนี้จะศึกษาเฉพาะเรื่องของระยะเวลาที่กั้นทางรถไฟที่นานเกินไปเท่านั้น โดยจะจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคด้วยโปรแกรม VISSIM เพื่อกำหนดตำแหน่งการติดตั้งระบบตรวจจับการมาถึงของขบวนรถไฟ (Detector) ก่อนถึงจุดตัดทางรถไฟด้วยระบบพรีเอมชันเพื่อควบคุมระยะเวลาของเครื่องกั้นให้มีความเหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงสุด เพื่อลดปัญหาการจราจรที่เกิดขึ้นให้น้อยลงได้ โดยจากการศึกษาทำให้ได้ผลการศึกษาที่สามารถ ลดความยาวแถวคอยของยานพาหนะได้เฉลี่ยร้อยละ 41 ลดเวลาที่ใช้ในการเดินทางได้เฉลี่ยร้อยละ 4 ลดเวลาการสูญเสียเนื่องจากความล่าช้าได้เฉลี่ยร้อยละ 13 และ ลดเวลาสูญเสียเนื่องจากต้องหยุดรอสัญญาณไฟได้เฉลี่ยร้อยละ 47 เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรการเดิมซึ่งใช้เจ้าหน้าที่ของการรถไฟ ฯ เป็นผู้ควบคุมเครื่องกั้น

คำสำคัญ: ปัญหาการจราจร จุดตัดทางรถไฟ สัญญาณไฟจราจรแบบพรีเอมชัน

ABSTRACT

The study was conducted to gain improvement measures of time control for crossing gates at the intersection of the railroad crossing between Nong Khon Kwang station with highway 216 (Eastern Ring Road), Udon Thani province. This area has experienced heavy traffic congestion during rush hour because traffic volume has increased every year. In this study, only the gate time issue was highlighted. Traffic microsimulation was carried on by using VISSIM in order to

Received 23-01-2022
Revised 17-03-2022
Accepted 18-03-2022

specify the location for installing a detector to detect trains before reaching the railway intersection using preemption system to obtain high suitability and efficiency in gate time control and to reduce the traffic congestion problem. Compared with the previous measures that the gates were controlled by officers, the results revealed that queue length of vehicles were lower (41%), travel time became shorter (4%), time lost due to delays (13%), and time lost due to being stopped by traffic lights (47%).

Keyword: Traffic problem, Railway intersection, Preemption system

1. บทนำ

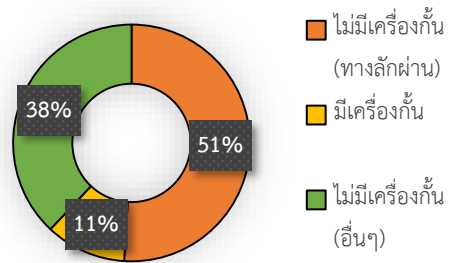
1.1 ทางแยกจุดตัดทางรถไฟ (Railroad crossing)

ทางแยกจุดตัดเป็นตำแหน่งบนโครงข่ายถนนที่เกิดจากการตัดกันของถนนทางแยกจึงมักเป็นบริเวณที่มีการขัดแย้งกันของกระแสการจราจร โดยเฉพาะอย่างยิ่งในกรณีที่มีปริมาณการจราจรจำนวนมากวิ่งเข้าสู่ทางแยก ถ้าการจัดการกระแสการจราจรบริเวณทางแยกไม่มีประสิทธิภาพแล้วอาจก่อให้เกิดการจราจรติดขัดและแออัดในปริมาณที่สูงได้ ด้วยเหตุนี้การจัดการระเบียบการเคลื่อนที่ของกระแสการจราจรบริเวณทางแยกจึงเป็นสิ่งที่มีความสำคัญและจำเป็นต่อการออกแบบโครงข่ายถนนในเมือง [1]

จุดตัดทางรถไฟ คือจุดตัดระหว่างถนนทางหลวงกับทางรถไฟ ในปัจจุบันพบว่า มีจุดตัดทางรถไฟมีทั้งสิ้น 2,463 แห่ง ซึ่งการรถไฟแห่งประเทศไทย (รฟท.) ได้ติดตั้งระบบป้องกันอุบัติเหตุเพียงประมาณ 699 แห่งเท่านั้นจึงทำให้เห็นว่ายังมีจุดตัดผ่านมากกว่า 1,000 แห่ง ที่ยังไม่มีมาตรการป้องกันอุบัติเหตุนี้ ทำให้ยังคงมีอุบัติเหตุบริเวณจุดตัดทางรถไฟเกิดขึ้นอยู่บ่อยครั้ง อย่างไรก็ตามอุบัติเหตุที่เกิดจากจุดตัดทางรถไฟนั้นมีสาเหตุหลัก ๆ

มาจากทัศนวิสัย สภาพแวดล้อม ตลอดจนความบกพร่องของอุปกรณ์บริเวณทางตัดผ่าน หรือเกิดขึ้นเนื่องจากความประมาทเลินเล่อ ความคะนอง และการไม่ปฏิบัติตามกฎจราจร จากตัวเลขสถิติของการรถไฟแห่งประเทศไทยพบว่าตั้งแต่ปีงบประมาณ พ.ศ.2545-2556 มีอุบัติเหตุรถไฟชนกับยานพาหนะหรือคนที่สัญจรผ่านจุดตัดทางรถไฟรวมเป็นจำนวนมากถึง 1,912 ครั้ง มีผู้เสียชีวิตรวม 621 ราย และบาดเจ็บ 1,909 ราย หากพิจารณาจากเส้นทางรถไฟในประเทศไทยที่มีความยาวรวมกว่า 4,000 กิโลเมตรพบว่ามีการตัดผ่านเส้นทางรถไฟมากถึง 2,457 แห่ง ซึ่งทางตัดผ่านเส้นทางรถไฟเหล่านี้จะมีระบบป้องกันอุบัติเหตุทั้งแบบที่มีเครื่องกั้นและไม่มีเครื่องกั้น บางแห่งเป็นทางตัดผ่านที่เป็นสะพานหรืออุโมงค์และในจำนวนนี้เป็นทางตัดผ่านของประชาชนในท้องถิ่นอีก 538 แห่ง ซึ่งเป็นทางตัดผ่านที่ผิดกฎหมาย (ทางลักผ่าน) เนื่องจากยังไม่ได้รับการอนุญาตอย่างถูกต้องจากการรถไฟฯ แต่อย่างไรก็ตามให้บริเวณดังกล่าวมักเกิดอุบัติเหตุขึ้นบ่อยครั้ง จากสถิติพบว่าอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นในบริเวณจุดตัดทางลักผ่านจะมีอุบัติเหตุเกิดขึ้นถึง 51% บริเวณจุดตัดทางรถไฟที่ถูกกฎหมายแต่ไม่มีเครื่องกั้น 38% และบริเวณบริเวณจุดตัดที่มีอุบัติเหตุบ่อยที่สุดคือบริเวณจุดที่มีเครื่องกั้น 11% แสดงดังภาพที่ 1 [1]

จุดตัดทางรถไฟที่พบเห็นในปัจจุบันแบ่งได้เป็น 4 ประเภท คือ จุดตัดทางรถไฟแบบต่างระดับ จุดตัดทางรถไฟแบบมีเครื่องกั้นจุดตัดทางรถไฟแบบควบคุมด้วยเครื่องหมายจราจร และจุดตัดทางรถไฟที่เป็นทางลัดผ่าน ตัวอย่างจุดตัดทางรถไฟแต่ละชนิดแสดงดังภาพที่ 2-5 [2]



ภาพที่ 1 สถิติอุบัติเหตุบริเวณจุดตัดทางรถไฟ [2]



ภาพที่ 2 จุดตัดทางรถไฟแบบทางต่างระดับ [2]



ภาพที่ 3 ตัวอย่างจุดตัดทางรถไฟแบบมีเครื่องกั้น [2]



ภาพที่ 4 จุดตัดทางรถไฟแบบควบคุมด้วยเครื่องหมายจราจร (ไม่มีเครื่องกั้น) [2]



ภาพที่ 5 ทางลัดผ่าน [2]

ตามคู่มือการจัดการด้านสิ่งอำนวยความสะดวกและปลอดภัยบริเวณทางตัดผ่านทางรถไฟ ในชุดระบบมาตรฐานความปลอดภัยด้านการจราจรและขนส่งระยะที่ 2 ของสำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและจราจรได้กำหนดเกณฑ์

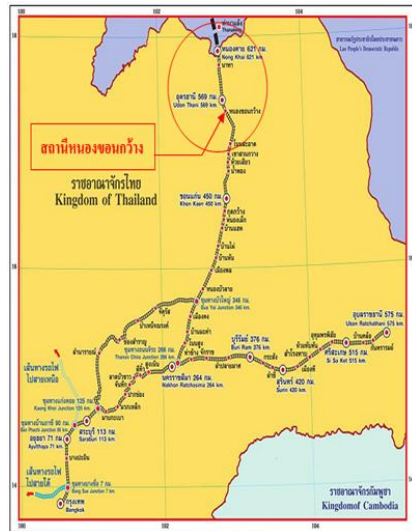
เบื้องต้นอุปกรณ์ควบคุมทางตัดผ่านทางรถไฟที่เหมาะสมกับค่าคุณควบคุมจราจร (Traffic moment, T.M.) ในเวลา 1 วัน แสดงดังตารางที่ 1 [2]

ตารางที่ 1 เกณฑ์การเลือกใช้อุปกรณ์ควบคุม

ค่า Traffic Movement (T.M.)	ประเภทของอุปกรณ์ควบคุมทางตัดผ่านทางรถไฟ
< 10,000	เครื่องหมายจราจร
10,000 - 40,000	เครื่องกั้นอัตโนมัติ (ข.1 หรือ ข.2)
40,000 - 100,000	เครื่องกั้นชนิดมีพนักงานเปิด - ปิด (ก.0 - ก.4)
> 100,000	ทางตัดผ่านต่างระดับ

(สนข,2561)

จากข้อมูลของพื้นที่ศึกษาบริเวณจุดตัดทางรถไฟสถานีหนองขอนกว้างกับทางหลวงหมายเลข 216 (วงแหวนด้านทิศตะวันออก) จังหวัดอุดรธานี แสดงดังภาพที่ 6 พบว่า ค่า T.M. มีค่าเท่ากับ 289,848 ซึ่งมีค่า T.M. มากกว่า 100,000 [3] ซึ่งแยกนี้ควรจัดสร้างทางข้ามแบบต่างระดับ (Overpass) ตามมาตรฐานความปลอดภัยที่กำหนดไว้ ดังตารางที่ 1 เนื่องจากมีค่า T.M. > 100,000 แต่สภาพในปัจจุบันยังไม่ได้ดำเนินการให้เป็นไปตามมาตรฐาน อาจจะเนื่องด้วยข้อจำกัดบางประการ ทำให้บริเวณแยกนี้ ในช่วงโมงเร่งด่วนเช้าและเย็นมีปริมาณจราจรที่หนาแน่นมากเมื่อเทียบกับปริมาณจราจรในเวลาปกติ ทำให้มีผลกระทบทำให้เกิดความยาวแถวคอย เวลาที่ใช้การเดินทาง เวลาที่สูญเสียเนื่องจากความล่าช้า เผลี่ยและหยุดรอเมื่อมีขบวนรถไฟมาที่สูงมาก ดังภาพที่ 7 ทำให้ผู้วิจัยสนใจที่จะศึกษาเพื่อหามาตรการปรับปรุงสัญญาณไฟจราจรและการจัดการเครื่องกั้นทางรถไฟบริเวณจุดตัดทางรถไฟที่เป็นพื้นที่ดังกล่าวนี้



ภาพที่ 6 พื้นที่ศึกษา



ภาพที่ 7 สภาพการจราจรของพื้นที่ศึกษา

1.2 ระบบ 프리เอิมชั่น (Preemption system)

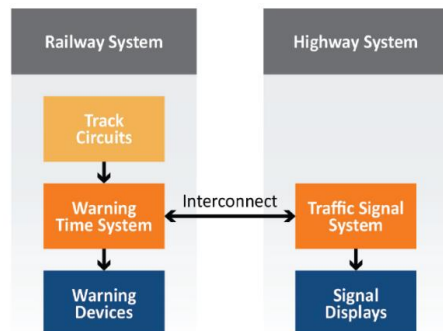
ระบบสัญญาณไฟจราจรแบบฟรีเอิมชั่น (Preemption of traffic signals) เป็นระบบที่ติดตั้งบนทางรถไฟ เพื่อให้มีระบบการตรวจจับขบวนรถไฟที่กำลังเดินทางเข้าใกล้จุดตัดถนนทางหลวง ซึ่งการตรวจจับนั้นจะใช้เทคโนโลยีต่าง ๆ ตั้งแต่ระบบแบบง่าย ๆ ไปจนกระทั่งระบบขั้นสูงที่ใช้ทำนายระยะเวลาที่ขบวนรถไฟจะมาถึงบริเวณจุดตัดทางรถไฟโดยใช้ความเร็วของขบวนรถไฟมาพิจารณาใช้

คาดการณ์ในการตรวจจับตำแหน่งของขบวนรถไฟ และเวลาที่รถไฟจะวิ่งมาถึงจุดตัดทางรถไฟ

ระบบสัญญาณไฟจราจรแบบพรีเอมชั่น บริเวณจุดตัดทางรถไฟนั้น มีความสำคัญทั้งในด้านความปลอดภัยและการขนส่งบริเวณจุดตัดทางรถไฟ โดยจะมีการเชื่อมต่อกันระหว่างระบบเวลาแจ้งเตือนทางรถไฟและระบบสัญญาณจราจรทางหลวง จุดประสงค์ในการเชื่อมต่อนี้เพื่อที่จะรับรองว่าไม่มีพาหนะโดยอยู่บนทางรถไฟเมื่อรถไฟมาถึงบริเวณจุดตัดซึ่งมีวิธีการหลายอย่างที่สัญญาณจราจรสามารถที่จะป้องกันไม่ให้พาหนะอยู่ในเขตทางรถไฟแต่ประสิทธิภาพจะมากขึ้นเพียงใดนั้นขึ้นอยู่กับการจัดการด้านเวลาและความถูกต้องในด้านข้อมูลที่มาจากหน่วยงานทางรถไฟ [4]

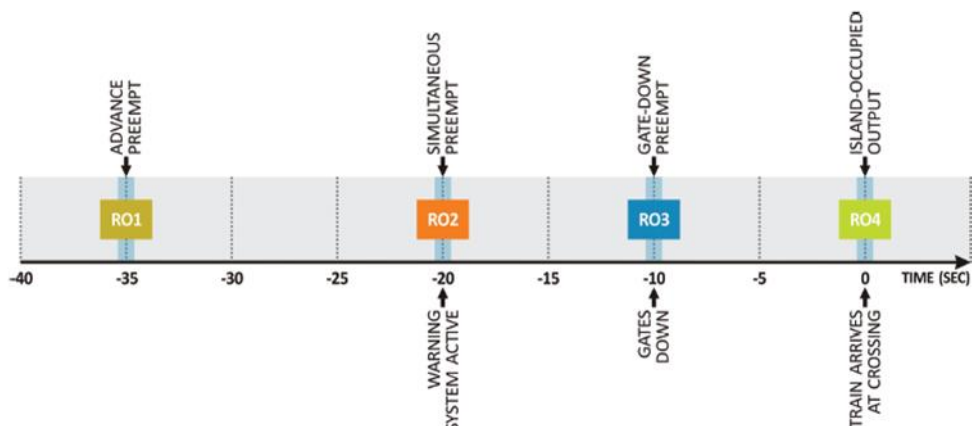
รูปแบบการทำงานของระบบ (Concept of operation) จะสามารถอธิบายเกี่ยวกับวิธีการต่าง ๆ ที่ระบบสามารถทำงานได้บริเวณจุดตัดทางรถไฟ โดยภาพที่ 8 แสดงถึงส่วนประกอบสำคัญของระบบทางรถไฟและทางหลวง การเชื่อมต่อประสาน

ระหว่างระบบทั้ง 2 แสดงให้เห็นถึงการสื่อสารซึ่งสามารถหรือเกิดขึ้นได้



ภาพที่ 8 ส่วนประกอบสำคัญของระบบสัญญาณไฟพรีเอมชั่นของทางรถไฟกับทางหลวง [4]

อุปกรณ์ควบคุมสัญญาณไฟจราจรในบริเวณทางแยกแบบมีสัญญาณก่อนที่รถไฟจะมาถึงระบบการแจ้งเตือนถูกสั่งให้ทำงานโดยสัญญาณไฟบริเวณทางแยกโดยจะเริ่มกะพริบเป็นช่วง ๆ ซึ่งถือว่าเป็นรูปแบบพื้นฐานของระบบสัญญาณพรีเอมชั่นแสดงดังภาพที่ 9 [4]



ภาพที่ 9 ระบบสัญญาณพรีเอมชั่น [4]

1.3 แบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาค (Micro-simulation model)

แบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาค หมายถึง การจำลองพฤติกรรมเคลื่อนที่ในลักษณะแบบพลวัต (Dynamic) ของยานพาหนะแต่ละประเภท แบบรายคันในโครงข่ายถนนแบบจำลองการจราจรระดับจุลภาคเป็นเครื่องมือโปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่สร้างขึ้นมาเพื่อช่วยจำลองสภาพการจราจรของรูปแบบการเดินทางประเภทต่าง ๆ ในสถานการณ์ต่าง ๆ และช่วยประเมินประสิทธิภาพการจราจรในเชิงเวลาและพื้นที่ในสถานการณ์นั้น ๆ ได้ ในปัจจุบันโปรแกรมแบบจำลองการจราจรระดับจุลภาค มีอยู่ด้วยกันหลายโปรแกรม ตัวอย่างเช่น PTV VISSIM, CORSIM, AIMSUN, PARAMICS เป็นต้น สำหรับโปรแกรม VISSIM เป็นแบบจำลองสภาพการจราจรที่พัฒนาขึ้นโดยบริษัท PTV ประเทศเยอรมัน ถือเป็นแบบจำลองที่กำลังได้รับความนิยมกันอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน โดยจุดเด่นของแบบจำลองนี้ คือความสามารถในการจำลองสภาพการจราจรในเขตเมืองที่มีรูปแบบการเดินทางหลายรูปแบบ ได้แก่ รถยนต์นั่งส่วนบุคคล รถจักรยานยนต์รถโดยสาร รถไฟ และคนเดินเท้า รวมทั้งความยืดหยุ่นในการปรับแก้ค่าตัวแปรพื้นฐานให้สอดคล้องกับพฤติกรรมทางและความสามารถในการแสดงผลของแบบจำลองเป็นภาพเคลื่อนไหวสามมิติโปรแกรม VISSIM เป็นแบบจำลองในระดับจุลภาคที่อาศัยพฤติกรรม การขับขี่ของผู้ขับขี่เป็นฐานในการจำลอง (Behavior based) โดยทำการคำนวณพฤติกรรมและสถานะขององค์ประกอบต่าง ๆ ในแบบจำลองทุก ๆ ช่วงเวลา (Time step) ในระดับวินาทีภายใต้เงื่อนไขสภาพการจราจร เช่น จำนวนช่องจราจร พฤติกรรม

การขับขี่ของผู้ขับขี่ที่สัดส่วนของยานพาหนะแต่ละประเภทในกระแสจราจร รอบของสัญญาณไฟจราจร และรูปแบบการควบคุมจราจร เป็นต้น ดังนั้นโปรแกรม VISSIM จึงถือเป็นเครื่องมือที่มีความเหมาะสมสำหรับการประเมินประสิทธิภาพการใช้งานด้านการจราจรของโครงการด้านการขนส่งและจราจรในเขตเมืองอย่างมาก [5]

2. วิธีดำเนินการศึกษา

การศึกษานี้ประยุกต์ใช้แบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคด้วยโปรแกรม VISSIM เพื่อเปรียบเทียบแต่ละมาตรการโดยใช้ระบบควบคุมระยะเวลาของเครื่องกับสัญญาณไฟจราจรบริเวณจุดตัดทางรถไฟเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการจราจรบริเวณโดยจะเปรียบเทียบมาตรการใหม่ กับมาตรการที่ใช้อยู่ ณ ปัจจุบัน (ที่ใช้พนักงานรถไฟเป็นผู้ควบคุม) โดยจะเปรียบเทียบสภาพการจราจร ได้แก่

- (1) ความยาวแถวคอยสูงสุด (Queue length maximum)
- (2) เวลาที่ใช้การเดินทางเฉลี่ย (Average travel time of all vehicles)
- (3) เวลาสูญเสียเนื่องจากความล่าช้าเฉลี่ย (Average delay time of all vehicles)
- (4) เวลาสูญเสียเนื่องจากการหยุดเฉลี่ย (Average stopped delay per vehicles in seconds)

การคัดเลือกช่วงถนนตัวแทนสำหรับการศึกษานี้ ได้ให้ความสำคัญกับทั้งทางหลวงที่มีจุดตัดทางรถไฟที่มีปริมาณจราจรสัญจรค่อนข้างสูง โดยคัดเลือกทางหลวงที่ตัดกับทางรถไฟสายตะวันออกเฉียงเหนือ (ช่วงขอนแก่น-หนองคาย) เนื่องจากยังไม่มีแก้ไขปรับปรุงที่จุดตัดทางรถไฟเสมอ

ระดับดินให้เป็นสะพานรถยนต์ยกระดับ (Over pass) และทางลอด (Box under pass) เหมือนทางรถไฟสายตะวันออกเฉียงเหนือ (ช่วงชุมทางถนนจิระ-สถานีขอนแก่น) แต่อย่างไรก็ตามมีปัญหาเรื่องการจราจรบริเวณจุดตัดทางแยกเหล่านี้สูงมาก ในการศึกษาครั้งนี้จึงเลือกจุดตัดทางรถไฟบริเวณแยกสถานีหนองขอนแก่นกับทางหลวงหมายเลข 216 (วงแหวนด้านทิศตะวันออก) จังหวัดอุดรธานี มาเป็นตัวแทนเพื่อการศึกษา ภายใต้เกณฑ์ในการคัดเลือก ดังนี้

- ทัศนวิสัยการมองเห็นที่ชัดเจน
- ผิวจราจรสภาพปกติไม่ชำรุด
- เป็นช่วงถนนที่ค่อนข้างตรงไม่มีผลกระทบต่อพฤติกรรมในการขับขี่
- ไม่มีลักษณะทางกายภาพหรือกิจกรรมที่เป็นสาเหตุให้ช่วงถนนไม่เป็นปกติหรือไม่มีความปลอดภัย เช่น โรงเรียน โรงงาน หรือสวนสาธารณะ

2.1 การรวบรวม ข้อมูลลักษณะทางกายภาพ และการจราจรของพื้นที่ศึกษา

สำหรับขั้นตอนการสร้างแบบจำลองและการเปรียบเทียบ โดยปกติแล้วข้อมูลที่จำเป็นจะต้องนำเข้าสู่แบบจำลองจะประกอบไปด้วย

- (1) ข้อมูลลักษณะกายภาพ (Geometry data)
- (2) ข้อมูลความต้องการในการเดินทาง (Demand data)
- (3) ข้อมูลการควบคุมการจราจร (Control data)
- (4) ข้อมูลสำหรับการปรับเทียบแบบจำลอง (Calibration data)
- (5) ข้อมูลสำหรับตรวจสอบความถูกต้อง (Validation data)

การเก็บข้อมูลภาคสนามอ้างอิงวิศวกรรมจราจร (Traffic engineering) [6] โดยแบ่งช่วงเวลาในการเก็บข้อมูลออกเป็น 2 ช่วง ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ช่วงเวลาในการสำรวจข้อมูล [6]

ช่วงเวลาการสำรวจข้อมูล	
7.30 น. - 8.30 น.	ช่วงเวลาเร่งด่วนเช้า (Morning peak)
16.30 น. - 17.30 น.	ช่วงเวลาเร่งด่วนเย็น (Evening peak)

สำหรับการแบ่งประเภทของยานพาหนะเพื่อความสะดวกในการพัฒนาแบบจำลองได้แบ่งประเภทของยานพาหนะออกเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ รถจักรยานยนต์และรถสามล้อเครื่อง รถยนต์นั่งส่วนบุคคล รถยนต์กระบะหรือรถปิกอัพและรถบรรทุกหนัก แสดงดังตารางที่ 3 [6]

ตารางที่ 3 การแบ่งประเภทยานพาหนะ

ประเภทยานพาหนะ				
				
	รถจักรยานยนต์	รถยนต์	รถยนต์	รถบรรทุก
	านยนต์	นั่ง	กระบะ	ทุกหนัก
	รถสามล้อ	ส่วนบุคคล	รถปิกอัพ	

2.2 ข้อมูลความต้องการในการเดินทาง (Demand data)

ข้อมูลความต้องการในการเดินทาง (Demand data) ใช้วิธีการเก็บข้อมูลด้วยกล้องวิดีโอ บันทึกสภาพการเคลื่อนตัวของยานพาหนะบนพื้นที่

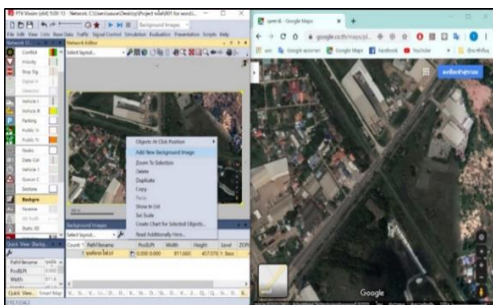
ศึกษา ข้อมูลที่ทำการสำรวจ ได้แก่ ปริมาณจราจรบนพื้นที่ศึกษา (Turning movement) สัดส่วนปริมาณจราจร (Vehicle composition) และความยาวแถวคอยสูงสุด (Max q-length) แสดงดังภาพที่ 10



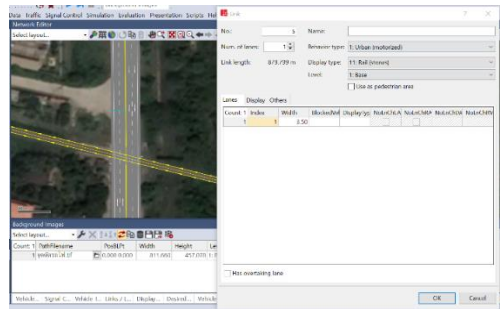
ภาพที่ 10 การเก็บข้อมูลผ่านกล้อง VDO

2.3 การจำลองสภาพการจราจรด้วยโปรแกรม VISSIM

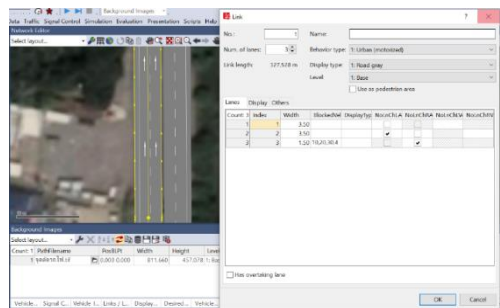
(1) นำภาพถ่ายทางอากาศเข้าสู่แบบจำลองนำภาพถ่ายทางอากาศเข้าสู่แบบจำลองสภาพการจราจรระดับจุลภาคจาก Google map แสดงดังภาพที่ 11 จากนั้นทำการกำหนดมาตราส่วน (Scale) เพื่อใช้ในการอ้างอิงระยะและทำการสร้างเส้นทาง (Link) แสดงดังภาพที่ 12 จากนั้นทำการลากเส้นถนนโดยเลือกที่ (Links & connectors) แสดงดังภาพที่ 13



ภาพที่ 11 การนำไฟล์รูปจาก Google map มาใส่ในโปรแกรม VISSIM

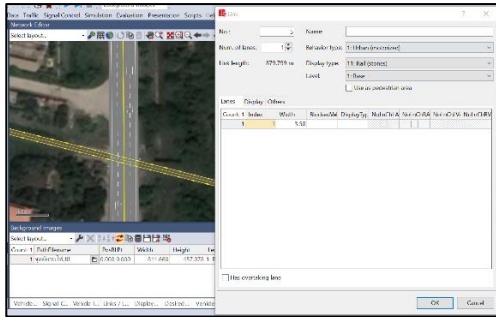


ภาพที่ 12 การสร้างเส้นถนน (Links & connectors)



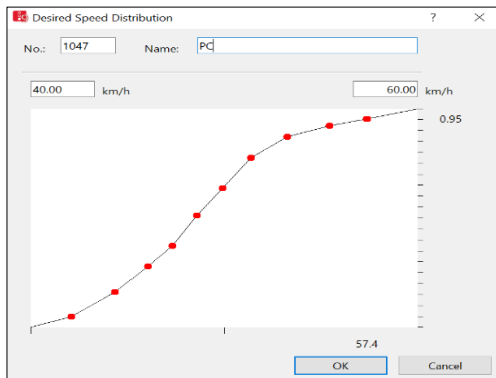
ภาพที่ 13 การสร้าง link เส้นทางรถไฟลงในโปรแกรม

จากในตาราง สามารถกำหนดองค์ประกอบของถนนผ่านตัวเลือกต่าง ๆ ได้ดังนี้ (1) ชื่อถนน (Name) (2) จำนวนช่องทางจราจร (No. of lanes) (3) ชนิดของพฤติกรรมใช้ถนน (Behavior type) (4) รูปแบบ การแสดงผล (Display type) (5) ความกว้างช่องจราจร (Lane width) (6) ความกว้างช่องจราจรหลายขนาด (Various lane widths) (7) เลนต้องห้าม (Lane closure) (8) ห้ามเปลี่ยนเลน (No lane change) (9) เปลี่ยนทิศทางการวิ่งของรถ (Change direction) เมื่อวาดถนนผิดทิศ ซึ่งจะส่งผลให้รถไม่สามารถเดินบนถนนเส้นนั้น ๆ ได้ (10) ใช้เป็นช่องคนเดิน (Use as pedestrian area) จากนั้นนำตัววางรถไฟที่โปรแกรมมีให้เลือกใช้ โดยใช้วิธีเดียวกับการสร้างเส้นถนน แต่เลือกคำสั่ง Display type: Rail แสดงดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 การนำทางรถไฟมาวางในรูปแบบ

(2) การกำหนดความเร็วของยานพาหนะ (Desired speed distribution) กำหนดพฤติกรรม การใช้ความเร็วของผู้ขับขี่ยานพาหนะแบบอิสระ (Free flow) ที่ 15 Percentile หรือ 85 Percentile ของยานพาหนะแต่ละประเภท แสดงดังภาพที่ 15

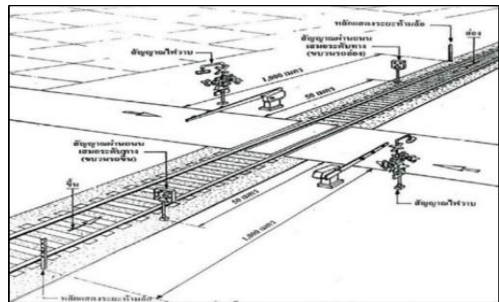


ภาพที่ 15 การสร้าง Desired speed distribution

2.4 ประยุกต์ใช้แบบจำลองเพื่อประเมิน มาตรการ

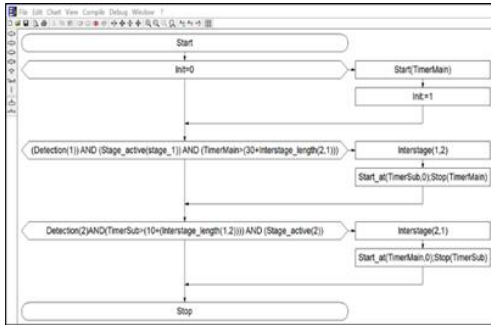
ทำการเปรียบเทียบการจัดการจุดตัดทาง รถไฟในรูปแบบเดิม คือ ใช้พนักงานรถไฟควบคุม เครื่องกั้นบริเวณจุดตัดทางทางรถไฟให้เป็น แบบจำลองฐานสำหรับการเปรียบเทียบ (Base

model) ด้วยเงื่อนไขที่สมมติฐานว่ามีอุปกรณ์ ตรวจจับ (Detector) เพื่อแจ้งการมาถึงระยะที่ กำหนด 1,000 เมตร ตามมาตรฐานข้อบังคับและ ระเบียบการเดินรถของการรถไฟแห่งประเทศไทย พ.ศ. 2549 แสดงดังภาพที่ 16



ภาพที่ 16 เครื่องกั้นถนนแบบคันอัตโนมัติใช้เป็น Base model (ที่มา: รพท, 2549)

หลังจากได้แบบจำลองฐาน (Base model) ขั้นตอนต่อไปจะเป็นการประยุกต์ใช้ แบบจำลองฐานเพื่อปรับปรุงมาตรการควบคุม เครื่องกั้นด้วยวิธีการใหม่ คือ วิธีการติดตั้งระบบ อาณัติสัญญาณไฟแบบพรีเอมชัน (Preemption system) โดยวางระบบตรวจจับ (Detector) จำลอง การมาถึงของขบวนรถไฟทั้งหมด 3 จุด ซึ่งควบคุม ระบบการทำงานด้วยโปรแกรม VISSIM และใช้ รูปแบบการจัดการจราจรอย่างเป็นลำดับขั้นตอน (Flow chart) โดยระยะห่างระหว่างอุปกรณ์ตรวจจับ จุดที่ 1 และ 2 ห่างกัน 200 เมตร อุปกรณ์ตรวจจับ จุดที่ 2 ห่างจากทางแยก 600 เมตร และอุปกรณ์ ตรวจจับจุดที่ 3 ห่างจากทางแยก 150 เมตร ทั้งขาขึ้น และขาล่อง แสดงดังภาพที่ 17-18



ภาพที่ 17 ชุดคำสั่งการทำงานของอุปกรณ์ตรวจจับการมาถึงของรถไฟด้วย VISSIM program

รายละเอียดการทำงานของอุปกรณ์ตรวจจับขบวนรถไฟ และชุดคำสั่งสัญญาณไฟจราจรได้ว่า เมื่อเริ่มระบบทำงาน (Start) อุปกรณ์ตรวจจับ (Detector) จะทำการตรวจจับขบวนรถไฟที่วิ่งผ่านโดยกำหนดค่าตัวแปรว่า ถ้าหากรถไฟวิ่งผ่านให้ค่าตัวแปรมีค่าเท่ากับ 1 ถ้าหากไม่มีให้มีค่าเท่ากับ 0

(Init = 0, 1) โดยอุปกรณ์ตรวจจับขบวนรถไฟจุดที่ 1 (Detector 1) มีหน้าที่ตรวจจับการมาถึงของขบวนรถไฟและให้สัญญาณไฟสีเขียวเพื่อเตือนการมาถึงรถไฟแต่ยังไม่มีกั้นการจราจร จากนั้นเมื่อขบวนรถไฟผ่านอุปกรณ์ตรวจจับขบวนรถไฟจุดที่ 2 (Detector 1) ระบบจะทำการยืนยันการมาถึงรถไฟอีกครั้ง และเริ่มทำการปิดกั้นกระแสจราจรสายหลักที่ตัดผ่านเพื่อความปลอดภัยและสลับเฟสสัญญาณไฟเขียวให้ขบวนรถไฟ (Interstage 1, 2) สุดท้ายอุปกรณ์ตรวจจับขบวนรถไฟจุดที่ 3 (Detector 3) มีหน้าที่ตรวจจับขบวนรถไฟเมื่อผ่านจุดตัดไปแล้วและเริ่มให้สัญญาณไฟเขียวแก่กระแสจราจรสายหลัก (Interstage 2, 1) ระยะที่ติดตั้งอุปกรณ์สามารถอธิบายได้ดังภาพที่ 18

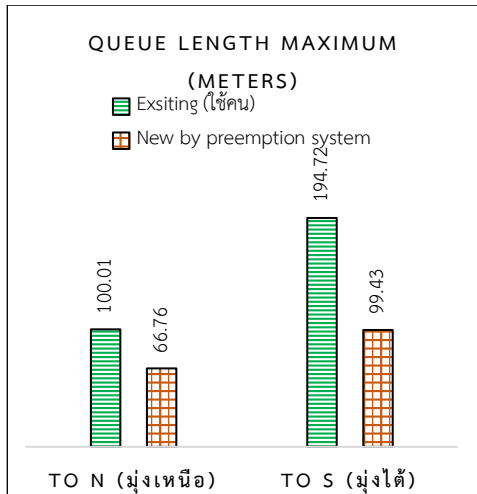


ภาพที่ 18 ระยะติดตั้งอุปกรณ์ตรวจจับการมาถึงของขบวนรถไฟ (Detector 1, 2, 3)

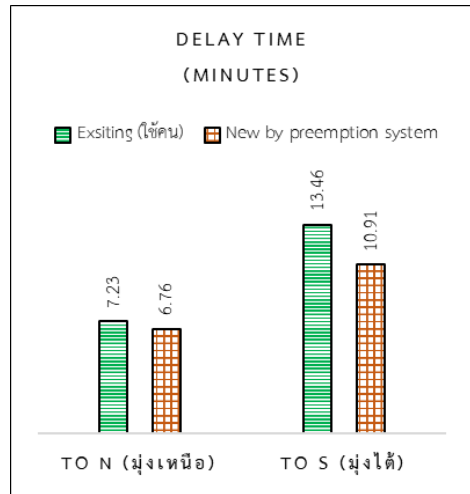
3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

ผลการศึกษาพบว่าระบบฟรีเอ็มชันเป็นมาตรการที่สามารถควบคุมระยะเวลาของเครื่องกั้นและสัญญาณไฟได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่อเปรียบเทียบกับมาตรการเดิมที่ใช้อยู่แสดงดังภาพที่ 19-22

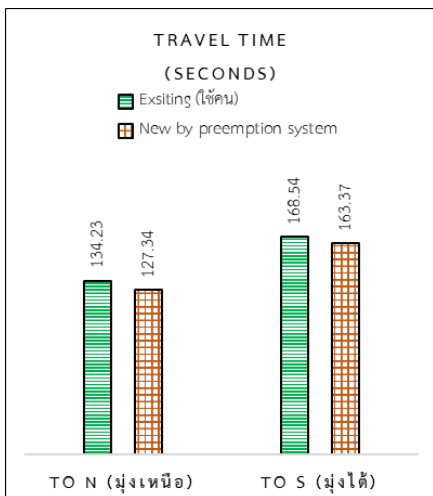
ผลการศึกษาแสดงภาพที่ 19 สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการลดความยาวแถวคอยสูงสุดทั้งสองทิศทางมุ่งเหนือและใต้ (Average queue length maximum) ลงได้ เฉลี่ยร้อยละ 41 เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรการเดิมที่ควบคุมโดยเจ้าหน้าที่ของการรถไฟที่อยู่ป้อมควบคุมบริเวณจุดตัดทางรถไฟบริเวณนี้



ภาพที่ 19 ความยาวแถวคอยสูงสุด (Queue length maximum)

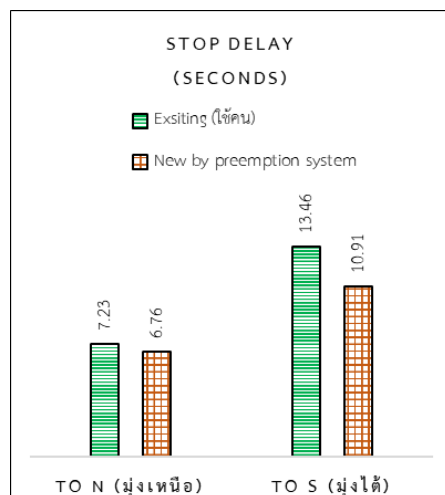


ภาพที่ 21 เวลาสูญเสียเนื่องจากความล่าช้าเฉลี่ย (Delay time of all vehicles)



ภาพที่ 20 เวลาที่ใช้การเดินทางเฉลี่ย (Travel time of all vehicles)

จากภาพที่ 20 สามารถลดเวลาที่ใช้การเดินทางทั้งสองทิศทาง (Average travel time of all vehicles) ได้เฉลี่ยร้อยละ 4



ภาพที่ 22 เวลาสูญเสียเนื่องจากการหยุด (Stopped delay)

จากภาพที่ 22 สามารถลดเวลาสูญเสียเนื่องจากการหยุดทั้งสองทิศทาง (Average stopped

delay per vehicles in seconds) ลงได้เฉลี่ยร้อยละ 47 เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรการเดิมที่ใช้อยู่

4. สรุปผลการศึกษา และข้อเสนอแนะ

จากการวิเคราะห์หาระยะเวลาปิดกั้นทางรถไฟที่มีประสิทธิภาพมากที่สุดพบว่าสภาพการจราจรในกรณีที่ตั้งระบบอาณัติสัญญาณไฟอัตโนมัติ (Preemption system) มีค่าความล่าช้าและระยะเวลาในการเดินทางรวมทั้งโครงข่ายน้อยกว่าสภาพการจราจรในปัจจุบันส่งผลให้มีสภาพการจราจรที่คล่องตัวกว่า ซึ่งจากการศึกษานี้สามารถนำไปใช้เพื่อออกแบบระบบอาณัติสัญญาณไฟอัตโนมัติ (Preemption system) ในบริเวณทางแยกที่มีจุดตัดทางรถไฟร่วมด้วยได้เพื่อเป็นการลดการติดขัดของกระแสจราจรที่เป็นผลมาจากการหยุดรอรถไฟ

แบบจำลองระดับจุลภาคของการหาประสิทธิภาพของจุดตัดทางรถไฟที่ได้พัฒนาขึ้นมานี้ได้ผ่านการปรับแก้และตรวจสอบความถูกต้อง ซึ่งมีความถูกต้องและมีลักษณะที่ใกล้เคียงสภาพความเป็นจริงในระดับหนึ่งแต่ทั้งนี้การพัฒนาแบบจำลองนี้ได้อ้างอิงข้อมูลจากการลงพื้นที่สำรวจจริงสำหรับข้อมูลด้านการจราจรและข้อมูลด้านกายภาพ ซึ่งถ้ามีการพัฒนาแบบจำลองขึ้นมาแทนควรใช้ข้อมูลการจราจรที่เป็นข้อมูลปัจจุบันจะเป็นผลดีต่อการวิเคราะห์

จากการพัฒนาแบบจำลองในการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพของจุดตัดทางรถไฟ โดยใช้โปรแกรม VISSIM พบว่าการใช้งานโปรแกรมนี้สามารถใช้ได้ง่ายสะดวกต่อการพัฒนาแบบจำลองการประมวลผลการแสดงผล รวมทั้งการวิเคราะห์ผลข้อมูลให้เหมาะสมสำหรับนำมาใช้วิเคราะห์หาประสิทธิภาพ

ของจุดตัดทางรถไฟที่จุดอื่น ๆ ของการรถไฟแห่งประเทศไทยได้นอกเหนือจากพื้นที่ที่ได้ศึกษานี้ต่อไปและถ้าเป็นไปได้ควรเพิ่มเติมอุปกรณ์ตรวจจับ (Detector) ในตำแหน่งก่อนที่รถไฟวิ่งเข้าจุดตัดเพื่อป้องกันอุปกรณ์ตรวจจับในจุดอื่นไม่ทำงานเพื่อป้องกันอันตรายที่จะเกิดขึ้น

เนื่องด้วยในปัจจุบันมีเทคโนโลยีที่พัฒนาไปอย่างรวดเร็วเช่นเดียวกับเทคโนโลยีตรวจจับวัตถุประเภทต่าง ๆ ณ ปัจจุบันมีอุปกรณ์ตรวจจับยานพาหนะหลากหลายรูปแบบให้เลือกใช้ไม่ว่าจะเป็นอุปกรณ์ตรวจจับขดลวดเหนี่ยวนำ (Inductive loop) อุปกรณ์ตรวจจับด้วยภาพ (Image processing) อุปกรณ์ตรวจจับด้วยแสง (Laser detector) และอุปกรณ์ตรวจจับด้วยคลื่น (Microwave detector) ดังนั้นการจะนำไปใช้ควรมีการศึกษาความเหมาะสมของอุปกรณ์ประเภทนั้น ๆ ให้เหมาะสมกับประเภทของงานที่จะต้องนำไปติดตั้ง

การทำงานของระบบสัญญาณไฟจราจรบริเวณจุดตัดทางรถไฟนั้นมีความสำคัญทั้งในด้านความปลอดภัยและเวลาการขนส่ง แต่ปัญหาของแต่ละทางแยกนั้นอาจมีความแตกต่างกัน ในทางปฏิบัติการของแบบจำลองสัญญาณจราจรระดับจุลภาคบริเวณจุดตัดทางรถไฟควรมีการพิจารณาถึงวัตถุประสงค์เหล่านี้เป็นพื้นฐานสำคัญด้วย เช่น ควรศึกษาเกี่ยวกับมาตรการที่ควรนำมาใช้ และปัญหาบริเวณจุดตัดทางรถไฟที่ยังไม่ได้รับการแก้ไข

5. กิตติกรรมประกาศ

การศึกษานี้สำเร็จลุล่วงและสมบูรณ์ได้ด้วยความอนุเคราะห์อย่างยิ่ง จาก รศ.ดร.อำพล การุณสุนทวงษ์ ที่ได้กรุณาให้คำปรึกษาและให้คำแนะนำแก้ไขข้อบกพร่องต่าง ๆ ในการดำเนินการ

และขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอม
เกล้าธนบุรี ที่ได้อำนวยความสะดวกในด้านต่าง ๆ
ช่วงของการดำเนินการเป็นอย่างดี และขอขอบคุณ
คุณธนพล พรหมรักษา นักศึกษาปริญญาเอก
ภาควิชาวิศวกรรมโยธา มหาวิทยาลัยขอนแก่น ที่ได้
ให้คำแนะนำในการปรับแก้แบบจำลองด้วยโปรแกรม
VISSIM จนทำให้การศึกษานี้สามารถสำเร็จลุล่วงไป
ได้ด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] มูลนิธิไทยโรดส์ และศูนย์วิจัยอุบัติเหตุแห่ง
ประเทศไทย, สถาบันเทคโนโลยีแห่งเอเชีย,
2556, รายงานสถานการณ์อุบัติเหตุทางถนน
ของประเทศไทย พ.ศ. 2555-2556, กรุงเทพฯ,
หน้า 20-30.
- [2] สำนักงานนโยบายและแผนการขนส่งและ
จราจร (สนข), กระทรวงคมนาคม, 2553,
โครงการศึกษาจัดทำแผนแก้ไขอุบัติเหตุบริเวณ
จุดตัดทางรถไฟกับถนนสำหรับทางรถไฟ
- ระยะไกล, รายงานฉบับสมบูรณ์ (Final
Report), กรุงเทพฯ, หน้า 6-8.
- [3] สำนักอำนวยความสะดวกภัย, กรมทางหลวง,
2558, สรุปรบริเวณทางรถไฟตัดผ่านทางหลวง
ประจำปี พ.ศ. 2558, กรุงเทพฯ, หน้า 7.
- [4] The Transportation Research Board
(TRB), 2017, Traffic Signal Preemption at
Intersections Near Highway– Rail Grade
Crossing, Washington D.C., USA, Chapter
2, pp. 7-18.
- [5] Park B. and Schneeberger, J.D., 2003,
Microscopic Simulation Model
Calibration and Validation Case Study of
VISSIM Simulation Model for a
Coordinated Actuated Signal System,
Washington, DC., pp. 50-150.
- [6] สุรเมศวร์ พิริยะวัฒน์, 2551, วิศวกรรมจราจร
(Traffic Engineering), ภาควิชาวิศวกรรมโยธา
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา,
หน้า 140-143.

การควบคุมธาตุอาหารสำหรับการปลูกเมล่อนระบบไฮโดรโปนิคส์แบบดาวกระจายด้วย
อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งและโครงข่ายประสาทเทียม
A Fertilizer Control for Mellon in Star-Topology Hydroponic System using IOT
and Artificial Neuron Network

อภิศักดิ์ พรหมฝาย¹, ดอนสัน ปงผาบ^{2*}, สุดาพรรค์ อริยพฤกษ์¹
Apisak Phromfaiy^{1*}, Donson Pongphab^{2*}, Sudapan Ariyapruengk¹

¹สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์

²สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง

¹Department of Computer Engineering, Faculty of Industrial Technology,
Uttaradit Rajabhat University, Thailand

²Department of Electrical Technology, Faculty of Industrial Technology,
Lampang Rajabhat University, Thailand

*Corresponding Author. Tel. 08 4500 0474, E-mail: donson@lpru.ac.th

บทคัดย่อ

การปลูกเมล่อนระบบไฮโดรโปนิคส์ในปัจจุบันยังคงพบปัญหาเกี่ยวกับการควบคุมธาตุอาหาร ซึ่งต้นที่อยู่ใกล้กับถังปุ๋ยจะมีการเจริญเติบโตมากกว่าต้นที่อยู่ไกลออกไป ดังนั้นงานวิจัยจึงได้พัฒนาระบบการปลูกแบบดาวกระจายเพื่อแก้ไขปัญหาการปลูกและได้นำเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตแห่งสรรพสิ่งมาประยุกต์ใช้เพื่อการจัดเก็บข้อมูลและการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ต่างๆ พร้อมกับใช้โครงข่ายประสาทเทียมพยากรณ์ปริมาณการเติมปุ๋ย A และ B โดยนำค่าผิดพลาดของค่าการนำไฟฟ้าของน้ำในถังปลูกแต่ละถังเป็นอินพุตสำหรับโครงข่ายทั้งหมด 6 โหนด ชั้นซ่อน 5 โหนด ชั้นเอาต์พุต 2 โหนด ฟังก์ชันกระตุ้นคือ Log-sigmoid transfer function ส่วนฟังก์ชันการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมคือ Levenberg-Marquardt จากการทดสอบข้อมูลพบว่า การควบคุมธาตุอาหารสำหรับการปลูกเมล่อนระบบไฮโดรโปนิคส์แบบดาวกระจายด้วยโครงข่ายประสาทเทียม มีค่า RMSE เท่ากับ 14.85 ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้งานการปลูกได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ : เมล่อน, ไฮโดรโปนิคส์แบบดาวกระจาย, โครงข่ายประสาทเทียม

ABSTRACT

Nowadays, the hydroponic system for melon plants has the problem of fertilizer control involving the nearest plants from the fertilizers that have more growth rate than the remote

one. Therefore, this research developed the star topology hydroponic system to solve the distance problem of the plant. This study used the internet of things (IoT) to apply for data storage and communication between the devices. The artificial neuron network was also used for prediction of the A, B fertilizer quantity. The error of electrical conductivity in each tank was used as the input for 6 nodes, 5 nodes for hidden layers and 2 nodes for output. Log-sigmoid transfer function was used as the activation function while Lavenberg-marquardt function was used as the training function of the artificial neuron network. The result showed that the artificial neuron network provided the efficiency to control the fertilizer with the RMSE of 14.85.

Keyword: Melon, Star topology hydroponics, Neural networks

1.บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรม โดยมีพื้นที่เกษตรกรรมทั้งหมด 149.25 ล้านไร่ จากพื้นที่ประเทศทั้งหมด 320.696 ล้านไร่ คิดเป็น 46.53 % [1] ปัญหาหลักที่เป็นจุดอ่อนของเกษตรกรคือ ไม่มีระบบบริหารจัดการที่มีประสิทธิภาพ การจัดการส่วนใหญ่ยังใช้แรงงานคนเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้เกิดต้นทุนการผลิตที่สูง อย่างไรก็ตามปัจจุบันเริ่มมีระบบเทคโนโลยี และระบบอัตโนมัติต่างๆ มาช่วย ในการจัดการเกษตรให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น เช่น ระบบเกษตรอัจฉริยะ (Smart farming) เป็นการทำการเกษตรที่มีกระบวนการตั้งแต่การวิเคราะห์สภาพพื้นที่ มุ่งเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพและผลผลิตต่อพื้นที่ โดยใช้เทคโนโลยีและเครื่องจักรกลการเกษตรอัจฉริยะ ควบคุมกระบวนการผลิตทุกขั้นตอน การใช้ระบบเซนเซอร์เพื่อการบริหารจัดการแปลงเกษตรและโรงเรือนเพาะปลูก ปัจจุบันอินเทอร์เน็ตแห่งสรรพสิ่ง (Internet of things) หรือ IoT ถูกนำไปประยุกต์ใช้กับภาคการเกษตรมากขึ้น มีการนำเทคโนโลยีเซ็นเซอร์เข้ามาใช้ในการเชื่อมต่อกับอุปกรณ์ทางการเกษตรต่าง ๆ เพื่อให้อุปกรณ์เหล่านั้นสามารถสื่อสารกับตัวควบคุมหลักได้ มีการนำระบบปัญญาประดิษฐ์

มาช่วยสนับสนุน การวางแผนและตัดสินใจทำการเกษตรบนฐานข้อมูลสารสนเทศที่ถูกต้อง ซึ่งจะช่วยเพิ่มคุณภาพผลผลิตและรายได้ของเกษตรกร ลดการสูญเสีย ต้นทุน ปุ๋ยเคมี น้ำ แร่ธาตุ

เมล่อน (Melon) นับว่าเป็นราชินีแห่งพืชตระกูลแตง การปลูกเมล่อนส่วนใหญ่จะปลูกบนแปลงดินและปลูกโดยใช้วัสดุปลูกแล้วให้น้ำโดยใช้ระบบน้ำหยด แต่พอระยะนานจะเริ่มเจอปัญหาเรื่องแรงงานที่ใช้ในการเตรียมดินหรือเตรียมวัสดุปลูกและปัญหาเชื้อโรคที่มากับดิน [2] ซึ่งการปลูกแบบไฮโดรโปนิกส์อายุเก็บเกี่ยวจะเร็วกว่าปลูกบนดินและที่สำคัญสามารถตัดปัญหาการปนเปื้อนของดินและประหยัดค่าสารเคมีกำจัดวัชพืชได้ ผลผลิตที่ได้จึงมีความสะอาดกว่าการปลูกโดยใช้ดินและปลอดจากสารพิษตกค้าง การปลูกพืชบนดิน

ปัจจุบันการปลูกเมล่อนสามารถปลูกได้ทั้งนอกโรงเรือนและในโรงเรือน โดยการปลูกในโรงเรือนสามารถให้ผลผลิตที่มีคุณภาพมากกว่า เนื่องจากสามารถป้องกันโรคพืชและแมลงต่าง ๆ ได้มากกว่า และช่วยลดปริมาณการใช้สารเคมีในการกำจัดศัตรูพืช อีกทั้งราคาผลผลิตที่ได้จากการปลูกในโรงเรือนจะมีราคาที่สูงกว่าการปลูกนอกโรงเรือน

การปลูกเมล่อนสามารถปลูกได้หลายวิธี โดยมีวิธีการปลูกที่เกษตรกรเมล่อนในประเทศไทยนิยมปลูก คือ ปลูกโดยใช้ดิน วัสดุปลูก และระบบไฮโดรโปนิคส์

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง พบว่ามีการงานวิจัยที่ได้นำระบบ IoT มาใช้สำหรับงานเกษตรหลายงานวิจัยได้แก่ วิทยา และ คณะ [3] ได้พัฒนาระบบควบคุมสภาพแวดล้อมของการปลูกผักไฮโดรโปนิคส์แบบอัตโนมัติด้วย Internet of things และทดสอบใช้งานจริงในฟาร์มปลูกของเกษตรกรที่เป็นกลุ่มตัวอย่างเป็นเวลา 1 รอบการผลิต รัฐศิลป์ [4] ได้นำเทคโนโลยี IoT มาประยุกต์ใช้กับระบบโรงเรือนปลูกผักไฮโดรโปนิคส์ ให้สามารถควบคุมการทำงานได้แบบอัตโนมัติ โดยใช้ระบบการเรียนรู้เชิงลึก (Deep learning) เพื่อช่วยวิเคราะห์การเจริญเติบโตของต้นผัก พรคิต [5] ได้พัฒนาระบบควบคุมสารละลายธาตุอาหารแบบอัตโนมัติสำหรับปลูกผักไฮโดรโปนิคส์ด้วย IoT ซึ่งสามารถลดภาระการทำงานต้นทุนการผลิตการปลูกผักสดและสามารถใช้งานได้ง่ายอย่างเหมาะสม จากงานวิจัยที่กล่าวมายังพบปัญหาเกี่ยวกับการควบคุมธาตุอาหาร สำหรับการปลูกเมล่อนด้วยระบบน้ำนิ่งแบบบัส ซึ่งต้นที่อยู่ใกล้กับถังปุ๋ยจะมีการเจริญเติบโตมากกว่าต้นที่อยู่ไกลออกไป

จากงานวิจัยที่กล่าวมาพบว่า การวัดค่าการนำไฟฟ้าของน้ำ (Electrical conductivity ; EC) จะวัดที่ถังผสมหลักที่เดียวเนื่องจากเป็นการปลูกแบบระบบน้ำไหล แต่จะต้องเปิดปั๊มน้ำตลอด 24 ชั่วโมง

ซึ่งทำให้มีค่าใช้จ่ายสูง หากเป็นระบบน้ำนิ่งแบบบัสจะพบปัญหาการเจริญเติบโต ซึ่งต้นที่อยู่ใกล้กับถังปุ๋ยหลักจะมีการเจริญเติบโตมากกว่าต้นที่อยู่ไกลออกไป ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาระบบการปลูกแบบดาวกระจายเพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าวเกี่ยวกับการควบคุมธาตุอาหาร และสร้างแบบจำลองเพื่อหาปริมาณการเติมปุ๋ย A และ B ที่เหมาะสมโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม เนื่องจากต้นเมล่อนแต่ละต้นใช้ปุ๋ยแตกต่างกันค่าของ EC แต่ละถัง จึงแตกต่างกันด้วย ดังนั้นการวัดระดับค่า EC แต่ละถังปลูกโดยตรงจะทำให้ได้ค่า EC ที่แม่นยำที่สุด งานวิจัยนี้จึงได้นำเอาค่า EC ทั้ง 6 ถัง มาวิเคราะห์หาปริมาณน้ำและปุ๋ย AB ที่เหมาะสมที่สุด โดยใช้ไมโครคอนโทรลเลอร์ ESP32 เป็นตัวประมวลผล

2.วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 การปลูกเมล่อนระบบไฮโดรโปนิคส์แบบดาวกระจาย

การปลูกเมล่อนด้วยระบบน้ำนิ่งแบบบัสมักประสบปัญหาเกี่ยวกับการเจริญเติบโตของต้นเมล่อนจะไม่เท่ากัน จากการทดสอบพบว่าโดยต้นที่อยู่ใกล้กับถังปุ๋ยจะมีการเจริญเติบโตมากกว่าต้นที่อยู่ไกลออกไป เนื่องจากต้นที่อยู่ต้นทางจะได้รับปริมาณธาตุอาหารได้เต็มที่ ซึ่งระบบนี้จะประกอบด้วย ถังผสมปุ๋ยหลัก ถังควบคุมระดับน้ำด้วยวาล์วลูกลอย และถังปลูก เมื่อน้ำในถังปลูกลดระดับลงวาล์วลูกลอยจะเปิดเพื่อเติมน้ำเข้าสู่ถังปลูก ดังภาพที่ 1 และ ภาพที่ 2

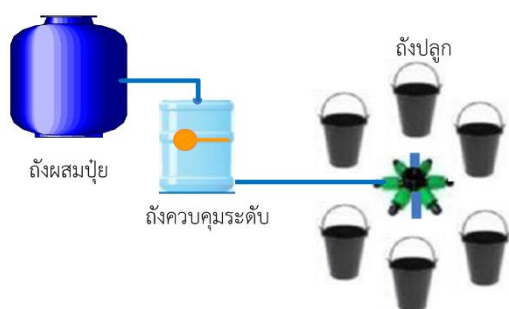


ภาพที่ 1 ระบบน้ำนิ่งแบบบัส



ภาพที่ 2 การปลูกเมล่อนด้วยระบบน้ำนิ่งแบบบัส

จากปัญหาการเจริญเติบโตของต้นเมล่อนดังกล่าว งานวิจัยนี้ได้ออกแบบการปลูกเมล่อนระบบไฮโดรโปนิคส์แบบดาวกระจายเพื่อเป็นการกระจายธาตุอาหารให้กับต้นเมล่อนในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน ดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 ระบบน้ำนิ่งแบบดาวกระจาย

อย่างไรก็ตามผู้วิจัยได้เพิ่มเติมอุปกรณ์เข้ามาเพื่อให้ระบบสามารถทำงานได้อย่างอัตโนมัติ ดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 โครงสร้างถังปลูกเมล่อนแบบดาวกระจาย

จากภาพที่ 4 โครงสร้างการปลูกเมล่อนแบบดาวกระจาย ประกอบด้วย ถังปุ๋ยหลักคือถังน้ำที่ผสมปุ๋ย A และปุ๋ย B ถังควบคุมระดับน้ำใช้สำหรับควบคุมระดับความสูงของน้ำในถังปลูกซึ่งจะส่งผลให้ถังปลูกทั้ง 6 ถังมีระดับน้ำเท่ากัน ถังปลูกใช้สำหรับปลูกเมล่อน และถังรองรับน้ำเป็นถังที่ต่อมาจากถังปลูกซึ่งระดับน้ำจะมีระดับเดียวกับถังควบคุมระดับน้ำและถังปลูก ภายในถังรองรับน้ำจะติดตั้งปั้มน้ำ เพื่อสูบน้ำป้อนกลับไปยังถังปุ๋ยหลัก โดยจะทำการสูบน้ำก็ต่อเมื่อ ระดับค่า EC เฉลี่ยของทุกถังปลูกมีค่าผิดพลาดเกินกำหนด แสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 การปลูกเมล่อนแบบดาวกระจาย

2.2 ระบบควบคุมธาตุอาหารสำหรับเมล่อนแบบดาวกระจาย

งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้โครงข่ายประสาทเทียม หาค่าปริมาณการเติมปุ๋ย A B และน้ำที่เหมาะสม โดยระบบควบคุมจะประกอบด้วย

1) บอร์ดคอนโทรลเลอร์ Arduino ESP32 ใช้สำหรับประมวลผลการทำงานของระบบ และ

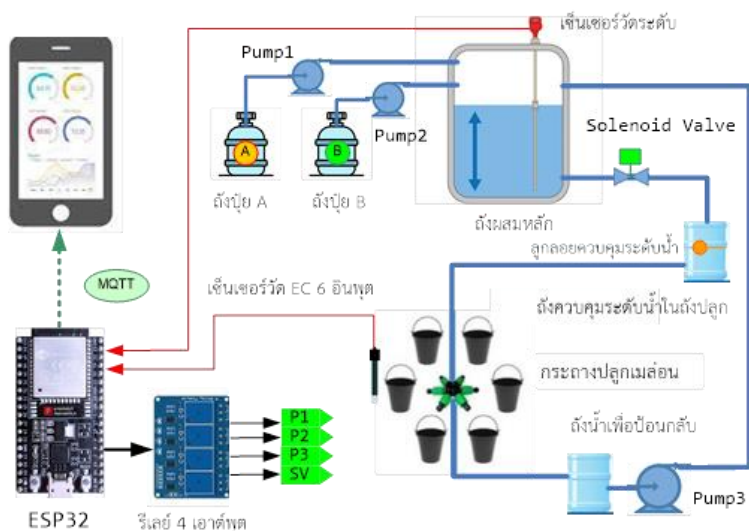
ประมวลผลหาค่าปริมาณการเติมปุ๋ย A และปุ๋ย B ที่เหมาะสมด้วยโครงข่ายประสาทเทียมพร้อมกับส่งค่าเข้าสู่ระบบ IoT โดยใช้แอปพลิเคชัน MQTT dashboard เพื่อเชื่อมต่อกับสมาร์ทโฟน

2) เซ็นเซอร์วัดค่าการนำไฟฟ้าของน้ำ (Electrical conductivity ;EC) ในถังปลูกแต่ละถังเพื่อส่งข้อมูลให้กับไมโครคอนโทรลเลอร์ทำการประมวลผลใช้ทั้งหมด 6 ตัว ซึ่งได้ทำการทดสอบความแตกต่างของการอ่านค่า EC ทางสถิติพบว่า ไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05

3) ถังผสมหลัก มีปั๊มไดอะแฟรมสำหรับดูดปุ๋ย A และ ปุ๋ย B เข้าสู่ถังผสมหลัก

4) ถังควบคุมระดับน้ำ โดยใช้ลูกกลอยในการปรับระดับน้ำในถังปลูกทั้งหมดให้เท่ากัน

5) รีเลย์ควบคุมการทำงานของปั๊มและวาล์วจ่ายน้ำ



ภาพที่ 6 ระบบควบคุมธาตุอาหารสำหรับเมล่อนแบบดาวกระจาย

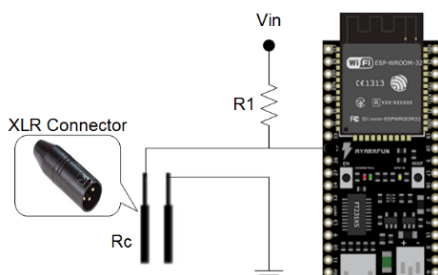
จากภาพที่ 6 การทำงานของระบบเริ่มจากไมโครคอนโทรลเลอร์วัดค่าการนำไฟฟ้าของน้ำ

และคำนวณหาค่าปริมาณการเติมปุ๋ย A B และน้ำที่เหมาะสม โดยมีเซ็นเซอร์วัดระดับน้ำในถังผสมหลัก

ทำหน้าที่ควบคุมไม่ให้ระดับน้ำในถังไม่ให้เกินหรือ
แจ้งเตือนเมื่อน้ำในถังหมด โซลินอยวาล์วควบคุม
การปล่อยน้ำไปยังถังควบคุมระดับน้ำ ภายในถังติดตั้ง
วาล์วลูกลอยเพื่อสำหรับควบคุมระดับน้ำในถังปุ๋ยรอง
เพื่อควบคุมถังปลูกทั้ง 6 ถังให้มีระดับน้ำเท่ากัน
ซึ่งสามารถปรับระดับน้ำในถังได้ตามการปรับวาล์ว
ลูกลอย ถังพักน้ำเป็นถังที่ต่อมาจากถังปลูก ซึ่งระดับ
น้ำจะมีระดับเดียวกับถังควบคุมระดับน้ำและถังปลูก
ภายในถังพักน้ำจะติดตั้งปั้มน้ำเพื่อสูบน้ำกลับไปยังถัง
ปุ๋ยหลักเมื่อระดับค่า EC เฉลี่ยของทุกถังปลูกมีค่า
ผิดปกติเกินค่าที่กำหนด

2.3 เซ็นเซอร์วัดค่า EC

เนื่องจากเซ็นเซอร์ที่สามารถเชื่อมต่อกับ
คอนโทรลเลอร์นั้นมีราคาแพง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้
ออกแบบเซ็นเซอร์ตรวจวัดค่า EC โดยประยุกต์จาก
วงจรแบ่งแรงดันไฟฟ้า ประกอบด้วย R1 มีค่าเท่ากับ
1 K Ω และ R_c คือค่าความต้านทานไฟฟ้าของน้ำ โดย
งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ XLR connector เป็นโพรบ
วัดค่าการนำไฟฟ้า และได้ทำการทดสอบ
ความแตกต่างของการอ่านค่า EC ในถังเดียวกัน ของ
หัวเซ็นเซอร์ EC ที่พัฒนาขึ้นเองจำนวน 6 หัว พบว่า
ไม่มีความแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05
แสดงว่าหัวเซ็นเซอร์ EC ที่พัฒนาขึ้นมีค่าใกล้เคียงกัน
ดังภาพที่ 7



ภาพที่ 7 วงจรเซ็นเซอร์ตรวจวัดค่า EC

ในการส่งค่า EC เข้าสู่ระบบจะใช้
แอปพลิเคชัน MQTT dashboard เพื่อแสดงผลและ
เชื่อมต่อกับสมาร์ทโฟน แสดงดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 การแสดงค่า EC

2.4 การสอบเทียบเซ็นเซอร์ตรวจวัดค่า EC กับเครื่องมือมาตรฐาน

เนื่องจากงานวิจัยนี้ได้พัฒนาเซ็นเซอร์
ตรวจวัดค่า EC ขึ้นเพื่อเป็นการลดค่าใช้จ่ายจึง
จำเป็นต้องทำการสอบเทียบเครื่องมือวัด โดยใช้
วิธีการสมการถดถอยเพื่อหาความสัมพันธ์ระหว่าง
เซ็นเซอร์วัดค่า EC ที่ได้พัฒนาขึ้น (EC_{rc}) กับ
เครื่องมือวัดค่า EC มาตรฐาน (EC_{meter}) ดังภาพที่ 9



ภาพที่ 9 การตรวจวัดค่า EC

จากการทดสอบเติมปุ๋ย A และ B ครั้งละ 1 มิลลิลิตร ตั้งแต่ 1 ถึง 10 มิลลิลิตร พร้อมกับเก็บค่า

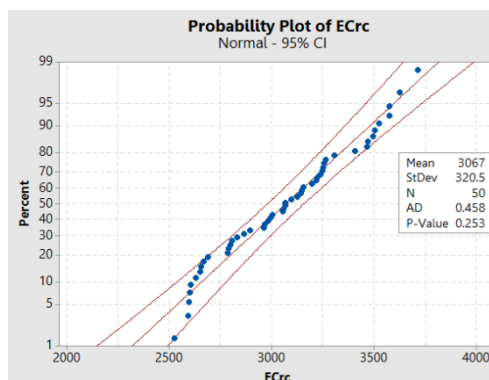
EC_{meter} และ EC_{rc} โดยทำการเก็บค่าซ้ำ 5 ครั้ง แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การเปลี่ยนแปลงค่าการนำไฟฟ้าของ EC_{meter} และ EC_{rc}

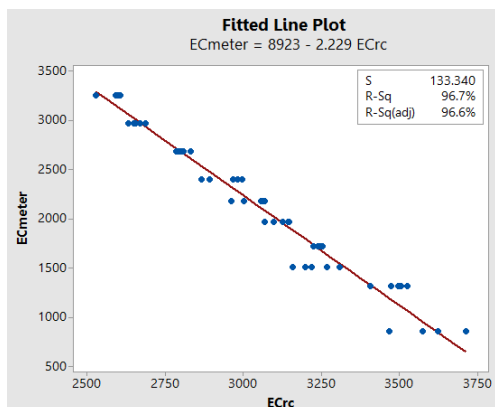
ปริมาณปุ๋ย (mL)		ค่าการนำไฟฟ้า EC_{meter} (μS)	ค่าการนำไฟฟ้า EC_{rc} (μS)				
A	B		ครั้งที่1	ครั้งที่2	ครั้งที่3	ครั้งที่4	ครั้งที่5
1	1	856	3467	3573	3573	3623	3713
2	2	1316	3523	3406	3504	3471	3494
3	3	1510	3217	3307	3157	3266	3199
4	4	1720	3250	3237	3223	3247	3254
5	5	1964	3067	3097	3145	3144	3126
6	6	2182	3069	3056	3059	2960	3003
7	7	2400	2996	2893	2982	2966	2867
8	8	2682	2831	2807	2790	2800	2786
9	9	2966	2688	2656	2669	2650	2631
10	10	3248	2605	2603	2527	2592	2598

จากตารางที่ 1 คณะผู้วิจัยได้ใช้การตรวจสอบการกระจายตัวแบบปกติเป็นการตรวจสอบส่วนตกค้างของข้อมูลว่ามีการกระจายแบบปกติหรือไม่ จากการพิจารณาการกระจายส่วนตกค้างในภาพที่ 10 พบว่า มีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง แสดงให้เห็นว่า ส่วนตกค้างจากผลการทดลอง ไม่แสดงสิ่งผิดปกติ และค่า P-Value มีค่ามากกว่า 0.05 สรุปได้ว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองชุดนี้มีการกระจายแบบแจกแจงปกติเหมาะสมสำหรับการนำไปวิเคราะห์สมการถดถอยที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 แสดงดังสมการที่ (1) และภาพที่ 11

$$EC_{meter} = 8923 - 2.299EC_{rc} \quad (1)$$



ภาพที่ 10 กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้างของค่าการนำไฟฟ้าของน้ำ



ภาพที่ 11 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า EC_{meter} และ EC_{rc}

2.5 การควบคุมปริมาณการเติมปุ๋ย A B

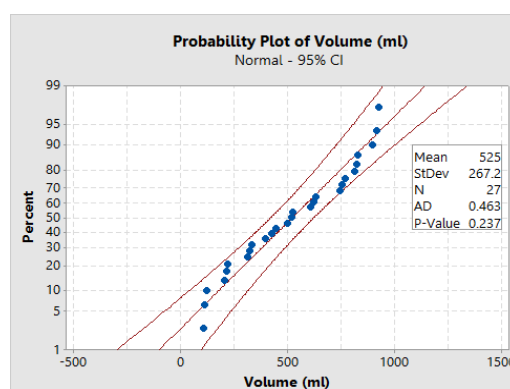
การเติมปุ๋ย A B เป็นขั้นตอนที่สำคัญที่มีผลต่อการควบคุมธาตุอาหารสำหรับการปลูกเมล่อนระบบไฮโดรโปนิคส์ สำหรับงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ปั๊มไดอะแฟรม (Diaphragm pump) [6] เป็นปั๊มสำหรับสูบน้ำของเหลวที่มีความหนืด มีลักษณะการทำงานแบบบีบอัดเป็นจังหวะ ภายในปั๊มประกอบด้วย แผ่นไดอะแฟรม 2 แผ่นผลัดกันผลักไปกลับด้วยแรงกดในช่องอากาศ ไดอะแฟรมด้านขาเข้าจะถูกดึงเข้าสู่แกนกลาง ส่งผลให้ของเหลวถูกดูดเข้าในตัวปั๊ม ไดอะแฟรมด้านขาออกจะถูกผลักออกส่งผลให้ของเหลวที่อยู่ในปั๊มถูกดันออกไปสู่ท่อออก

จากการบันทึกปริมาณการเติมปุ๋ย A B ด้วยปั๊มไดอะแฟรม เพื่อหาอัตราการเปลี่ยนแปลงของปุ๋ย A B ต่อหนึ่งหน่วยเวลา แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ปริมาณการเติมปุ๋ย A B ด้วยปั๊มไดอะแฟรมต่อหนึ่งหน่วยเวลา

ระยะเวลา (วินาที)	ปริมาณปุ๋ย (mL)			
	ครั้งที่ 1	ครั้งที่ 2	ครั้งที่ 3	เฉลี่ย
10	110	115	125	116.67
20	210	220	225	218.33
30	315	335	325	325
40	400	450	430	426.67
50	500	520	525	515
60	625	610	635	623.33
70	750	770	760	760
80	815	830	825	823.33
90	900	930	920	916.67

เมื่อนำข้อมูลไปวิเคราะห์การกระจายตัวของข้อมูลพบว่า มีการกระจายตัวตามแนวเส้นตรง แสดงให้เห็นว่า ส่วนตกค้างจากผลการทดลอง ไม่แสดงสิ่งผิดปกติ และค่า P-value มีค่ามากกว่า 0.05 ดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 กราฟความน่าจะเป็นแบบปกติของส่วนตกค้างของปริมาณปุ๋ย

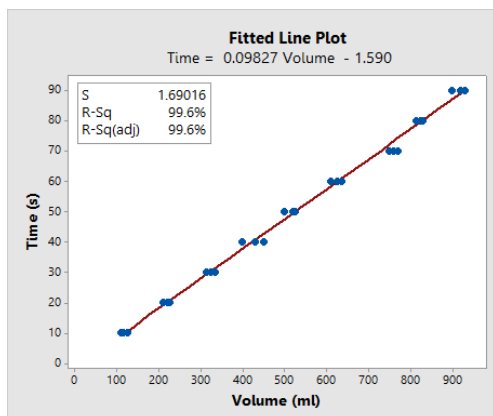
สรุปได้ว่าข้อมูลที่ได้จากการทดลองชุดนี้มีการกระจายแบบแจกแจงปกติ เหมาะสำหรับการนำไปวิเคราะห์สมการถดถอยที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 ดังนั้นความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณการดูดปุ๋ย A B ด้วยปั๊มไดอะแฟรมต่อหนึ่งหน่วยเวลาสามารถแสดงดังสมการที่ (2) และ ภาพที่ 13

$$Time = (0.09827 \times Volume) - 1.590 \quad (2)$$

โดยที่

Time คือ เวลาที่เปิดปั๊มไดอะแฟรม

Volume คือ ปริมาณปุ๋ย A B ที่ต้องการ

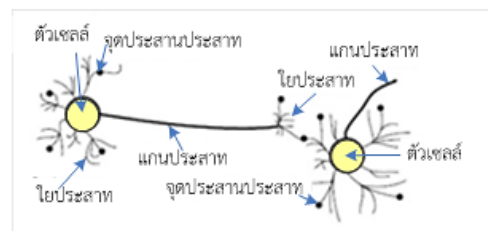


ภาพที่ 13 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่าเวลาและปริมาณปุ๋ย A B

2.6 การประยุกต์โครงข่ายประสาทเทียมควบคุมธาตุอาหารสำหรับเมล็ดองุ่นแบบดาวกระจาย

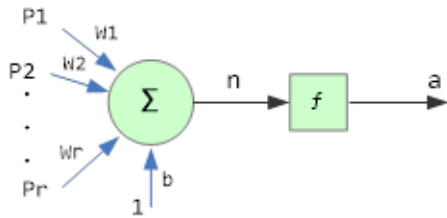
โครงข่ายประสาทเทียมได้ถูกพัฒนาขึ้นโดยอาศัยหลักการทำงานของสมองมนุษย์ ซึ่งสมองประกอบด้วยหน่วยประมวลผลพื้นฐานที่เรียกว่า นิวรอน (เซลล์ประสาท หรือ Neuron) ภายในสมองประกอบด้วยนิวรอนจำนวนมากและมีจุดต่อจำนวนโครงข่ายประสาทประกอบขึ้นด้วยส่วนสำคัญ 3 ส่วน คือ โยประสาท (Dendrite) ตัวเซลล์ (Soma)

และแกนประสาท (Axon) ในแต่ละโครงข่ายประสาทจะเชื่อมต่อกันโดยจุดประสานประสาท (Synapse) ซึ่งสามารถเปลี่ยนค่าความต้านทานได้ตามสัญญาณที่ส่งระหว่างกันของเซลล์ประสาท การส่งสัญญาณระหว่างเซลล์ประสาททำได้โดยการถ่ายทอดสารประกอบโซเดียมและโพแทสเซียม ดังภาพที่ 14



ภาพที่ 14 โครงสร้างระบบประสาท

โครงข่ายประสาทเทียมเป็นการจำลองการทำงานของโครงข่ายประสาทในสมองมนุษย์ เพื่อสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์หรือแบบจำลองทางคอมพิวเตอร์ [7] เพื่อให้คอมพิวเตอร์มีความชาญฉลาดในการเรียนรู้เหมือนมนุษย์ และสามารถนำความรู้และทักษะไปประยุกต์ใช้ในงานด้านต่างๆ เช่น การแบ่งกลุ่มข้อมูล การคัดแยกผลผลิตทางการเกษตร [8-9] การพยากรณ์ข้อมูล การจดจำรูปแบบและอื่น ๆ ซึ่งการประมวลผลต่าง ๆ นั้นจะเกิดขึ้นในหน่วยประมวลผลย่อยเรียกว่า โหนด (Node) ซึ่งเทียบเท่ากับเซลล์ในระบบประสาท การส่งสัญญาณระหว่างโหนดที่เชื่อมต่อกันจำลองมาจากการเชื่อมต่อของเดนไดรต์และแอกซอนในระบบประสาทของมนุษย์ ภายในโหนดจะมีฟังก์ชันกำหนดสัญญาณส่งออกที่เรียกว่า ฟังก์ชันกระตุ้น (Activation function) หรือฟังก์ชันการเปลี่ยนแปลงซึ่งทำหน้าที่เหมือนกระบวนการทำงานในเซลล์ [10] ดังภาพที่ 15



ภาพที่ 15 โครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียมประกอบด้วย 5 องค์ประกอบ ดังนี้

1) ข้อมูลอินพุต (Input) เป็นข้อมูลที่เป็นตัวเลข หากเป็นข้อมูลเชิงคุณภาพต้องแปลงให้อยู่ในรูปเชิงปริมาณที่โครงข่ายประสาทเทียมยอมรับได้

2) ข้อมูลเอาต์พุต (Output) คือผลลัพธ์ที่เกิดขึ้นจริง จากกระบวนการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม

3) ค่าน้ำหนัก (Weights) คือสิ่งที่ได้จากการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียม หรือเรียกอีกอย่างหนึ่งว่าค่าความรู้ (Knowledge) ค่านี้จะถูกเก็บเป็นทักษะเพื่อใช้ในการจดจำข้อมูลอื่น ๆ ที่อยู่ในรูปแบบเดียวกัน

4) ฟังก์ชันผลรวม (Summation function) เป็นผลรวมของข้อมูลป้อนเข้า (P_i) และค่าน้ำหนัก (W_i)

5) ฟังก์ชันการแปลง (Transfer function) คือส่วนที่ทำหน้าที่รวมค่าเชิงตัวเลขจากเอาต์พุตของนิวรอน แล้วทำการตัดสินใจว่าจะส่งสัญญาณเอาต์พุตออกไปในรูปแบบใด ฟังก์ชันการแปลงสามารถเป็นได้ทั้งแบบเชิงเส้นหรือไม่เป็นเชิงเส้น การเลือกใช้ฟังก์ชันการแปลงจะขึ้นอยู่กับลักษณะของระบบ ที่นำเอาโครงข่ายประสาทเทียมไปประยุกต์ใช้

งานวิจัยนี้ได้นำโครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่กระจายย้อนกลับ (Feed-forward back-propagation) [11] มาประยุกต์ใช้ควบคุมธาตุอาหารสำหรับเมล่อนแบบดาวกระจาย โดยในชั้นอินพุตประกอบด้วย 6 โหนดเพื่อรับค่าผิดพลาดของค่าการนำไฟฟ้าของน้ำที่กำหนดกับค่าการนำไฟฟ้าของน้ำในถังปลูก ดังสมการที่ (3)

$$EC_{\Delta E}^i = EC_{sp} - EC_{rc}^i \quad (3)$$

โดยที่

$EC_{\Delta E}$ คือ ค่าผิดพลาดของค่าการนำไฟฟ้า

EC_{sp} คือ ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำที่กำหนด

EC_{rc} คือ ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำในถัง

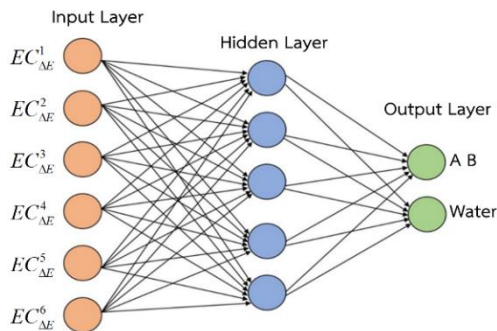
i คือ ลำดับตั้งแต่ 1 – 6

ส่วนชั้นซ่อนประกอบด้วย 5 โหนด ชั้นเอาต์พุตกำหนดเป็น 2 โหนด คือโหนดสำหรับคำนวณหาปริมาณปุ๋ย A B และ โหนดสำหรับคำนวณหาปริมาณน้ำ ส่วนฟังก์ชันกระตุ้น (Activation function) ในงานวิจัยนี้เลือกใช้ Log-sigmoid transfer function โดยคำนวณได้จากสมการที่ (4) ส่วนฟังก์ชันการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมคือ Levenberg-marquardt และสามารถแสดงสถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับควบคุมธาตุอาหารสำหรับเมล่อนแบบดาวกระจายดังภาพที่ 16

$$f(n) = \frac{1}{1 + e^{(-n)}} \quad (4)$$

โดยที่

n คือ ข้อมูลนำเข้า
 f คือ ฟังก์ชันกระตุ้น



ภาพที่ 16 โครงข่ายประสาทเทียมสำหรับควบคุมธาตุอาหารสำหรับเมลอนแบบดาวกระจาย

3.ผลการทดลอง

ในการทดลองได้ปลูกเมลอนพันธุ์สีทองในโรงเรือน จำนวน 6 ต้นด้วยระบบไฮโดรโปนิคส์แบบดาวกระจายด้วยโครงข่ายประสาทเทียมจะทำให้ได้ผลเมลอนแต่ละถึงปลูกมีขนาดและความสุกที่ใกล้เคียงกันแสดงดังภาพที่ 17



ภาพที่ 17 ผลของเมลอนพันธุ์สีทอง

ในส่วนข้อมูลสำหรับการฝึกสอนและทดสอบโครงข่ายประสาทเทียม เป็น 70% และ 30% ตามลำดับ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient; R) แสดงดังสมการที่ (5) ได้ถูกนำมาใช้สำหรับการพิจารณาสถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียม โดยสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่า EC จริงและค่า EC พยากรณ์พบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์มีค่าเท่ากับ 0.87577 แสดงดังภาพที่ 16

$$R = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})(E_i - \bar{E})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (Q_i - \bar{Q})^2 \sum_{i=1}^N (E_i - \bar{E})^2}} \quad (5)$$

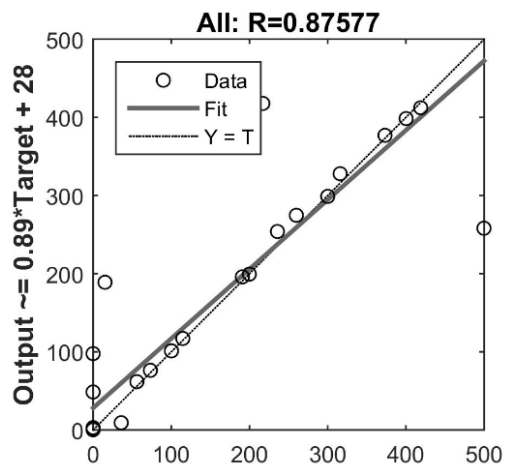
โดยที่

Q = ค่า EC เป้าหมาย

E = ค่า EC ที่ได้จากการ

พยากรณ์

N = จำนวนข้อมูลทั้งหมด



ภาพที่ 18 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างค่า EC จริงและค่า EC พยากรณ์จากโครงข่ายประสาทเทียม

จากการนำโครงข่ายประสาทเทียมไปประยุกต์ใช้ควบคุมธาตุอาหารสำหรับการปลูกเมล่อนระบบไฮโดรโปนิคส์แบบดาวกระจาย โดยการปรับการ EC_{sp} ทั้งหมด 5 ระดับ เพื่อทดสอบประสิทธิภาพระบบการควบคุมธาตุอาหารสำหรับการปลูกเมล่อนระบบไฮโดรโปนิคส์แบบดาวกระจายด้วยโครงข่ายประสาทเทียม แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การควบคุมธาตุอาหารสำหรับการปลูกเมล่อนระบบไฮโดรโปนิคส์แบบดาวกระจาย

ครั้งที่	ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำ (μS)			Error
	EC เป้าหมาย	EC ก่อนเติมปุ๋ย	EC หลังเติมปุ๋ย	
1	120	75	109	11
2	180	109	165	15
3	260	165	248	12
4	350	267	367	-17
5	420	367	438	-18

จากการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root mean squared error : RMSE) ดังสมการที่ (6) [12] มีค่าเท่ากับ 14.85

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (Q_i - E)^2} \quad (6)$$

โดยที่

Q = ค่า EC เป้าหมาย

E = ค่า EC ที่ได้จากการ

พยากรณ์

N = จำนวนข้อมูลทั้งหมด

4.สรุปผลการทดลอง

การพัฒนาการควบคุมธาตุอาหารสำหรับการปลูกเมล่อนระบบไฮโดรโปนิคส์แบบดาวกระจายด้วยโครงข่ายประสาทเทียม ได้นำเทคโนโลยีอินเทอร์เนตแห่งสรรพสิ่ง มาประยุกต์ใช้เพื่อการจัดเก็บข้อมูลและการสื่อสารระหว่างอุปกรณ์ต่างๆ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบการปลูกเมล่อนระบบไฮโดรโปนิคส์แบบดาวกระจายเพื่อแก้ไขปัญหาเกี่ยวกับการควบคุมธาตุอาหาร สำหรับการปลูกเมล่อนด้วยระบบน้ำนิ่ง พร้อมกันได้ออกแบบเซ็นเซอร์ตรวจวัดค่าการนำไฟฟ้าของน้ำ และได้นำโครงข่ายประสาทเทียมมาวิเคราะห์ปริมาณการเติมปุ๋ย A B โดยในชั้นอินพุต 6 โหนด เพื่อรับค่าผิดพลาดของค่าการนำไฟฟ้าของน้ำที่กำหนดกับค่าการนำไฟฟ้าของน้ำในถังปลูก ชั้นซ่อน 5 โหนด ชั้นเอาต์พุต 2 โหนด สำหรับปริมาณปุ๋ย A B และปริมาณน้ำ โดยใช้ฟังก์ชันกระตุ้น Log-sigmoid transfer function ส่วนฟังก์ชันการฝึกสอนโครงข่ายประสาทเทียมคือ Levenberg-marquardt จากการทดสอบข้อมูลพบว่า การควบคุมธาตุอาหารสำหรับการปลูกเมล่อนระบบไฮโดรโปนิคส์แบบดาวกระจายด้วยโครงข่ายประสาทเทียม มีค่า RMSE เท่ากับ 14.85 และเมื่อเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของต้นเมล่อนกับวิธีการปลูกระบบน้ำนิ่งแบบบัสแล้วพบว่า การปลูกเมล่อนระบบไฮโดรโปนิคส์แบบดาวกระจายทำให้ต้นเมล่อนเจริญเติบโตได้ใกล้เคียงกัน

5.กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์ และมหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง ที่สนับสนุนงานวิจัยอย่างจริงจังและต่อเนื่องมาโดยตลอด คณะผู้วิจัยยินดี

รับฟังคำแนะนำจากทุกท่านที่ได้เข้ามาศึกษา เพื่อเป็น
ประโยชน์ในการพัฒนางานวิจัยต่อไป

6.อ้างอิง

- [1] Office of agricultural economics,
"Agricultural statistics of thailand 2020,"
Ministry of agriculture and cooperatives,
Bangkok, Thailand, 2020.
- [2] บริษัท ฟอ์ฟาร์ม จำกัด. [อินเทอร์เน็ต].
ปทุมธานี: การปลูกเมล่อน โดยใช้ระบบน้ำวน;
2562 [เข้าถึงเมื่อ 3 มีนาคม 2564]. เข้าถึงได้
จาก : <https://forfarm.co/158/melon-hydroponics-nft/>.
- [3] วิทยา ปัญญาภาศ, โสภภาพรรณ ฝิ่นนตา, อุดลย์
ชูบาล และคณะ. [อินเทอร์เน็ต]. การสร้างและ
หาประสิทธิภาพระบบควบคุมสภาพแวดล้อม
ของการปลูกผักไฮโดรโปนิกส์; 2559. [เข้าถึง
เมื่อ 28 มกราคม 2564]. จาก :
[http://www.iven1.ac.th/main/attachme
nts/Hydroponics%20research.pdf](http://www.iven1.ac.th/main/attachments/Hydroponics%20research.pdf).
- [4] รัฐศิลป์ รานอกภานุวัชร. ระบบควบคุมโรงเรือน
ผักไฮโดรโปนิกส์อัตโนมัติโดยใช้เทคโนโลยี
IoT. Journal of Information Science and
Technology. 2561; 8(2):74-82.
- [5] พรคิด อ้นขาว. ระบบควบคุมสารละลายธาตุ
อาหารแบบอัตโนมัติสำหรับปลูกผักไฮโดรโ
นิกส์. วารสารวิจัยมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชม
งคลศรีวิชัย. 2562; 11(1):146-57.
- [6] เมคคานีก้า. [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ:
Diaphragm Pumps; 2562 [เข้าถึงเมื่อ 15
มีนาคม 2564]. จาก : [https://www.](https://www.mechanika.co.th/content/diaphragm-pumps/)
- [7] Kamlungpetch A , Inrawong P.
Appication of artificial neural networks
with fast fourier transform for wave form
analysis and classification. The journal of
KMUTNB. 2017; 27(4): 643-53.
- [8] Guyer D, Yang X. Use of genetic artificial
neural networks and spectral imaging for
detection on cherries. Computers and
Electronics in Agriculture. 2000 ;
29(1):179-94.
- [9] Chen X, Xun Y, Li W, et al. Combining
discriminant analysis and neural
networks for corn variety identifcation.
Computers and Electronics in
Agriculture. 2010; 71S:S48-S53.
- [10] Prakorppon T. Artificial neural networks.
HCU Journal. 2009; 24(1):73-87.
- [11] Sibi P, Allwyn S, Siddarth P. Analysis of
different activation functions using back
propagation neural networks. Journal of
Theoretical and Applied Information
Technology. 2013; 47(3):1264-8.
- [12] Buntam D, Permpoonsinsup W, Surin P.
The Application of a Hybrid Model Using
Mathematical Optimization and
Intelligent Algorithms for Improving the
Talc Pellet Manufacturing Process.
Symmetry. 2020; 12(10): 1-18.

การพัฒนาระบบสืบค้นที่มาของลายผ้าย้อมครามด้วยเทคนิคการเรียนรู้เชิงลึก

A Development of Information Retrieval System of Indigo Fabric Pattern with Deep Learning Techniques

ชารินทร์ ไชยชนะ^{1*}, สีสลา วงษ์กาฬสินธุ์¹, ฉัตรชัย เจียมรัมย์²

Charinee Chaichana^{1*}, Seetala Wongkalasin¹, Chatchai Jiamram²

¹โปรแกรมวิชาคอมพิวเตอร์ธุรกิจ สาขาบริหารธุรกิจ คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

²สำนักคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏนครราชสีมา

^{1*}Program in Business Computer, Business Administration, Faculty of Industry and Technology,
Rajamangala University of Technology Isan Sakonakhon Campus, Thailand

²Computer Center of Nakhonratchasima Rajabhat University, Thailand

*Corresponding author. Tel: 08 2189 8693, E-mail: charinee.ch@muti.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการประมวลผลภาพด้วยเทคนิคการเรียนรู้เชิงลึกเพื่อจำแนก
ลายผ้าย้อมครามของกลุ่มแปรรูปผ้าย้อมครามธรรมชาติที่ได้ขึ้นทะเบียนขอใช้ตราสัญลักษณ์สิ่งบ่งชี้ทาง
ภูมิศาสตร์ (Geographical indication: GI) ในจังหวัดสกลนคร จำนวน 42 กลุ่ม โดยเก็บรวบรวมข้อมูลภาพถ่าย
ลายผ้าครามทั้งหมด 216 ลาย และได้ประยุกต์ใช้สถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียมแบบสังวัตนาการ
(CNN) ด้วยโมเดล ResNet50 สำหรับสร้างแบบจำลอง ผลการวิจัย พบว่าความแม่นยำของแบบจำลองโดยรวมมี
ค่าสูงสุดที่ 93% และมีค่าความผิดพลาดลดลงที่ 0.09% จากนั้นนำแบบจำลองมาพัฒนาระบบสืบค้นที่มาของ
ลายผ้าครามด้วยเทคนิคการเรียนรู้เชิงลึก โดยผลการประเมินความแม่นยำของระบบจากตัวอย่างลายผ้าคราม
จำนวน 10 ลาย พบว่ามีความแม่นยำ 80% ขึ้นไป ซึ่งงานวิจัยนี้นอกจากจะทำให้ทราบถึงอัตลักษณ์ที่มาและ
ข้อมูลพื้นฐานของลายผ้าคราม และยังเป็นส่วนหนึ่งในการประชาสัมพันธ์การท่องเที่ยวชุมชน ”วิถีคราม“ส่งผล
ให้ชุมชนเกิดรายได้เพิ่มขึ้น มีความมั่นคง ยั่งยืนต่อไป

คำสำคัญ : การเรียนรู้เชิงลึก, การประมวลผลภาพ, ลายผ้าคราม, โครงข่ายประสาทเทียมแบบสังวัตนาการ

Abstrat

This research is an application of image processing technology with deep learning techniques to classify the indigo fabric pattern of natural indigo dye processing groups that have been registered to use the symbolizing geographical indication. In Sakon Nakhon province, there were 42 groups, with a collection of 216 images of fabric patterns. The model is developed using the architecture of the convolutional neural network (CNN) which uses the RestNet50 model.

Received 21-01-2022

Revised 25-02-2022

Accepted 03-03-2022

The model accuracy assessment was 93% with a lower loss of 0.09%. Then the model was used in the information retrieval system of indigo fabric pattern with deep learning techniques. As a result, the accuracy on 10 samples of indigo fabric pattern was more than 80%. In addition, the system can support the identity and basic information of the indigo pattern, which is a part of public relations for community tourism called “The Indigo Way”. As a result, the community income has increased and the community also has stability and sustainability.

Keywords: Deep Learning, Image Processing, Indigo Fabric Pattern, Convolutional Neural Network

1. บทนำ

ประเทศไทยมีการพัฒนาประเทศภายใต้โมเดล “ประเทศไทย 4.0” ซึ่งเป็นนโยบายสำหรับการวางรากฐานการพัฒนาประเทศในระยะยาว เพื่อขับเคลื่อนไปสู่การเป็นประเทศที่มั่นคง มั่งคั่ง และยั่งยืน อาทิเช่น การยกระดับนวัตกรรมและผลิตภัณฑ์ การส่งเสริมการท่องเที่ยว และการสร้างรายได้ เป็นต้น จังหวัดสกลนครเป็นอีกหนึ่งจังหวัดที่ได้ส่งเสริมการท่องเที่ยวชุมชน “วิถีคราม” และถือว่าเป็นจังหวัดแรกของประเทศไทยที่มีการฟื้นฟูภูมิปัญญาท้องถิ่นการทอผ้าย้อมครามธรรมชาติเพื่อให้นักท่องเที่ยวได้สัมผัสภูมิปัญญาท้องถิ่นที่เป็นมรดกจากบรรพบุรุษสืบทอดกันมายาวนานจากรุ่นสู่รุ่น ที่ยังคงความงดงาม มีความปราณีต สามารถสร้างชื่อเสียงให้กับจังหวัด และได้รับการยอมรับทั้งในและต่างประเทศ [1-2] จากรายงานข้อมูลการจำหน่ายผลิตภัณฑ์ OTOP และวิสาหกิจในพื้นที่จังหวัดสกลนคร 5 ปี (2557-2561) พบว่าผ้าย้อมครามเป็นผลิตภัณฑ์หรือสินค้าที่สามารถผลิตเพื่อการส่งออกมาก 5 ลำดับแรกของการจำหน่ายผลิตภัณฑ์ OTOP ของจังหวัดสกลนคร โดยสามารถทำรายได้เพิ่มขึ้นจาก 225 ล้านบาท ในปี 2560 มาเป็น 342 ล้านบาท ในปี 2561 [3] ปัจจุบันในจังหวัดสกลนครมีการรวมตัวของกลุ่มทอผ้าย้อมคราม

มากกว่า 60 กลุ่มที่ขึ้นทะเบียนผู้ขออนุญาตใช้ตราสัญลักษณ์สิ่งบ่งชี้ทางภูมิศาสตร์ ผ้าครามธรรมชาติสกลนคร ปี พ.ศ. 2562 เช่น กลุ่มทอผ้าครามบ้านคำข่า กลุ่มอนุรักษ์ฝ้ายย้อมครามไทเท็งกู และกลุ่มครามภูสะโน เป็นต้น

โดยในแต่ละกลุ่มหรือชุมชนมีการออกแบบลวดลายผ้าย้อมครามที่สวยงามโดดเด่นด้วยลวดลายที่เป็นอัตลักษณ์ของแต่ละชุมชน เพื่อให้สินค้าที่ออกมาเป็นที่ต้องตา ต้องใจ ผู้บริโภค เช่น ลายนกนางแอ่นของกลุ่มทอผ้าครามบ้านดอนกอย ลายประสาธินพินนาของกลุ่มทอผ้าย้อมสีธรรมชาติบ้านพินนา และลายขลิบร่วงของกลุ่มแปรรูปผ้าฝ้ายมัดย้อมบ้านสงเปลือย เป็นต้น ซึ่งลวดลายผ้าย้อมครามในแต่ละชุมชนหรือท้องถิ่นจะมีความเป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัวที่แตกต่างกันออกไป แต่อย่างไรก็ตามบางลวดลายของผ้าย้อมครามธรรมชาติอาจจะมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน หรือบางลวดลายผ้าครามอาจจะมีลายที่เหมือนกันและชื่อเดียวกัน แต่มีเทคนิคและวิธีการทอผ้าครามที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งหากเป็นประชาชนทั่วไปที่ไม่ได้มีความชำนาญเฉพาะด้านจะไม่สามารถแยกแยะด้วยตาเปล่าว่าลายดังกล่าวชื่อว่าอะไร และผลิตมาจากแหล่งชุมชนใด และจากความเจริญก้าวหน้าของเทคโนโลยีสารสนเทศสามารถประยุกต์ใช้เทคนิคการประมวลผลภาพ

(Image progresssing) เป็นเทคโนโลยีการวิเคราะห์รูปภาพให้เป็นข้อมูลแบบดิจิทัลด้วยคอมพิวเตอร์วิเคราะห์เพื่อที่จะสามารถนำมาปรับแต่งเพื่อให้ได้รายละเอียดหรือความคมชัดที่จะสามารถนำไปใช้ประโยชน์ ตัวอย่างการประยุกต์ใช้งานด้านการประมวลผลภาพ เช่น ระบบจำแนกคุณภาพของผลไม้ ระบบดูแลการจราจรบนท้องถนน ระบบตรวจจับใบหน้า และระบบตรวจสอบวัตถุ [4-7] เป็นต้น โดยในระบบเหล่านี้มักมีการใช้เทคนิคการเรียนรู้เชิงลึก (Deep learning) ซึ่งเป็นเทคนิคการเรียนรู้ที่เลียนแบบมนุษย์ และมีกระบวนการคิดคำนวณคล้ายคลึงกับระบบโครงข่ายประสาทเทียมที่ช่วยในการจำแนกหรือแยกแยะสิ่งต่าง ๆ เช่น การจำแนกใบหน้าคน การจำแนกเสียง และการจำแนกการแต่งกาย [8-10]

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการประมวลผลภาพด้วยเทคนิคการเรียนรู้เชิงลึกเพื่อจำแนกลายผ้าย้อมคราม ซึ่งจะทำให้ทราบถึงอัตลักษณ์ที่มาและข้อมูลพื้นฐานของลายผ้าครามในแต่ละชุมชนในจังหวัดสกลนคร และเป็นการอนุรักษ์ภูมิปัญญาเกี่ยวกับศิลปะการทอผ้าย้อมครามธรรมชาติ อีกทั้งยังเป็นส่วนหนึ่งในการเชื่อมโยงการท่องเที่ยวชุมชนของจังหวัดและช่วยในการประชาสัมพันธ์การท่องเที่ยวชุมชน “วิถีคราม” ในพื้นที่จังหวัดสกลนครที่เป็นเมืองท่องเที่ยว 3 ธรรม (ธรรม ธรรมชาติ วัฒนธรรม) และงานวิจัยนี้ยังเป็นส่วนหนึ่งในการพัฒนาการตลาดตามแนวทางความปกติใหม่ (New normal) ตามสถานการณ์การเปลี่ยนแปลงในยุคเทคโนโลยีดิจิทัลที่สามารถเข้าถึงข้อมูลได้ตรงตามความต้องการของลูกค้า ส่งผลให้ชุมชนเกิดรายได้เพิ่มขึ้น มีความมั่นคง ยั่งยืนต่อไป

2. วิธีดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้ ได้ดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูลจากกลุ่มแปรรูปผ้าย้อมครามธรรมชาติที่ได้ขึ้นทะเบียนขอใช้ตราสัญลักษณ์สิ่งบ่งชี้ทางภูมิศาสตร์ในจังหวัดสกลนคร จำนวน 42 กลุ่ม เฉพาะประเภทการยื่นขอในฐานะผู้ผลิต และผู้ผลิตและผู้ประกอบการเท่านั้น ดังตารางที่ 1 โดยดำเนินการจัดเก็บรวบรวมข้อมูลภาพถ่ายลายผ้าย้อมคราม ข้อมูลรายละเอียดเกี่ยวกับลายผ้าย้อมคราม ข้อมูลพิกัดที่ตั้งของกลุ่มข้อมูลรายละเอียดของกลุ่ม และภาพถ่าย Street View ของกลุ่ม ซึ่งขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยเพื่อการเรียนรู้ลายผ้าย้อมคราม ดังแสดงในภาพที่ 1

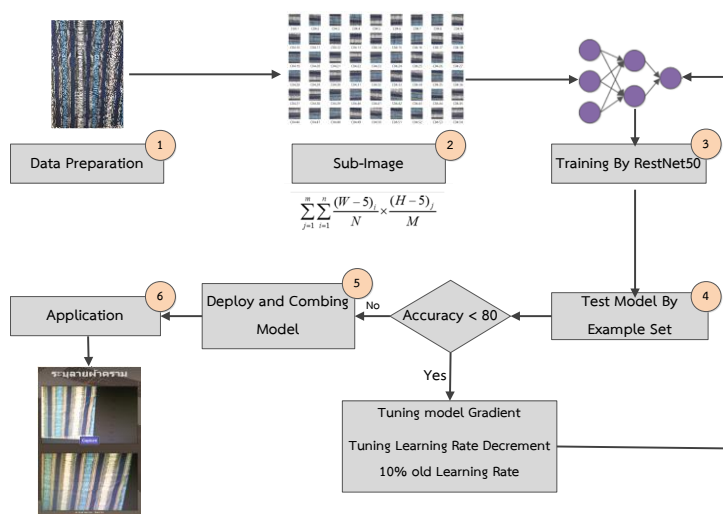
ตารางที่ 1 รายชื่อกลุ่มผ้าคราม

1) ไบคราม (4 ลาย)	2) กลุ่มทอผ้าลายมุกบ้านนาจานใหม่ (7 ลาย)
3) กลุ่มทอผ้าลายมุกบ้านใหม่หนองผือ (4 ลาย)	4) วิสาหกิจชุมชนแปรรูปผลิตภัณฑ์จากผ้าบ้านสามัคคี (11 ลาย)
5) ปากีผ้าฝ้าย (4 ลาย)	6) วิสาหกิจชุมชนกลุ่มพัฒนาอาชีพบ้านดงเสียว (3 ลาย)
7) กลุ่มวิสาหกิจชุมชนสตรีทอผ้าชุมชน 2 (7 ลาย)	8) กลุ่มวิสาหกิจชุมชนอินแปง (7 ลาย)
9) กลุ่มวิสาหกิจชุมชนทอผ้าไหม-ผ้าฝ้ายบ้านกุดแสด (6 ลาย)	10) ครามภูสะโน (5 ลาย)
11) กลุ่มวิสาหกิจชุมชนส่งเสริมอาชีพบ้านหนองสะโน (4 ลาย)	12) วิสาหกิจชุมชนทอผ้าฝ้ายย้อมครามบ้านเชิงดอย (3 ลาย)
13) กลุ่มวิสาหกิจชุมชนผ้าย้อมครามโคกภูสามัคคี (10 ลาย)	14) กลุ่มอนุรักษ์ฝ้ายย้อมครามไทเทิงภู (5 ลาย)

ตารางที่ 1 (ต่อ) รายชื่อกลุ่มผ้าคราม

15) กลุ่มวิสาหกิจชุมชนทอผ้าครองวิถี (11 ลาย)	16) กลุ่มทอผ้าย้อมครามบ้านนาขาม (3 ลาย)
17) กลุ่มของนางไพรัตน์ พิทักษ์กุล (5 ลาย)	18) วิสาหกิจชุมชนทอผ้าย้อมครามบ้านอุ้งคาง-หนองไขวาลย์ (8 ลาย)
19) กลุ่มทอผ้าย้อมครามบ้านดอนกอย (6 ลาย)	20) กลุ่มทอผ้าย้อมครามบ้านคำข่า (3 ลาย)
21) กลุ่มสตรีทอผ้าขาวม้าและผ้าย้อมครามบ้านแหลมทอง (4 ลาย)	22) วิสาหกิจชุมชนกลุ่มทอผ้าย้อมครามและสีธรรมชาติบ้านกุดเรือใหญ่ (8 ลาย)
23) กลุ่มแม่บ้านแปรรูปผ้าขาวม้าบ้านซำก่าย (7 ลาย)	24) กลุ่มทอผ้ามัดหมี่ย้อมสีธรรมชาติและเคมี (7 ลาย)
25) กลุ่มทอผ้ามัดหมี่ย้อมครามและสีธรรมชาติ (4 ลาย)	26) วิสาหกิจชุมชนกลุ่มทอผ้าย้อมครามและแปรรูปผลิตภัณฑ์ (4 ลาย)
27) วิสาหกิจชุมชนกลุ่มทอผ้ากุดเรือใหญ่ตำบลนาซอ (2 ลาย)	28) รัตนผ้าคราม (8 ลาย)

29) กลุ่มของนางสาว พุทธิรักษา เชื้อนแก้ว (5 ลาย)	30) กลุ่มของนางกาวิณ จันทร์ละคร (5 ลาย)
31) กลุ่มแปรรูปผ้าฝ้ายมัดย้อมบ้านสงเปลือย (9 ลาย)	32) กลุ่มทอผ้าย้อมสีธรรมชาติ (3 ลาย)
33) กลุ่มทอผ้าย้อมสีธรรมชาติบ้านพินนา คุณคำพูล สุราชวงศ์ (10 ลาย)	34) กลุ่มวิสาหกิจชุมชนทอผ้าบ้านพินนาคร คุณรัชณี สุราชวงศ์ (3 ลาย)
35) กลุ่มทอผ้าย้อมครามบ้านโนนสร้างไฟ คุณสภาพร โสคำภา (2 ลาย)	36) กลุ่มมัดย้อมและแปรรูปบ้านโนนสร้างไฟ คุณหนูถิ่น อุทัยวัฒน์ (2 ลาย)
37) วิสาหกิจชุมชนกลุ่มแปรรูปผลิตภัณฑ์จากผ้าและเส้นด้ายบ้านหนองหอย คุณอานวย พิมพ์ปิดชา (5 ลาย)	38) กลุ่มวิสาหกิจชุมชนทอผ้าฝ้ายย้อมครามหนองหอยพัฒนา คุณบุญโฮม สารสวัสดิ์ (2 ลาย)
39) กลุ่มทอผ้าที่กระตุกบ้านนาจัว (1 ลาย)	40) กลุ่มสตรีทอผ้าย้อมครามบ้านนาจัว (3 ลาย)
41) ร้านจุ่มทองผ้าไหมไทย (4 ลาย)	42) กลุ่มทอผ้าไหมผ้าฝ้ายบ้านเหล่าใหญ่ (2 ลาย)



ภาพที่ 1 วิธีการดำเนินการวิจัย

2. .1 การเตรียมข้อมูล (Data preparation) ในขั้นตอนนี้เป็นการนำข้อมูลภาพถ่ายลายผ้าครามทั้งหมด 216 ลาย ที่ได้รับการเก็บรวบรวมข้อมูลจากกลุ่มผ้าครามธรรมชาติจำนวน 42 กลุ่ม เพื่อนำมาปรับเปลี่ยนภาพของลายผ้าครามให้มีขนาด 1024x1024 พิกเซล (Pixel) เนื่องจากลาย

ผ้าครามบางกลุ่มอาจจะมีแบบหรือลวดลายที่ค่อนข้างคล้ายคลึงกันแต่มีกระบวนการทอผ้าที่แตกต่างกันออกไป ดังนั้นผู้วิจัยจึงจำเป็นที่จะต้องปรับเปลี่ยนภาพให้มีความละเอียดสูง เพื่อนำข้อมูลภาพถ่ายที่ได้มาศึกษาองค์ประกอบและเพื่อหาอัตลักษณ์ของแต่ละลาย ตัวอย่างดังภาพที่ 2



ลายอินทะนิลภูพาน
(กลุ่มใบคราม)



ลายแมงคราม
(กลุ่มไทเทิงกู)

ภาพที่ 2 ตัวอย่างภาพลายผ้าคราม

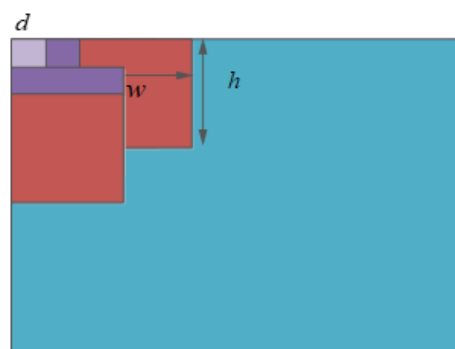
2.2. การแบ่งภาพย่อย (Sub-Image)

การแบ่งแยกภาพขนาดใหญ่เป็นภาพขนาดเล็ก โดยการนำข้อมูลภาพมา Stride เป็นการขยับภาพทั้งในแนวแกน x และแกน y เป็น (128,128) เริ่มจากซ้ายและเลื่อนตำแหน่งไปขวาครั้งละ 128 พิกเซลและเลื่อนไปด้านล่างครั้งละ 128 พิกเซลตามอัลกอริทึมที่

กำหนด ในขนาด $w_i = \frac{W}{N}$ โดย W คือความกว้างของภาพในแกนแนวนอนและทำการขยับช่องว่างเพิ่มขึ้นทีละ d จนสุดขนาดของภาพ และทำการแบ่ง

ภาพจากบนลงล่างในแนวแกนตั้ง $h_i = \frac{H}{M}$ โดย H คือความสูงของภาพ โดยจำนวนข้อมูลภาพที่ได้

สามารถคำนวณจากสมการที่ 1 เพื่อนำข้อมูลภาพข้อมูลเหล่านี้มาเป็นชุดข้อมูล (Data Set) ตัวอย่างดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 การแบ่งภาพ

โดยมีอัลกอริทึมสำหรับการแบ่งแยกส่วนต่าง ๆ ของผ้าย้อมคราม ดังนี้

```

While(sumw<W)
Begin
    While(sumh<H)
        Begin
            h=h+d
            sumh=sumh+d
            cropimage(wi,hi,wi+d,hi+d)
        End
        sumw=sumw+d
        w=w+d
    End
End

```

ซึ่งจะได้ภาพเป็นจำนวน

$$picture = \sum_{j=1}^m \sum_{i=1}^n \frac{(W-d)_i}{N} \times \frac{(H-d)_j}{M} \quad (1)$$

โดย

W

ความกว้างของภาพจริง

N

จำนวนที่ต้องการแบ่งในแนวนอน $\times$

d

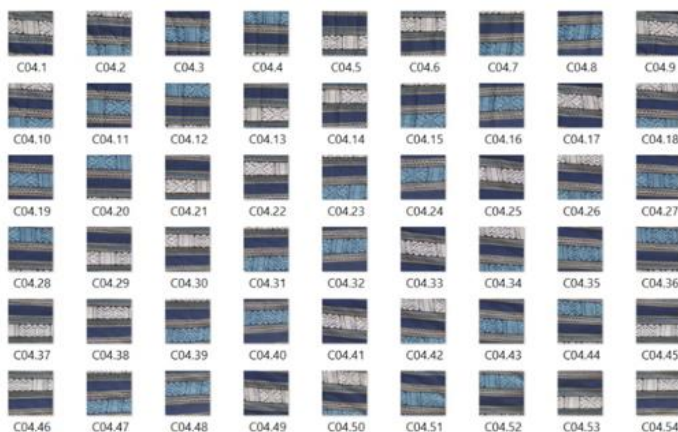
คือช่องว่างระหว่างการแบ่งภาพ

H

ความสูงของภาพ

M

จำนวนที่ต้องการแบ่งในแนวนอน y



ภาพที่ 4 ตัวอย่างการ Stride ผ่าลายขนาดของดาวล้อมเดือน กลุ่มทอผ้าลายมุกบ้านหนองผือใหม่

2.3. ขั้นตอนการเรียนรู้ (Training set)

สำหรับการสร้างแบบจำลอง งานวิจัยนี้ได้ใช้

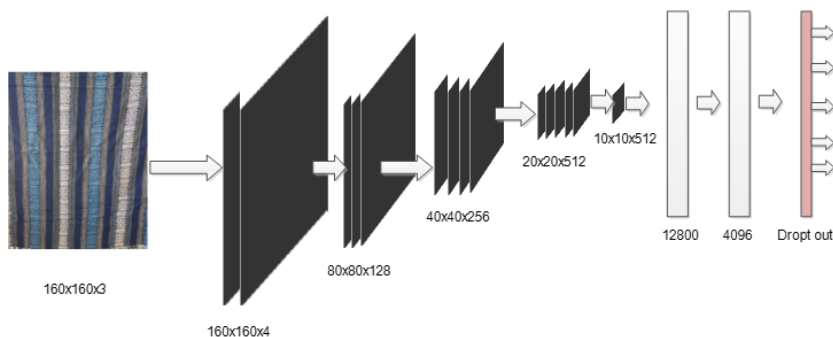
สถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียมแบบ

สังวัตนาการ [11-12] ด้วยโมเดล ResNet50 [13-14]

โดยได้นำข้อมูลภาพทั้งหมดจากขั้นตอน 2.2 มาทำการแยกประเภท (Classifications) ตามชื่อกลุ่มแปรรูปผ้าย้อมครามธรรมชาติโดยไม่ได้นำคำนึงถึงว่าจะเป็นผ้าลายใด หลังจากนั้นทำการแยกประเภทตามชื่อลายผ้า เพื่อนำข้อมูลมาสร้างแบบจำลองเพื่อให้โปรแกรมที่พัฒนาขึ้นเข้าใจข้อมูลในแต่ละคลาส โดยมี การจำแนกทั้งหมดจำนวน 42 คลาสตามชื่อกลุ่มผ้าครามธรรมชาติ และใช้โมเดล ResNet-50 ในการแบ่งภาพ ดังแสดงในรูปที่ 5

โดยทำการย่อขนาดภาพลงไปเรื่อย ๆ จนได้เป็นขนาดที่ 512 และนำภาพมาสร้างเป็นรูปแบบ

(Pattern) เดียวกันทั้งหมดแล้วแปลงเป็นไบนารี หลังจากนั้นนำรูปแบบที่ได้ไปแปลงให้อยู่ในรูปของโมเดลที่ใช้ในการเรียนรู้ (Machine learning model) เพื่อให้โมเดลสามารถเรียนรู้ค่าพารามิเตอร์ (Parameter) ที่เหมาะสม ซึ่งกระบวนการดังกล่าวต้องทำการเปลี่ยนแปลงขนาดของภาพให้เหมาะสมเพื่อนำมาสร้างเป็นแบบจำลอง โดยงานวิจัยนี้ได้ทำการเปลี่ยนแปลงขนาดและค่าของ d เพื่อทำการ Stride โดยใช้ขนาด 150×150 , 200×200 , 250×250 , 300×300 , 350×350 และกำหนดค่าของ $d = 5, 10, 15, 20$



ภาพที่ 5 ขั้นตอนการแบ่งภาพด้วยโมเดล ResNet-50

2.4 ขั้นตอนการสร้างชุดข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบ (Test set) ในงานวิจัยนี้ได้ใช้สูตรของทาโร่ ยามาเน่ (Taro Yamane) [15] สำหรับการคำนวณหาจำนวนกลุ่มตัวอย่างของข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบดังสมการที่ 2 โดยการสุ่มตัวอย่างแบบชั้นภูมิ (Stratified random sampling) เพื่อประเมินความถูกต้องของโมเดล (Model evaluation)

$$n = \frac{N}{1 + Ne^2} \quad (2)$$

โดย n คือ ขนาดของกลุ่มตัวอย่าง
 N คือ ขนาดประชากร
 e คือ ค่าความคลาดเคลื่อนเท่ากับ 0.04 ในกรณีที่มีประชาชนตั้งแต่ 1000 ขึ้นไป

ตารางที่ 2 ตัวอย่างการคำนวณหากลุ่มตัวอย่างของชุดข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบ

ที่	ชื่อกลุ่มผ้าคราม	ประชากรใน การสร้าง แบบจำลอง	จำนวนที่ได้รับ เลือกโดยสุตร Taro Yamane	Precision	Recall	F-Measure	Accuracy
1	ใบคราม	2000	476	0.97	0.95	0.96	0.92
2	กลุ่มทอผ้าลายมุกบ้านนาจานใหม่	763	763	0.71	0.84	0.77	0.82
3	กลุ่มทอผ้าลายมุกบ้านใหม่หนองผือ	600	600	0.78	0.85	0.81	0.85
4	กลุ่มของนางสาวพชรรัชชา เชื้อนแก้ว	2000	476	0.98	0.91	0.94	0.91
5	กลุ่มของนางสาวกานัน จันทรละคร	1000	385	0.94	0.86	0.90	0.86
6	กลุ่มแปรรูปผ้าฝ้ายมัดย้อมบ้านสงเปลือย	1000	385	0.95	0.88	0.91	0.89
7	กลุ่มวิสาหกิจชุมชนส่งเสริมอาชีพบ้าน หนองสะโน	423	423	0.77	0.83	0.80	0.82
8	กลุ่มอนุรักษ์ผ้าย้อมครามไทเท็งกู	1000	385	0.87	0.88	0.88	0.84

โดย ค่ำ Precision, Recall แล ะ
F-Measure ดังสมการที่ 3-5 ดังนี้

$$\text{Precision} = \frac{TP}{(TP+FP)} \quad (3)$$

$$\text{Recall} = \frac{TP}{(TP+FN)} \quad (4)$$

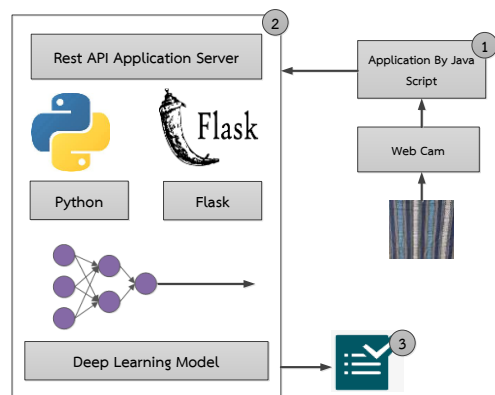
$$\text{F-Measure} = \frac{(2 * \text{Precision} * \text{Recall})}{(\text{Precision} + \text{Recall})} \quad (5)$$

ในงานวิจัยนี้ทดสอบประสิทธิภาพของโมเดล
ด้วยการวัดค่าความแม่นยำ (Accuracy)
ดังสมการที่ 6 [16] โดยผลความแม่นยำของโมเดล
ต้องมีค่าตั้งแต่ 80% ขึ้นไป

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

โดย TP คือ ค่าที่พยากรณ์ถูกต้องเชิงบวก
TN คือ ค่าที่พยากรณ์ถูกต้องเชิงลบ
FP คือ ค่าที่พยากรณ์ผิดพลาดเชิง
บวก FN คือ ค่าที่พยากรณ์ผิดพลาดเชิงลบ

2.5 การนำแบบจำลองไปใช้งาน (Deploy and combing model) โดยมี ขั้นตอน การทำงานอธิบายได้ดังภาพที่ 6



ภาพที่ 6 กระบวนการ Deploy and Combining Model

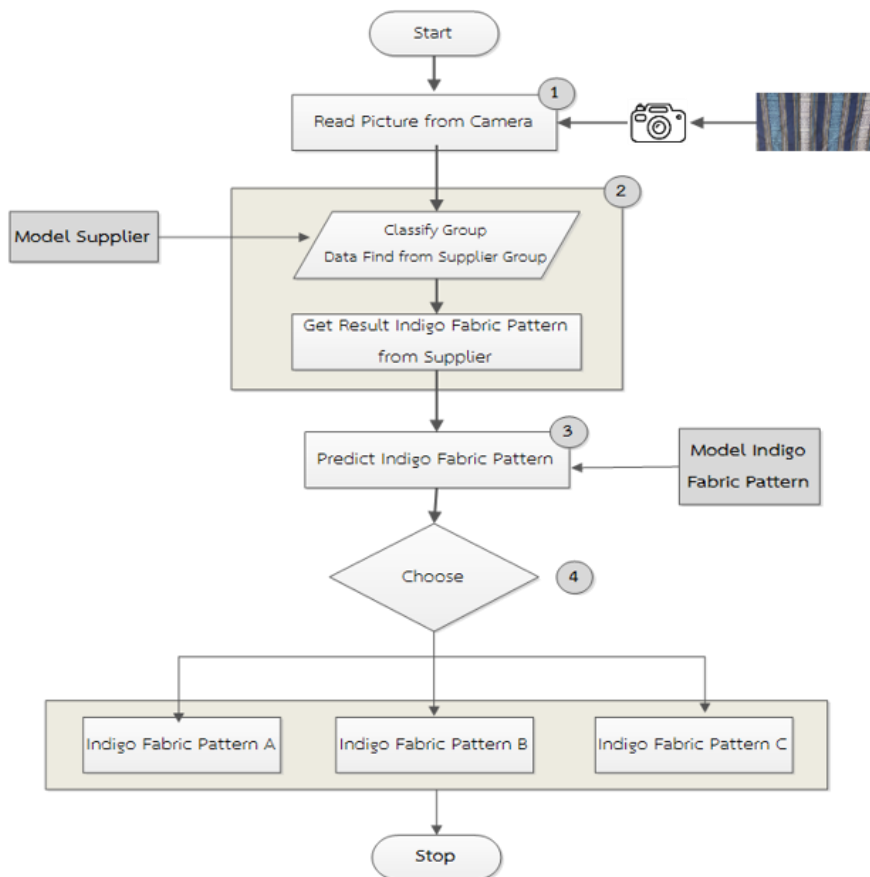
จากภาพที่ 6 เป็นกระบวนการนำแบบจำลอง
ที่ได้ไปพัฒนาโปรแกรมประยุกต์ โดยเริ่มจาก
โปรแกรม Java script ที่ผู้วิจัยพัฒนาขึ้นมาจะทำการ
อ่านภาพจากกล้อง Web cam เพื่อนำข้อมูลที่ได้สู่
กระบวนการสร้าง Application server ด้วย ภาษา

Python ที่เชื่อมต่อกับแบบจำลองการทำนายลายผ้า
ย้อมครามธรรมชาติด้วยกระบวนการของการเรียนรู้
เชิงลึก หลังจากนั้นจะทำการบันทึกแบบจำลองที่ได้
เพื่อนำไปพัฒนาระบบสืบค้นที่มาของลายผ้าย้อม
ครามด้วยเทคนิคการเรียนรู้เชิงลึก

2.6. การพัฒนาแอปพลิเคชัน

(Application) ที่เป็นระบบเพื่อสืบค้นที่มาของลาย

ผ้าย้อมครามด้วยเทคนิคการเรียนรู้เชิงลึก บน
การประมวลผลภาพเพื่อจำแนกลายผ้าย้อมครามของ
กลุ่มแปรรูปผ้าย้อมครามธรรมชาติที่ได้ขึ้นทะเบียนขอ
ใช้ตราสัญลักษณ์สิ่งบ่งชี้ทางภูมิศาสตร์ ในจังหวัด
สกลนคร โดยมีขั้นตอนการทำงานอธิบายได้ดังภาพที่
7 และมีรายละเอียดดังนี้



ภาพที่ 7 กระบวนการพัฒนาแอปพลิเคชัน

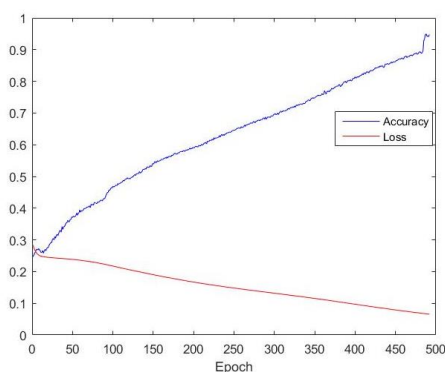
2.6.1. เริ่มจากการอ่านภาพลายผ้าคราม
ย้อมธรรมชาติจากกล้อง Webcam

2.6.2. ทำการแบ่งแยกภาพลายผ้าคราม
ตามกลุ่มแปรรูปผ้าคราม ในจังหวัดสกลนคร โดย
กระบวนการนี้อ่านข้อมูลมาจากแบบจำลอง Model
supplier

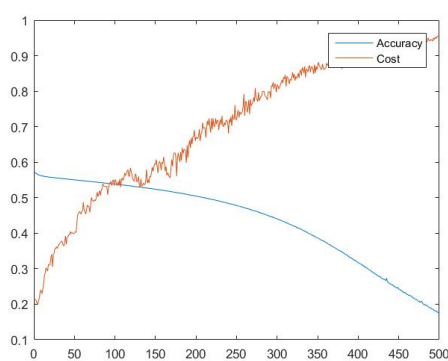
2.6.3. นำข้อมูลที่ได้จากการพยากรณ์มา
ระบุว่าลายผ้าครามดังกล่าวเป็นลายของ
ผ้าครามชนิดใด โดยกระบวนการนี้อ่านข้อมูลมาจาก
แบบจำลอง Model indigo fabric pattern

2.6.4. เลือกข้อมูลตามลวดลายผ้าที่อ่าน

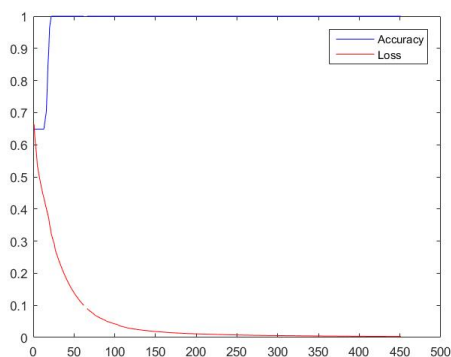
ภาพจากกล้อง Webcam เพื่อประมวลผลภาพ
จำแนกลายผ้าครามของกลุ่มแปรรูปผ้าคราม
ธรรมชาติ พร้อมทั้งอธิบายข้อมูลเกี่ยวกับชื่อลายผ้า
ย้อมคราม ข้อมูลรายละเอียดเกี่ยวกับลายผ้าย้อม
คราม ข้อมูลพิกัดที่ตั้งของกลุ่ม ข้อมูลรายละเอียดของ
กลุ่ม และภาพ Street view ของกลุ่มแปรรูปผ้าคราม
ธรรมชาติ



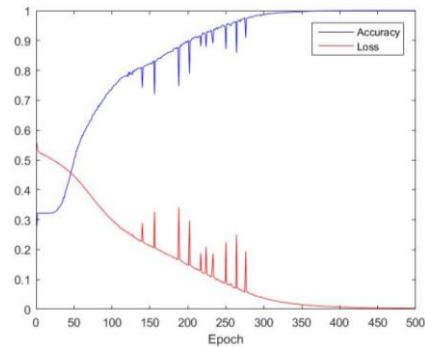
ภาพที่ 8 ความแม่นยำของการจำแนกแบบจำลอง
ในภาพรวม (Accuracy = 0.93, Loss = 0.09)



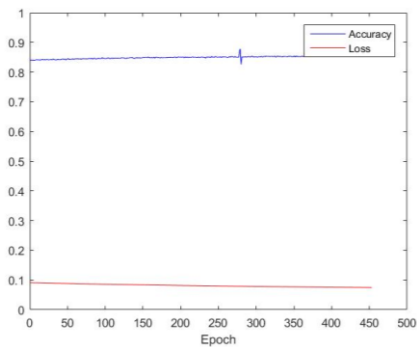
ภาพที่ 9 ความแม่นยำของการจำแนกแบบจำลอง
กลุ่มใบคราม (Accuracy = 0.96, Loss = 0.13)



ภาพที่ 10 ความแม่นยำของการจำแนกแบบจำลอง กลุ่มทอผ้าลายมุกบ้านนาจานใหม่ (Accuracy = 0.97
Loss = 0.01)



ภาพที่ 11 ความแม่นยำของการจำแนกแบบจำลอง กลุ่มทอผ้าลายมุกบ้านใหม่หนองผือ (Accuracy = 0.94, Loss = 0.01)



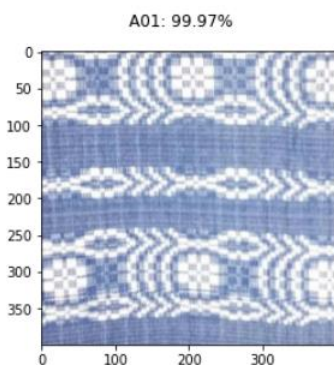
ภาพที่ 12 ความแม่นยำของการจำแนกแบบจำลอง วิสาหกิจชุมชนแปรรูปผลิตภัณฑ์จากวิสาหกิจชุมชนแปรรูปผลิตภัณฑ์จากผ้าบ้านสามัคคี (Accuracy = 0.86, Loss = 0.23)

จากภาพที่ 8 แสดงถึงผลการทดสอบความแม่นยำของการจำแนกภาพรวมของแบบจำลองของทุกกลุ่ม โดยค่าความแม่นยำ (Accuracy) และค่าความผิดพลาด (Loss) โดยจำนวนรอบในการเรียนรู้ (Epoch) ต่างกันจะให้ผลลัพธ์ที่ต่างกัน และผลการทดสอบโมเดลได้ค่าแม่นยำสูงสุดที่ 0.93 และค่าความผิดพลาดลดลงที่ 0.09

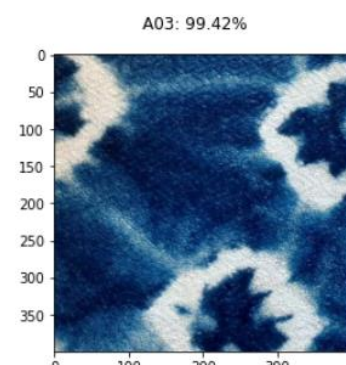
จากภาพที่ 9 และ 11 เป็นตัวอย่างผลการทดสอบแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพ เนื่องจากเมื่อทำการเพิ่มรอบของการทดสอบโมเดลจะมีค่าแม่นยำ

เพิ่มขึ้นและค่าความผิดพลาดลดลง และจากภาพที่ 10 และ 12 เป็นตัวอย่างผลการทดสอบแบบจำลองที่อาจจะเกิดการ Overfitting เนื่องมาจากมีจำนวนภาพถ่ายลายผ้าที่ค่อนข้างน้อย หรือภาพถ่ายมีลวดลายที่ใกล้เคียงกัน

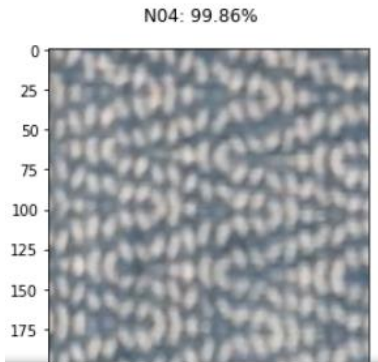
3.2 ผลจากการทดสอบความแม่นยำของชุดทดสอบ ในงานวิจัยนี้ผู้วิจัยได้แสดงผลตัวอย่างของค่าความแม่นยำของชุดทดสอบเพื่อประเมินความถูกต้องของโมเดล ดังแสดงในภาพที่ 13-17



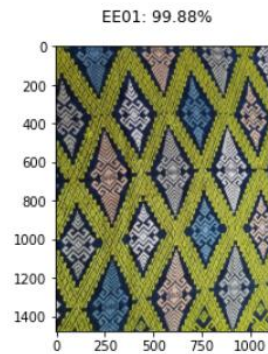
ภาพที่ 13 ค่าความแม่นยำของชุดทดสอบลายผ้าลายกุดจิกกลม กลุ่มใบคราม



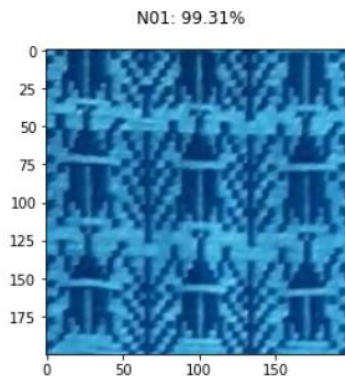
ภาพที่ 14 ค่าความแม่นยำของชุดทดสอบลายผ้าลายลายดอกฝ้าย กลุ่มใบคราม



ภาพที่ 15 ค่าความแม่นยำของชุดทดสอบลายลูกแก้ว
กลุ่มอนุรักษ์ฝ้ายย้อมครามไทเทิงกู



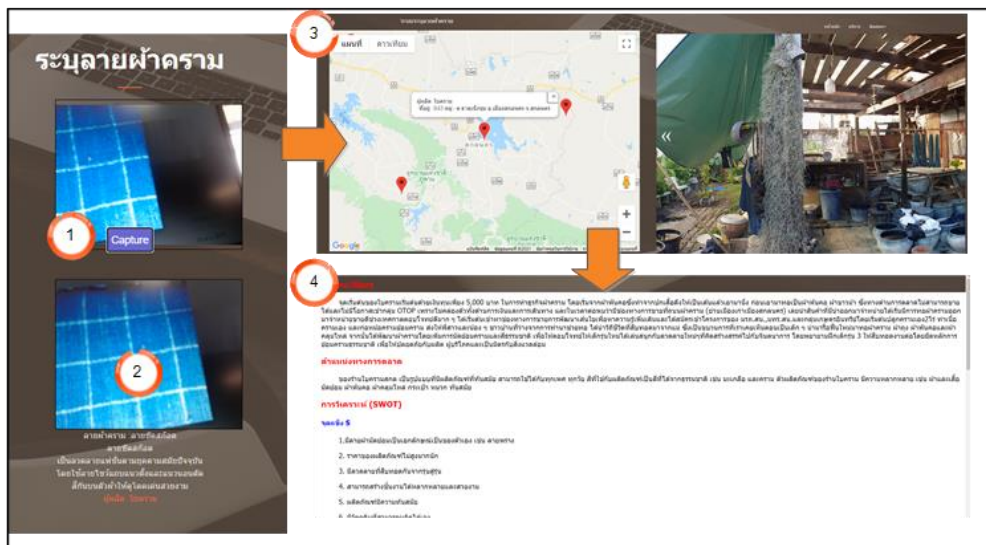
ภาพที่ 16 ค่าความแม่นยำของชุดทดสอบลายขลิ
เกาะ กลุ่มแปรรูปผ้าฝ้ายมัดย้อมบ้าน
สงเปลือย



ภาพที่ 17 ค่าความแม่นยำของชุดทดสอบลายแมงคราม กลุ่มอนุรักษ์ฝ้ายย้อมครามไทเทิงกู

จากภาพที่ 13-17 ผลการทดสอบพบว่าถ้ามี
กลุ่มประชากรที่นำมาสร้างแบบจำลองมากจะ
สามารถสร้างแบบจำลองที่มีความแม่นยำได้สูงกว่า
เนื่องจากสถาปัตยกรรมแบบโครงข่ายประสาทเทียม
จะสามารถเรียนรู้และจดจำข้อมูลได้หลากหลาย ซึ่ง
จะพบได้จากค่า F-measure ที่มีค่าใกล้เคียง 0.90

3.3 ผลการพัฒนาระบบสืบค้นที่มาของ
ลายฝ้ายย้อมครามด้วยเทคนิคการเรียนรู้เชิงลึก โดย
ผลการพัฒนาระบบ ดังแสดงในภาพที่ 18



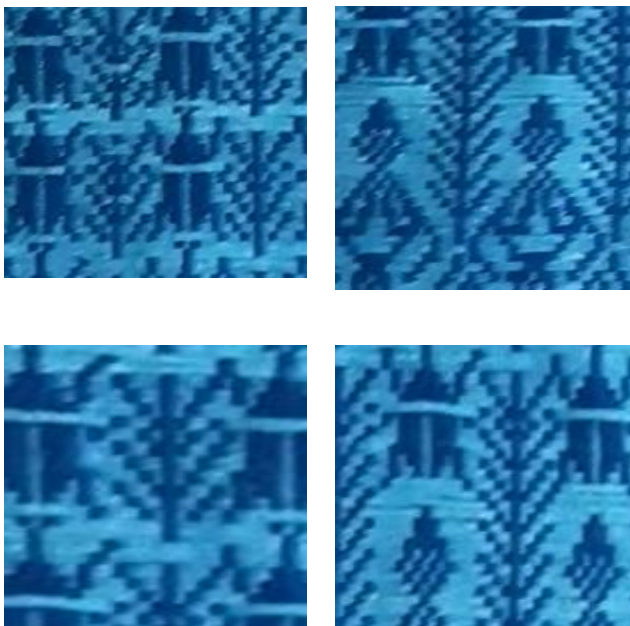
ภาพที่ 18 ผลการพัฒนาระบบสืบค้นที่มาของลายผ้าครามด้วยเทคนิคการเรียนรู้เชิงลึก

จากภาพที่ 18 เมื่อผู้ใช้ทำถ่ายภาพลวดลายผ้าจากกล้อง Webcam ระบบจะทำการประมวลผลภาพเพื่อจำแนกลายผ้าครามของกลุ่มแปรรูปผ้าครามธรรมชาติ พร้อมทั้งอธิบายข้อมูลเกี่ยวกับชื่อลายผ้าครามลาย ละเอียดเกี่ยวกับลายผ้าคราม ข้อมูลพิกัดที่ตั้งของกลุ่ม ข้อมูลรายละเอียดของกลุ่ม และภาพ Street view ของกลุ่มแปรรูปผ้าครามธรรมชาติ ในจังหวัดสกลนคร

หลังจากนั้นนำระบบที่พัฒนาขึ้นมาทดสอบจำแนกลายผ้าครามของกลุ่มแปรรูปผ้าครามธรรมชาติ ในจังหวัดสกลนคร ดังตารางที่ 3 โดยได้ทดสอบตัวอย่างการจำแนกลายผ้าครามจำนวน 10 ลาย ในแต่ละลายมีภาพจำนวน 20 ภาพ ดังแสดงตัวอย่างในภาพที่ 19 สำหรับภาพลายผ้าครามที่ใช้ในการทดสอบระบบเป็นภาพลายผ้าคนละชุดกับภาพลายผ้าที่ใช้ในการเรียนรู้

ตารางที่ 3 ตัวอย่างการประเมินความแม่นยำของระบบสืบค้นที่มาของลายผ้าคราม

ชื่อลายผ้า	จำแนกถูกต้อง (ภาพ)	จำแนกผิด (ภาพ)	ความแม่นยำ (%)
ลายกุดจิกกลม	18	2	90%
ลายอินทนิลภูพาน	19	1	95%
ลายเต่าว่ายน้	20	0	100%
ลายหอปราสาท	19	1	95%
ลายแมงคราม	19	1	95%
ลายพันหวี	18	2	90%
ลายนกนางแอ่น	17	2	85%
ลายดอกฝ้าย	16	4	80%
ลายบันไดสวรรค์	18	2	90%
ลายดอกไม้จีน	16	5	80%



ภาพที่ 19 ตัวอย่างภาพถ่ายลายผ้าครามแมงครามที่ใช้ในการทดสอบระบบ

4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการประมวลผลภาพด้วยเทคนิคการเรียนรู้เชิงลึกเพื่อจำแนกลายผ้าย้อมครามของกลุ่มแปรรูปผ้าย้อมครามธรรมชาติที่ได้ขึ้นทะเบียนขอใช้ตราสัญลักษณ์สิ่งบ่งชี้ทางภูมิศาสตร์ ในจังหวัดสกลนคร จำนวน 42 กลุ่ม โดยเก็บรวบรวมข้อมูลภาพถ่ายลายผ้าครามทั้งหมดจำนวน 216 ลาย และได้ประยุกต์ใช้สถาปัตยกรรมของโครงข่ายประสาทเทียมแบบสังวัตนาการ ด้วยโมเดล ResNet50 สำหรับสร้างแบบจำลอง จากนั้นจะทำการประเมินความถูกต้องของโมเดล พบว่าความแม่นยำของแบบจำลองโดยรวมมีค่าสูงสุดที่ 93% และมีค่าความผิดพลาดลดลงที่ 0.09% จากนั้นนำแบบจำลองมาพัฒนาระบบสืบค้นที่มาของลายผ้าคราม โดยผลการประเมินความแม่นยำของระบบจากตัวอย่างลายผ้าครามจำนวน 10 ลาย พบว่ามีความแม่นยำตั้งแต่ 80% ขึ้นไป

งานวิจัยนี้ทำให้ทราบถึงอัตลักษณ์ที่มาและข้อมูลพื้นฐานของลายผ้าครามในแต่ละชุมชนในจังหวัดสกลนคร และช่วยในการอนุรักษ์ภูมิปัญญาเกี่ยวกับศิลปะการทอผ้าย้อมครามธรรมชาติ อีกทั้งยังเป็นส่วนหนึ่งในการประชาสัมพันธ์การท่องเที่ยวชุมชน “วิถีคราม” ส่งผลให้ชุมชนเกิดรายได้เพิ่มขึ้น มีความมั่นคง ยั่งยืนต่อไป

โดยองค์ความรู้ที่ได้จากงานวิจัยนี้ สามารถนำไปต่อยอดงานวิจัยที่ต้องการอนุรักษ์ภูมิปัญญาเกี่ยวกับศิลปะการทอผ้าย้อมครามธรรมชาติในจังหวัดสกลนคร และเป็นต้นแบบการพัฒนาระบบสำหรับจำแนกลายผ้าในจังหวัดอื่น ๆ ได้นอกจากนั้นยังเป็นแนวทางการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีดิจิทัลด้านการตลาดในยุค New normal

ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการจำแนกลายผ้ามีความจำเป็นจะต้องถ่ายมาด้วยความละเอียดสูงและต้องคำนึงถึงองค์ประกอบอื่น ๆ

ในการถ่ายภาพ เช่น แสง และพื้นหลังในการถ่ายภาพ เนื่องจากลายผ้าในแต่ละกลุ่มอาจจะมีลักษณะคล้ายคลึงกันแต่มีกระบวนการทอผ้าที่แตกต่างกัน ซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพของโมเดล และงานวิจัยที่ทำร่วมกับชุมชนหรือสังคมในท้องถิ่น ผู้วิจัยจะต้องศึกษาถึงปัญหา ความต้องการ และบริบทของชุมชนหรือสังคม เพื่อนำไปสู่การแก้ปัญหาในเชิงรูปธรรม และให้ผลผลงานวิจัยสามารถนำไปใช้ประโยชน์สู่ชุมชนและสังคมต่อไป

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] อนุรัตน์ สายทอง, อังคณา เทียนกลุ่ม, สุตกลมลลาโสภา. ครามและผลิตภัณฑ์คราม. สกลนคร: มหาวิทยาลัยราชภัฏสกลนคร; 2554.
- [2] กระทรวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ร่วมกับมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร. การพัฒนาผลิตภัณฑ์ผ้าสกลนคร; 2555.
- [3] สำนักงานเกษตรจังหวัดสกลนคร กรมส่งเสริมการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. แผนพัฒนาการเกษตรจังหวัดสกลนครปี 2563-2564; 2562.
- [4] นพรุจ พัฒนาสาร, ณัฐวุฒิ ศรีวิบูลย์. การประมวลผลภาพสำหรับจำแนกคุณภาพมะม่วงพันธุ์โชคอนันต์ โดยการจำลองการมองเห็นของมนุษย์ด้วยวิธีการเรียนรู้เชิงลึก. Journal of Information Science and Technology. 2563;10(1):24-29.
- [5] Shamrat FJM, Mahmud I, Rahman AS, et al. A smart automated system model for vehicles detection to maintain traffic by image processing. International Journal of Scientific & Technology Research. 2020; 9(02):2921-2928.
- [6] Rahouma KH, Mahfouz AZ. Design and implementation of a face recognition system based on API mobile vision and normalized features of still images. Journal of Procedia Computer Science. 2021;194:32-44.
- [7] Rahmatov N, Paul A, Saeed F, et al. Machine learning-based automated image processing for quality management in industrial Internet of Things. International Journal of Distributed Sensor Networks. 2019;15(10):1-11.
- [8] Schlett T, Rathgeb C, Busch C. Deep learning-based single image face depth data enhancement. Computer Vision and Image Understanding Journal. 2021;210:1-15.
- [9] Gjoreski M, Gradišek A, Budna B, et al. Machine learning and end-to-end deep learning for the detection of chronic heart failure from heart sounds. IEEE Access. 2020;8:20313-20324.
- [10] Han C, Lei S, Mingming W, et al. Innovative design of traditional calligraphy costume patterns based on deep learning. In Journal of Physics: Conference Series. 2021;1790(1):1-6.
- [11] LeCun Y, Bottou L, Bengio Y, et al. Gradient based learning applied to

- document recognition. In: Proceedings of the IEEE. 1998;86(11):2278–2324.
- [12] Wang D, Wang J, Li W, et al. T-CNN: Trilinear convolutional neural networks model for visual detection of plant diseases. Computers and Electronics in Agriculture Expert Systems with Applications Journal. 2021;190:1-10.
- [13] Giuseppe CA. ResNet-50-based Convolutional neural network model for language ID identification from speech recordings. Proceedings of the Third Workshop on Computational Typology and Multilingual NLP; 2021 June. Association for Computational Linguistics. 2021:136-144.
- [14] Zhang H, Jiang L, Li C. Cs-resnet: cost-sensitive residual convolutional neural network for PCB cosmetic defect detection. Expert Systems with Applications Journal. 2021;185:1-10.
- [15] Yamane T. Statistics: An introduction analysis. New York: Harper & Row; 1973.
- [16] Bruckhaus T. The business impact of predictive analytics. In Knowledge discovery and data mining: Challenges and realities. USA: Igi Global; 2007.

An Analysis of Customer Satisfaction for Bus Air Conditioning Service Centers by Multiple Linear Regression

Tara Khongluntan^{1*}, Parinya Srisattayakul²

^{1*}Program in Engineering and Technology Management, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Krungthep, Thailand

²Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering,
Rajamangala University of Technology Krungthep, Thailand
Corresponding Author E-mail: 649041810122@mail.rmuth.ac.th

ABSTRACT

The goal of this study was to determine the factors that influence customer satisfaction in bus air conditioning service centers (i.e., Denso's official representative service centers in Thailand) in order to understand the true needs of customers. This was done by collecting data from 100 questionnaires in which the questions were mainly focused on satisfaction. We were interested in factors such as satisfaction, repair quality, reasonable price, repeat purchase, repair time, and location. Multiple linear regressions were used as a statistical tool to perform a stepwise analysis to eliminate the factors that had no effect and to obtain the satisfaction equation (SAT): $SAT = 0.585 + 0.465 (RP) + 0.249 (LT) + 0.169 (L)$, meaning that 46.5% of those surveyed intended to make a repeat purchase. Furthermore, the F-test value from the ANOVA analysis was 34.675. This demonstrated that all three variables had a significant impact on satisfaction and explains why the regression equations developed are appropriate and correct.

Keyword: Customer satisfaction, Multiple linear regression, Repeat purchase, Repair lead time, Location.

1. INTRODUCTION

The definition of "customer satisfaction" comes from a variety of perspectives, which is understood by many marketers. Customer satisfaction is defined as the key to achieving goals in the service environment, and it involves exceeding the needs and demands of customers [1]. The better the customer satisfaction, the greater the benefits for the company, as customers will repurchase a company's product, and vice versa [2]. Customer expectations serve as the foundation for satisfaction. When customers are provided with services or products that exceed their expectations, they accept the quality of service as a result of this. It is the foundation of all business.

Customers who bring their buses in for service would expect a high-standard service center, rather than a general repair shop. Customers who are willing to pay a higher price must receive a higher level of service in terms of quality, lead time, and employee response, as well as the convenience of using the service shop. Service centers are capable of providing services that meet or exceed expectations, resulting in an implicit satisfaction at the end. Hansemark and Albinson [3] define customer satisfaction as a general customer attitude towards a service provider, or an emotional response to the difference between what customers expect and what they receive, in terms of the fulfillment of

Received 21-01-2022

Revised 31-03-2022

Accepted 01-04-2022

certain needs, goals, or desires. It could be said that customer satisfaction is what a customer feels after learning or experiencing a company's ability to meet their expectations. Satisfaction regarding goods/services greatly influences the intention to revisit, and if the degree of satisfaction rises, the likelihood of retaining the existing customer is more likely to increase [4]. To create satisfaction in service, especially for the drivers who bring their buses to the service center, several factors must be considered. For example, the repair lead time is critical because if the technician takes too long to repair the vehicle, the waiting driver may become frustrated. The reason for this is that having a bus in for repairs means that it is unable to pick up passengers, which affects the fare collection revenue, resulting in dissatisfaction with the service. On the other hand, repair prices may not be a factor that drives satisfaction as the drivers do not pay for the repairs themselves. Customers who are satisfied are more likely to return to those who supported them, while dissatisfied customers will go elsewhere [5] meaning that the key factor for customer's satisfaction is knowing the customer's expectation about a certain product. Customer satisfaction is the maximum percentage of customers using a certain product who perceive its quality, and hence they are happy and satisfied. We look at product quality using an aggregate measure of satisfaction known as market-level product satisfaction in the marketing literature. Service quality, on the other hand, was assessed at the dealer facility using an individual satisfaction measure of service delivery. Both of these variables were utilized to determine customer loyalty [6]. Transaction-specific customer satisfaction refers to an evaluation of a specific purchase transaction, while cumulative customer satisfaction represents an evaluation based on the total purchase

and usage of goods or services over time [7]. As a result, in order to ensure the long-term viability of the bus air conditioning repair business, we must try to understand the true needs of all customer groups. Customer satisfaction is the key to profitability as satisfied customers will eventually become loyal customers.

The automotive air conditioning repair business is highly competitive and has been especially so during the COVID-19 outbreak, causing problems in the public bus industry and inevitably affecting the amount of air conditioning repair work that is carried out. The travel restrictions brought on by the COVID-19 pandemic resulted in an estimated 20 thousand international tourists visiting Thailand in the first quarter of 2021 only [8]. A study of the factors that influence customer satisfaction is critical in order to improve the competitiveness of service centers after the COVID-19 pandemic has passed. As can be seen, there are numerous factors that influence satisfaction, such as service quality, repair time, reasonable price, and location, with the assumption that if the company thoroughly understands customer satisfaction, it can clearly design services to meet the needs of customers. In the following step, primary information was obtained from satisfaction surveys that were conducted by handing out questionnaires to customers who brought their vehicles to service centers. The essential idea is to satisfy customers so that they continue patronizing a business, thus enabling the business to increase its profit and be sustainable in the industry [9]. Revenue from repeat customer service is driven by customer satisfaction. As a result, a company must concentrate on the process of creating customer satisfaction.

After sales service is a term used to describe the services provided to a product's customer during the product's life cycle after it has been acquired [10]. Companies

can improve their service in order to make customers happy and eliminate unpleasant customer experiences [11]. Customer satisfaction is the level of fulfillment a person feels after comparing a performance or results with expectations [12]. Understanding the needs, wants, and demands of customers provides the input for institutions to design marketing strategies in order to create satisfaction with the company [13]. After-sales service satisfaction measurement is an effective management tool for understanding the true needs of customers across all dimensions. Building a concrete framework of appropriate services fostering loyalty leads to business sustainability. When researching the factors that influence customer satisfaction, it is possible to narrow the gap between the company and the customer, which is regarded as something that the company must prioritize. To elevate service above that of the competitors, working proactively in accordance with the factors investigated is recommended.

Do you wonder if customer satisfaction surveys are still useful after several years of use? What approaches should be used to ensure that data from customer satisfaction surveys is used more effectively?[14]. According to[15]. Customer happiness has become the fundamental to success for hospitality businesses. After-market automobiles as a result any business should not overlook the significance of customer satisfaction. It's also critical to keep track of the aspects and variables that influence customer happiness, and to attempt to raise customer expectations for these factors and variables in order to increase customer loyalty.

Another factor to consider is the repeat purchase or service of air conditioners, because when bus air conditioners breakdown, what factors influence customers' decisions to be using in our services? That is why we must

investigate the significant factors influencing repeat purchases. Aside from satisfaction, there are other factors to consider. It has been recognized that the most valuable customers are those who return and become repeat buyers [16]. In return, repeat buyers are more likely to use word-of-mouth and spend more (e.g., an increase in margins and cross-sales), while the costs of retention decrease over time [17].

The quality of service can lead to customer satisfaction where there is an understanding and improvement of operational processes, and also the identification of any problems. To develop reliable and accurate service performance measures, customer satisfaction and other performance outcomes must also be measured. Service quality is essential in measuring customer satisfaction and it is one of the most important aspects of business operations [18]. Paying attention and striving to improve the quality of repair work, as well as assisting customers to be satisfied, will also assist the service center to save money on low-quality tasks, representing a significant reduction in operating costs. Finally, consider the value that customers derive from quality, as they will pass on that satisfaction and recommend the service to others. Many organizations strive to establish service quality standards. Investing in high-tech tools, staff development through the provision of training, using Internet of Thing to identify root causes of issues, reducing waiting times, service process monitoring, and always attempting to find solutions are all activities that contribute to an increase in the quality of repair work.

Repeat purchases are an important goal that every business aims for from its customers, and results from product or service satisfaction and loyalty. Retaining loyal customers is less expensive than acquiring new customers. Service centers

must try to find a way to establish strong and stable relationships with existing customers who have the potential for repeat purchases. According to a study, service quality judgments are influenced by price expectations, especially in the event of a loss price, such as when the actual selling price exceeds the predicted price [19]. However, there are risks to keeping these customers. If this group of customers is dissatisfied, the aim must be to impress them more in order to secure a repeat purchase. Customer needs can easily be met by determining their true needs. A consumer typically decides to undergo a repeat purchase when he/she is normally satisfied with the brand and is in the last stage of post-purchase behavior in the consumer buying process [20] In order to generate repeat purchases in the future, service centers must strive to maintain quality work while remaining professional in their industry.

This is the first time that a study has been conducted on the maintenance system of air conditioners used in large buses, and the results of the study and analysis could be used to further expand the study in the future.

2. MATERIALS AND METHODS

The questionnaire was used to collect primary data from customers who expressed their opinions. This was the starting point for this research to determine the goal of creating effective services. We chose multiple linear regression as the specific tool for this analysis from among the most widely used statistical tools in research to investigate the impact of various factors on customer satisfaction.

2.1 Research concept

The relationship among all of the factors of interest to us will be linked together in this research to identify a point at which we can examine the effect of the

dependent variables, which is the hypothesis that we are most interested in. The data from the questionnaires was used as input in a multiple regression equation, as shown in Figure 1.

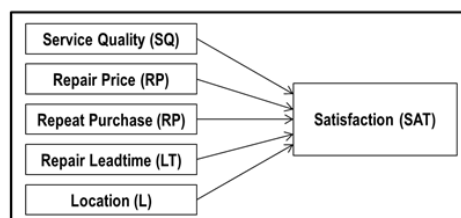


Figure 1. Research framework.

Service quality, lead time, price, location, and repeat purchase are all independent variables, with satisfaction as the dependent variable. The research workflow began with the creation of a questionnaire. The customers who took the buses to be repaired were analyzed as respondents, and the important factors affecting satisfaction were derived as the result.

2.2 Basic Service Center Information

Sahamontol Solutions (Thailand) Co. Ltd. is a Denso bus air conditioner distributor in charge of providing comprehensive air conditioning system repair services for bus air conditioners, truck refrigerators, and air conditioners in passenger cars. The workshop is located near a large bus station, and there are numerous public buses in the area. It is also close to Tarad-Thai, which is a wholesale market of fresh fruits, vegetables, and frozen food and the source of a large number of refrigerated trucks. As a result, Denso is well known in the public bus and commercial transportation industries.

According to Figure 2, the service center's current service activities include repair following installation and delivery to the customer. It is a thorough service that

includes maintenance, replacement of defective parts, and cleanup. Both work within and outside of the warranty period. Customers will look for alternatives to maintain air conditioners after the warranty period has expired in order to save money. For example, shifting to general garage

services, etc., despite the fact that the repair center will strive to reach customers through a variety of techniques even with a preventative maintenance (Pre-failure) program, it is unable to provide a service that fulfills the needs of each customer segment.



(a) Bus Air conditioner repaired.



(b) Condensing unit cleaning up.



(c) Special tools.

Figure 2. Details of service activities

2.3 Questionnaire Preparation

The questionnaire used in this study was divided into two sections. The first section contained questions regarding the respondents' basic information and consisted of seven questions. The second section inquired about the level of customer satisfaction. The questionnaire used a Likert scale of 1–5: 1=Disagree entirely, 2=Disagree, 3=Neutral, 4=Agree, and 5=Strongly agree. The details of the

questions regarding the level of satisfaction for each factor are shown in Table 1.

2.4 Data collection

2.4.1 Research population

We collected data via an online questionnaire from customers who brought their vehicles to the service center for air conditioning check and repairs, and these questionnaires were collected over the course of approximately one month.

2.4.2 Research samples

Service center employees completed a total of 100 questionnaires by conducting interviews with the customers who arrived to pick up their buses. In the case of private vehicles, the owners were interviewed. In the case of company vehicles, interviews with the officers in charge of driving those vehicles were conducted.

The sampling formula was chosen based on the formula [20] which was derived as the equation below.

$$n = \frac{Z^2}{4(Moe)^2}$$

Information:

n = Number of samples

Z = Normal distribution level at level of 5% = 1.96%

Moe = Margin of Error or maximum error rate is 10%

As a consequence of the calculation, the following sampling results are obtained:

$$n = \frac{1.96^2}{4(0.10)^2} = 96.04$$

As a result, the sample group will be 100 respondents who will fill out an online questionnaire using the Google Forms questionnaire builder.

Table 1. Details of questionnaire.

Factors	Questionnaire
Service Quality	Your satisfaction: in terms of repair skills or craftsmanship/quality of repair work
Lead Time	Your satisfaction: in terms of the time it takes to repair
Price	Your satisfaction: in terms of the appropriateness of the repair price
Location	Your satisfaction: in terms of location of the service center
Satisfaction	Your satisfaction: in terms of overview of all services in the service center
Repeat Purchase	If you have to come back to repair your car's air conditioning system again, please give us the weight level for returning to our service center again

2.5 Data analysis

To analyze the data, we used IBM SPSS V.21 descriptive statistics to describe the characteristics of the respondents, which are classified according to five factors: gender, occupation, education, age, and income. Following that, multiple linear regressions were used as a tool to forecast the factors influencing satisfaction based on the forecast coefficient and whether any factors explain the variation in the dependent variable. There was also a statistical test to determine the questionnaire's confidence.

2.5.1 Reliability test for research confidence

The questionnaire's reliability test was successful. Cronbach's alpha is a popular method for determining an item's internal consistency [21]. According to this test, the value of an alpha coefficient greater than 0.60 indicates a reliable model for the survey results for the population under study [22]. The decision-making of a construct or variable is said to be reliable based on 40 respondents. If the Cronbach's alpha (α) value is greater than 0.60, the questionnaire is considered to be reliable. If

Cronbach's alpha (α) is less than 0.60, the questionnaire used is not reliable.

Table 2. Reliability test

Cronbach's Alpha (α)	Description
0.836	Reliable

The results and factors are important in all questions. Here, Cronbach's alpha (α) is 0.836, which is greater than the recommended value of 0.6, and indicates that the questionnaire's factors are reliable. This also shows that the equations generated are reasonable and correct based on the results of this reliability test.

3. RESULTS AND DISCUSSION

3.1 Results

3.1.1 Characteristics of respondents

We can explain that the characteristics of the 100 respondents who came to use the service in the service center are shown in Table 2. The majority of customers were men, 76 (76%), and there were 24 women (24%). A total of 63 respondents (63%) were working in the private sector, 25 were business owners (25%), and 12 were government employees (12%). Regarding education, 36 respondents were educated below a bachelor's degree (36%), 37 had a bachelor's degree (37%), and 27 had higher than bachelor's degree (27%). In terms of age, the majority of respondents (46 people) were aged between 41 and 60 years old, while the income range of 41 respondents (41%) was THB 15,000 - 40,000.

Table 3. Characteristics of respondents.

	Characteristic	Percentage
Gender	Female	24
	Male	76
	Total	100
Occupation	Business owner	25
	Government employee	12
	Private sector	63
	Total	100
Education	Below bachelor's degree	36
	Bachelor's degree	37
	Higher than bachelor's degree	27
	Total	100
Age	< 25	1
	25 – 40	50
	41 – 60	46
	> 60	3
	Total	100
Income	15,000 – 40,000	41
	40,001 – 60,000	31
	> 60,001	28
	Total	100

3.1.2 Multiple linear regressions

The analysis was based on studying all the selected factors that were predicated on the initial concept before creating the regression equation, which is a concept that can be represented as a factor relationship diagram.

According to Table 4, As a result, in order to generate multiple linear regression equations, we employed a stepwise method of selecting factors into the equation, with the first factor being correlated with a high-level dependent

variable. For this we had three inputs, namely repeat purchase, repair lead time, and location, with two factors, service quality and repair price, removed.

To see how this could be used, we conducted an analysis of variance. Can the equation's independent variables predict the dependent variable? Table 4 shows that the three models were all significantly < 0.05 , indicating that all independent variables had a significant impact on the dependent variable.

Table 4. Factors selected using stepwise.

Model	Variables entered	Variables removed	Method
1	Repeat purchase (RP)	-	Stepwise (Criteria: Probability-of-F-to-enter ≤ 0.050 , Probability-of-F-to-remove ≥ 0.100).
2	Repair lead time (LT)	-	Stepwise (Criteria: Probability-of-F-to-enter ≤ 0.050 , Probability-of-F-to-remove ≥ 0.100).
3	Location (L)	-	Stepwise (Criteria: Probability-of-F-to-enter ≤ 0.050 , Probability-of-F-to-remove ≥ 0.100).

3.1.3 Re-evaluation of service quality (SQ) and repair price (P)

Based on the stepwise results, we can determine which factors influence satisfaction and which do not, which in this case refers to service quality and repair price being cut. We concluded that it had no effect on satisfaction because the p-value of Service quality and repair price was > 0.05 .

As a result, both factors were removed from the experiment. So, therefore, we combined factors for further investigation by employing multiple regression equations with other variables. Table 5 represents a grouping to study such factors. To consider the final model (Model 3), we can conclude the following.

Table 5. Dimension variable summary of multiple linear regression analyses.

Variable	B	Beta	t-value	p-value
Repeat purchase (RP)	0.465	0.430	4.917	< 0.05
Repair lead time (LT)	0.249	0.252	3.238	< 0.05
Location (L)	0.169	0.215	2.471	< 0.05
Constant	0.585		1.541	0.127

As a result, Table 5 shows that we can write the regression equation as follows: Satisfaction (SAT) = 0.585 + 0.465 Repeat Purchase (RP) + 0.249 Repair Lead Time (LT) + 0.169 Location (L).

The value $F = 34.765$, $Sig < 0.001$ for Model 3 was obtained from the ANOVA (Table 6), which means that the form of the generated equation is correct, even though all three variables had a significant positive impact on the dependent variable.

Table 6. Analysis of variance (ANOVA) test.

ANOVA ^a					
Model	SS	DF	MS	F-value	p-value
1 Regression	14.260	1	14.260	70.406	< 0.001 ^b
Residual	19.850	98	0.203		
Total	34.110	99			
2 Regression	16.722	2	8.361	46.641	< 0.001 ^c
Residual	17.388	97	0.179		
Total	34.110	99			
3 Regression	17.671	3	5.920	34.765	< 0.001 ^d
Residual	16.349	96	0.170		
Total	34.110	99			

^a Dependent variable: Satisfaction (SAT).

^b Predictors: (Constant), Repeat purchase.

^c Predictors: (Constant), Repeat purchase, Repair Lead time.

^d Predictors: (Constant), Repeat purchase, Repair Lead time, Location.

Each independent variable's regression coefficient (T-test) was examined. Unstandardized coefficients are the raw scores for each independent

variable that describe the effect or influence on the dependent variable, as shown in the Table 7.

Table 7. Details of coefficients.

Coefficients ^a					
Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t-value	p-value
	B	Std. Error	Beta		
1 Constant	1.355	0.357		3.791	0.000
Repeat Purchase (RP)	0.698	0.083	0.647	8.391	0.000
2 Constant	0.631	0.389		1.624	0.108
Repeat Purchase (RP)	0.579	0.085	0.536	6.832	0.000
Repair Lead Time (LT)	0.287	0.077	0.291	3.705	0.000
3 Constant	0.585	0.379		1.541	0.127
Repeat Purchase (RP)	0.465	0.095	0.430	4.917	0.000
Repair Lead Time (LT)	0.249	0.077	0.252	3.238	0.002
Location (L)	0.169	0.068	0.215	2.471	0.015

^a Dependent variable: Satisfaction (SAT).

Referring to Table 7, we can see that repeat purchase had a significant effect on satisfaction with $t\text{-value} = 4.917$ ($p\text{-value } 0.001 < 0.05$ rejected H_0), repair lead time had a significant positive effect on satisfaction with $t\text{-value} = 3.238$ ($p\text{-value } 0.002 < 0.05$ rejected H_0), and location had significant positive effect on satisfaction as $t\text{-value} = 2.471$ ($p\text{-value } 0.015 < 0.05$ rejected H_0). Beta is a standard score that indicates the order of influence of independent variables from strong to weak. We can see the importance of the factors of repeat purchase, repair lead time, and location, respectively.

A constant of 0.585 indicates that, if repeat purchase (RP), repair lead time (LT), and location (L) are constant (unchanged), then satisfaction (SAT) is positive at 0.585 with a standard error of 0.379.

The regression coefficient of the variable repeat purchase (RP) has a positive value on satisfaction of 0.465, or 46.5%, indicating that repeat purchase affects customer satisfaction. If the repeat order score is increased by 1 unit, the customer satisfaction score will increase by 0.465 units with a 0.095 standard error.

The regression coefficient on the variable repair lead time (LT) has a positive value on satisfaction of 0.249, or 24.9%, indicating that the lead time of servicing affects customer satisfaction. If the lead time score is increased by 1 unit, the customer satisfaction score will increase by 0.249 units with a 0.077 standard error.

The regression coefficient on the location (L) variable has a positive value on satisfaction of 0.169, or 16.9%, indicating that the location of service center affects customer satisfaction. If the location order score is increased by 1 unit, the customer satisfaction score will increase by 0.169 units with a 0.068 standard error.

3.2 Discussion

3.2.1 Summary of the dimensions of service quality

Service quality was removed from the study because it had no significant influence on satisfaction. According to the findings, service quality was removed from the study, and the majority of respondents believed the branded service centers' quality and reputation were acceptable. As a reason, give more weight to other variables. This is because the service provider is a Denso distributor that is constantly developing the competence of their technicians. However, many commented on the speed with which repairs were completed. This is similar with the findings of Blake et al. [23], who discovered that the speed of service is important for automotive firms. Customer expectations and new disruptive technology are among the major difficulties challenging today's automotive firms. As the service is fairly standard, the customers are already delighted. The quality is also affected because it introduces value to the customer and keeps the automotive industry profitable. Meeting the servicing needs of customers has been proven to be the first step to customer satisfaction in an automotive organization [24]. Loomba [25] stated that the main objective of after-sales service is to keep the customer satisfied and loyal through trust, credibility, and security provided by the organization, and by building long-lasting connections that contribute to an increased positive market performance. The expertise of technicians helps to improve the quality of service work. Knowledge within an organization is always important, but relevant knowledge is even more important today than it was even ten years ago, due to the intense pressures that businesses are currently experiencing.

3.2.2 Summary of the dimensions of repair price

This factor was also left out of the study. Although price is a significant consideration, some jobs such as servicing bus air conditioners, required the skills of specialists in deciding whether or not to use a service, the service center, on the other hand, operates under a world-class brand. As a result, there is a standard repair cost. Pricing is based on the number of hours spent on each type of work. Before a repair is undertaken, there is a price quote. There are also conditions such as discounted spare parts and payment credit. As a result, customers are already satisfied with their services. Regardless of the fact that the pricing strategy is complex, it has a direct impact on customer satisfaction. Customers want to find a way to reduce the costs in their businesses. However, if the price is right for the quality, a satisfactory level of satisfaction will be achieved.

3.2.3 Summary of the dimensions of repeat purchase

Referring to the regression equation results, repeat purchases had a 46.5% impact on satisfaction, which is not very high. However, it is a value that reflects the needs of the bus air conditioner repair customers who responded to the questionnaire. Many factors influence repeat purchases, such as preventive maintenance, the need for specialized craftsmen, etc. If we look at the beta values, we can see that the results for repeat purchases are higher than the results for other factors ($0.430 > 0.252$), indicating that the customer is satisfied with the service and intends to use it again for future air conditioner repairs. Repeat purchase had a significant positive impact on satisfaction with $t\text{-test} = 4.917$ ($p\text{-value } 0.001 < 0.05$ rejected H_0). As a result, it was determined that repeat purchase influences service satisfaction.

3.2.4 Summary of the dimensions of repair lead time

Again referring to the regression equation results, because the majority of customers who brought their buses in for repairs were drivers, the effect of repair time on satisfaction was 24.9%. Even if the driver has time to rest during the repairs, this still has a direct impact on the wait. Ticket sales generate revenue for bus operators, and drivers are compensated based on the revenue generated by ticket sales. Buses cannot make money if they are stopped for an extended period of time. As a result, there is concern about the repair period. In Table 7, the beta value, on the other hand, is 0.252, which is higher than that for location, but lower than that for repeat purchase. Repair lead time had a significant positive effect on satisfaction, with $t\text{-test} = 3.238$ ($p\text{-value } 0.002 < 0.05$ rejected H_0), indicating that repair lead time also had an impact and influence on customer satisfaction.

3.2.5 Summary of the dimensions of location

The location of the service center had a significant impact with a $p\text{-value of } 0.015 < 0.05$. This is due to the bus industry, which is a large industry. When air conditioners malfunction, buses must be taken to a service center, which has limitations in terms of location, as setting up a repair service center usually requires a very large area, which may be outside of the city or in the outer suburbs. As a result, location has a significant impact on customer satisfaction, and this can be seen from $t\text{-test} = 2.471$. As a result of the above $p\text{-value}$, H_0 is rejected. We can see that the regression equation has a 16.9% effect, so it is possible to say that the location has a slight influence.

3.2.6 Re-grouping variables

Furthermore, the researchers were interested in how the new correlations of service quality and repair price with

importance variables from previous outcomes were related. Table 8 was divided into two groups so that statistical equations could be used to determine the relationship of effect between variables in each group.

To determine whether the results of the previous regression equation analysis differed in terms of service quality and repair price.

Table 8. Re-grouping of all variables.

Dependent Variable	Group	Independent variable
Satisfaction (SAT)	A	Service quality (SQ)
		Repair lead time (LT)
		Repeat purchase (RP)
		Location (L)
	B	Repair price (P)
		Repair lead time (LT)
		Repeat purchase (RP)
		Location (L)

Using regression equations to analyze the data, Table 9 shows the results for Group A, which clearly describe the relationship and effect of the factors.

Satisfaction (SAT) = 0.514 + 0.073 Repair price (P) + 0.439 Repeat purchase (RP) + 0.238 Repair lead time (LT) + 0.155 Location (L).

Table 9. Group A—multiple linear regression analyses.

Variable	B	Beta	t-value	p-value
Service quality (SQ)	0.126	0.127	1.390	0.168
Repeat purchase (RP)	0.401	0.373	3.838	<0.05
Repair lead time (LT)	0.229	0.232	2.943	<0.05
Location (L)	0.155	0.197	2.257	<0.05
Constant	0.440			0.265

We can conclude from the above results that when service quality, repeat purchase, repair lead time, and location remain constant (unchanged), satisfaction (SAT) is positive at 0.440 with a standard error of 0.392. However, from p -value = 0.168 (> 0.05), it was determined that service quality had no effect on satisfaction.

Following that, the regression was examined to determine the results for Group B, as shown in Table 9.

Satisfaction (SAT) = 0.514 + 0.073 Repair price (P) + 0.439 Repeat purchase (RP) + 0.238 Repair lead time (LT) + 0.155 Location (L).

Table 10. Group B—multiple linear regression analyses.

Variable	B	Beta	t-Value	p-Value
Repair price (P)	0.073	0.073	1.005	0.317
Repeat purchase (RP)	0.439	0.098	4.476	<0.05
Repair lead time (LT)	0.238	0.078	3.062	<0.05
Location (L)	0.155	0.070	2.216	<0.05
Constant	0.514			0.186

Based on the above findings, we conclude that, when the repair price, repeat purchase, repair lead time, and location are constant (unchanged), satisfaction (SAT) is positive at 0.514 with a standard error of 0.386, and the repair price factor has no effect on satisfaction with p -value = 0.317 (> 0.05).

4. CONCLUSIONS

Five factors of interest in the research, namely service quality, repair price, repeat purchase, repair lead time, and location, were of varying importance. According to the findings from effective statistical tools, customers are unconcerned about the quality of repair work and the price, with little interest in location, but are focused on repurchasing and repair times as major influences on satisfaction. Furthermore, to confirm the stepwise outcome, the researchers took the two non-effect factors and analyzed the relationship using a regression equation with the significant factor again. The resulting recommendation is that the company should concentrate on its policy of providing customer satisfaction through appropriate marketing strategies that are designed for specific needs. However, service centers need to develop a service system policy that emphasizes the importance of managing customer satisfaction in the area of after-sales service. Customers will return to use a service because they are happy with the work that was performed, particularly the skill of the technicians, as well as a

reasonable price. The speed with which technical problems in complicated air conditioning systems are analyzed is also important. For example, to fully comprehend customer expectations and service, and to meet customer needs, a new dimension of service to suit all target customers should be designed. After-sales service keeps customers coming back and encourages them to recommend your company to others. Studying the significance of the factors that influence customer satisfaction in air conditioning service centers will support executives in understanding the true needs of customers and those involved in the supply chain, and can direct business operations to maintain competence and long-term competitive advantages.

5. ACKNOWLEDGMENTS

Authors would like to express their sincere thanks to Sahamontol Solutions (Thailand) co.,Ltd. for providing data for this research work.

6. REFERENCES

- [1] Lam SY, Shankar V, Erramilli MK, et al. Customer Value, Satisfaction, Loyalty, and Switching Costs: An Illustration from a Business-to-Business 70 Service Context. *J Acad Mark.Sci.* 2004; 32:293-311.
- [2] Wantara P. The Relationships among Service Quality, Customer Satisfaction, and Customer Loyalty in Library Services. *Int J Econ Financ.* 2015; 5:264-9.

- [3] Hansemark O, Albinsson M. Customer satisfaction and retention: The experiences of individual employees. *Manag. Serv. Qual. Int. J.* 2004; 14: 40–57. [Internet]. [updated 2021]. Available from: <https://doi.org/10.1108/09604520410513668>.
- [4] Zhong Y, Moon HC. What Drives Customer Satisfaction, Loyalty, and Happiness in Fast-Food Restaurants in China? Perceived Price, Service Quality, Food Quality, Physical Environment Quality, and the Moderating Role of Gender. *Foods*. 2020; 9: 460.
- [5] Nicasio F. Customer Retention Strategies for Retailers: 6 Ways to Boost Repeat Sales and Loyalty. *Vendhq*. 2018. [Internet]. [updated 2021 September 16; cited 2021 September 16]. Available from: <https://www.vendhq.com/blog/customer-retention-strategies-retail/>.
- [6] Devaraj S, Matta KF, Conlon E. Product and service quality: The antecedents of customer loyalty in the automotive industry. *Prod Oper Manag.* 2001; 10(4):424-39.
- [7] Anderson EW, Fornell C, Lehmann DR. Customer Satisfaction, Market Share, and Profitability: Findings from Sweden. *J Mark.* 1994; 58:53-66.
- [8] Travel Intentions among Locals in Thailand for 2nd Quarter 2021 [Internet]. Bangkok: [updated 2021 September 27; cited 2021 September 21]. Available from: <https://www.statista.com/>
- [9] Nunkoo R, Teeroovengadam V, Ringle C, et al. Service quality and customer satisfaction: The moderating effects of hotel star rating. *Int J Hosp Manag.* 2019; 91: 10241-10244.
- [10] Gaiardelli P, Saccani N, Songini L. Performance measurement of the after-sales service network—Evidence from the automotive industry. *Comput Ind.* 2007; 58:698-708.
- [11] Iswahyudi H. Pengaruh Faktor-Faktor Kualitas Jasa Terhadap Kepuasan Nasabah di BMT Amanah Ummah; Program Studi Mana-jemen Syariah Sekolah Tinggi Agama Islam Negeri Surakarta. Surakarta, India. 2009.
- [12] Guntur M. Transformasi Manajemen Pemasaran. Cv sagung Seto. Jakarta. India. 2010.
- [13] Lovenia COA. Analysis of the Effect of Service Quality on Customer Satisfaction (Case Study on Central Java Customers, Semarang Main Branch). Bachelor's Thesis. Fakultas Ekonomi Dan Bisnis Universitas Diponegoro Semarang. 2012. [Internet]. [updated 2021. Available from: http://eprints.undip.ac.id/35662/1/Skripsi_LOVENIA.pdf.
- [14] Takala J, Bhufhai A, Phusavat K. Proposed verification method for the content suitability of the customer satisfaction survey. *Industrial Management & Data Systems.* 2006; 106(6):841-54.
- [15] Vigneshwaran SR, Mathirajan M. A Theoretical Framework for Customer Satisfaction and Customer Loyalty at Automobile After Sales Service Centres. *Int J Space Tech Manag Innovat.* 2021; 12(1):15-24.
- [16] Gupta S, Kim H. The moderating effect of transaction experience on the decision calculus in on-line. *Int J Electron Commerce.* September 2007; 12:127-58.
- [17] Reichheld F, Sasser W. Zero defections: Quality comes to service. *Harv Bus Rev.* 1990; 68:105-111.

- [18] Dandotiya R, Aggarwal P, Gopal R. Impact of Food and Beverage Quality on Passenger Satisfaction in Indian Railways. *Int J Cust Relatsh Mark Manag. (IJCRMM)*. 2020; 11: 37-52.
- [19] Toncar MF, Alon I, Misati E. The importance of meeting price expectations: linking price to service quality. *Journal of Product & Brand Management*. 2010; 19(4): 295-305
- [20] Kotler P, Armstrong G. *Principles of Marketing*. 16th ed. Global Edition. Pearson. London. UK. 2016.
- [21] Sugiyono. 2012. *Metode Penelitian Kuantitatif Kualitatif dan R&D*. Bandung: Alfabeta.
- [22] Gefen D, Straub D, Boudreau M-C. Structural equation modeling and regression: guidelines for research practice. *Commun Assoc Inf Syst*. 2000; 4:2-77.
- [23] Cronbach LJ. Coefficient alpha and the internal structure of tests. *Psychometrika*. 1951; 16:297-334.
- [24] Blake D, Cucuzza T, Rishi S. Now or never: the automotive collaboration imperative. *Strategy Leadersh*. 2003; 31:9-16.
- [25] Ureshchandar GS. Development of a framework for total quality service - The case of banks in India. Unpublished Ph.D. Dissertation. Indian Institute of Technology Madras. IIT P.O., Chennai 600 036 INDIA. 2000.
- [26] Loomba A. Product distribution and service support strategy linkages: An empirical validation. *Int. J. Phys. Distrib. Logist. Manag*. 1998; 28: 143-161. [Internet]. [updated 2021]. Available from: <https://doi.org/10.1108/09600039810221694>.

การกำจัดไอออนสังกะสีจากน้ำเสียเส้นด้ายยางโดยใช้เทคนิคการตกตะกอนทางเคมี

Removal of Zinc Ions from Rubber Thread Wastewater using Chemical Precipitation Techniques

ชนิษฐา เจริญลาภ^{1*}, ฉันทมณี พูลเจริญศิลป์²

Khanittha Charoenlarp^{1*}, Chantamane Poonjarernsil²

¹คณะอุตสาหกรรมสิ่งทอ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

²คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

¹Faculty of Textile Industries, Rajamangala University of Technology Krungthep, Thailand

²Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep, Thailand

*Corresponding Author E-mail: khanittha.c@mail.rmutk.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อกำจัดไอออนสังกะสีจากน้ำเสียเส้นด้ายยาง โดยศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของกระบวนการตกตะกอน โดยใช้สารตกตะกอน 3 ชนิด ได้แก่ (โซเดียมไฮดรอกไซด์ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมซัลไฟด์) ศึกษาปริมาณของสารตกตะกอน เวลาการกวน เวลาการตกตะกอน และเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนสังกะสีของสารตกตะกอนแต่ละชนิด ผลการทดลองพบว่าสภาวะที่เหมาะสมในการกำจัดไอออนสังกะสีด้วยวิธีการตกตะกอนคือใช้โซเดียมซัลไฟด์เข้มข้น ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ปริมาณ 26.67 มิลลิลิตร ต่อน้ำเสีย 1 ลิตร อัตราการกวนเร็ว 100 รอบต่อนาที เวลา 1 นาที อัตราการกวนช้า 30 รอบต่อนาที เวลา 30 นาที ปล่อยให้ตกตะกอน 60 นาที น้ำหลังบำบัดมีปริมาณไอออนสังกะสี 0.13 ± 0.05 มิลลิกรัมต่อลิตร คิดเป็นประสิทธิภาพในการกำจัดร้อยละ 99.99 ± 0.03 นอกจากนี้ยังมีค่าพีเอช 4.77 ± 0.01 การนำไฟฟ้า 10.55 ± 0.06 ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร ซีโอดี $1,643.84 \pm 91.32$ มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณของแข็งแขวนลอย 4.50 ± 1.00 มิลลิกรัมต่อลิตร มีค่าใช้จ่ายในการบำบัด 91.32 บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร

คำสำคัญ: ไอออนสังกะสี น้ำเสียจากการผลิตเส้นด้ายยาง การตกตะกอน

ABSTRACT

The objective of this research was to remove zinc ions from rubber thread wastewater. The experiment was conducted by studying the optimum conditions of the precipitation process, i.e. the precipitant types (Sodium hydroxide, calcium hydroxide and sodium sulfide), amount of the precipitant, stirring time, settling time and comparison of zinc removal efficiency for each coagulant. The results showed that the optimum condition for the removal of zinc ions

by the precipitation method was to use sodium sulfide at a concentration of 10% by weight/volume at a volume of 26.67 mL per 1 L of wastewater, fast stirring rate 100 rpm for 1 minute, slow stirring rate 30 rpm for 30 minutes and the settling time for 60 minutes. The zinc content of water after treatment was 0.13 ± 0.05 mg/L, corresponding to 99.99 ± 0.03 % removal efficiency. Moreover, pH value 4.77 ± 0.01 , conductivity 10.55 ± 0.06 $\mu\text{S}/\text{cm}$, COD $1,643.84 \pm 91.32$ mg/L. and suspended solids 4.50 ± 1.00 mg/L were obtained. The cost of wastewater treatment was 91.32 baht per cubic meter of wastewater.

Keyword: Zinc ion, Rubber thread wastewater, precipitation

1. บทนำ

เส้นด้ายยางเป็นวัตถุดิบที่สำคัญในการผลิตสินค้าในกลุ่มอุตสาหกรรมสิ่งทอ อุปกรณ์กีฬา รองเท้า สตรี และวัสดุทางการแพทย์ การผลิตเส้นด้ายยางเริ่มจากขนส่งน้ำยางพาราดิบสู่โรงงานแปรรูป ซึ่งมีการเติมแอมโมเนียผสมลงในน้ำยาง เพื่อไม่ให้น้ำยางเกิดการเน่าเสีย ในขั้นตอนการผลิตจะนำน้ำยางดิบผสมสารเคมีที่ใช้ในการปรับปรุงสภาพยาง โดยมีซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เป็นส่วนผสมหลัก น้ำยางดิบที่ผสมสารเคมีจะส่งไปยังถังอัดกรอง และฉีดเป็นเส้นด้ายยาง ทำให้คงรูปด้วยกรดแอซิดิก ตามด้วยการล้างเส้นด้ายยางที่ได้ด้วยน้ำร้อน เพื่อทำความสะอาดสารเคมีซึ่งติดที่ผิวด้านนอกของเส้นยาง จากกระบวนการเหล่านี้ ทำให้น้ำเสียที่เกิดจากการผลิตเส้นด้ายยาง มีค่าซีไอดีสูงจากการใช้กรดแอซิดิก แอมโมเนีย และสารเคมีที่ใช้ในการให้เส้นยางคงรูปซึ่งมีสังกะสีเป็นองค์ประกอบ ไอออนสังกะสีที่ปนเปื้อนในน้ำเสียถ้ากำจัดออกไม่หมดจะยับยั้งการทำงานของแบคทีเรียในระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ ทำให้ระบบบำบัดน้ำเสียชีวภาพล้มเหลว ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นจึงมีความจำเป็นต้องกำจัดไอออนสังกะสีออกก่อนที่จะนำน้ำเสียเข้าสู่ระบบบำบัดทางชีวภาพ การกำจัดสารประเภทโลหะหนักที่ปนเปื้อนในน้ำเสียโดยทั่วไปจะใช้กระบวนการ

ตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation) ซึ่งเป็นกระบวนการเปลี่ยนรูปสารที่อยู่ในรูปสารละลายให้เป็นรูปของแข็งที่ไม่ละลายน้ำ โดยเติมสารเคมีผสมกับน้ำเสียเกิดปฏิกิริยาเคมีทำให้สามารถแยกมลสารในรูปของแข็งที่ไม่ต้องการออกจากน้ำเสีย ของแข็งที่ตกตะกอนสามารถแยกออกจากสารละลายน้ำโดยการตกตะกอนหรือการกรอง [1–3] กระบวนการตกตะกอนทางเคมีของโลหะหนักมีหลายรูปแบบ เช่น การตกตะกอนในรูปไฮดรอกไซด์ (Hydroxide precipitation) การตกตะกอนในรูปซัลไฟด์ (Sulfide precipitation) การตกตะกอนในรูปคาร์บอเนต (Carbonate precipitation) [4–5] การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์ เป็นการตกตะกอนแบบดั้งเดิมโดยเติมสารเคมี ได้แก่ ปูนขาวหรือแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ($\text{Ca}(\text{OH})_2$) หรือโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์สามารถใช้กับน้ำเสียได้หลายประเภท แต่มีข้อจำกัดคือโลหะไฮดรอกไซด์มีสมบัติแอมโฟเทอริก (Amphoteric property) คือไม่สามารถตกตะกอนที่พีเอชใดพีเอชหนึ่ง โดยค่าพีเอชที่เหมาะสมสำหรับนิกเกิลคือ 10.0 – 10.5 สำหรับสังกะสีคือ 9.0 – 9.5 และสำหรับทองแดงคือ 8.5 – 9.5 [6] และสารประกอบโลหะไฮดรอกไซด์สามารถละลายถ้าพีเอชเปลี่ยนจากค่าที่ตกตะกอนผลึก [7] การตกตะกอนผลึกซัลไฟด์ ซัลไฟด์ที่ใช้ในการตกตะกอนมีหลายรูปแบบ ได้แก่ รูปแบบที่ละลายน้ำได้ เช่น โซเดียมซัลไฟด์

(Na_2S) โซเดียมไฮโดรเจนซัลไฟด์ (NaHS) รูปแบบที่ละลายได้เล็กน้อยเช่นแคลเซียมซัลไฟด์ (CaS) รูปแบบที่ไม่ละลายน้ำ เช่น เฟอร์รัสซัลไฟด์ (FeS) หรือรูปแบบแก๊ส เช่น ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) [8] การตกตะกอนโลหะหนักโดยใช้สารประกอบซัลไฟด์เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงเมื่อเทียบกับการใช้สารตกตะกอนชนิดอื่น เนื่องจากตะกอนในรูปโลหะหนักซัลไฟด์มีความสามารถในการละลายต่ำ [9] ในส่วนของค่าพีเอชในน้ำเสียนั้น ค่าพีเอชที่เหมาะสมในกระบวนการแบบซัลไฟด์อยู่ในช่วงพีเอชที่เป็นกลางไปจนถึงช่วงที่เป็นด่างเล็กน้อย หากพีเอชเป็นกรดจะทำให้โลหะถูกกำจัดได้น้อยและเป็นสาเหตุให้เกิดแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ [10] การตกตะกอนผลึกคาร์บอเนต ส่วนใหญ่ใช้โซเดียมคาร์บอเนตหรือโซดาแอช (Na_2CO_3) หรือโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO_3) การตกตะกอนผลึกคาร์บอเนต เหมาะสำหรับการตกตะกอนแคลเซียม นิกเกิล และตะกั่ว และมีค่าพีเอชที่เหมาะสมในการตกตะกอนต่ำกว่าในกรณีของการตกผลึกไฮดรอกไซด์และไม่ทำให้เกิดกลิ่นเหม็นของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ อีกทั้งสัณฐานที่เกิดขึ้นจะตกตะกอน และรีดน้ำออกได้ง่ายกว่าการตกผลึกไฮดรอกไซด์ [11-12] งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมของสารตกตะกอนสามชนิด คือโซเดียมไฮดรอกไซด์ แคลเซียมไฮดรอกไซด์ และโซเดียมซัลไฟด์ ในการกำจัดไอออนสังกะสีในน้ำเสียโรงงานเส้นด้ายยาง รวมถึงเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดไอออนสังกะสีในน้ำเสียระหว่างสารตกตะกอนทั้งสามชนิด

2. วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

2.1 วัสดุและสารเคมี

สารเคมี

สารเคมีเกรดสำหรับวิเคราะห์ ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) แคลเซียมไฮดรอกไซด์

(Ca(OH)_2) โซเดียมซัลไฟด์ (Na_2S) สารละลายมาตรฐาน สังกะสี ซิลเวอร์ซัลเฟต (Ag_2SO_4) โพแทสเซียมไดโครเมต ($\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$) เฟอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต ($\text{FeSO}_4 \cdot (\text{NH}_4)_2\text{SO}_4 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$) เฟอร์โรอินอินดิเคเตอร์ สารอินครอน ($\text{C}_{20}\text{H}_{15}\text{N}_4\text{NaO}_6$) และกรดซัลฟูริกเข้มข้น (H_2SO_4) ของบริษัท Ajax finchem, Australia

ตัวอย่างน้ำเสียจากโรงงานผลิตเส้นด้ายยาง โดยเก็บตัวอย่างน้ำแบบจ้วง (grab sample) จากบ่อพัก น้ำเสีย เก็บตัวอย่างสัปดาห์ละ 1 ครั้ง เป็นเวลา 6 สัปดาห์

อุปกรณ์

เครื่องวัดค่าพีเอช ยี่ห้อ CyberScans รุ่น PC 200 เครื่องวัดค่าการนำไฟฟ้า ยี่ห้อ CyberScan รุ่น CON 410 เครื่องทดสอบการตกตะกอนจาร์เจสตัยี่ห้อ VELP รุ่น FP4 และเครื่องวัดค่าการดูดกลืนแสง ยี่ห้อ PG Instrument รุ่น T110

2.2 วิธีทดลอง

(1) เตรียมสารรวมตะกอน 3 ชนิด ได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โซเดียมซัลไฟด์ และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ที่ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร

(2) ศึกษาชนิดและปริมาณของสารตกตะกอน ทดลองด้วยเครื่องจาร์เจสตั ด้วยสภาวะดังนี้ ปริมาตรน้ำเสีย 300 มิลลิลิตร อัตราการวนเร็ว 100 รอบต่อนาที เวลา 1 นาที อัตราการวนช้า 20 รอบต่อนาที เวลา 30 นาที และเวลาตกตะกอน 60 นาที [13] โดยแปรผันชนิดและปริมาณของสารรวมตะกอน วิเคราะห์ปริมาณไอออนสังกะสีหลังการบำบัด เลือกชนิดและปริมาณของสารตกตะกอนที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการกำจัดไอออนสังกะสี นำไปทดลองหาเวลาการวนช้า

(3) ศึกษาเวลาการวนช้า โดยใช้ชนิดและปริมาณของสารตกตะกอนที่ได้จากข้อ (1) อัตราการวนเร็ว 100 รอบต่อนาที เวลา 1 นาที อัตราการวนช้า 20

รอบต่อนาที แปรผันเวลากวนข้าที่ 15, 30, 45, 60 นาที และเวลาตกตะกอน 60 นาที เลือกเวลากวนข้าที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการกำจัดไอออนสังกะสี นำไปทดลองหาเวลาตกตะกอน

(4) ศึกษาเวลาตกตะกอน โดยใช้ชนิดและปริมาณของสารตกตะกอนที่ได้จากข้อ (1) อัตราความเร็วที่ความเร็ว 100 รอบต่อนาที เวลา 1 นาที อัตราการกวนข้าที่ความเร็ว 20 รอบต่อนาที เวลาการกวนข้าที่ได้

จากข้อ (2) แปรผันระยะเวลาตกตะกอน 30, 60, 90, 120, 150 นาที เลือกเวลาตกตะกอนที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการกำจัดไอออนสังกะสี

(5) เปรียบเทียบสมบัติของน้ำเสียก่อนและหลังบำบัดด้วยสารตกตะกอนในสภาวะที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในข้อ (1) – (3) โดยวิเคราะห์สมบัติของน้ำตามตารางที่ 1 ทั้งนี้ในแต่ละการทดลองจะทำซ้ำ 3 ครั้ง

ตารางที่ 1 วิธีการวิเคราะห์สมบัติของน้ำเสีย

พารามิเตอร์	วิธีการ	หมายเหตุ
พีเอช	ใช้เครื่องวัดพีเอช	[14]
การนำไฟฟ้า	ใช้เครื่องวัดการนำไฟฟ้า	[14]
ของแข็งแขวนลอย	กรองน้ำตัวอย่างที่ผสมเป็นเนื้อเดียวกันผ่านกระดาษกรอง GF/C (Glass-fiber filter) ที่ทราบน้ำหนัก แล้วนำกระดาษกรองพร้อมตะกอนที่ค้างอยู่ด้านบนไปอบที่อุณหภูมิ 103 – 105 องศาเซลเซียส จนได้น้ำหนักคงที่	[14]
ซีไอดี	วิเคราะห์ปริมาณโพแทสเซียมไดโครเมตที่เหลือจากการออกซิไดส์สารอินทรีย์ในน้ำเสียภายใต้สภาวะกรดที่อุณหภูมิสูง โดยการไทเทรตด้วยสารละลายมาตรฐานเพอร์รัสแอมโมเนียมซัลเฟต ใช้เฟอร์โรนเป็นอินดิเคเตอร์	[14]
ไอออนสังกะสี	ใช้เทคนิคสเปกโทรโฟโตเมทรี โดยให้ไอออนสังกะสีทำปฏิกิริยากับสารซินครอน (Zincon; 2-carboxy-2'-hydroxy-5'-sulfoformazylbenzene) ในสภาวะต่าง (พีเอช 9) ได้สารประกอบเชิงซ้อนสีแดง วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 620 นาโนเมตร	[15,16]

(6) คำนวณประสิทธิภาพการกำจัดไอออนสังกะสี จากสูตร $((C_0 - C_1)/C_0) \times 100$ เมื่อ C_0 คือ ค่าที่วิเคราะห์ได้ของตัวอย่างน้ำเสียก่อนทดลอง และ C_1 คือ ค่าที่วิเคราะห์ได้ในตัวอย่างน้ำเสียหลังการทดลอง

3. ผลการวิจัยและอภิปราย

3.1 ลักษณะของน้ำเสียจากการผลิตเส้นด้ายยาง

น้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตเส้นด้ายยาง ส่วนใหญ่เกิดจากการล้างเส้นด้ายยางในถาดน้ำร้อน และการใช้กรดแอสติคเพื่อให้เส้นยางคงรูป น้ำเสียมีสีขาวขุ่น และมีสารเจือปนมากโดยเฉพาะ

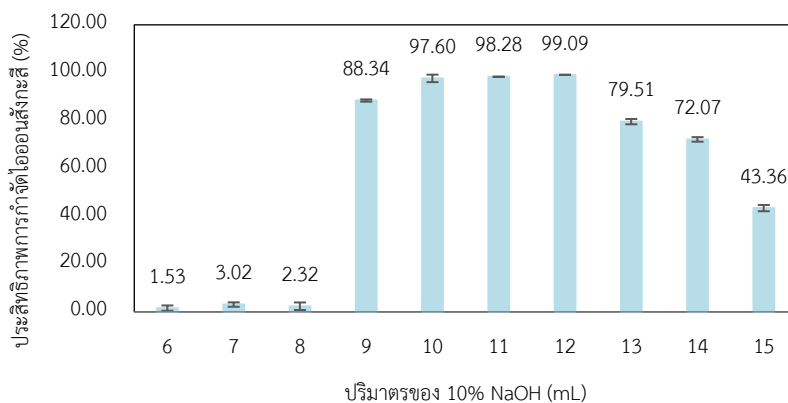
ไอออนของสังกะสี เนื่องจากในโรงงานสังเคราะห์เส้นด้ายยางพาราจะมีการเติมซิงค์ออกไซด์ (ZnO) เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับปฏิกิริยาวัลคาไนเซชัน (Vulcanization) ของเนื้อยางพารากับซัลเฟอร์เพื่อให้เกิดการเรียงตัวของโมเลกุลอีลาสโตเมอร์ (Elastomer) ในเนื้อยาง นอกจากนี้ยังมีการเติมสารเติมแต่ง เช่น zinc-2-ercaptobenzothiazole (ZMBT) ทำให้น้ำทิ้งมีความเป็นกรดสูง โดยมีค่าเฉลี่ยพีเอชเท่ากับ 7.96 ± 0.02 และมีปริมาณไอออนสังกะสีปะปนในปริมาณสูง โดยมีปริมาณเฉลี่ยของไอออนสังกะสีเท่ากับ 909.06 ± 38.56 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณไอออนสังกะสีในน้ำ

เสียมีผลต่อประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียแบบชีวภาพเนื่องจากสังกะสีเป็นสารต้านแบคทีเรีย [17-18] จึงรบกวนระบบทางชีวภาพในการบำบัดน้ำเสียทั้งแบบใช้ออกซิเจน และไม่ใช้ออกซิเจน โดยไปยับยั้งการเจริญเติบโต หรือลดความสามารถในการทำงานของจุลินทรีย์ ทำให้ระบบบำบัดน้ำเสียทำงานไม่เต็มประสิทธิภาพ และอาจล้มเหลวได้ ดังนั้นจึงต้องมีขั้นตอนการกำจัดไอออนสังกะสีออกจากน้ำเสียก่อนที่นำน้ำเสียไปบำบัดด้วยระบบชีวภาพต่อไป

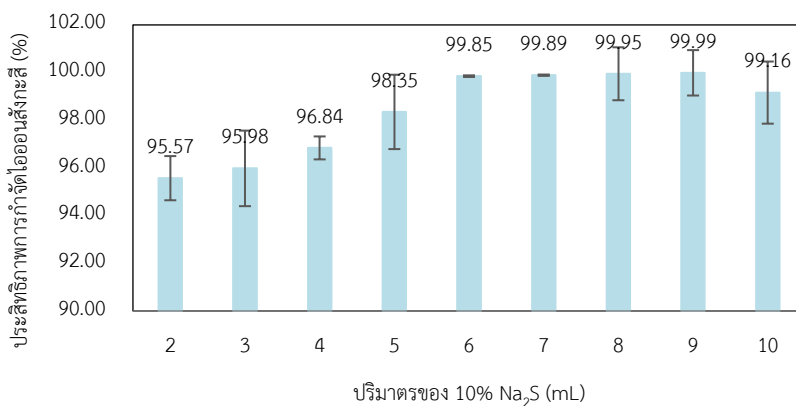
3.2 ปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนสังกะสีด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี

3.2.1 ปริมาณที่เหมาะสมของสารตกตะกอน

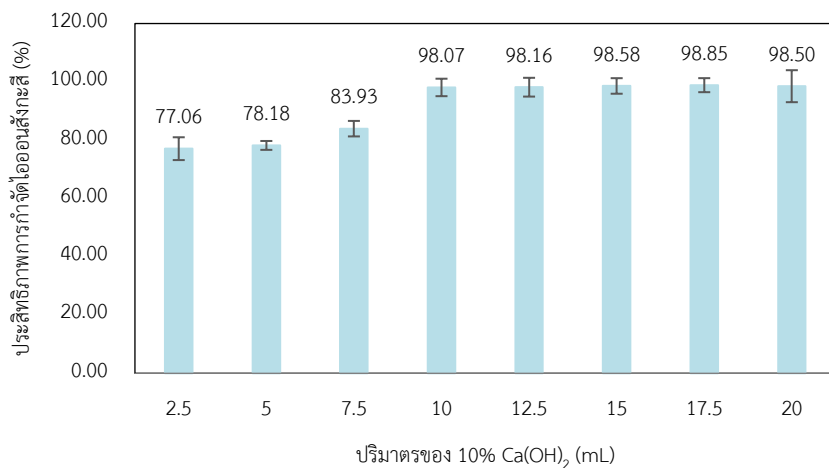
ศึกษาปริมาณที่เหมาะสมของสารตกตะกอนแต่ละชนิด ต่อปริมาณน้ำเสีย 300 มิลลิลิตร ได้ผลวิเคราะห์แสดงในภาพที่ 1 – 3



ภาพที่ 1 ประสิทธิภาพการกำจัดไอออนสังกะสีด้วยโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่ปริมาณแตกต่างกัน



ภาพที่ 2 ประสิทธิภาพการกำจัดไอออนสังกะสีด้วยโซเดียมซัลไฟด์ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่ปริมาณแตกต่างกัน



ภาพที่ 3 ประสิทธิภาพการกำจัดไอออนสังกะสีด้วยแคลเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่ปริมาณแตกต่างกัน

ผลการทดลองพบว่าชนิดและปริมาณของสารตกตะกอนมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดไอออนสังกะสีในน้ำเสีย

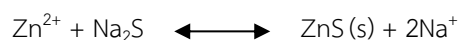
การใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรเป็นสารตกตะกอนพบว่า ปริมาณการใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์ 12 มิลลิลิตรต่อน้ำเสีย 300 มิลลิลิตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนสังกะสีสูงที่สุด คือร้อยละ 99.09 ± 0.03 โดยมีปริมาณไอออนสังกะสีหลังบำบัด 8.28 ± 0.26 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชของน้ำหลังบำบัดมีค่า 10.83 ± 0.02 ทั้งนี้ไอออนสังกะสีที่ถูกกำจัดจะอยู่ในรูปตะกอน $Zn(OH)_2$ โดยมีปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นตามสมการ [19]



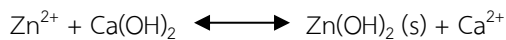
การตกตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์มีข้อจำกัด คือโลหะไฮดรอกไซด์มีสมบัติแอมโฟเทอริก คือไม่สามารถตกตะกอนที่พีเอชใดพีเอชหนึ่ง โดย

ค่าพีเอชที่เหมาะสม สำหรับสังกะสีคือ 9.0 – 9.5 การเติมปริมาณโซเดียมไฮดรอกไซด์ที่มากเกินไปทำให้โลหะไฮดรอกไซด์สามารถละลาย ถ้าพีเอชเปลี่ยนจากค่าที่ตกตะกอนผลึก [7]

การใช้โซเดียมซัลไฟด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร เป็นสารตกตะกอน พบว่าปริมาณโซเดียมซัลไฟด์ 9 มิลลิลิตรต่อน้ำเสีย 300 มิลลิลิตร มีประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนสังกะสีสูงที่สุด คือร้อยละ 99.99 ± 0.95 โดยมีปริมาณไอออนสังกะสีหลังบำบัด 0.06 ± 0.34 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชของน้ำหลังบำบัดมีค่า 4.80 ± 0.02 สังกะสีที่ถูกกำจัดจะอยู่ในรูปตะกอน $ZnS(s)$ โดยมีปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นตามสมการ [19] และเมื่อเพิ่มปริมาณโซเดียมซัลไฟด์ถึงระดับหนึ่ง ประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนสังกะสีจะมีแนวโน้มลดลง



การใช้แคลเซียมไฮดรอกไซด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตรเป็นสารตกตะกอน เป็นสารตกตะกอน พบว่าปริมาณแคลเซียมไฮดรอกไซด์ 17.5 มิลลิกรัมต่อน้ำเสีย 300 มิลลิกรัม มีประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนสังกะสีสูงที่สุด คือร้อยละ 98.85 ± 2.41 โดยมีปริมาณไอออนสังกะสีหลังบำบัด 10.42 ± 2.41 มิลลิกรัมต่อลิตร ค่าพีเอชของน้ำหลังบำบัดมีค่า 12.39 ± 0.16 ไอออนสังกะสีที่ถูกกำจัดจะอยู่ในรูปตะกอน $Zn(OH)_2$ โดยมีปฏิกิริยาที่เกิดขึ้นตามสมการ [19]

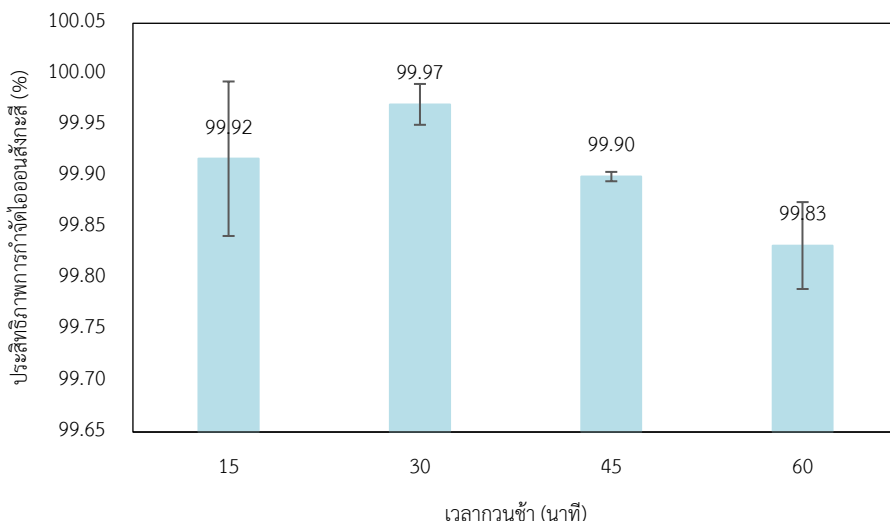


สรุปได้ว่าการใช้โซเดียมซัลไฟด์ มีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการกำจัดไอออนสังกะสีในน้ำเสีย รองลงมาเป็นโซเดียมไฮดรอกไซด์ และแคลเซียมไฮดรอกไซด์ตามลำดับ และเมื่อพิจารณาผลการทดลอง

ในภาพที่ 2 การใช้โซเดียมซัลไฟด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ที่ปริมาตร 8 และ 9 มิลลิกรัมต่อน้ำเสีย 300 มิลลิกรัม มีประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนสังกะสีใกล้เคียงกัน ดังนั้นเพื่อเป็นการลดปริมาณการใช้สารตกตะกอนในการทดลองนี้จึงเลือกใช้โซเดียมซัลไฟด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ปริมาณ 8 มิลลิกรัมต่อน้ำเสีย 300 มิลลิกรัม หรือคิดเป็น 26.67 มิลลิกรัมต่อน้ำเสีย 1 ลิตร

3.2.2 ผลของเวลาการกวนซ้ำต่อประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสี

ทดลองโดยใช้โซเดียมซัลไฟด์เข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ปริมาณ 26.67 มิลลิกรัมต่อน้ำเสีย 1 ลิตร อัตราการกวนเร็ว 100 รอบต่อนาที เวลา 1 นาที อัตราการกวนช้า 30 รอบต่อนาที ที่ระยะเวลาการกวนซ้ำต่างกัน ปล่อยให้ตกตะกอน 60 นาที เก็บตัวอย่างส่วนใสมาวิเคราะห์หาปริมาณไอออนสังกะสีทดลองซ้ำ 4 ครั้ง ได้ผลวิเคราะห์แสดงในภาพที่ 4



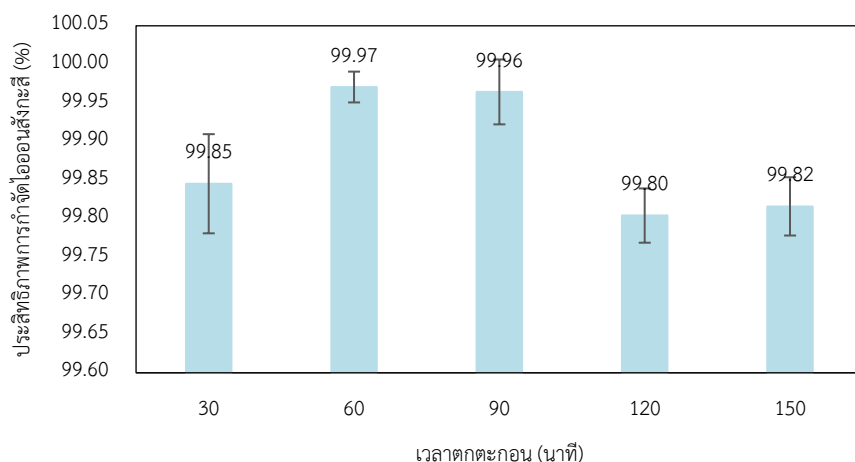
ภาพที่ 4 ปริมาณไอออนสังกะสีในน้ำเสียเส้นด้ายยางหลังบำบัดด้วยด้วยโซเดียมซัลไฟด์เข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ปริมาณ 26.67 มิลลิกรัม ต่อน้ำเสีย 1 ลิตร ที่ระยะเวลาการกวนซ้ำต่างกัน

การกวนข้าวมีวัตถุประสงค์ เพื่อให้ตะกอนที่เกิดขึ้นมีโอกาสสัมผัสกันมากขึ้น และเกิดการรวมตัวกันเป็นอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ขึ้น เพื่อให้ตะกอนมีน้ำหนักมากพอที่จะตกตะกอนออกจากน้ำ [3,20] ผลการทดลองพบว่า เวลาการกวนข้าวมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดไอออนสังกะสีในน้ำเสีย การกวนข้าวด้วยอัตราความเร็ว 30 รอบต่อนาที เวลา 30 นาที มีประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีสูงที่สุด และเมื่อเพิ่มระยะเวลาการกวนข้าวมากขึ้นส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสีมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเวลาการกวนที่มากเกินไปจะส่งผลให้ตะกอน

ที่จับตัวกันแล้วเกิดการแตกตัวออก [19] ทำให้ประสิทธิภาพการกำจัดไอออนสังกะสีมีค่าน้อยลง

3.2.3 ผลของเวลาตกตะกอนต่อประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสี

ทดลองโดยใช้โซเดียมซัลไฟด์เข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ปริมาณ 26.67 มิลลิลิตร ต่อน้ำเสีย 1 ลิตรกวน อัตราความเร็ว 100 รอบต่อนาที เวลา 1 นาที อัตราการกวนข้าว 30 รอบต่อนาที เวลา 30 นาที ปล่อยให้ตกตะกอนที่ระยะเวลาต่างกัน เก็บตัวอย่างส่วนใสมาวิเคราะห์หาปริมาณสังกะสี ทดลองซ้ำ 4 ครั้ง ได้ผลวิเคราะห์แสดงในภาพที่ 5



ภาพที่ 5 ปริมาณไอออนสังกะสีในน้ำเสียเส้นด้ายยางหลังบำบัดด้วยด้วยโซเดียมซัลไฟด์เข้มข้นร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ปริมาณ 26.67 มิลลิลิตร ต่อน้ำเสีย 1 ลิตร ที่ เวลาตกตะกอนต่างกัน

การตกตะกอนเป็นการแยกตะกอนที่มีขนาดใหญ่ และมีน้ำหนักมากพอที่จะตกตะกอนได้เองตามแรงโน้มถ่วง ทำให้ได้น้ำใส ผลการทดลองพบว่า เวลาตกตะกอนมีผลต่อประสิทธิภาพการกำจัดสังกะสีในน้ำเสีย ที่เวลาตกตะกอน 60 นาที มีประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีสูงที่สุด คือร้อยละ 99.97 ± 0.02 และเมื่อเพิ่มระยะเวลาตกตะกอนนานมากขึ้นส่งผลให้

การกำจัดสังกะสีมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้เนื่องจากตะกอนผลึกไฮดรอกไซด์สามารถละลายกลับมาได้อีก [7]

3.3 คุณภาพน้ำเสียจากกระบวนการผลิตเส้นด้ายยางยืดหลังการบำบัดด้วยสารเคมี

การเปรียบเทียบคุณภาพน้ำก่อนและหลังบำบัดด้วยโซเดียมซัลไฟด์ ได้ผลแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยคุณภาพน้ำเสียเส้นด้ายยางยืดก่อนและหลังบำบัดด้วยโซเดียมซัลไฟด์

พารามิเตอร์	ก่อนบำบัด	หลังบำบัด	ค่ามาตรฐาน [21]
ปริมาณสังกะสี (ส่วนในล้านส่วน)	909.06 ± 38.56	0.13 ± 0.05	ไม่เกิน 5.0
พีเอช	4.58 ± 0.02	4.77 ± 0.01	5.5-9.0
ความนำไฟฟ้า (ไมโครซีเมนส์ต่อเซนติเมตร)	7.96 ± 0.02	10.55 ± 0.06	-
ซีโอดี (มิลลิกรัมต่อลิตร)	11,445.57 ± 1436.21	1,643.84 ± 91.32	ไม่เกิน 120.0
ของแข็งแขวนลอย (มิลลิกรัมต่อลิตร)	51.64 ± 2.38	4.50 ± 1.00	ไม่เกิน 50.0

ผลการทดลองพบว่าน้ำหลังบำบัดมีปริมาณไอออนสังกะสีลดลงอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานน้ำทิ้งอุตสาหกรรม แต่ยังมีค่าซีโอดี และค่าพีเอชของน้ำเสียที่ยังไม่เป็นไปตามมาตรฐานน้ำทิ้ง อย่างไรก็ตามโรงงานยังต้องนำน้ำเสียไปบำบัดด้วยกระบวนการทางชีวภาพต่อไป ซึ่งการกำจัดไอออนสังกะสีออกก่อนจะช่วยให้ระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพมีประสิทธิภาพมากขึ้น

3.4 ค่าใช้จ่ายในการกำจัดไอออนสังกะสี ด้วยกระบวนการตกตะกอนทางเคมี

ค่าใช้จ่ายในการบำบัดด้วยสารเคมีจะพิจารณาจากสารเคมีที่ใช้ในการบำบัดได้แก่สารตกตะกอน และสารที่ใช้ในการปรับค่าความเป็นกรดหลังการบำบัดเพื่อให้มีค่าเท่ากับ 7 ดังนั้นสมการที่ใช้ในการคำนวณต้นทุนการบำบัดน้ำ 1 หน่วย (บาทต่อลูกบาศก์เมตร) เป็นดังนี้

$$\begin{aligned} & \text{ต้นทุนการบำบัดน้ำ 1 หน่วย} \\ &= \text{ค่าใช้จ่ายสารตกตะกอน 1 หน่วย} + \\ & \text{ค่าใช้จ่ายในการปรับค่า pH 1 หน่วย} \end{aligned}$$

ค่าใช้จ่ายของสารตกตะกอน ได้แก่ ค่าโซเดียมซัลไฟด์ โดยใช้โซเดียมซัลไฟด์ร้อยละ 10 โดยน้ำหนักต่อปริมาตร ปริมาณ 26.67 มิลลิกรัมต่อ น้ำเสีย 1 ลิตร

ค่าใช้จ่ายสารรวมตะกอน

$$= (\text{ปริมาณโซเดียมซัลไฟด์} \times \text{ราคา}) / 1,000,000$$

ปริมาณโซเดียมซัลไฟด์ = 4,960 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อความหนาแน่นของโซเดียมซัลไฟด์ = 1.86 กรัมต่อมิลลิกรัม และราคาโซเดียมซัลไฟด์ (เกรดอุตสาหกรรม) ประมาณ 18,412 บาทต่อตัน

ค่าใช้จ่ายสารตกตะกอน

$$= (4,960 \times 18,412) / 1,000,000$$

$$= 91.32 \text{ บาทต่อลูกบาศก์เมตร}$$

ในส่วนที่สองหลังการรวมตะกอนด้วยโซเดียมซัลไฟด์ มีค่าใช้จ่ายในการปรับพีเอชของน้ำเสียให้มีค่าเป็นกลาง น้ำหลังการตกตะกอนด้วยโซเดียมซัลไฟด์ มีค่าพีเอชเท่ากับ 4.77 ดังนั้นสารที่ใช้ในการปรับพีเอชได้แก่ โซเดียมไฮดรอกไซด์ โดยใช้สารที่ความเข้มข้นร้อยละ 50 โดยมวลต่อปริมาตร ในการปรับค่าพีเอช จากสมการ

$$[\text{OH}]_{\text{เริ่มต้น}} + [\text{OH}]_{\text{ที่เติม}} = [\text{OH}]_{\text{ที่ต้องการ}}$$



$$\text{เมื่อ } p\text{OH} = 14 - p\text{H} \text{ และ } p\text{OH} = -\log[\text{OH}]$$

$$p\text{H} \text{ เริ่มต้น} = 4.77$$

$$p\text{OH} \text{ เริ่มต้น} = 14 - 4.77$$

$$-\log[\text{OH}] \text{ เริ่มต้น} = 9.23$$

$$\begin{aligned}
 [\text{OH}] \text{ เริ่มต้น} &= 10^{(-9.23)} = 5.89 \times 10^{-10} \text{ โมลต่อลิตร} &= 3.98 \times 10^{-6} \text{ g/L} \times 50\text{g}/100\text{g} \times 14.6 \text{ Bth./kg.} \times 1 \\
 \text{pH ที่ต้องการ} &= 7.00 &\text{kg}/10^3 \text{ g} \times 10^3 \text{ L}/\text{m}^3 \\
 \text{pOH ที่ต้องการ} &= 14.00 - 7.00 &= 2.91 \times 10^{-5} \text{ Bth./m}^3 \text{ (บาทต่อลูกบาศก์เมตร)} \\
 [\text{OH}] \text{ ที่ต้องการ} &= 10^{(-7.00)} = 1.00 \times 10^{-7} \text{ โมลต่อลิตร} \\
 \text{ดังนั้น } [\text{OH}] \text{ ที่เติม} &= [1.00 \times 10^{-7} - 5.89 \times 10^{-10}] &\text{ต้นทุนการบำบัดน้ำเสีย} = 91.32 + 2.91 \times 10^{-5} \\
 &= 9.94 \times 10^{-8} \text{ โมลต่อลิตร} &= 91.32 \text{ บาทต่อลูกบาศก์เมตร} \\
 \text{มวลโมเลกุลของ NaOH} &= 40 \text{ กรัมต่อโมล} \\
 \text{ปริมาณ NaOH ที่เติม} &= 40 [9.94 \times 10^{-8}] \\
 &= 3.98 \times 10^{-6} \text{ กรัมต่อลิตร}
 \end{aligned}$$

ใช้ NaOH เข้มข้นร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก
ราคา 14.6 บาทต่อกิโลกรัม ในการปรับค่าพีเอชของน้ำ
เสียค่าใช้จ่ายในการปรับพีเอช

เนื่องจากค่าใช้จ่ายของโซเดียมไฮดรอกไซด์
เพื่อปรับ พีเอชมีค่าน้อยมากจึงทำให้ผลรวมต้นทุน
การบำบัดน้ำด้วยสารรวมตะกอนทางเคมี มากกว่า
ต้นทุนของโซเดียมคลอไรด์ เมื่อเปรียบเทียบ
ประสิทธิภาพในการกำจัดไอออนสังกะสีกับราคา
สารเคมีได้ผลแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบประสิทธิภาพและค่าใช้จ่ายในการกำจัดไอออนสังกะสีของสารตกตะกอนแต่ละชนิด

สารตกตะกอน	ปริมาณการใช้ (มิลลิกรัมต่อ ลิตร)	ราคาสาร ตกตะกอน (บาทต่อตัน)	ราคาในการกำจัด ไอออนสังกะสี (บาทต่อน้ำเสีย 1 ลูกบาศก์เมตร)	ประสิทธิภาพใน การกำจัดไอออน สังกะสี (ร้อยละ)
โซเดียมคลอไรด์	4960	18412	91.32	99.99 ± 0.95
โซเดียมไฮดรอกไซด์	8520	14562	124.07	99.09 ± 0.03
แคลเซียมไฮดรอกไซด์	12890	7119	91.76	98.85 ± 2.41

4. สรุปและข้อเสนอแนะ

โรงงานผลิตเส้นด้ายยางยืด ใช้น้ำยาง
เป็นวัตถุดิบในการผลิต และใช้สารเคมีในกระบวนการ
ผลิตทำให้น้ำเสียที่เกิดจากกระบวนการผลิตเส้นด้าย
ยาง มีปริมาณสารอินทรีย์ และปริมาณสังกะสีในน้ำทิ้ง
สูง น้ำที่มีการปนเปื้อนด้วยสังกะสี เมื่อผ่านระบบบำบัด
น้ำเสียทางชีวภาพ จะทำให้จุลินทรีย์ในระบบบำบัดตาย
และไม่สามารถทำงานได้ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่
จะต้องกำจัดสังกะสีออกจากน้ำทิ้งก่อนที่จะนำน้ำไป

บำบัดต่อด้วยระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ ซึ่งใน
งานวิจัยนี้จะกำจัดสังกะสีด้วยการตกตะกอนด้วย
สารเคมี โดยปัจจัยที่มีผลต่อประสิทธิภาพการบำบัดน้ำ
เสียด้วยกระบวนการรวมตะกอนทางเคมีคือ ชนิดและ
ปริมาณของสารรวมตะกอน เวลาทวนซ้ำ และ เวลา
ตกตะกอน โดยกระบวนการตกตะกอนทางเคมีมีข้อดี
คือ มีประสิทธิภาพในการกำจัดสังกะสีที่ละลายปนเปื้อนอยู่
ในน้ำเสียสูงมาก ประมาณร้อยละ 98.00 – 99.99 ทั้งนี้
ขึ้นกับสารรวมตะกอนที่ใช้ และมีข้อเสียคือ มีค่าใช้จ่าย
ด้านสารเคมี ต้องควบคุมสภาวะในการรวมอย่าง

เหมาะสม ทั้งปริมาณสารเคมีที่เติม สภาวะในการกวนที่เหมาะสม เกิดตะกอนหลังบำบัดปริมาณมาก และตะกอนที่เกิดขึ้นอยู่ในรูปสารประกอบ รวมทั้งมีสารผสมอื่นๆ เจือปน มีกลิ่นระหว่างการบำบัดและหลังการบำบัด

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานประสานงานโครงการวิจัยการพัฒนาเศรษฐกิจจากฐานความหลากหลายทางชีวภาพ ประจำปีงบประมาณ 2560

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] Ahmed Basha C, Bhadrinarayana NS, Anantharaman N, Meera Sheriffa Begum KM. Heavy metal removal from copper smelting effluent using electrochemical cylindrical flow reactor. J Hazard Mater. 2008 Mar 21; 152(1):71–8.
- [2] Akbal F, Camcı S. Copper, chromium and nickel removal from metal plating wastewater by electrocoagulation. Desalination. 2011 Mar 15; 269(1–3):214–22.
- [3] Pohl A. Removal of heavy metal ions from water and wastewaters by sulfur-containing precipitation agents. Water Air Soil Pollut. 2020 Sep 28; 231(10):503.
- [4] Rodriguez-Freire L, Gonzalez-Estrella J, Li G. Technologies for fractionation of wastewater and resource recovery. In 2020. p. 329–54.
- [5] Vishali S, Kavitha E. Chapter 6 - Application of membrane-based hybrid process on paint industry wastewater treatment. In: Shah MP, Rodriguez-Couto S, editors. Membrane-Based Hybrid Processes for Wastewater Treatment [Internet]. Elsevier; 2021 [cited 2021 Dec 15]. p. 97–117. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780128238042000161>
- [6] Ain Zainuddin N, Azwan Raja Mamat T, Imam Maarof H, Wahidah Puasa S, Rohana Mohd Yatim S. Removal of nickel, zinc and copper from plating process industrial raw effluent via hydroxide precipitation versus sulphide precipitation. IOP Conf Ser Mater Sci Eng. 2019 Aug 1; 551(1):012122.
- [7] Ayres DM, Davis AP, Gietka PM. Removing heavy metals from wastewater University of Maryland; 1994 Aug Available from: <http://www.appliedmechtech.com/wp-content>
- [8] Veeken AHM, Akoto L, Hulshoff Pol LW, Weijma J. Control of the sulfide (S^{2-}) concentration for optimal zinc removal by sulfide precipitation in a continuously stirred tank reactor. Water Res. 2003 Sep; 37(15):3709–17.
- [9] U.S. EPA. Control and treatment technology for the metal finishing industry-sulfide precipitation. [Internet]. Cincinnati, Ohio: United States Environmental Protection Agency; 1980.

- Report No.: EPA 625/8-80-003. Available from: <https://nepis.epa.gov/Exe/ZyNET.exe/30004EDD.TXT>
- [10] Yrjas KP, Zevenhoven CAP, Hupa MM. Hydrogen sulfide capture by limestone and dolomite at elevated pressure. 1. sorbent performance. *Ind Eng Chem Res.* 1996 Jan 1; 35(1):176–83.
- [11] Junuzovic H, Begic S, Selimović A, Djozic A, Cvrk R, Ahmetović M. Efficiency of carbonate precipitation and removal of copper and nickel ions from their mono-component and two-component aqueous solutions. *Int J Res Appl Sci Biotechnol.* 2019 Dec 13;06:11–5.
- [12] Patterson JW, Allen HE, Scala JJ. Carbonate precipitation for heavy metals pollutants. *J Water Pollut Control Fed U S* Available from: <https://www.osti.gov/biblio/5170276>
- [13] มั่นสิน ตัณฑุลเวศม์. วิศวกรรมการประปา เล่ม 1. 3rd ed. กรุงเทพฯ.: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2542.
- [14] American public health association, eaton AD, American water works association, water environment federation. Standard methods for the examination of water and wastewater. Washington, D.C.: APHA-AWWA-WEF; 2005.
- [15] Platte JA, Marcy VM. Photometric Determination of Zinc with zincon. application to water containing heavy metals. *Anal Chem.* 1959 Jul 1;31(7):1226–8.
- [16] Säbel CE, Neureuther JM, Siemann S. A spectrophotometric method for the determination of zinc, copper, and cobalt ions in metalloproteins using Zincon. *Anal Biochem.* 2010 Feb 15; 397(2):218–26.
- [17] Faiz U, Butt T, Satti L, Hussain W, Hanif F. Efficacy of zinc as an antibacterial agent against enteric bacterial pathogens. *J Ayub Med Coll Abbottabad JAMC.* 2011 Jun; 23(2):18–21.
- [18] Sirelkhatim A, Mahmud S, Seeni A, Kaus NHM, Ann LC, Bakhori SKM, et al. Review on zinc oxide nanoparticles: antibacterial activity and toxicity mechanism. *Nano-Micro Lett.* 2015 Jul 1; 7(3):219–42.
- [19] Freeman HM. Standard handbook of hazardous waste treatment and disposal. 2 edition. New York: McGraw-Hill Education; 1997.
- [20] Cañizares P, Martínez F, Jiménez C, Sáez C, Rodrigo MA. Coagulation and electro coagulation of oil-in-water emulsions. *J Hazard Mater.* 2008 Feb 28; 151(1): 44–51.
- [21] กระทรวงอุตสาหกรรม. ประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม เรื่อง กำหนดมาตรฐานควบคุมการระบายน้ำทิ้งจากโรงงาน พ.ศ. 2560. ราชกิจจานุเบกษา เล่ม 134 ตอนพิเศษ 153 ง 2560, 15 หน้า.

อิทธิพลเถ้าขานอ้อยต่อความแข็งแรงอัดในการขึ้นรูปคอนกรีต

Influence of Cane Bagasse Ash to Compression Strength on Concrete Forming

ณัฐพงษ์ ศรีสุภา

Nutthaphong Srisupha

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep, Thailand

Author.Tel: 08 1626-9346, E-mail: nutthaphong.s@mail.rmutk.ac.th

บทคัดย่อ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาเกี่ยวกับอิทธิพลเถ้าขานอ้อยต่อความแข็งแรงอัดในการขึ้นรูปคอนกรีต โดยเป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเถ้าขานอ้อยสำหรับอุตสาหกรรมงานก่อสร้าง ในการดำเนินงานวิจัยเป็นการประยุกต์ใช้หลักการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง (DOE) ภายใต้การวิเคราะห์เชิงสถิติวิศวกรรม ด้วยการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ การออกแบบเชิงสถิติวิศวกรรมนี้ กำหนดพารามิเตอร์สำคัญ 2 พารามิเตอร์ ได้แก่ เปอร์เซ็นต์เถ้าขานอ้อย (%CBA) คือ 5, 15, 25 และ 35% กับระยะเวลาในการบ่มคอนกรีต (CC-time) คือ 7, 14 และ 28 วัน ที่มีต่อค่าความแข็งแรงอัด ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) บ่งชี้ว่า มีผลต่อค่าความแข็งแรงอัด (CS-value) ทั้งอิทธิพลหลักของพารามิเตอร์กับอิทธิพลร่วมกันระหว่างพารามิเตอร์ บทสรุปสุดท้ายเกี่ยวกับสถานะที่เหมาะสมของงานวิจัยนี้ แสดงให้เห็นว่าระดับของพารามิเตอร์ %CBA เท่ากับ 5% และระดับพารามิเตอร์ CC-time เท่ากับ 28 วัน จะมีอิทธิพลต่อการให้ได้มาซึ่ง CS-value สูงสุด เท่ากับ 275.3887 ซึ่งสามารถเทียบเป็นค่าความพึงพอใจได้สูงมากถึง 99.60%

คำสำคัญ : เถ้าขานอ้อย ความแข็งแรงอัด การออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง (DOE)

ABSTRACT

This research aims to study the influence of cane bagasse ash to compression strength on concrete forming which was value added to the cane bagasse ash for civil industrial. In research implementation, the design and analysis of experiment (DOE) was applied within the engineering statistical analysis by the full-factorial experiment technique. This design of engineering statistics defined two important parameters namely; the percentage of cane bagasse ash (%CBA) of 5, 15, 25 and 35% with the curing concrete time (CC-time) of 7, 14 and 28 days. Response of research was the compression strength value (CS-value). Analysis of variance (ANOVA) results indicated the influence of both the main effect and interaction. In optimized

Received 21-01-2021

Revised 17-03-2022

Accepted 18-03-2022

parameter condition, the %CBA of 5% with CC-time of 28 days was obtained the maximum CS-value of 275.3887 which was compared to the desirability value of 99.60%.

Keyword: Cane Bagasse Ash, Compression Strength, Design and Analysis of Experiment (DOE)

1. บทนำ

อ้อยเป็นพืชเศรษฐกิจของประเทศไทยที่ปลูกกันมาก โดยถือเป็นวัตถุดิบที่มีความสำคัญอย่างมากในการผลิตน้ำตาลทราย ซึ่งผลิตภัณฑ์ส่วนหนึ่งจากการผ่านกระบวนการผลิตน้ำตาลทรายนั้น คือ เถ้าขานอ้อย (Cane bagasse ash) โดยเถ้าขานอ้อยนั้นถือเป็นวัสดุที่เหลือจากการเผาขานอ้อย ในปัจจุบันสิ่งนี้กลับถูกมองข้ามถึงความสำคัญจนกลายเป็นเพียงเศษวัสดุที่ไม่มีคุณค่า แต่ถ้าหากกล่าวถึงการนำเอาเถ้าขานอ้อยดังกล่าวนี้ มาประยุกต์ใช้ประโยชน์ในด้านอื่น ๆ จึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจต่อการศึกษาวิจัยเช่นเดียวกันกับการศึกษางานวิจัยนี้ ที่มีการนำเอาเถ้าขานอ้อยมาใช้เป็นส่วนผสมในการขึ้นรูปคอนกรีต เพื่อเป็นแนวทางเลือกสำหรับการสร้างวัสดุใหม่ขึ้นมาทดแทนวัสดุเดิมที่ใช้กันอยู่ในปัจจุบันที่อาจจะหมดสิ้นไปในอนาคตอันใกล้

ขานอ้อยเป็นเศษวัสดุที่ได้มาจากการผลิตน้ำตาล โรงงานอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาลจึงใช้ขานอ้อยเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อนเพื่อผลิตกระแสไฟฟ้า ขานอ้อยถือว่าเป็นเชื้อเพลิงที่ดีจากการที่มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมน้อยมาก เนื่องจากมีปริมาณธาตุกำมะถันต่ำจึงไม่ก่อให้เกิดฝนกรด ในปัจจุบันนี้ ประเทศไทยมีการผลิตอ้อยทั้งหมดโดยเฉลี่ยในปริมาณที่สูงมากถึง 165.5 ล้านตัน โดยเมื่ออ้อยเหล่านี้ ผ่านกระบวนการผลิตเป็นน้ำตาลแล้วจะมีขานอ้อยเหลือประมาณ 26% ของน้ำหนักอ้อยทั้งหมด หรือมีปริมาณขานอ้อยเหลือประมาณ 43.03 ล้านตัน ภายหลังจากการเผาขานอ้อยเพื่อผลิต

กระแสไฟฟ้าสำหรับใช้งานภายในโรงงานแล้ว จะมีปริมาณเถ้าขานอ้อยเหลืออยู่ 0.62% ของน้ำหนักขานอ้อยทั้งหมด หรือประมาณ 2.7 ล้านตัน ซึ่งเถ้าขานอ้อยส่วนใหญ่เหล่านี้ จะถูกนำไปทิ้ง และมีบางส่วนที่เกษตรกรนำไปทำปุ๋ยหรือปรับสภาพดินที่เป็นกรด

Gnesan [1] ทำการศึกษาเพื่อจะนำเอาเถ้าขานอ้อยมาใช้ให้เกิดประโยชน์ในด้านอื่นๆ เนื่องจากเถ้าขานอ้อยมีส่วนประกอบที่สำคัญของซิลิกา (Silica) มากกว่า 60% และเถ้าขานอ้อยที่ผ่านการบดละเอียดแล้วนั้น ยังมีสมบัติเป็นวัสดุปอซโซลาน (Pozzolan) ได้ ทำให้สามารถใช้เป็นวัสดุผสมกับปูนซีเมนต์บางส่วนในการขึ้นรูปคอนกรีตได้ โดยที่สมบัติของคอนกรีตยังคงสามารถในการรับน้ำหนักได้ดี Paula [2] ได้ทำการศึกษาปริมาณส่วนผสมที่มีความเหมาะสมของแกลบในการขึ้นรูปคอนกรีตให้มีความแข็งแรงสูง ผลการศึกษา พบว่าการผสมแกลบในปริมาณ 30% สำหรับการขึ้นรูปคอนกรีตนั้น สามารถช่วยเพิ่มความแข็งแรงให้กับคอนกรีตได้ แต่ถ้าหากเป็นการผสมของเถ้าขานอ้อยเข้ากับปูนซีเมนต์สำหรับการขึ้นรูปคอนกรีตในประเทศบราซิล พบว่าจะต้องผสมในปริมาณ 20% Kawade [3] พบว่าจะต้องผสมในปริมาณ 15% สำหรับการขึ้นรูปคอนกรีตในประเทศอินเดีย และ Hailu [4] พบว่าจะต้องผสมในปริมาณมากกว่า 10% สำหรับการขึ้นรูปคอนกรีตในประเทศเอธิโอเปีย นอกจากนี้ Gar [5] ยังพบว่าการผสมในปริมาณ 10% นั้น จะสามารถช่วยเพิ่มความสามารถในการต้านทาน

อุณหภูมิที่สูงได้ Rukzon [6] ศึกษาปริมาณส่วนผสมของเถ้าขานอ้อยช่วง 10-30% ในการขึ้นรูปคอนกรีต ผลการศึกษาพบว่าช่วงปริมาณส่วนผสม 10% จะสามารถเพิ่มสมบัติความสามารถในการต้านทานการแทรกซึมของสารคลอไรด์ (Chloride penetration) ได้ดี และทำให้ได้มาซึ่งคอนกรีตที่มีรูพรุนต่ำ (Low porosity) ส่วนช่วงปริมาณส่วนผสม 30% จะทำให้คอนกรีตมีความแข็งแรงสูง และ Muangtong [7] พบว่าถ้าหากการผสมในปริมาณ 20% จะส่งผลค่าอัตราส่วน W/C สำหรับการใช้งานสูงถึง 0.735

จากการศึกษาในงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมา นั้นอุตสาหกรรมงานก่อสร้างในประเทศไทยยังมีสมบัตินด้านความแข็งแรงอัด (Compression strength) ที่น่าสนใจต่อการศึกษาพัฒนาเพิ่มเติม เพื่อช่วยเพิ่มสมบัติเชิงกลให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น อีกทั้งยังเป็นการช่วยลดการใช้วัสดุปูนซีเมนต์ลงได้ รวมไปถึงการเพิ่มมูลค่าให้กับวัสดุเหลือใช้อย่างเถ้าขานอ้อย (ดังแสดงในภาพที่ 1) ได้อีกด้วย จากเหตุผลความสำคัญดังกล่าวข้างต้น การศึกษาการขึ้นรูปคอนกรีตที่มีส่วนผสมเถ้าขานอ้อยโดยมุ่งเน้นสมบัตินด้านความแข็งแรงอัดจึงมีความน่าสนใจอย่างยิ่ง โดยวัตถุประสงค์ของงานวิจัยเป็นการประยุกต์ใช้หลักการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง (Design and analysis of experiment; DOE) เข้ามาหาสภาวะที่เหมาะสม (Optimization) ของเปอร์เซ็นต์เถ้าขานอ้อย (Percentage of cane bagasse ash; %CBA) และระยะเวลาในการบ่มคอนกรีต (CC-time) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์สำคัญจากการศึกษาในงานวิจัยในอดีตที่ผ่านมา



ภาพที่ 1 เถ้าขานอ้อย (Cane Bagasse Ash)

2. วิธีดำเนินการวิจัย

ในการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีตเกี่ยวกับการกำลังในการต้านทานแรงอัดซึ่งเป็นสมบัติที่สำคัญของคอนกรีตในงานโครงสร้างคอนกรีตนั้น จะทำการออกแบบการหล่อแท่งคอนกรีตให้รับแรงอัดโดยตรง ชิ้นงานทดสอบ (Specimen) คือ แท่งคอนกรีตมาตรฐานรูปทรงลูกบาศก์ (Cube) ขนาด $15 \times 15 \times 15$ cm ตามมาตรฐานของประเทศอังกฤษ จำนวน 36 ชิ้นงานทดสอบ ตามหลักการออกแบบและวิเคราะห์การทดลอง (Design and analysis of experiment; DOE) เชิงสถิติวิศวกรรม (Engineering statistical) ด้วยเทคนิคการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ (Full-factorial experiment) โดยมีพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา 2 พารามิเตอร์ ได้แก่ พารามิเตอร์เกี่ยวกับเปอร์เซ็นต์เถ้าขานอ้อย (%CBA) คือ 5, 15, 25 และ 35% กับพารามิเตอร์เกี่ยวกับระยะเวลาในการบ่มคอนกรีต (CC-time) คือ 7, 14 และ 28 วัน และมีผลตอบสนอง (Response) ที่ทำการศึกษาเป็นค่าความแข็งแรงอัด (Compression strength value; CS-value)

ในขณะทำการเทคอนกรีตจะแบ่งการเทออกเป็น 3 ชั้น โดยในแต่ละชั้นทำการกระทุ้งด้วย

เหล็กกระทัน 25 ครั้ง/ชั้น และเมื่อกระทันจนถึงชั้นสุดท้ายเรียบร้อยแล้ว จะทำการปาดผิวหน้าคอนกรีตให้เรียบเสมอกับแบบหล่อ จากนั้นปล่อยทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง แล้วจึงถอดแบบหล่อออกเพื่อนำไปบ่ม โดยในการบ่มคอนกรีตนั้น จะนำแท่งคอนกรีตดังกล่าวไปแช่น้ำทิ้งไว้เป็นระยะเวลา 7, 14 และ 28 วัน ก่อนนำไปทดสอบความแข็งแรงอัด โดยแท่งคอนกรีตชิ้นงานทดสอบที่ผ่านกระบวนการผลิตเหล่านี้สามารถแสดงได้ดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 แท่งคอนกรีตชิ้นงานทดสอบ (Specimen)

ในการทดสอบความแข็งแรงอัดของแท่งคอนกรีตชิ้นงานทดสอบ (Specimen) (ดังแสดงในภาพที่ 3) นั้น จะดำเนินการตามหลักการเชิงสถิติวิศวกรรมด้วยเทคนิคการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ โดยมี 2 พารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา ได้แก่ เปอร์เซนต์เถ้าขานอ้อย (%CBA) และระยะเวลาในการบ่มคอนกรีต (CC-time) ในส่วนของผลตอบสนองที่ทำการศึกษา คือ ค่าความแข็งแรงอัด (CS-value) นั้น จะได้มาจากข้อมูลผลการทดสอบมาคำนวณร่วมกับสมการทางคณิตศาสตร์



ภาพที่ 3 การทดสอบความแข็งแรงอัด

ในการคำนวณค่าความแข็งแรงอัด (σ_c) นั้น และค่าความหนาแน่นของคอนกรีต (ρ) สามารถคำนวณได้ดังสมการที่ 1 และ 2 ตามลำดับ

$$\sigma_c = P/A \quad (1)$$

กำหนดให้

σ_c คือ ค่าความแข็งแรงอัด
หน่วย kk/cm^2

P คือ ค่าน้ำหนักกดจาก
เครื่องทดสอบ หน่วย kk

A คือ พื้นที่หน้าตัดที่รับ
น้ำหนักกด หน่วย cm^2

$$\rho = W/V \quad (2)$$

กำหนดให้

ρ คือ ความหนาแน่นของ
คอนกรีต หน่วย g/cm^3

W คือ น้ำหนักชิ้นงาน
ทดสอบ หน่วย g

V คือ ปริมาตรของชิ้นงาน
ทดสอบ หน่วย cm^3

ผลลัพธ์จากการนำเอาข้อมูลการทดสอบมาคำนวณร่วมกับสมการทางคณิตศาสตร์เกี่ยวกับความสามารถในการรับกำลังอัดของคอนกรีตนั้นสามารถแสดงผลตามหลักการเชิงสถิติวิศวกรรมด้วยเทคนิคการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบ สามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ในการวิเคราะห์เชิงสถิติวิศวกรรมด้วยเทคนิคการออกแบบการทดลองเชิงแฟกทอเรียลเต็มรูปแบบสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 2 ซึ่งเป็นผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance; ANOVA) เกี่ยวกับอิทธิพลหลักของพารามิเตอร์ทั้ง 2 พารามิเตอร์ (Main effect) คือ เปอร์เซ็นต์เถ้าขานอ้อย (%CBA) และระยะเวลาในการบ่มคอนกรีต

(CC-time) รวมไปถึงอิทธิพลร่วมกันระหว่าง 2 พารามิเตอร์ (Interaction) พบว่า มีอิทธิพลต่อค่าความแข็งแรงอัด (CS-value) อย่างมีนัยสำคัญเนื่องจากค่า $p\text{-value} < \alpha (0.05)$ ซึ่งสอดคล้องสัมพันธ์กันกราฟอิทธิพลหลัก (Main effect plot) กับกราฟอิทธิพลร่วมกันระหว่างพารามิเตอร์ (Interaction plot) ดังแสดงในภาพที่ 4 และ 5 ตามลำดับ โดยถึงแม้ว่ากราฟ Interaction plot นั้นจะไม่ตัดกันอย่างชัดเจน แต่แนวโน้มกราฟแต่ละเส้นมีค่าสูงต่ำในแต่ละช่วงที่แตกต่างกัน ณ ระดับความเชื่อมั่น 95% นั้น ถือว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ ข้อมูลที่นำมาวิเคราะห์นี้มีความน่าเชื่อถือสูงมากถึง 99.94%

ตารางที่ 1 ข้อมูลการรับกำลังอัดของคอนกรีต

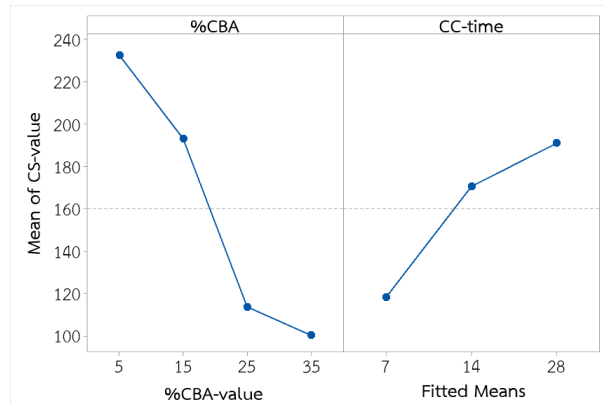
NO	%CBA	CC-time	CS-value
1	5	7	172.92
2	5	14	247.72
3	5	28	275.66
4	15	7	121.517
5	15	14	219.67
6	15	28	243.023
7	25	7	98.142
8	25	14	116.82
9	25	28	130.79
10	35	7	79.42
11	35	14	98.142
12	35	28	121.55
13	5	7	173.03
14	5	14	250.47
15	5	28	276.166
16	15	7	124.74

ตารางที่ 1 (ต่อ) ข้อมูลการรับก้างอัดของคอนกรีต

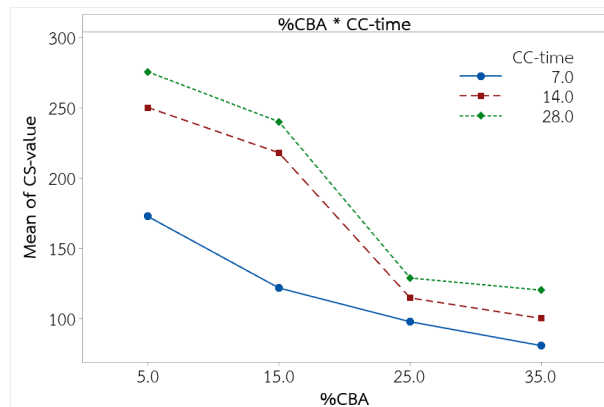
NO	%CBA	CC-time	CS-value
17	15	14	217.25
18	15	28	238.37
19	25	7	95.81
20	25	14	112.09
21	25	28	126.17
22	35	7	80.85
23	35	14	100.474
24	35	28	120.12
25	5	7	172.04
26	5	14	251.9
27	5	28	274.34
28	15	7	119.13
29	15	14	216.7
30	15	28	238.37
31	25	7	99.55
32	25	14	115.39
33	25	28	129.8
34	35	7	82.28
35	35	14	101.882
36	35	28	119.13

ตารางที่ 2 ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA)

Source	DF	SS	MS	F-value	P-value
Model	11	153230	13930	3650	< 0.01
Linear	5	142476	28495	7466	< 0.01
%CBA (A)	3	108594	36198	9484	< 0.01
CC-time (B)	2	33882	16941	4439	< 0.01
Interaction	6	10754	1792	470	< 0.01
AB	6	10754	1792	470	< 0.01
Error	24	92	4		
Total	35	153322			



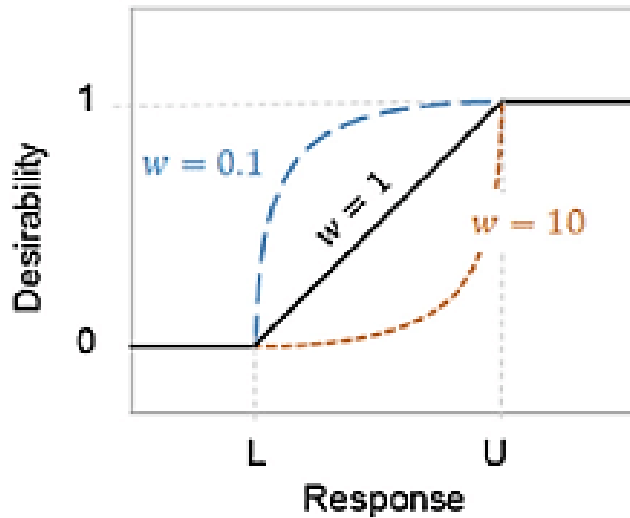
ภาพที่ 4 กราฟอิทธิพลหลัก (Main effect)



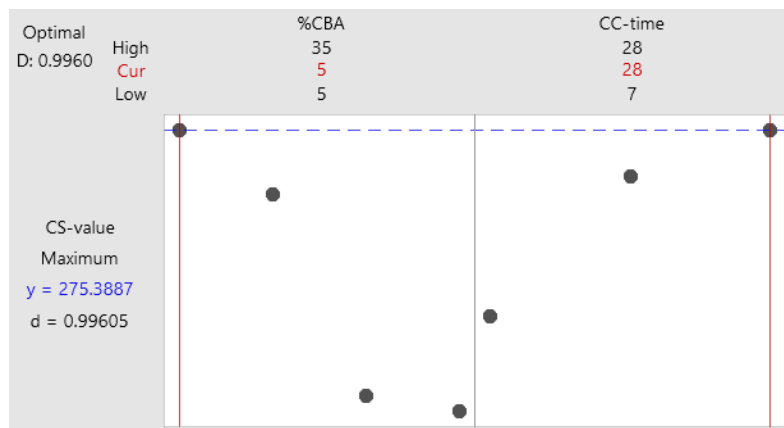
ภาพที่ 5 กราฟอิทธิพลร่วมกันระหว่าง 2 พารามิเตอร์ (Interaction)

ในการวิเคราะห์เชิงสถิติวิศวกรรมเพื่อค้นหา ระดับที่เหมาะสมของ 2 พารามิเตอร์ คือ เปอร์เซ็นต์ ถ้ำซานอ้อย (%CBA) และระยะเวลาในการบ่ม คอนกรีต (CC-time) ที่มีอิทธิพลต่อการให้ได้มาซึ่งค่า ความแข็งแรงอัด (CS-value) สูงสุดนั้น จะเป็นการประยุกต์ใช้ฟังก์ชันความพึงพอใจเชิงสถิติ (Desirability function) ด้วยเทคนิคเชิงสถิติ วิศวกรรมเกี่ยวกับการค้นหาค่ามากที่สุด คือ ค่าที่ดีที่สุด (Maximize the response) ดังแสดงใน

ภาพที่ 6 ซึ่งผลลัพธ์จากการวิเคราะห์พบว่า การเลือก ระดับของพารามิเตอร์เปอร์เซ็นต์ถ้ำซานอ้อย (%CBA) ณ 5% และพารามิเตอร์ระยะเวลาในการบ่ม คอนกรีต (CC-time) ณ 28 วัน จะมีอิทธิพลต่อการให้ได้มาซึ่งค่าความแข็งแรงอัด (CS-value) สูงสุด เท่ากับ 275.3887 โดยสมการดังกล่าว สามารถสร้างความพึงพอใจได้มากถึง 99.60% ดังแสดงในภาพที่ 7



ภาพที่ 6 การค้นหาค่ามากที่สุด คือ ค่าที่ดีที่สุด (Maximize the response)



ภาพที่ 7 ผลการวิเคราะห์ฟังก์ชันความพึงพอใจเชิงสถิติ (Desirability function)

4. สรุปผลการวิจัย

บทสรุปงานวิจัยเกี่ยวกับอิทธิพลของอัตราส่วนต่อความแข็งแรงอัดในการขึ้นรูปคอนกรีต สามารถบ่งชี้ได้ว่า เปอร์เซ็นต์อัตราส่วน (%CBA) ที่มีค่ามากขึ้นจาก 5% ขึ้นไป ค่าความแข็งแรงอัด (CS-value) ก็จะลดลงเรื่อย ๆ โดยสามารถพิจารณาได้จากกราฟอิทธิพลหลัก (ดังแสดงในภาพที่ 4) ส่วนระยะเวลาในการบ่มคอนกรีต (CC-time) ที่เพิ่มมากขึ้น จะส่งผลให้ค่าความแข็งแรงอัด (CS-value) เพิ่ม

มากขึ้นตามไปด้วย โดยสามารถพิจารณาได้จากกราฟอิทธิพลร่วมกันระหว่างพารามิเตอร์ (ดังแสดงในภาพที่ 5) จากผลการวิจัยดังกล่าวนี้ จึงมีความเป็นไปได้ว่าการที่จะได้มาซึ่งค่าความแข็งแรงอัด (CS-value) สูงสุดนั้น เปอร์เซ็นต์อัตราส่วน (%CBA) จะอยู่ในช่วง $\leq 5\%$ และระยะเวลาในการบ่มคอนกรีต (CC-time) จะอยู่ในช่วง ≥ 28 วัน ซึ่งเมื่อพิจารณาผลลัพธ์ของ %CBA ในงานวิจัยนี้ร่วมกับงานวิจัยที่ผ่านมา นั้น จะเห็นได้ว่ามีค่าต่ำกว่า ได้แก่ %CBA เท่ากับ

15% สำหรับในประเทศอินเดีย [3] และ %CBA มากกว่า 10% สำหรับในประเทศเอธิโอเปีย [4] สิ่งนี้กำลังบ่งชี้ได้หลากหลายประเด็นสำคัญ ไม่ว่าจะเป็นสภาวะภูมิประเทศ สายพันธุ์ของขานอ้อย และอายุซากของขานอ้อยเป็นต้น สิ่งเหล่านี้ถือเป็นพารามิเตอร์สำคัญอย่างยิ่งต่อการวิจัยพัฒนาต่อไปในอนาคตสำหรับการเพิ่มประสิทธิภาพของการประยุกต์นำเอาเถ้าขานอ้อยมาเป็นส่วนผสมในการขึ้นรูปคอนกรีตของประเทศไทย

5. อ้างอิง

- [1] Ganesan K, Rajagopal K, Thangavel K. Rice husk ash blended cement: Assessment of optimal level of replacement for strength and permeability properties of concrete. Construct Build Mater. 2008; 22:1675-1683.
- [2] Paula MO, Tinoco IFF, Rodrigues CS, et al. Sugarcane bagasse ash as partial portland cement replacement material. Scielo. 2010; 77(163):47-54.
- [3] Kawade UR, Rathhi VR, Vaishali D, et al. Effect of use of bagasse ash on strength of concrete, Int J Innovat Res Sci. 2013; 2(7).
- [4] Hailu B, Dinku A. Application of sugarcane bagasse ash as a partial cement replacement material. Journal of EEA. 2012;29.
- [5] Gar PS, Suresh N, Bindiganavile V. Sugar cane bagasse ash as a pozzolanic admixture in concrete for resistance to sustained elevated temperatures. Construct Build Mater. 2017;153:929-36.
- [6] Rukzon S, Chindapasirt P. Utilization of bagasse ash in high-strength concrete. Mater Des. 2012;34:45-50.
- [7] วินิต ช่อวิเชียร. คอนกรีตเทคโนโลยี. ครั้งที่ 8. กรุงเทพฯ: ปสัสมพันธ์พาณิชย์.; 2546.

การพัฒนาเทคนิคการติดตั้งแบบหล่อสำหรับเสาคอนกรีตเสริมเหล็ก
หน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดใหญ่

Development of Formwork Installation Techniques for Large rectangular Cross-
section Reinforced Concrete Columns

ชำนาญ น้อยพิทักษ์^{1*}, สอนยา ทองอรุณศรี², วันดี พูนพจน์มาศ¹
Chumnahn Noipitak^{1*}, Sontaya Tongaroonsri², Wandee Poonpotmas¹

¹สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ สาทร กรุงเทพฯ

²สาขาวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนาตาก เมือง ตาก

¹Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep, Sathon, Bangkok,
Thailand

²Civil and Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna Tak,
Muang, Tak, Thailand

*Corresponding author. Tel. 0992691442, E-mail address: chumnahn.n@mail.rmutk.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเทคนิคการติดตั้งแบบหล่อสำหรับเสาคอนกรีตเสริมเหล็กหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 250 x 750 มิลลิเมตร และศึกษาประสิทธิภาพการใช้งานของแบบหล่อที่พัฒนาขึ้นในโครงการก่อสร้างจริง ให้สามารถก่อสร้างได้อย่างรวดเร็วและลดปัญหาที่เกิดจากการใช้แบบหล่อเสาทั่วไป จากผลการวิจัยพบว่า แบบหล่อที่พัฒนาขึ้นสามารถลดจำนวนจุดค้ำยัน ลดเวลาในการประกอบเสา และสามารถใช้ทาวเวอร์เครนยกและสวมลงในเหล็กเสริมของเสาได้โดยไม่เกิดการเสียรูป โดยเสาคอนกรีตที่ได้มีผิวเรียบไม่เกิดการโก่งหรือเสียรูปเนื่องจากแบบหล่อ เมื่อนำแบบหล่อเสาที่พัฒนาขึ้นไปใช้ในโครงการก่อสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 8 ชั้นจำนวน 3 อาคาร มูลค่าการก่อสร้าง 408 ล้านบาท มีระยะเวลาการก่อสร้างเพียง 11 เดือน จำนวนเสาที่ต้องก่อสร้างรวมทั้งสิ้น 144 ต้นต่อชั้น พบว่าแบบหล่อที่พัฒนาขึ้นสามารถต้านทานการเสียรูปได้ทั้งขณะยกติดตั้งด้วยทาวเวอร์เครน และการเทคอนกรีตลงในแบบหล่อ ได้เสาที่มีขนาดตามต้องการ ไม่เกิดการโก่งหรือเสียรูป ช่วยลดระยะเวลาในการก่อสร้างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กในส่วนของการติดตั้งแบบหล่อได้ถึงร้อยละ 33 และสามารถลดต้นทุนด้านแบบหล่อ จุดค้ำยันและด้านแรงงาน ทำให้ลดระยะเวลาการก่อสร้างและช่วยลดต้นทุนการก่อสร้างได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: แบบหล่อคอนกรีต เหล็กรูปพรรณ เสาคอนกรีตเสริมเหล็ก

Abstract

This research aims to develop formwork installation techniques for 250 x 750 mm rectangular cross-sectional reinforced concrete columns and study the efficacy of developed formworks in a real construction project to be able to construct quickly and reduce problems caused with conventional formwork. The results showed that developed formwork can reduce the number of crutches, and assembly columns of time. The tower crane can be used to lift and wear it into the reinforced steel of the columns without deformation. The resulting concrete columns have been a smooth surface, neither deflected nor deformed from the formwork. When the developed column formwork was used to the construction site of a high reinforced concrete building for 8 floors, 3 buildings with a construction value of 408 million baht, carried out for 11 months of the construction period of time. A total of 144 columns per floor were required. Hence, this research found that the developed formworks were able to withstand deformation both of lifting with tower cranes and pouring concrete into the formwork. Furthermore, this research has achieved the column size as needed, without deflection or deformation. Therefore, it can reduce the construction time of reinforced concrete columns in the formwork installation by 33 percent, which decreases the cost of formwork, crutches and labor in order to reduce construction time and costs effectively.

Keywords: Concrete formwork, Structural steel, Reinforce concrete column

1. บทนำ

งานก่อสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กขนาดใหญ่ต้องให้ความสำคัญทั้งคุณภาพ เวลา และต้นทุน การก่อสร้าง การบริหารคุณภาพด้วยการตรวจและทดสอบในขั้นตอนสุดท้ายอาจทำให้เกิดการเสียเวลา และค่าใช้จ่ายมากขึ้น ในปัจจุบันรูปแบบของการควบคุมคุณภาพ (Quality control) ต้องดำเนินการในระหว่างการทำงาน โดยควบคุมคุณภาพทั้งกระบวนการทำงาน และผู้ปฏิบัติงาน การควบคุมคุณภาพสามารถกระทำได้ทั้งในขั้นตอนการออกแบบ และขั้นตอนการก่อสร้าง งานควบคุมคุณภาพด้านเทคนิคและวิธีการก่อสร้างที่ใช้ก็มีความจำเป็นและสำคัญอย่างมาก เนื่องจากส่งผลต่อระยะเวลา

และต้นทุนค่าใช้จ่ายในการก่อสร้างอย่างมาก งานแบบหล่อ (Formwork) เป็นหนึ่งในหลายงานที่ต้องใช้เทคนิคในการก่อสร้าง อีกทั้งยังมีวัสดุหลายชนิดให้เลือกใช้ อาทิเช่น ไม้ ไม้อัด เหล็ก อะลูมิเนียม ไฟเบอร์กลาส พลาสติก และคอนกรีต [1] แบบหล่อไม้และแบบหล่อเหล็ก เป็นแบบหล่อที่ได้รับความนิยมและมีการใช้ทั่วไปในงานก่อสร้างต่าง ๆ ในปัจจุบัน [2] การหล่อคอนกรีตให้ได้รูปร่างและขนาดที่ต้องการ ต้องมีการออกแบบและสร้างแบบหล่อตามรายการคำนวณ [3] พร้อมทั้งต้องออกแบบจุดยึดแบบหล่อด้วยการค้ำยันให้มีความแข็งแรงเพียงพอสำหรับการติดตั้งและเทคอนกรีตลงแบบหล่อ นอกจากนี้ยังต้องคำนึงถึงขนาดที่ถูกต้องและลักษณะ

ของผิวคอนกรีตหลังถอดแบบหล่อ [4] ซึ่งถือว่าเป็นปัจจัยสำคัญที่ต้องมีการกำหนดคุณภาพของงานและความต้องการพื้นฐานสำหรับการเลือกกระบบของแบบหล่อให้เหมาะสม ตั้งแต่ขั้นตอนการวางแผนงานก่อสร้าง [5,6] ดังนั้นการเลือกกระบบแบบหล่อที่ดีต้องคำนึงถึงความแข็งแรง ความทนทานและทำให้งานก่อสร้างมีความปลอดภัย [7,8] การเลือกแบบหล่อต้องพิจารณาจากปัจจัยต่าง ๆ เช่น ปัจจัยด้านราคา ซึ่งรวมถึงราคาของวัสดุ ค่าแรงในการประกอบและการรื้อถอนแบบหล่อ ค่าใช้จ่ายของอุปกรณ์ที่เกี่ยวข้องกับแบบหล่อ เป็นต้น [9] ค่าใช้จ่ายด้านแบบหล่ออาจเป็นครึ่งหนึ่งของค่าใช้จ่ายสำหรับงานคอนกรีตหล่อในที่ของทั้งโครงการ [10] สมบัติของแบบหล่อที่ดีต้องใช้วัสดุที่มีราคาถูกหาซื้อได้ง่ายมีความแข็งแรงอย่างเพียงพอ ไม่เกิดการโก่งหรือแอ่นตัวจนเสียรูป ขณะเทคอนกรีต รอยต่อต้องมีความมั่นคงแข็งแรงสามารถต้านทานแรงกระทำได้โดยไม่เกิดการเสียรูป ในปัจจุบันแบบหล่อสำหรับเสา คอนกรีตเสริมเหล็กที่มีหน้าตัดขนาดใหญ่มักนิยมสร้างขึ้นด้วยโครงเหล็กกรวดด้วยไม้อัดเป็นผนังแบบหล่อ ซึ่งมีข้อดีคือมีราคาถูก แต่สามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้เพียง 3-4 ครั้ง [1] การติดตั้งใช้เวลานานเพราะต้องมีจุดค้ำยันหลายจุด เพื่อให้แบบหล่อไม่เสียรูป และแบบหล่ออีกชนิดที่นิยมใช้จะเป็นแบบหล่อทำมาจากเหล็กทั้งหมด ซึ่งมีความแข็งแรง สามารถใช้ซ้ำได้ตามต้องการ แต่มีราคาแพง ต้องใช้ช่างที่ชำนาญในการประกอบ อีกทั้งต้องมีจุดค้ำยันอย่างน้อย 2 จุดสำหรับเสาน้ำตดกลม และต้องมีจุดค้ำยันอย่างน้อย 3 จุด หากหน้าตัดเสาเป็นสี่เหลี่ยมผืนผ้า การคำนวณออกแบบและสร้างแบบหล่อให้มีความแข็งแรงต้องพิจารณาแรงดันของคอนกรีตที่กระทำต่อแบบหล่อ อาจเกิดจากหลายสาเหตุ เช่น คอนกรีตที่เหลวมีค่า

การยุบตัวสูงแรงดันกระทำต่อแบบหล่อมมาก ในทางตรงกันข้าม คอนกรีตที่มีสภาพชื้นเหนียวมีค่าการยุบตัวน้อยแรงดันต่อแบบหล่อน้อย การเทคอนกรีตในอัตราที่ช้าทำให้คอนกรีตบางส่วนเริ่มแข็งตัวแรงดันต่อแบบหล่อลดลง คอนกรีตที่มีความหนาแน่นมากขึ้นแรงดันต่อแบบหล่อมมากขึ้นแรงดันคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นตามความสูงของระยะเทคอนกรีต ขนาดหน้าตัดของโครงสร้างใหญ่มีแรงดันต่อแบบหล่อมมากกว่าหน้าตัดของโครงสร้างขนาดเล็ก การใช้เครื่องสั่นคอนกรีตจะส่งผลให้เกิดแรงดันต่อแบบหล่อมมากขึ้น นอกจากนี้ปริมาณเหล็กเสริมช่วยต้านทานและพยุงเนื้อคอนกรีตทำให้แรงดันต่อแบบหล่อลดลงได้ [11-14] นอกจากนี้การเลือกชนิดของแบบหล่อยังต้องคำนึงถึงความสูงของอาคารที่ก่อสร้างและสภาพอากาศที่แบบหล่อต้องเผชิญในขณะก่อสร้างอาคาร [15]

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาแบบหล่อเสาที่สามารถลดระยะเวลาการก่อสร้างเสา คอนกรีต อีกทั้งมีคุณสมบัติที่สามารถป้องกันปัญหาที่มักเกิดขึ้นกับการใช้แบบหล่อเสาชนิดโครงเหล็กกรวดด้วยไม้อัด หรือปัญหาของแบบหล่อเหล็กที่พบโดยทั่วไป ซึ่งจะกล่าวในหัวข้อถัดไป แบบหล่อที่พัฒนาขึ้นจะถูกนำไปใช้ในการก่อสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 8 ชั้น จำนวน 3 อาคารมูลค่าการก่อสร้าง 408 ล้านบาท มีระยะเวลาการก่อสร้างที่จำกัดเพียง 11 เดือน ดังนั้นงานก่อสร้างในส่วนของการก่อสร้างอาคารจึงต้องแล้วเสร็จภายในระยะเวลา 4 เดือนหลังได้ลงนามสัญญาก่อสร้าง ดังนั้นผู้วิจัยจึงได้พัฒนาแบบหล่อและเทคนิคการติดตั้งให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น ซึ่งแตกต่างจากแบบหล่อทั่วไป โดยพิจารณาปัจจัยหลักได้แก่ ปัจจัยด้านความแข็งแรงของแบบหล่อทั้งขณะติดตั้ง ประกอบแบบ เทคอนกรีตและการรื้อถอน รวมถึง

ปัจจัยด้านระยะเวลาในการทำงานทั้งขณะติดตั้งเทคอนกรีตและการรื้อถอน โดยพัฒนาเทคนิคการติดตั้งแบบหล่อเสาให้มีความรวดเร็วมากขึ้น โดยแบบหล่อต้องสามารถต้านทานการเสีรูปในทุกขั้นตอนการติดตั้ง การใช้งาน และการรื้อถอน โดยคำนึงถึงต้นทุนการก่อสร้างที่ประหยัด และเทคนิคการลดขั้นตอนและระยะเวลาการติดตั้ง ต้นทุนค่าวัสดุและอุปกรณ์ ค่าแรงงาน และการบริหารระยะเวลาการก่อสร้างของโครงการให้มีประสิทธิภาพสูงสุด

2. วิธีดำเนินการวิจัย

การพัฒนาแบบหล่อเสา

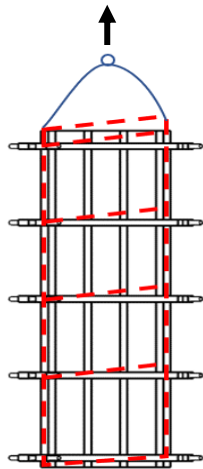
การพัฒนาแบบหล่อเสาในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยได้ดำเนินการศึกษาปัญหาต่าง ๆ ที่มักเกิดขึ้นในขั้นตอนการก่อสร้างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กจากโครงการต่าง ๆ แล้วนำมาปรับปรุงและพัฒนาแบบหล่อเสา ที่สามารถลดปัญหาที่เกิดขึ้นและสามารถลดระยะเวลาติดตั้งแบบหล่อเสา โดยทั่วไปแบบหล่อเสาที่ถูกสร้างขึ้นด้วยโครงเหล็กกรุด้วยไม้อัดเป็นผนังแบบหล่อทำให้มีขีดจำกัด สามารถใช้งานซ้ำได้ประมาณ 3 – 4 ครั้งเท่านั้น นอกจากนี้ยังมีปัญหาการเสีรูปของแบบหล่อเสาที่เกิดขึ้นจากขบวนการติดตั้งแบบหล่อที่สามารถแบ่งได้เป็น 2 กรณี และปัญหาจากแรงดันของคอนกรีตสดขณะเทลงในแบบหล่อแบ่งได้เป็น 4 กรณี รวมทั้งสิ้น 6 กรณี ได้แก่

1) การเสีรูปเนื่องจากการยกเคลื่อนย้ายแบบหล่อด้วยทาวเวอร์เครน เนื่องจากแบบหล่อที่มีผนังไม้อัดยึดแน่นกับโครงเหล็กด้วยสกรูขันเกลียวข้อเสียทำให้ความสามารถต้านทานแรงเฉือนลดลงจากเนื้อไม้อัดเสื่อมสภาพจากการใช้งาน และเกิดการเสีรูปทำให้เกิดการบิดเบี้ยวเสีรูปทรง แบบ

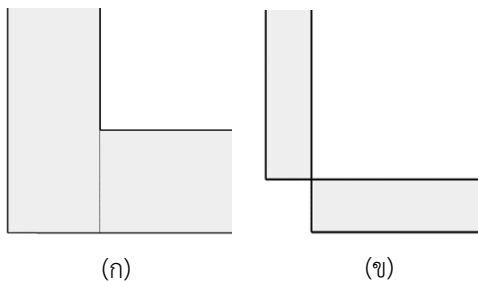
โยเอียงตามแรงเฉือนในแนวตั้งจากน้ำหนักตัวแบบเอง ดังภาพที่ 1 ปัญหาดังกล่าวผู้วิจัยได้แก้ไขโดยเปลี่ยนวัสดุจากไม้อัดเป็นแผ่นเหล็ก ซึ่งความหนาของแผ่นเหล็กสามารถคำนวณได้จากแรงดันต่อความยาวของเส้นรอบวง 1 หน่วยของแผ่นเหล็ก (P) และรัศมีความโค้งของแผ่นแบบหล่อ (r) และความหนาของแผ่นแบบหล่อ (t) คำนวณตามสมการ $\sigma = Pr / t$ [4,11] และผลจากการเปลี่ยนไม้อัดหนา 20 มิลลิเมตร เป็นแผ่นเหล็กหนา 2 มิลลิเมตร ยังสามารถเปลี่ยนวิธีการประกอบการเข้ามุมแบบไม้อัดที่มีลักษณะแบบทาบ ดังภาพที่ 2(ก) เป็นการเข้ามุมแบบต่อชนจะทำให้ต้นทุนการสร้างแบบหล่อลดลง เนื่องจากใช้เหล็กรัดรูปสั้นลงทุกทิศทางดังภาพที่ 2(ข) นอกจากนี้ยังเปลี่ยนระบบการประกอบชิ้นส่วนจาก 4 ชิ้นส่วน ดังภาพที่ 3(ก) เป็นแบบ 2 ชิ้นส่วน ที่มีลักษณะเป็นรูปตัวแอล ดังภาพที่ 3(ข)

2) การเสีรูปเนื่องจากการค้ำยันแบบหล่อ การค้ำยันอาจทำให้คานหรือตงเกิดการโก่งงอหรือการแอ่นตัวตามแนวแรงกระทำ และทำให้เกิดการบิดเบี้ยวเสีรูปทรงแบบโยเอียงจากแรงดึงหรือหรือแรงผลักขณะบังคับให้แบบหล่ออยู่ในตำแหน่งที่ต้องการ ดังภาพที่ 4 ปัญหาการเสีรูปเนื่องจากการค้ำยันแบบหล่อ เกิดจากสาเหตุจุดยึดประกอบแบบไม่สามารถต้านทานแรงเฉือนหรือแรงอัดได้ จึงทำให้เกิดการเคลื่อนตัว ดังนั้นผู้วิจัยจึงเปลี่ยนระบบการยึดแบบเดิมคือ การนำโครงเหล็กรัดรอบมาวางซ้อนทับแล้วยึดแน่นด้วยสกรูขันเกลียวหรือน็อต ดังภาพที่ 5(ก) หรือการยึดโดยการนำโครงเหล็กรัดรอบชนในระดับเดียวกันแล้วและยึดแน่นแท่งนอตขนาดยาวหรือชุดอุปกรณ์ฟอร์มไท (Form tie) ดังภาพที่ 5(ข) โดยเปลี่ยนมาเป็นแบบจุดยึดที่ทำมุม 45 องศา กับมุมฉากของแบบหล่อด้วยการสร้างปลอก

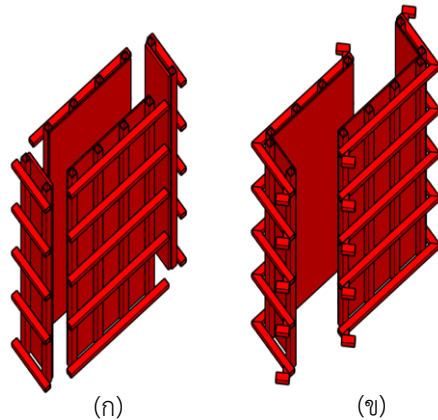
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 35 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นขนาดที่ใช้สำหรับใส่แท่งเหล็กแฉัดเบสและยูเบส เนื่องจากการทดสอบในครั้งนี้ผู้วิจัยได้ใช้แฉัดเบสและยูเบส ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับงานติดตั้งนั่งร้านสำหรับทำแบบหล่อโครงสร้างพื้นอาคาร แทนแท่งเหล็กเกลียวชั้นแนวดังภาพที่ 6



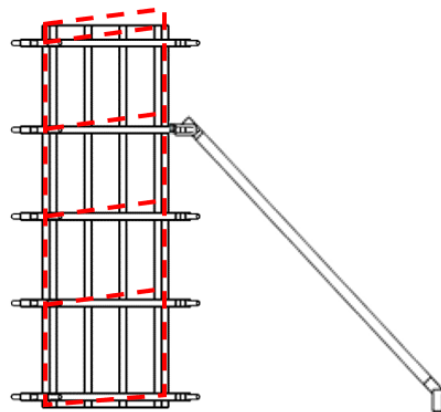
ภาพที่ 1 การเสียรูปของแบบหล่อ เนื่องจากการยกเคลื่อนย้ายแบบหล่อด้วยทาวเวอร์เครน



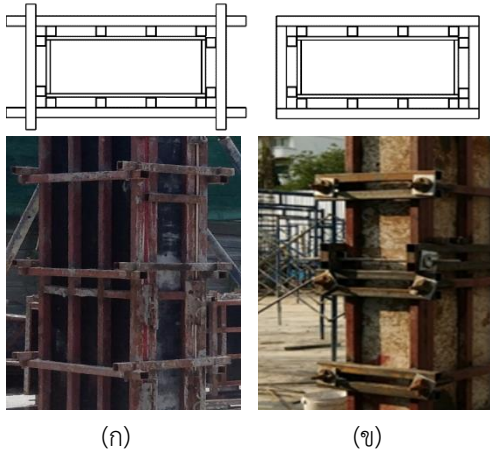
ภาพที่ 2 วิธีการประกอบมุมแบบของแบบหล่อ



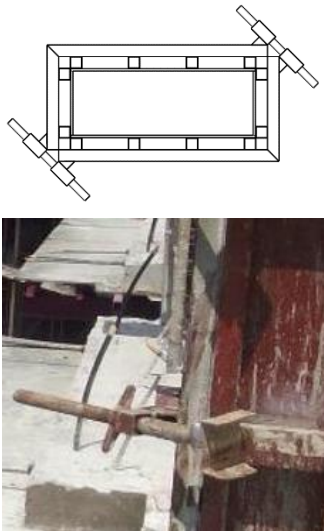
ภาพที่ 3 การประกอบชิ้นส่วนของแบบหล่อ



ภาพที่ 4 การเสียรูปเนื่องการดึงหรือดันแบบหล่อด้วยเสาค้ำยัน



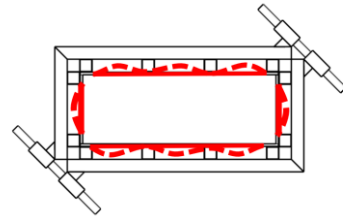
ภาพที่ 5 จุดยึดประกอบแบบที่ไม่สามารถต้านทานแรงเหวี่ยงหรือแรงอัดได้



ภาพที่ 6 จุดยึดประกอบแบบที่สามารถต้านทานแรงเหวี่ยงหรือแรงอัดได้

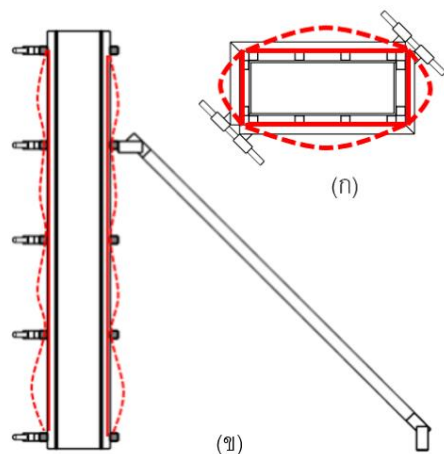
3) การเสียรูปเนื่องจากแรงดันของคอนกรีตสดจะทำให้แบบหล่อเกิดการโก่งงอ ซึ่งเป็นการเสียรูปที่ทำให้เกิดหลุมคลื่นที่ผิวของคอนกรีตหลังคอนกรีตแข็งตัว ส่งผลให้ขนาดเสาไม่เป็นไปตามต้องการดังภาพที่ 7 ซึ่งเป็นการเสียรูปเนื่องจากแผ่นไม้อัดเสื่อมสภาพหรือชำรุดจากการใช้งาน ผู้วิจัยจึงแก้ปัญหาโดยการเปลี่ยนวัสดุจากแผ่นไม้อัดเป็น

แผ่นเหล็ก นอกจากจะป้องกันการเสียรูปจากแรงดันคอนกรีตสดแล้ว ยังสามารถแก้ปัญหาการเสียรูปจากการยกเคลื่อนย้ายแบบหล่อด้วยทาวเวอร์เครนอีกด้วย



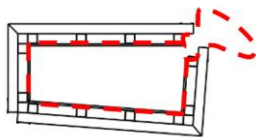
ภาพที่ 7 การเสียรูปเนื่องจากแรงดันของคอนกรีตสด

4) การเสียรูปเนื่องจากแรงดันของแผ่นแบบหล่อจนทำให้เหล็กกรัดรอบ ดังภาพที่ 8(ก) และคานหรือตงดังภาพที่ 8(ข) เกิดการโก่งงอหรือการแอ่นตัวตามแนวแรงกระทำ ซึ่งเป็นการเสียรูปที่ทำให้เกิดการบวมกรณีเหล็กกรัดรอบ หรือเกิดคลื่นขนาดใหญ่ตามแนวตั้งของเสาที่ผิวคอนกรีต หลังจากคอนกรีตแข็งตัว แต่ปัญหาเหล่านี้มักพบได้น้อยเนื่องจากแนวปฏิบัติทั่วไปหน่วยงานจะใช้ขนาดเหล็กกรัดรอบ และคานหรือตงใหญ่กว่าที่ได้จากรายการคำนวณ



ภาพที่ 8 การเสียรูป (ก)เหล็กกรัดรอบ (ข)คานหรือตง

5) การเสียรูปเนื่องจากแรงดันของคอนกรีตสดทำให้แบบหล่อเสาแตกบริเวณจุดยึดประกอบแบบเนื่องจากความแข็งแรงของจุดยึดประกอบไม่เพียงพอ ซึ่งเป็นการเสียรูปที่ทำให้ขนาดหน้าตัดเสาเปลี่ยนรูปทรงไม่เป็นไปตามขนาดที่ต้องการหลังคอนกรีตแข็งตัว ดังภาพที่ 9 ซึ่งกรณีที่ต้องสกัดคอนกรีตส่วนเกินออก แรงสั่นสะเทือนอาจส่งผลให้เกิดรอยแตกร้าวบริเวณคอนกรีตที่เชื่อมโยงกัน ส่งผลต่อการรับน้ำหนักของโครงสร้างคอนกรีตเป็นอย่างมาก ปัญหาการเสียรูปเนื่องจากแบบหล่อแตกบริเวณจุดยึดนี้ ผู้วิจัยได้แก้ไขโดยการเปลี่ยนเป็นจุดยึดแบบทำมุม 45 องศา ส่งผลให้แบบหล่อมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น และยังช่วยแก้ปัญหาการเสียรูปของแบบหล่อจากการยกเคลื่อนย้ายแบบหล่อด้วยทาวเวอร์เครนอีกด้วย



ภาพที่ 9 การเสียรูปเนื่องจากความแข็งแรงของจุดยึดประกอบไม่เพียงพอ

การทดสอบประสิทธิภาพการใช้งานแบบหล่อเสา

แบบหล่อเสาที่พัฒนาขึ้นจะนำไปทดสอบประสิทธิภาพการใช้งาน ในโครงการก่อสร้างอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 8 ชั้น จำนวน 3 อาคาร จำนวนเสารวมทั้งสิ้น 144 ต้นต่อชั้น แบบหล่อที่ใช้ในการทดสอบเป็นแบบหล่อที่สร้างจากเหล็กชั้นคุณภาพตามเกณฑ์มาตรฐานเหล็กโครงสร้างรูปพรรณขึ้นรูปเย็น มอก. 1228-2549 แบบหล่อที่ใช้ในการทดสอบมีขนาด $250 \times 750 \times 2800$ มิลลิเมตร จำนวน 72 ต้น แบบหล่อประกอบด้วย แผ่นแบบหล่อเป็นแผ่นเหล็ก

หนา 2 มิลลิเมตร ตัดขนาดเท่ากับขนาดเสาที่ต้องการและคานหรือตงป้องกันแผ่นแบบหล่อเสียรูปใช้เหล็กกล่องสี่เหลี่ยมหรือเหล็กแป้นโปรง (Square steel tube) ขนาด $25 \times 25 \times 3.2$ มิลลิเมตร น้ำหนัก 1.93 กิโลกรัมต่อเมตร และเหล็กกรอบประกอบเป็นรูปตัวแอล โดยใช้เหล็กกล่องขนาด $50 \times 50 \times 3.2$ มิลลิเมตร น้ำหนัก 4.50 กิโลกรัมต่อเมตร ดังภาพที่ 3(ข) และภาพที่ 10



ภาพที่ 10 แบบหล่อเสาที่ใช้ในการทดสอบ



ภาพที่ 11 การค้ำยันแบบต้นด้วยเสาเหล็กปรับเกลียว และตึงด้วยลวดสลิง

ระบบเสาค้ำยัน ที่ใช้ควบคู่กับแบบหล่อที่พัฒนาขึ้นนี้เป็นแบบต้นด้วยเสาเหล็กปรับเกลียว และดึงด้วยลวดสลิง ดังภาพที่ 11 แต่อย่างไรก็ตามถ้าสามารถใช้เสาค้ำยันแบบที่มีความสามารถทั้งดึงและดันด้วยเสาเหล็กปรับเกลียวเพียงจุดเดียวแทนได้จะทำให้เกิดความสะดวกและติดตั้งได้รวดเร็วมากขึ้น

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ผลการศึกษาการใช้แบบหล่อเสาที่พัฒนาขึ้นในโครงการก่อสร้างจริง พบว่า

1) สามารถลดจำนวนครั้งการยกแบบหล่อจาก 4 ครั้ง (4 ชั้นส่วน) แสดงดังภาพที่ 3(ก) ให้เหลือเพียง 1 ครั้งด้วยทาวเวอร์เครน เนื่องจากสามารถประกอบแบบหล่อให้เป็นชุดเดียวกันก่อนยกโดยไม่เกิดการเสียรูปได้แสดงดังภาพที่ 1 และผลของการไม่เสียรูปของแบบหล่อจึงสามารถใช้เทคนิคการยกแบบหล่อที่ตำแหน่งแนวแกนสมมาตรให้แบบหล่อตั้งอยู่ในแนวตั้งขณะยก ช่วยเพิ่มความสามารถการสวมแบบหล่อลงตำแหน่งที่ต้องการได้สะดวกและรวดเร็วกว่าการประกอบแบบหล่อที่ละชั้นส่วนในตำแหน่งกำหนด

2) การเปลี่ยนแผ่นแบบหล่อจากไม้อัดเป็นแผ่นเหล็กสามารถช่วยเพิ่มความแข็งแรง สามารถป้องกันการบิดตัวหรือการเสียรูปของแบบหล่อ ทั้งในขั้นตอนการติดตั้ง การถอดแบบและการเคลื่อนย้ายแบบหล่อ [5] นอกจากนี้ยังพบว่าแผ่นแบบหล่อที่ทำด้วยไม้อัดสามารถใช้งานซ้ำได้ประมาณ 3 – 4 ครั้งเท่านั้น ต้องทำการเปลี่ยนแผ่นใหม่ ตรงกันข้ามกับแผ่นแบบหล่อที่ทำด้วยเหล็กสามารถใช้งานได้แบบไม่จำกัดจำนวนครั้ง แต่ต้นทุนการผลิตเริ่มต้นแบบหล่อที่ทำด้วยแผ่นเหล็กจะมีราคาแพงกว่าประมาณ 2.5 เท่า ในทางกลับกันเมื่อมีการใช้งานซ้ำทุก ๆ

3 - 4 ครั้ง แบบหล่อที่ทำด้วยแผ่นไม้ต้องมีการซ่อมบำรุงและเปลี่ยนแผ่นใหม่ เมื่อเปรียบเทียบต้นทุนการผลิตในระยะยาวทำให้แผ่นแบบหล่อที่ทำด้วยเหล็กมีราคาต้นทุนที่ถูกกว่ามาก แสดงการวิเคราะห์ราคาต้นทุนแผ่นแบบหลอดังตารางที่ 1

3) ชิ้นส่วนรับโมเมนต์ดัด ที่ประกอบไปด้วย คานหรือตง เหล็กกรัดรอบ ใช้งานได้โดยไม่เกิดการบวมตัว โก่งงอหรือการแอ่นตัวตามแนวแรงกระทำ สามารถตรวจสอบขนาดของเสาได้หลังจากคอนกรีตแข็งตัวและแกะแบบหล่อแล้วเสร็จ แสดงดังภาพที่ 12



ภาพที่ 12 ผลงานเสาคอนกรีตที่ได้จากใช้แบบหล่อที่พัฒนาแล้ว

4) จุดยึดประกอบแบบหล่อที่เปลี่ยนเป็นแบบจุดยึดที่ทำมุม 45 องศา สามารถป้องกันการแตกของแบบหล่อ เพิ่มความแข็งแรงสามารถคงรูป ไม่เกิดการโยกของแบบขณะเคลื่อนย้าย และสามารถขึ้นเกลียวบังคับเพิ่มความสะดวกในการประกอบแบบเปรียบเทียบระหว่างภาพที่ 5(ข) กับภาพที่ 6 แสดงให้เห็นว่าขนาดแกนของเหล็กชั้นเกลียวใช้ขนาดใหญ่ขึ้นสามารถลดจำนวนจุดชั้นเกลียวจาก 4 จุดเหลือเพียง 2 จุดต่อเหล็กกรัดรอบ 1 จุด ประกอบกับการเปลี่ยนเหล็กกรัดรอบเป็นรูปตัวแอลทำให้ลดจำนวนชิ้นของแบบลดลงจาก 4 ชิ้นส่วน เป็นแบบ

2 ชั้นส่วนแสดงดังภาพที่ 3 นอกจากนี้จุดยึดที่ทำมุม 45 องศาสามารถลดความยาวของเหล็กชั้นเกลียว และเพิ่มความสามารถต้านทานแรงบิด แสดงดังภาพที่ 6 จากผลของจำนวนจุดยึดที่ลดลงทำให้ประกอบแบบได้รวดเร็วมากขึ้น และจุดสำคัญคือหลังการพัฒนาแบบหล่อให้คงรูปไม่เกิดการบิดงอทุกกรณีการใช้งาน สามารถลดจุดค้ำยันและจุดยึดด้านล่างแบบลงได้ ทำให้ต้นทุนการก่อสร้างลดลง เปรียบเทียบแบบหล่อที่ยังไม่ได้พัฒนากับแบบหล่อที่พัฒนาแล้ว ดังภาพที่ 13(ก) และภาพที่ 13(ข) ตามลำดับ การวิเคราะห์ต้นทุนจุดค้ำยันแสดงดังตารางที่ 2 เทคนิคการค้ำยันควรค้ำยันที่ตำแหน่งแนวกึ่งกลางของแบบแต่ละด้าน (จะทำให้เกิดแรงบิดกับแบบหล่อเสาท่กับศูนย์) ตำแหน่งที่ค้ำประมาณ 3/4 ของความสูงเสา ทำมุม 30 – 45 องศากับแนวตั้งเสา จะลดต้นทุนทั้งขนาดและความยาวเสาค้ำยันลงได้ เนื่องจากค้ำยันทำมุมน้อยกว่า 30 องศาจะส่งผลให้เสถียรภาพการรับแรงด้านข้างของค้ำยันลดลง หรือมากกว่า 45 องศาจะส่งผลต่อความยาวและการโค้ง

เดาะของค้ำยันมากขึ้นเนื่องจากกลไกการถ่ายน้ำหนักของชั้นส่วน ซึ่งเป็นไปตามหลักทฤษฎีการออกแบบชั้นส่วนค้ำยัน [1,3] แต่อย่างไรก็ตามกรณีพบแบบบิตให้ตรวจสอบขนาดของชั้นส่วน และขบวนการสร้าง เช่น ขนาดแผ่นไม่เท่ากัน ขนาดแผ่นไม่ได้ฉาก ประกอบเหล็กตรอบรูปตัวแอล ไม่ได้ฉาก หรือขนาดเหล็กตรอบรูปตัวแอลไม่เท่ากัน

5) อาคารที่ใช้แบบหล่อที่พัฒนาแล้ว สามารถติดตั้งแบบหล่อเสาได้จำนวน 72 ต้นต่อจำนวนแรงงาน 25 คนต่อวัน ส่วนอาคารที่ใช้แบบหล่อแบบเดิมโดยใช้แรงงานชุดเดิมสามารถติดตั้งได้เพียงจำนวน 32 ต้นต่อวันเท่านั้น ในภาพรวมอาคารที่ใช้แบบหล่อที่พัฒนาขึ้น ใช้ระยะเวลาในการก่อสร้างเสาประมาณ 8 วันต่อชั้น ส่วนอาคารที่ใช้แบบหล่อเดิมในการก่อสร้างต้องใช้เวลาประมาณ 12 วันต่อชั้น การวิเคราะห์หาค่าต้นทุนระยะเวลาทำงาน แสดงดังตารางที่ 3



(ก)



(ข)

ภาพที่ 13 (ก)การติดตั้งแบบหล่อเสาที่พัฒนาแล้ว และ (ข)การติดตั้งแบบหล่อเสาที่ยังไม่ได้พัฒนา

ตารางที่ 1 ผลวิเคราะห์ราคาต้นทุนแผ่นแบบหล่อจำนวนใช้กับแบบหล่อ 72 ชุด

รายการ	ปริมาณ	หน่วย	ค่าวัสดุ (บาท/หน่วย)	ค่าแรง (บาท/หน่วย)	รวมทั้งสิ้น (บาท)	หมายเหตุ
ไม้อัด หนา 20 มม.	113.4	ตร.ม.	320	80	45,360	เปลี่ยน 3 ครั้ง
	97	กก.	25	12	3,596	ส่วนต่างเหล็กกรัดรอบ ขนาด 50 x 50 x 3.2 มม.
แผ่นเหล็ก หนา 2 มม.	37.8	ตร.ม.	580	200	29,484	กรณีขายเป็นเศษเหล็กหลัง จบงานได้ ตร.ม. ละ 170 บาท เป็นเงิน 6,426 บาท

หมายเหตุ: สามารถลดต้นทุนได้ $(45,360 + 3,596 - 29,484 + 6,426) = 25,898$ บาท

ตารางที่ 2 ผลวิเคราะห์ราคาต้นทุนจุดค้ำยันใช้กับแบบหล่อ 72 ชุด

รายการ	ปริมาณ	หน่วย	ค่าวัสดุ (บาท/ชุด)	ค่าแรง (บาท)	รวมทั้งสิ้น (บาท)	หมายเหตุ
เสา ค้ำยันแบบ หล่อไม้อัด	216	ชุด	850	0	183,600	
ต้นทุนค่าติดตั้ง แบบหล่อ	144	ชุด		315,000*	315,000	ติดตั้ง 8 ชั้น
เสา ค้ำยันแบบ หล่อเหล็ก	144	ชุด	850	0	122,400	
ต้นทุนค่าติดตั้ง แบบหล่อ	144	ชุด		140,000*	140,000	ติดตั้ง 8 ชั้น

หมายเหตุ: สามารถลดต้นทุนได้ $(183,600 + 315,000 - 122,400 - 140,000) = 236,200$ บาท

*ต้นทุนค่าติดตั้งแบบหล่อ = จำนวนวันที่ใช้ติดตั้ง x จำนวนคนที่ใช้ติดตั้งต่อวัน x ค่าแรงเฉลี่ยต่อวันต่อคน x จำนวนชั้นที่ติดตั้ง

ตารางที่ 3 ผลวิเคราะห์ราคาต้นทุนระยะเวลาทำงานได้เร็วขึ้น 4 วันต่อชั้น รวมระยะเวลาที่ทำงานได้เร็วขึ้น 32 วัน มีจำนวนแรงงานทำงานในโครงการวิจัยนี้เฉพาะส่วนงานของโครงสร้างโดยเฉลี่ย 30 คนต่ออาคารต่อวันรวม 3 อาคารประมาณ 90 คนต่อวัน ค่าแรงเฉลี่ย 350 บาทต่อคนต่อวัน

รายการ	ปริมาณ	หน่วย	ค่าวัสดุ (บาท)	ค่าแรง (บาท)	รวมทั้งสิ้น (บาท)	หมายเหตุ
รายจ่ายประจำ	32	วัน	0	31,500	1,008,000	

หมายเหตุ: สามารถลดต้นทุนได้จากรายจ่ายประจำ = 1,008,000 บาท

4. สรุปผลการวิจัย

จากผลการศึกษาการพัฒนาแบบหล่อเสาและเทคนิคการติดตั้งแบบหล่อเสาหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดใหญ่ของอาคารคอนกรีตเสริมเหล็กสูง 8 ชั้นจำนวน 3 อาคาร ในงานวิจัยนี้สามารถสรุปได้ว่า แบบหล่อที่พัฒนาขึ้นมีความแข็งแรงไม่เกิดการเสียรูปขณะใช้งานทั้งการยกด้วยทาวเวอร์เครนและการเทคอนกรีตสามารถประกอบแบบหล่อแล้วยกสวมลงให้เหล็กเสริมของเสาได้โดยไม่เสียรูป ทำให้ทำงานได้รวดเร็วสามารถลดจำนวนจุดค้ำยันทั้งด้านสั้นและยาวให้เหลือเพียงด้านละหนึ่งจุด ส่งผลให้การติดตั้งแบบหล่อได้รวดเร็วเพิ่มขึ้นจากจำนวน 32 ต้นต่อวัน เป็น 72 ต้นต่อวันต่อจำนวนแรงงาน 25 คน หรือติดตั้งแบบหล่อเร็วขึ้นกว่าการใช้แบบหล่อเดิม 2.25 เท่าผิวของคอนกรีตเรียบสม่ำเสมอ เมื่อนำแบบหล่อที่พัฒนาขึ้นไปใช้ในการก่อสร้างจริง ช่วยลดระยะเวลาในการก่อสร้างเสาคอนกรีตเสริมเหล็กในส่วนของการติดตั้งแบบหล่อจาก 12 วันต่อชั้น เหลือเพียง 8 วันต่อชั้น หรือลดระยะเวลาได้ถึงร้อยละ 33 และสามารถลดต้นทุนด้านแบบหล่อ จุดค้ำยันและด้านแรงงานได้อีกด้วย

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ที่สนับสนุนการดำเนินงานวิจัย

6. อ้างอิง

- [1] เอกสิทธิ์ลิ้มสุวรรณ. แบบหล่อคอนกรีต. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2546.
- [2] Yip R, Poon CS. Comparison of timber and metal formwork systems. Proceedings of the Institution of Civil Engineers - Waste and Resource Management. 2008; 161(1):29-36.
- [3] กรมโยธาธิการและผังเมือง กระทรวงมหาดไทย. คู่มือการออกแบบอาคารเหล็กโครงสร้างรูปพรรณ. กรุงเทพฯ: สำนักควบคุมและตรวจสอบอาคาร กรมโยธาธิการและผังเมือง; 2558
- [4] Schipper H. Double-curved precast concrete elements. Research into technical viability of the flexible mould method; 2015

- [5] Peurifoy LR, Oberlender DG. Formwork for Concrete Structures 4th edition. The McGraw-Hill Companies; 2011
- [6] Ko CH, Kuo JD. Making formwork design lean. Journal of Engineering Project and Production Management. 2019; 9(1):29-47.
- [7] Brózda K, Selejdak J. Safety of Formworks in the Engineering and General Construction Sector. System Safety: Human-Technical Facility-Environment. 2019; 1(1): 284-90.
- [8] Rajeshkumar V, Anandaraj S, Kavinkumar V, et al. Analysis of factors influencing formwork material selection in construction buildings. Materials Today: Proceedings;2020.
- [9] Arumsari P, Xavier C. Cost and time analysis on the selection of formwork installation method. E&ES. 2020; 426(1): 12-42.
- [10] Hyun C, Jin C, Shen Z, et al. Automated optimization of formwork design through spatial analysis in building information modeling. Automation in Construction. 2018; 95(1):193-205.
- [11] Jean-Claude L. Formwork Pressures by Self-Compacting Concrete. Stellenbosch University. 2018:13-42
- [12] Giammatteo MM, Gregori A, Totani G. In - situ measurement of formwork pressures generated by Self-Compacting Concrete. WIT Transactions on Modelling and Simulation. 2007; 46(1):851-860.
- [13] Yaser G, Jonny N, Mats E, et al. Lateral Formwork Pressure for Self-Compacting Concrete—A Review of Prediction Models and Monitoring Technologies. MDPI stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliation. 2021; 14(1): 1-18.
- [14] Robert LP, Garold DO. Pressure of Concrete on Formwork. Formwork for Concrete Structures. 2011:7-148.
- [15] Ciribini A, Tramajoni M. High-Rise Towers an Integrated Approach between Climbing Formworks and Stationary Booms 18th. CIB World Building Congress Salford UK;2010

การปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อลดความสูญเปล่าในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์

Improvement of production process for waste reduction in auto parts manufacturing industry

วินัย หล้าวงษ์¹, โยธิน นามโสรัส¹, อภิวัฒน์ ด่านแก้ว¹, วีรพงศ์ จุลศรี^{1*}

Winai Lawong¹, Yothin Namsoros¹, Apiwat Dankeaw¹, Weerapong Julsi^{1*}

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ, คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี,
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน, วิทยาเขตสกลนคร

¹ Department of Industrial Engineering, Faculty of Industry and Technology,
Rajamangala University of Technology Isan, Sakon Nakhon Campus, Thailand

*Corresponding author. E-mail: weerapong.ju@rmu.ac.th

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้เป็นการปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อลดความสูญเปล่าในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์จากการขนย้าย และการรอคอยในกระบวนการ การขนส่งและการตรวจสอบ และการขัดเงาและการบรรจุ โดยการศึกษาเวลามาตรฐาน การคำนวณหากรอบการจับเวลาด้วยวิธีการของเมย์แท็ก (Maytag) การหาค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูล การวิเคราะห์การไหลของกระบวนการ รวมถึงหลักการวางแผนโรงงาน ผลการวิจัย พบว่า รอบการจับเวลาที่เหมาะสม คือ 30 รอบ ที่ความน่าเชื่อมั่น 95% เวลามาตรฐานในกระบวนการ การขนส่งและการตรวจสอบ หลังปรับปรุง เท่ากับ 90.83 วินาที ลดลง 24.35 วินาที (21.14%) เวลามาตรฐานในกระบวนการขัดเงาและการบรรจุ หลังปรับปรุง เท่ากับ 202.67 วินาที ลดลง 5.53 วินาที (2.65%) การวิเคราะห์การไหลของกระบวนการ พบว่า หลังปรับปรุงมีกระบวนการดำเนินงาน ระยะทางในการขนย้าย 42 เมตร ลดลง 23 เมตร

คำสำคัญ : การปรับปรุงผังการทำงาน, การลดความสูญเปล่า, การศึกษาเวลาของกระบวนการ

ABSTRACT

The aim of this research was to improve the manufacturing process for waste reduction in auto parts manufacturing during transferring, waiting, transportation, checking, polishing, and packing, via investigation of standard time, calculation of timing cycles employing Maytag method, determination of data tolerances, process flow analysis, and principles of factory planning. It was found that, after the improvement, the optimized timing cycle was 30 rounds with reliability of 95%. The standard time of the process, transferring, and checking was 90.83 s (24.35 s reduced; ca. 21.14%); meanwhile, that of polishing and packaging was 202.6

Received	09-05-2022
Revised	09-06-2022
Accepted	13-06-2022

(5.53 s reduced; ca. 2.65%). By the analysis of the process flow, the transferring distance was 42 m (23 m reduced).

Keyword: Work Flow Improvement, Waste Reduction, Process Time Study

1. บทนำ

ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์นั้น มีการขยายตัว และการแข่งขันสูงหากบริษัทใดสามารถออกแบบ และผลิตรถยนต์รุ่นใหม่ได้เร็วกว่า บริษัทคู่แข่ง ก็จะสามารถมีโอกาสทางการค้าสูงกว่า ดังนั้นผู้ประกอบการจึงต้องหาแนวทางในการปรับปรุง และพัฒนาผลิตภัณฑ์ของตนให้ทันกับการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา ตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภค และที่สำคัญ คือ ความใส่ใจด้านคุณภาพของผลิตภัณฑ์ การควบคุมต้นทุนในการผลิตและการส่งมอบที่ตรงเวลา ซึ่งจำเป็นต้องมีการปรับปรุงกระบวนการผลิต และอาศัยการบริหารจัดการที่ดี ดังนั้นจึงควรมีการแก้ไขปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อลดความสูญเปล่าที่เกิดขึ้น แต่ยังคงรักษาคุณภาพระดับคุณภาพของสินค้าให้คงเดิม เพื่อให้กระบวนการผลิตนั้นมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

ปัจจุบันได้มีการศึกษาการปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อลดความสูญเปล่าในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น พงศ์เทพ งามทวีรัตน์ [1] ใช้เทคนิคการวิเคราะห์กระบวนการผลิต เทคนิคการกำจัดความสูญเปล่า 7 ประการ และเทคนิคการวิเคราะห์เพื่อลดปริมาณของเสีย มาประยุกต์ใช้เพื่อให้กระบวนการผลิต ทำให้ประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตเพิ่มสูงขึ้น ลักษณะ อุปะทะ, คณิศร ภูมิคม [2] ได้นำความรู้ทางด้านวิศวกรรมอุตสาหการ มาประยุกต์ใช้เพื่อช่วยลดต้นทุนด้านเวลา และแรงงานให้กับผู้ประกอบการหลังจากการปรับปรุงการทำงานแล้ว สามารถลดเวลาความสูญเปล่าในการ

ทำงานได้น้อยกว่าเดิม กิตติชัย อธิกุลรัตน์ [3] ทำการปรับปรุงการติดตั้งแม่พิมพ์และหาเวลามาตรฐานติดตั้งแม่พิมพ์ หลังการปรับปรุงกระบวนการสามารถลดขั้นตอนในการติดตั้งแม่พิมพ์และลดเวลาในการติดตั้งแม่พิมพ์ พรศิริ คำหล้า และคณะ [4] ใช้วิธีการศึกษาการทำงานสามารถหาเวลามาตรฐานในกระบวนการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จ และใช้เป็นตัวกำหนดและวางแผนในการผลิต [5] มีการออกแบบ และวางผังโรงงานให้เหมาะสมกับสายการผลิต พบว่าผังโรงงานทางเลือกแบบที่ 3 เหมาะสมกับโรงงานมากที่สุด ซึ่งผังโรงงานมีระยะทางรวมในการขนส่งวัสดุโดยเฉลี่ยน้อยที่สุด

โรงงานผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ที่เป็นกรณีศึกษา นี้ยังไม่ได้มีการจัดทำเวลาในการผลิตที่เป็นมาตรฐาน โดยในการผลิตยังอาศัยความเคยชินในการผลิต ทำให้เกิดความล่าช้า โดยวิธีการหนึ่งที่ใช้ในการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน คือการประยุกต์ใช้ทฤษฎีทางวิศวกรรมอุตสาหการเพื่อปรับปรุงกระบวนการผลิต การลดความสูญเปล่าที่เกิดในกระบวนการ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาการปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อลดความสูญเปล่าในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์

2. วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้ได้ดำเนินการเครื่องมือ และเอาแนวคิดทางวิศวกรรมอุตสาหการมาประยุกต์ใช้ในการดำเนินงาน เพื่อให้เกิดประโยชน์ ดังนี้

2.1 แผนภูมิกระบวนการ (Process chart) [6]

เป็นเครื่องมือในการบันทึกข้อมูล อย่างละเอียด ประกอบไปด้วยสัญลักษณ์คำบรรยาย และลายเส้นที่บ่งบอกถึงรายละเอียดของขั้นตอนในกระบวนการผลิต ช่วยให้สามารถมองเห็นภาพของกระบวนการผลิตได้ชัดเจน ตั้งแต่ต้นจนจบเพื่อนำไปสู่การพัฒนา และปรับปรุงกระบวนการทำงานให้ดีขึ้น ซึ่งแผนภูมิที่นำมาใช้ในการดำเนินงานมี 2 แผนภูมิ ดังต่อไปนี้

2.1.1 แผนภูมิกระบวนการไหล (Flow process charts)

แผนภูมิที่นำมาใช้เพื่อทำการวิเคราะห์ขั้นตอนการไหล (Flow) ของวัตถุดิบ ชิ้นส่วน พลังงาน และอุปกรณ์ ที่เคลื่อนไปในกระบวนการพร้อมกับกิจกรรมต่างๆ โดยใช้สัญลักษณ์มาตรฐาน 5 สัญลักษณ์

2.1.2 แผนภาพการไหล (Flow diagram)

การนำมาใช้แสดงการเคลื่อนย้ายของงานและคนงานในระหว่างปฏิบัติงาน ซึ่งการสร้างแผนภาพการไหลสามารถทำได้โดยใช้แผนผัง ที่ตรงตามมาตรฐานของโรงงานหรือสถานที่จริง มีการระบุทุก ๆ ตำแหน่งของกิจกรรม แสดงเส้นทาง และทิศทางการเคลื่อนที่ของวัสดุ ส่วนใหญ่มักใช้ร่วมกับแผนภูมิกระบวนการไหลเพื่อตรวจสอบและศึกษาเส้นทางการเคลื่อนที่

2.2 หลักการคำนวณหาจำนวนครั้งในการจับเวลา

เทคนิคของการวัดผลงานเพื่อหาเวลาและอัตราการทำงาน ซึ่งการคำนวณหาจำนวนรอบในการจับเวลาแต่ละครั้งมีงานย่อยอื่นซ้อนอยู่ ดังนั้นการจับเวลาเพียงครั้งเดียวย่อมไม่เพียงพอจะใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณเวลามาตรฐานที่มีความน่าเชื่อถือโดยวิธีการหาจำนวนรอบที่เหมาะสม

สามารถทำได้ 2 วิธี ได้แก่ 1 วิธีการเปิดตารางเมย์แท็ก (Maytag) 2 วิธีพิสัย (Range)

2.3 การคำนวณหาเวลามาตรฐาน (Standard time) [7]

ค่าเวลาของพนักงาน ซึ่งได้จากการทำงานภายใต้เงื่อนไขการทำงานปกติ ด้วยอัตราความเร็วมาตรฐาน และการกำหนดวิธีการทำงานอย่างชัดเจน ซึ่งการคำนวณหาเวลามาตรฐานมีขั้นตอนในการดำเนินงาน ดังนี้

2.3.1 ประเมินอัตราเร็ว (Rating factor; RF)

การประเมินหรือลงความเห็นว่าการทำงานของคนงานภายใต้การศึกษานั้นอยู่ที่ค่าใดเมื่อเปรียบเทียบกับความเร็ว ปกติซึ่งเกณฑ์ระดับความเร็วปกติคือ อัตราการทำงานของคนงานเฉลี่ย ซึ่งมีความชำนาญในการทำงานนั้นพอสมควรทำงานภายใต้คำแนะนำที่ถูกต้อง

2.3.2 การคำนวณหาเวลาปกติ (Normal time; NT)

$$(NT) = (ST) \times (RF) \quad (1)$$

โดยที่ NT คือ เวลาปกติ (วินาที)

ST คือ เวลาตัวแทน (วินาที)

RF คือ การประเมินอัตราเร็วในการทำงาน

2.3.3 กำหนดเวลาเผื่อ (Allowance time; A)

เนื่องจากเวลาปกติที่หามาได้ในขั้นตอนที่แล้วเป็นเวลาการทำงานเพียงอย่างเดียวแต่การทำงานทุกอย่างไม่ได้ทำโดยไม่มีหยุดพักผ่อนหรือเกิดเหตุล่าช้าเลย ดังนั้นต้องมีเวลาเผื่อไว้สำหรับกรณีต่าง ๆ พนักงานจำเป็นต้องมีเวลาสำหรับทำกิจส่วนตัวสำหรับการพักผ่อน โดยทั่วไปแล้วอยู่ระหว่าง 4.5 - 6.5% แต่ในอุตสาหกรรมทั่วไป จะกำหนดไว้ที่ 5% ของเวลาทำงานทั้งหมด ค่าเผื่อส่วน

บุคคลนี้อาจเปลี่ยนไปตามสภาพแวดล้อมได้ ค่าเพื่อพื้นฐาน เป็นค่าคงที่สำหรับงานทั่ว ๆ ไปองค์การแรงงาน ระหว่างประเทศ (International labour office; ILO)

2.4 การจัดวางผังโรงงาน (Plan layout design) [8]

การวางผังโรงงานเป็นการวางแผนเพื่อจัดวางเครื่องมือ เครื่องจักร คนงาน อุปกรณ์ วัตถุดิบ สิ่งอำนวยความสะดวก และสนับสนุนในการผลิตของโรงงาน ในตำแหน่งหรือพื้นที่ที่เหมาะสม เพื่อให้การดำเนินการ ผลิตมีความปลอดภัย ประหยัด และมีประสิทธิภาพสูงสุด

2.5 วิเคราะห์ และสร้างแผนภูมิความสัมพันธ์ของกิจกรรม

ความสัมพันธ์ของแต่ละกิจกรรม โดยใช้คะแนนเป็นตัวแสดงระดับความสัมพันธ์ กิจกรรมใดมีความสัมพันธ์กันมาก ก็ให้คะแนนความสำคัญระดับสูง ในทางกลับกันกิจกรรมใดที่มีความสัมพันธ์กันน้อย ก็ให้คะแนนความสำคัญระดับต่ำ

2.6 การศึกษากระบวนการผลิตชิ้นงานตัวอย่าง

ชิ้นงานตัวอย่าง แสดงดังภาพที่ 1 ในกระบวนการพ่นสี ตั้งแต่การเตรียมชิ้นงาน ไปจนถึงการตรวจสอบชิ้นสุดท้ายก่อนที่จะส่งมอบให้กับลูกค้า โดยมีกระบวนการผลิตทั้งหมด 9 กระบวนการ

1 การเตรียมชิ้นงานดิบ (Preparing part) เป็นกระบวนการตรวจสอบ และขีดบริเวณขอบชิ้นงานชิ้นงานดิบที่ให้เรียบเนียน ป้องกันไม่ให้ชิ้นงานที่เป็นครีบ งานเสียรูป และเป็นรอยสเก็ด (Scratch) หลุดไปกระบวนการพ่นสี

2 การทำความสะอาดชิ้นงาน (Clean and air jetter) เป็นกระบวนการทำความสะอาด

ชิ้นงานโดยการใช้ น้ำยาทำความสะอาด และเครื่องเป่าลมในการทำความสะอาดเพื่อป้องกันสิ่งสกปรกต่าง ๆ เช่น เม็ดฝุ่น ขนผ้า เป็นต้น ดัดเข้าไปกับตัวผิวชิ้นงาน

3 การโหลดชิ้นงานขึ้นสายพานลำเลียง (Conveyor) เป็นการประกอบชิ้นงานใส่จิ๊ก (Jig) เพื่อเตรียมไปยังกับกระบวนการกำจัดไฟฟ้าสถิต และการพ่นสี

4 การกำจัดไฟฟ้าสถิตบนผิวชิ้นงาน (Air blow) เป็นกระบวนการกำจัดไฟฟ้าสถิตบนผิวชิ้นงาน โดยชิ้นงานจะเคลื่อนที่ผ่านหุ่นยนต์ (Robot) อาศัยแรงลมในการเป่าไอออนเซอร์ สำหรับเติมประจุไฟฟ้าที่เป็นกลางเข้าไปบนผิวชิ้นงาน เพื่อลดการดูดสิ่งสกปรกของตัวชิ้นงานเอง

5 การพ่นสี (Paint) เป็นการพ่นสีลงไปให้ตัวชิ้นงานที่ผ่านการทำความสะอาดแล้ว โดยในกระบวนการนี้จะอาศัยหุ่นยนต์ Robot เข้ามาช่วยในการพ่นสี โดยพ่นทั้งหมด 3 ชั้นสี (3 Code) ดังนี้ไพรเมอร์ (Primer), เบส (Base) และเคลียร์ (Clear)

6 การอบ (Baking part) เป็นกระบวนการที่ทำให้ชิ้นงานที่พ่นสีมีการแข็ง โดยชิ้นงานจะเคลื่อนไปตามสายพานลำเลียง (Conveyor) ผ่านห้องอบที่ 1 เป็นห้องอบร้อน และห้องอบที่ 2 เป็นห้องพ่นแบบเย็น

7 นำออกจากสายพานลำเลียง (Conveyor) และตรวจสอบชิ้นงาน (Unload and inspection Part) เป็นการนำเอาชิ้นงานที่ผ่านห้องอบแล้วออกจากสายพานลำเลียง (Conveyor) และถอดออกจากจิ๊ก (Jig) และทำการตรวจสอบชิ้นงาน

8 การขัดเงา และการบรรจุ (Polishing and packing) เป็นกระบวนการในการป้อนเก็บ

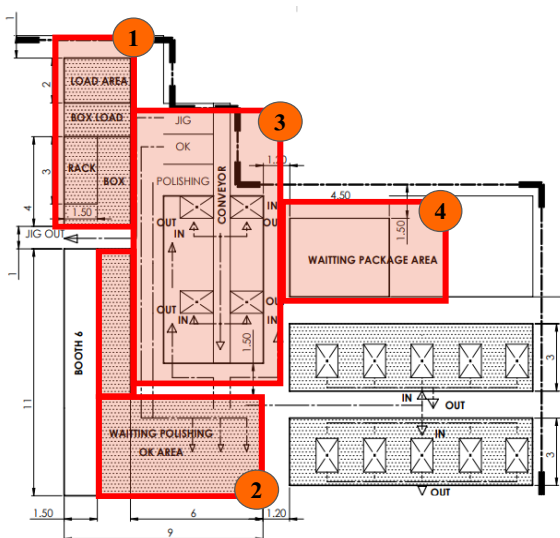
9 ตรวจสอบขั้นตอนสุดท้าย (Final inspection) การควบคุมคุณภาพ (Quality control) ทำการตรวจสอบครั้งสุดท้ายของกระบวนการผลิตก่อนจะส่งยังคลังสินค้า และส่งมอบกับลูกค้า



3. การศึกษา

3. การศึกษา

3.1 ผลการศึกษาก่อนการปรับปรุง



ปีที่ 16 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2565

1. พื้นที่สำหรับจัดเก็บลังเปล่า และชั้นวาง
งานมีพื้นที่ติดกันทำให้พนักงานในกระบวนการขนส่ง
และการตรวจสอบ (Unload and inspection) มี
ระยะทางการขนย้ายจิก (Jig) ที่ใกล้

3. เส้นทางการขนย้ายงานมีลักษณะที่
ซับซ้อน และสูญเสียเปล่า

4. พื้นที่สำหรับงานที่รอการบรรจุ (Packing) มีการจัดเก็บที่ไม่เหมาะสม และสถานะงานไม่ชัดเจน เกิดความล่าช้าในการค้นหงานเพื่อจัดส่ง

3.1.1 การศึกษาเวลา

3.1.1.1 การประมาณรอบการจับเวลา

กำหนดหน่วยของเวลาที่ศึกษา คือ วินาที (s) โดยประมาณรอบการจับเวลา คือ 10 รอบ เนื่องจากเวลาการทำงานในแต่ละรอบนั้น มีเวลาน้อยกว่า 120 วินาที ด้วยวิธีการเมย์แท็ก (Maytag) โดยมีวิธีการดังนี้

3.1.1.2 หาค่าพิสัย (R) จากสูตร

$$R = X_{max} - X_{min} \quad (2)$$

โดยที่

X_{max} คือ ค่าสูงสุดของข้อมูล

X_{min} คือ ค่าต่ำที่สุดของข้อมูล

3.1.1.3 หาค่าเฉลี่ย $\bar{x}$ ได้จากสูตร

$$\bar{x} = \frac{\sum x}{n} \quad (3)$$

โดยที่ x_i คือ ค่าเฉลี่ยเลขคณิต

n คือ จำนวนข้อมูลทั้งหมด

3.1.1.4 หาค่า $\frac{R}{\bar{x}}$ (4)

โดยที่

R คือ ค่าพิสัย

$\bar{x}$ คือ ค่าเฉลี่ย

3.1.1.5 ตารางเมย์แท็ก (Maytag)

นำค่าพิสัย และค่าเฉลี่ยที่ได้มาหารกันจากนั้นนำผลลัพธ์ที่ได้ไปเปิดในตารางเมย์แท็ก (Maytag) แสดงดังตารางที่ 1 จะได้ค่า N (จำนวน ครั้งในการจับเวลาที่เหมาะสม) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ค่าความคลาดเคลื่อน $\pm 5\%$

ตารางที่ 1 ตารางเมย์แท็ก (Maytag) [9]

$\frac{R}{\bar{x}}$	ข้อมูลจากกลุ่ม		$\frac{R}{\bar{x}}$	ข้อมูลจากกลุ่ม		$\frac{R}{\bar{x}}$	ข้อมูลจากกลุ่ม	
	5	10		5	10		5	10
0.1	3	2	0.42	52	30	0.74	162	93
0.12	4	2	0.44	57	33	0.76	171	98
0.14	6	3	0.46	63	36	0.78	180	103
0.16	8	4	0.48	68	39	0.8	190	108
0.18	10	6	0.5	74	42	0.82	199	113
0.2	12	7	0.52	80	46	0.84	209	119
0.22	14	8	0.54	86	49	0.86	18	125
0.24	17	10	0.56	93	53	0.88	229	131
0.26	20	11	0.58	100	57	0.9	239	138
0.28	23	13	0.6	107	61	0.92	250	143
0.3	27	15	0.62	114	65	0.94	261	149
0.32	30	17	0.64	121	69	0.96	273	156
0.34	34	20	0.66	129	74	0.98	284	162
0.36	38	22	0.68	137	78	1	296	169
0.38	43	24	0.7	145	83			
0.4	47	27	0.72	153	88			

จากกรณีศึกษาได้กำหนดหน่วยของเวลา คือ วินาที (s) โดยประมาณรอบการจับเวลา คือ 10 รอบ เนื่องจากเวลาการทำงานในแต่ละรอบนั้น มี

เวลาน้อยกว่า 120 วินาที ตามวิธีการของเมย์แท็ก (Maytag) พบว่าการขนส่งและการตรวจสอบ (Unload and inspection) พบว่า มีรอบการจับเวลา

สูงสุดอยู่ที่ 27 รอบ และในกระบวนการขัดเงาและ
การบรรจุ (Polishing and packing) มีรอบการจับเวลา
สูงสุดอยู่ที่ 30 รอบ

ดังนั้นในการวิจัยนี้ได้เลือกใช้การจับเวลา
ที่ 30 รอบ เพื่อให้ได้ระดับความเชื่อมั่น 95%
ค่าความคลาดเคลื่อน $\pm 5\%$

3.1.1.6 การจับเวลา

การคำนวณหารอบการจับเวลาที่เหมาะสมเพื่อให้ได้ข้อมูลที่มีความน่าเชื่อถือ ที่ 95%
คือ 30 รอบ จึงได้ทำการเก็บข้อมูลเวลาจริงของ
การทำงานทั้ง 2 กระบวนการ โดยแบ่งตามงานย่อยที่
พนักงานได้รับ

3.1.1.7 การหาค่าความคลาดเคลื่อน ของข้อมูล

หลังจากที่ได้ค่าเวลาแล้วนำมา
คำนวณเพื่อหาค่าคลาดเคลื่อนของข้อมูล (Relative
accuracy) ในแต่ละงานย่อย โดยที่มีความคลื่อน

$\pm 5\%$ ภายใน 95% นั้นหมายความว่าหาก คำนวณ
ผลลัพธ์ออกมามีค่ามากกว่า $\pm 5\%$ ต้องทำการเพิ่ม
ค่า n ออกไปเรื่อยๆ จนได้ความแม่นยำสัมพัทธ์ตาม
ต้องการเพื่อแสดงให้เห็นว่าข้อมูลของเวลาที่ได้นั้น
เชื่อถือได้จริงโดยมีสูตร ดังนี้

$$\text{ค่าความคลาดเคลื่อน} = Z_{\frac{\alpha}{2}} \left(\frac{\sigma}{\sqrt{(n-1)}} \right) \quad (5)$$

โดยที่

$$Z_{\frac{\alpha}{2}} \left(\frac{\sigma}{\sqrt{(n-1)}} \right) \quad \text{คือ ค่าสัมประสิทธิ์}$$

ความเชื่อมั่น (จากตารางการแจกแจงความน่าจะเป็น
แบบปกติมาตรฐาน)

σ คือ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

n จำนวนของข้อมูลทั้งหมด

ค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลทั้ง 2

กระบวนการ แสดงดังตารางที่ 2 และตารางที่ 3
ตามลำดับ

ตารางที่ 2 ค่าความคลาดเคลื่อนกระบวนการขนส่งและการตรวจสอบ (Unload and inspection)

การคำนวณหาค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลที่ 95% $\pm 5\%$ (Z - Tabel)							
No.	คำอธิบายการทำงาน	ค่าที่ได้จากการคำนวณ					
		α	$\frac{\alpha}{2}$	$Z_{\frac{\alpha}{2}}$	σ	$\sqrt{(n-1)}$	Confidence 95%
ผู้ดำเนินงานการขนส่ง 2	1 ถอดจิ๊ก (Jig) ออกจากชิ้นงาน	0.95	0.475	1.96	0.38	5.39	0.14
	2 เก็บจิ๊ก (Jig) รวมกันเตรียมเก็บ	0.95	0.475	1.96	0.24	5.39	0.09
	3 เก็บจิ๊ก (Jig) ใส่ลังเพื่อนำไปลอกสี	0.95	0.475	1.96	0.19	5.39	0.07
	4 ติดป้าย (Tag) วันทีผลิตบนชิ้นงาน	0.95	0.475	1.96	0.26	5.39	0.09
	5 นำจิ๊ก (Jig) ที่ใส่ลงไปเก็บในพื้นที่เก็บจิ๊ก (Jig)	0.95	0.475	1.96	3.27	5.39	1.19
	6 พนักงานเดินไปเอาลังมาเตรียมใส่ชิ้นงาน	0.95	0.475	1.96	0.68	5.39	0.25
ผู้ดำเนินงานการขนส่ง 2	1 การตรวจสอบชิ้นงาน หลังการพ่นสี	0.95	0.475	1.96	0.51	5.39	0.19
	2 แยกงานปั่นน้อยขึ้นไปในสแกนพาล์วเสียง	0.95	0.475	1.96	0.24	5.39	0.09
	3 เก็บงานตีบรรจุลงลัง	0.95	0.475	1.96	0.24	5.39	0.09
	4 ขนงานดีไปเก็บที่ท้ายไลน์ผลิต	0.95	0.475	1.96	0.85	5.39	0.31
	5 แยกงานปั่นยากลงลัง	0.95	0.475	1.96	0.16	5.39	0.06
	6 ย้ายงานปั่นยากในลัง ไปเก็บท้ายไลน์ผลิต	0.95	0.475	1.96	0.52	5.39	0.19
	7 ลงบันทึกรายงานการผลิต	0.95	0.475	1.96	3.71	5.39	1.35

ตารางที่ 3 ค่าความคลาดเคลื่อนกระบวนการขัดเงาและการบรรจุ (Polishing and packing)

การคำนวณค่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลที่ 95% +/-5% (Z - Tabel)							
No.	คำอธิบายการทำงาน	ค่าที่ได้จากการคำนวณ					
		α	$\frac{\alpha}{2}$	$Z_{\frac{\alpha}{2}}$	σ	$\sqrt{(n-1)}$	Confidence 95%
ผู้ดำเนินการขัดเงา 1	1 ไปเอาล้างจากพื้นที่เก็บลังมาเตรียมบรรจุงานดี	0.95	0.475	1.96	0.51	5.39	0.18
	2 ตรวจสอบชิ้นงานจากสายพานลำเลียง	0.95	0.475	1.96	0.26	5.39	0.10
	3 การขัดเงา (Polishing) งานปัญหาเม็ดบิ่นง่าย	0.95	0.475	1.96	13.82	5.39	5.03
	4 ตรวจสอบชิ้นงานหลังการขัดเงา (Polishing)	0.95	0.475	1.96	0.34	5.39	0.12
	5 เรียงงานใส่ลังบรรจุ	0.95	0.475	1.96	0.26	5.39	0.09
	6 ติดป้าย (Tag) การตรวจสอบ (Inspection)	0.95	0.475	1.96	0.80	5.39	0.29
	7 ย้ายงานที่บรรจุครบ ส่งการควบคุมคุณภาพ	0.95	0.475	1.96	0.69	5.39	0.25
ผู้ดำเนินการขัดเงา 2	1 ไปเอาล้างจากพื้นที่เก็บลังมาเตรียมบรรจุงานดี	0.95	0.475	1.96	0.51	5.39	0.18
	2 ตรวจสอบชิ้นงานจากสายพานลำเลียง	0.95	0.475	1.96	0.26	5.39	0.10
	3 Polishing งานปัญหาเม็ดบิ่นง่าย	0.95	0.475	1.96	10.21	5.39	3.71
	4 ตรวจสอบชิ้นงานหลังการขัดเงา (Polishing)	0.95	0.475	1.96	0.34	5.39	0.12
	5 เรียงงานใส่ลังบรรจุ	0.95	0.475	1.96	0.26	5.39	0.09
	6 ติดป้าย (Tag) การตรวจสอบ (Inspection)	0.95	0.475	1.96	0.80	5.39	0.29
	7 ย้ายงานที่บรรจุครบ ส่งการควบคุมคุณภาพ	0.95	0.475	1.96	0.69	5.39	0.25

3.1.1.8 การประเมินความเร็วในการทำงาน

การคำนวณหาเวลามาตรฐานของพนักงาน อาศัยการวิเคราะห์ประเมินค่าอัตราการทำงานแบบเวสต์ิงเฮาส์ (Westinghouse) เป็นเกณฑ์ในการประเมินความเร็ว และความชำนาญในการทำงาน โดยเกณฑ์คะแนน แสดงดังตารางที่ 4

คะแนนการประเมินอัตราความเร็วของพนักงานกระบวนการขนส่งและการตรวจสอบ (Unload and inspection) คือ พนักงานคนที่ 1 มีค่าประเมินอัตราความเร็ว เท่ากับ 0.27 ประสิทธิภาพในการทำงาน 1.27% พนักงานคนที่ 2 มีค่าประเมินอัตราความเร็ว เท่ากับ 0.30 ประสิทธิภาพในการทำงาน 1.30%

คะแนนการประเมินอัตรา

ความเร็วของพนักงานกระบวนการขัดเงาและการบรรจุ กระบวนการขัดเงาและการบรรจุ (Polishing and packing) คือ พนักงานคนที่ 1 มีค่าประเมินอัตราความเร็ว เท่ากับ 0.27 ประสิทธิภาพในการทำงาน 1.27% พนักงานคนที่ 2 มีค่าประเมินอัตราความเร็ว เท่ากับ 0.30 ประสิทธิภาพในการทำงาน 1.30%

การให้คะแนนสามารถนำมาคำนวณหาเวลาปกติ (Normal time) และเวลามาตรฐาน (Standard time) โดยกำหนดเวลาเผื่อสำหรับบุคคล 5% เวลาเผื่อสำหรับความล่าช้า 5%

ตารางที่ 4 องค์ประกอบต่าง ๆ ในการประเมินความเร็วตามวิธีของเวสต์ิงเฮาส์ (Westinghouse)

ทักษะ (Skill)			ความพยายาม (Effort)		
0.15	A1	ชำนาญสูงมาก	0.13	A1	ชำนาญสูงมาก
0.13	A2		0.12	A2	
0.11	B1	ดีมาก	0.1	B1	ดีมาก
0.08	B2		0.08	B2	
0.06	C1	ดี	0.05	C1	ดี
0.03	C2		0.02	C2	
0	D	เฉลี่ย	0	D	เฉลี่ย
-0.05	E1	พอใช้	-0.04	E1	พอใช้
-0.1	E2		-0.18	E2	
-0.16	F1	ควรปรับปรุง	-0.12	F1	ควรปรับปรุง
-0.22	F2		-0.17	F2	
สภาพแวดล้อมในการทำงาน (Condition)			ความสม่ำเสมอ (Consistency)		
0.06	A	ดีเยี่ยม	0.04	A	ดีเยี่ยม
0.04	B	ดีมาก	0.03	B	ดีมาก
0.02	C	ดี	0.01	C	ดี
0	D	เฉลี่ย	0	D	เฉลี่ย
-0.03	E	พอใจ	-0.02	E	พอใจ
-0.07	F	ควรปรับปรุง	-0.04	F	ควรปรับปรุง

3.1.1.9 การคำนวณหาเวลาปกติ

(Normal time)

การจับเวลา และประเมิน

ความเร็วในการทำงานของพนักงาน สามารถ
คำนวณหาค่า เวลาปกติของแต่ละงานย่อยโดยการนำ
เวลาตัวแทนมาคูณกับค่าประเมินอัตราเร็วในการ
ทำงานของพนักงานซึ่งมีสูตรการคำนวณดังสมการที่ 1

3.1.1.10 กำหนดเวลาเผื่อ (Allowance

time)

ความต้องการพนักงาน เช่น

การพักเข้าห้องน้ำ ความล่าช้าจากการทำงานหรือเกิด
การรบกวนงานต่าง ๆ เป็นต้น ซึ่งสภาพการทำงานแต่
ละอย่างเป็นสาเหตุของการใช้เวลาส่วนตัวไม่
เหมือนกัน ในการศึกษาที่มีการพิจารณาดังนี้

1. เวลาเพื่อสำหรับส่วนบุคคล

- เป็นเวลาเผื่อเพื่อให้พนักงานทำ

กิจส่วนตัว

- โดยทั่วไปแล้วจะอยู่ระหว่าง 4.5

- 6.5% แต่ในอุตสาหกรรมทั่วไปมักกำหนดไว้ที่ 5%
ของเวลาทำงานทั้งหมด

2. เวลาเพื่อความล่าช้าสำหรับ

งานนั้น

วิธีการกำหนดค่าเผื่อสำหรับ

ความล่าช้า

- การศึกษากระบวนการผลิต

(Production study)

- ใช้วิธีการสุ่มงาน (Work

sampling)

3.1.1.11 คำนวณหาเวลามาตรฐาน
(Standard time; Std)

หลังทราบเวลาปกติ (Normal time) และเวลาเผื่อ (Allowances time) นำเอาค่าเวลาปกติมาคำนวณหาเวลามาตรฐานของการทำงานได้ ดังนี้

$$\text{เวลามาตรฐาน} = \text{เวลาปกติ} + \text{ค่าเผื่อต่าง ๆ} \quad (6)$$

เวลามาตรฐานที่คำนวณได้ พบว่า
ในกระบวนการขนส่งและการตรวจสอบ (Unload and Inspection) มีเวลามาตรฐานเฉลี่ย เท่ากับ 115.18 วินาที และกระบวนการขัดเงาและการบรรจุ (Polishing and packing) มีเวลามาตรฐานเฉลี่ย เท่ากับ 208.20 วินาที แสดงดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 เวลามาตรฐานก่อนปรับปรุง

		กระบวนการ (Process)		การขนส่งและการตรวจสอบ (Unload and inspection)		การขัดเงาและการบรรจุ (Polishing and packing)	
		ผู้ดำเนินการ (Operator)		1	2	1	2
การคำนวณหาเวลามาตรฐาน	เวลาเฉลี่ยบุคคล (Avg.T.)		64.26	98.31	155.43	138.96	
	เวลาเฉลี่ย (Avg.T.)		81.29		147.20		
	อัตรา ความเร็ว	Skill	B1 (0.11)	A1 (0.15)	A1 (0.15)	B1 (0.11)	
		Effort	A1 (0.13)	B1 (0.10)	B1 (0.10)	A1 (0.13)	
		Condition	C (0.02)	C (0.02)	C (0.02)	C (0.02)	
		Consistency	C (0.01)	B (0.03)	B (0.03)	C (0.01)	
	Rating		1.27	1.30	1.30	1.27	
	เวลาปกติบุคคล (Nm.T.)		81.61	127.80	202.06	176.48	
	เวลาปกติเฉลี่ย (Nm.T.Avg.)		104.71		189.27		
	เวลาเผื่อ	บุคคล	5%	5%	5%	5%	
		ล่าช้า	5%	5%	5%	5%	
	เวลามาตรฐาน (Std.T.)		89.77	140.58	222.26	194.13	
	เวลามาตรฐานเฉลี่ย		115.18		208.20		

3.2 การวิเคราะห์การไหลของกระบวนการ
เวลามาตรฐานของการทำงานในแต่ละงานย่อยแล้ว และได้คำนวณหาเวลาการทำงานของกระบวนการแล้ว สามารถนำมาวิเคราะห์แผนภูมิการไหลของกระบวนการ (Process flow charts)

พบว่า มีกระบวนการดำเนินงาน 4 กระบวนการ การขนย้าย 6 กระบวนการ การรอคอย 4 กระบวนการ การตรวจสอบ 1 กระบวนการ เวลาที่ใช้ในการทำงานทั้งหมด 424.31 วินาที และระยะทางทั้งหมด 62 เมตร แสดงดังตารางที่ 6

ตารางที่ 6 แผนภูมิการไหลของกระบวนการก่อนปรับปรุง

แผนภูมิการไหลของกระบวนการ (Process flow charts)								
แผนภูมิหมายเลข 31012022 แผ่นที่ 2	สรุปผล							
	กิจกรรม	ปัจจุบัน	หลังปรับปรุง					ลดลง
กิจกรรม : การขนส่งและการตรวจสอบ (Unload and inspection) - การขัดเงา (Polishing) วิธีการทำงาน : ปัจจุบัน	การดำเนินงาน ○	4						
	การขนส่ง ➡	6						
	การรอคอย D	4						
	การตรวจสอบ □	1						
	การเก็บรักษา ▽							
สถานที่ : Paint section	ระยะทาง (เมตร)	55						
พนักงาน เวลา	เวลา (นาฬิกา)	424.31						
บันทึกโดย Yothin Namsoros	ต้นทุน :							
วันที่อนุมัติโดย วันที่ 31/01/2022	ค่าแรง ค่าวัสดุ							
	รวม							
คำอธิบาย	เวลา (วินาที)	ระยะทาง (เมตร)	สัญลักษณ์					หมายเหตุ
			○	➡	D	□	▽	
1. ตรวจสอบชิ้นงาน	7.4	-	○	➡	D	■	▽	
2. บรรจุงานดีลงถัง	4.1	0.5	●	➡	D	□	▽	
3. ขนย้ายไปพื้นที่รองงานดี	33.9	9	○	➡	D	□	▽	
4. ติดป้าย (Tag) /ส่งการควบคุมคุณภาพ (Quality control)	4.2	3	○	➡	D	□	▽	
5. ปล่องงานการขัดเงา (Polishing) ขึ้น สายพานลำเลียง (Conveyor)	96.71	-	●	➡	D	□	▽	
6. การขัดเงา (Polishing)	26.5	13	●	➡	D	□	▽	
7. ติดป้าย (Tag) /ส่งการควบคุมคุณภาพ (Quality Control)	-	-	○	➡	D	□	▽	
8. รอติดป้าย (Tag) /การควบคุมคุณภาพ (Quality control)	4	0.5	●	➡	D	□	▽	
9. เก็บงานการขัดเงา (Polishing) ยาก ลงถัง	26.5	9	○	➡	D	□	▽	
10. ขนย้ายไปท้ายไลน์ผลิต	-	-	○	➡	●	□	▽	
11. รอการขัดเงา (Polishing)	26.5	9	○	➡	D	□	▽	
12. ขนไปการขัดเงา (Polishing)	165.3	-	●	➡	D	□	▽	
13. Polishing งาน	-	-	○	➡	●	□	▽	
14. รอติดป้าย (Tag) /ส่งการควบคุม คุณภาพ (Quality control)	29.2	11	○	➡	D	□	▽	
15. รอการตรวจสอบ (Inspection) /ส่ง การควบคุมคุณภาพ (Quality control)			○	➡	D	□	▽	
รวม	424.31	55	4	6	4	1		

3.3 การหาเวลามาตรฐานหลังการปรับปรุง
การปรับปรุงผังการผลิตใหม่ ได้มีการหา
เวลามาตรฐานหลังการปรับปรุงเพื่อให้ทราบถึงค่า
เวลาที่เปลี่ยนไปของกระบวนการ พบว่า ใน
กระบวนการขนส่งและการตรวจสอบ (Unload and

inspection) มีเวลามาตรฐานเฉลี่ย เท่ากับ 90.83
วินาที และกระบวนการขัดเงาและการบรรจุ
(Polishing and packing) มีเวลามาตรฐานเฉลี่ย
เท่ากับ 202.67 วินาที แสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 เวลามาตรฐานหลังปรับปรุง

		กระบวนการ (Process)		การขนส่งและการตรวจสอบ (Unload and inspection)		การขัดเงาและการบรรจุ (Polishing and packing)	
		ผู้ดำเนินการ (Operator)		1	2	1	2
เวลาเฉลี่ยบุคคล (Avg.T.)				37.20	90.69	151.52	135.05
เวลาเฉลี่ย (Avg.T.)				63.95		143.29	
อัตรา ความเร็ว	Skill			B1 (0.11)	A1 (0.15)	A1 (0.15)	B1 (0.11)
	Effort			A1 (0.13)	B1 (0.10)	B1 (0.10)	A1 (0.13)
	Condition			C (0.02)	C (0.02)	C (0.02)	C (0.02)
	Consistency			C (0.01)	B (0.03)	B (0.03)	C (0.01)
Rating				1.27	1.30	1.30	1.27
เวลาปกติบุคคล (Nm.T.)				47.24	117.90	196.98	171.51
เวลาปกติเฉลี่ย (Nm.T.Avg.)				82.57		184.24	
เวลาเพื่อ	บุคคล			5%	5%	5%	5%
	ล่าช้า			5%	5%	5%	5%
เวลามาตรฐาน (Std.T.)				51.97	129.69	216.67	188.66
เวลามาตรฐานเฉลี่ย				90.83		202.67	

เวลามาตรฐานหลังปรับปรุงกระบวนการ
สามารถวิเคราะห์แผนภูมิการไหลของกระบวนการ
เพื่ออธิบายเกี่ยวกับการลดการเคลื่อนย้าย และ
การรอคอยงาน แสดงดังตารางที่ 8

จากตารางที่ 8 การวิเคราะห์แผนภูมิ
การไหลของกระบวนการหลังปรับปรุง พบว่า มี

กระบวนการดำเนินงาน 6 กระบวนการ การขนย้าย
5 กระบวนการ การรอคอย 1 กระบวนการ
การตรวจสอบ 1 กระบวนการ เวลาที่ใช้ในการทำงาน
ทั้งหมด 447.21 วินาที และระยะทางทั้งหมด 45
เมตร

ตารางที่ 8 แผนภูมิการไหลของกระบวนการหลังปรับปรุง

แผนภูมิการไหลของกระบวนการ (Process flow charts)								
แผนภูมิหมายเลข 3101202202 แผ่นที่ 2	สรุปผล							
	กิจกรรม	ปัจจุบัน	หลังปรับปรุง					ลดลง
กิจกรรม : การขนส่งและการตรวจสอบ (Unload and inspection) - การขัดเงา (Polishing) วิธี การทำงาน : หลังปรับปรุง	การดำเนินงาน ○	4	6					+2
	การขนส่ง ➡	6	5					1
	การรอคอย D	4	1					3
	การตรวจสอบ □	1	1					0
	การเก็บรักษา ▽							
สถานที่ : Paint section	ระยะทาง (เมตร)	62	45					17
พนักงาน เวลา	เวลา (วินาที)	424.31	447.2					+22.9
บันทึกโดย Yothin Namsoros วันที่ 31/02/2022 อนุมัติโดย วันที่ 31/01/2022	ต้นทุน :							
	ค่าแรง ค่าวัสดุ							
	รวม							
คำอธิบาย	เวลา (วินาที)	ระยะทาง (เมตร)	สัญลักษณ์					หมายเหตุ
			○	➡	D	□	▽	
1. ตรวจสอบชิ้นงาน	7.4	-	○	➡	D	■	▽	
2. บรรจุงานดีลงถัง	4.1	0.5	●	➡	D	□	▽	
3. ขนย้ายไปพื้นที่งานตี	33.9	13	○	➡	D	□	▽	
4. รอดัดป้าย (Tag)	-	-	○	➡	●	□	▽	
5. ปล่องงานการขัดเงา (Polishing) ขึ้นสายพาน ลำเลียง (Conveyor)	4.2	3	○	➡	D	□	▽	
6. การขัดเงา (Polishing)	96.7	-	●	➡	D	□	▽	
7. รอดัดป้าย (Tag)	30	-	●	➡	D	□	▽	
8. ส่งการควบคุมคุณภาพ (Quality control)	29.2	15	○	➡	D	□	▽	
9. เก็บงานการขัดเงา (Polishing) ยาก ลงถัง	4	0.5	●	➡	D	□	▽	
10. ขนย้ายไปพื้นที่รองรับการขัดเงา (Polishing)	13.2	5	○	➡	D	□	▽	
11. การขัดเงา (Polishing) งาน	165.3	-	●	➡	D	□	▽	
12. ดัดป้าย (Tag) งานตี + การขัดเงา (Polishing)	30	-	●	➡	D	□	▽	
13. ส่งการควบคุมคุณภาพ (Quality control)	29.2	8	○	➡	D	□	▽	
รวม	447.21	45	6	5	1	1		0

4. สรุปผลการวิจัย

การศึกษานี้จัดทำขึ้นเพื่อแก้ไขการปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อลดความสูญเสียในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์จากการรวบรวมข้อมูล และวิเคราะห์ข้อมูลดังกล่าว

ข้างต้นได้ผลลัพธ์ ดังนี้

4.1 การประมาณรอบการจับเวลาเริ่มต้นจากการคำนวณ และวิเคราะห์ด้วยวิธีการเมย์แท็ก (Maytag) พบว่า เพื่อให้ได้ค่าความเชื่อมั่นของข้อมูล ที่ $95\% \pm 0.5\%$ ได้เลือกจำนวนครั้งในการเก็บข้อมูล 30 รอบ

4.2 ผลการจับเวลา เพื่อกำหนดหาเวลามาตรฐานก่อนปรับปรุง โดยอาศัยการประเมินอัตราการทำงานแบบวิธีของเวสต์ิงเฮาส์ (Westinghouse) ได้ผลลัพธ์ คือ กระบวนการขนส่งและการตรวจสอบ (Unload and inspection) มีเวลามาตรฐานเฉลี่ย เท่ากับ 115.18 วินาที และกระบวนการขัดเงาและการบรรจุ (Polishing and packing) มีเวลามาตรฐานเฉลี่ย เท่ากับ 208.20 วินาที

4.3 การวางแผน และปรับปรุงกระบวนการผลิต กำหนดหาเวลามาตรฐาน ได้ผลลัพธ์ คือ กระบวนการขนส่งและการตรวจสอบ (Unload and inspection) มีเวลามาตรฐานเฉลี่ย เท่ากับ 90.83 วินาที ลดลงจากเดิม 24.35 วินาที (21.14%) และกระบวนการขัดเงาและการบรรจุ (Polishing and packing) มีเวลามาตรฐานเฉลี่ย เท่ากับ 202.67 วินาที ลดลงจากเดิม 5.53 (2.65%)

4.4 แผนภูมิการไหลก่อนปรับปรุงกระบวนการพบว่า พบว่า มีกระบวนการดำเนินงาน 4 กระบวนการ การขนย้าย 6 กระบวนการ การรอคอย 4 กระบวนการ การตรวจสอบ 1 กระบวนการ เวลาที่ใช้ในการทำงานทั้งหมด 424.31 วินาที และระยะทางทั้งหมด 62 เมตร

4.5 แผนภูมิการไหลหลังปรับปรุงกระบวนการพบว่า มีกระบวนการดำเนินงาน 6 กระบวนการ เพิ่มขึ้นจากเดิม 2 กระบวนการ การขนย้าย 5 กระบวนการ ลดลงจากเดิม 1 กระบวนการ การรอคอย 1 กระบวนการ ลดลงจากเดิม 3 กระบวนการ การตรวจสอบ 1 กระบวนการ เวลาที่ใช้ในการทำงานทั้งหมด 447.21 วินาที เพิ่มขึ้นจากเดิม 22.90 วินาที และระยะทางทั้งหมด 45 เมตร ลดลงจากเดิม 17 เมตร

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณบริษัท แอมพาส อินดัสตรี จำกัด ที่ได้ให้ข้อมูลวิจัย และสาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร ที่สนับสนุนเครื่องมืออุปกรณ์ในงานวิจัยครั้งนี้

6. อ้างอิง

- [1] พงศ์เทพ งามทวีรัตน์. การวิเคราะห์เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต กรณีศึกษา: บริษัท ไฮยาเลนซ์ ไทยแลนด์ จำกัด. [ปริญาบริหารธุรกิจมหาบัณฑิต]. ปทุมธานี: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี; 2557.
- [2] คณิศร ภูนิคม. การปรับปรุงประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตด้วยเทคนิคการปรับปรุงงาน กรณีศึกษา: โรงงานน้ำดื่มใบไม้เขียว. การประชุมวิชาการช่างงานวิศวกรรมอุตสาหการ; 12-15 กรกฎาคม ค.ศ. 2560; เชียงใหม่ : มหาวิทยาลัยเชียงใหม่; 2560. น. 150-155.
- [3] กิตติชัย อธิกุลรัตน์. การศึกษาเวลามาตรฐานการติดตั้งแม่พิมพ์กรณีศึกษา บริษัทผลิตถุงพลาสติก. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลธัญบุรี; 2562: 17(1).77-90.
- [4] พรศิริ คำหล้า และคณะ. การศึกษาเวลามาตรฐานในกระบวนการผลิตคอนกรีตผสมเสร็จด้วยการจับเวลาโดยตรง. Industrial Technology Journal; 2564:6(2).41-51.
- [5] ลักษณ์ อุปะทะ. การออกแบบและวางแผนโรงงานของ ห้างหุ้นส่วนจำกัด ที.ที.เอ็น.สแตนเลส. [ปริญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต]. นครปฐม: มหาวิทยาลัยศิลปากร; 2558.

- [6] จันทศิริ สิงห์เถื่อน. การวิเคราะห์กระบวนการ. [อินเทอร์เน็ต]. 2551. [สืบค้นเมื่อ 25 มกราคม 2565]. จาก: http://pirun.ku.ac.th/~fengcsr/courses/2008_01/206341/ch8.pdf.
- [7] จุลลดา จุลพันธ์ และคณะ. การศึกษาด้านเวลาของช่างในกระบวนการเปลี่ยนเครื่องยนต์. [ปริญญาวิทยาศาสตร์บัณฑิต]. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์; 2553.
- [8] สมศักดิ์ ตริสสัย. การออกแบบและวางผังโรงงาน. พิมพ์ครั้งที่ 10. กรุงเทพฯ: สมาคมส่งเสริมเทคโนโลยี (ไทย-ญี่ปุ่น); 2548.
- [9] รัชต์วรรณ กาญจนปัญญาคม. การศึกษางานอุตสาหกรรม. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ท็อป; (2553).

คำแนะนำสำหรับผู้เขียน

วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ รับบทความทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ต้องเป็นต้นฉบับ ไม่เคยตีพิมพ์หรือเผยแพร่ที่ไหนมาก่อน มีจุดประสงค์เพื่อเผยแพร่ความรู้ และผลงานวิชาการทางวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และมีการตรวจสอบคุณภาพอย่างเคร่งครัด

1. หลักเกณฑ์การส่งบทความ

1.1 บทความเปิดรับทั้งจากบุคคลภายในและภายนอกมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

1.2 บทความมีรูปแบบการเขียนตามที่กำหนดไว้

1.3 บทความวิชาการต้องมีความยาวประมาณ 12-20 หน้า ในรูปแบบ 1 คอลัมน์

บทความวิจัย ต้องมีความยาวประมาณ 10-15 หน้า ในรูปแบบ 1 คอลัมน์

1.4 การส่งบทความ เพื่อผ่านการพิจารณาก่อนกรองและประเมินคุณภาพจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้องผ่าน รูปแบบ Online

โดยจัดส่งไฟล์อิเล็กทรอนิกส์ผ่าน <https://www.tci-thaijo.org/index.php/rmutk> เริ่มจากการกรอกข้อมูลตามแบบฟอร์มส่งบทความเพื่อพิจารณาให้สมบูรณ์ บทความจะได้รับการพิจารณาก่อนกรองจากผู้ทรงคุณวุฒิ และเมื่อบทความได้รับการแก้ไข (หากมี) อย่างเหมาะสม ผู้เขียนจะต้องส่งบทความเข้ามายัง <https://www.tci-thaijo.org/index.php/rmutk> เพื่อดำเนินการในส่วนอื่นต่อไป

2. ประเภทของบทความที่ตีพิมพ์

บทความที่ตีพิมพ์ในวารสารมี 2 ประเภท คือ

2.1 บทความวิจัย (Research Paper) เป็นบทความที่มีลักษณะและรูปแบบการวิจัยตามหลักวิชาการ เช่น ตั้งสมมติฐาน โดยระบุวัตถุประสงค์ที่ชัดเจน ได้ค้นคว้าทดลองอย่างมีระบบ และสรุปผลการวิจัยที่นำไปใช้ประโยชน์ต่อไป

2.2 บทความวิชาการ (Academic Paper) เป็นบทความที่มีลักษณะเชิงวิเคราะห์หรือวิจารณ์ จากการทบทวนเอกสาร จากประสบการณ์หรือความชำนาญของผู้เขียน และเสนอแนวคิดใหม่บนพื้นฐานวิชาการ อันก่อให้เกิดองค์ความรู้หรือสามารถประยุกต์ใช้ประโยชน์

3. รูปแบบการพิมพ์บทความ

3.1 ระยะขอบ

ขอบบน (Top Margin) 1 นิ้ว หรือ 2.54 ซม.

ขอบล่าง (Bottom Margin) 0.7 นิ้ว หรือ 2 ซม.

ขอบขวา (Right Margin) 0.7 นิ้ว หรือ 2 ซม.

ขอบซ้าย (Left Margin) 0.7 นิ้ว หรือ 2 ซม.

3.2 กระดาษ

ขนาด B5 (JIS) 18.2 x 25.7 ซม.

3.3 รูปแบบตัวอักษร

บทความภาษาไทย ใช้ TH SarabunPSK

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ Time New Roman

3.4 ชื่อเรื่อง

บทความภาษาไทย ใช้ชื่อเรื่องทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ขนาด 16 ตัวหนา (พิมพ์กลางหน้ากระดาษควรเป็นชื่อที่สั้น กระชับ ได้ใจความตรงกับวัตถุประสงค์และเนื้อเรื่อง)

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ชื่อเรื่อง ขนาด 16 ตัวหนา (พิมพ์กลางหน้ากระดาษ)

3.5 ชื่อผู้เขียนและชื่อผู้ร่วมงาน

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 14 ตัวหนา (พิมพ์กลางหน้ากระดาษ)

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 12 ตัวหนา (พิมพ์กลางหน้ากระดาษ)

3.6 สถานที่ทำงาน เบอร์โทรศัพท์ และ E-mail

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 12 ตัวปกติ (พิมพ์กลางหน้ากระดาษ)

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 10 ตัวปกติ (พิมพ์กลางหน้ากระดาษ)

3.7 คำว่า บทคัดย่อ/Abstract

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 16 ตัวหนา

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 12 ตัวหนา

3.8 เนื้อความใน บทคัดย่อ/Abstract

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 14 ตัวปกติ (พิมพ์แบบเต็มขอบ)

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 11 ตัวปกติ (พิมพ์แบบเต็มขอบ)

3.9 เนื้อความทั้งหมด (แบ่งเป็น 2 คอลัมน์ ระยะห่างระหว่างคอลัมน์ 0.3 นิ้ว หรือ 0.7 ซม.)

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 14 ตัวปกติ

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 11 ตัวปกติ

3.10 ชื่อหัวเรื่องใหญ่

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 16 ตัวหนา (พิมพ์แบบชิดซ้าย)

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 12 ตัวหนา (พิมพ์แบบชิดซ้าย)

3.11 ชื่อหัวเรื่องย่อย

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 14 ตัวหนา (พิมพ์แบบชิดซ้าย)

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 11 ตัวหนา (พิมพ์แบบชิดซ้าย)

3.12 คำว่า กิตติกรรมประกาศ/Acknowledgement และคำว่า เอกสารอ้างอิง/Reference

(ใส่หมายเลขลำดับหัวเรื่องด้วย)

บทความภาษาไทย ใช้ขนาด 16 ตัวหนา

บทความภาษาอังกฤษ ใช้ขนาด 12 ตัวหนา

3.13 สมการหรือพจน์ทางคณิตศาสตร์ที่ซับซ้อน

ควรเขียนโดยใช้ Equation Editor โดยจัดแยกบรรทัด และมีเลขกำกับอยู่ในวงเล็บเล็ก จัดพิมพ์ด้วย Microsoft Word

4. ส่วนประกอบของบทความแต่ละประเภท

4.1 บทความวิจัย

A. ส่วนปก

1. **ชื่อบทความ (Title)** ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ควรกะทัดรัด ไม่ยาวเกินไป ชื่อเรื่องต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ
2. **ชื่อผู้เขียน (Authors)** ชื่อเต็ม นามสกุลเต็ม ของผู้เขียนทุกคน สำหรับผู้เขียนประสานงานให้ใส่ที่อยู่ให้ละเอียด พร้อมทั้งหมายเลขโทรศัพท์/โทรสาร และ E-mail address ที่สามารถติดต่อได้
3. **ตัวเลขยก** ให้เขียนไว้บนนามสกุล เพื่อระบุที่อยู่ของผู้เขียน
4. **บทคัดย่อ (ABSTRACT)** ควรจัดทำเป็นร้อยแก้วย่อหน้าเดียว สั้น ตรงประเด็น ครอบคลุมสาระสำคัญของการศึกษา ได้แก่ วัตถุประสงค์ วิธีการ ผลการวิจัยและการอภิปรายผล เป็นต้น ถ้าบทความเป็นภาษาไทยจะต้องมีบทคัดย่อทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ โดยให้ภาษาไทยขึ้นก่อน มีความยาวไม่เกิน 1,000 คำ
5. **คำสำคัญ (keywords)** ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ เป็นคำสำคัญที่สามารถใช้ในการสืบค้น ในระบบฐานข้อมูล

หมายเหตุ : เนื้อหาส่วนปกจะต้องเขียนให้อยู่ในกระดาด จำนวน 1 หน้า เท่านั้น

B. ส่วนเนื้อหา

1. **บทนำ (INTRODUCTION)** เพื่ออธิบายถึงความสำคัญของปัญหา และวัตถุประสงค์ของการวิจัย รวมถึงการทบทวนวรรณกรรม และเอกสารที่เกี่ยวข้อง
2. **วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ (MATERIALS AND METHODS)/วิธีดำเนินการวิจัย (RESEARCH METHODOLOGY)** อธิบายเครื่องมือและวิธีการดำเนินการวิจัยให้ชัดเจน
 - บทความวิจัยด้านวิทยาศาสตร์ ควรอธิบายเกี่ยวกับเครื่องมือ อุปกรณ์ สารเคมี และวิธีการที่ใช้ในการวิจัย
3. **ผลการวิจัยและอภิปรายผล/ ผลการทดลองและอภิปรายผล (RESULT AND DISCUSSION)** เสนอผลการทดลอง อย่างชัดเจน และตรงประเด็น ควรมีรูปภาพ/หรือตารางประกอบ การอธิบายผลในตารางและรูปภาพ ต้องไม่ซ้ำซ้อนกัน รูปภาพและตารางของบทความที่เป็นภาษาไทย ให้บรรยายเป็นภาษาไทย รูปภาพและตารางของบทความที่เป็นภาษาอังกฤษ ให้บรรยายเป็นภาษาอังกฤษ

- เป็นการอภิปรายผลการวิจัยว่าเป็นไปตามสมมติฐานที่ตั้งไว้หรือไม่เพียงใด และควรอ้างอิงทฤษฎีหรือเปรียบเทียบการทดลองของผู้อื่นที่เกี่ยวข้องประกอบ เพื่อให้ผู้อ่านเห็นด้วยตามหลักการหรือคัดค้านทฤษฎีที่มีอยู่เดิม รวมทั้งแสดงให้เห็นถึงการนำไปใช้ประโยชน์ และการให้ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยในอนาคต
- รูปภาพ/กราฟ ให้อยู่ในเนื้อเรื่องของบทความ ขนาดตัวอักษรสามารถอ่านได้ชัดเจน เหมาะสมกับขนาดของรูปภาพ/กราฟ โดยบันทึกเป็นไฟล์ที่มีนามสกุล JPG มีความละเอียดไม่ต่ำกว่า 300 dpi เท่านั้น ถ้าเป็นภาพถ่ายกรุณาส่งภาพต้นฉบับ และในกรณีที่ เป็นรูปถ่ายเส้นให้วาดโดยใช้หมึกสีดำที่มีความคมชัด หมายเลขรูปภาพ/กราฟให้เป็นเลขอารบิก และอยู่ด้านล่างของรูปภาพ/กราฟ
- ตาราง ให้อยู่ในเนื้อเรื่องของบทความ หมายเลขตารางให้เป็นเลขอารบิก และอยู่ด้านบนของตาราง

4. **บทสรุป (CONCLUSION)** สรุปประเด็น และสาระสำคัญที่ได้จากการวิจัย
5. **กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements)** เป็นการแสดงความขอบคุณแก่ผู้ให้ความช่วยเหลือให้การวิจัยสำเร็จลุล่วงไปด้วยดี เพียงสั้นๆ (อาจมีหรือไม่ก็ได้)
6. **เอกสารอ้างอิง (REFERENCES)** เป็นรายการเอกสารอ้างอิงที่ใช้เป็นหลักในการค้นคว้าวิจัยที่ได้รับการตรวจสอบเพื่อนำมาเตรียมรายงาน และมีการอ้างอิงถึงเฉพาะเอกสารที่ปรากฏในบทความเท่านั้น การอ้างอิงให้จัดเรียงตามลำดับที่อ้างอิงเป็นตัวเลขในเครื่องหมาย [x] และให้เริ่มต้นเรียงลำดับเอกสารจากที่พบในเนื้อหา ก่อนเป็น [1] หากผู้เขียนมีมากกว่า 3 คน ให้ใส่ชื่อ 3 คนแรก แล้วตามด้วย และคณะหรือ et al.

การอ้างอิงเอกสารในเนื้อเรื่องของบทความ (In-text Citations) การอ้างอิงเอกสารในเนื้อเรื่อง ให้ใช้ระบบแวนคูเวอร์ (Vancouver style) สามารถดูรายละเอียดเพิ่มเติมได้ที่

<http://library.md.chula.ac.th/guide/vancouver2011.pdf>

ตัวอย่างการเขียนเอกสารอ้างอิง

หนังสือหรือตำรา

รูปแบบพื้นฐาน ชื่อผู้แต่ง (Author)./ชื่อหนังสือ (Title of the book)./ครั้งที่พิมพ์ (Edition)./เมืองที่พิมพ์ (Place of Publication):สำนักพิมพ์ (Publisher);ปี (Year).

- Janeway CA, Travers P, Walport M, Shlomchik M. Immunobiology. 5th ed. New York: Garland Publishing; 2001.

- รังสรรค์ ปัญญาญะ. โรคติดเชื้อของระบบประสาทกลางในประเทศไทย. กรุงเทพฯ: เรือนแก้วการพิมพ์; 2536.

บทความจากวารสาร (Articles in Journals)

รูปแบบพื้นฐาน ชื่อผู้แต่ง(Author)/ชื่อบทความ(Title of the article)/ชื่อวารสาร(Title of the Journal)/ปีที่พิมพ์(Year);เล่มที่ของวารสาร(Volume):หน้า(Pages).

- ขนิษฐา ดำรงกิจ, ใหม่ น้อยพิทักษ์, วิบุญ ตั้งวโรตมณกุล และคณะ.การศึกษาสมบัติทางกลและส่วนผสมทาง เคมีของรอยเชื่อมเหล็กกรางรถไฟ. วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ. 2561;12(1):119-31.
- White AR, Treenate D, Kiatgungwalgrai A, et al. The effects of accent familiarity on english as a foreign language students' word recognition and comprehension of the english language. UTK Res J. 2559;10(2):21-30.

เอกสารอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Material)

รูปแบบพื้นฐาน ชื่อผู้แต่ง (Author)/ชื่อบทความ (Title of the article) [ประเภทของสื่อ/วัสดุ]/สถานที่พิมพ์: สำนักพิมพ์; ปีพิมพ์ (Year) [เข้าถึงเมื่อ/cited ปี เดือน วันที่]/จาก (Available from): <http://.....>

- Foley KM, Gelband H, editors. Improving palliative care for cancer [Internet]. Washington: National Academy Press; 2001 [cited 2002 Jul 9]. Available from: <https://www.nap.edu/catalog/10149/improving-palliative-care-for-cancer>.
- “กำเนิด” ระบบหลักประกันสุขภาพถ้วนหน้า มิติใหม่แห่งการบริการด้านสาธารณสุขเพื่อคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้นของคนไทย [อินเทอร์เน็ต]. นนทบุรี: สปสช.; 2552. [เข้าถึงเมื่อ 25 มีนาคม 2554]. จาก: www.localfund.in.th/files/NHSO-intro1-6.pdf

การอ้างอิงบทความที่นำเสนอในการประชุม หรือสรุปผลการประชุม (Conference paper)

รูปแบบพื้นฐาน ชื่อผู้เขียน./ชื่อเรื่อง./ใน(In):/ชื่อบรรณาธิการ./บรรณาธิการ./ชื่อหนังสือ./ชื่อการประชุม./วัน เดือน ปีที่ประชุม./สถานที่จัดประชุม./สถานที่พิมพ์:สำนักพิมพ์./ปีที่พิมพ์./น./เลขหน้าเริ่มต้น-เลขหน้าสุดท้ายของบทที่อ้าง.

- อีระ ฤชตระกูล. Coagulopathy in liver diseases. ใน: ปิยะวัฒน์ โกมลมิศร์, ทวีศักดิ์ แทนวันดี, อนุชิต จุฑะพุทธิ, บรรณาธิการ. Vascular diseases of the liver. การประชุมวิชาการประจำปี ครั้งที่ 4 Vascular diseases of the liver; วันที่ 12-14 มีนาคม 2552; เพชรบุรี.กรุงเทพฯ: สมาคมโรคตับ (ประเทศไทย); 2552. น.1-13.

4.2 บทความวิชาการ

A. ส่วนปก

มีส่วนประกอบเหมือนบทความวิจัย

B. ส่วนเนื้อหา

1. บทนำ (INTRODUCTION) เป็นส่วนของที่มาของมูลเหตุของการเขียนบทความ
2. วิธีการศึกษา/วิธีดำเนินการ (METHOD) (ถ้ามี) เป็นการอธิบายวิธีการศึกษา หรือ การดำเนินการตามประเภทของบทความวิชาการ
3. ผลการศึกษา/ผลการดำเนินการ (RESULT AND DISCUSSION) เป็นการเสนอผล อย่างชัดเจน ตามประเด็นโดยลำดับตามหัวข้อที่ศึกษาหรือดำเนินการ
4. สรุป (CONCLUSION) สรุปประเด็น และสาระสำคัญที่ได้จากการศึกษา
5. เอกสารอ้างอิง (REFERENCES) ใช้ตามที่วารสารกำหนด

รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ (Peer Review)

รองศาสตราจารย์เรืองรุขดี ชีระโรจน์	รองศาสตราจารย์สรารุช จิตดงาม
รองศาสตราจารย์ชวลิต วัฒนเวทิน	รองศาสตราจารย์ศิริชัย ต่อสกุล
รองศาสตราจารย์ตรีเนตร ยิ่งสัมพันธ์เจริญ	ผู้ช่วยศาสตราจารย์นพดล อ่ำดี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์กรรณิการ์ ม่วงชู	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชาญยุทธ์ กาญจนพิบูลย์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์นุชริน ทิพย์วรรณกร	ผู้ช่วยศาสตราจารย์อัครพงศ์ พัทธรุ่งเรือง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชาญชัย เหลาหา	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธรรมมา เจียรธรวานิช
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ชาญวิทย์ ปรามพยัคฆ์	ผู้ช่วยศาสตราจารย์คมยุทธ์ ไชยวงษ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์สุวัฒน์ กิจเจริญวัฒน์	ผู้ช่วยศาสตราจารย์จรัสศรี รุ่งรัตนอุบล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์กัญลิน จิรัฐชุต	ผู้ช่วยศาสตราจารย์กนกพร ช่างทอง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ปริญญาศรี สรียัตกุล	ผู้ช่วยศาสตราจารย์พิษณุ ทองขาว
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ธนศพร นวลโย	ผู้ช่วยศาสตราจารย์วรวิทย์ จันทร์สุวรรณ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์เบญจมาศ ไชยลาภ	ดร.วรุตม์ บุญภักดี
ดร.ณภัทร อินทนนท์	ดร. สวลี อุตตรา
ดร. ธิดาธิป หารชุมพล	ดร.ปราโมทย์ ฉลองรัตนสกุล
ดร.ดวงรัตน์ หิรัญญะสิริ	ดร. เดือนเพ็ญ มะโนเรือง
	ดร.กฤษฎา เหล็กดี

แบบฟอร์มส่งบทความเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ลงในวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ

วันที่.....เดือน.....พ.ศ.....

ข้าพเจ้า (นาย/นาง/นางสาว)..... นามสกุล.....

ขอส่ง ☐ บทความวิจัย

☐ บทความวิชาการ

เรื่อง (ภาษาไทย).....

เรื่อง (ภาษาอังกฤษ).....

ชื่อผู้เขียนร่วม (ภาษาไทย)

1.
2.
3.

ชื่อผู้เขียนร่วม (ภาษาอังกฤษ)

1.
2.
3.

ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้สะดวก..... หมู่ที่..... ซอย.....

ถนน..... ตำบล/แขวง..... อำเภอ/เขต..... จังหวัด.....

รหัสไปรษณีย์..... E-mail..... โทรศัพท์.....

โทรสาร..... โทรศัพท์ (มือถือ).....

ข้าพเจ้าขอรับรองว่าบทความนี้

☐ เป็นผลงานของข้าพเจ้าแต่เพียงผู้เดียว

☐ เป็นผลงานของข้าพเจ้าและผู้ร่วมงานตามชื่อที่ระบุในบทความจริง

โดยขอรับรองว่ารูปภาพและข้อความทั้งหมดในบทความนี้ ไม่ละเมิดลิขสิทธิ์ใด ๆ และบทความนี้ไม่เคย
ลงตีพิมพ์ในวารสารใดมาก่อน และจะไม่นำบทความนี้ส่งไปเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารอื่นอีกเป็น
การซ้ำซ้อนการละเมิดลิขสิทธิ์ถือเป็นความรับผิดชอบของผู้เขียนบทความโดยตรง ทั้งนี้ผู้เขียนเข้าใจในนโยบาย
การรับบทความของวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพแล้ว และยินยอมว่าบทความที่ตีพิมพ์ลงในวารสารวิจัย
มทร. กรุงเทพ ถือเป็นลิขสิทธิ์ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ลงชื่อ.....

(.....)



หนังสือรับรองการตีพิมพ์บทความ
วารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ขอรับรองว่าบทความ.....

เรื่อง

โดย

ได้ผ่านการประเมินจากคณะกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิจำนวน 3 ท่าน

และตีพิมพ์ในวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ

ปีที่..... ฉบับที่ (..... - พ.ศ.)

(.....)

บรรณาธิการวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

ขั้นตอนการจัดทำวารสารวิจัย มทร.กรุงเทพ

