

ISSN : 2408-235X

SAU JOURNAL

OF SCIENCE & TECHNOLOGY

Volume 11 / Number 2 / July – December 2025

SAUJOURNAL.SAU.AC.TH



SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY

เจ้าของ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

ที่ปรึกษา

ดร.ฉัททวุฒิ พิษผล

อธิการบดี

บรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.วีระพันธ์ คั่งทองสุข

มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

กองบรรณาธิการภายใน

รองศาสตราจารย์ ดร.วีระพันธ์ คั่งทองสุข

กรรมการ (มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นาวาเอกไชโย ธรรมรัตน์

กรรมการ (มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พนัภา บริบูรณ์สุขศรี

กรรมการ (มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐ โอธนาทรัพย์

กรรมการ (มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ จิรฐิติ บรรจงศิริ

กรรมการ (มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์)

ดร.ภาณุวัฒน์ แตระกุล

กรรมการ (มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์)

กองบรรณาธิการภายนอก

ศาสตราจารย์ ดร.สมชาย วงศ์วิเศษ

กรรมการ (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี)

รองศาสตราจารย์ ดร.ปิยะบุตร วานิชพงษ์พันธุ์

กรรมการ (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี)

รองศาสตราจารย์ ดร.พานิช อินต๊ะ

กรรมการ (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา)

รองศาสตราจารย์ ดร.วรเชษฐ์ ภิรมย์ภักดี

กรรมการ (มหาวิทยาลัยบูรพา)

รองศาสตราจารย์ ดร.ศิระ สายสร

กรรมการ (สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

รองศาสตราจารย์ ดร.จิระศักดิ์ ชาญุฒิธรรม

กรรมการ (มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

พระนครเหนือ)

รองศาสตราจารย์ มนต์รี คำเงิน

กรรมการ (สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้า

เจ้าคุณทหารลาดกระบัง

กรรมการบริหาร

รองศาสตราจารย์ สิริวิษ ทัศวน

(มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ จิรฐิติ บรรจงศิริ

(มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วราธร แก้วแสง

(มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์)

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ วีระพงษ์ กาญจนวงศ์กุล

(มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์)



SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY

ฝ่ายพัฒนา ดูแลและปรับปรุงเว็บไซต์

นางณัฐภาวี จิระภาพันธุ์

นางสาวชুমณูช แยมรู้การ

นางสาวรุ่งทิวา ลังกาพันธ์

ฝ่ายเลขานุการ

นางณัฐภาวี จิระภาพันธุ์

นางสาวชুমณูช แยมรู้การ

จัดพิมพ์โดย มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ ถนนเพชรเกษม เขตหนองแขม กรุงเทพฯ 10160

ที่ติดต่อ วารสาร SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

ถนนเพชรเกษม เขตหนองแขม กรุงเทพฯ 10160 โทร 0-2807-4500-27 ต่อ 404

เว็บไซต์ saujournalst.sau.ac.th อีเมล SAUJournalST@sau.ac.th

วัตถุประสงค์

1. เพื่อเป็นเอกสารเผยแพร่ผลงานบทความวิจัยและบทความวิชาการ สาขา วิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และโทรคมนาคม วิทยาการคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมอุตสาหกรรม อาชีวอนามัยและความปลอดภัย วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และวิศวกรรมเกษตร
2. เพื่อเป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนความรู้ใหม่ทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ระหว่างนักวิจัย นักศึกษาและผู้สนใจทั่วไป
3. เพื่อเป็นเอกสารรวบรวมรายงานและบทความวิจัยที่น่าสนใจ และมีคุณค่าทางวิชาการทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
4. เพื่อส่งเสริมและสนับสนุนให้เกิดองค์ความรู้ใหม่แก่นักวิจัยของมหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ นักศึกษาและผู้สนใจทั่วไป

ขอบเขต

เป็นเอกสารเผยแพร่บทความวิจัยและบทความวิชาการ (บทความวิชาการปริทรรศน์ บทความวิชาการเทคนิค บทความวิชาการพิเศษ) ทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

วาระการเผยแพร่

วารสาร SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY มีกำหนดออกปีละ 2 ฉบับ โดยฉบับที่ 1 จะจัดพิมพ์ระหว่างเดือนมกราคม-มิถุนายน ฉบับที่ 2 จะจัดพิมพ์ระหว่างเดือนกรกฎาคม-ธันวาคม ของทุกปี

ข้อคิดเห็นในบทความของวารสาร SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY เป็นทรัพย์สินส่วนตัวของผู้เขียน กองบรรณาธิการไม่จำเป็นต้องเห็นด้วย

Objectives

The main objectives of this journal are:

1. to publish research articles and academic articles in science and technology, Journal focus are Electrical Engineering, Electronics and communication Engineering, Computer Science, Computer Engineering, Civil Engineering, Mechanical Engineering, Industrial Engineering, Occupational Health and Safety, Environment Engineering and Agricultural Engineering;
2. to become a center for exchanging innovations in science and technology among researchers and interested persons;
3. to become a collection of interesting and valuable research papers and articles;
4. to promote and encourage Southeast Asia University researchers and interested persons to develop innovations.

Scope

To publish research articles and academic articles (Review articles, Technical article, Special Articles) in science and technology.

Schedule

SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY is published two issues annually. The first volume is published between January and June and the second is published July and December in each year.

Comments on the article of the SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY is a personal opinion of the author. Editors boards may not necessarily agree.

บทบรรณาธิการ

วารสาร SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY ปีที่ 11 ฉบับที่ 2
ประจำเดือน กรกฎาคม – ธันวาคม พ.ศ. 2568 ปัจจุบันเป็นวารสารที่ได้รับรองให้อยู่ใน
ฐานข้อมูลของ TCI 2

จากผลการดำเนินงานของวารสารฉบับนี้มีบทความที่น่าสนใจทั้งหมด 9 บทความ เป็น
บทความวิจัย จำนวน 9 บทความ ซึ่งกองบรรณาธิการหวังเป็นอย่างยิ่งว่าผู้อ่านจะได้รับความรู้
จากงานวิจัยต่าง ๆ ในวารสารเล่มนี้เป็นอย่างมาก

และในนามของ กองบรรณาธิการวารสาร ต้องขอขอบพระคุณ ผู้ประเมินบทความทุก
ท่าน ที่ยอมเสียสละเวลาอันมีค่าช่วยกลั่นกรองงานวิจัยให้มีคุณภาพยิ่งขึ้น รวมถึง
คณาจารย์ นักศึกษา บุคคลทั่ว ๆ ไปทุกท่าน ที่ให้ความสนใจส่งบทความเพื่อเข้าสู่กระบวนการ
พิจารณาคุณภาพเพื่อตีพิมพ์เผยแพร่ ด้วยเหตุดังกล่าวนี้ทำให้กองบรรณาธิการทุกท่านมีกำลังใจ
เป็นอย่างมากในการพัฒนาวารสารฯ ให้มีคุณภาพยิ่งขึ้น

บรรณาธิการ

สารบัญ

บทความวิจัย	หน้า
การพัฒนาระบบแชทบอทเพื่อสนับสนุนการให้บริการงานการเงิน วิทยาลัยเทคนิคลพบุรี Develop a chatbot system to support financial services Lopburi technical college ศิริพิไลย พรหมแพทย์* และ ชุตติมา พิศาลย์	1
การศึกษาทางทฤษฎีเกี่ยวกับลักษณะการไหลของสารทำความเย็น R600a ในท่อคาปิลลารีที่ใช้ในระบบทำความเย็น Theoretical Investigation of R600a Flow Characteristics in a Capillary Tube Used in Refrigeration Systems ไกรวิชญ์ เยื้องเนิน, ปิยธิดา เดชกรกฤช, ภาณุพงศ์ เสงทรัพย์ศิริกุล และ วรเชษฐ์ ภิรมย์ภักดี*	14
การปรับปรุงกระบวนการพ่นสีเคลือบป้องกันสนิมใต้ท้องรถยนต์: กรณีศึกษาผู้ผลิตยานยนต์ Process Improvement for Underbody Anti-Corrosion Coating Spray: A Case Study at an Automotive Manufacturer บัณฑิต อินทริย์มีศักดิ์*, ยศคนภา เกษเมือง, ภูมิ จาคุนิตานนท์ และ ชัยวุฒิ นรินทรางกูร	25
สมบัติทางกายภาพและเชิงกลของมอร์ตาร์ซีเมนต์ผสมกากกาแฟ Physical and Mechanical Properties of Cement Mortar mixed with Recycled Spent Coffee Grounds กุลธิดา บรรจงศิริ และ อนัญญา ประดิษฐ์ปรีชา*	39
การศึกษาการมีส่วนร่วมในการจัดการสิ่งแวดล้อมของผู้พักอาศัย ในอาคารชุดแห่งหนึ่งของกรุงเทพมหานคร A Study on the Participation of Building Occupants in Environmental Management in Bangkok บัญชา ศรีจันทร์ไทร, ชัยศรี ธาราสวัสดิ์พิพัฒน์ และ พรนิภา บริบูรณ์สุขศรี*	51

สารบัญ (ต่อ)

บทความวิจัย	หน้า
การศึกษาการใช้งานโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Primavera P6 เพื่อวางแผนงานและวางแผนต้นทุนสำหรับบริหารโครงการก่อสร้าง Study of the Use of Primavera P6 Computer Program for Planning and Cost Planning for Construction Project Management สุวิมล เจียรธรวานิช* , ธรรมมา เจียรธรวานิช และ สิงหาวีร์ รัตนวิจิตร	66
การศึกษาผลกระทบของฮาร์มอนิกลำดับ $2k\pm 1$ ต่ออายุการใช้งานของหม้อแปลงแบบแช่น้ำมัน A Study on the Impact of $2k\pm 1$ Harmonic Components on the Lifetime of Oil-Immersed Transformers สิริวิษ ทัดสวน และ ชนภัช เฉชนาราพัฒน์*	78
The Study of Various Aspects of User Perception on the Mobile Application of AIoT-Based Air Quality Monitoring and Prediction for $PM_{2.5}$ Nuth Otanasap* , Pornpimol Bungkomkhun, Tanainan Tanantpapat, Tida Jindamanee, and Natthawat Saengsupphaseth	94
ผลกระทบของการไหลกึ่งเสถียรที่มีต่อลักษณะการไหลของ R600a ใน ท่อคาปิลลารีที่ใช้ในระบบทำความเย็น Effects of Metastable flow on Flow Characteristics of R600a in Capillary Tubes Used in Refrigeration Systems ปราโมทย์ ลายประดิษฐ์ และ วรเชษฐ์ ภิรมย์ภักดี*	111

การพัฒนาระบบแชทบอทเพื่อสนับสนุนการให้บริการงานการเงิน

วิทยาลัยเทคนิคลพบุรี

Develop a chatbot system to support financial services Lopburi technical college

ศิริพิไล พรหมแพทย* และ ชุตินา พิศาลย์

Siripilai Promphaet* and Chutima Pisarn

สาขาวิชาการจัดการนวัตกรรมการดิจิทัล มหาวิทยาลัยรังสิต

52/347 ถ. พหลโยธิน ตำบล หลักหก อำเภอเมืองปทุมธานี ปทุมธานี 12000

ผู้นิพนธ์ประสานงาน : wim_me@hotmail.com

วันที่รับบทความ: 8 เมษายน 2568 / วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ : 13 มิถุนายน 2568 / วันที่ตอบรับการตีพิมพ์: 17 กรกฎาคม 2568

บทคัดย่อ การพัฒนาระบบแชทบอทเพื่อสนับสนุนการให้บริการงานการเงิน วิทยาลัยเทคนิคลพบุรี มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบ และประเมินประสิทธิภาพของระบบดังกล่าว ระบบถูกพัฒนาโดยใช้บัญชีไลน์สำหรับธุรกิจร่วมกับ Dialogflow เพื่อให้ข้อมูลเกี่ยวกับค่าใช้จ่ายในการเดินทางไปราชการ การขืมและคืนเงินทดรองราชการ และค่าใช้จ่ายในการฝึกอบรม การจัดงาน และการประชุมระหว่างประเทศ ขอบเขตของการวิจัยครอบคลุมบุคลากรจำนวน 346 คน และเก็บข้อมูลจากกลุ่มตัวอย่าง 190 คน ในระยะเวลา 4 เดือน ผลการวิจัยพบว่า ระบบแชทบอทสามารถตอบคำถามได้ถูกต้องถึงร้อยละ 96.04 ช่วยลดระยะเวลาการขอข้อมูลจากเจ้าหน้าที่ได้อย่างมีนัยสำคัญ และผู้ใช้มีระดับความพึงพอใจโดยรวมต่อระบบเฉลี่ย 4.93 (S.D. = 0.26) ทั้งนี้ยังพบว่าระบบสามารถตอบสนองต่อคำถามได้รวดเร็ว (เฉลี่ย 4.84) และเข้าถึงข้อมูลได้ตลอดเวลาโดยไม่ต้องรอเจ้าหน้าที่ นอกจากนี้ ข้อเสนอแนะที่ได้จากผู้ใช้งานชี้ว่าควรขยายขอบเขตการใช้งานแชทบอทให้รองรับบริการอื่น เช่น งานทะเบียนหรือบุคลากร พร้อมทั้งพัฒนาให้รองรับการประมวลผลภาษาธรรมชาติที่ซับซ้อนยิ่งขึ้น เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการให้บริการอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ : ระเบียบ, งานการเงิน, แชทบอท, บัญชีไลน์สำหรับธุรกิจ, Dialogflow

Abstract This study aimed to develop a chatbot system to support financial services at Lopburi Technical College and to evaluate its effectiveness. The system was developed using a LINE Official Account integrated with Dialogflow to provide information on travel expenses for official duties, advances and reimbursements, as well as expenses related to training, events, and international conferences. The research involved 346 personnel, with data collected from a sample of 190 individuals over a period of four months. The findings revealed that the chatbot system achieved an accuracy rate of 96.04% in responding to inquiries and significantly reduced the time required to obtain information from staff. Users reported a high level of satisfaction, with an average

satisfaction score of 4.93 (S.D. = 0.26). Additionally, the system demonstrated a fast response rate (average score of 4.84) and enabled continuous access to information without the need for direct staff interaction. User feedback further suggested expanding the chatbot's functionality to support other services, such as academic registration and personnel management, and enhancing its natural language processing capabilities to handle more complex queries. These improvements would contribute to a more efficient and sustainable service system.

Keywords: regulations, finance department, chatbot, Line Official Account, Dialogflow

1. บทนำ

ในยุคปัจจุบัน การใช้สื่อสังคมออนไลน์มีความนิยมและแพร่หลาย โดยเฉพาะบนแพลตฟอร์มไลน์ (LINE) ซึ่งเป็นแอปพลิเคชันที่มีการเข้าถึงกลุ่มผู้ใช้ในทุกช่วงอายุ ทำให้ผู้ใช้ได้รับข้อมูล และบริการต่าง ๆ ได้อย่างสะดวก และรวดเร็ว [1] แอปพลิเคชันไลน์ได้พัฒนาอย่างต่อเนื่อง เพื่อให้สอดคล้องกับการใช้งานของผู้ใช้ โดยถูกนำไปใช้ในหลาย ๆ ด้าน เช่น การส่งเอกสาร การสนับสนุนด้านธุรกิจและการตลาด การแบ่งปันข้อมูล การติดต่อและประสานงานภายในองค์กร ซึ่งช่วยเพิ่มความรวดเร็วในการทำงาน ลดเวลาที่เสียไป และทำให้งานดำเนินไปอย่างราบรื่นมากขึ้น [2] นอกจากนี้ แอปพลิเคชันไลน์ยังมีบัญชีไลน์สำหรับธุรกิจ เป็นช่องทางการสื่อสารที่มีประสิทธิภาพสูงและเหมาะกับยุคดิจิทัลในปัจจุบัน สามารถใช้สร้างและเผยแพร่เนื้อหาต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็นข้อความ รูปภาพ หรือวิดีโอ โดยเนื้อหาที่สร้างจะปรากฏในแอปพลิเคชันไลน์ของผู้ติดตาม คล้ายกับการรับข้อความจากเพื่อน การส่งข้อความสามารถทำได้ง่ายและรวดเร็ว เพียงคลิกส่งครั้งเดียว ข้อความก็จะถูกส่งไปยังกลุ่มเป้าหมายทั้งหมดในทันที [3]

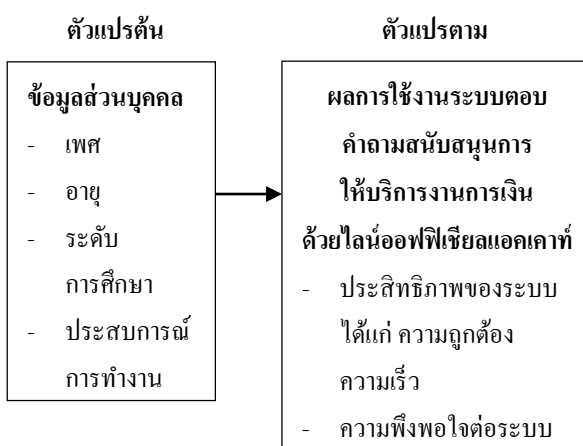
การบริหารสถานศึกษาในยุคการเปลี่ยนแปลงดิจิทัล (Digital Transformation) หมายถึง การใช้เทคโนโลยีดิจิทัลในการบริหารและจัดการสถานศึกษา โดยเน้นการดำเนินการตามเป้าหมายที่กำหนดไว้

สถานศึกษาสามารถใช้เทคโนโลยีเพื่อบริหารงาน 4 ด้าน ได้แก่ 1) การจัดการด้านวิชาการ 2) การจัดการด้านงบประมาณ 3) การจัดการทรัพยากรบุคคล และ 4) การจัดการการบริหารทั่วไป [4] ซึ่งสอดคล้องกับสถานศึกษาในสังกัดสำนักงานคณะกรรมการการอาชีวศึกษา ที่แบ่งการบริหารงานออกเป็น 4 ฝ่าย ได้แก่ 1) ฝ่ายวิชาการ 2) ฝ่ายแผนงานและความร่วมมือ 3) ฝ่ายบริหารทรัพยากร และ 4) ฝ่ายพัฒนาการเรียน นักศึกษา โดยงานการเงินเป็นงานหนึ่งในฝ่ายบริหารทรัพยากร ที่มีบทบาทสำคัญในการสนับสนุน และขับเคลื่อนการปฏิบัติงานในหลาย ๆ ด้าน เพื่อให้บรรลุตามเป้าหมาย และวัตถุประสงค์ของแผนงานที่กำหนดไว้ โดยมีความเชื่อมโยงกับทุกภาคส่วน ในการดำเนินงาน และกิจกรรมของทุกหน่วยงาน [5] โดยการปฏิบัติงานการเงินและบัญชีจำเป็นต้องปฏิบัติตามกฎระเบียบ และข้อกำหนดหลายประการ ซึ่งต้องอาศัยทั้งประสบการณ์และความเชี่ยวชาญ เพื่อให้การดำเนินงานเป็นไปอย่างถูกต้อง และสอดคล้องกับระเบียบที่กำหนด [6]

วิทยาลัยเทคนิคพุนนังมีบุคลากรทั้งสิ้น 346 คน โดยมีเจ้าหน้าที่งานการเงินทั้งหมด 4 คน ทำให้เกิดภาระงานสะสม โดยเฉพาะคำถามที่เกี่ยวข้องกับการเบิกจ่ายงบประมาณ เบี้ยเลี้ยงราชการ ค่าที่พัก และระเบียบต่าง ๆ ที่ต้องอ้างอิงอย่างถูกต้องและรวดเร็ว หากสามารถนำระบบเชทบอทมาช่วยให้บริการข้อมูลด้านการเงินได้

อย่างแม่นยำและทันเวลา จะช่วยลดภาระของเจ้าหน้าที่ เพิ่มประสิทธิภาพในการทำงาน และเพิ่มความสะดวกแก่ผู้ใช้งานอย่างมีนัยสำคัญ

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบแชทบอท โดยใช้ปัญญาประดิษฐ์สำหรับธุรกิจ และ Dialogflow เพื่อให้บริการข้อมูลเกี่ยวกับการเงินแก่นักศึกษาภายในวิทยาลัย และประเมินประสิทธิภาพของระบบดังกล่าวทั้งในด้านความแม่นยำ ความรวดเร็ว และความพึงพอใจของผู้ใช้งาน



รูปที่ 1 กรอบแนวคิดการวิจัย

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

การวิจัยมีวัตถุประสงค์ของการวิจัย ดังนี้

1) เพื่อพัฒนาระบบแชทบอทเพื่อสนับสนุนการให้บริการงานการเงินวิทยาลัยเทคนิคพนัธิ

2) เพื่อศึกษาผลการใช้งานระบบแชทบอทเพื่อสนับสนุนการให้บริการงานการเงินวิทยาลัยเทคนิคพนัธิ

ผู้วิจัยได้ดำเนินการตามขั้นตอนดังต่อไปนี้

2.1 กรอบแนวคิดการวิจัย

ในการวิจัยครั้งนี้ มุ่งเน้นการพัฒนาเพื่อให้บริการข้อมูล เพื่อให้การปฏิบัติงานการเงินมีประสิทธิภาพมากขึ้น และลดเวลาการติดต่อ เพิ่มความสะดวกให้กับบุคลากรวิทยาลัยเทคนิคพนัธิ โดยมีตัวแปร ดังนี้

2.1.1 ตัวแปรต้น ได้แก่ ข้อมูลส่วนบุคคล

2.1.2 ตัวแปรตาม ได้แก่ ประสิทธิภาพของระบบ และความพึงพอใจต่อระบบ

2.2 ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

การกำหนดขนาดของกลุ่มตัวอย่าง ผู้วิจัย ได้ใช้ตารางของเครจซี่และมอร์แกน (Krejcie & Morgan) ลักษณะที่สนใจในประชากร เท่ากับ 0.5 ระดับความคลาดเคลื่อนที่ยอมรับได้ 5% และระดับความเชื่อมั่น 95% สามารถคำนวณหาขนาดของกลุ่มตัวอย่างกับประชากรที่มีขนาดเล็กได้ตั้งแต่ 10 ขึ้นไป

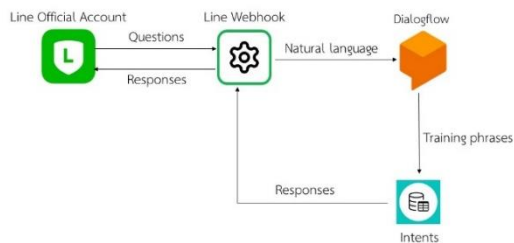
2.2.1 ประชากร คือ บุคลากรวิทยาลัยเทคนิคพนัธิ จำนวน 346 คน

2.2.2 กลุ่มตัวอย่างประเมินความพึงพอใจ คือ บุคลากรผู้รับบริการ วิทยาลัยเทคนิคพนัธิ จำนวน 190 คน

2.2.3 กลุ่มตัวอย่างประเมินประสิทธิภาพ คือ บุคลากรผู้รับบริการ วิทยาลัยเทคนิคพนัธิ จำนวน 190 คน

2.3 พัฒนาระบบแชทบอทเพื่อสนับสนุนการให้บริการงานการเงิน วิทยาลัยเทคนิคพนัธิ

2.3.1 ออกแบบโครงสร้างการใช้งานของระบบ



รูปที่ 2 โครงสร้างของระบบแชทบอทเพื่อสนับสนุน
การให้บริการงานการเงินวิทยาลัยเทคนิคลพบุรี

จากรูปที่ 2 โครงสร้างของระบบแชทบอท เพื่อสนับสนุนการให้บริการงานการเงินวิทยาลัยเทคนิค ลพบุรี เริ่มต้นจากการที่ผู้ใช้งาน คือบุคลากร วิทยาลัยเทคนิคลพบุรี พิมพ์คำถามผ่านบัญชีไลน์สำหรับ ธุรกิจ โดยบัญชีไลน์สำหรับธุรกิจทำหน้าที่เป็นช่องทาง ในการโต้ตอบหลัก เมื่อผู้ใช้งานพิมพ์ข้อความเข้ามา บัญชีไลน์สำหรับธุรกิจจะส่งต่อข้อความเหล่านั้น ไปยัง Line Webhook ซึ่งทำหน้าที่เป็นตัวกลางในการส่งต่อ ข้อมูลจากบัญชีไลน์สำหรับธุรกิจไปยัง Dialogflow โดย Dialogflow มีความ สามารถ ในการ ประมวลผล ภาษาธรรมชาติ Natural Language Understanding) ช่วย ให้แชทบอทสามารถเข้าใจเจตนา (Intent) ของคำถามที่ ผู้ใช้งานพิมพ์เข้ามา และสร้างคำตอบที่เหมาะสมเพื่อ ตอบสนองผู้ใช้งานกลับไป

2.3.2 สร้างบัญชีไลน์สำหรับธุรกิจชื่อ “งาน การเงิน วท.ลพ.”

2.3.3 เชื่อมต่อ Dialogflow กับบัญชีไลน์ สำหรับธุรกิจ

2.3.4 ตั้งค่า Line Messaging API

2.3.5 เพื่อให้ระบบสามารถตอบคำถามที่ เกี่ยวข้องกับงานการเงินได้อย่างแม่นยำ ผู้วิจัยได้ ออกแบบ Intents และ Entities โดยอิงจากระเบียบงาน การเงินของวิทยาลัยเทคนิคลพบุรี โดยมีขั้นตอนดังนี้

1) รวบรวมคำถามจริงจากเจ้าหน้าที่งานการเงิน ที่ พบบ่อย เช่น “เบี้ยเลี้ยงราชการได้เท่าไร?”, “ค่าที่พักเบิก ได้ไหม”, “คืนเงินต้องทำอะไร?”

2) จัดกลุ่มคำถามตามหมวดหมู่เนื้อหา เช่น หมวด ค่าที่พัก, หมวดการขืมเงิน, หมวดค่าตอบแทนวิทยากร, หมวดค่าอาหาร ฯลฯ

3) สร้าง Intents โดยใช้ชื่อหมวดเป็นชื่อ Intent เช่น ค่าที่พัก, การขืมเงิน, ค่าตอบแทน วิทยากร, ค่าอาหาร

4) เพิ่ม Training Phrases ที่หลากหลายทั้งใน รูปแบบคำสั้น และประโยค เช่น

- คำสั้น: “เบี้ยเลี้ยง”, “ค่าโรงแรม”
- ประโยค: “ถ้าไปราชการต่างจังหวัดเบิก

ค่าที่พักได้เท่าไร?”

5) กำหนด Responses ที่ครอบคลุมโดยใช้ข้อมูล จากระเบียบการเงิน

6) ตัวอย่างการแสดงผลตอบกลับ

ผู้ใช้: “สอบถามค่า ค่าเบี้ยเลี้ยงไปราชการของ คนขับรถเบิกได้วันละเท่าไร?”

Chatbot: “เบี้ยเลี้ยง เจ้าหน้าที่ คนขับรถ วันละ 240 บาท”

ผู้ใช้: “ไปราชการต้องค้างแรม สามารถเบิก ค่าที่พักได้คืนละเท่าไร?”

Chatbot: “ค่าเช่าที่พักจ่ายจริง

- พักเดี่ยว 1,200 บาท (มีเหตุจำเป็นหรือไม่ เหมาะสม)

- พักคู่ 750 บาท ค่าที่พักเหมาจ่าย

- ผู้บริหาร 800 บาท

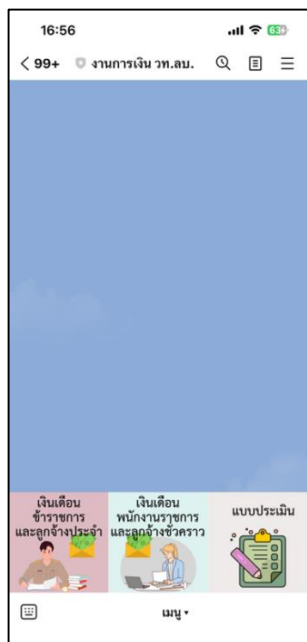
- ครู 700 บาท

- เจ้าหน้าที่ 600 บาท

- นักเรียน นักศึกษา 450 บาท

กรณีเดินทางเป็นหมู่คณะ ต้องเลือกเบิกแบบ เดียวกันทั้งคณะ”

2.3.6 ทดสอบระบบแชทบอทเพื่อประเมินประสิทธิภาพของระบบด้านการตอบสนองและการใช้งานเบื้องต้น พร้อมทั้งเก็บรวบรวมข้อเสนอแนะ เพื่อปรับปรุงระบบก่อนนำไปใช้งานจริง โดยเจ้าหน้าที่งานการเงินและงานบัญชี จำนวน 6 คน ระหว่างวันที่ 5-30 สิงหาคม 2567



รูปที่ 3 หน้าจอติดต่อผู้ใช้งานบัญชีไลน์สำหรับธุรกิจ

2.4 สร้างแบบประเมินความพึงพอใจและประเมินประสิทธิภาพการทำงานของระบบแชทบอทเพื่อสนับสนุนการให้บริการงานการเงิน วิทยาลัยเทคนิคลพบุรี

2.4.1 ผู้วิจัยสร้างแบบประเมินด้วย Google Form สำหรับการเก็บข้อมูล โดยผู้ใช้งานสามารถกดผ่านริชเมนู “แบบประเมิน” บนหน้าจอบัญชีไลน์สำหรับธุรกิจ

2.4.2 นำระบบไปใช้งานจริงกับบุคลากรวิทยาลัยเทคนิคลพบุรี ระหว่างวันที่ 2 กันยายน – 30 ธันวาคม 2567

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1 ผลการพัฒนาาระบบแชทบอทเพื่อสนับสนุนการให้บริการงานการเงิน วิทยาลัยเทคนิคลพบุรี

3.1.1 ผู้วิจัยได้ให้กลุ่มตัวอย่างเพิ่มเพื่อนผ่านช่องทางการแอดไลน์ไอดี, การกดลิงค์จากไลน์กลุ่มประชาสัมพันธ์วิทยาลัยเทคนิคลพบุรี และการพิมพ์ไอดีไลน์ @940resxk มีผลการเพิ่มเพื่อนดังนี้

ระยะที่ 1 ทดสอบระบบก่อนนำไปใช้งาน 1 เดือน (สิงหาคม 2567) มีการเพิ่มเพื่อน 9 ราย

ระยะที่ 2 นำไปใช้งานและเก็บข้อมูล 4 เดือน (กันยายน-ธันวาคม 2567) มีการเพิ่มเพื่อน 193 ราย รวมทั้งสิ้น 202 ราย

3.2 ผลการทดลองในระยะที่ 1 ทดสอบการทำงาน

ผู้วิจัย ได้กำหนด Intents จำนวนทั้งสิ้น 44 Intents เพื่อให้เนื้อหาครอบคลุม เรื่อง ค่าใช้จ่ายในการเดินทางไปราชการ, การขืมและคืนเงินทดรองราชการ และค่าใช้จ่ายในการฝึกอบรม การจัดงาน และการประชุมระหว่างประเทศ จากจำนวนคำถามทั้งหมด 227 คำถาม มีผลการทดลอง ดังนี้

ตารางที่ 1 ผลการทดลองในระยะที่ 1

รายการ	จำนวนครั้ง	คิดเป็นร้อยละ
คำถามที่อยู่ในขอบเขต	221	97.36
คำถามที่อยู่นอกขอบเขต	6	2.64
คำถามที่ตอบถูกต้อง	218	96.04
คำถามที่ตอบผิด	9	3.96

คำถามที่ตอบผิด แสดงดังตารางที่ 2 โดยผู้วิจัยได้แก้ไขโดย

- เพิ่ม “เพิ่มเอกสาร” เป็น Training phrases ของ Intents “ค่ากระเป๋า”

- เพิ่ม “เบรก”, “ค่าเบรก” เป็น Training phrases ของ Intents “ค่าอาหารว่าง”

ตารางที่ 2 คำถามที่ตอบผิดและคำตอบที่แสดงผล ใน ระยะที่ 1

คำถาม	คำตอบที่แสดงผล
เพิ่มเอกสาร	ขอโทษค่ะ ฉันไม่เข้าใจค่ะ
เบรก	ขอโทษค่ะ ฉันไม่เข้าใจค่ะ
ค่าเบรก	ขอโทษค่ะ ฉันไม่เข้าใจค่ะ

คำถามที่อยู่นอกขอบเขต แสดงดังตารางที่ 3 โดยผู้วิจัยได้แก้ไขโดย

- สร้าง Intents “ค่าประชุม” โดยมี “ค่าประชุม” เป็น Training phrases
- สร้าง Intents “เงินรายหัว” โดยมี “งบรายจ่ายอื่น” เป็น Training phrases
- เพิ่ม “ระเบียบ” เป็น Training phrases ของ Intents “ไม่ชัดเจน”
- สร้าง Intents “แบบประเมิน” โดยมี “แบบประเมิน” เป็น Training phrases

ตารางที่ 3 คำถามที่อยู่นอกขอบเขตและคำตอบที่แสดงผล ในระยะที่ 1

คำถาม	คำตอบที่แสดงผล
- ค่าประชุม - งบรายจ่ายอื่น - แบบประเมิน	ขอโทษค่ะ ฉันไม่เข้าใจค่ะ
- ระเบียบ	เบี่ยงเลียง (ต่อวัน) - ผู้บริหาร ครู ระดับเชี่ยวชาญขึ้นไป 270 บาท - ผู้บริหาร ครู ระดับชำนาญการพิเศษลงมา และเจ้าหน้าที่ 240 บาท - นักเรียน นักศึกษา 200 บาท

3.3 ผลการทดลองในระยะที่ 2 การนำระบบไปใช้งาน

ผู้วิจัย ได้กำหนด Intents จำนวนทั้งสิ้น 48

Intents จากจำนวนคำถามทั้งหมด 314 คำถาม มีผลการทดลอง ดังนี้

ตารางที่ 4 ผลการทดลองในระยะที่ 2

รายการ	จำนวนครั้ง	คิดเป็นร้อยละ
คำถามที่อยู่ในขอบเขต	288	91.72
คำถามที่อยู่นอกขอบเขต	26	8.28
คำถามที่ตอบถูกต้อง	276	87.90
คำถามที่ตอบผิด	38	12.10

คำถามที่ตอบผิด แสดงดังตารางที่ 5 โดยผู้วิจัยได้แก้ไขโดย

- เพิ่ม “ไปทักยะ”, “แข่งทักยะ”, “ทักยะ”, “สิ่งประดิษฐ์”, “สอบถามค่าใช้จ่ายในการเดินทางไปราชการ” เป็น Training phrases ของ Intents “ค่าใช้จ่ายไปราชการ”
- เพิ่ม “ค่าเบี้ยเลี้ยงพนักงานขับรถ” เป็น Training phrases ของ Intents “เบี้ยเลี้ยงเจ้าหน้าที่”

ตารางที่ 5 คำถามที่ตอบผิดและคำตอบที่แสดงผล ในระยะที่ 2

คำถาม	คำตอบที่แสดงผล
- ไปทักยะ - แข่งทักยะ - ทักยะ - สอบถามค่าใช้จ่ายในการเดินทางไปราชการ	ขอโทษค่ะ ฉันไม่เข้าใจค่ะ
- สิ่งประดิษฐ์	สวัสดิค๊ะ งานการเงินยินดี

คำถาม	คำตอบที่แสดงผล
	ให้บริการค่ะ
- ค่าเบี้ยเลี้ยงพนักงานขับรถ	เบี้ยเลี้ยงครู - ระดับเชี่ยวชาญขึ้นไป 270 บาท - ระดับชำนาญการพิเศษลงมา 240 บาท - ครูพิเศษสอน 240บาท

คำถามที่อยู่นอกขอบเขต แสดงดังตารางที่ 6 โดยผู้วิจัยได้แก้ไขโดย

- สร้าง Intents “ที่อยู่” โดยมี “ที่อยู่”, “ที่อยู่วิทยาลัย” เป็น Training phrases
- สร้าง Intents “กบข.ออมเพิ่ม” โดยมี “ออมเพิ่ม” เป็น Training phrases
- สร้าง Intents “การตรวจสอบสุขภาพประจำปี” โดยมี “ตรวจสอบสุขภาพ” เป็น Training phrases
- สร้าง Intents “การศึกษาดูงานของนักเรียน” โดยมี “นักเรียนศึกษาดูงาน” เป็น Training phrases
- สร้าง Intents “กำหนดการลงทะเลเบียน” โดยมี “กำหนดลงทะเลเบียน” เป็น Training phrases
- สร้าง Intents “กิจกรรมพัฒนาผู้เรียน”, “เงินกิจกรรม” โดยมี “กิจกรรมพัฒ” เป็น Training phrases
- สร้าง Intents “ติดต่อหัวหน้างาน” โดยมี “ติดต่อหัวหน้า” เป็น Training phrases
- สร้าง Intents “ค่าการศึกษาบุตร” โดยมี “ค่าเล่าเรียนบุตร” เป็น Training phrases
- สร้าง Intents “ค่ารักษา” โดยมี “รพ”, “รพ.รัฐ” เป็น Training phrases
- สร้าง Intents “ค่าเช่าบ้าน” โดยมี “ค่าเช่าบ้าน” เป็น Training phrases
- สร้าง Intents “ค่าเช่า” โดยมี “ค่าเช่า”, “ค่าเช่าสถานที่ในวิทยาลัย” เป็น Training phrases

- สร้าง Intents “เบอร์ติดต่อ ห้องการเงิน” โดยมี “เบอร์โทร” เป็น Training phrases
- เพิ่ม “รายหัวของนักเรียน” เป็น Training phrases ของ Intents “เงินรายหัว”
- เพิ่ม “ประเมิน” เป็น Training phrases ของ Intents “แบบประเมิน”
- สร้าง Intents “เงินเดือน” โดยมี “ดูเงินเดือน” เป็น Training phrases
- เพิ่ม “Hello” เป็น Training phrases ของ Intents “ทักทาย”
- สร้าง Intents “สอบถามค่ะ” โดยมี “สอบถามค่ะ” เป็น Training phrases
- สร้าง Intents “ค่าเช่าโรงอาหาร”, โดยมี “ค่าเช่าพื้นที่โรงอาหาร” เป็น Training phrases
- สร้าง Intents “ค่าเช่ารถ”, โดยมี “ค่าเช่ารถ” เป็น Training phrases
- เพิ่ม “ค่ารถจ้างเหมา” เป็น Training phrases ของ Intents “ค่าพาหนะรับจ้าง”
- สร้าง Intents “ขอบคุณ”, โดยมี “ขอบคุณค่ะ” เป็น Training phrases

ตารางที่ 6 คำถามที่อยู่นอกขอบเขตและคำตอบที่แสดงผล ในระยะที่ 2

คำถาม	คำตอบที่แสดงผล
- ที่อยู่ - ที่อยู่วิทยาลัย - ออมเพิ่ม - นักเรียนศึกษาดูงาน - กิจกรรมพัฒ - รายหัวของนักเรียน - ประเมิน	ขอโทษค่ะ ฉันไม่เข้าใจค่ะ

คำถาม	คำตอบที่แสดงผล	คำถาม	คำตอบที่แสดงผล
- เงินเดือน - เงินกิจกรรม - สอบถามค่ะ			ติดต่อ เพื่อไปทำอากาศยานสุวรรณภูมิ จ่ายจริงไม่เกินเที่ยวละ 600 บาท
- ตรวจสอบภาพ - ขอบคุณค่ะ	สวัสดิคัะ งานการเงินยินดีให้บริการค่ะ		- ข้ามเขตจังหวัดอื่นๆ จ่ายจริงไม่เกินเที่ยวละ 500 บาท
- กำหนด ลงทะเบียน	เบี้ยเลี้ยงครู - ระดับเชี่ยวชาญขึ้นไป 270 บาท - ระดับชำนาญการพิเศษลงมา 240 บาท - ครูพิเศษสอน 240บาท		กรณีผู้ไม่มีสิทธิ ได้แก่ ประเภททั่วไป ระดับปฏิบัติงาน และประเภทวิชาการ ระดับปฏิบัติการ ถ้าต้องนำสัมภาระในการเดินทางหรือสิ่งของเครื่องใช้ของทางราชการไปด้วย และเป็นเหตุให้ไม่สะดวกที่จะเดินทางโดยยานพาหนะประจำทาง ให้เบิกค่าพาหนะรับจ้างได้ หรือชี้แจงเหตุผลความจำเป็น
- ติดต่อหัวหน้า - เบอร์โทร	งานการเงิน ชั้น1 ตึกอำนวยการค่ะ		
- รพ - รพ.รัฐ	ดำเนินการตามระเบียบพัสดุค่ะ		
- Hello	อันพึ่งไม่ทันค่ะ		
- ค่าเล่าเรียนบุตร - ค่าเช่ารถ - ค่ารถจ้างเหมา - ค่าเช่าบ้าน - ค่าเช่า - ค่าเช่าสถานที่ในวิทยาลัย - ค่าเช่าพื้นที่โรงอาหาร	- การเดินทางไปราชการ โดยปกติให้ใช้ยานพาหนะประจำทางและให้เบิกค่าพาหนะได้โดยประหยัด - ในกรณีที่ไม่มียานพาหนะประจำทาง หรือมีแต่ต้องการความรวดเร็วเพื่อประโยชน์แก่ราชการ ให้ใช้พาหนะอื่นได้ แต่จะต้องชี้แจงเหตุผลและความจำเป็นไว้ในหลักฐานการขอเบิกค่าพาหนะนั้น ค่าพาหนะรับจ้าง - ในเขตกรุงเทพ หรือเขตจังหวัดอื่น จ่ายจริงไม่เกินเที่ยวละ 300 บาท - ข้ามเขตระหว่างกรุงเทพกับเขตติดต่อ จ่ายจริงไม่เกินเที่ยวละ 500 บาท - ข้ามเขตระหว่างกรุงเทพกับเขต		

3.4 ผลการใช้งานระบบแท็บเล็ตเพื่อสนับสนุนการให้บริการงานการเงิน วิทยาลัยเทคนิคลพบุรี

จากการศึกษาผลการประเมินความพึงพอใจและประเมินประสิทธิภาพการทำงานของระบบแท็บเล็ตเพื่อสนับสนุนการให้บริการงานการเงินวิทยาลัยเทคนิคลพบุรี ผู้วิจัยได้นำเสนอผลการวิเคราะห์ข้อมูล ดังนี้

ตารางที่ 7 ผลการประเมินความพึงพอใจและประเมินประสิทธิภาพการทำงาน

รายการประเมิน	$\bar{X}$	S.D.
ความพึงพอใจของระบบ		
1. ความสะดวกในการใช้งาน	4.93	0.26
2. ความรวดเร็วในการโต้ตอบ	4.92	0.28
3. เนื้อหาสามารถทำความเข้าใจได้ง่าย	4.86	0.34
4. ความเหมาะสมในการโต้ตอบและ	4.86	0.34

รายการประเมิน	$\bar{X}$	S.D.
แสดงผล		
5. ประโยชน์ที่ได้รับจากการใช้งานระบบ	4.91	0.29
6. ความพึงพอใจโดยรวมต่อการใช้งานระบบ	4.93	0.26
ประสิทธิภาพของระบบ		
1. ความครอบคลุมของเนื้อหา	4.84	0.37
2. ด้านความถูกต้องของเนื้อหา	4.88	0.33
3. ระบบสามารถช่วยตอบคำถามสนับสนุนงานการเงินได้	4.83	0.42
4. ความเป็นธรรมชาติของระบบ	4.55	0.63
5. ระยะเวลาในการตอบสนอง	4.90	0.30
6. สามารถทำงานได้ตรงตามความต้องการของผู้ใช้งาน	4.84	0.37

จากการเก็บรวบรวมข้อมูลข้อเสนอแนะจากผู้ใช้งาน พบว่า ผู้ใช้งานมีความพึงพอใจต่อระบบ และมีข้อเสนอแนะที่ช่วยเสริมประสิทธิภาพของระบบเซทบอท โดยมีข้อเสนอแนะดังนี้

- มีข้อเสนอให้เพิ่ม แบบฟอร์มเอกสารต่าง ๆ ซึ่งจะทำให้เซทบอทมีประโยชน์มากยิ่งขึ้นในการให้บริการเอกสาร

- การเพิ่ม กฎ หมาย ที่ เกี่ยว ข้อง เป็น ข้อเสนอแนะที่สำคัญ เพื่อให้ข้อมูลที่ตอบกลับมีความครบถ้วนและแม่นยำ

3.5 อภิปรายผล

การพัฒนาระบบเซทบอทเพื่อสนับสนุนการให้บริการงานการเงิน วิทยาลัยเทคนิคพลบุรี ได้รับการประเมินประสิทธิภาพจากตัวชี้วัดเชิงปริมาณหลายด้าน ดังนี้

3.5.1 ประสิทธิภาพด้านความถูกต้องของคำตอบ และการลดภาระงานของเจ้าหน้าที่

อัตราความถูกต้องของคำตอบที่สูงถึงร้อยละ 96.04 ในระยะแรก และ 87.90 ในระยะการใช้งานจริง ชี้ให้เห็นถึงความสามารถของระบบเซทบอทในการให้ข้อมูลที่แม่นยำและเป็นไปตามระเบียบของงานการเงิน วิทยาลัยเทคนิคพลบุรี ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ความแม่นยำนี้เป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วยลดภาระงานของเจ้าหน้าที่งานการเงิน ได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งคำถามที่ซ้ำซ้อนและเป็น routine การที่ผู้ใช้งานสามารถหาคำตอบได้ด้วยตนเองผ่านระบบ ลดความจำเป็นในการติดต่อเจ้าหน้าที่โดยตรง ทำให้เจ้าหน้าที่มีเวลาไปดำเนินงานที่ซับซ้อนและมีความสำคัญเชิงกลยุทธ์มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ ลัดดาวรรณ เจริญตระกูล และกมลพรรณ ศรีกัน [1] ที่พบว่าเซทบอทสามารถลดภาระงานของเจ้าหน้าที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพในการให้บริการข้อมูลแก่นักท่องเที่ยว ความคล้ายคลึงนี้เน้นย้ำถึงศักยภาพของเซทบอทในการปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานในหลากหลายบริบท โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการลดงานซ้ำซ้อนของบุคลากร

นอกจากความถูกต้องของคำตอบและความพึงพอใจของผู้ใช้งานแล้ว ยังมีการวัดผลเชิงปริมาณอื่น ๆ ดังนี้

1) เวลาตอบสนองของระบบเฉลี่ย 1-2 วินาทีต่อคำถาม เมื่อเทียบกับการรอเจ้าหน้าที่ที่เฉลี่ย 15 นาที/ครั้ง

2) จำนวนชั่วโมงที่ลดภาระงานเจ้าหน้าที่ ประมาณ 11.5 ชั่วโมงต่อเดือน (จากคำถามที่ตอบแทนได้ในระยะที่ 2 จำนวน 276 คำถาม ในระยะเวลา 4 เดือน = 69 คำถามต่อเดือน)

69 คำถาม x 15 นาที = 17.25 ชั่วโมง/เดือน
หรือ 17.25 ชั่วโมง ÷ 21 วัน = 0.82 ชั่วโมง/วัน
= 49.2 นาที/วัน

3) อัตราการแก้ปัญหาโดยไม่ต้องพึ่งเจ้าหน้าที่ ร้อยละ 87.9

4) จากการคำนวณภาระงานที่ระบบสามารถช่วยลดได้โดยเฉลี่ย 17.25 ชั่วโมงต่อเดือน เมื่อเทียบกับอัตราค่าจ้างเจ้าหน้าที่การเงินที่มีเงินเดือน 11,000 บาทต่อเดือน (หรือประมาณ 65.48 บาทต่อชั่วโมง) พบว่าระบบสามารถลดต้นทุนแรงงานได้ประมาณ 1,129.53 บาทต่อเดือน หรือเทียบเท่าประมาณ 13,554.36 บาทต่อปี ซึ่งแสดงให้เห็นถึง ผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์ที่เป็นรูปธรรม จากการใช้งานแชทบอท

3.5.2 ประสิทธิภาพด้านเวลาตอบสนองและการเข้าถึงข้อมูล

ระบบแชทบอทมีระยะเวลาในการตอบสนองต่อข้อคำถามของผู้ใช้งานโดยเฉลี่ย 4.90 (S.D. = 0.30) ซึ่งสะท้อนถึงความสามารถของระบบในการให้บริการข้อมูลที่รวดเร็วและทันทั่วถึงที่ ผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงข้อมูลได้ตลอด 24 ชั่วโมง โดยไม่ต้องรอการตอบกลับจากเจ้าหน้าที่ ทำให้ได้รับข้อมูลที่ต้องการได้ทันที การเข้าถึงข้อมูลที่รวดเร็วและสะดวกนี้เป็นการยกระดับคุณภาพการบริการอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะอย่างยิ่งในยุคดิจิทัลที่ความรวดเร็วเป็นสิ่งสำคัญ ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดของ จอร์จคัลด์ วังคังทะ, สุธาสินี คุปตะบุตร, ปิยวรรณ โปสาธอน, อุบลศิลป์ โพธิ์พรหม, และแพรวตะวัน จารุตัน [2] ที่พัฒนาแชทบอทเพื่อสนับสนุนการฝึกประสบการณ์วิชาชีพโดยใช้ Line Messaging API ในการดึงข้อมูลและตอบคำถามแก่นักศึกษาแบบเรียลไทม์ การที่แพลตฟอร์ม LINE สามารถเข้าถึงได้ง่ายและ ผู้ใช้งานคุ้นเคยอยู่แล้ว ยิ่งเสริมให้การนำระบบไปใช้ในชีวิตประจำวันเป็นไปอย่างราบรื่น

3.5.3 ประสิทธิภาพด้านการประมวลผลภาษาธรรมชาติและประสบการณ์ผู้ใช้

การนำ Dialogflow มาใช้ในการประมวลผลภาษาธรรมชาติ ถือเป็นหัวใจสำคัญที่ทำให้แชทบอทของงานวิจัยนี้สามารถเข้าใจเจตนาของผู้ใช้งานและตอบคำถามได้อย่างเป็นระบบ แม้ว่าผู้ใช้งานจะสอบถามด้วย

ภาษาที่ไม่ตรงกับคำสำคัญที่กำหนดไว้ล่วงหน้า ระบบยังสามารถจับความต้องการของผู้ใช้ได้อย่างแม่นยำ ด้วยการที่ Dialogflow สามารถเรียนรู้และปรับปรุง Training Phrases ได้อย่างต่อเนื่องตามคำถามจริงที่พบจากการใช้งาน ความสามารถนี้ส่งผลโดยตรงต่อความพึงพอใจโดยรวมของผู้ใช้งานที่สูงถึง 4.93 (S.D. = 0.26) เนื่องจากผู้ใช้งานได้รับข้อมูลที่ต้องการได้อย่างรวดเร็วและตรงประเด็น แนวคิดนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ มนต์ทิศา รัตนพันธ์ และนัตรวดี สายใยทอง [7] ซึ่งใช้ Google Sheets และ Dialogflow ในการพัฒนาแชทบอทสำหรับงานบริการข้อมูลงานวิจัย และพบว่าการใช้เทคโนโลยีดังกล่าวช่วยลดเวลาการรอคอยของผู้ใช้และเพิ่มความแม่นยำในการตอบคำถาม ซึ่งเป็นการยืนยันประสิทธิภาพของ Dialogflow ในการเพิ่มความฉลาดของแชทบอทในการโต้ตอบกับมนุษย์

3.5.4 การยอมรับและการใช้งานระบบ

การเพิ่มขึ้นของจำนวนผู้ใช้งานที่เพิ่มพูนกับบัญชีไลน์สำหรับธุรกิจ เป็น 202 ราย และปริมาณคำถามรวมกว่า 541 ครั้งตลอดระยะเวลาการศึกษา แสดงให้เห็นถึงการยอมรับและการใช้งานระบบแชทบอทที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง สะท้อนให้เห็นว่าระบบได้กลายเป็นช่องทางหลักที่บุคลากรใช้ในการเข้าถึงข้อมูลงานการเงินความสำเร็จในการนำไปใช้งานจริงนี้เป็นดัชนีสำคัญที่ชี้วัดว่าระบบสามารถตอบสนองความต้องการของผู้ใช้งานได้อย่างแท้จริง และบ่งบอกถึงความเชื่อมั่นที่ผู้ใช้งานมีต่อระบบในการให้ข้อมูลที่ถูกต้องและรวดเร็ว

3.5.5 ข้อจำกัดและจุดเด่นเมื่อเทียบกับงานวิจัยอื่น

แม้ว่าจะมีงานวิจัยจำนวนมากศึกษาการประยุกต์ใช้แชทบอทในงานบริการข้อมูล แต่จุดเด่นของงานวิจัยนี้คือการมุ่งเน้นไปที่การให้บริการข้อมูลด้านการเงินภายในสถานศึกษา ซึ่งเป็นงานที่ต้องปฏิบัติตามกฎระเบียบ และข้อกำหนดที่เข้มงวดและจำเป็นต้องอ้างอิงอย่างถูกต้องแม่นยำ ความซับซ้อนนี้สอดคล้องกับสิ่งที่

ณัฐกัญย์ สืบศรี, และชนิดา ขารณะ [5] ได้ชี้ให้เห็นในการศึกษาแนวทางการพัฒนาการปฏิบัติงานด้านการเงินและบัญชีในสำนักงานศึกษาธิการจังหวัด ซึ่งพบว่าการดำเนินงานด้านการเงินต้องเป็นไปตามระเบียบอย่างเคร่งครัด ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงได้ออกแบบแพลตฟอร์มที่สามารถให้ข้อมูลตามระเบียบข้อบังคับได้อย่างถูกต้องและเชื่อถือได้ ซึ่งเป็นจุดที่แตกต่างจากแพลตฟอร์มที่อาจเน้นการตอบคำถามในลักษณะที่ไม่ซับซ้อนมากนัก อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดของระบบอาจอยู่ในประเด็นที่ซับซ้อนมากหรือเกี่ยวข้องกับสถานการณ์เฉพาะบุคคลที่จำเป็นต้องมีการตีความ ซึ่งอาจยังต้องอาศัยการปรึกษาเจ้าหน้าที่โดยตรง

ระบบแพลตฟอร์มสนับสนุนการเข้าถึงข้อมูลการเงินในรูปแบบที่เท่าเทียม ลดความเหลื่อมล้ำด้านเวลาและโอกาสสำหรับบุคลากรที่ไม่สามารถติดต่อเจ้าหน้าที่ในเวลาราชการได้ นอกจากนี้ ระบบยังสามารถขยายใช้ในหน่วยงานราชการอื่นได้หากปรับชุดข้อมูล เช่น หน่วยงานด้านทะเบียน หรือพัสดุ ซึ่งช่วยลดภาระในวงกว้างระดับระบบราชการ

4. สรุปผล

การพัฒนาแพลตฟอร์มเพื่อสนับสนุนการให้บริการงานการเงิน วิทยาลัยเทคนิคลพบุรี ประสบความสำเร็จตามวัตถุประสงค์ในการพัฒนาระบบเพื่อช่วยตอบคำถามเกี่ยวกับระเบียบและแนวทางการปฏิบัติของงานการเงินได้อย่างถูกต้อง และช่วยลดภาระงานของเจ้าหน้าที่ รวมถึงเพิ่มความสะดวกในการเข้าถึงข้อมูลให้กับบุคลากร

ระบบแพลตฟอร์มที่พัฒนาขึ้นนี้มีประสิทธิภาพสูงในด้านการเข้าถึงของคำตอบ ด้วยอัตราความถูกต้องที่น่าพอใจ และมีเวลาตอบสนองที่รวดเร็วเป็นพิเศษ ทำให้ผู้ใช้งานสามารถเข้าถึงข้อมูลทางการเงินที่ซับซ้อนได้ตลอด 24 ชั่วโมง โดยไม่ต้องรอการบริการจากเจ้าหน้าที่

ส่งผลให้ลดภาระงานของเจ้าหน้าที่งานการเงินได้อย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ การที่ปริมาณผู้ใช้งานและคำถามเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องยังสะท้อนถึงการยอมรับและประสิทธิภาพของระบบในการเป็นช่องทางหลักสำหรับการสอบถามข้อมูลทางการเงินในวิทยาลัยเทคนิคลพบุรี

การประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการประมวลผลภาษาธรรมชาติ (NLP) ผ่าน Dialogflow และการเชื่อมต่อผ่าน Line Messaging API ได้พิสูจน์แล้วว่ามีประสิทธิภาพในการสร้างระบบบริการข้อมูลอัตโนมัติที่มีความฉลาดและใช้งานง่าย ซึ่งเป็นผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และตอบย้ำถึงคุณค่าของการนำเทคโนโลยีแพลตฟอร์มมาปรับใช้ในงานบริการข้อมูลที่มีความซับซ้อนและต้องการความถูกต้องแม่นยำสูง

4.1 นวัตกรรมและสิ่งใหม่ของงานวิจัย

จุดเด่นของงานวิจัยนี้คือการมุ่งเน้นไปที่การประยุกต์ใช้แพลตฟอร์มสำหรับงานบริการข้อมูลด้านการเงินในบริบทของสถาบันการศึกษา ซึ่งมีความซับซ้อนและต้องอ้างอิงระเบียบข้อบังคับที่เข้มงวด การที่ระบบสามารถให้ข้อมูลที่ถูกต้องตามกฎระเบียบของงานการเงินได้อย่างแม่นยำด้วยระบบตอบคำถามอัตโนมัติ ถือเป็นนวัตกรรมที่สำคัญ เนื่องจากงานด้านการเงินมักต้องการการตรวจสอบและยืนยันข้อมูลที่สูงกว่างานบริการข้อมูลทั่วไป การพัฒนานี้ไม่เพียงช่วยลดภาระงานของเจ้าหน้าที่ แต่ยังช่วยให้บุคลากรเข้าถึงข้อมูลที่ถูกต้องได้อย่างรวดเร็วและสร้างความโปร่งใสในการดำเนินงานทางการเงิน ซึ่งแตกต่างจากแพลตฟอร์มทั่วไปที่อาจเน้นการตอบคำถามในลักษณะที่ไม่ซับซ้อนหรือเป็นข้อมูลทั่วไป

4.2 ข้อจำกัดของงานวิจัยและแนวทางในการวิจัยต่อไปในอนาคต

แม้ว่าระบบแชทบอทจะแสดงประสิทธิภาพที่น่าพึงพอใจ แต่ก็ยังมีข้อจำกัดบางประการที่สามารถนำไปพัฒนาต่อไปในอนาคต ได้แก่

4.2.1 การจัดการกับคำถามที่มีความซับซ้อนสูงหรือต้องการการตีความ

ปัจจุบันระบบยังคงพึ่งพาฐานข้อมูลที่กำหนดไว้ล่วงหน้า คำถามที่มีความซับซ้อนมาก เช่น กรณีศึกษาเฉพาะบุคคล หรือคำถามที่ต้องอาศัยการตีความจากเจ้าหน้าที่ผู้เชี่ยวชาญ อาจยังไม่สามารถตอบได้อย่างสมบูรณ์

4.2.2 การรวมระบบกับฐานข้อมูลหรือระบบอื่นๆ

ปัจจุบันระบบยังเน้นการให้ข้อมูลแบบ static การพัฒนาในอนาคตอาจรวมระบบเข้ากับฐานข้อมูลงานการเงินภายใน (เช่น ระบบเบิกจ่าย) เพื่อให้สามารถตอบคำถามที่เกี่ยวข้องกับสถานะของเอกสาร หรือข้อมูลส่วนบุคคลได้อย่างอัตโนมัติและเป็นแบบเรียลไทม์มากขึ้น

4.2.3 การเพิ่มฟังก์ชันการโต้ตอบแบบสนทนาที่ซับซ้อน (Advanced Conversational AI)

การนำเทคนิค AI ขั้นสูง เช่น Machine Learning หรือ Deep Learning มาใช้ในการประมวลผลภาษาธรรมชาติที่ซับซ้อนยิ่งขึ้น จะช่วยให้แชทบอทสามารถเรียนรู้จากบทสนทนาที่ผ่านมา และตอบคำถามที่หลากหลายและเป็นธรรมชาติมากขึ้น

4.2.4 การขยายขอบเขตการให้บริการ

การนำระบบแชทบอทไปประยุกต์ใช้กับงานบริการอื่นๆ ภายในวิทยาลัยฯ ที่มีลักษณะเป็นคำถามซ้ำซ้อน เช่น งานทะเบียน งานพัสดุ หรือการบริการนักศึกษา ก็เป็นแนวทางที่น่าสนใจในการวิจัยและพัฒนาต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยในครั้งนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความช่วยเหลือและการสนับสนุนจาก ผศ.ดร.ชุติมา เบี้ยวไข่มุข อาจารย์ที่ปรึกษาที่ได้สละเวลาให้คำปรึกษาคำแนะนำและข้อเสนอแนะ ตลอดจนชี้แนะแนวทางในการดำเนินงานวิจัย ทำให้สามารถพัฒนาระบบให้มีประสิทธิภาพและสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ที่ตั้งไว้ และสำเร็จลุล่วงเป็นที่เรียบร้อย และต้องขอขอบคุณบุคลากรของวิทยาลัยเทคนิคพนบุรี ที่ให้ความร่วมมือในการตอบแบบสอบถาม ตลอดจนทดสอบระบบ และให้ข้อคิดเห็นที่เป็นประโยชน์ ซึ่งช่วยให้สามารถปรับปรุงระบบแก้ไขระบบแชทบอทให้ตรงกับความต้องการของผู้ใช้งานจริง

สุดท้ายนี้ ขอขอบคุณทุกท่านที่มีส่วนร่วมทั้งทางตรงและทางอ้อม ข้าพเจ้าหวังว่างานวิจัยฉบับนี้จะ เป็นประโยชน์ต่อการผู้ที่ต้องการศึกษา และสามารถนำไปต่อยอดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานในอนาคตต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- [1] L. Riantarakul, K. Srikun, “Application of LINE Chatbot for Tourist Information Services in National Parks,” in *Proc. Kasetsart University Academic Conference*, vol. 59, Mar. 2021, pp. 1072-1079(in Thai).
- [2] K. Wongchanta, S. Kuptabut, P. Thopason, U. Phoprom and P. Charutan, “Development of an Automatic Question-Answering System for Professional Experience Training,” *Journal of Science, Engineering, and Technology, Loei Rajabhat University*, vol. 3, pp. 28-39, Jul. 2023(in Thai).

- [3] K. Sangkasrisombat, C. Machara, M. Promsri and N. Panit, "Development of a Knowledge and Consultation Model via LINE Official Account Application for Mothers in Caring for Premature Infants," *Journal of Health Center* 9, vol. 16, pp. 623-641, May 2022(in Thai).
- [4] S. Kosasaeng, K. Phongpitaya and S. Thepsaeng, "Digital Technology for Educational Institution Management in the Era of Digital Transformation," *Journal of Educational Administration, SWU*, vol. 19, pp. 242-250, Jul. 2022(in Thai).
- [5] N. Suebsri and C. Yarana, "A Study on the Development Guidelines for Financial and Accounting Operations in Provincial Education Offices under the Office of the Permanent Secretary, Ministry of Education," *Journal of Management Science, Ubon Ratchathani University*, vol. 10, pp. 75-97, Jan. 2021(in Thai).
- [6] N. Udomlap, "Knowledge and Understanding of Financial and Accounting Practices among Finance and Accounting Officers at Mahasarakham University," *Journal of Politics and Governance*, vol. 10, pp. 238-252, Jan. 2020(in Thai).
- [7] M. Rattanaphan and C. Saiyaitong, "Development of a LINE Chatbot for Research Services: A Case Study of the Research and Development Institute, Rajamangala University of Technology Thanyaburi," *Journal of Applied Research on Science and Technology (JARST)*, vol. 22, pp. 78-89, Apr. 2023(in Thai).

ประวัติผู้ประพันธ์ :



น.ส.ศิริพิไล พรหมแพทย
ตำแหน่ง ครูชำนาญการพิเศษ
วิทยาลัยเทคนิคพนบุรี



ผศ.ดร.ชุตินา พิศาลย์
ผู้อำนวยการหลักสูตร
วิทยาศาสตรมหาบัณฑิต
การจัดการนวัตกรรมดิจิทัล
(ระบบการศึกษาทางไกลผ่าน
อินเทอร์เน็ต)

การศึกษาทางทฤษฎีเกี่ยวกับลักษณะการไหลของสารทำความเย็น R600a ในท่อคาปิลลารีที่ใช้ในระบบทำความเย็น

Theoretical Investigation of R600a Flow Characteristics in a Capillary Tube Used in Refrigeration Systems

ไกรวิชญ์ เยื้องเนิน, ปิยธิดา เดชกรกรกิต, ภาณุพงศ์ เฮงทรัพย์ศิริกุล และ วรเชษฐ์ ภิรมย์ภักดี*

Kraiwit Yesungnern, Piyathida Detkorakrit, Phanupong Hengsubsirikul and Worachest Pirompugd*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

169 ถนนลงหาดบางแสน ตำบลแสนสุข อำเภอเมืองชลบุรี จังหวัดชลบุรี 20131

*ผู้นิพนธ์ประสานงาน : worapiro@eng.buu.ac.th

วันที่รับบทความ: 1 กรกฎาคม 2568 / วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 : 7 สิงหาคม 2568 / วันที่ตอบรับการตีพิมพ์: 15 สิงหาคม 2568

บทคัดย่อ งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาเชิงทฤษฎีเกี่ยวกับการไหลของสารทำความเย็น R600a ผ่านท่อรูเล็กหรือที่นิยมเรียกกันว่า ท่อคาปิลลารี แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นจะอยู่บนพื้นฐานของการไหลเนื้อเดียวของ R600a ผ่านท่อคาปิลลารี โดย R600a จะมีการเปลี่ยนสถานะตลอดการไหล ซึ่งจะเริ่มจากสถานะของเหลวเย็นเยือก ของเหลวอิ่มตัว ของเหลวอิ่มตัว-ไออิ่มตัว จนกระทั่ง R600a มีความเร็วเท่ากับความเร็วเสียงที่ทางออกของท่อคาปิลลารี แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นได้รับการยืนยันความถูกต้องโดยการเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ในอดีต ซึ่งพบว่ามีความสอดคล้องและใกล้เคียงกันอย่างยิ่ง นอกจากนี้จากผลลัพธ์ พบว่าเมื่ออัตราการไหลเพิ่มขึ้น ความดันของ R600a จะลดลงอย่างรวดเร็ว ในขณะที่การเพิ่มขึ้นของเส้นผ่านศูนย์กลางท่อคาปิลลารีและระดับความเย็นยิ่งยวด ทำให้อัตราการไหลของ R600a จะต้องเพิ่มขึ้น เพื่อให้ความดันที่ลดลงของ R600a มีค่าคงที่ ส่วนท่อที่มีความขรุขระมากกว่า จะต้องการอัตราการไหลที่น้อยกว่า และจะให้ผลลัพธ์ที่เด่นชัดสำหรับท่อที่มีขนาดใหญ่

คำสำคัญ : การไหลเนื้อเดียว, ท่อคาปิลลารี, ระบบทำความเย็น, R600a

Abstract This research presents a theoretical investigation of the flow characteristics of R600a refrigerant through a small-bore tube, commonly called to as a capillary tube. The developed mathematical model is based on the homogeneous flow, accounting for the phase change of R600a along the capillary tube. The refrigerant enters as a subcooled liquid, transitions to a saturated liquid, then to a saturated liquid-vapor mixture and finally accelerates to sonic velocity at the tube outlet. The model was validated by comparison with previous studies, showing excellent agreement. The results indicate that as the mass flow rate increases, the pressure of R600a drops sharply. In addition, increasing the capillary tube diameter or the degree of subcooling necessitates a higher flow rate to maintain a constant pressure drop. Conversely, a rougher inner tube surface requires a lower flow rate, with the effect being more pronounced in larger-diameter tubes.

Keywords: Capillary tube, Homogeneous flow, Refrigeration, R600a.

1. บทนำ

ในปัจจุบัน เครื่องทำความเย็นและเครื่องปรับอากาศเป็นสิ่งจำเป็นสำหรับบ้านเรือนและอุตสาหกรรมในประเทศไทย โดยประเทศไทยส่งออกเครื่องปรับอากาศเป็นอันดับ 3 ของโลก โดยมีมูลค่า 6.9 พันล้านเหรียญสหรัฐ ซึ่งคิดเป็น 10.3% โดยเป็นรองสาธารณรัฐประชาชนจีน ที่มีมูลค่าการส่งออก 26.2 พันล้านเหรียญสหรัฐ ซึ่งคิดเป็น 39.3% และเม็กซิโก ที่มีมูลค่าการส่งออก 7.6 พันล้านเหรียญสหรัฐ หรือคิดเป็น 11.4% ของมูลค่าการส่งออกเครื่องปรับอากาศทั้งหมด^[1] โดยหนึ่งในอุปกรณ์ที่สำคัญในระบบเครื่องทำความเย็นขนาดเล็ก คือ ท่อคาปิลลารี ซึ่งมีหน้าที่ควบคุมการไหลและลดความดันของสารทำความเย็น นอกจากนี้ การใช้สารทำความเย็น R600a (isobutane) ในระบบทำความเย็นขนาดเล็ก เช่น ตู้เย็นและเครื่องปรับอากาศ กำลังได้รับความสนใจเพิ่มขึ้น เนื่องจาก R600a มีศักยภาพในการทดแทนสารทำความเย็นที่ก่อให้เกิดภาวะโลกร้อนสูง[2] ด้วยคุณสมบัติที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและประสิทธิภาพด้านพลังงาน ด้วยเหตุนี้จึงมีงานวิจัยจำนวนมาก ที่ศึกษาเกี่ยวกับการไหลของ R600a ผ่านท่อคาปิลลารี

จากงานวิจัยในอดีต ได้แสดงให้เห็นว่าลักษณะทางเรขาคณิตของท่อคาปิลลารี เช่น ความยาว เส้นผ่านศูนย์กลาง รูปทรงเกลียว และระยะพิชของท่อที่ขดเป็นเกลียวปริง มีผลต่อประสิทธิภาพของระบบทำความเย็นแบบอัดไอโดยตรง[2, 3, 4] การเลือกขนาดและรูปแบบท่อที่เหมาะสมจะช่วยเพิ่มค่า COP และลดพลังงานที่ใช้ของคอมเพรสเซอร์[5, 6] ในปี ค.ศ. 2017 Yang et al. [7] ได้ศึกษาเชิงทดลอง สำหรับการไหลของ R600a ผ่านท่อเล็กที่อยู่ในแนวราบ โดย Yang et al. [7] ได้นำเสนอสัมประสิทธิ์การพาความร้อนและความดันลดที่เกิดขึ้น ซึ่งทั้งสองปริมาณดังกล่าวนี้ จะเพิ่มขึ้นตามคุณภาพไอที่

เพิ่มขึ้น ในปี ค.ศ. 2025 Knabben and Boeng [8] นำเสนอการวิเคราะห์ระดับชิ้นส่วน (Component-level analysis) สำหรับท่อคาปิลลารีที่ถูกเชื่อมยึดติดกับท่อด้านเข้าของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อนโดยใช้สารทำความเย็น R600a และใช้แบบจำลองการไหลที่เกือบจะเป็นเนื้อเดียวกัน (Quasi-homogeneous flow model) สำหรับการไหลในช่วงสองสถานะ โดยแบบจำลองดังกล่าวนี้สามารถทำนาย อัตราการไหลได้อย่างแม่นยำโดยมีความผิดพลาดไม่เกิน $\pm 10\%$

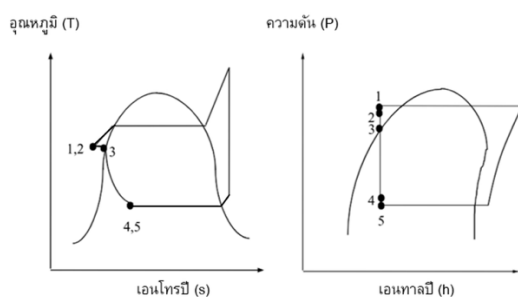
ในการเลือกขนาดและสภาวะการทำงานที่เหมาะสมสำหรับท่อคาปิลลารีนั้น Pirompugd and Wongwises [9] ได้นำเสนอแบบจำลองการไหลเนื้อเดียวกันสำหรับวิเคราะห์การไหลของสารทำความเย็นผ่านท่อคาปิลลารีที่อยู่ในแนวราบ โดยแบบจำลองดังกล่าวนี้ จะอยู่บนพื้นฐานของอุณหพลศาสตร์และกลศาสตร์ของไหล รวมถึงการไหลสองสถานะ นอกจากนี้ Pirompugd and Wongwises [9] ยังได้นำเสนอแผนภาพสำหรับเลือกขนาดท่อคาปิลลารีที่ใช้สารทำความเย็น R134a, R404A, R407B, R407C และ R410A โดยสามารถประยุกต์ใช้กับท่อคาปิลลารีที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.63 mm และมีความยาว 2.03 m ทั้งนี้ ขนาดดังกล่าว อ้างอิงจากแผนภาพของ ASHRAE ที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย นอกจากนี้ Pirompugd and Wongwises [9] ยังได้นำเสนอแผนภาพสำหรับแก้ไขเพื่อใช้เลือกขนาดและสภาวะการทำงานของท่อคาปิลลารีที่มีขนาดอื่นๆ ไว้อีกด้วย

อย่างไรก็ตาม จากการสืบค้นข้อมูลต่างๆ รวมถึงข้อมูลจาก ASHRAE Handbook 2022 [10] ไม่ปรากฏบทความวิจัยหรือเอกสารที่นำเสนอแผนภาพสำหรับเลือกขนาดและสภาวะการทำงานของท่อคาปิลลารีที่ใช้สารทำความเย็น R600a อีกทั้งยังไม่มีงานวิจัยใด ที่ศึกษาเกี่ยวกับคุณลักษณะของสารทำความเย็น R600a ที่ไหลผ่านท่อคาปิลลารี คือ ความดัน เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อ ความยาวท่อ ความขรุขระ อุณหภูมิด้านเข้า และ

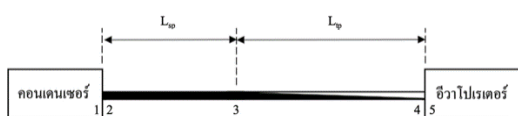
ระดับความเย็นยิ่งยวด (Degree of subcooling) เป็นต้น ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ จะเป็นการศึกษาสมรรถนะของ ท่อคาปิลลารีหรือท่อรูเล็ก ที่ใช้ R600a เป็นสารทำความเย็น และนำเสนอแผนภาพสำหรับเลือกขนาด ท่อคาปิลลารีที่ใช้สารทำความเย็น R600a

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

ในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ สำหรับอธิบายลักษณะการไหลของสารทำความเย็น R600a ผ่านท่อคาปิลลารีนั้น จะแบ่งการพิจารณาแบ่ง ท่อคาปิลลารีออกเป็น 2 ช่วง คือ ช่วงการไหลสถานะ เดียว และช่วงการไหลสองสถานะ โดยตัวแปรอิสระ คือ อุณหภูมิคอนเดนเซอร์ (T_1), อุณหภูมิอีวาโปรเตอร์ (T_5), ระดับความเย็นยิ่งยวด (DT), เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน ท่อคาปิลลารี (d), ความขรุขระต่อเส้นผ่านศูนย์กลาง ภายในท่อคาปิลลารี (e/d) และอัตราการไหลโดยมวล ของสารทำความเย็น R600a ($\dot{m}$) โดยตำแหน่งต่างๆ นั้น สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1 และ 2



รูปที่ 1 แผนภาพ T-s และ P-h สำหรับ การไหลของ R600a ผ่านท่อคาปิลลารี



รูปที่ 2 การไหลของสารทำความเย็นผ่านท่อคาปิลลารี

จากรูปที่ 2 สารทำความเย็นจะไหลออกจาก คอนเดนเซอร์ ณ ตำแหน่งที่ 1 โดยมีสถานะเป็นของเหลว เย็นเยือก ดังแสดงในรูปที่ 1 จากนั้น สารทำความเย็นจะ ไหลเข้าสู่ท่อคาปิลลารี ณ ตำแหน่งที่ 2 จากนั้น สารทำความเย็นจะไหลไปตามท่อคาปิลลารี โดยจะมีความดัน ลดลงเรื่อยๆ จนถึงตำแหน่งที่ 3 ดังแสดงในรูปที่ 2 ณ ตำแหน่งที่ 3 นี้ สารทำความเย็นจะมีสถานะของเหลว อิ่มตัว ดังแสดงในรูปที่ 1 จากนั้น เมื่อสารทำความเย็น ไหลต่อไป ของเหลวบางส่วนจะเดือดกลายเป็นไอน้ำ มากขึ้นเรื่อยๆ ตามความยาวท่อคาปิลลารี ดังแสดงใน รูปที่ 2 โดยสารทำความเย็นในช่วงนี้จะมีสถานะเป็น ของเหลวอิ่มตัวและไอน้ำอิ่มตัว และเมื่อสารทำความเย็น กลายเป็นไอน้ำมากขึ้นเรื่อยๆ ความเร็วของสารทำความเย็น ก็จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนเท่ากับความเร็วเสียง ณ ตำแหน่งที่ 4 สารทำความเย็นความจะไหลออกจากท่อคาปิลลารี พร้อมกันนี้ สารทำความเย็นจะไหลเข้าสู่อีวาโปรเตอร์ ณ ตำแหน่งที่ 5

2.1 ช่วงการไหลสถานะเดียว

สำหรับช่วงการไหลสถานะเดียวนั้น จะเป็นการไหล จากตำแหน่งที่ 1 ไปยังตำแหน่งที่ 3 ซึ่งสามารถแบ่ง การพิจารณาออกเป็น 2 ช่วง คือ การไหลจากตำแหน่งที่ 1 ไปยังตำแหน่งที่ 2 ซึ่งเป็นการไหลของ R600a ออกจาก คอนเดนเซอร์เข้าสู่คาปิลลารี โดยพื้นที่หน้าตัดของ คอนเดนเซอร์จะใหญ่กว่าพื้นที่หน้าตัดของท่อคาปิลลารี เป็นอย่างมาก เมื่ออาศัยสมการพลังงาน จะได้

$$P_1 - P_2 = (k + 1) \frac{\rho V_2^2}{2} \quad \dots (1)$$

เมื่อ k คือ ตัวประกอบการสูญเสียที่ทางเข้า ท่อคาปิลลารี

P คือ ความดัน (Pa)

V คือ ความเร็ว (m/s)

ρ คือ ความหนาแน่น (kg/m^3)

สำหรับการไหลจากตำแหน่งที่ 2 ไปยังตำแหน่งที่ 3 นั้น จะเกิดการสูญเสียหลักแต่เพียงอย่างเดียว การหาความยาวของท่อคาปิลลารีในช่วงนี้ สามารถเริ่มจากการพิจารณาสมการพลังงาน ดังต่อไปนี้

$$\frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 = \frac{P_3}{\rho g} + \frac{V_3^2}{2g} + z_3 + h_{L,23} \quad \dots (2)$$

เมื่อ g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (9.81 m/s^2)

$h_{L,23}$ คือ เสถียรของการสูญเสียหลัก (m)

z คือ ระดับความสูงของท่อคาปิลลารี (m)

เมื่อแทนค่า $h_{L,23}$ ลงในสมการที่ (3) แล้วจัดรูปของสมการใหม่ จะได้สมการที่ใช้สำหรับคำนวณความยาวของท่อคาปิลลารีในช่วงการไหลสถานะเดียว ดังนี้

$$L_{sp} = \frac{d}{f_{sp}} \left[(P_1 - P_3) \frac{2\rho}{G^2} - k - 1 \right] \quad \dots (3)$$

เมื่อ d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อคาปิลลารี (m)

f_{sp} คือ ตัวประกอบความเสียดทาน

G คือ อัตราการไหลต่อพื้นที่หน้าตัด ($\text{kg/m}^2/\text{s}$)

k คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียรอง

L_{sp} คือ ความยาวท่อคาปิลลารีในช่วงการไหลสถานะเดียว (m)

จากสมการที่ (3) จะสามารถคำนวณความยาวของท่อคาปิลลารี ในช่วงการไหลสถานะเดียวได้ โดยจะมีผลต่างของความดันสารทำความเย็นที่ตำแหน่งที่ 1 และตำแหน่งที่ 3 เป็นแรงขับ (Driving force)

สำหรับตัวประกอบความเสียดทาน สามารถหาได้จากสมการของ Colebrook ดังนี้

$$\frac{1}{\sqrt{f_{sp}}} = -2 \log \left(\frac{\epsilon/d}{3.7} + \frac{2.51}{\text{Re} \sqrt{f_{sp}}} \right) \quad \dots (4)$$

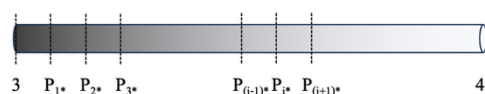
เมื่อ Re คือ ตัวเลขไรย์โนลด์

ϵ คือ ความขรุขระ (m)

2.2 ช่วงการไหลสองสถานะ

สำหรับการไหลสองสถานะ สารทำความเย็น R600a จากตำแหน่งที่ 3 ซึ่งมีสถานะเป็นของเหลวอิ่มตัว จะค่อยๆ กลายเป็นไอ ทำให้สารทำความเย็นอยู่ในสถานะของเหลวอิ่มตัวและไออิ่มตัว และเมื่อปริมาณไอเพิ่มขึ้น จะทำให้สารทำความเย็นมีความเร็วเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนเท่ากับความเร็วเสียง ซึ่งจะเป็นตำแหน่งที่ 4 หรือตำแหน่งสุดท้ายของท่อคาปิลลารี ในการคำนวณหาความยาวในช่วงนี้ ท่อคาปิลลารีจะถูกแบ่งการพิจารณาออกเป็น n ส่วน โดยแต่ละส่วนจะมีผลต่างของความดัน (ΔP) เท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 3

ในการหาคุณสมบัติของสารทำความเย็นในช่วงการไหลสองสถานะนี้ จะอาศัยแบบจำลองการไหลเนื้อเดียว โดยจะเริ่มจากการพิจารณาสมการพลังงาน ดังนี้



รูปที่ 3 การไหลสองสถานะผ่านท่อคาปิลลารี

$$h_{i*} + \frac{V_{i*}^2}{2} = h_3 + \frac{V_3^2}{2} \quad \dots (5)$$

เมื่อ h คือ เอนทัลปี (J/kg)

จากสมการที่ (5) เมื่อเปลี่ยนเอนทัลปีและความเร็วให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันของคุณภาพไอ จะทำให้ได้สมการที่ใช้ในการคำนวณคุณภาพไอ ดังนี้

$$X_{i*} = \frac{-h_{fg,i*} - G^2 v_{f,i*} v_{fg,i*} + \sqrt{(h_{fg,i*} + G^2 v_{f,i*} v_{fg,i*})^2 - 2G^2 v_{fg,i*}^2 \left[h_{f,i*} + 0.5G^2 v_{f,i*}^2 - h_3 - \frac{v_3^2}{2} \right]}}{G^2 v_{fg,i*}^2} \quad \dots (6)$$

สำหรับความหนืด สามารถคำนวณได้จากสมการ
ของ McAdams et al. [11] ดังนี้

$$\frac{1}{\mu_i*} = \frac{1-X_{i*}}{\mu_{f,i*}} + \frac{X_{i*}}{\mu_{g,i*}} \quad \dots (7)$$

เมื่อ x คือ คุณภาพไอ
 V คือ ปริมาตรจำเพาะ (m^3/kg)
 μ คือ ความหนืด (Pa.s)
 f หมายถึง สถานะของเหลว
 g หมายถึง สถานะก๊าซ

ในการหาความยาวแต่ละช่วงของท่อคาปิลลารี
ในช่วงการไหลสองสถานะ จะอาศัยสมการโมเมนต์
ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ได้ดังนี้

$$\frac{1}{\rho_i*} \frac{d\rho}{dL} - \frac{\rho_i*}{G^2 f_{tp,i*}} \frac{dP}{dL} - \frac{1}{2d} = 0 \quad \dots (8)$$

ในการแก้สมการที่ (8) จะอาศัยวิธีเชิงตัวเลข ซึ่งก็คือ
วิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (Finite difference method) ดังนี้

$$\frac{1}{\rho_i*} \frac{\rho_{i*+1} - \rho_{i*-1}}{2 \cdot \Delta L} - \frac{\rho_i*}{G^2 f_{tp,i*}} \frac{P_{i*+1} - P_{i*-1}}{2 \cdot \Delta L} = \frac{1}{2d} \quad \dots (9)$$

สำหรับตำแหน่ง $i* = 1*$ และ $(n-1)*$ โดย n คือ
จำนวนส่วนเล็กๆของท่อคาปิลลารีในช่วงการไหล
สองสถานะ จะต้องอาศัยการประมาณค่าย้อนกลับและ
การประมาณค่าไปข้างหน้า ซึ่งจะได้

$$\frac{1}{\rho_1*} \frac{\rho_1* - \rho_3}{\Delta L} - \frac{\rho_1*}{G^2 f_{tp,1*}} \frac{P_1* - P_3}{\Delta L} = \frac{1}{2d} \quad \dots (10)$$

โดย $i = n$ จะเป็นตำแหน่งที่ 4 หรือตำแหน่งสุดท้าย
ในท่อคาปิลลารีนั่นเอง

จากสมการที่ (10) และ (11) จะสามารถหา ΔL ได้
โดยมีข้อสังเกต คือ ΔL แต่ละช่วงจะไม่เท่ากัน แต่สิ่งที่
เท่ากัน ก็คือ ΔP สำหรับ ΔL ที่คำนวณได้นั้น จะมี
จำนวนเท่ากับ n เพราะฉะนั้น จะสามารถหา L_{tp} หรือ
ความยาวของท่อคาปิลลารีในช่วงการไหลสองสถานะ
ได้ดังนี้

$$L_{tp} = \Delta L_1 + \Delta L_2 + \Delta L_3 + \dots + \Delta L_n \quad \dots (12)$$

สำหรับตำแหน่งสุดท้ายในท่อคาปิลลารีนั้น จะเป็น
ตำแหน่งที่สารทำความเย็น R600a มีความเร็วเท่ากับ
ความเร็วเสียง ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากเอนโทรปีที่
เพิ่มขึ้นนั่นเอง ทั้งนี้ เนื่องจาก เมื่อสารทำความเย็นไหล
R600a ไหลผ่านท่อคาปิลลารี ความดันและเอนโทรปี
ของสารทำความเย็นจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง
การไหลสองสถานะ จนกระทั่งสารทำความเย็นมี
ความเร็วเท่ากับความเร็วเสียง ณ ตำแหน่งถัดไปจาก
ตำแหน่งนี้ ความดัน และเอนโทรปีจากการคำนวณ จะมี
ค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้น ท่อคาปิลลารีจะไม่สามารถใช้ใ
การลดความดันของสารทำความเย็น R600a ได้อีกต่อไป
ปรากฏการณ์ลักษณะนี้ ถูกเรียกว่า การไหลอุดตัน
(Choked flow) นอกจากนี้ ผลลัพธ์จากการเพิ่มขึ้นของ

เอนโทรปีที่ได้จากการคำนวณสามารถถูกนำมาใช้ประโยชน์ในการระบุตำแหน่งที่เกิดการไหลอุดตันได้ โดยเอนโทรปีสำหรับสารทำความเย็นสองสถานะสามารถคำนวณได้ดังนี้

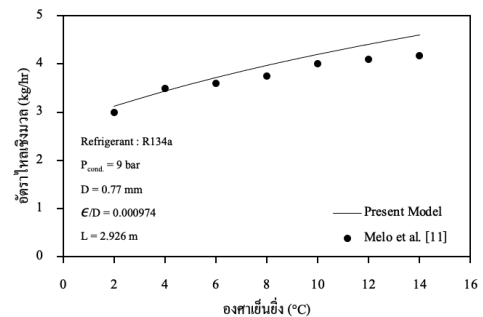
$$S_i^* = S_{f,i}^* + X_i^* S_{fg,i}^* \quad \dots (13)$$

เมื่อ s คือ เอนโทรปี (J/kg/K)

3. ผลลัพธ์และการวิเคราะห์

ผลลัพธ์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ถูกพัฒนาขึ้น ได้ถูกเปรียบเทียบกับผลลัพธ์จากการทดลองในอดีต ดังแสดงในรูปที่ 4 อย่างไรก็ตาม ผลการทดลองสำหรับ R600a ที่ไหลผ่านท่อคาปิลลารี มีข้อจำกัด ดังนั้น คณะผู้วิจัยจึงใช้ R134a เป็นสารทำความเย็นในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ แล้วจึงเปรียบเทียบกับผลลัพธ์จากการทดลองของ Melo et al. [11] ดังแสดงในรูปที่ 4

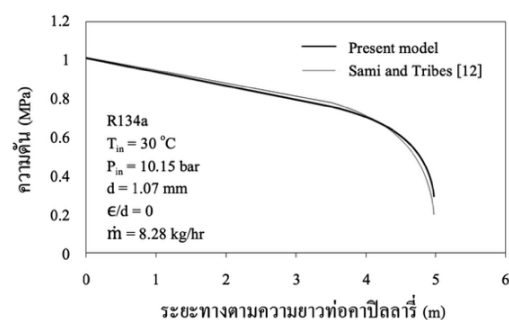
จากรูปที่ 4 จะพบว่า ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์มีแนวโน้มไปในทำนองเดียวกับผลลัพธ์ของ Melo et al. [11] และมีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 10% และจะยิ่งมีความแม่นยำขึ้น เมื่อองศาเย็นยิ่ง (Degree of subcooling) มีค่าต่ำกว่า 10 °C ดังนั้น ทำให้มั่นใจในระดับหนึ่งว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นมานี้ สามารถทำนายคุณลักษณะการไหลของสารทำความเย็นผ่านท่อคาปิลลารีได้อย่างแม่นยำ



รูปที่ 4 การเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ของ Melo et al. [11]

นอกจากนี้ ผลลัพธ์ที่ได้จะถูกเปรียบเทียบกับผลลัพธ์จากแบบจำลองของ Sami and Tribes [12] ดังแสดงในรูปที่ 5 โดยจากการเปรียบเทียบจะพบว่า แนวโน้มที่ได้จะเป็นในทิศทางเดียวกัน และแตกต่างกัน น้อยกว่า 5%

จากรูปที่ 5 ในช่วงการไหลสองสถานะเดียว ($x \leq 3.5$ m) ความดันจะลดลงในลักษณะเชิงเส้นตามความยาวท่อคาปิลลารี หรือ ระยะ x นั้นเอง แต่สำหรับในช่วงการไหลสองสถานะ ($x > 3.5$ m) ความดันจะลดลงอย่างรวดเร็วจนกระทั่งสารทำความเย็นมีความเร็วเท่ากับความเร็วเสียง ณ ตำแหน่งนี้ จะเป็นตำแหน่งสุดท้ายของท่อคาปิลลารี



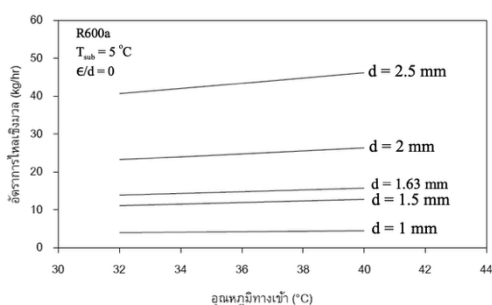
รูปที่ 5 การเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ของ

Sami and Tribes [12]

จากรูปที่ 6 แสดงอิทธิพลของอุณหภูมิทางเข้าของสารทำความเย็น R600a ที่มีต่ออัตราการไหลของสารทำความเย็น R600a ที่เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของ

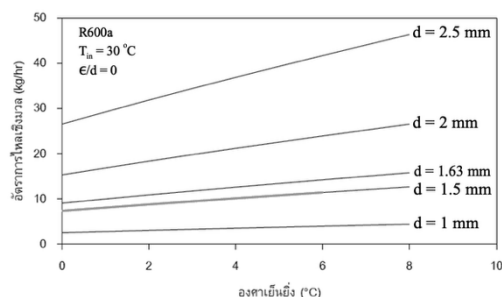
ท่อคาปิลลารีขนาดต่างๆ โดยจะพบว่า เมื่ออุณหภูมิของสารทำความเย็น R600a ที่ทางเข้า มีค่าเพิ่มขึ้นจาก 32 °C จนถึง 40 °C อัตราการไหลของ R600a จะมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจาก เมื่ออุณหภูมิทางเข้าเพิ่มขึ้น จะทำให้ผลต่างของความดันที่ทางเข้าและความดันที่ทางออกของท่อคาปิลลารีมีค่าเพิ่มขึ้น ดังนั้น อัตราการไหลของ R600a จะต้องมีการเพิ่มขึ้น เพื่อให้ความดันลดลงจากการสูญเสียหลัก (Major loss) เพิ่มขึ้น จึงจะสามารถลดความดันได้ตามที่ต้องการ

นอกจากนี้ เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางท่อคาปิลลารีเพิ่มขึ้น อัตราการไหลก็จะเพิ่มขึ้นเช่นกัน ทั้งนี้ ก็เพื่อให้ท่อคาปิลลารี สามารถลดความดันได้ตามต้องการนั่นเอง โดยสภาวะที่ทางออกของท่อคาปิลลารีจะต้องเป็นการไหลอุดตัน (Choked flow) หรือก็คือ สารทำความเย็น R600a จะมีความเร็วเท่ากับความเร็วเสียงนั่นเอง



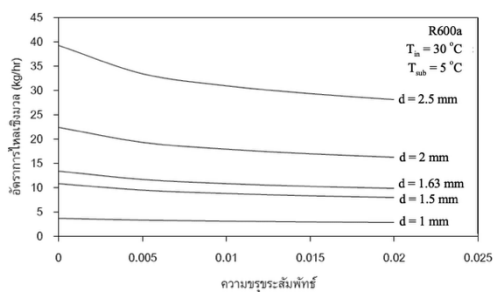
รูปที่ 6 อิทธิพลของอุณหภูมิทางเข้าและเส้นผ่านศูนย์กลางภายในที่มีต่ออัตราการไหลของ R600a

จากรูปที่ 7 แสดงอิทธิพลขององศาเย็นยิ่ง (Degree of subcooling) ที่มีต่ออัตราการไหลของ R600a โดยจะพบว่า อัตราการไหลของ R600a จะเพิ่มขึ้นตามองศาเย็นยิ่ง ทั้งนี้ เมื่อองศาเย็นยิ่งเพิ่มขึ้น จะทำให้ความยาวในช่วงการไหลสถานะเดียวเพิ่มขึ้น และความยาวในช่วงการไหลสองสถานะก็จะลดลง



รูปที่ 7 อิทธิพลขององศาเย็นยิ่งที่มีต่ออัตราการไหลของ R600a

ดังนั้น ถ้าหากท่อคาปิลลารียังคงมีอัตราการไหลเท่าเดิม ก็จะไม่สามารถลดความดันของ R600a ได้ตามที่ต้องการ ฉะนั้น ถ้าต้องการให้ท่อคาปิลลารีสามารถลดความดันได้ตามที่ต้องการ อัตราการไหลของ R600a จะต้องถูกปรับให้มีค่าเพิ่มขึ้นนั่นเอง



รูปที่ 8 อิทธิพลของความขรุขระสัมพัทธ์ที่มีต่ออัตราการไหลของ R600a

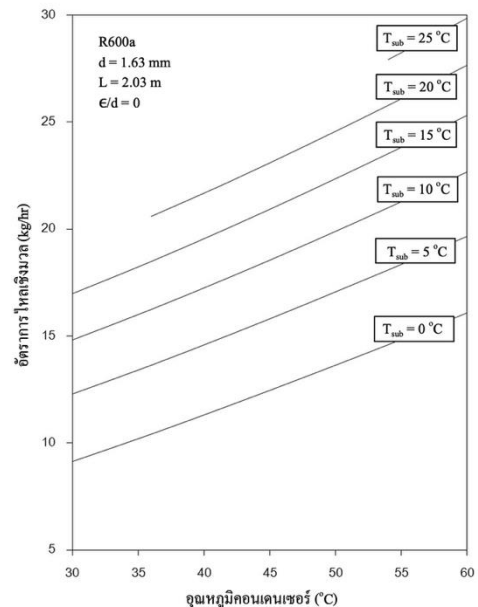
จากรูปที่ 8 จะพบว่า อัตราการไหลของ R600a จะลดลงตามความขรุขระสัมพัทธ์ของท่อคาปิลลารีที่เพิ่มขึ้น เนื่องจาก ท่อคาปิลลารีที่มีความขรุขระสัมพัทธ์มากกว่า จะสามารถลดความดันของ R600a ได้เร็วกว่า ซึ่งเป็นผลให้ท่อคาปิลลารีมีขนาดสั้นลงนั่นเอง ดังนั้น สำหรับท่อคาปิลลารีที่มีความยาวคงที่ และต้องการลดความดันให้ได้ตามต้องการเช่นเดิม อัตราการไหลก็ต้องมีค่าลดลง

จากที่กล่าวมาทั้งหมดนี้ จะเป็นอิทธิพลของตัวแปรต่างๆ ที่มีผลต่ออัตราการไหลของท่อคาปิลลารี รวมถึงความดันที่ลดลงตามความยาวของท่อคาปิลลารี อย่างไรก็ตาม จากการสืบค้นงานวิจัยในอดีต^[9, 10] พบว่า ASHRAE ได้นำเสนอแผนภาพสำหรับเลือกขนาดและระบุสภาวะการทำงานของท่อคาปิลลารีที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.63 mm ยาว 2,030 mm โดยได้นำเสนอแผนภาพสำหรับสารทำความเย็นชนิดต่างๆ แต่ไม่ปรากฏแผนภาพสำหรับเลือกขนาดและระบุสภาวะการทำงานของท่อคาปิลลารีที่ใช้สารทำความเย็น R600a

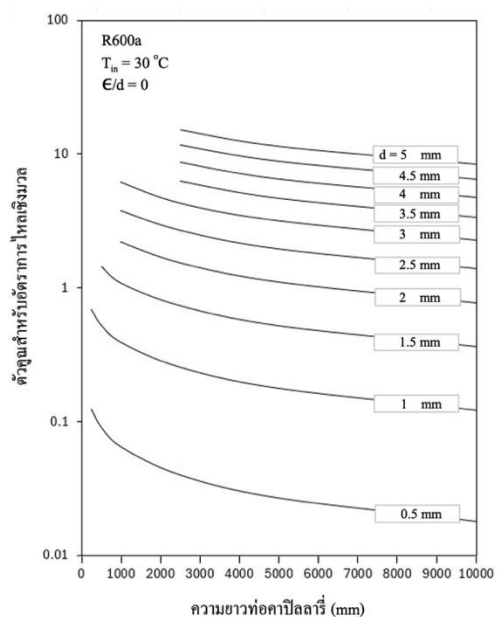
ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ จึงได้นำเสนอแผนภาพสำหรับเลือกขนาดและระบุสภาวะการทำงานของท่อคาปิลลารีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 1.63 mm ยาว 2.03 m ดังแสดงในรูปที่ 9 และ 10

จากรูปที่ 9 ผู้อ่านสามารถใช้แผนภาพนี้ในการระบุสภาวะการทำงานของท่อคาปิลลารีที่มีขนาด 1.63 mm และมีความยาว 2.03 mm โดยจะต้องระบุอุณหภูมิคอนเดนเซอร์ (T_{cond}) อยุ่สูงยิ่ง (T_{sub}) ลงในรูปที่ 9 ก็จะสามารถหาอัตราการไหลเชิงมวลของ R600a ได้

อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดของการใช้งานรูปที่ 9 นี้ ก็คือท่อคาปิลลารีจะต้องมีขนาดตามที่กำหนดเท่านั้น ดังนั้นรูปที่ 10 จึงถูกนำเสนอ เพื่อใช้เป็นแผนภาพเลือกขนาดท่อคาปิลลารี โดยจะสามารถใช้กับท่อคาปิลลารีที่มีขนาดอื่นๆได้ ดังต่อไปนี้



รูปที่ 9 แผนภาพสำหรับเลือกขนาดและระบุสภาวะการทำงานของท่อคาปิลลารี



รูปที่ 10 ตัวคูณสำหรับอัตราการไหล

จากรูปที่ 10 แสดงตัวคูณสำหรับอัตราการไหลของสารทำความเย็น R600a สำหรับท่อคาปิลลารีที่มีขนาดต่างๆ โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน 0.5-5 mm และมีความยาว 300-10,000 mm สำหรับเส้นกราฟที่ขาดหายไปนั้น เป็นช่วงที่ไม่เหมาะสมสำหรับการใช้งาน

ในการใช้งานรูปที่ 10 นี้ เมื่อผู้อ่านกำหนดขนาดของท่อคาปิลลารี ก็จะได้ตัวคูณสำหรับอัตราการไหล ซึ่งจะต้องนำไปคูณอัตราการไหลที่ได้จากรูปที่ 9 ก็จะได้อัตราการไหลที่แท้จริง หรืออัตราการไหลสำหรับสภาวะการทำงานจริงนั่นเอง อย่างไรก็ตาม ผลลัพธ์ที่ได้จากรูปที่ 10 จะมีความคลาดเคลื่อนสูง ซึ่งแตกต่างจากผลลัพธ์จากรูปที่ 9 ซึ่งมีความแม่นยำสูง ดังนั้น ถ้าเป็นไปได้ ควรกำหนดขนาดท่อคาปิลลารีเป็น 1.63 mm และ 2.03 mm ตามขนาดที่ ASHRAE ได้แนะนำไว้นั่นเอง

จากผลลัพธ์ที่ได้นี้ จะมีประโยชน์ต่อการออกแบบท่อคาปิลลารีที่ใช้ R600a เป็นอย่างมาก ผู้ใช้งานสามารถเลือกใช้ท่อคาปิลลารีได้หลากหลายขนาดมากขึ้น นอกจากนี้ สำหรับประเทศไทย ยังคงมีการใช้สารทำความเย็นที่มีค่า Global Warming Potential (GWP) สูง เช่น R-22 และ R-134a เป็นต้น ซึ่งมีผลต่อการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและภาวะโลกร้อน โดยภายใต้พันธกรณีตามข้อตกลง Kigali Amendment ประเทศไทยจะต้องลดใช้สาร HFC ที่มี GWP สูงอย่างต่อเนื่องในอนาคต อุตสาหกรรมปรับอากาศและทำความเย็นจึงเริ่มเปลี่ยนมาใช้สารทำความเย็นทางเลือกที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมมากขึ้น เช่น R-32 ซึ่งมีค่า GWP ต่ำกว่าเดิม และ R-600a (Isobutane) ซึ่งเป็นสารไฮโดรคาร์บอนที่มี GWP ต่ำมากเกือบเข้าสู่ศูนย์ และไม่ทำลายชั้นโอโซน อีกทั้ง ยังใช้พลังงานน้อย เหมาะสมสำหรับเครื่องทำความเย็นขนาดเล็ก เช่น ตู้เย็นและตู้แช่ เป็นต้น แนวโน้มนี้สะท้อนถึงการเปลี่ยนผ่านสู่การใช้เทคโนโลยีทำความเย็นสีเขียว (Green Cooling) ที่ปล่อยก๊าซเรือน

กระจกน้อยลงและมีประสิทธิภาพพลังงานสูงขึ้นในระยะยาว

4. สรุปผลและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้ ได้นำเสนอแบบจำลองการไหลเนื้อเดียวสำหรับทำนายคุณลักษณะการไหลของสารทำความเย็น R600a ผ่านท่อคาปิลลารีที่นิยมใช้ในระบบทำความเย็นขนาดเล็ก จากผลลัพธ์และการวิเคราะห์ที่ได้ สามารถสรุปได้ดังนี้

4.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้น ได้รับการยืนยันความถูกต้อง โดยการเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Melo et al. [11] และผลลัพธ์จากแบบจำลองของ Sami and Tribes [12] ซึ่งพบว่า มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน และมีความคลาดเคลื่อนน้อยมาก

4.2 เมื่อสารทำความเย็น R600a ไหลผ่านท่อคาปิลลารี ความดันจะลดลงในลักษณะเชิงเส้นสำหรับช่วงการไหลสถานะเดียว และจะลดลงอย่างรวดเร็วในช่วงการไหลสองสถานะ

4.3 อัตราการไหลของ R600a จะเพิ่มขึ้น เมื่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน อุณหภูมิทางเข้า และองศาเย็นยิ่ง มีค่าเพิ่มขึ้น แต่จะมีค่าลดลง เมื่อความขรุขระสัมพัทธ์มีค่าเพิ่มขึ้น

4.4 ในงานวิจัยนี้ ได้นำเสนอแผนภาพสำหรับระบุสภาวะการทำงานของท่อคาปิลลารีที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.63 mm ยาว 2.03 m ซึ่งมีความแม่นยำสูง

4.5 ในงานวิจัยนี้ ได้นำเสนอแผนภาพสำหรับเลือกขนาดท่อคาปิลลารีที่มีขนาดอื่นๆ เพื่อใช้ประกอบกับแผนภาพในข้อ 4.4 อย่างไรก็ตาม แผนภาพดังกล่าวนี้ จะให้ความคลาดเคลื่อนที่สูงขึ้นกว่าเดิม

ในการทำวิจัยต่อไปนั้น สามารถเพิ่มอิทธิพลของการไหลอุปเสถียร (Metastable flow) เข้าไปได้ แม้ว่า จะไม่มากนัก แต่ก็ทำให้การคำนวณจะแม่นยำมากยิ่งขึ้น อีกทั้ง ยังอาจสร้างแบบจำลองกับท่อคาปิลลารีใน

ลักษณะอื่น เช่น ท่อคาปิลลารีที่ขดเป็นเกลียวสปริง หรือ ท่อคาปิลลารีที่ขดเป็นเกลียวกันหอย เป็นต้น และอาจเปลี่ยนสารทำความเย็นให้เป็นสารที่มีค่า GWP ต่ำลง หรือก็คือ สารทำความเย็นที่ทำลายสิ่งแวดล้อมน้อยลง สารทำความเย็นที่มีคุณสมบัติการถ่ายโอนความร้อนที่ดีขึ้น เป็นต้น

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนทุกท่าน ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ และกองบริหารการวิจัยและนวัตกรรม มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ได้ให้การสนับสนุนในด้านต่างๆ งานวิจัยนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Daniel Workman, World's Top Export, <https://www.worldstopexports.com/air-conditioners-exports-country>.
- [2] A.K.R. Abed, H.J. Fadhiel, G. Mahsun, T.C. Yassen, "Experimental study on the effect of capillary tube geometry on the performance of vapour compression refrigeration system", Diyala Journal of Engineering Sciences, 7(2), 74-60, (2014). Doi: 10.24237/djes.2014.07204
- [3] N.N. Raja, A.D. Khanderao, "Experimental investigation on the effect of capillary tube geometry on the performance of vapor compression refrigeration system", Asian Journal of Engineering and Applied Technology, 5(2), 29-35, 2016. Doi: 10.51983/ajeat-2016.5.2.802
- [4] A. Khanderao, N. Raja, M. Basavaraj, "Effect of capillary tube geometry on the performance of vapour compression refrigeration system", International Journal of Mechanical Engineering, 3(6), 1355-1360, 2015.
- [5] J.K. Dabas, A.K. Dodeja, S. Kumar, K.S. Kasana, "Impact of refrigerant charge over the performance characteristics of a simple vapour compression refrigeration system", International Journal of Advances in Engineering & Technology, 1(5), 267-277, 2011.
- [6] R. Zade, P. Walke, A. Khanderao, "Experimental investigation on the performance of V.C.R. system using refrigerant", International Research Journal of Engineering and Technology, 6(7), 2020-2025, 2019.
- [7] Z. Yang, M. Gong, G. Chen, X. Zou, J. Shen, "Two-phase flow patterns, heat transfer and pressure drop characteristics of R600a during flow boiling inside a horizontal tube", Applied Thermal Engineering, 120(25), 654-671, 2017. Doi: 10.1016/j.applthermaleng.2017.03.124
- [8] F.T. Kanabben, J. Boeng, "A component-level analysis of brazed-type capillary tube-suction line heat exchangers", International Journal of Refrigeration, 177, 181-194, 2025. Doi: 10.1016/j.ijrefrig.2025.06.007
- [9] W. Pirompugd, S. Wongwises, "Capillary tube sizing charts for fluorine-based refrigerants", ASHRAE Transactions, 112(2), 680-689, 2006.
- [10] ASHRAE, "Capillary tubes", 2022 ASHRAE Handbook: Refrigeration, 11.24-11.31, 2022.

[11] C. Melo, R.T.S. Ferreira, N.C. Boabaid, J.M. Goncalves, R.H. Pereira, M.R. Thiessen, Evaluation of H.C.-600a, HFC134a and CFC-12 mass flow rates through capillary tubes, Proceedings of the New Applications to Reduce Global Warming and Energy Consumption Conference, Hannover, Germany, 621-630, 1994.

[12] S.M. Sami, C. Tribes, Numerical prediction of capillary tube behaviour with pure and binary alternative refrigerants, Applied Thermal Engineering, 18, 491-502, 1998. Doi: 10.1016/S1359-4311(97)00048-3

ประวัติผู้ประพันธ์ :

ไกรวิชญ์ เยื้องเนิน



- จบการศึกษา : ปริญญาตรี
จากมหาวิทยาลัยบูรพา
(วศ.ด. วิศวกรรมเครื่องกล)

ปิยธิดาเดชกรฤช



- จบการศึกษา : ปริญญาตรี
จากมหาวิทยาลัยบูรพา
(วศ.ด. วิศวกรรมเครื่องกล)

ภาณุพงศ์ เสงฆ์พิสัยศิริกุล



- จบการศึกษา : ปริญญาตรี
จากมหาวิทยาลัยบูรพา
(วศ.ด. วิศวกรรมเครื่องกล)

รองศาสตราจารย์ ดร.วรเชษฐ์ ภิรมย์ภักดี



- จบการศึกษา : ปริญญาเอกจาก
มจร. (วศ.ด. วิศวกรรมเครื่องกล)
- จบการศึกษา : ปริญญาโทจาก
มจร. (วศ.ม. วิศวกรรมเครื่องกล)
- จบการศึกษา : ปริญญาตรีจาก
มจร. (วศ.บ. วิศวกรรมเครื่องกล)

การปรับปรุงกระบวนการพ่นสีเคลือบป้องกันสนิมใต้ท้องรถยนต์:

กรณีศึกษาผู้ผลิทยานยนต์

Process Improvement for Underbody Anti-Corrosion Coating Spray: A Case Study at an Automotive Manufacturer

บัณฑิต อินทรีย์มีศักดิ์*, ยอดนภา เกษเมือง, ภูมิ จาคุนิตานนท์ และ ชัยวุฒิ นรินทรางกูร

Bundit Inseemeeesak*, Yodnapha Ketmuang, Poom Jatunitanon, and Chaiyawoot Narintharangkul

สาขาวิศวกรรมการผลิตยานยนต์ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์

85/1 หมู่ที่ 2 ถนนแจ้งวัฒนะ ตำบลบางตลาด อำเภอปากเกร็ด นนทบุรี 11120

*ผู้พิมพ์ประสานงาน : Banditins@pim.ac.th

วันที่รับบทความ: 4 เมษายน 2568 / วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 : 3 กันยายน 2568 / วันที่ตอบรับการตีพิมพ์: 18 กันยายน 2568

บทคัดย่อ ผู้วิจัยได้ศึกษาการทำงานของสายการผลิตสีเคลือบกันสนิมใต้ท้องรถยนต์ พบว่าปัจจุบันสายการผลิตดังกล่าวเกิดปัญหาการไหลย้อยของฟิล์มสีและการฟุ้งกระจายของละอองสีไปตกเกาะบนผิวตัวถัง (Sagging and Overspray Deposition) ก่อให้เกิดการชะงักของสายการผลิตลงไป นำไปสู่เวลาหยุดเครื่อง (Downtime) งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อสร้างมาตรฐานการทำงานของสายการผลิต ลดปัญหาที่เกิดจากการทำงาน และลดต้นทุนการใช้สีเคลือบ โดยทำการเก็บข้อมูลขั้นตอนการพ่นสีเคลือบทั้งหมด จากนั้นจึงได้นำมาวิเคราะห์หาสาเหตุของปัญหาโดยใช้หลักการตั้งคำถามทำไม-ทำไม (Why-Why Analysis) และดำเนินการปรับปรุงขั้นตอนการทำงาน (Work Instruction) กำหนดและควบคุม มาตรฐานแรงดันพ่นสีไว้ที่ 80 bar นอกจากนี้ ปรับแผนการจัดซื้อวัสดุเคลือบให้เหมาะสมยิ่งขึ้น ส่งผลให้กระบวนการพ่นสีเคลือบป้องกันสนิมใต้ท้องรถยนต์มีประสิทธิภาพมากขึ้น

ผลการแก้ปัญหาสีเคลือบกันสนิมใต้ท้องรถยนต์ไหล ก่อนการปรับปรุงเกิดปัญหาจำนวน 10 คัน ในเดือนตุลาคม 2566 และหลังการปรับปรุงในเดือนธันวาคม 2566 สามารถลดลงเหลือ 0 คัน คิดเป็นร้อยละ 100 ผลการแก้ไข ปัญหาสีเคลือบกระจายโดนตัวรถบริเวณ Fender จากเดิมจำนวน 27 คัน หลังปรับปรุงจำนวน 6 คัน คิดเป็นร้อยละ 77.78 บริเวณ Hood จากเดิมจำนวน 15 คัน หลังปรับปรุงจำนวน 0 คัน คิดเป็นร้อยละ 100 และควบคุมมาตรฐานแรงดันพ่นสีอยู่ที่ 80 bar และผลการแก้ปัญหาการสังสีเคลือบที่มากเกินไป จากเดิมสังสี 188 kg หลังปรับปรุงเหลือเพียง 153 kg ลดลงร้อยละ 18.62 ผลการดำเนินการพบว่า ข้อบกพร่องฟิล์มสีไหลย้อย (Sagging/Runs) ลดจาก 10 คัน เหลือ 0 คัน (ลดลง 100%) ขณะที่การปนเปื้อนจากละอองสีฟุ้ง (Overspray) บนผิวตัวถังบริเวณ Fender ลดจาก 27 คัน เหลือ 6 คัน (ลดลง 77.78%) และบริเวณ Hood ลดจาก 15 คัน เหลือ 0 คัน (ลดลง 100%) นอกจากนี้ ปริมาณการสังสีวัสดุเคลือบลดจาก 188 kg เป็น 153 kg (ลดลง 18.62%) สะท้อนประสิทธิผลของมาตรการทั้งด้านคุณภาพกระบวนการ และการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า

คำสำคัญ: สีเคลือบกันสนิมใต้พื้น, ลดต้นทุน, การจัดทำวิธีการทำงาน, หลักการวิเคราะห์ ทำไม-ทำไม

Abstract The researcher investigated the operation of the automotive underbody anti-corrosion coating production line and found that the current process exhibits issues of paint film sagging and overspray deposition on the vehicle body surface. These defects cause disruptions in subsequent production stages, leading to machine downtime. The objective of this research is to establish standardized work procedures in the production line, reduce operational problems, and minimize coating material costs. Data were collected from all stages of the coating spray process, after which the root causes of problems were analyzed using the Why-Why Analysis technique. The development of standardized work instructions, with the spray gun pressure set and controlled at 80 bar. Furthermore, the procurement plan for coating materials was revised to achieve greater efficiency. As a result, the underbody anti-rust coating process in automotive manufacturing became more effective.

The results of the improvement in preventing underbody anti-rust coating flow indicate that, prior to the modification, 10 vehicles encountered this issue in October 2023. After the implementation in December 2023, the number of affected vehicles was reduced to zero, representing a 100% improvement. The number of defects observed at the fender area decreased from 27 cases to 6 cases after improvement, corresponding to a reduction of 77.78%. For the hood area, the number of defects decreased from 15 cases to 0 cases, achieving a 100% reduction. Additionally, the spray gun pressure standard was controlled at 80 bar. Furthermore, the problem of excessive procurement of coating material was addressed. The purchase quantity was reduced from 188 kg to 153 kg after the improvement, corresponding to a reduction of 18.62%. The overall improvement outcomes reflect the effectiveness of the measures in both process quality enhancement and efficient utilization of resources.

Keywords : Under body coating, Cost reduction, Work method development, Why-Why analysis

1. บทนำ

ในปัจจุบัน รถยนต์ได้กลายเป็นส่วนสำคัญที่ไม่สามารถแยกออกจากชีวิตประจำวันของผู้คนทั่วโลก ไม่ว่าจะเป็นการเดินทางระยะสั้นเพื่อไปทำงานหรือการเดินทางระยะไกลในวันหยุดพักผ่อน รถยนต์ทำหน้าที่เป็นเครื่องมือที่ช่วยให้สะดวกสบายขึ้นในชีวิตประจำวัน และยังเป็นสัญลักษณ์ของการพัฒนาและความเจริญรุ่งเรืองในหลายๆ ด้านทั้งในด้านเทคโนโลยี การผลิต และการบริการที่เกี่ยวข้อง

ประเทศไทยเป็นฐานการผลิตรถยนต์ที่มีขนาดใหญ่ในอาเซียน (ASEAN) และของโลกจากหลายปัจจัยหลักที่สนับสนุนการเติบโตในอุตสาหกรรมนี้ เช่น เป็น

ศูนย์กลางของภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ มีแรงงานที่มีคุณภาพและต้นทุนต่ำ มีนโยบายจากภาครัฐที่สนับสนุน มีความแข็งแกร่งในซัพพลายเชน มีการลงทุนจากต่างประเทศ [1] ทั้งหมดนี้รวมกันทำให้ประเทศไทยสามารถเป็นฐานการผลิตรถยนต์ที่สำคัญในอาเซียนและส่งผลกระทบต่อประเทศไทยมีความสำคัญในอุตสาหกรรมยานยนต์ในระดับภูมิภาคและระดับโลก เช่น การส่งออกรถยนต์และชิ้นส่วนยานยนต์ให้แก่ประเทศออสเตรเลีย, ตะวันออกกลาง, ยุโรป, และอเมริกาใต้ เป็นต้น ที่มา: กรมส่งเสริมการค้าระหว่างประเทศ กระทรวงพาณิชย์

ประเทศต่างๆ รวมถึงประเทศไทยมีภูมิภาคอยู่ติดทะเล มีลมทะเลและไอเค็มจากทะเล ซึ่งเป็นปัจจัยที่

ทำให้รถยนต์เกิดการผุกร่อนและเป็นสนิมได้ง่ายกว่าพื้นที่อื่น โดยมีงานวิจัยของคุณเสกศิลป์ บรรพพะสุชะ [2] ได้ทำการทดสอบความต้านทานการกัดกร่อนโดยการเร่งสภาวะ ด้วยเทคนิคการพ่นละอองน้ำเกลือ โดยมุ่งเน้นชิ้นส่วนที่ใช้กับยานยนต์เป็นหลัก ซึ่งการทดสอบการกัดกร่อน เป็นการทดสอบเพื่อพิสูจน์หรือประเมินความสามารถในการต้านทานการกัดกร่อนของการทำผิวเคลือบบนวัสดุต่างๆ เช่น การเคลือบด้วยสี การเคลือบด้วยกรรมวิธีทางเคมี-ไฟฟ้า ที่ใช้งานแพร่หลาย เช่น ชิงค์ หรือ นิกเกิล โครเมียม ฯลฯ เพื่อให้ปฏิกิริยาการเสื่อมสภาพจากการกัดกร่อนของชิ้นงาน เป็นไปอย่างรวดเร็ว และควบคุมภาวะต่างๆ ให้มีความคงที่ อ้างอิงจากมาตรฐานการทดสอบ JIS D 0201 Automobile Parts – General Rule of Electroplating ผลการทดสอบพบว่าชิ้นงานที่มีสารเคลือบจะปกป้องผิวเคลือบคงอยู่ร้อยละ 80 แสดงให้เห็นว่าสารเคลือบมีความสำคัญกับชิ้นส่วนยานยนต์ทุกคัน

กรณีศึกษาตัวอย่าง เป็นบริษัทผู้ผลิตรถยนต์จำหน่ายทั้งประเทศไทยและต่างประเทศ มีการผลิตเป็นจำนวนมากและเป็นรถยนต์รุ่นใหม่ที่มีปัญหาหาสีเคลือบกันสนิมได้ทั้งรถยนต์ไม่ได้มาตรฐาน คณะผู้วิจัยจึงมีวัตถุประสงค์ที่จะสร้างมาตรฐานการทำงานและแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้น รวมไปถึงเก็บข้อมูลปริมาณที่ใช้จริงของสีเคลือบกันสนิมได้ทั้งรถยนต์ เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการลดต้นทุน ซึ่งส่งผลต่อกำไรที่เพิ่มมากขึ้น

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 การเพิ่มผลผลิต (Productivity)

การเพิ่มผลผลิต (Productivity) เป็นสิ่งที่สามารถวัดได้ซึ่งจะช่วยให้หน่วยงานหรือบริษัทสามารถมองเห็นได้อย่างชัดเจนว่าการประกอบธุรกิจนั้นๆ มีประสิทธิภาพและเกิดประสิทธิผลหรือไม่ อย่างไร ซึ่งจะต้องทำความเข้าใจว่าการผลิตหรือการบริการ เกิดขึ้น

จากการที่นำเอาสิ่งที่จำเป็นต้องใช้หรือที่เรียกว่าปัจจัยการผลิต (Input) มาผ่านกระบวนการผลิต (Process) เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ หรือผลิตผล (Output) ออกมาตามที่ต้องการ ดังรูปที่ 1

สุจิตรา บัวผัน (2563) [3] การปรับปรุงกระบวนการผลิตเพื่อเพิ่มผลผลิตในอุตสาหกรรมประเภทอิเล็กทรอนิกส์ โดยการวิเคราะห์ทำงานของคนและเครื่องจักร ปรับการทำงานให้เป็นไปตามมาตรฐานที่



รูปที่ 1 กระบวนการผลิต

กำหนดให้เหมาะสม ส่งผลให้สายการผลิตมีประสิทธิภาพการทำงานเพิ่มขึ้น จากจำนวนพนักงานเดิมที่ใช้ 38 คนต่อสายการผลิต ลดลงเหลือ 35 คนต่อสายการผลิต ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 7.89 ส่งผลให้สามารถลดต้นทุนแรงงานลงจากประมาณ 2,394,000 บาทต่อเดือนเหลือ 2,205,000 บาทต่อเดือน หรือประมาณร้อยละ 7.89

2.2 การศึกษาการทำงาน (Work Study)

การศึกษางาน (Work Study) [4] เป็นการศึกษาการเคลื่อนไหวและเวลา (Motion and Time Study) ซึ่งหมายถึงเทคนิคการวิเคราะห์ในส่วนของการดำเนินการเพื่อขจัดงานที่ไม่จำเป็นออก และสรรหาวิธีการทำงานที่ดีที่สุดและรวดเร็วที่สุด ในการปฏิบัติงานต่างๆ รวมถึงการปรับปรุงมาตรฐานของวิธีการทำงาน สภาพการทำงาน เครื่องมือต่างๆ และการฝึกอบรมพนักงานให้ทำงานด้วยวิธีที่ถูกต้อง การหาเวลามาตรฐานทำงาน เพื่อเพิ่มผลผลิตจากทรัพยากรที่มีอยู่ทำให้ต้นทุนการผลิตลดลงซึ่งการศึกษาจะประกอบด้วย 2 ตัวอย่างดังนี้

2.2.1 การศึกษาวิธีการทำงาน (Method Study) เป็นการศึกษาเพื่อหาวิธีการทำงานที่ง่าย สะดวก รวดเร็ว ประหยัด และมีประสิทธิภาพสูงมากขึ้น กว่าวิธีการทำงานแบบเดิม

2.2.2 การวัดงาน (Work Measurement) เป็น การศึกษาเพื่อกำหนดเวลามาตรฐาน (Standard Time) ที่เป็นประโยชน์ในด้านต่างๆ เช่น การวางแผนการผลิต ปรับสมดุลของ 9 สายการผลิต เป็นข้อมูลเกี่ยวกับการ จ่ายค่าแรงจูงใจหรือการกำหนดมาตรฐานการผลิต (Production Standard)

2.3 การวิเคราะห์สาเหตุปัญหา

2.3.1 แผนภูมิก้างปลา (Fish Bone Diagram) เป็นแผนภูมิที่ใช้แสดงความสัมพันธ์ระหว่างผลกระทบ และสาเหตุ โดยแบ่งเป็น สาเหตุหลัก สาเหตุรอง และ สาเหตุย่อย ด้วยโครงสร้างที่ชัดเจนในการวิเคราะห์ระบุ ปัจจัยพื้นฐานของสาเหตุของปัญหาต่างๆ

2.3.2 หลักการ ทำไม-ทำไม (Why-Why Analysis)

การวิเคราะห์และแก้ไขปัญหาคือ Why Why Analysis จะเป็นการวิเคราะห์หาสาเหตุรากเหง้าของ ปัญหา โดยหากสามารถค้นพบสาเหตุรากเหง้าและกำจัด ได้แล้ว ปัญหาเดิมจะไม่เกิดขึ้นซ้ำ หากปัญหาเดิมเกิดขึ้นซ้ำ แสดงว่าการวิเคราะห์นั้นมาผิดทางหรืออาจมีบางสาเหตุ ตกหล่นไป อาจจะต้องมาทำการวิเคราะห์ใหม่ เครื่องมือ นี้เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูงมาก หากผู้วิเคราะห์ มีความเข้าใจ และมีความชำนาญ ในงานที่ตนทำอยู่ รวมถึงความรู้ด้านวิศวกรรมที่ Toyota 5-Why Analysis ถูกใช้เป็นเครื่องมือหลักในการวิเคราะห์ปัญหา ซึ่งสุชาติ ชำรงสุข [5] ได้นำทฤษฎีนี้มาทำการปรับปรุงประสิทธิภาพ ในกระบวนการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ด้วยเทคนิคการ ปรับปรุงงาน พบว่า ขั้นตอนการเตรียมการผลิต กระบวนการบ่มขึ้นรูปส่วน โกงนูลลดลงจาก 15

ขั้นตอน เหลือ 11 ขั้นตอน ระยะทางในการเคลื่อนที่จาก เดิม 35 เมตร ลดลงเหลือ 12 เมตร หรือคิดเป็นร้อยละ 65.70 และเวลาที่ใช้ในการเตรียมการผลิตจากเดิม 20 นาที ลดลงเหลือ 7 นาที คิดเป็นร้อยละ 65

2.4 การลดความสูญเปล่า

ทฤษฎีการลดความสูญเปล่าด้วยหลักการระบบ ECRS คือ หลักการที่ประกอบด้วยการกำจัด (Eliminate) การรวมกัน (Combine) การจัดใหม่ (Rearrange) และ การทำให้ง่าย (Simplify) ซึ่งเป็นหลักการง่ายๆ สามารถ อธิบายได้ดังนี้ [6]

E : Eliminate คือ การตัดขั้นตอนการทำงานที่ไม่จำเป็น ในกระบวนการออกไป

C : Combine คือ การรวมขั้นตอนการทำงานเข้าด้วยกัน เพื่อประหยัดเวลา หรือแรงงาน

R : Rearrange คือการจัดลำดับงานใหม่ให้เหมาะสมมี ประสิทธิภาพมากขึ้น

S : Simplify คือ การปรับเปลี่ยนวิธีการหรืออุปกรณ์ บางอย่างให้ง่ายขึ้น สะดวกขึ้น

ศุภวิชญ์ สุขเกิด (2563) [7] ได้ทำการเพิ่มผล ผลิตในกระบวนการผลิตเวเฟอร์ขนาด 4 นิ้ว ก่อนการ ปรับปรุงพบว่าในการผลิตเวเฟอร์ของโรงงานกรณีศึกษา มีพนักงาน 2 คน ผลิตได้วันละ 2 ชิ้น ซึ่งเป้าหมายการ ผลิตอยู่ที่ 3 ชิ้นต่อวัน จึงได้ทำการปรับปรุงสายการผลิต โดยใช้หลักการลดความสูญเปล่า พบว่าพนักงาน 2 คน สามารถผลิตได้วันละ 3 ชิ้น

2.5 วิธีการทำงาน (Work Instruction : WI)

วิธีการทำงาน คือ คู่มือในการทำงาน หรือ คู่มือสำหรับการปฏิบัติงาน เป็นเอกสารที่เป็นลายลักษณ์ อักษร หรือภาพกราฟิก ที่ให้คำแนะนำอย่างละเอียดทีละ ขั้นตอนสำหรับการปฏิบัติงาน หรือกระบวนการทำงาน ต่างๆ โดยทั่วไปแล้วจะนิยมใช้ในอุตสาหกรรมการผลิต

เพื่อให้แน่ใจว่าการทำงานนั้นดำเนินการไปอย่างถูกต้อง ปลอดภัย และมีประสิทธิภาพ

Sumasto, F. [8] ได้ทำการปรับปรุงคุณภาพชิ้นส่วนยานยนต์ใน SMEs ผ่านการนำ DMAIC ซึ่งเป็นวิธีการที่เข้าร่วมกับการปรับปรุงกระบวนการแบบ Six Sigma มาใช้ในกรณีศึกษาการผลิตยานยนต์ที่อินโดนีเซีย ผลลัพธ์ของการดำเนินการหลังการปรับปรุงพบว่าจำนวนของเสียต่อการปฏิบัติการหนึ่งล้านครั้ง (DPMO) ลดลง 2,339 จากเดิม ในขณะที่เดียวกันระดับซิกม่าเพิ่มขึ้น 0.82 จาก 3.51 เป็น 4.33 ในการควบคุมระดับซิกม่า ควรมีการปรับปรุงโดยการสร้างคำแนะนำการทำงาน สำหรับการใช้อุปกรณ์เชื่อมจุด เพื่อให้ทุกอย่างเป็นมาตรฐาน เพื่อให้สามารถควบคุมได้อย่างต่อเนื่อง

3. วิธีดำเนินการวิจัย

ผู้วิจัยได้กำหนดขอบเขตการศึกษาเฉพาะสายการผลิตพ่นสีเคลือบกันสนิมได้ห้องรถยนต์ของบริษัท กรณีศึกษา ในช่วงเดือนตุลาคมถึงธันวาคม พ.ศ. 2566 โดยมุ่งเน้นการแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นจริงในสายการผลิต ได้แก่ ปัญหาการไหลย้อยของฟิล์มสีและการฟุ้งกระจายของละอองสี ทั้งนี้ กลุ่มตัวอย่างที่ใช้ในการศึกษา คือ รถยนต์รุ่นใหม่จำนวน 50 คันที่ผ่านกระบวนการผลิตในช่วงเวลาดังกล่าว

จากการทบทวนวรรณกรรมและการสังเกตการณ์หน้างาน ผู้วิจัยได้ตั้งสมมุติฐานการวิจัยไว้ว่า การนำวิธีการทำงานมาตรฐาน (Work Instruction: WI) มาใช้ร่วมกับการควบคุมแรงดันพ่นสีให้อยู่ในช่วงมาตรฐานที่ 80 bar (8–9 MPa) จะช่วยลดจำนวนข้อบกพร่องที่เกิดจากการพ่นสีเคลือบกันสนิม รวมถึงช่วยให้ปริมาณการใช้สีต่อคันลดลงเมื่อเทียบกับก่อนการปรับปรุง

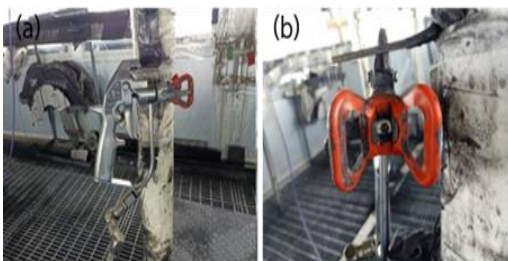
เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยประกอบด้วย แบบบันทึกข้อบกพร่อง (Check Sheet) เพื่อเก็บข้อมูลจำนวนรถยนต์ที่เกิดปัญหา Overspray และ Sagging ซึ่งผ่านการตรวจสอบความตรงเชิงเนื้อหา (Content Validity) โดยผู้เชี่ยวชาญด้านคุณภาพจำนวน 3 คน และตรวจสอบความเชื่อมั่น (Reliability) ด้วยการบันทึกซ้ำโดยผู้ตรวจสอบ 2 คน นอกจากนี้ยังใช้เครื่องมือวัดความหนาของฟิล์มสี ชนิด Wet Film Thickness Gauge ตามมาตรฐาน JIS D 0201 [9] เพื่อยืนยันความแม่นยำของการวัด ตลอดจนใช้การบันทึกวิดีโอประกอบเพื่อวิเคราะห์หาทางการพ้นของพนักงาน

การวิจัยนี้ใช้รูปแบบการวิจัยกึ่งทดลอง (Quasi-experimental Design) ประเภท One Group Pre-test /Post-test Design โดยเก็บข้อมูลก่อนการปรับปรุงในเดือนตุลาคม 2566 และหลังการปรับปรุงในเดือนธันวาคม 2566 เพื่อนำผลการเปรียบเทียบมาใช้ยืนยันประสิทธิผลของการปรับปรุงกระบวนการ การวิเคราะห์ข้อมูลใช้ทั้งสถิติเชิงพรรณนา ได้แก่ ค่าเฉลี่ย ร้อยละ และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เพื่อเปรียบเทียบปริมาณการใช้สีเคลือบก่อนและหลังการปรับปรุง เพื่อตรวจสอบความแตกต่างของจำนวนข้อบกพร่องที่เกิดขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ สอดคล้องกับงานวิจัยของคุณศิริประภา สินใจ [10] ได้เพิ่มประสิทธิผลของเบาะรองนั่งเพื่อลดความสั่นสะเทือนทั่วร่างกายของกลุ่มพนักงานขับรถรถชนิดนั่งขับในท่าเรือแห่งหนึ่ง จังหวัดกรุงเทพมหานคร โดยใช้รูปแบบการวิจัยกึ่งทดลอง ในการทำแบบสอบถามข้อมูลทั่วไป แบบสอบถามความพึงพอใจ และเครื่องวัดความสั่นสะเทือน จากการศึกษาพบว่าควรศึกษาความสั่นสะเทือนในรถที่มีพิกัดน้ำหนักยกขนาดอื่น ๆ เพื่อลดการบาดเจ็บสะสมขณะทำงานต่อร่างกาย

3.1 ศึกษาสภาพปัจจุบันของสายการผลิตสีเคลือบกันสนิมใต้ท้องรถยนต์

จากการสังเกตวิธีการพ่นสีงานและอค์วิธีโอเพื่อทำการดูซ้ำ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. รูปแบบและจำนวนรอบการพ่นสีเคลือบของพนักงานไม่เหมือนเดิมในทุกครั้ง จึงไม่สามารถควบคุมคุณภาพหรือความหนาของสีเคลือบได้ ทำให้รถยนต์แต่ละคันมีความหนาที่ไม่เท่ากัน ในรูปที่ 2 แสดงลักษณะปืนที่ใช้สำหรับสายการผลิตสีเคลือบกันสนิมใต้ท้องรถ โดยจะใช้เครื่องพ่นสีระบบ Airless spray เป็นกระบวนการทำให้สีแตกเป็นละอองขนาดเล็ก (Atomization) โดยไม่ใช้แรงของอากาศอัดความดัน (Compressed Air) หมายความว่าสีที่แตกออกเป็นละอองนั้นจะไม่มีเม็ดอากาศปนอยู่ แต่จะเป็นเนื้อสีล้วนๆ โดยสีจะถูกดูดด้วยความดันสูงผ่านสายพ่นไปยังปืนพ่น



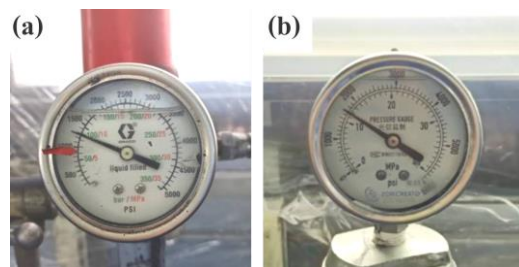
รูปที่ 2 ปืนพ่นสีเคลือบกันสนิมใต้ท้องรถยนต์

2. ทิศทางปืนหรือองศาปืนดังรูปที่ 3 ในการพ่นของพนักงานในแต่ละครั้งไม่เหมือนกัน จึงทำให้สีเคลือบกันสนิมใต้ท้องรถมีผิวไม่สม่ำเสมอและต้องเกิดการพ่นเสริมบ่อยครั้ง ทำให้ช่วงที่พ่นเสริมโดยไม่จำเป็นเกิดการหนากว่าพื้นผิวอื่น และหากเปลี่ยนพนักงานในการพ่นก็จะเกิดปัญหาเดิมซ้ำๆ



รูปที่ 3 แสดงองศาปืนของพนักงาน

3. แรงดันลมของปืนพ่นสีเคลือบสองข้างไม่เท่ากัน โดยปืนด้านซ้าย (รูปที่ 4a) มีแรงดัน 90 bar ด้านขวา (รูปที่ 4b) มีแรงดัน 115 bar ซึ่งทั้งสองยังอยู่ในค่ามาตรฐาน คือ 50-300 bar แต่ความต่างของแรงดันนี้อาจส่งผลกระทบต่อด้านการพ่นไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากปืนที่มีแรงดันมากเมื่อทำการพ่น ตัวของสีเคลือบกันสนิมใต้ท้องรถจะออกมาอย่างรวดเร็วและเกาะตัวกันเร็ว ทำให้ผู้ปฏิบัติงานต้องใช้เวลาดินปืนให้เร็วกว่าด้านปืนที่มีแรงดันน้อย

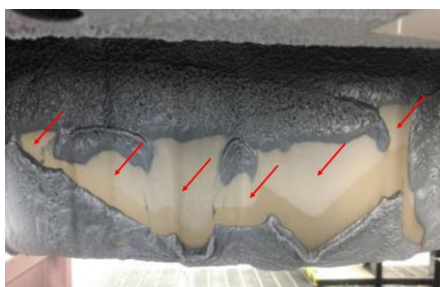


รูปที่ 4 แรงดันของปืนพ่นสีเคลือบกันสนิมใต้พื้นรถ

3.2 สรุปปัญหาที่เกิดจากสายการผลิตสีเคลือบกันสนิมใต้ท้องรถยนต์

การเพิ่มคุณภาพของสายการผลิตสีเคลือบกันสนิมใต้ท้องรถยนต์ บริษัทผลิตรถยนต์ เป็นกรณีศึกษาในการวิจัยนี้ กำลังพบปัญหาต่างๆ ที่ส่งผลกระทบต่อการทำงาน รวมไปถึงต้นทุนขององค์กร โดยมีรายละเอียดดังนี้

1. ปัญหาสีเคลือบกันสนิมใต้ท้องรถไหล มีลักษณะไหลจากบริเวณที่พ่นลงสู่พื้น ดังรูปที่ 5 ซึ่งสีเคลือบจะไหลและหล่นจากตัวรถระหว่างสายการผลิต ก่อนจะถึงเตาอบ ส่งผลต่อสายการผลิตอื่นๆ ที่ได้รับผลกระทบเรื่องความสะดวก และสีเคลือบกันสนิมยืดยึด ไม่เต็มประสิทธิภาพ ไม่สามารถรับแรงกระแทกและกันสนิมใต้ท้องรถได้ อาจทำให้เกิดปัญหาน้ำรั่วใต้ท้องรถยนต์ ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 สีเคลือบกันสนิมใต้ท้องรถยนต์ไหล

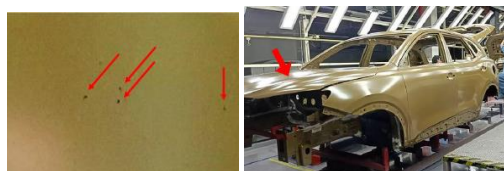
ปัญหาดังกล่าวได้ถูกบันทึกเป็นข้อมูล Check Sheet ไว้ยังสายการผลิตต่อไป ซึ่งเดือนตุลาคม 2566 พบว่าสายการผลิตต่อไปได้พบปัญหาสีเคลือบกันสนิมใต้ท้องรถยนต์ไหลจำนวน 10 คัน ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 แสดงปัญหาเดือน ตุลาคม 2566 ของสีเคลือบรถไหล

แสดงจำนวนรถยนต์ปัญหาสีเคลือบกันสนิมไหล			
เดือนตุลาคม 2566			
วันที่	จำนวน (คัน)	วันที่	จำนวน (คัน)
1	0	15	1
2	0	16	1
5	0	17	0
6	2	19	0
7	0	20	2

8	2	21	1
9	0	22	1
14	0	23	0
รวม			10

2. ปัญหาสีเคลือบกันสนิมใต้ท้องรถกระจาย โคนตัวรถ มีลักษณะกระจายออกจากพื้นที่ไปติดกับ Hood และ Fender ดังรูปที่ 6-7 มีจำนวน 42 คัน ดังตารางที่ 2



รูปที่ 6 สีเคลือบกันสนิมใต้ท้องรถยนต์กระจายไป

บริเวณ Hood



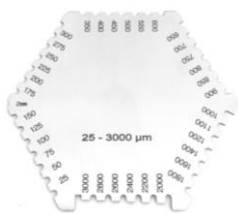
รูปที่ 7 สีเคลือบกันสนิมใต้ท้องรถยนต์กระจายไป

บริเวณ Fender

ตารางที่ 2 ข้อมูล การกระจายของสีเคลือบเดือน ตุลาคม 2566

ตำแหน่งการกระจายของ สีเคลือบกันสนิม	จำนวนคัน
Hood	15
Fender	27
Front Door	0
Rear Door	0
Side Panel	0
รวม	42

3. ต้นทุนที่ไม่สามารถควบคุมได้ เกิดจากปัญหาดังข้อ 1 และ 2 สมมติฐานว่าในการพ่นสีเคลือบกันสนิมได้ทั้งรถของรถแต่ละคันมีความหนาไม่สม่ำเสมอ จาก Check Sheet ย้อนหลังของพนักงานดังตารางที่ 3 พบว่ารถบางคันมีความหนางบางจุดไม่ถึง 500 ไมโครเมตร และรถบางคันมีความหนามากกว่า 1,000 ไมโครเมตร โดยค่ามาตรฐานคือ 500-1,000 ไมโครเมตร โดยวัดด้วยเครื่องมือหิววัดความหนาของสี (ชนิดฟิล์มเปียก : Wet Film Thickness Gauge) ดังรูปที่ 8 ซึ่งไม่สามารถควบคุมปริมาณที่ใช้ต่อรถ 1 คันได้ จึงทำให้ต้นทุนการซื้อสีเคลือบกันสนิมสูง ในปัจจุบันมีการสั่งซื้อสีเคลือบกันสนิมได้ทั้งรถยนต์ 1 ถึง น้ำหนัก 250 kg สามารถใช้กับรถยนต์ได้ทั้งหมด 66 คัน



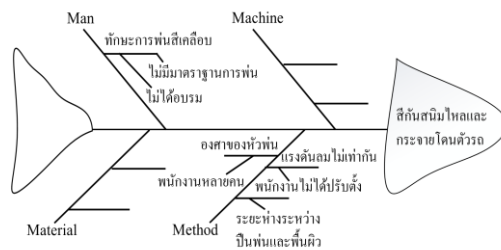
รูปที่ 8 หิววัดความหนาของสี (ชนิดฟิล์มเปียก)

ตารางที่ 3 ข้อมูลความหนาของสีเคลือบกันสนิม

ครั้งที่	Front Wheel		Under Body		Rear Wheel		Spare Tire
1	450	700	700	750	900	750	500
2	750	800	450	650	850	900	1,200
3	800	800	500	650	850	850	750
4	500	750	700	600	750	800	650
5	600	850	600	700	1,200	1,000	600
6	650	450	750	650	750	900	600
7	600	650	550	650	750	850	1,000
8	700	750	650	450	800	750	700
9	750	750	600	700	800	1,200	600
10	550	750	700	700	1,000	900	550
**ค่ามาตรฐาน UBC เท่ากับ 500-1000 ไมโครเมตร							

3.3 การวิเคราะห์ปัญหาและการแก้ไขปัญหา

ในการวิเคราะห์หาปัจจัยที่ทำให้เกิดปัญหาสีเคลือบกันสนิมไหลและกระจายโดนตัวรถ โดยใช้แผนผังก้างปลา และหลักการ Why-Why Analysis หารากเหง้าของปัญหาที่แท้จริง ดังรูปที่ 9-10



รูปที่ 9 แผนผังก้างปลาวิเคราะห์ปัญหาสีเคลือบกันสนิมไหลและกระจายโดนตัวรถยนต์

จากรูปที่ 9 สามารถสรุปปัญหาสีเคลือบกันสนิมไหลและกระจายโดนตัวรถได้ 2 ปัจจัย คือ ปัจจัยที่เกิดจากคนและปัจจัยที่เกิดจากวิธีการ

3.3.1 ปัจจัยที่เกิดจากคน

1. ทักษะการพ่นสีเคลือบ พนักงานสามารถพ่นสีเคลือบกันสนิมได้ แต่ไม่สามารถควบคุมคุณภาพการพ่นได้ เช่น การปรับองศาของปืนพ่นสี การปรับแรงดันลม อัตราการไหลของสี ระยะห่างระหว่างปืนพ่นและพื้นผิว เกิดจากพนักงานมีหลายคนในขณะทำงานและไม่มีมาตรฐานกำหนดไว้

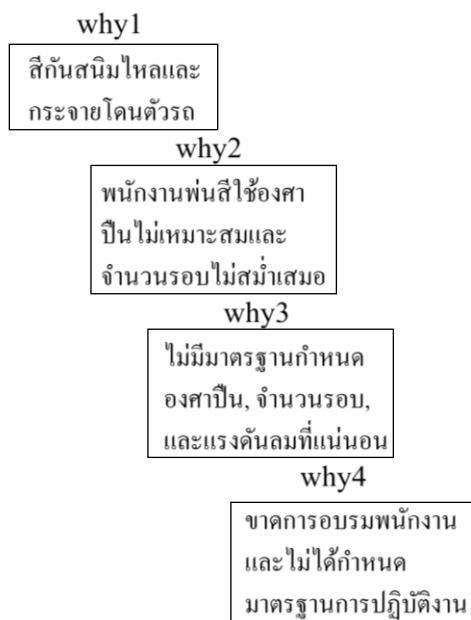
3.3.2 ปัจจัยที่เกิดจากวิธีการ

1. องศาของปืนพ่นสี (Spray Gun Angle) ปืนพ่นสีเคลือบกันสนิม เป็นอุปกรณ์ที่สำคัญที่สุดในงานนี้ จากปัญหาที่พบคือ การควบคุมองศาปืนพ่นสีเคลือบของพนักงาน เนื่องจากมีพนักงานหลายคนแต่ละคนพ่นสีเคลือบกันสนิมด้วยมุมมอง และรอบที่แตกต่างกัน จึงทำให้ชิ้นงานมีความหนางบางของสีเคลือบไม่

เท่ากัน รวมถึงการกระจายของสีไปโดนตัวรถยนต์ในส่วนอื่นๆ

2. แรงดันลมของปืนพ่นสี (Optimal Gun Pressure) จากปัญหาที่พบคือ ในขณะที่พ่นสีเคลือบกันสนิมใช้ปืนพ่นสี 2 ตัว แต่ละตัวมีแรงดันลมที่ไม่เท่ากัน ดังรูปที่ 3 จึงทำให้สีเคลือบมีความหนาไม่เท่ากัน

3. ระยะห่างระหว่างปืนพ่นสีและพื้นผิว (Spray Distance) จากปัญหาที่พบคือ พนักงานแผนกพ่นสีเคลือบกันสนิมมีหลายคน ในขณะที่พ่นสีแต่ละคนถือปืนพ่นสีในระยะที่ไม่เท่ากัน ระหว่างปืนพ่นสีกับผิวของท้องรถยนต์ ทำให้ความหนาบางของแต่ละจุดไม่เท่ากัน จึงเกิดการไหลของสีเคลือบ รวมไปถึงการกระจายของสีไปโดนตัวรถยนต์ส่วนอื่นอีกด้วย



รูปที่ 10 หลักการ Why-Why Analysis วิเคราะห์ปัญหาสีเคลือบกันสนิมไหลและกระจายโดนตัวรถยนต์

จากรูปที่ 10 วิเคราะห์ปัญหาด้วยหลักการ Why-Why Analysis สามารถสรุปการเกิดปัญหาสีเคลือบกันสนิมไหลและกระจายโดนตัวรถ คือ พนักงานแผนกพ่น

สีเคลือบขาดการอบรมตามมาตรฐาน ซึ่งในขณะนี้ยังไม่มีมาตรฐานที่แน่ชัด ทางคณะผู้วิจัยจึงออกแบบขั้นตอนการพ่นสีเคลือบและการปรับตั้งเครื่องมือต่างๆต่อไป

3.4 ขั้นตอนการออกแบบคู่มือในการทำงาน (Work Instructions : WI)

หลังจากการวิเคราะห์ปัญหาที่ขึ้นกับสายการผลิตสีเคลือบกันสนิมได้ท้องรถแล้ว พบว่าปัญหาสีเคลือบกันสนิมได้ท้องรถไหล และการกระจายโดนตัวรถ มีความเกี่ยวข้องกัน สาเหตุมาจากการไม่มีมาตรฐานในการทำงาน นั่นคือ องศาปืนสำหรับการพ่น จำนวนรอบ องศาปืนพ่นสี แรงดันลม และรูปแบบการพ่น โดยจัดทำคู่มือการทำงาน (WI) ดังต่อไปนี้

1. ปรับตั้ง Regulator ให้แรงดันลมอยู่ที่ 8-9 Mpa ทั้งด้านซ้ายและด้านขวา ดังรูปที่ 11



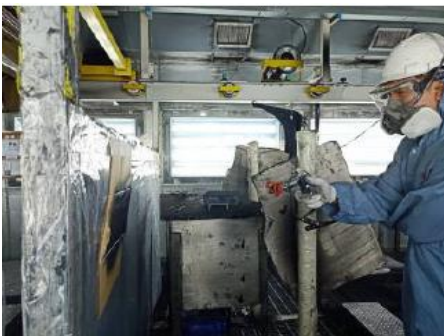
รูปที่ 11 ปรับตั้ง Regulator

2. เตรียมแผ่นโกลด์ กระดาษก๊อกลงในการทดสอบปืนพ่นสีเคลือบกันสนิมได้ท้องรถยนต์ และรูปแบบการพ่นสี ดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 เตรียมแผ่นโกลด์ กระดาษกล่อง

3. ทดสอบพันลงแผ่นโกลด์ให้ได้รูปแบบตามมาตรฐานที่กำหนดในแผนการทำงาน ดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 ทดสอบพันลงแผ่นโกลด์

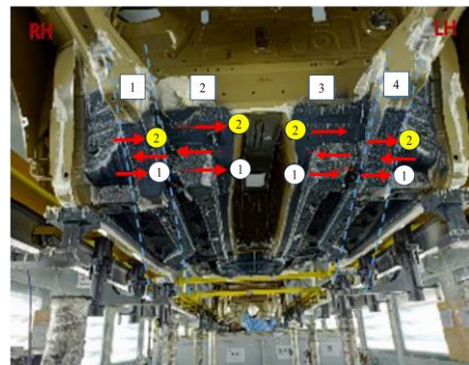
4. ทำการพันสีเคลือบชุ่มลือหน้าด้านซ้ายและด้านขวา การพันไปและกลับจำนวน 3 รอบ ดังรูปที่ 14



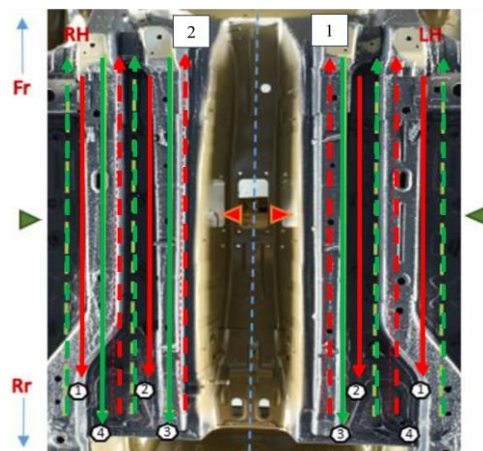
รูปที่ 14 แสดงขั้นตอนการพันบริเวณชุ่มลือหน้าด้านซ้ายและขวา

5. ทำการพันสีเคลือบใต้ท้องรถยนต์ส่วนหน้า ด้านซ้ายและด้านขวา การพันไปและกลับจำนวน 1.5 รอบ ของแต่ละตำแหน่ง 1-4 ดังรูปที่ 15

6. ทำการพันสีเคลือบใต้ท้องรถยนต์ส่วนกลาง แสดงขั้นตอนดังรูปที่ 12 พันตามเส้นสีแดง จำนวน 2 รอบ โดยยืนอยู่ด้านในตัวรถ จากนั้นพันเสริมตามเส้นสีเขียวจำนวน 2 รอบ โดยยืนด้านนอกตัวรถ เริ่มจากตำแหน่งที่ 1 ไปยังตำแหน่งที่ 2 ดังรูปที่ 16

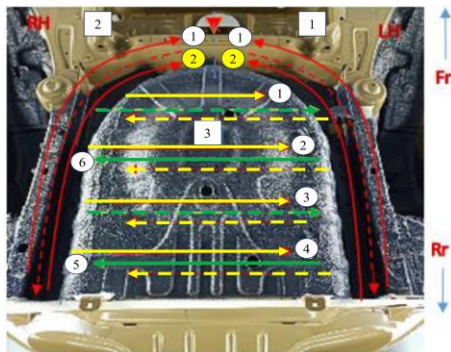


รูปที่ 15 ตำแหน่งการพันสีเคลือบใต้ท้องรถยนต์ส่วนหน้า



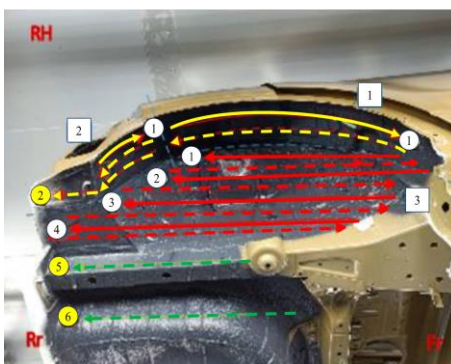
รูปที่ 16 ตำแหน่งการพันสีเคลือบใต้ท้องรถยนต์ส่วนกลาง

7. ทำการพันสี่เกลือบบริเวณช่องว่างอะไหล่ได้
 ท้องรถยนต์ ขั้นตอนคือพันไปและกลับตามเส้นสีแดง
 จำนวน 1.5 รอบ โดยยืนอยู่ด้านในตัวรถ ที่ตำแหน่งที่ 1-
 2 และในตำแหน่งที่ 3 ยืนอยู่ด้านในตัวรถ พันไปและ
 กลับตามเส้นสีเขียว จำนวน 4 รอบ จากนั้นพันเสริม
 จำนวน 2 รอบ ตามเส้นสีเขียวโดยยืนอยู่ด้านนอกตัวรถ
 ดังรูปที่ 17



รูปที่ 17 การพันบริเวณช่องว่างอะไหล่ใต้ท้องรถ

8. ขั้นตอนการพันสี่เกลือบบริเวณซุ้มล้อหลัง
 ด้านซ้ายและด้านขวา เริ่มต้นในตำแหน่งที่ 1 พันไปและ
 กลับ จำนวน 1 รอบ ตำแหน่งที่ 2 พันไปและกลับ
 จำนวน 1.5 รอบ และตำแหน่งที่ 3 พันไปและกลับตาม
 เส้นสีแดง จำนวน 4 รอบ จากนั้นพันเสริมบริเวณคาน
 และ Spare Tire ตำแหน่งละ 0.5 รอบ ตามเส้นสีเขียวใน
 รูปที่ 18



รูปที่ 18 ตำแหน่งการพันบริเวณซุ้มล้อหลัง

โดยคู่มือการทำงาน (WI) ที่จัดทำขึ้น จะมี
 ข้อจำกัดที่แสดงอย่างชัดเจนอยู่ด้านล่างซ้ายของเอกสาร
 ดังตารางที่ 4 ข้อจำกัด WI

ตารางที่ 4 แสดงสัญลักษณ์สำหรับการพันสี่เกลือบ

○	แทนจำนวน 1 รอบ
●	แทนจำนวน 0.5 รอบ
←	Process หลัก
←	พันเสริม
▼	ตำแหน่งขึ้นพัน Process หลัก
▼	ตำแหน่งขึ้นพันเสริม
□	บอกลำดับตำแหน่งที่เริ่มงาน
---	เส้นแบ่ง Area
** ปีนห่างจากพื้นที่ผิวรถ 30 mm ตำแหน่งเป็น 45 องศา, ล้างหัวปืนก่อนออกจากพื้นที่ทำงาน, เส้นระหว่างไปและกลับต้องทับกัน 50 % แรงดัน 8-9 MPa	

หลังจากจัดทำวิธีการทำงาน (WI) เรียบร้อยแล้ว
 ทำการอบรมพนักงาน ทดลองพันตามเอกสารจะทำให้
 สามารถควบคุมความหนาของสี่เกลือบกันสนิมได้ทั้ง
 รถยนต์ได้ ดังนั้นจึงทำการเก็บข้อมูลการใช้สี่เกลือบกัน
 สนิมได้ทั้งรถ เพื่อนำข้อมูลมาเปรียบเทียบหาปริมาณที่
 ใช้งานจริงและปริมาณที่สั่งซื้อ ซึ่งหากพบว่า เมื่อทำการ
 เพิ่มคุณภาพแล้วสี่เกลือบกันสนิมได้ทั้งรถที่ใช้งานมี
 ปริมาณลดลงก็จะสามารถช่วยลดการสั่งซื้อ ซึ่งเป็นการ
 ช่วยลดต้นทุนในโรงงานอีกด้วย

4. ผลการทดลองและอภิปรายผล

4.1 ปัญหาสี่เกลือบกันสนิมได้ทั้งรถไหล

จากการวิเคราะห์ปัญหาสี่เกลือบกันสนิมได้ทั้งรถ
 ไหล โดยใช้หลัก Why-Why Analysis พบว่าปัญหา
 เกิดจากไม่มีเอกสารหน้างานที่บ่งบอกวิธีการพัน ทำให้

พนักงานไม่สามารถพ่นสีเคลือบกันสนิมได้ต้องรอให้สม่ำเสมอได้ ดังนั้นจึงจัดทำวิธีการดำเนินงาน (WI) ขึ้น ทำการอบรมพนักงาน และได้ทำการบันทึกผลเพื่อเปรียบเทียบก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุง ดังตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการเปรียบเทียบก่อนและหลังการปรับปรุง ปัญหาสีเคลือบกันสนิมได้ต้องรอไหล

หัวข้อ	ก่อนการปรับปรุง	หลังการปรับปรุง	สัดส่วนที่ลดลง
	ตุลาคม 2566	ธันวาคม 2566	(ร้อยละ)
สีเคลือบกันสนิมได้พ่นรอไหล	พบปัญหาสีเคลือบไหลจำนวน 10 คัน	ไม่พบปัญหาสีเคลือบไหล	100%

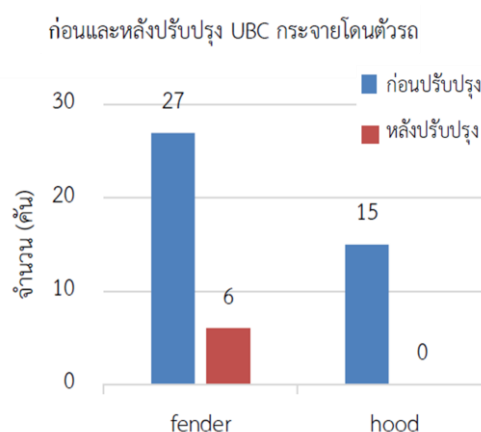
จากตารางที่ 5 เปรียบเทียบก่อนการปรับปรุงและหลังการปรับปรุงจะเห็นว่า วิธีการดำเนินงาน (WI) ที่ผู้วิจัยได้จัดทำขึ้น สามารถลดปัญหาการไหลของสีเคลือบกันสนิมได้ต้องรอจากเดิม เดือนตุลาคม 2566 จำนวน 10 คัน หลังการปรับปรุงเดือนธันวาคม 2566 จำนวน 0 คัน คิดเป็นร้อยละ 100 ซึ่งปัญหาดังกล่าวไม่เกิดขึ้นซ้ำอีก

4.2 ปัญหาสีเคลือบกันสนิมได้ต้องรอกระจายโดนตัวรถ

จากการวิเคราะห์ปัญหาสีเคลือบกันสนิมได้ต้องรอกระจายโดนตัวรถ โดยใช้หลัก Why-Why Analysis พบว่าปัญหาที่เกิดขึ้น ได้แก่ การไม่ได้ระบุงศาปีนลม และรูปแบบการพ่นที่ชัดเจน ทำให้พนักงานไม่มีมาตรฐานในการพ่น ดังนั้นจึงจัดทำคู่มือปฏิบัติงานเพื่อสร้างมาตรฐานขององศาปีนลม แรงดันลม และรูปแบบการพ่นสีเคลือบกันสนิมได้ต้องรอรถยนต์

ผู้วิจัยได้ทำการบันทึกผลเพื่อเปรียบเทียบก่อนและหลังการปรับปรุง พบว่าการระบุงศาปีนและรูปแบบการพ่นที่ชัดเจนในคู่มือปฏิบัติงาน รวมถึงระบุง้อจำกัดของแรงดันปีน สามารถลดปัญหาการกระจาย

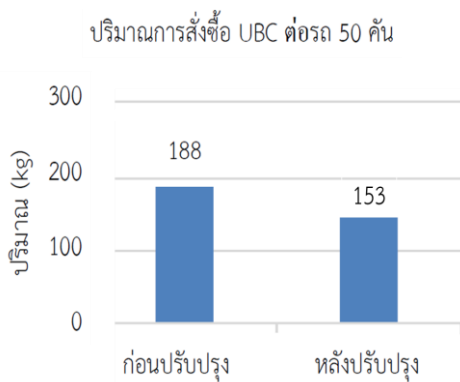
ตัวของสีเคลือบกันสนิมได้ต้องรอบริเวณ Fender จากเดิมเดือนตุลาคม 2563 จำนวน 27 คัน หลังการปรับปรุงเดือนตุลาคม 2563 จำนวน 6 คัน คิดเป็นร้อยละ 77.78 บริเวณ Hood จากเดิมเดือนตุลาคม 2563 จำนวน 15 คัน หลังการปรับปรุงเดือนธันวาคม 2563 จำนวน 0 คัน คิดเป็นร้อยละ 100 สามารถนำมาเปรียบเทียบข้อมูลได้ ดังรูปที่ 19



รูปที่ 19 เปรียบเทียบผลก่อนและหลังการปรับปรุงของการกระจายสีเคลือบกันสนิม

4.3 ปัญหาการสั่งซื้อสีเคลือบกันสนิมได้ต้องรอที่มากเกินไป

จากการเก็บข้อมูลการใช้งานสีเคลือบกันสนิมได้ต้องรอ พบว่าปริมาณที่ใช้จริงน้อยกว่าการสั่งซื้อในปัจจุบันอย่างมาก และได้ทำการบันทึกผลเพื่อเปรียบเทียบปริมาณการใช้งานสีเคลือบกันสนิมได้ต้องรอรถยนต์ก่อนและหลังการปรับปรุงพบว่า ปริมาณที่ใช้ก่อนการจัดทำวิธีดำเนินงาน (WI) รถยนต์ 50 คัน ใช้ปริมาณสีเคลือบที่ 188 kg หลังการปรับปรุงโดยการดำเนินงานตาม WI ใช้ปริมาณ 153 kg ซึ่งลดลงจากเดิมร้อยละ 16.62 ดังรูปที่ 20



รูปที่ 20 เปรียบเทียบปริมาณการสั่งซื้อสีเคลือบกันสนิม

ผลการวิจัยที่แสดงถึงการลดข้อบกพร่องด้านคุณภาพและการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพสอดคล้องกับแนวคิดการจัดการคุณภาพโดยรวม (TQM) และการปรับปรุงอย่างต่อเนื่อง (Continuous Improvement) ที่มุ่งเน้นการแก้ไขสาเหตุรากแท้ของปัญหา การนำ Why-Why Analysis และการกำหนด Work Instruction (WI) มาใช้ยังสะท้อนหลักการ Lean Manufacturing ในการลดความสูญเปล่าและเพิ่มผลิตภาพ (Productivity) ของสายการผลิตอย่างเป็นรูปธรรม

ในด้านการประยุกต์ ผลลัพธ์สามารถนำไปขยายผลในสายการผลิตที่มีลักษณะคล้ายคลึง เช่น การพ่นสีตัวถังรถยนต์ อุตสาหกรรมเครื่องใช้ไฟฟ้า หรืออุตสาหกรรมชิ้นส่วนที่ต้องการการเคลือบผิว ทั้งนี้ การวิจัยในอนาคตอาจพัฒนาต่อด้วยการออกแบบการทดลองเชิงสถิติที่ซับซ้อน (DOE) หรือการบูรณาการเทคโนโลยีหุ่นยนต์และระบบตรวจสอบด้วย AI เพื่อเพิ่มความแม่นยำและยั่งยืนของกระบวนการผลิตในระยะยาว

นอกจากผลลัพธ์เชิงคุณภาพและต้นทุนในสายการผลิตแล้ว งานวิจัยนี้ยังมีนัยสำคัญในเชิงมหภาคต่อแรงงานและมาตรฐานอุตสาหกรรม กล่าวคือ การจัดทำมาตรฐานวิธีการทำงาน (WI) และการควบคุมกระบวนการช่วยยกระดับทักษะของพนักงาน ลดความ

เสี่ยงจากการทำงานซ้ำๆ ที่อาจก่อให้เกิดอุบัติเหตุ และสร้างสภาพแวดล้อมการทำงานที่ปลอดภัยมากขึ้น อีกทั้งยังสอดคล้องกับมาตรฐานอุตสาหกรรมยานยนต์สากลที่มุ่งเน้นความปลอดภัย คุณภาพ และความยั่งยืนของการผลิต ผลการวิจัยนี้จึงไม่เพียงช่วยลดต้นทุนและของเสียในระดับโรงงาน แต่ยังเป็นส่วนหนึ่งของการสนับสนุนมาตรฐานแรงงานและคุณภาพในอุตสาหกรรมยานยนต์ของประเทศในภาพรวม

5. สรุปผล

ปัญหาสีเคลือบกันสนิมได้ทิ้งรอยไหลและการกระจายโค่นตัวรถยนต์ สามารถใช้หลักการ แผนผังก้างปลา Why-Why Analysis ในการวิเคราะห์หารากของปัญหา ซึ่งมีสาเหตุเกิดจากไม่มีเอกสารหน้างานที่บ่งบอกวิธีการพ่น ทำให้พนักงานไม่สามารถพ่นสีเคลือบกันสนิมได้ทิ้งรอยให้สม่ำเสมอได้ ดังนั้นจึงจัดทำวิธีการดำเนินงาน (WI) ขึ้นและทำการอบรมพนักงานพบว่า ก่อนการปรับปรุงเดือนตุลาคม 2566 ได้เกิดปัญหาสีเคลือบกันสนิมได้ทิ้งรอยไหลจำนวน 10 คัน เมื่อทำการปรับปรุงการผลิตเดือนธันวาคม 2566 แล้ว ไม่พบปัญหาการไหลอีก ซึ่งผลการแก้ปัญหาคิดเป็นร้อยละ 100 และปัญหาการกระจายตัวของสีเคลือบกันสนิมได้ทิ้งไปโค่นตัวรถยนต์บริเวณ Fender จากเดิมเดือนตุลาคม 2566 มีจำนวน 27 คัน หลังปรับปรุงเดือนธันวาคม 2566 จำนวน 6 คัน คิดเป็นร้อยละ 77.78 บริเวณ Hood ในเดือนเดียวกันจากเดิมจำนวน 15 คัน ลดลงเหลือ 0 คัน คิดเป็นร้อยละ 100 และควบคุมแรงดันลมของปืนพ่นสีเคลือบให้ได้มาตรฐานอยู่ที่ 8-9 MPa

นอกจากนี้ก่อนและหลังการปรับปรุงพบว่า ปริมาณที่ใช้สีเคลือบกันสนิมก่อนการจัดทำวิธีการดำเนินงาน (WI) มีปริมาณ 188 kg และหลังการปรับปรุงการผลิตใช้สีในปริมาณ 153 kg ลดลงร้อยละ 18.62 แสดงว่ารถ 1 คัน ใช้ปริมาณ 3.06 kg ดังนั้นสีเคลือบกันสนิม

ได้ทั้งรถ 1 ถึง 250 kg สามารถใช้กับรถได้ทั้งหมด
ประมาณ 81 คัน

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณบริษัท เอส เอ ไอ ซี มอเตอร์-ซีพี จำกัด อนุเคราะห์สถานที่ในการรวบรวมข้อมูลและปฏิบัติงานปรับปรุงแก้ไขสายการผลิตการพ่นสีเคลือบกันสนิมให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ณ โอกาสนี้ขอขอบพระคุณ สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์ สนับสนุนทุนเผยแพร่ผลงานวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Viriyayingyong and B. Pathravishkul, "Studying China's New Energy Automobile Industry Development Plan under the Made in China 2025 Strategy to Develop Thailand's New Energy Automotive Industry" *Journal of Sinology*, 18(2), pp. 185-199, July-December 2024.
- [2] S. Banphasuk, Thailand Automotive Institute. (2023, Aug. 23). "Corrosion resistance testing by accelerated salt spray technique" [Online]. Available: https://www.thaiauto.or.th/2020/th/news/news-detail.asp?news_id=3203
- [3] Sujitra Buaphan (2020). Improving the production process to increase productivity in the electronics industry, Thesis, Department of Industrial Engineering and Management, Graduate School, Silpakorn University. (In Thai)
- [4] Wutthiphon Sripairoj (2015). Improving the production process and manpower per production line to reduce labor costs, Thesis, Industrial Development Program, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University. (In Thai)
- [5] Suchadee Thamrongsuk and Thanawat Manoharn (2022). Improving the efficiency in the automotive parts production process with work improvement techniques, Southern Vocational Education Institute Academic Journal 1. (In Thai)
- [6] R. Saravanan, M. S. Rao, N. Sunkara and T. Malyadri, "Six sigma's ECRS technique to down cost and time of manufacturing-An experimental investigation," In *AIP Conference Proceedings*, AIP Publishing LLC, Vol. 2283, no.1, pp. 020070, October. 2020.
- [7] Suphawit Sukkoet. (2020). Increasing productivity in the polishing section of the wafer production process. Thesis, Engineering Management Program, Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University. (In Thai)
- [8] Sumasto, F., Arliananda, D. A., Imansuri, F., Aisyah, S., & Purwojatmiko, B. H. (2023). Enhancing Automotive Part Quality in SMEs through DMAIC Implementation: A Case Study in Indonesian Automotive Manufacturing. *Quality Innovation Prosperity*, 27(3), 57-74.
- [9] Jis D 0201 1995, (2023, Aug. 23). "Automobile parts - General rules of eletroplating" [Online]. Available: <https://www.scribd.com/doc/271139212/JIS-D-0201-1995>

- [10] S. SINJAI. "The effectiveness of seat cushion in reducing whole body vibration among counter balance forklift drivers in a seaport, bangkok," M. S. Thesis, Burapha Univ. , 2020. (in Thai)



ชอนภา เกษเมือง
- อาจารย์ประจำสาขาวิชา
วิศวกรรมการผลิตยานยนต์ คณะ
วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์
- งานวิจัยที่สนใจ Statistical
Statistical Process Control (SPC)
and Lean Manufacturing
applications in the automotive
industry.

ประวัติผู้ประพันธ์ :



บัณฑิต อินทรีย์มีศักดิ์
- อาจารย์ประจำสาขาวิชา
วิศวกรรมการผลิตยานยนต์ คณะ
วิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี
สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์
- งานวิจัยที่สนใจ แปลรูปชีวมวล
ออกแบบเครื่องจักรการเกษตร
ออกแบบชิ้นส่วนยานยนต์



ชัยวุฒิ นรินทรางกูร
- เจ้าหน้าที่อาวุโส ด้านห้องปฏิบัติการ
การ CNC คณะวิศวกรรมศาสตร์
และเทคโนโลยี สถาบันการ
จัดการปัญญาภิวัฒน์
- งานวิจัยที่สนใจ การออกแบบ
ชิ้นส่วนด้านยานยนต์
ระบบควบคุมอัตโนมัติ PLC
Quality Control



ภูมิ จาตุณตานนท์
- หัวหน้าสาขาวิชาวิศวกรรม
การผลิตยานยนต์ คณะวิศวกรรม
ศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบัน
การจัดการปัญญาภิวัฒน์
- งานวิจัยที่สนใจ ระบบควบคุม
PLC ระบบการขนส่งเพื่อน
แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

สมบัติทางกายภาพและเชิงกลของมอร์ตาร์ซีเมนต์ผสมกากกาแฟ Physical and Mechanical Properties of Cement Mortar mixed with Recycled Spent Coffee Grounds

กุลธิดา บรรจงศิริ และ อนัญญา ประดิษฐ์ปรีชา*

Kultida Bunjongsiri and Anunya Pradidthaprecha*

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สุขภาพ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช

9/9 ม.9 ตำบลบางพูด อ.ปากเกร็ด จ.นนทบุรี 11120 ประเทศไทย

*ผู้พิมพ์ประสานงาน : pradidthaprecha.w@gmail.com

วันที่รับบทความ: 25 กรกฎาคม 2568 / วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 : 16 กันยายน 2568 / วันที่ตอบรับการตีพิมพ์: 18 กันยายน 2568

บทคัดย่อ งานวิจัยนี้ศึกษาสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของมอร์ตาร์ซีเมนต์ผสมกากกาแฟ โดยนำไปแทนที่ทรายที่ร้อยละ 0 10 20 30 40 50 70 90 และ 100 โดยปริมาตร ทดสอบหาปริมาณน้ำ โดยควบคุมค่าการไหลร้อยละ 110 ± 5 ทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ที่อายุการบ่ม 7 14 21 และ 28 วัน ถ่ายภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ขนาด 500 เท่า เพื่อผลการกระจายตัวของกากกาแฟในมอร์ตาร์ ผลการทดสอบพบว่า การนำกากกาแฟเป็นวัสดุทดแทนทรายส่งผลให้ความต้องการน้ำในส่วนผสมเพิ่มขึ้น การแทนที่ทรายด้วยกากกาแฟ ทำให้มอร์ตาร์มีความต้องการน้ำเพิ่มขึ้นร้อยละ 4.43 ถึง 44.83 ตามลำดับ ผลการทดสอบกำลังของมอร์ตาร์ผสมกากกาแฟมีอัตราการพัฒนาของกำลังอัดในแต่ละส่วนผสมเปลี่ยนแปลงเพิ่มขึ้นร้อยละ 5.72 เมื่อผสมกากกาแฟร้อยละ 30 และเปลี่ยนแปลงลดลงร้อยละ 11.29 เมื่อผสมกากกาแฟร้อยละ 100 โดยส่วนใหญ่กำลังรับแรงอัดมีแนวโน้มลดลง และมีการพัฒนากำลังไม่มากนัก จึงต้องมีการปรับปรุงส่วนผสมต่อไป หน่วยน้ำหนักของมอร์ตาร์ขึ้นอยู่กับปริมาณของกากกาแฟและมีแนวโน้มลดลงร้อยละ 6.51 ถึง 30.52 ตามปริมาณกากกาแฟที่เพิ่มขึ้น ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง พบว่าการกระจายตัวของกากกาแฟทั่วตัวอย่างของมอร์ตาร์เห็นเป็นเนื้อเดียวกัน

คำสำคัญ : มอร์ตาร์, กากกาแฟ, ทราย, กำลังรับแรงอัด

Abstract This study examined the mechanical and physical characteristics of mortar that contains coffee grounds at volume percentages of 0, 10, 20, 30, 40, 50, 70, 90, and 100% in place of sand. The mortar's water content, flow, and control flow rate were tested at 110 ± 5 percent. The mortar's compressive strength was tested at 7, 14, 21, and 28 days of curing age. The effects of mixing the coffee grounds mortar were seen using a 500x Optical microscope to acquire the results. According to the test results, the combination needed more water when coffee grounds were used in place of sand. The water consumption of the mortar increased by 4.43% and 44.83%, respectively, when coffee grounds were substituted for sand. According to

the strength test results, the rate at which the compressive strength of each mixture developed rose by 5.72% when 30% coffee grounds were added, and it fell by 11.29% when 100% coffee grounds were added. Further improvement of the combination is necessary because the compressive strength tended to decline and there was little strength development. Depending on the amount of coffee grounds, the mortar's unit weight tends to reduce by 6.51 to 30.52 percent as the coffee grounds content rises. The uniform distribution of coffee grounds throughout the mortar sample was demonstrated by the Optical microscope images.

Keywords: Mortar, Coffee grounds, Sand, Compressive strength

1. บทนำ

การวิจัยและพัฒนาวัสดุก่อสร้างมีในปัจจุบันสามารถช่วยลดต้นทุนการผลิตด้วยการใช้วัสดุที่หมุนเวียนได้ ทำให้ลดต้นทุนการก่อสร้างไปได้มากพอสมควรและหนึ่งในวัสดุก่อสร้างที่นิยมใช้เป็นวัสดุประสานหรือใช้ในการก่อฉาบ [1] จะมีส่วนประกอบสำคัญอย่างหนึ่งคือ ทราย การนำทรายจากธรรมชาติมาใช้ในอุตสาหกรรมอย่างต่อเนื่องทั่วโลก ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เนื่องจากทรายมีที่มาจากแม่น้ำและดัก ใช้เพื่อตอบสนองความต้องการที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของอุตสาหกรรมก่อสร้าง ด้วยแนวทางเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) ที่นำกากกาแฟมาใช้ทดแทนทรายนี้ ทำให้สามารถกำจัดขยะอินทรีย์ได้โดยไม่ต้องฝังกลบ และยังสามารถรักษาทรัพยากรธรรมชาติของเราได้อีกทางหนึ่งด้วย [2] ซึ่งคาดการณ์ว่าปริมาณกากกาแฟที่ใช้แล้วที่ผลิตทั่วโลกอยู่ที่ 60 ล้านตัน ถือเป็นขยะที่มีมากที่สุดในการเตรียมกาแฟ และโดยปกติแล้วกากกาแฟใช้แล้วส่วนใหญ่จะมีปลายทางที่หลุมฝังกลบ [3]

กากกาแฟ (Spent Coffee Grounds; SCGs) เป็นของเหลือทิ้งจากกระบวนการการสกัดน้ำกาแฟ โดยจากปริมาณการบริโภคกาแฟในประเทศไทย เราจะมีกากกาแฟเหลือทิ้งเป็นจำนวนมากกว่า 290,000 ตัน/ปี ในปี 2565 [4] กากกาแฟจัดเป็นของเสียชีวภาพซึ่งมีระยะเวลา

ในการย่อยสลายไม่แน่นอน โดยปกติจะมีระยะเวลาไม่กี่วันถึงไม่กี่เดือน ขึ้นอยู่กับปัจจัยต่างๆ เช่น ความชื้น ปริมาณจุลินทรีย์ และการนำไปจัดการ เช่น หากนำไปทำปุ๋ยหมัก จะย่อยสลายได้เร็วกว่าการนำไปทิ้งในแหล่งทิ้งขยะทั่วไปที่อาจใช้เวลาหลายเดือน [5] การจัดการกากกาแฟในอุตสาหกรรมกาแฟสำเร็จรูป จะนำกากกาแฟไปเผาเพื่อสร้างเป็นพลังงานความร้อนใช้ในกระบวนการผลิต และในภาคครัวเรือน [6] และร้านอาหารส่วนใหญ่จะส่งกำจัด ปัจจุบันกระแสสิ่งแวดล้อมกำลังเป็นที่จับตามอง ทำให้มีการณรงค์ลดปริมาณขยะ และ/หรือนำขยะเหล่านั้นมาแปรรูปเป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรมต่อไป กากกาแฟเองถือได้ว่าเป็นวัตถุดิบที่มีประโยชน์มากมายด้วยส่วนประกอบของตัวเอง เช่น น้ำมัน เส้นใย สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ไบโอดีเซล เชื้อเพลิงอัดแท่ง [7-8] เป็นต้น อาจจะถือได้ว่ากากกาแฟสามารถนำมาใช้ทดแทนวัตถุดิบที่มาจากปิโตรเลียม หรือมาจากแหล่งอาหาร ซึ่งนอกจากจะช่วยเรื่องสิ่งแวดล้อมและความมั่นคงด้านพลังงานและอาหารแล้ว ยังเป็นการลดการใช้จ่ายในการกำจัดกากกาแฟ และต้นทุนในการผลิตผลิตภัณฑ์ได้อีกด้วย แนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน ถูกนำมาปรับใช้ในแวดวงอุตสาหกรรมต่างๆ มากขึ้น เป็นแนวทางการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่ามากที่สุดในทุกๆ กระบวนการ ไม่ว่าจะเป็นการพัฒนาอุตสาหกรรมก่อสร้างให้ประสบความสำเร็จและก้าวหน้าขึ้น เพราะมันคือ “โมเดลที่จะ

เปลี่ยนวิถีและรูปแบบการก่อสร้าง” ที่มีอยู่ในปัจจุบัน และอุตสาหกรรมการก่อสร้าง เป็นหนึ่งในอุตสาหกรรมที่มีการใช้ทรัพยากรจากธรรมชาติอย่างฟุ่มเฟือย และยังสร้างผลกระทบต่อในวงกว้างให้กับโลกของเราด้วย

งานวิจัยที่ผ่านมา จากมหาวิทยาลัยในออสเตรเลียที่ค้นพบว่าการแทนที่ทรายในคอนกรีตบางส่วนด้วยกากกาแฟที่ผ่านการแปรรูปเป็นไบโอชาร์ (biochar, ถ่านชีวภาพ) สามารถเพิ่มความแข็งแรงของคอนกรีตได้ ร้อยละ 30 และช่วยลดปริมาณซีเมนต์ที่ต้องใช้ได้ถึง ร้อยละ 10 ซึ่งไม่เพียงแต่ช่วยจัดการปัญหาขยะอินทรีย์จากกากกาแฟ แต่ยังช่วยลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติคือทราย และส่งเสริมแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียนในอุตสาหกรรมก่อสร้างอีกด้วย [9] อย่างไรก็ตาม งานวิจัยยังคงขาดข้อมูลในช่วงสัดส่วนที่กว้างกว่านี้ รวมถึงการใช้งานมอร์ตาร์ประเภทอื่นๆ ที่อาจได้รับผลกระทบจากส่วนผสมกากกาแฟแตกต่างกันไป ประกอบกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำกากกาแฟมาใช้ในงานก่อสร้างของประเทศไทยมีจำนวนที่น้อยมาก ผู้วิจัยจึงสนใจการศึกษาสมบัติทางกายภาพและเชิงกลของมอร์ตาร์ผสมกากกาแฟ โดยแทนที่ทรายด้วยกากกาแฟที่สัดส่วนต่างๆ จาก ร้อยละ 0 ถึง 100 โดยปริมาตร

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

การทดสอบในงานวิจัยนี้มีวัสดุและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดสอบ การเตรียมวัสดุทดสอบ การทดสอบคุณสมบัติด้านต่างๆ ของวัสดุ การทดสอบหาผลกระทบต่างๆ ของมอร์ตาร์มาตรฐานและมอร์ตาร์ผสมกากกาแฟ รวมถึงการทดสอบกำลังอัด ผู้วิจัยได้กำหนดวิธีดำเนินการวิจัยดังต่อไปนี้

2.1 วัสดุ

- 1.ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ตาม มอก. 15 เล่ม 1-2555 ประเภทหนึ่ง และมาตรฐานอเมริกัน ASTM C150/C150M [10]
- 2.ทรายแม่น้ำ มีขนาดคละลงที่ตามมาตรฐาน ASTM C778 [11]
- 3.กากกาแฟที่เหลือจากกระบวนการสกัดน้ำกาแฟจากเมล็ดกาแฟสายพันธุ์อาราบิก้า ร้อยละ 100 นำมาอบแห้งจนน้ำหนักคงที่ นำมาคัดขนาดขนาดคละตามมาตรฐาน ASTM C778 [11]
- 4.น้ำประปาจากกระบวนการผลิตน้ำประปาของการประปานครหลวง

2.2 อุปกรณ์

- 1.เครื่องชั่งน้ำหนักความละเอียด 0.01 กรัม
- 2.เครื่องทดสอบกำลังรับอัด (Universal Testing Machine)
- 3.เครื่องผสมมอร์ตาร์
- 4.ตะแกรงมาตรฐาน
- 5.แบบหล่อมอร์ตาร์ลูกบาศก์ขนาด 50 มิลลิเมตร
- 6.เครื่องมือทดสอบการไหลแม่ (Flow Test)
- 7.ขวดแก้วทดสอบความถ่วงจำเพาะปูนซีเมนต์ (Le Chatelier)
- 8.ขวดแก้วทดสอบความถ่วงจำเพาะทรายและกากกาแฟ (Volumetric Flask)
- 9.กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope)

2.3 วิธีการวิจัย

วิธีการดำเนินงานวิจัย แบ่งวิธีการทดสอบออกเป็น 3 ส่วนดังนี้คือ

ส่วนที่ 1 การเตรียมวัสดุและทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพเบื้องต้นของวัสดุ ได้แก่ ความถ่วงจำเพาะ

และหน่วยน้ำหนัก วัสดุที่ใช้ในการวิจัยประกอบด้วย ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 กรากกาแฟที่ผ่านกระบวนการสกัดน้ำจากกระบวนการบรีโกล นำไปอบแห้งจนน้ำหนักคงที่และนำไปคัคนาดตามมาตรฐาน ASTM C778 [11] และทราย โดยทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะปูนซีเมนต์ ตาม ASTM C188 [12] ทดสอบหาค่าความถ่วงจำเพาะของทรายและกรากกาแฟ ตามมาตรฐาน ASTM C128 [13]

ส่วนที่ 2 ทดสอบการไหลเพื่อหาความต้องการน้ำในส่วนผสมของมอร์ตาร์ การเตรียมตัวอย่างวัสดุวัตถุดิบที่นำมาศึกษาจาก กรากกาแฟที่ได้นำมาร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐานเบอร์ 16 เพื่อแยกอนุภาคที่มีขนาดใหญ่ออกและทำการทดสอบหาปริมาณน้ำโดยทดสอบตามมาตรฐาน ASTM C230/C230M [14] โดยทดสอบการไหล (Flow Test) แทนที่ทรายด้วยกรากกาแฟที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40, 50, 70, 90 และ 100 การแทนที่ทรายด้วยกรากกาแฟในมอร์ตาร์สามารถทำได้ทั้งแบบแทนที่โดยน้ำหนัก (weight-based replacement) และแทนที่โดยปริมาตร (volume-based replacement) ซึ่งแต่ละวิธีมีผลต่อคุณสมบัติของมอร์ตาร์แตกต่างกัน ในการทดสอบนี้เลือกการแทนที่โดยปริมาตรเพื่อรักษาปริมาตรรวมของมอร์ตาร์ให้ใกล้เคียงกัน มีการควบคุมค่าการไหลร้อยละ 110 ± 5 ในส่วนการทดสอบนี้ทำให้ทราบปริมาณกรากกาแฟกับความต้องการน้ำ เพื่อใช้ในการควบคุมความชื้นเหลวของมอร์ตาร์และนำไปหล่อเป็นก้อนตัวอย่างในการทดสอบความสามารถในการรับกำลังอัดในส่วนการทดสอบต่อไป

ส่วนที่ 3 ทดสอบความต้านแรงอัดของมอร์ตาร์ตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M [15] โดยทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7, 14, 21 และ 28 วัน เพื่อนำผลทดสอบมอร์ตาร์จากค่าเฉลี่ยกำลังรับแรงอัดในแต่ละอายุเพื่อติดตามการพัฒนาการรับแรงอัดและความสามารถในการรับแรงที่อัตราส่วนผสมต่างๆ และนำตัวอย่างบาง

หลังจากการทดสอบไปถ่ายภาพโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope) เพื่อดูการกระจายตัวของกรากกาแฟในก้อนตัวอย่างของมอร์ตาร์

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

ผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ผสมกรากกาแฟ แบ่งออกเป็นหัวข้อต่างๆ ตามการทดสอบดังต่อไปนี้

3.1 ผลการทดสอบคุณสมบัติพื้นฐานของวัสดุ

1. การทดสอบความถ่วงจำเพาะ (Specific Gravity) ของปูนซีเมนต์ ได้เท่ากับ 3.15

2. การทดสอบความถ่วงจำเพาะของทราย เท่ากับ 2.63 และเปอร์เซ็นต์การดูดซึมน้ำของทราย มีค่าเท่ากับ 1.42 เปอร์เซ็นต์

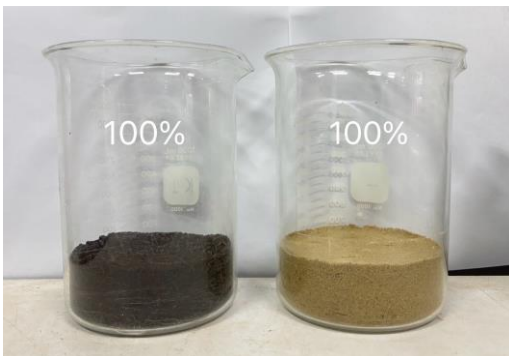
3. การทดสอบความถ่วงจำเพาะของกรากกาแฟ เท่ากับ 1.39

จากการทดสอบพบว่าความถ่วงจำเพาะ และปริมาตรของวัสดุ เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อคุณสมบัติของมอร์ตาร์เมื่อมีการใช้วัสดุทดแทนทรายด้วยกรากกาแฟ ซึ่งกรากกาแฟมีความหนาแน่นต่ำกว่าทรายมาก จากรูปที่ 1 (ก) จะเห็นได้ว่าหากน้ำหนักของทรายเท่ากับกรากกาแฟ มีปริมาตรแตกต่างกันอย่างมาก (ที่น้ำหนัก 300 กรัม ทรายมีปริมาตร 392.7 ลบ.ซม. กรากกาแฟมีปริมาตร 863.94 ลบ.ซม.) ส่วนรูปที่ 1 (ข) ปริมาตรทรายและกรากกาแฟมีปริมาตรเท่ากันจะมีน้ำหนักที่แตกต่างกัน (ที่ปริมาตร 392.7 ลบ.ซม กรากกาแฟมีน้ำหนัก 128 กรัม ทรายมีน้ำหนัก 300 กรัม) และการที่กรากกาแฟมีปริมาตรมากแต่น้ำหนักเบาทำให้ปริมาณของมวลรวมละเอียดมีมากทำให้ความต้องการของซีเมนต์เพสต์ที่ต้องการไปยึดเพื่อสร้างการยึดเกาะตัวต้องมีปริมาณมากตามไปด้วยประกอบกับความแข็งแรงของกรากกาแฟมีค่าต่ำกว่าทรายก็จะส่งผลให้ความแข็งแรงมีค่าน้อยตามลง

ไปด้วย ซึ่งอาจต้องไปดูการแทรกตัวของกากกาแฟในส่วนผสมของมอร์ตาร์และการกระจายตัวของกากกาแฟในตัวอย่างทดสอบเพื่อนำไปทำการถ่ายภาพขยายต่อไป



(ก) แสดงปริมาตรของทราย และกากกาแฟที่ต่างกันเมื่อน้ำหนัก 300 กรัม ทรายมีปริมาตร 392.7 ลบ.ซม. กากกาแฟมีปริมาตร 863.94 ลบ.ซม



(ข) แสดงน้ำหนักของทราย และกากกาแฟที่ต่างกันเมื่อมี ปริมาตร 392.7 ลบ.ซม กากกาแฟมีน้ำหนัก 128 กรัม ทรายมีน้ำหนัก 300 กรัม

รูปที่ 1 เปรียบเทียบปริมาตรและน้ำหนักตามอัตราส่วนผสมต่างๆ

3.2 ผลทดสอบการไหล ตามมาตรฐาน ASTM C230/C230M

การทดสอบการไหล (Flow Test) ตามมาตรฐาน ASTM C230 แสดงในรูปที่ 2 โดยการแทนที่ทรายด้วยกากกาแฟที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40, 50, 70, 90 และ 100 ควบคุมค่าการไหลร้อยละ 110 ± 5 เท่ากันทุกการทดสอบ ทดสอบความสามารถในการไหลแผ่โดยใช้กรวยตักขนาดตามมาตรฐานวางแผนทดสอบผิวเรียบ ทำการบรรจุมอร์ตาร์ที่ผสมเสร็จใหม่ๆ ลงในกรวยจนเต็ม จากนั้นทำการยกกรวยตักขึ้นโดยปล่อยให้มอร์ตาร์ไหลอย่างอิสระ ทำการวัดขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางของมอร์ตาร์ที่แผ่ออกตามมาตรฐาน ASTM C1437-07 [16] ดังรูปที่ 2 รายละเอียดของส่วนผสมของมอร์ตาร์ผสมกากกาแฟแสดงดังตารางที่ 1

ผลการทดสอบพบว่า การนำกากกาแฟเป็นวัสดุทดแทนทรายที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40, 50, 70, 90 และ 100 เมื่อเทียบกับมอร์ตาร์มาตรฐาน ทำให้ความต้องการน้ำในส่วนผสมเพิ่มขึ้นร้อยละ 4.43, 11.33, 18.97, 27.34, 31.53, 36.94, 41.13 และ 44.83 ตามลำดับ



รูปที่ 2 ทดสอบการไหลตามมาตรฐาน ASTM C230

Table 1 รายละเอียดของส่วนผสมของมอร์ตาร์ผสมกากกาแฟ

*Coffee	Mix Proportion of Mortar (By Weight)			
Grounds	Cement	Sand	Coffee	Water
%	kg.	kg.	kg.	kg.
0	733.63	2017.48	0.00	595.71
10	733.63	1815.73	106.63	622.12
20	733.63	1613.98	213.25	663.20
30	733.63	1412.23	319.88	708.69
40	733.63	1210.49	426.51	758.57
50	733.63	1008.74	533.14	783.52
70	733.63	605.24	746.39	815.79
90	733.63	201.75	959.64	840.74
100	733.63	0.00	1066.27	862.75

*Coffee Grounds: % Replacement Sand with Coffee Grounds

จากรูปที่ 3 แสดงแผนภูมิส่วนผสมโดยปริมาตรของส่วนผสมเห็นได้จากปริมาณของน้ำที่เพิ่มขึ้นซึ่งผลกระทบของกากกาแฟมีผลต่อการไหลของมอร์ตาร์จากการที่มอร์ตาร์มีความพรุนสูงจากโครงสร้างของกากกาแฟ มีการดูดซึมน้ำมาก ด้วยความหนาแน่นต่ำจากน้ำหนักของส่วนผสมทั้งหมด ดูได้จากส่วนผสมในตารางที่ 2

3.3 ผลทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์

จากผลทดสอบกำลังของมอร์ตาร์ตาม ASTM C109/C109M [15] แสดงดังรูปที่ 4 ทำเห็นถึงสีและการวิบัติซึ่งมีลักษณะที่ใกล้เคียงกัน แต่รับกำลังได้แตกต่างกัน จากการที่ผิวของกากกาแฟมีลักษณะหยาบและไม่สม่ำเสมอแรงยึดเกาะระหว่างกับซีเมนต์เพสต์กับอนุภาคของกากกาแฟมีค่าลดลงเมื่อมีปริมาณกากกาแฟทดแทนทรายที่เพิ่มขึ้น ส่วนหนึ่งมาจากความต้องการของซีเมนต์เพสต์เพื่อใช้ในการยึดเกาะมวลรวม จากการที่ปริมาตรเท่ากันแต่ความละเอียดไม่เท่ากันทำให้อัตราร่วนพื้นผิวต่อปริมาตรมีค่ามากขึ้น เมื่อแทนที่กาก

กาแฟในปริมาณที่สูงขึ้นขณะที่ปริมาตรของซีเมนต์เพสต์เปลี่ยนแปลงเล็กน้อยโดยไม่สัมพันธ์กับปริมาณมวลรวมละเอียด

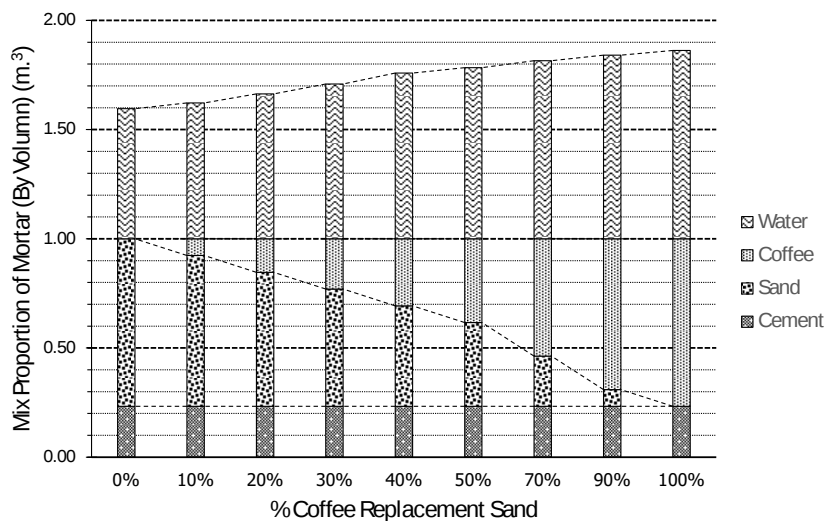
ลักษณะของการวิบัติจากแรงอัดของมอร์ตาร์มีแนวโน้มเป็นการวิบัติแบบเปราะ (brittle failure) มากกว่าคอนกรีต เนื่องจากไม่มีมวลรวมหยาบช่วยต้านแรงดึง ความพรุนเพิ่มขึ้น แตกร้าวจากการหดตัวและการดูดซึมน้ำและกำลังอัดลดลง เมื่อใช้ปริมาณเพิ่มมากขึ้นและการวิบัติจากแรงอัด [17] การยึดเกาะลดลงจากการที่ตัวอย่างหลุดล่อนหรือแตกร้าวตามแนวต่อ เมื่อสังเกตการวิบัติในรูปที่ 4 จะเห็นว่าเป็นการวิบัติแบบ Shear Cone เป็นหนึ่งในรูปแบบการพังทลายที่พบได้บ่อยในการทดสอบกำลังอัด โดยทั่วไปมีมุมอยู่ที่ประมาณ 45° การเกิด Shear Cone บ่งชี้ว่า วัสดุมีความสามารถรับแรงอัดได้ระดับหนึ่ง แต่ยังมีแนวโน้มล้มเหลวจากแรงเฉือน และการที่แรงเฉือนสูงกว่าทำให้ความสามารถของวัสดุเกิดการลื่นไถลภายในเนื้อวัสดุ การยึดเกาะระหว่างมอร์ตาร์กับแผ่นกดไม่ดี ทำให้เกิดการลื่นและเฉือน วัสดุมีความพรุนหรือมีโพรงอากาศ ลดความสามารถในการต้านแรงเฉือน ซึ่งพบได้เมื่อใช้ทดสอบแรงอัดกับตัวอย่างทรงลูกบาศก์ ซึ่งสามารถบ่งชี้ถึงพฤติกรรมของวัสดุภายใต้แรงอัดได้อย่างชัดเจน สอดคล้องกับการวิจัยของ Moussa, T. และคณะ (2024) ศึกษาความยืดหยุ่นเชิงเส้นภายใต้แรงเค้นต่ำ และเกิดการแตกหักแบบเปราะเนื่องจากกลไกการเชื่อมต่อที่อ่อนแอระหว่างวัสดุประสานและกากกาแฟ [18]

เมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างแรงอัดกับสัดส่วนกากกาแฟ ในรูปแบบของกราฟโมเดล Linear regression ได้สมการเชิงเส้น $y = -14.302x + 74.129$ และ ค่า $R^2 = 0.473$ ซึ่งมีความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่าง ร้อยละของกากกาแฟ (x) และ กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ (y) โดยมีความความชันติดลบ (-14.302) พบว่า เมื่อร้อยละของกากกาแฟเพิ่มขึ้นกำลังรับแรงอัด

ของมอร์ตาร์จะลดลง และเมื่อพิจารณา R^2 (Coefficient of Determination) มีค่าความแปรปรวนของข้อมูลได้ประมาณร้อยละ 47.3 ซึ่งถือว่า ปานกลาง ไม่สูงมากและเมื่อพิจารณา รูปแบบของกราฟ โมเดล Non-linear regression จากสมการ $y = 7.5988x^2 - 22.79x + 75.772$ และ ค่า $R^2 = 0.4809$ พบว่ากราฟจะมีลักษณะพาราโบลา เปิดขึ้นแนวโน้มของข้อมูลเหมือนกับแบบโมเดล Linear regression ในส่วนของค่า $R^2 = 0.4809$ สูงกว่าแบบ linear เล็กน้อย แสดงว่าโมเดลนี้สามารถอธิบายความ

แปรปรวนของข้อมูลได้มากขึ้นเล็กน้อย ประมาณร้อยละ 48.09

สีของตัวอย่างทดสอบแตกต่างกันตามปริมาณของกากกาแฟที่เพิ่มขึ้นทำให้สีของตัวอย่างมีความเข้มมากขึ้นดังแสดงในรูปที่ 4 เห็นได้ชัดถึงสีที่มีความต่างกัน ในรูปที่ 4 ก และ ข ส่วนด้านความแข็งแรงก็มีกำลังลดลงตามปริมาณของกากกาแฟที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงค่าจากตารางที่ 2



รูปที่ 3 แผนภูมิแสดงส่วนผสมโดยปริมาตรของส่วนผสม



(ก) Coffee Grounds Mortar ร้อยละ 0

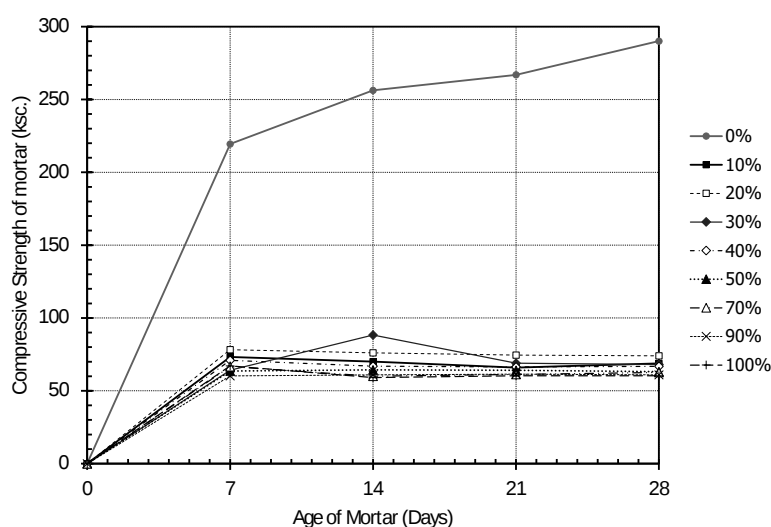


(ข) Coffee Grounds Mortar ร้อยละ 100

รูปที่ 4 ลักษณะการวิบัติด้วยกำลังอัดของมอร์ตาร์ซีเมนต์มาตรฐาน และมอร์ตาร์ผสมกากกาแฟแทนที่มวลรวมละเอียดร้อยละ 100

Table 2 ผลทดสอบกำลังอัดของมอร์ตาร์และมอร์ตาร์ผสมกากกาแฟที่อัตราส่วนต่าง ๆ

Sample No.	Coffee Grounds	% Flow	Age of Compressive strength (days)				Remark
			7 (ksc.)	14 (ksc.)	21 (ksc.)	28 (ksc.)	
M-1	0		219.44	256.26	266.88	290.07	Standard
M-2	10	110	73.26	70.04	65.92	68.79	
M-3	20	110	78.23	76.11	74.54	74.00	
M-4	30	110	64.17	88.33	68.97	68.07	
M-5	40	110	70.95	66.87	66.42	66.76	
M-6	50	110	63.61	64.35	64.08	63.12	
M-7	70	110	66.63	60.07	61.24	62.63	
M-8	90	110	60.18	60.90	61.47	60.91	
M-9	100	110	67.12	59.15	60.32	60.32	

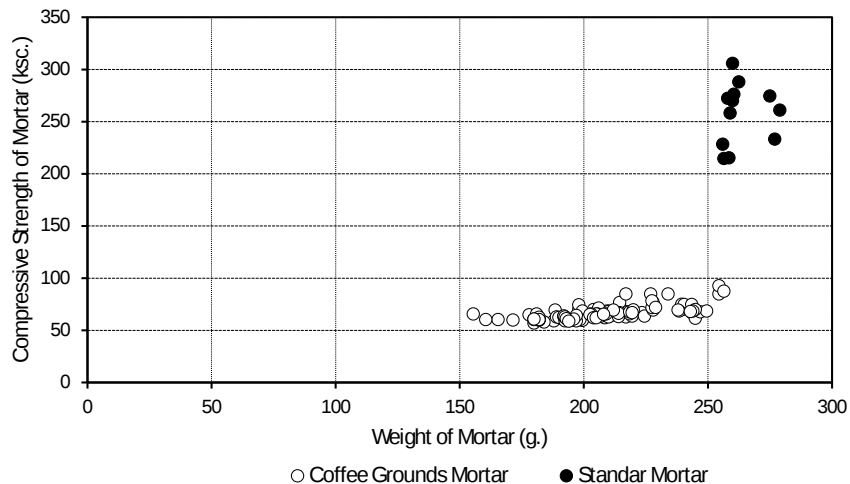


รูปที่ 5 แสดงแผนภูมิการพัฒนากำลังของมอร์ตาร์ที่ส่วนผสมต่าง ๆ

จากการทดสอบพบว่า การพัฒนากำลังของมอร์ตาร์ ดังแสดงในรูปที่ 5 เป็นกระบวนการพัฒนากำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์มีความสามารถในการรับกำลังอัดเพิ่มขึ้น ตามอายุการบ่ม โดยทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7, 14, 21 และ 28 วัน ซึ่งเป็นผลจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์และการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างภายในจากกากกาแฟ โดยการแทนที่ที่ทรายด้วยกากกาแฟที่ร้อยละ 0, 10, 20, 30, 40, 50, 70, 90 และ 100 ความแตกต่างของกำลังอัดในแต่ละส่วนผสมมีไม่มาก มีค่าเบี่ยงเบน

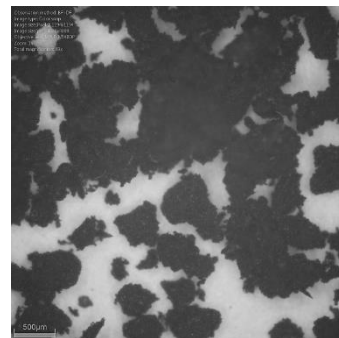
มาตรฐาน ที่อายุ 7 วัน 5.84 กก./ซม.² ที่อายุ 14 วัน 9.92 กก./ซม.² ที่อายุ 21 วัน 4.75 กก./ซม.² และที่อายุ 28 วัน 4.67 กก./ซม.² แสดงให้เห็นว่าปริมาณของกากกาแฟที่เพิ่มขึ้นไม่ได้ส่งผลกระทบท่อกำลังรับแรงอัดอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งการรบกวนปฏิกิริยาไฮเดรชันของซีเมนต์เป็นผลมาจากกากกาแฟสดเป็นสารอินทรีย์ สารเหล่านี้ อาจเคลือบผิวของอนุภาคซีเมนต์ และ ขัดขวางการคูดน้ำ ทำให้ปฏิกิริยาไฮเดรชันเกิดได้ไม่เต็มที่ [19] ส่งผลให้ เจล C-S-H ซึ่งเป็นตัวสร้างกำลังอัด เกิดขึ้นน้อยหรือไม่

ต่อเนื่อง และ โพรงอากาศ (voids) หรือฟอง (air bubbles) ของมอร์ตาร์จากน้ำหนักของก้อนตัวอย่างที่ได้จากการทดสอบ
 ในเนื้อมอร์ตาร์ ลดความหนาแน่นและกำลังอัด



รูปที่ 6 แผนภูมิแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกำลังของมอร์ตาร์และหน่วยน้ำหนักที่ส่วนผสมต่าง ๆ

จากรูปที่ 6 เห็นได้ว่ากำลังของมอร์ตาร์มีผลต่อหน่วยน้ำหนักที่ส่วนผสมต่างๆ น้ำหนักของก้อนมอร์ตาร์ผสมกากกาแฟอยู่ส่วนใหญ่อยูในช่วง 200 ± 50 กรัม และมีกำลังรับแรงอัดอยู่ในช่วง 50-100 กก./ซม.² ขึ้นอยู่กับปริมาณของกากกาแฟ ส่วนมอร์ตาร์มาตรฐานมีกำลังและหน่วยน้ำหนักมากกว่ามอร์ตาร์ผสมกากกาแฟ และมอร์ตาร์มาตรฐานจากการทดสอบมีความหนาแน่น 2,088 กก./ลบ.ม. เมื่อแทนที่กากกาแฟ ที่ร้อยละ 10, 20, 30, 40, 50, 70, 90 และ 100 ตามลำดับ ความหนาแน่นของมอร์ตาร์ที่ผสมกากกาแฟมีค่าลดลงร้อยละ 6.51, 12.64, 15.96, 20.37, 21.2, 25.93, 25.99 และ 30.52 ตามลำดับจากการที่กากกาแฟมีน้ำหนักที่เบากว่าทราย นอกจากนั้น จากผลการทดสอบกำลังรับแรงอัดและน้ำหนักของก้อนตัวอย่างที่ได้จากการทดสอบ พบว่ากากกาแฟสดเป็นขยะประเภทสารอินทรีย์จึงมีผลกับการลดความหนาแน่น และกำลังอัดของมอร์ตาร์ลง



(ก) ภาพถ่ายขยายกากกาแฟ ขนาด 500 เท่า



(ข) ภาพถ่ายขยายมอร์ตาร์ผสมกากกาแฟ ขนาด 500 เท่า

รูปที่ 7 ภาพถ่ายขยายมอร์ตาร์ผสมกากกาแฟ

จากรูปที่ 7 ผลการถ่ายภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (Optical microscope) ขนาด 500 เท่า จะเห็นได้ว่าภาพถ่ายขยายกากกาแฟ อนุภาคมีขนาดเล็กและมีการกระจายตัวที่สม่ำเสมอ ขึ้นอยู่กับระดับของการคั่วกาแฟ จะให้สีที่แตกต่างกัน เมื่อขยายชมอร์ตาร์ผสมกากกาแฟจะเห็นถึงความแตกต่างของสีปูนซีเมนต์และสีของกากกาแฟที่กระจายไปทั่วตัวอย่างของมอร์ตาร์ แสดงให้เห็นถึงขั้นตอนในการผสมกากกาแฟไม่ได้จับตัวกันหรือกระจุกตัวกันอยู่ในบริเวณใดบริเวณหนึ่งที่จะส่งผลกระทบต่อความสามารถในการรับแรงอัด

4. สรุปผล

สรุปผลการทดสอบกากกาแฟเป็นวัสดุทดแทนทรายมีผลต่อกำลังอัดของมอร์ตาร์อย่างชัดเจน พบว่าเมื่อแทนที่ทรายด้วยกากกาแฟโดยปริมาตรจากความถ่วงจำเพาะของทรายและกากกาแฟแตกต่างกัน ส่งผลให้ความต้องการน้ำเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาส่วนผสมที่มีการควบคุมค่าการไหลร้อยละ 110 ± 5 ลักษณะทางกายภาพของมอร์ตาร์ผสมกากกาแฟ มีความแตกต่างจากมอร์ตาร์ทั่วไปอย่างชัดเจน เนื่องจากกากกาแฟมีคุณสมบัติที่เบา พูน และมีพื้นผิวหยาบ ในด้านการพัฒนา กำลังของมอร์ตาร์มีความสามารถในการรับกำลังอัดเพิ่มตามอายุวันในทุกส่วนผสม สำหรับมอร์ตาร์มาตรฐานมีการพัฒนาอย่างชัดเจน ส่วนความแตกต่างของกำลังอัดของมอร์ตาร์ผสมกากกาแฟมีค่าแตกต่างกันไม่มาก อีกด้านหนึ่งคือผลของกำลังของมอร์ตาร์มีความสัมพันธ์กับหน่วยน้ำหนักที่ส่วนผสมต่างๆ ขึ้นอยู่กับปริมาณของกากกาแฟ ภาพถ่ายภาพจากกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ทำให้เห็นกากกาแฟที่กระจายไปทั่วตัวอย่างของมอร์ตาร์จากสีที่แตกต่างกัน มอร์ตาร์เป็นเนื้อเดียวกัน ผลของกำลังรับแรงที่ลดลงมาจากความแข็งแรงที่ต่างกันของทรายและกากกาแฟ สอดคล้องกับงานวิจัยหลายชิ้นในอดีต [20-22] นอกจากนั้นกากกาแฟ

สามารถส่งผลต่อกำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ได้อย่างมีนัยสำคัญ คือองค์ประกอบทางเคมีของกากกาแฟที่มีผลต่อมอร์ตาร์ เช่น สารอินทรีย์ (Organic compounds) อาจลดการยึดเกาะกับปูนซีเมนต์ น้ำมันและกรดไขมันอาจรบกวนการไฮเดรชันของซีเมนต์ ทำให้กำลังอัดลดลง เนื่องจากการรบกวนการเกิดเจล C-S-H ของซีเมนต์ และเจล Calcium Silicate Hydrate (C-S-H) นี้คือผลิตภัณฑ์หลักจากปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ เป็นตัวสร้างโครงสร้างจุลภาคที่ทำให้กำลังอัดและความแข็งแรงแกมมอร์ตาร์และคอนกรีต รวมทั้งความชื้นและสารระเหย ถ้ากากกาแฟไม่ผ่านการอบแห้ง อาจทำให้เกิดฟองอากาศหรือโพรงในเนื้อมอร์ตาร์อีกด้วย [23]

แนวทางในการพัฒนาและใช้ประโยชน์ในด้านต่างๆ ของกากกาแฟ เพื่อใช้เป็นวัสดุก่อสร้างโดยการแทนที่ทรายในมอร์ตาร์ต้องนำไปผลิตเป็นถ่านชีวภาพ แทนทรายบางส่วนในมอร์ตาร์ นอกจากนั้นยังลดน้ำหนักและเพิ่มความพรุนสำหรับวัสดุฉนวน โดยอาศัยความพรุนของกากกาแฟช่วยดูดซับเสียงและควบคุมอุณหภูมิจะเป็นแนวทางที่ดีในการใช้ประโยชน์จากกากกาแฟ

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช สำหรับการสนับสนุนทุนวิจัย และขอขอบคุณ ผศ.จิรวิทย์ บรรจงศิริ ที่ให้การสนับสนุนการทดสอบในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- [1] Kim, J. , & Lee, S. , “ Study of recycled spent coffee grounds as aggregates in cementitious materials,” *Recent Progress in Materials*, vol.5, no.1, pp.1-23, 2023.

- [2] Saberian, Mohammad, Jie Li, Anita Donnoli, Ethan Bonderenko, Paolo Oliva, Bailey Gill, Simon Lockrey, and Rafat Siddique., "Recycling of spent coffee grounds in construction materials: A review," *Journal of Cleaner Production*, vol.289:125837, 2021.
- [3] Paul McClure, "Waste coffee grounds make concrete 30% stronger" [Online]. Available: <https://newatlas.com/materials/waste-coffee-grounds-make-concrete-30-percent-stronger/>.
- [4] Natthaphong Tantiwattanaphan, "Coffee grounds from coffee cups to the concept of circular economy for bio-products," *Environmental Journal*, vol.23, no.1, pp.1-8, 2019 (in Thai).
- [5] Bomfim, A. S. C. D., De Oliveira, D. M., Walling, E., Babin, A., Hersant, G., Vaneeckhaute, C., ... & Rodrigue, D., "Spent coffee grounds characterization and reuse in composting and soil amendment." *In Waste*, vol.1, no.1, pp. 2-20. MDPI, 2022.
- [6] Atabani, A. E., Mercimek, S. M., Arvindnarayan, S., Shobana, S., Kumar, G., Cadir, M., & Al-Muhatseb, A. A. H., "Valorization of spent coffee grounds recycling as a potential alternative fuel resource in Turkey: An experimental study," *Journal of the Air & Waste Management Association*, vol.68, no.3, pp. 196-214, 2018.
- [7] Mahmoud, E., Atabani, A. E., & Badruddin, I. A., "Valorization of spent coffee grounds for biogas production: A circular bioeconomy approach for a biorefinery," *Fuel*, vol. 328, 125296, 2022.
- [8] Atabani, A. E., Mahmoud, E., Aslam, M., Naqvi, S. R., Juchelková, D., Bhatia, S. K., ... & Palacky, P., "Emerging potential of spent coffee ground valorization for fuel pellet production in a biorefinery," *Environment, Development and Sustainability*, vol.25, no.8, pp.7585-7623, 2023.
- [9] Roychand, R., Kilmartin-Lynch, S., Saberian, M., Li, J., Zhang, G., & Li, C. Q., "Transforming spent coffee grounds into a valuable resource for the enhancement of concrete strength," *Journal of cleaner production*, vol.419, 138205, 2023.
- [10] American Society for Testing and Materials, ASTM C150/C150M-17, Standard Specification for Portland Cement. Annual Book of ASTM Standard, 2017.
- [11] American Society for Testing and Materials, ASTM C778 Standard Specification for Standard Sand, Standard Specification for Standard Sand. Annual Book of ASTM Standard.
- [12] American Society for Testing and Materials, ASTM C188 Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement, Annual Book of ASTM Standard.
- [13] American Society for Testing and Materials, ASTM C128, Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate, Annual Book of ASTM Standard, 2015.
- [14] American Society for Testing and Materials, ASTM Standard C230/ C230M, Standard specification for flow Table for Use in Tests of Hydraulic Cement, Annual Book of ASTM Standard, 2008.
- [15] American Society for Testing and Materials, ASTM C109/ C109M Standard Test Method for

- Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars, Annual Book of ASTM Standard, 2016.
- [16] American Society for Testing and Materials, ASTM C1437-07 Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar, Annual Book of ASTM Standard, 2015.
- [17] Feng, M., Wang, Z., & Wu, L., “Experimental study on high-strength concrete, ultrahigh-strength concrete and corresponding mortar under triaxial compression,” *Arabian Journal for Science and Engineering*, vol.46, no.11, pp.11179-11194, 2021.
- [18] Moussa, T., Maalouf, C., Ghanem, A., Bliard, C., Abbes, B., Badouard, C., . . . & Polidori, G., “Physicomechanical and Hygrothermal characterization of a sugarcane waste/spent coffee grounds composite for buildings,” *Waste and Biomass Valorization*, vol.15, no.9, pp.5431-5443, 2024.
- [19] Chen, Z., Wen, H., Shao, J., Su, L., He, Y., & Li, Y., “Evaluate on shrinkage deformation and internal curing mechanism in low water- to- cement ratio cement mortar modified with recycled spent coffee grounds,” *Construction and Building Materials*, vol.493, 143167, 2025.
- [20] Na, S., Lee, S., & Youn, S., “Experiment on activated carbon manufactured from waste coffee grounds on the compressive strength of cement mortars,” *Symmetry*, vol.13, no.4, pp.619, 2021.
- [21] Yee, J. J., Khong, S. C., Tee, K. F., & Chin, S. C., “Physical and mechanical properties of spent coffee grounds (SCG) in concrete,” *Malaysian Journal of Analytical Sciences*, vol.28, no.4, pp.843-858, 2024.
- [22] Shahid, K. A., Ganesh, V., & Ghazali, N., “The incorporation of spent coffee grounds as an additive in cement ventilation blocks,” *Open Civ Eng J*. DOI: 10.2174/0118741495286280240206073611, 2024, 18, e18741495286280, 2024.
- [23] Nasr, Y., El Zakhem, H., Hamami, A. E. A., El Bachawati, M., & Belarbi, R., “Comprehensive review of innovative materials for sustainable buildings’ energy performance,” *Energies*, vol. 16, no.21, 7440, 2023.

ประวัติผู้ประพันธ์ :



Assoc.Prof. Dr. Kultida
Bunjongsiri : She earned a B.Eng.
and an M.Eng. in environmental
engineering from Chulalongkorn

University in Thailand in 1992 and 1997, respectively. From Griffith University in Australia, she received a Ph.D. in environmental engineering in 2017. Her primary area of competence is environmental engineering. She was named a Senior Fellowship by the Higher Education Academy in accordance with the UK Professional Standards Framework as of 2024 (UKPSF).



Assist.Prof.Dr.Anunya
Pradithaprecha: In 2009, 2011,
and 2021, respectively, she
earned her bachelor’s, master’s,
and doctorate in public health

from Khon Kean University in Thailand. Her main areas of expertise are in parasitology, nutrition, epidemiology, and community health. She received the UK Professional Fellowship recognition from the Higher Education Academy in 2023 (UKPSF).

การศึกษาการมีส่วนร่วมในการจัดการสิ่งแวดล้อมของผู้พักอาศัย ในอาคารชุดแห่งหนึ่งของกรุงเทพมหานคร A Study on the Participation of Building Occupants in Environmental Management in Bangkok

บัญชา ศรีจันทร์¹ไทร, ¹ชัยศรี ธาราสวัสดิ์พิพัฒน์¹ และ พรนิภา บริบูรณ์สุขศรี^{2*}

Bancha Srijansai, ¹Chaisri Tarasawatpipat¹ and Phonnipha Boriboonsuksri^{2*}

¹สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา

เลขที่ 1 ถนนอุทอนนอก เขตดุสิต กรุงเทพมหานคร 10300

²สาขาวิชาวิศวกรรมความปลอดภัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

19/1 ถนนเพชรเกษม แขวงหนองค้างพูล เขตหนองแขม กรุงเทพฯ

*ผู้นิพนธ์ประสานงาน : phonniphab@sau.ac.th

วันที่รับบทความ: 4 สิงหาคม 2568 / วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 : 30 กันยายน 2568 / วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 2 : 25 ตุลาคม 2568

วันที่ตอบรับการตีพิมพ์: 31 ตุลาคม 2568

บทคัดย่อ การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเชิงพรรณนาแบบภาคตัดขวาง ระดับการมีส่วนร่วม และปัจจัยส่วนบุคคลที่มีผลต่อระดับการมีส่วนร่วมต่อการจัดการสิ่งแวดล้อมของผู้พักอาศัยในอาคารชุดแห่งหนึ่งในเขตกรุงเทพมหานคร โดยเก็บจากกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 323 คน วิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติพรรณนา และ ANOVA ผลการศึกษาพบว่า สิ่งที่ได้โดดเด่นที่สุด คือ (1) การมีส่วนร่วมของผู้พักอาศัยต่อการจัดการสิ่งแวดล้อม, ด้านระบบสุขาภิบาลสิ่งแวดล้อม และ (2) การมีส่วนร่วมผู้พักอาศัยต่อการจัดการสิ่งแวดล้อมด้านระบบความปลอดภัย ซึ่งอยู่ที่ระดับมากที่สุด คือ $\bar{x} = 4.40 \pm 0.640$ และ $\bar{x} = 4.40 \pm 0.602$ ตามลำดับ ผลการทดสอบ ปัจจัยส่วนบุคคลด้วยสถิติ ANOVA และ t-test พบว่า เพศ, รายได้และระยะเวลาในการพักอาศัยที่แตกต่างกัน มีผลต่อระดับการมีส่วนร่วมต่อการจัดการสิ่งแวดล้อมไม่แตกต่างกัน ส่วนผู้พักอาศัยที่มีสถานภาพในครัวเรือน อายุ และระดับการศึกษาสูงสุดแตกต่างกันมีระดับการมีส่วนร่วมต่อการจัดการสิ่งแวดล้อมแตกต่างกัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ผลงานวิจัยนี้มีประโยชน์ใช้ช่วยกำหนดนโยบายการบริหารจัดการสิ่งแวดล้อมที่เหมาะสมกับบริหารอาคารชุดในกรุงเทพมหานคร

คำสำคัญ : การมีส่วนร่วม, การจัดการสิ่งแวดล้อม, อาคารชุด, ความปลอดภัย, ผู้พักอาศัย

Abstract This cross-sectional descriptive study aimed to investigate the level of participation and personal factors affecting the level of participation in environmental management of residents in a condominium building in Bangkok. A sample of 323 samples was collected from the sample. Data were analyzed by descriptive statistics and ANOVA. The results showed that the most prominent factors were (1) residents' participation in environmental management, environmental sanitation system, and (2) residents' participation in environmental management, safety system, which were at the highest levels, i. e. $\bar{x} =$

4.40±0.640 and $\bar{x}$ = 4.40±0.602, respectively. The results of ANOVA and t-test on personal factors revealed that gender, income, and length of stay did not significantly affect the level of participation in environmental management. Residents with different household status, age, and highest level of education had different levels of participation in environmental management at the 0.05 significance level. This research will be useful in determining appropriate environmental management policies for condominium management in Bangkok.

Keywords: Participation, environmental management, condominium, safety, residents

1. บทนำ

ในปัจจุบันสิ่งแวดล้อมได้เข้ามามีบทบาทต่อสังคมและการดำรงชีวิตอย่างมากในหลายทศวรรษที่ผ่านมา ประเทศไทยได้ออกพระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อม พ.ศ. 2535 [1] เพื่อควบคุมและกำหนดมาตรการป้องกันผลกระทบสิ่งแวดล้อมจากการพัฒนาโครงการ ซึ่งรวมถึงอาคารชุดที่มีผู้อยู่อาศัยจำนวนมาก จำเป็นต้องมีแนวทางการจัดการสิ่งแวดล้อมที่มีประสิทธิภาพ เพื่อสร้างความมั่นใจและคุณภาพชีวิตที่ดีของผู้พักอาศัยและชุมชนโดยรอบ

การมีส่วนร่วมของผู้พักอาศัยถือเป็นปัจจัยสำคัญในการจัดการสิ่งแวดล้อมของอาคารชุด เนื่องจากผู้พักอาศัยเป็นผู้ใช้ประโยชน์โดยตรงจากทรัพยากรและระบบต่าง ๆ ภายในอาคาร การมีส่วนร่วมทำให้เกิดการตระหนักรู้รู้สึกเป็นเจ้าของ และมีความรับผิดชอบร่วมกันต่อการดูแลรักษาสิ่งแวดล้อม [2] [3] ทั้งนี้การมีส่วนร่วมครอบคลุมหลายมิติ ได้แก่ การร่วมวิเคราะห์ปัญหา การวางแผน การดำเนินกิจกรรม การติดตามและประเมินผล ตลอดจนการได้รับผลประโยชน์จากการจัดการสิ่งแวดล้อม [4]

ระดับการมีส่วนร่วมของผู้พักอาศัยสามารถแบ่งได้ตั้งแต่ระดับต่ำสุด เช่น การรับรู้ข้อมูล ไปจนถึงระดับสูงสุด เช่น การตัดสินใจและกำหนดนโยบายร่วมกัน ซึ่งในเชิงการจัดการสิ่งแวดล้อมที่มีประสิทธิภาพ จำเป็นต้องส่งเสริมการมีส่วนร่วมในระดับที่สูงขึ้น เพื่อให้ผู้พักอาศัยไม่เพียงแต่เป็นผู้รับบริการ แต่ยังเป็น "ผู้ร่วมจัดการ"

สิ่งแวดล้อมของอาคาร [5] [6] การสร้างความร่วมมือดังกล่าวช่วยลดความขัดแย้ง เสริมสร้างความปลอดภัย และทำให้มาตรการจัดการสิ่งแวดล้อมมีความยั่งยืนมากขึ้น และสอดคล้องกับพระราชบัญญัติควบคุมอาคาร พ.ศ. 2522 [7] และที่แก้ไขเพิ่มเติม. แม้ว่าพ.ร.บ.จะมุ่งไปที่เจ้าของอาคาร/นิติบุคคลอาคารชุด เป็นหลัก แต่ผู้พักอาศัยก็มีบทบาทต่อการบังคับใช้กฎหมายโดยการมีส่วนร่วม เช่น การปฏิบัติตามข้อกำหนดการทิ้งขยะและการใช้น้ำ หรือการก่อกวนเสียง การไม่กระทำการที่ก่อให้เกิดมลพิษ เสียง กลิ่น หรือความเดือดร้อน การมีสิทธิร้องเรียนหรือตรวจสอบเมื่อพบปัญหาการจัดการสิ่งแวดล้อมในอาคาร เป็นต้น

แนวคิดการมีส่วนร่วม[2] [3] [6] สามารถกำหนดขอบข่ายการมีส่วนร่วมของผู้พักอาศัยได้ใน 5 มิติหลักคือ (1) การวิเคราะห์ปัญหา (Problem Analysis) ได้แก่ การแจ้งปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม เช่น ขยะ น้ำเสีย กลิ่น เสียง การมีส่วนร่วมเสนอแนะแนวทางแก้ไข เป็นต้น (2) การวางแผน (Planning Participation) ได้แก่ การเข้าร่วมประชุมคณะกรรมการนิติบุคคลอาคารชุด การเสนอข้อคิดเห็นต่อมาตรการสิ่งแวดล้อม เช่น ระบบแยกขยะ พื้นที่สีเขียว เป็นต้น (3) การดำเนินการ (Operational Participation) ได้แก่ การปฏิบัติตามระเบียบด้านสิ่งแวดล้อม เช่น การคัดแยกขยะใช้ทรัพยากรอย่างประหยัด การเข้าร่วมกิจกรรมอนุรักษ์สิ่งแวดล้อม เช่น ปลูกต้นไม้ วัน Big Cleaning เป็นต้น

(4) การติดตามและประเมินผล (Monitoring and Evaluation) ได้แก่ การร่วมตรวจสอบความสะอาดและความปลอดภัยในอาคาร การให้ข้อเสนอแนะต่อมาตรการหรือบริการของนิติบุคคล เป็นต้น

(5) การได้รับผลประโยชน์ (Benefit Sharing) ได้แก่ การได้รับคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้น เช่น อาคารสะอาด ปลอดภัย ค่าใช้จ่ายลดลงจากการริไซเคิล การได้รับความโปร่งใสในการจัดการกองทุนค่าส่วนกลาง เป็นต้น

ซึ่งจะเห็นว่าการจัดการสิ่งแวดล้อมในอาคารชุดไม่ใช่เพียงหน้าที่ของนิติบุคคลหรือผู้บริหารอาคารเท่านั้น แต่ผู้พักอาศัย ต้องมีส่วนร่วมในทุกระดับเพื่อให้มาตรการที่กำหนดตามกฎหมายเกิดผลจริง มีความยั่งยืน และสร้างคุณภาพชีวิตที่ดีร่วมกัน

ดังนั้นวัตถุประสงค์การศึกษานี้จึงได้ทำการศึกษาเพื่อสำรวจระดับการมีส่วนร่วมของผู้พักอาศัย ณ อาคารชุดแห่งหนึ่งในกรุงเทพมหานคร และศึกษาปัจจัยสำคัญที่เกี่ยวข้องที่สะท้อนให้เห็นถึงระดับความร่วมมือที่แท้จริง ตลอดจนศึกษาอุปสรรค และแนวทางที่เหมาะสมในการพัฒนาระบบการจัดการสิ่งแวดล้อมให้มีประสิทธิภาพ และยั่งยืนสำหรับชุมชนเมืองสมัยใหม่

2. แนวทางการจัดการสภาพสิ่งแวดล้อมอาคารชุด

รายงานประจำปี 2566 ของอาคารชุดที่ศึกษา ได้ศึกษาสภาพด้านสิ่งแวดล้อมภายใต้เป้าหมายการพัฒนาอย่างยั่งยืนประจำปี 2566 ของวิสัยทัศน์ที่มุ่งหมายขับเคลื่อนไปสู่ความยั่งยืน 6 Green [8] [9] คือ (1) การดำเนินธุรกิจให้ความสำคัญกับการบริหารจัดการและทุนมนุษย์ (Green Enterprise) (2) การกำหนดผลตอบแทนและการเติบโตขององค์กรให้เหมาะสม (Green Financial Management) (3) การออกแบบผลิตภัณฑ์ภายใต้ความรับผิดชอบต่อสิ่งแวดล้อม (Green Design Concept) (4) การจัดการระบบการตลาดที่เป็นธรรมกับผู้บริโภคและคู่แข่ง (Green Marketing Management) (5) การบริหาร

จัดการผลกระทบที่มีผลต่อสิ่งแวดล้อมและสังคมในกระบวนการก่อสร้าง (Green Construction Process) (6) การดูแลและบริหารจัดการคุณภาพชีวิต ของผู้พักอาศัยในโครงการ หลังส่งมอบ (Green Communication Management) โดยการบริหารจัดการเพื่อความยั่งยืนภายใต้แนวคิด Green Enterprise นี้ ครอบคลุมการดำเนินงานในเชิงโครงสร้างการบริหารจัดการขององค์กรที่ยึดหลักธรรมาภิบาลในการบริหาร องค์กรบวร การ ซึ่งให้ความสำคัญกับความรับผิดชอบต่อสังคมและสิ่งแวดล้อมเพื่อมุ่งสู่องค์กรคุณค่า เพื่อให้เป็นมาตรฐานเดียวกันในทุกมิติของการดำเนินงาน และในระหว่างการก่อสร้างโครงการจะต้องให้ชุมชนข้างเคียงสามารถตรวจสอบติดตามการก่อสร้างทุกขั้นตอน โดยติดตั้งกล้องระบบวงจรปิด (CCTV System) พร้อมติดตั้งผู้รับจดหมายของประชาชนในระแวกใกล้เคียง และต้องทำรายงานผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมทุก ๆ 6 เดือน เพื่อรายงานผลกระทบต่อวงทรัพยากรธรรมชาติสิ่งแวดล้อม ดังนั้นแนวทางแรกที่สามารถตอบโจทย์ลูกค้า คือ การจัดการสิ่งแวดล้อมอาคารชุด ที่สามารถทำให้อาคารชุด บรรลุความสำเร็จในการก่อสร้าง ผนวกกับการออกแบบอาคารที่ถูกใจในความสะดวกสบายในการเดินทาง และมีที่ตั้งโครงการใกล้สถานที่ทำงาน ใกล้ห้างสรรพสินค้า และสามารถเพิ่มเวลาพักผ่อนจากการเดินทางไปทำงานได้เป็นอย่างดี ซึ่งจากการสำรวจของธนาคารอาคารสงเคราะห์ พบว่า ตลาดที่อยู่อาศัยปี 2564 จากภาวะเศรษฐกิจไทยในปี 2563 [8] ซึ่งได้รับผลกระทบอย่างหนักจากการแพร่ระบาดของไวรัสโควิด-19 ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มวลรวมในประเทศ หรือ GDP มีการปรับลดลงร้อยละ 6.1 ซึ่งเป็นการขยายตัวที่ต่ำสุดในรอบ 22 ปี ภาพรวม ดังกล่าวส่งผลกระทบต่อธุรกิจพัฒนาอสังหาริมทรัพย์ อาคารชุดจึงมีการจัดหาพื้นที่เพื่อการพัฒนาอสังหาริมทรัพย์ การออกแบบอาคารให้มีรูปแบบที่สวยงามทันสมัย มีการจัดสรรสัดส่วนของพื้นที่ภายในห้องพักที่เหมาะสมทั้งใน

ด้านความสะดวกสบาย และมีมาตรฐาน [10] [11] ในราคาที่สามารถจับจองเป็นเจ้าของได้ โดยจัดจำหน่ายให้กับผู้ที่เข้ามาพักอาศัยทั่วไปได้เป็นเจ้าของในแบบร้านค้าารชุดและจากการที่มีผู้พักอาศัยเข้ามาอยู่รวมกันเป็นจำนวนมาก ทำให้การจัดการสิ่งแวดล้อมของผู้พักอาศัย ที่มีได้มีเป้าหมายตามแนวทางการจัดการสิ่งแวดล้อมที่เหมาะสม อันเกิดจากผู้พักอาศัยที่เข้ามาพักอาศัยมีพื้นฐานสภาพความเป็นอยู่ ความรู้ ความเข้าใจ และความตระหนักต่อสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน เมื่อเข้ามาอยู่ร่วมกันจึงมีวิถีปฏิบัติในการจัดการสภาพสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างตามวัฒนธรรมในวิถีปฏิบัติที่ติดตัวอยู่เดิมในแต่ละบุคคล [12 - 15] อันส่งผลในภาพรวมต่อการจัดการสิ่งแวดล้อมของอาคาร จึงก่อให้เกิดปัญหาระบบระบายอากาศภายในห้องพัก, ท่อระบายน้ำเสียอุดตัน, พื้นที่รองรับขยะมูลฝอยภายในอาคาร, ระบบไฟฟ้าที่คับบ่อๆ และการจัดการเมลงนำโรคและสัตว์พาหะ เป็นต้น

เนื่องจากโครงการนี้มีพื้นที่ 12 ไร่ หรือ 96.335 ตารางวา มีพื้นที่ห้องพักขยะอาคาร B และ C รวมอยู่หน้าอาคาร B เป็นที่พักขยะแห่ง 38 ลูกบาศก์เมตร เป็นที่พักขยะเปียก 11 ลูกบาศก์เมตร รวมเป็น 49 ลูกบาศก์เมตร มีจำนวนห้องพักทั้งหมด แยกเป็น อาคาร A มีห้องพัก 178 ห้อง ร้านค้า 4 ห้อง อาคาร B มีห้องพัก 578 ห้อง ร้านค้า 4 ห้อง, อาคาร C มีห้องพัก 543 ห้อง ร้านค้า 6 ห้อง รวม 1,313 ห้อง จำนวนผู้พักอาศัยอาคาร B เท่ากับ 1,872 คน จำนวนผู้พักอาศัยอาคาร C เท่ากับ 1,792 คน จึงก่อให้เกิดปัญหาการคัดแยกขยะของผู้พักอาศัยและปัญหาต่างๆ โดยรวมโครงการมีพื้นที่สีเขียวทั้งหมด 4,850 ตารางเมตร มีระบบระบายน้ำเสียแบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge) ชนิดผสมสมบูรณ์ (Completely Mix) รองรับปริมาณน้ำเสียจากอาคาร B ที่อัตราไหลของน้ำเสียสูงสุดเท่ากับ 340 ลูกบาศก์เมตร/วัน ระบบบำบัดน้ำเสียอาคาร C เป็นระบบบำบัดน้ำเสียแบบตะกอนเร่ง (Activated Sludge) ชนิด

ผสมสมบูรณ์ (Completely Mix) รองรับปริมาณน้ำเสียจากอาคาร C ที่อัตราไหลของน้ำเสียสูงสุดเท่ากับ 340 ลูกบาศก์เมตร/วัน รวมปริมาณน้ำเสียต่อวัน อาคาร A = 113.52 ลูกบาศก์เมตร/วัน อาคาร B = 323.52 ลูกบาศก์เมตร/วัน อาคาร C = 311.20 ลูกบาศก์เมตร/วัน จึงใช้เวลาในการบำบัดเป็นเวลานาน

จากปัญหาการคัดแยกขยะมูลฝอย จึงควรประชาสัมพันธ์ให้ผู้พักอาศัยนำขยะผ่านแอปพลิเคชันเวคอัพเวสต์ (Wake up Waste) เพื่อนำไปรีไซเคิล ซึ่งต้องมีการให้ความรู้แก่ผู้พักอาศัยและนำมาซึ่งการลดค่าใช้จ่าย, ท่อระบายน้ำทิ้งไขมันอุดตันท่อ ระบบไฟฟ้าที่คับบ่อๆ โดยเฉพาะความเลื่อมโทรมของพื้นที่สีเขียว ซึ่งตามลักษณะพื้นที่ตามเกณฑ์ เกณฑ์ด้านลักษณะการใช้งาน ประเภทพื้นที่ว่าง อาคารชุดพักอาศัยต้องมีที่ว่างไม่น้อยกว่า 30 ใน 100 ส่วน, เกณฑ์ด้านลักษณะพื้นที่ผิวประเภทพื้นที่ชุ่มน้ำ ผ่านได้เพื่อปลูกต้นไม้ไม่น้อยกว่าร้อยละ 50 ของพื้นที่ว่าง, พื้นที่สีเขียวชั้นล่างมากกว่าหรือเท่ากับร้อยละ 50 ของพื้นที่สีเขียวทั้งหมด, เกณฑ์ด้านลักษณะพืชพันธุ์ประเภทพื้นที่ปลูกไม้ยืนต้นชั้นล่าง มากกว่าหรือเท่ากับ ร้อยละ 50 ของพื้นที่สีเขียวชั้นล่าง ที่ยังขาดการปลูกทดแทนทดแทน และระยะห่างของอาคารมีทางเดิน กีดขวางรุดดับเพลิงไม่สามารถเข้าได้ การใช้พลังงานโซล่าเซลล์ทดแทน ระบบระบายท่อน้ำเสียอุดตันรวมทั้งการจัดการสิ่งแวดล้อมภายในห้องพักด้านการระบายอากาศ การจัดการสิ่งแวดล้อมภายนอกห้องพัก การเพิ่มพื้นที่สีเขียวตามเกณฑ์ด้านลักษณะพืชพันธุ์ การติดตั้งอุปกรณ์สัญญาณแจ้งเตือนระบบอัคคีภัย (Fire Alarm System) ด้านระบบรักษาความปลอดภัยในการตรวจตรา และการจัดการด้านระบบสุขาภิบาลสิ่งแวดล้อม การรักษาความสะอาดความเป็นระเบียบเรียบร้อยสวยงามเป็นต้น

3. วัสดุอุปกรณ์และวิธีการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ใช้วิธีการวิจัยเชิงปริมาณ โดยใช้เครื่องมือวิจัยเป็นแบบสอบถามในการเก็บข้อมูล รวบรวมข้อมูลจากผู้อาศัยในอาคารชุด 323 คน ซึ่งมีข้อคำถาม 3 ตอน ประกอบด้วย:

ตอนที่ 1 ข้อมูลทั่วไปของผู้ตอบแบบสอบถาม ประกอบด้วย (1) เพศ (2) ระดับอายุ (3) ระดับการศึกษาสูงสุด (4) อาชีพ (5) สถานะภาพในครัวเรือนของผู้ตอบแบบสอบถาม (6) รายได้ของครัวเรือน (7) ระยะเวลาในการพักอาศัย

ตอนที่ 2 ข้อมูลเกี่ยวกับการมีส่วนร่วมต่อการจัดการสิ่งแวดล้อมของอาคารชุด ซึ่งมีองค์ประกอบการมีส่วนร่วมจำนวน 5 ด้าน คือ (1) การมีส่วนร่วมด้านการวิเคราะห์ปัญหา (2) การมีส่วนร่วมด้านการวางแผน (3) การมีส่วนร่วมด้านการดำเนินงานหรือกิจกรรม (4) การมีส่วนร่วมด้านการติดตามและประเมินผล (5) การมีส่วนร่วมด้านการได้รับผลประโยชน์ โดยกำหนดน้ำหนักการให้คะแนนการประมาณค่าเป็นตามแบบของลิเคิร์ตสเกล (Likert's scale) [16] มี 5 ระดับการมีส่วนร่วม คือ มากที่สุด มาก ปานกลาง น้อยและน้อยที่สุด

ตอนที่ 3 แนวทางการจัดการสิ่งแวดล้อมที่เหมาะสมของอาคารชุด เป็นแบบสอบถามปลายเปิด ซึ่งจะสอบถามเกี่ยวกับการจัดการสิ่งแวดล้อมภายในห้องพัก ภายนอกห้องพัก การจัดการสิ่งแวดล้อมด้านระบบความปลอดภัยของอาคาร และการจัดการสิ่งแวดล้อมด้านระบบสุขภาพสิ่งแวดล้อม

แบบสอบถามที่สร้างขึ้นสำหรับการวิจัยถูกนำไปหาค่าคุณภาพ และทดสอบหาความเที่ยงตรงเชิงเนื้อหา (Content Validity) และความเชื่อมั่น (Reliability) โดยนำแบบสอบถามที่สร้างไว้ไปให้ผู้ทรงคุณวุฒิที่เกี่ยวข้อง จำนวน 3 ท่าน ตรวจสอบความเที่ยงตรงเชิงเนื้อหาให้ครอบคลุมแต่ละด้าน และครอบคลุมตามวัตถุประสงค์ของการวิจัย จากนั้นนำมาหาค่าดัชนีความ

สอดคล้อง (Index of Item-Objective Congruence : IOC) โดยใช้สูตร:

$$IOC = \frac{\sum R}{N} \quad (1)$$

โดยที่

IOC = ดัชนีความสอดคล้องระหว่าง

ข้อคำถามกับวัตถุประสงค์การวิจัย

$\sum R$ = ผลรวมคะแนนจากผู้เชี่ยวชาญ

N = จำนวนผู้เชี่ยวชาญ

ผู้วิจัยนำแบบสอบถามที่ปรับปรุงแล้วนำไปทดสอบ (Try – out) กับผู้พักอาศัยที่มีลักษณะใกล้เคียงกับกลุ่มตัวอย่างที่จะวิจัย จำนวน 30 ชุด และนำคำตอบที่เป็นแบบมาตราส่วนประมาณค่ามาหาค่าสัมประสิทธิ์ครอนบาคอัลฟา (Cronbach's Alpha Coefficient) [17] โดยการทดสอบพบค่า IOC = 0.81 และค่าความเชื่อมั่น = 0.90 แล้วจึงนำไปใช้เป็นเครื่องมือเก็บข้อมูลวิจัย ผลข้อมูลที่ได้ถูกนำมาวิเคราะห์โดยใช้สถิติเชิงพรรณนา ด้วยโปรแกรมทางสถิติ ทั้งนี้ผู้วิจัยได้ผ่านการประเมินจริยธรรมวิจัยในคน (Human Subject Protection : HSP) ของสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ เมื่อวันที่ 21 พฤศจิกายน พ.ศ.2567 และมี Cert.No.: COE. 2-023/2025

ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

ประชากรที่ศึกษาเป็นผู้พักอาศัยในอาคารคอนโดมิเนียมในเขตพื้นที่กรุงเทพมหานครแห่งหนึ่ง ซึ่งมี 1313 ห้อง และมีจำนวนผู้พักอาศัย 1,677 คน สุ่มตัวอย่างโดยใช้หลักการของ Taro Yamane [18] ตามสมการ

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

โดยที่

n = ขนาดของกลุ่มตัวอย่าง

N = จำนวนประชากรทั้งหมด

e = ค่าความคลาดเคลื่อนของการสุ่มตัวอย่าง

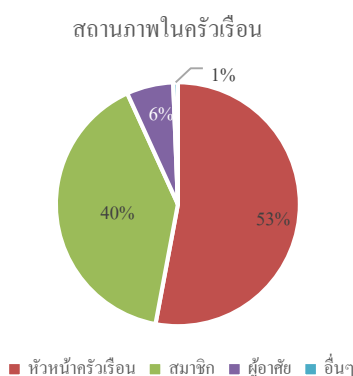
ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ผลคำนวณได้กลุ่มตัวอย่างจำนวน 323 ตัวอย่าง และเก็บข้อมูลด้วยวิธีการแบบสุ่ม (Random sampling) โดยสุ่มเก็บข้อมูลจากผู้พักอาศัยอยู่ในอาคารชุดแห่งนี้ ในแต่ละชั้นของอาคารวิเคราะห์ในภาพรวมไม่แยกกลุ่มชั้น

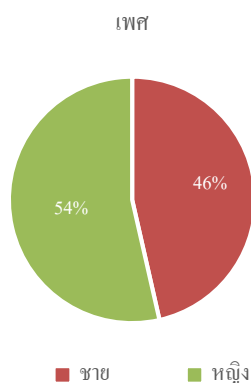
4. ผลการศึกษาและอภิปรายผล

4.1 ด้านปัจจัยส่วนบุคคล

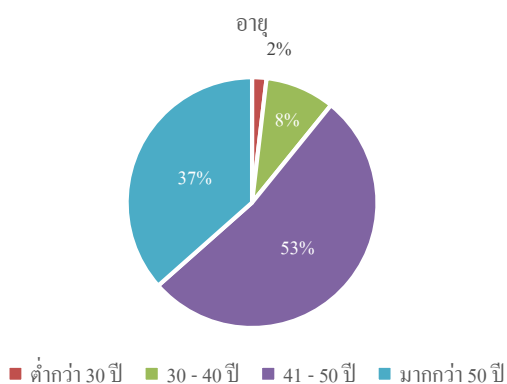
จากผลการศึกษา พบว่าส่วนใหญ่เป็นหัวหน้าครัวเรือน ร้อยละ 53 เพศชาย ร้อยละ 54 มีอายุอยู่ระหว่าง 41-50 ปี ระดับการศึกษาสูงกว่าปริญญาตรี ร้อยละ 89 มีรายได้เฉลี่ยต่อเดือน อยู่ในช่วง 60,001 – 70,000 บาท ขึ้นไป ร้อยละ 73 และมีระยะเวลาพักอาศัยอยู่ที่ 3-5 ปี ร้อยละ 39 ดังแสดงในรูปที่ 1 (ก), (ข), (ค), (ง), (จ) และ (ฉ) ตามลำดับ



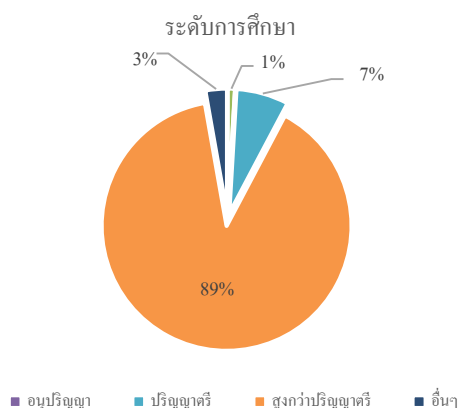
(ก) ปัจจัยส่วนบุคคลด้านสถานภาพในครัวเรือน



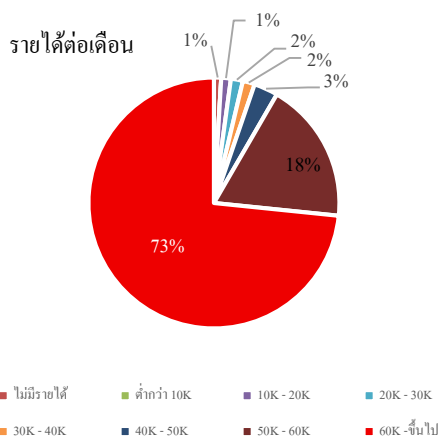
(ข) ปัจจัยส่วนบุคคลด้านเพศ



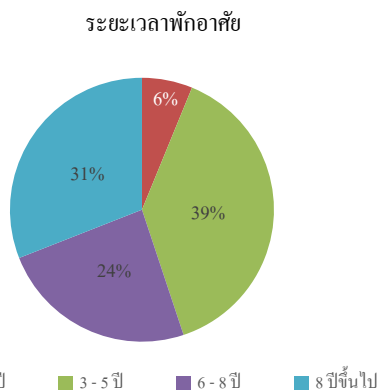
(ค) ปัจจัยส่วนบุคคลด้านอายุ



(ง) ปัจจัยส่วนบุคคลด้านระดับการศึกษา



(จ) ปัจจัยส่วนบุคคลด้านรายได้ต่อเดือน



(ฉ) ปัจจัยส่วนบุคคลด้านระยะเวลาพักอาศัย

รูปที่ 1 ข้อมูลปัจจัยส่วนบุคคลในแต่ละด้านของผู้เข้าร่วมวิจัย

4.2 ปัจจัยส่วนบุคคลที่มีผลต่อระดับการมีส่วนร่วมต่อการจัดการสิ่งแวดล้อมของผู้พักอาศัย

4.2.1 การมีส่วนร่วมต่อการจัดการสิ่งแวดล้อมของผู้พักอาศัยจำแนกตามสถานภาพในครัวเรือน

ผลการศึกษาเปรียบเทียบการมีส่วนร่วมต่อการจัดการสิ่งแวดล้อมจำแนกตามสถานภาพในครัวเรือน โดยวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว พบค่า $p\text{-value} = 0.025$ บ่งชี้ว่าผู้พักอาศัยที่มีสถานภาพในครัวเรือนที่แตกต่างกันจะมีส่วนร่วมต่อการจัดการสิ่งแวดล้อมที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ซึ่งแสดงให้เห็นว่าหัวหน้าครัวเรือนหรือผู้ที่มีบทบาทหลักในครอบครัวจะมีความรับผิดชอบสูงกว่า และเข้ามามีส่วนร่วมในการจัดการสิ่งแวดล้อมมากกว่าสมาชิกครัวเรือนทั่วไป

4.2.2 ผลการเปรียบเทียบระดับการมีส่วนร่วมต่อการจัดการสิ่งแวดล้อมของผู้พักอาศัยจำแนกตามเพศ

การเปรียบเทียบระดับการมีส่วนร่วมของผู้พักอาศัยจำแนกตามเพศ วิเคราะห์ด้วยค่าสถิติ (T-test) พบ $p\text{-value} = 0.531$ บ่งชี้ว่าเพศที่แตกต่างกันจะมีการมีส่วนร่วม ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

แสดงให้เห็นว่าการมีส่วนร่วมในการจัดการสิ่งแวดล้อมในอาคารชุดไม่ได้ขึ้นอยู่กับเพศ แต่ขึ้นอยู่กับบทบาทหน้าที่หรือความตระหนักต่อปัญหามากกว่า

4.2.3 ผลการเปรียบเทียบระดับการมีส่วนร่วมต่อการจัดการสิ่งแวดล้อมของผู้พักอาศัยจำแนกตามอายุ

การทดสอบความแตกต่างการมีส่วนร่วมของผู้พักอาศัยจำแนกตามอายุ โดยใช้วิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว พบ ค่า $p\text{-value} = 0.030$ ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ บ่งชี้ว่าผู้พักอาศัยที่มีอายุแตกต่างกันจะมีการมีส่วนร่วมแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 แสดงให้เห็นว่ากลุ่มอายุที่มากกว่ามักให้ความสำคัญกับความมั่นคงและสิ่งแวดล้อมที่ปลอดภัยมากขึ้น จึงมีแนวโน้มที่จะมีส่วนร่วมมากกว่ากลุ่มอายุน้อยที่อาจยังไม่ได้ตระหนักถึงผลกระทบระยะยาว

4.2.4 ผลการเปรียบเทียบระดับการมีส่วนร่วมต่อการจัดการสิ่งแวดล้อมของผู้พักอาศัยจำแนกตามระดับการศึกษาสูงสุด

การทดสอบความแตกต่างของการมีส่วนร่วมของผู้พักอาศัยจำแนกตามระดับการศึกษาสูงสุด โดยใช้วิธี

วิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว พบ $p\text{-value} = 0.005$ ซึ่งน้อยกว่าระดับนัยสำคัญ บ่งชี้ว่าผู้พักอาศัยที่มีระดับการศึกษาสูงสุดแตกต่างกันจะมีการมีส่วนร่วมแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 แสดงให้เห็นว่าผู้พักอาศัยที่มีการศึกษาสูงกว่า มักมีความตระหนักรู้และทักษะการวิเคราะห์ปัญหามากกว่า จึงแสดงออกถึงการมีส่วนร่วมสูงกว่า

4.2.5 ระดับการมีส่วนร่วมต่อการจัดการสิ่งแวดล้อมของผู้พักอาศัยจำแนกตามรายได้

ผลทดสอบความแตกต่างการมีส่วนร่วมของผู้พักอาศัยจำแนกตามรายได้ ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งวิเคราะห์ด้วยสถิติ ANOVA test วิเคราะห์ความแปรปรวน และสถิติที (T-test) พบว่า ค่า $p\text{-value} = 0.051$ ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ บ่งชี้ว่าผู้พักอาศัยที่มีรายได้แตกต่างกันจะมีระดับการมีส่วนร่วม ไม่แตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 แสดงให้เห็นว่าการมีส่วนร่วมไม่ได้ขึ้นกับฐานะทางเศรษฐกิจ แต่ขึ้นอยู่กับค่านิยม ความตระหนัก และความรู้สึกเป็นเจ้าของร่วมในชุมชน

ตาราง 1 ผลทดสอบปัจจัย ด้วยสถิติ ANOVA และ T-test

ความพึงพอใจ					
ต่อการจัดการสิ่งแวดล้อม	SS	df	Ms	F	p-value
ระหว่างกลุ่ม	0.617	3	0.206	3.17	0.025
ภายในกลุ่ม	20.730	319	0.065	-	-
รวม	21.350	322	-	-	-

ความตระหนัก					
ต่อการจัดการสิ่งแวดล้อม	SS	df	Ms	F	p-value
ระหว่างกลุ่ม	0.589	3	0.196	3.017	0.030
ภายในกลุ่ม	20.760	319	0.065	-	-
รวม	21.349	322	-	-	-

ระดับการศึกษา					
สูงสุดต่อการจัดการสิ่งแวดล้อม	SS	df	Ms	F	p-value
ระหว่างกลุ่ม	0.852	3	0.284	4.417	0.005
ภายในกลุ่ม	20.497	319	0.064	-	-
รวม	21.349	322	-	-	-

รายได้ต่อการจัดการสิ่งแวดล้อม					
ระหว่างกลุ่ม	SS	df	Ms	F	p-value
ระหว่างกลุ่ม	0.824	3	0.137	2.114	0.051
ภายในกลุ่ม	20.525	319	0.065	-	-
รวม	21.349	322	-	-	-

ระยะเวลาในการพักอาศัยต่อการจัดการสิ่งแวดล้อม					
ระหว่างกลุ่ม	SS	df	Ms	F	p-value
ระหว่างกลุ่ม	0.267	3	0.067	1.007	0.404
ภายในกลุ่ม	21.082	319	0.066	-	-
รวม	21.349	322	-	-	-

เพศ	$\bar{X}$	SD	T	p-value
ชาย	4.375	0.216	0.394	0.531
หญิง	4.380	0.289		

โดยที่

SS: Sum of Squares, df: Degrees of Freedom

Ms: Mean Square, F: F-statistic (F-ratio),

$\bar{X}$: Mean, SD: Standard Deviation

T: T-statistic (T-value), p-value: Probability value

4.2.6 ผลการเปรียบเทียบระดับการมีส่วนร่วมต่อการจัดการสิ่งแวดล้อมของผู้พักอาศัยจำแนกตามระยะเวลาในการพักอาศัย

การทดสอบความแตกต่างการมีส่วนร่วมของผู้พักอาศัยจำแนกตามระยะเวลาในการพักอาศัย โดยวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว พบ $p\text{-value} = 0.404$ ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญ บ่งชี้ว่าผู้พักอาศัยที่มีระยะเวลาในการพัก

อาศัยแตกต่างกันจะมีการมีส่วนร่วม ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 แสดงให้เห็นว่าระยะเวลาอยู่ในอาคารชุดไม่ใช่ตัวกำหนดการมีส่วนร่วมโดยตรง เนื่องจากผู้พักอาศัยใหม่อาจมีแรงจูงใจจากความสะดวกใหม่ในการอยู่อาศัย ในขณะที่ผู้อาศัยนานอาจมีประสบการณ์ต่อปัญหา จึงทำให้ทั้งสองกลุ่มมีส่วนร่วมได้ไม่ต่างกัน

4.3. ระดับการมีส่วนร่วมต่อการจัดการสิ่งแวดล้อม

4.3.1 ระดับการมีส่วนร่วมต่อการจัดการสิ่งแวดล้อมของผู้พักอาศัยภายในห้องพักของตน

ระดับการมีส่วนร่วมต่อการจัดการสิ่งแวดล้อมของผู้พักอาศัยภายในห้องพักในอาคารชุด ผลการรวมอยู่ระดับ “มากที่สุด” โดยมีค่าเฉลี่ย ($\bar{x}$) = 4.34 ± 0.61 ซึ่งเมื่อพิจารณาในรายละเอียดแต่ละประเด็น พบว่า อันดับหนึ่งที่ผู้พักอาศัยให้ความสำคัญ คือ การมีส่วนร่วมในการค้นหาปัญหาและสาเหตุ โดยมีค่าเฉลี่ย ($\bar{x}$) = 4.63 ± 0.49 รองลงมา คือ การมีส่วนร่วมในการติดตามประเมินผล โดยค่าเฉลี่ย ($\bar{x}$) = 4.39 ± 0.64 ดังรูปที่ 2 (ก)

4.3.2 ผลการวิเคราะห์ระดับการมีส่วนร่วมต่อการจัดการสิ่งแวดล้อมของผู้พักอาศัยภายนอกห้องพัก

ผลการวิเคราะห์ระดับการมีส่วนร่วมต่อการจัดการสิ่งแวดล้อมของผู้พักอาศัยภายนอกห้องพัก ผลการรวมอยู่ในระดับการมีส่วนร่วมมากที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ย ($\bar{x}$) = 4.35 ± 0.63 เมื่อพิจารณาตามรายชื่อ พบว่า ผู้พักอาศัยให้ความสำคัญ อันดับหนึ่งที่หนึ่ง คือ การมีส่วนร่วมในการค้นหาปัญหาและสาเหตุ โดยมีค่าเฉลี่ย ($\bar{x}$) = 4.38 ± 0.58 รองลงมา คือ การออกแบบหรือวางแผนมีส่วนร่วมในการปฏิบัติสนับสนุนการดำเนินการ โดยมีค่าเฉลี่ย ($\bar{x}$) = 4.35 ± 0.64 ดังรูปที่ 2 (ข)

4.3.3 ผลการวิเคราะห์การมีส่วนร่วมผู้พักอาศัยต่อการจัดการสิ่งแวดล้อม ด้านระบบความปลอดภัย

ผลการวิเคราะห์ระดับการมีส่วนร่วมของผู้พักอาศัยต่อการจัดการสิ่งแวดล้อมด้านระบบความปลอดภัย

ภาพรวมอยู่ในระดับการมีส่วนร่วมมากที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ย ($\bar{x}$) = 4.41 ± 0.60 เมื่อพิจารณาตามรายชื่อตามลำดับที่สำคัญ พบว่า ผู้พักอาศัยให้ความสำคัญ อันดับหนึ่งที่หนึ่ง คือ การมีส่วนร่วมในการค้นหาปัญหาและสาเหตุ โดยมีค่าเฉลี่ย ($\bar{x}$) = 4.67 ± 0.49 รองลงมา คือ การมีส่วนร่วมในการติดตามประเมินผล ค่าเฉลี่ย($\bar{x}$) = 4.48 ± 0.64 ตามมาด้วย คือ ท่านหรือสมาชิกในครัวเรือนของท่านมีส่วนร่วมในการรับผลประโยชน์จากการดำเนินการนั้นเพียงใด มีค่าเฉลี่ย ($\bar{x}$) = 4.37 ± 0.68 , การออกแบบ/วางแผนมีส่วนร่วมในการปฏิบัติสนับสนุนการดำเนินการ โดยมีค่าเฉลี่ย ($\bar{x}$) = 4.27 ± 0.68 , การมีส่วนร่วมออกแบบ/วางแผนดำเนินการ ค่าเฉลี่ย ($\bar{x}$) = 4.24 ± 0.52 ดังรูปที่ 2 (ค)

4.3.4 ผลการวิเคราะห์ การมีส่วนร่วมของผู้พักอาศัยต่อการจัดการสิ่งแวดล้อม ด้านระบบสุขภาพสิ่งแวดล้อม

ผลการวิเคราะห์ระดับการมีส่วนร่วมของผู้พักอาศัยต่อการจัดการสิ่งแวดล้อมด้านระบบสุขภาพสิ่งแวดล้อม ภาพรวมอยู่ในระดับการมีส่วนร่วมมากที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ย ($\bar{x}$) = 4.41 ± 0.64 เมื่อพิจารณาตามรายชื่อตามลำดับที่สำคัญ พบว่า ผู้พักอาศัยให้ความสำคัญ อันดับหนึ่งที่หนึ่ง คือ การมีส่วนร่วมในการค้นหาปัญหาและสาเหตุ โดยมีค่าเฉลี่ย($\bar{x}$) = 4.50 ± 0.58 รองลงมา คือ การมีส่วนร่วมในการรับผลประโยชน์จากการดำเนินการ โดยมีค่าเฉลี่ย ($\bar{x}$) = 4.44 ± 0.62 ตามมาด้วย คือ ตัวท่านหรือสมาชิกในครัวเรือนของท่านมีส่วนร่วมในการติดตามประเมินผลการกระทำนั้นเพียงใด โดยมีค่าเฉลี่ย ($\bar{x}$) = 4.43 ± 0.70 , การออกแบบหรือวางแผนมีส่วนร่วมในการปฏิบัติสนับสนุนการดำเนินการ โดยมีค่าเฉลี่ย ($\bar{x}$) = 4.37 ± 0.67 , การมีส่วนร่วมในการออกแบบ/วางแผนดำเนินการ โดยมีค่าเฉลี่ย ($\bar{x}$) = 4.30 ± 0.61 ดังรูปที่ 2 (ง)

4.4 แนวทางการจัดการสิ่งแวดล้อมที่เหมาะสมตามแนวทางของผู้พักอาศัย

1. ด้านการจัดการขยะมูลฝอย/ของเสียอันตราย

มีการจัดการ กัดแยกขยะ และนำขยะที่ขายได้ไปแปลงเป็นรายได้ มีการคัดแยกขยะของเสียอันตราย/ ขยะติดเชื้อเป็นระเบียบเรียบร้อย มีห้องพักขยะควรออกแบบห้องริมทางเดินส่วนกลางในการวางถังขยะไว้ภายในห้องและมีช่องหน้าต่างบานเลื่อนด้วยระบบเปิด ปิด ด้วยเซ็นเซอร์หย่อนขยะ เช่น ขยะแห้ง เปียก ขยะรีไซเคิล ขยะเคมีอันตราย และมีระบบไฟฟ้าแสงสว่างแบบเซ็นเซอร์ ประตูปิดด้วยการล็อก และสามารถเปิดได้ในการลำเลียงขนย้ายขยะเพื่อป้องกันแมลงสาบ หนูหรือพาหะนำโรค

2. ด้านการจัดการน้ำเสีย/น้ำทิ้ง มีการบำบัดน้ำเสียก่อนระบายออกสู่ภายนอกตามมาตรฐาน มีระบบระบายน้ำจัดการได้ดีน้ำไม่ท่วมขัง

3. ด้านการดูแลรักษาความสะอาดพื้นที่ มีแม่บ้านเพียงพอในการดูแลพื้นที่โครงการ

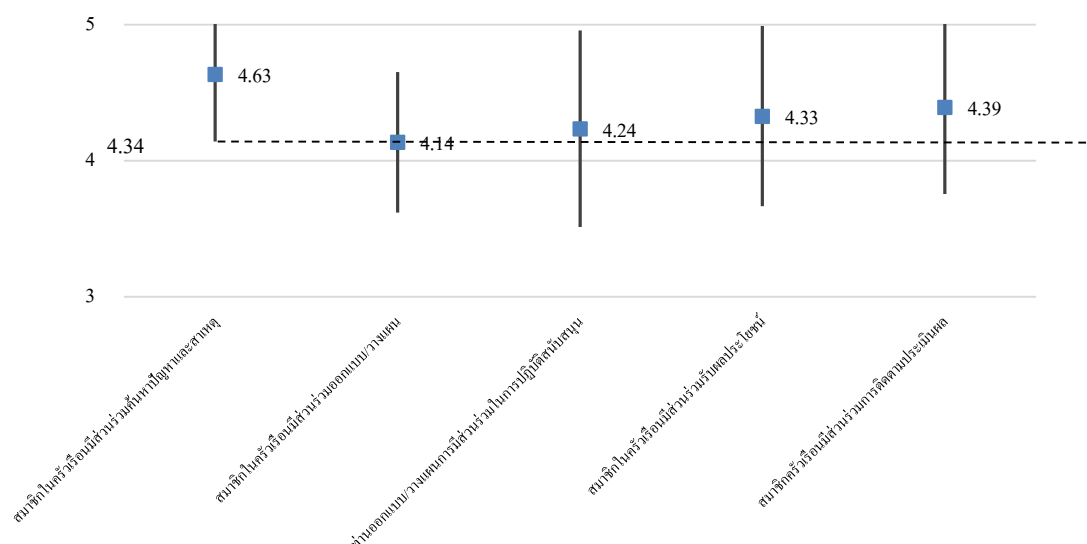
4. ด้านการจัดการสิ่งปฏิกูล/สิ่งโสโครก มีการบำบัดสิ่งปฏิกูล/สิ่งโสโครก เป็นไปตามมาตรฐานโครงการ

5. การจัดการป้องกันเหตุรำคาญ มีระบบป้องกันเหตุรำคาญภายในอาคารชุด แห่งหนึ่งได้ดี มีการควบคุมพื้นที่

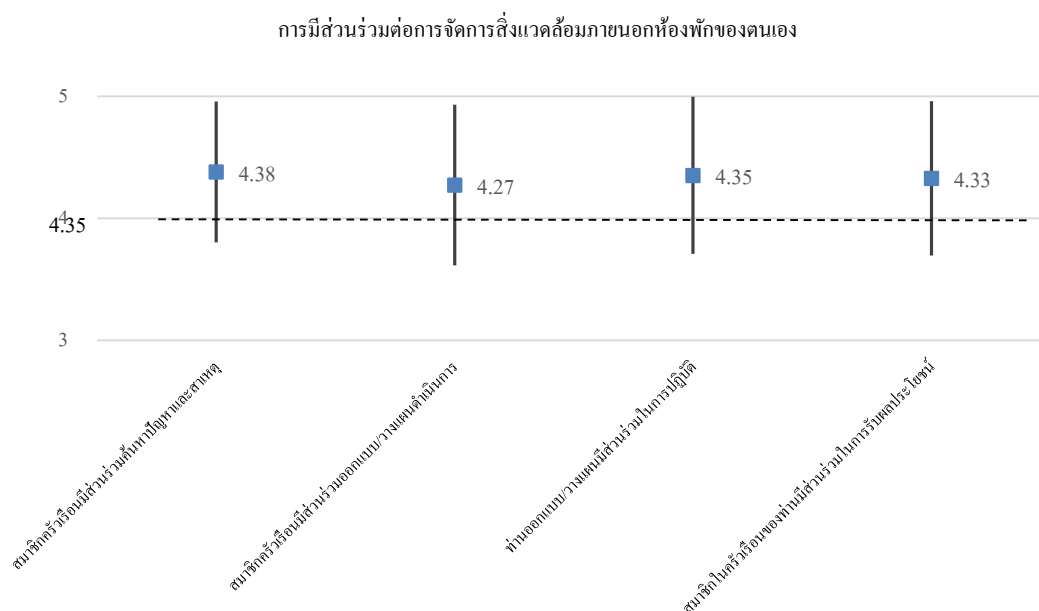
ในการบริหารจัดการและมีระบบกล้องวงจรปิด (CCTV SYSTEM) ในการดูแลพร้อมเจ้าหน้าที่ ropic. การจัดการแมลงนำโรคและสัตว์แทะ ในบริเวณพื้นที่พักอาศัยมักพบหนูและแมลงสาบบนฝ้าเพดานห้องพัก และมีแมลงสาบขึ้นจากท่อ อยากให้โครงการมีระบบป้องกันในส่วนจากระบบท่อระบาย

6. น้ำจากด้านบนของอาคารที่ระบายลงมาถึงบ่อพักควรติดตั้งฝาดะแกรงปลายท่อป้องกันหนูที่ขึ้นมาตามท่อระบายน้ำ, ท่อน้ำฝน, ท่อระบายน้ำทิ้ง, รวมถึงการติดตั้งตาข่ายที่ฝาท่อระบายน้ำในห้องน้ำและระเบียงเพื่อป้องกันแมลงสาบ, ในส่วนของพื้นที่ชั้นล่าง ควรติดตั้งท่อน้ำยากำจัดปลวกขึ้นตัวอาคารจากความชื้นโดยรอบตัวอาคารชุด แห่งหนึ่ง และในทางทัศนียภาพของตัวอาคารควรออกแบบติดตั้งมุงลวดที่ให้ความกลมกลืนกับสีอาคารเพื่อป้องกันแมลงเม่า ยุง สัตว์เลื้อยคลานหรือนก เพื่อใช้พื้นที่ให้คุ้มค่าและเกิดความปลอดภัยในพื้นที่ระเบียง

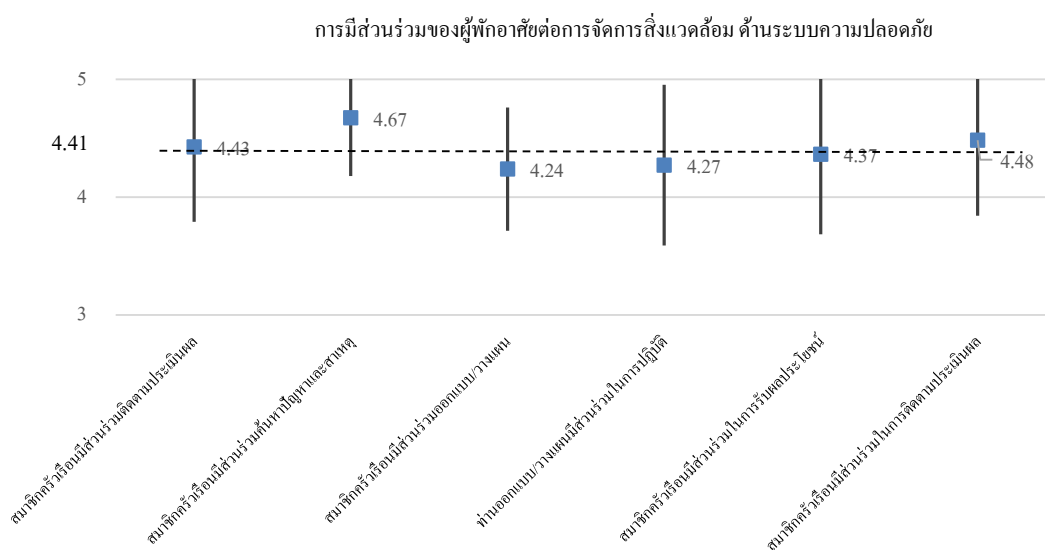
การมีส่วนร่วมต่อการจัดการสิ่งแวดล้อมภายในห้องพักของตนเอง



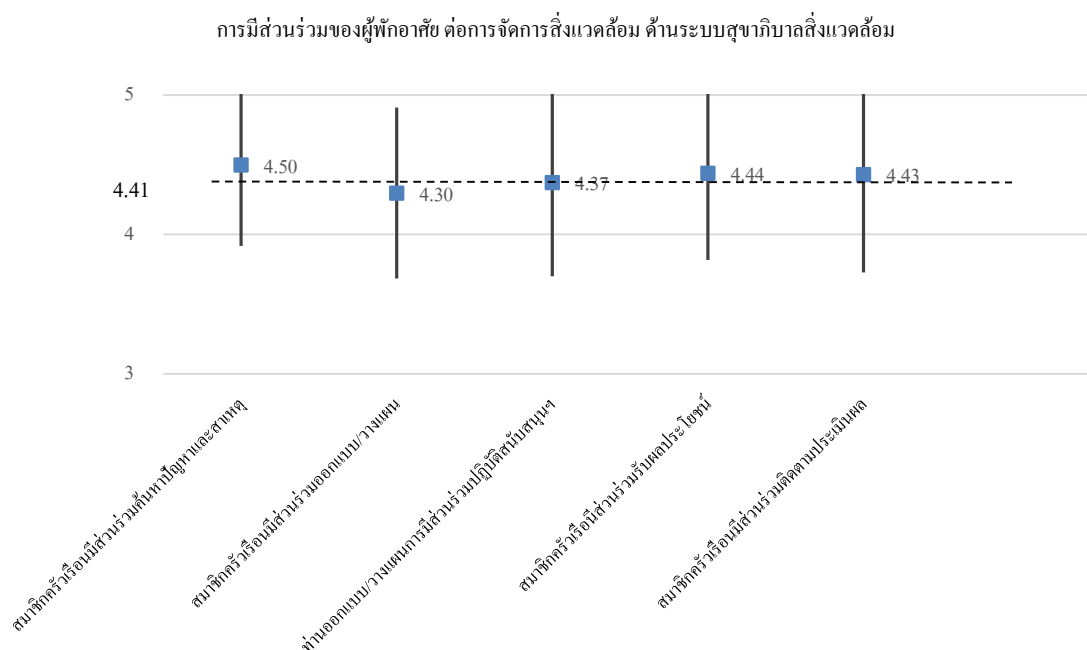
(ก) การมีส่วนร่วมจัดการสิ่งแวดล้อมด้านบริเวณภายในส่วนห้องพักตนเอง จำแนกตามมิติต่างๆ



(ข) การมีส่วนร่วมจัดการสิ่งแวดล้อมด้านบริเวณภายนอกห้องพัก จำแนกตามมิติต่างๆ



(ค) การมีส่วนร่วมของผู้พักอาศัยต่อการจัดการสิ่งแวดล้อม ด้านระบบความปลอดภัย ในมิติต่างๆ



(ง) การมีส่วนร่วมของผู้พักอาศัยต่อการจัดการสิ่งแวดล้อม ด้านระบบสุขาภิบาลสิ่งแวดล้อม ในมิติต่างๆ

รูปที่ 2 แสดงระดับการมีส่วนร่วมต่อการจัดการสิ่งแวดล้อมของผู้พักอาศัยในอาคารชุดที่ศึกษาวิจัยด้านต่างๆ

4.5 อภิปรายผล

ผลการศึกษาพบว่า การมีส่วนร่วมของผู้พักอาศัยในอาคารชุดที่ศึกษาอยู่ในระดับ “มากที่สุด” โดยเฉพาะด้านระบบสุขาภิบาลสิ่งแวดล้อมและด้านระบบความปลอดภัย ($\bar{x}=4.40$) แสดงให้เห็นว่าผู้พักอาศัยตระหนักถึงความสำคัญของคุณภาพสิ่งแวดล้อมและความปลอดภัยภายในอาคารชุดเป็นอันดับต้น ๆ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Krissana [2] ที่กล่าวถึงการมีส่วนร่วมของเจ้าของห้องชุดในการบริหารจัดการทรัพย์สินส่วนกลางว่าเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้เกิดความรับผิดชอบร่วมกันในชุมชนคอนโดมิเนียมระดับรายได้ปานกลาง และยังสอดคล้องกับ Kokamai และ Weeraplangkun [3] ที่พบว่า การมีส่วนร่วมของสมาชิก

ชุมชนต่อการจัดการสิ่งแวดล้อมต้องเน้นช่วยสร้างความโปร่งใสและความยั่งยืนของมาตรการที่ดำเนินการ

ในด้านปัจจัยส่วนบุคคล งานวิจัยนี้พบว่าเพศรายได้ และระยะเวลาในการพักอาศัยไม่ส่งผลต่อระดับการมีส่วนร่วมอย่างมีนัยสำคัญ แต่สถานภาพในครัวเรือนอายุ และระดับการศึกษามีผลแตกต่างกัน ($p < 0.05$) สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Somjai [6] ที่ชี้ว่าการมีส่วนร่วมของประชาชนในท้องถิ่นขึ้นอยู่กับปัจจัยด้านอายุและบทบาทในครัวเรือนเป็นสำคัญ อย่างไรก็ตามแตกต่างจากงานของ Kantaphan [13] ที่รายงานว่าระดับรายได้ของประชาชนสัมพันธ์กับพฤติกรรมการจัดการน้ำเสียในเขตเทศบาล ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปัจจัยทางเศรษฐกิจอาจมีบทบาทแตกต่างกันไปตามบริบทพื้นที่และรูปแบบการอยู่อาศัย

สำหรับการจัดการสิ่งแวดล้อมโดยรวม ผู้พักอาศัยในงานวิจัยนี้ให้ความสำคัญกับการค้นหาปัญหาและการติดตามประเมินผล ซึ่งสะท้อนถึงความต้องการเป็น "ผู้ร่วมจัดการ" มากกว่าเพียง "ผู้รับบริการ" แนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับข้อเสนอของ Kittinan และ Udom [5] ที่เสนอแนวทางการจัดการแบบมีส่วนร่วมเพื่อลดความขัดแย้งในชุมชนที่อยู่อาศัย ซึ่งการมีส่วนร่วมเชิงรุกจะช่วยสร้างความร่วมมือและความไว้วางใจในมาตรการจัดการสิ่งแวดล้อม

อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดของการวิจัยนี้คือ ข้อมูลได้จากอาคารชุดแห่งเดียวในกรุงเทพมหานคร ซึ่งวัฒนธรรมการอยู่อาศัยและรูปแบบการจัดการอาจแตกต่างจากพื้นที่อื่น ๆ ตามที่ Phakphum [12] และ Parichat [15] ชี้ว่าพฤติกรรมและวัฒนธรรมเดิมของผู้พักอาศัยมีผลต่อรูปแบบการจัดการขยะและสิ่งแวดล้อมโดยรวม ดังนั้น การนำผลวิจัยนี้ไปประยุกต์ใช้กับพื้นที่อื่น ๆ จำเป็นต้องพิจารณาบริบททางสังคมและวัฒนธรรมร่วมด้วย

5. สรุปผล

ผลการศึกษาการมีส่วนร่วมในการจัดการสิ่งแวดล้อมของผู้พักอาศัยในอาคารชุด โดยพิจารณาจากด้านปัจจัยส่วนบุคคลและระดับการมีส่วนร่วมผู้พักอาศัยในด้านต่างๆ ซึ่งสามารถสรุปได้ว่า (1) ปัจจัยส่วนบุคคลที่มีผลต่อระดับการมีส่วนร่วมต่อการจัดการสิ่งแวดล้อมของผู้พักอาศัย ทางด้าน เพศ รายได้ และระยะเวลาในการพักอาศัยที่แตกต่างกันจะมีระดับการมีส่วนร่วมต่อการจัดการสิ่งแวดล้อมอาคารชุดไม่แตกต่างกัน ส่วนผู้พักอาศัยที่มีสถานภาพในครัวเรือน อายุ และระดับการศึกษาสูงสุดแตกต่างกันมีระดับการมีส่วนร่วมต่อการจัดการสิ่งแวดล้อมแตกต่างกัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และ (2) ระดับการมีส่วนร่วมในด้านต่างๆพบว่า ที่โดดเด่นคือ (1) การมีส่วนร่วมของผู้พักอาศัยต่อการจัดการสิ่งแวดล้อมด้านระบบสุขาภิบาลสิ่งแวดล้อม และ (2) การมีส่วนร่วมผู้

พักอาศัยต่อการจัดการสิ่งแวดล้อมด้านระบบความปลอดภัย ซึ่งอยู่ที่ระดับการให้ความสำคัญมากที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ย $\bar{x} = 4.40 \pm 0.640$ และ $\bar{x} = 4.40 \pm 0.602$ สิ่งที่ผู้พักอาศัยเห็นว่าการจัดการสิ่งแวดล้อมที่ดีอยู่แล้ว ประกอบด้วย ด้านการจัดการขยะมูลฝอย/ของเสียอันตราย ด้านการจัดการน้ำเสีย/น้ำทิ้ง ด้านการดูแลรักษาความสะอาดพื้นที่ และด้านการจัดการสิ่งปฏิกูล

ข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้มีประโยชน์ใช้ในการช่วยกำหนดนโยบายการบริหารจัดการสิ่งแวดล้อมที่เหมาะสมกับบริหารอาคารชุดในกรุงเทพมหานคร แต่ด้วยธรรมชาติของการมีส่วนร่วมของบุคคลนั้นจะแปรเปลี่ยนตามวัฒนธรรมการใช้ชีวิตที่เป็นวิถีปฏิบัติที่ติดตัวอยู่แต่เดิมแต่ละบุคคลในแต่ละพื้นที่ ผลของงานวิจัยนี้จึงอาจข้อจำกัดในการนำไปประยุกต์ใช้ในพื้นที่อื่นที่มีวัฒนธรรมการใช้ชีวิตเดิมของผู้คนที่แตกต่างออกไป ดังนั้นหากได้ศึกษาในมิติที่หลากหลายต่างจากนี้อาจพบผลลัพธ์ใหม่ๆ ที่ส่งผลที่ดีต่อการมีส่วนร่วมในการจัดการขยะในมิติอื่นๆ ซึ่งอาจขยายขอบเขตในมิติหรือในมุมมองอื่นได้ อาทิเช่น ด้านการขยายพื้นที่ศึกษาไปยังอาคารชุดหลายประเภทและหลายทำเล เพื่อให้ได้ข้อมูลที่สะท้อนภาพรวมของผู้พักอาศัยในบริบทที่แตกต่างกันมากขึ้น การเปลี่ยนระเบียบวิธีวิจัยโดยใช้ระเบียบวิธีวิจัยแบบผสมผสาน (Mixed Methods) ที่ให้ความสำคัญซึ่งในการเจาะถึงข้อมูลซึ่งต้องเพิ่มวิธีเก็บข้อมูลวิจัยเชิงคุณภาพร่วมด้วย เช่น การสัมภาษณ์เชิงลึก (In-depth interview) หรือการสนทนากลุ่ม (Focus Group Discussion) เพื่อสะท้อนมิติทางสังคมและวัฒนธรรมของผู้พักอาศัยที่อาจไม่ปรากฏในแบบสอบถาม ตลอดจนปรับมุมมองการศึกษาในบริบทการศึกษาปัจจัยเชิงพฤติกรรมและจิตวิทยาสังคม เช่น พฤติกรรมการทิ้งขยะ การใช้ทรัพยากร การรับรู้ความเสี่ยง ความตระหนักต่อสิ่งแวดล้อม เพื่อทำความเข้าใจกลไกการมีส่วนร่วมอย่างรอบด้าน หรือแม้แต่การศึกษา

เปรียบเทียบระหว่างอาคารชุดกับที่อยู่อาศัยประเภทอื่น เช่น หมู่บ้านจัดสรร หรือหอพัก เพื่อเปรียบเทียบลักษณะการมีส่วนร่วมที่อาจแตกต่างกันตามโครงสร้างสังคมและรูปแบบการจัดการ ที่สามารถทำให้เห็นมุมมองที่ต่างจากเดิมได้ รวมถึงการศึกษาวิจัยการใช้เทคโนโลยีเพื่อดึงดูดความสนใจในการมีส่วนร่วม เช่น แอปพลิเคชันด้านการจัดการขยะ การนำไปใช้เป็นพลังงานหมุนเวียน และการใช้ระบบ IoT ในการบริหารจัดการขยะด้วยหรือตรวจสอบคุณภาพสิ่งแวดล้อม เพื่อวัดผลต่อการเพิ่มการมีส่วนร่วมของผู้พักอาศัย เป็นต้น

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ องค์กรที่สนับสนุนและกลุ่มตัวอย่างซึ่งเป็นผู้พักอาศัยในอาคารชุด ตลอดจนผู้มีส่วนเกี่ยวข้องเป็นอย่างสูงที่ทำให้การศึกษาวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- [1] Office of Natural Resources and Environmental Policy and Planning, Environmental Quality Promotion and Conservation Act B.E. 2535. (In Thai).
- [2] P. Krissana, Participation of Unit Owners in Managing Common Asset of Middle-Income Residential Condominiums, Master's thesis, Chulalongkorn Univ., 1998. (In Thai).
- [3] Y. Kokamai and W. Weeraplangkun, "Community members' participation in environmental management in Bang Len Subdistrict Municipality, Bang Yai District, Nonthaburi Province," Journal of Humanities and Social Sciences, Rajabhat Suan Dusit University, vol. 3, no. 2, pp. 12–29, 2019. (In Thai).
- [4] P. Charoen, Public Participation in Government Operations. Public Administration Association of Thailand, 1997. (In Thai).
- [5] K. Kittinan and S. Udom, "Development of the guidelines participative management to reduce conflicts of residential communities," Journal of Educational Innovation and Research, vol. 8, no. 2, pp. 739–752, 2024. (In Thai).
- [6] J. Somjai, Public Participation in Local Development in Tha Luang Municipality, Makhm District, Chanthaburi Province, Master's thesis, Burapha Univ., 2011. (In Thai).
- [7] Building Control Act B.E. 2522 (1979) and Its Amendments. Royal Thai Government Gazette. (In Thai).
- [8] R. Chaiwat, "The prioritisation and satisfaction on Thai's rating energy and environmental sustainability criteria: A case study of Bangkok Green Condominium," in Proc. 16th EuroFM Research Symposium: EFMC 2017, Madrid, Spain, Apr. 25–28, 2017.
- [9] J. Napasorn, Study Guidelines of Green Area Concept in Environmental Impact Assessment of Condominium Project in Bangkok, Chulalongkorn Univ. Theses and Dissertations (Chula ETD 6204), 2022. (In Thai).
- [10] Real Estate Information Center, Housing Market Situation in 2021 Report. Government Housing Bank, 2021. (In Thai).
- [11] M. Wuttisak, A Study on Design for Residential Condominium with an Area Not Exceeding 10,000 Square Meters in Accordance with ASHRAE 90.1 2019 Standard Building, Master of Architecture thesis, Dept. of Architecture, Silpakorn Univ., 2022. (In Thai).

- [12] A. Phakphum, A Study of Household Waste and Wastewater Management Behavior of People in Rai Khok Subdistrict. Office of the Permanent Secretary of Rai Khok Subdistrict Administrative Organization, Ban Lat District, Phetchaburi Province, 2018. (In Thai).
- [13] P. Kantaphan, Participation in Wastewater Management of Civil Servants in Municipalities of Thailand, Ramkhamhaeng Univ., Bangkok, 2008. [Online]. Available: <https://doi.nrct.go.th/ListDoi/listDetail>. (In Thai).
- [14] K. Khemmarat, Participation in Environmental Management of Members of the Subdistrict Administrative Organization Council: A Case Study of Sawang Wirawong Subdistrict, Ubon Ratchathani Province, National Institute of Development Administration, Bangkok, 2001. [Online]. Available: <https://doi.nrct.go.th/ListDoi/listDetail>. (In Thai).
- [15] L. Parichat, Development Guidelines for Condominium Management: A Case Study: The Hug Condo Bangsaen, Chonburi Province, Master of Business Administration thesis, College of Commerce, Burapha Univ., 2017.
- [16] R. Likert, "A technique for the measurement of attitudes," Archives of Psychology, vol. 140, pp. 1–55, 1932.
- [17] L. J. Cronbach, "Coefficient alpha and the internal structure of tests," Psychometrika, vol. 16, pp. 297–334, 1951, doi: 10.1007/BF02310555.
- [18] T. Yamane, Statistics: An Introductory Analysis, 3rd ed. New York: Harper and Row, 1973.

ประวัติผู้ประพันธ์ :



บัญชา ศรีจันทร์ไทร
อยู่ระหว่างการศึกษาระดับปริญญาโท สาขาวิชา
วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม คณะ
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา
วศบ. (วิศวกรรมการจัดการความปลอดภัย)
มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์



ชัยศรี ธาราสวัสดิ์พิพัฒน์
ปร.ด. (การจัดการเทคโนโลยี
สิ่งแวดล้อม) มหาวิทยาลัยพะเยา
วท.ม. (เทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม)
พระจอมเกล้าธนบุรี สนใจ
งานวิจัยด้านการบำบัดน้ำเสีย การตรวจสอบ
ติดตามคุณภาพสิ่งแวดล้อม EIA ESA และการผลิต
พลังงานเชื้อเพลิงชีวภาพ



พนัภา บริบูรณ์สุขศรี
Ph.D. (Occupational and
Environmental Health)
Thammasat University,
International Program

วท.ม. ศึกษาศาสตร์อุตสาหกรรมและความปลอดภัย
มหาวิทยาลัยมหิดล
อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมความปลอดภัย
คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
หัวหน้าหน่วยส่งเสริมเทคโนโลยีความปลอดภัยและ
สิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
ความเชี่ยวชาญ: ศึกษาศาสตร์อุตสาหกรรมและความ
ปลอดภัย, การยศาสตร์, การประเมินความเสี่ยงด้านอา
ชีวอนามัยและความปลอดภัย, ระบบการจัดการด้าน
อาชีวอนามัยฯ และวิทยาการความปลอดภัย

การศึกษาการใช้งานโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Primavera P6 เพื่อวางแผนงานและวางแผนต้นทุนสำหรับบริหารโครงการก่อสร้าง

Study of the Use of Primavera P6 Computer Program for Planning and Cost Planning for Construction Project Management

สุวิมล เจียรธรวานิช^{1*}, ชรรมมา เจียรธรวานิช² และ สิงหาวีร์ รัตนวิจิตร²

Suwimol Jaitalawanich^{1*}, Thamma Jaitalawanich² and Singhawapee Rattanavijit²

^{1*}ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ ประเทศไทย

²ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

2 ถนนนางลิ้นจี่ แขวงทุ่งมหาเมฆ เขตสาทร กรุงเทพฯ ประเทศไทย

*ผู้นิพนธ์ประสานงาน : Suwimol.J@mail.rmuk.ac.th

วันที่รับบทความ: 18 กันยายน 2568 / วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 : 22 ตุลาคม 2568 / วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 2 : 2 พฤศจิกายน 2568

วันที่ตอบรับการตีพิมพ์: 5 พฤศจิกายน 2568

บทคัดย่อ การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการใช้งานโปรแกรม Primavera P6 ในการวางแผนด้านระยะเวลาและต้นทุนของโครงการก่อสร้าง โดยวิเคราะห์ปริมาณงาน วัสดุ แรงงาน และเครื่องจักรจาก BOQ (Bill of Quantities) เพื่อนำมาวางแผนและเปรียบเทียบต้นทุน ตลอดจนใช้ตัวชี้วัดประสิทธิภาพโครงการ เช่น BCWP, BCWS, ACWP, CPI, SPI, CV, SV เพื่อประเมินความคุ้มค่าและประสิทธิภาพของโครงการจากการจำลองโครงการใน 4 ระยะ พบว่า 1) โครงการดำเนินไปร้อยละ 25 ค่า BCWS = 20,341,803.04 บาท ค่า SV = -20,038,557.54 บาท ค่า CV = -109,491,703.68 บาท 2) โครงการดำเนินไปร้อยละ 50 ค่า BCWS = 33,980,146 บาท ค่า SV = 6,180,297.5 บาท ค่า CV = -108,137,343.72 บาท 3) โครงการดำเนินไปร้อยละ 75 ค่า BCWS = 94,905,240.52 บาท ค่า SV = 11,986,476.95 บาท ค่า CV = -90,474,325.45 บาท 4) โครงการดำเนินไปร้อยละ 100 ค่า BCWS = 109,794,949.18 บาท ค่า SV = 0.00 บาท ค่า CV = -83,198,409.53 บาท ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า Primavera P6 สามารถช่วยให้การวางแผนและติดตามโครงการก่อสร้างมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยสามารถประเมินค่าใช้จ่ายจริง เทียบกับแผนที่กำหนดไว้เพื่อนำไปปรับปรุงการบริหารโครงการให้เกิดประโยชน์สูงสุด

คำสำคัญ: การวางแผนงาน, การวิเคราะห์มูลค่าที่ได้รับ, บริหารโครงการก่อสร้าง

Abstract This research aims to study the use of Primavera P6 program in planning the duration and cost of construction projects by analyzing the quantity of work, materials, labor and machinery from BOQ (Bill of Quantities) for planning and comparing costs. including project performance indicators such as BCWP, BCWS, ACWP, CPI, SPI, CV, SV to assess

the value and efficiency of the project from project simulation in 4 phases, found that 1.The project progressed 25%, BCWS value = 20,341,803.04 THB, SV value = -20,038,557.54 THB, CV value = -109,491,703.68 THB 2.The project progressed 50%, BCWS value = 33,980,146 THB, SV value = 6,180,297.5 THB, CV value = -108,137,343.72 THB 3.The project progressed 75%, BCWS value = 94,905,240.52 THB, SV value = 11,986,476.95 THB, CV value = -90,474,325.45 THB 4.The project progressed. 100% BCWS = 109,794,949.18 THB SV = 0.00 THB CV = -83,198,409.53 THB The results of this study show that Primavera P6 can help to make the planning and monitoring of construction projects more efficient by estimating the actual cost compared to the planned cost to improve the project management for maximum benefit.

Keywords: Planning, Earned value analysis, Construction project management

1. บทนำ

เทคโนโลยีการก่อสร้างได้พัฒนาอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดนวัตกรรมใหม่ๆ ที่ช่วยให้การก่อสร้างมีประสิทธิภาพมากขึ้นรวดเร็วขึ้นและมีความซับซ้อนมากขึ้นจากอดีตสู่ปัจจุบันการก่อสร้างเป็นหนึ่งในองค์ประกอบสำคัญของการพัฒนาอารยธรรมมนุษย์ปัจจุบันเน้นการวางแผนล่วงหน้าอย่างละเอียดควบคู่ไปกับการตรวจสอบและการสื่อสารอย่างรอบคอบระหว่างการดำเนินการเทคโนโลยีใหม่ๆ เช่น การสร้างแบบจำลองข้อมูลอาคาร (Building Information Modeling : BIM) ช่วยให้เห็นภาพรวมของโครงการได้ชัดเจนขึ้น

จากงานวิจัยเรื่องการศึกษาความเป็นไปได้ของการลงทุนสร้างที่พักอาศัยประเภทให้เช่า พบว่าโปรแกรม Microsoft Excel และ Microsoft Project จะถูกนำมาใช้อยู่บ้างในโครงการก่อสร้างแต่การใช้โปรแกรม Primavera P6 ยังคงไม่เป็นที่รู้จักอย่างแพร่หลายในวงกว้างนัก อย่างไรก็ตามผู้วิจัยเห็นว่า Primavera P6 ถูกพัฒนาขึ้นมาเพื่อตอบโจทย์การวางแผนต้นทุนและระยะเวลาสำหรับโครงการก่อสร้างขนาดใหญ่ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าวิธีการในอดีต ดังนั้นการศึกษาศักยภาพของโปรแกรม Primavera P6 ซึ่งในงานวิจัยครั้งนี้ได้ใช้โปรแกรมในรุ่นทดลองใช้ในการศึกษาวิจัย ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญมีประสิทธิภาพการวางแผนและการบริหารโครงการ

ก่อสร้างในปัจจุบัน [1] และจากงานวิจัยเรื่อง การประยุกต์ใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคาร 5 มิติ เพื่อปรับปรุงการถอดปริมาณงานกรณีศึกษาโครงการก่อสร้างอาคารเรียนรู้อะเนกประสงค์ 4 ชั้น พบว่าการประยุกต์ใช้แบบจำลองสารสนเทศอาคาร 5 มิติเพื่อการถอดปริมาณงานของโครงการก่อสร้างสามารถลดระยะเวลาในการทำงานตรวจสอบความถูกต้องของแบบก่อสร้างลดข้อผิดพลาดจากการถอดปริมาณงานสนับสนุนและเพิ่มความเข้าใจในการทำงานของผู้ประมาณราคาได้เป็นอย่างดีเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการวัดปริมาณงานก่อสร้างแบบเดิมจากการเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างปริมาณงานจากโปรแกรม Autodesk Revit และ บัญชีแสดงปริมาณวัสดุและราคา (Bill of Materials : BOQ) พบว่า ร้อยละความแตกต่างเฉลี่ยของงานโครงสร้าง งานสถาปัตยกรรม และงานสุขาภิบาลมีค่าน้อยกว่าร้อยละ 2.69, ร้อยละ 4.12 และ ร้อยละ 8.43 ตามลำดับ สามารถสรุปได้ว่าปริมาณงานจากโปรแกรม Autodesk Revit มีความแม่นยำมากกว่าเนื่องจากวิธีการวัดปริมาณงานก่อสร้างแบบเดิมมีการวัดปริมาณงานซ้ำซ้อน เช่นการวัดปริมาณงานคอนกรีต โครงสร้างประกอบด้วยงานคอนกรีตพื้นคานและเสาโดยที่โครงสร้างทั้ง 3 ส่วนซ้อนทับกันทำให้การวัดปริมาณงานซ้ำซ้อนแตกต่างกับ

ปริมาณงานจากโปรแกรม Autodesk Revit ที่วัดปริมาณงานเฉพาะ โครงสร้างแต่ละส่วน [2]

โครงการก่อสร้างรถไฟฟ้ายกระดับเป็นโครงการก่อสร้างโครงสร้างพื้นฐานขนาดใหญ่ที่มีความซับซ้อน และ มักถูกวางแผนด้วย โปรแกรม Primavera และ Microsoft Project ซึ่งโปรแกรมดังกล่าวอาศัยวิธี Critical Path Method (CPM) ในการวิเคราะห์หา กำหนดเวลาทำงาน เนื่องจากงานก่อสร้างโครงการรถไฟฟ้ายกระดับมีงานส่วนใหญ่ที่สามารถแบ่งงานออกเป็นหน่วยย่อยๆ โดยแต่ละหน่วยมีขั้นตอนการทำงานที่มีลักษณะซ้ำกัน (repetitive construction) และ กำหนดค่าให้แต่ละขั้นตอนมีกลุ่มคนงานและทรัพยากรเฉพาะเป็นของตนเอง (dedicated resource assignment) หลายงานวิจัยชี้ให้เห็นว่าหากใช้วิธี CPM ในการวางแผน จะทำให้การทำงานของแต่ละกลุ่มคนงานดำเนินงานไม่ต่อเนื่อง อีกทั้งก่อให้เกิดความสับสนและยุ่งยาก บทความนี้เป็น การนำเสนอขั้นตอนการวางแผนโครงการก่อสร้างรถไฟฟ้ายกระดับด้วยวิธีการวางแผนงานก่อสร้างที่มีลักษณะซ้ำกัน โดยอาศัยโครงการรถไฟฟ้าสายสีเขียว ช่วง แบริ่ง-สมุทรปราการ เป็นกรณีศึกษา เฉพาะในส่วนของงานก่อสร้างทางวิ่งยกระดับ และงานสถานี จากผลการวิเคราะห์จะเห็นได้ว่าเมื่อวางแผนงานด้วยวิธีการวางแผนงานก่อสร้างที่มีลักษณะซ้ำกัน กำหนดเวลาทำงานที่ได้ทำ ให้กลุ่มการทำงานในแต่ละส่วนสามารถดำเนินงานได้อย่างต่อเนื่อง รองรับเงื่อนไขการทำงานทางเทคนิคภายใต้กรอบกำหนดเวลาตามสัญญา และมีรูปแบบการนำเสนอ ที่ค่อนข้างกระชับ พร้อมกันนี้ยังสามารถระบุระยะเวลา ลอยตัวหรือระยะเวลาเพื่อเพื่อรองรับความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้น นอกจากนี้งานวิจัยยังชี้ให้เห็นว่ารูปแบบการนำเสนอของการวางแผนงานก่อสร้างที่มีลักษณะซ้ำกันทำให้ผู้วางแผนเห็นถึงทางเลือกการใช้ทรัพยากรเพื่อให้แผนงานมีประสิทธิภาพ [3]

หากมองในมุมมองของนักศึกษา พบว่านักศึกษา สาขาวิชาการจัดการงานก่อสร้างมีความสามารถใช้โปรแกรมสำเร็จรูป Primavera 5.0 ในการวางแผนงานก่อสร้างได้มากขึ้น จากเดิมกลุ่มตัวอย่างส่วนใหญ่มีความสามารถในการใช้โปรแกรมระดับมาก ร้อยละ 10.64 เพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 46.43 นอกจากนี้แล้วนักศึกษามีความพึงพอใจในต้นแบบสื่อ การเรียนรู้และสามารถเรียนรู้การใช้งานเพิ่มเติมได้ด้วยตนเองผ่านทางต้นแบบสื่อการเรียนรู้และคู่มือการใช้งานโปรแกรม Primavera 5.0 ที่ได้จัดทำขึ้น อีกทั้งยังสามารถนำความรู้ที่ได้ไปใช้ในการประกอบอาชีพต่อไป [4]

งานวิจัยชิ้นนี้เป็นกรณีศึกษาที่แสดงให้เห็นถึง การประยุกต์ใช้ Primavera P6 ในกระบวนการบริหารโครงการก่อสร้างอาคารพักอาศัย 4 ชั้น (G+4) อย่างครบวงจร ตั้งแต่การวางแผน (Planning), การจัดลำดับกิจกรรม และตารางเวลา (Scheduling), การติดตามความก้าวหน้า (Tracking) ไปจนถึงการควบคุมต้นทุน (Cost Control) บทความนี้แสดงให้เห็นว่า P6 ไม่ได้เป็นเพียงเครื่องมือสร้างแผนงาน (Gantt Chart) เท่านั้น แต่เป็นเครื่องมือสำคัญในการ "ควบคุม" โครงการ ผู้วิจัยได้นำข้อมูลจริงของโครงการและติดตามความก้าวหน้าจริงเทียบกับแผนงานพื้นฐาน (Baseline) ผลการศึกษาพบว่า P6 ช่วยให้ผู้จัดการโครงการสามารถระบุความเบี่ยงเบน (Deviations) ทั้งในแง่ของเวลาและค่าใช้จ่ายได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นถึงความสามารถของซอฟต์แวร์ในการทำ Schedule Compression (การบีบอัดตารางเวลา) โดยการปรับเพิ่มชั่วโมงการทำงาน เพื่อให้โครงการกลับมาเสร็จทันตามกำหนด สรุปได้ว่า P6 เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพสูงในการบริหารจัดการทรัพยากรและควบคุมโครงการก่อสร้างจริง [5]

การศึกษาเชิงเปรียบเทียบระหว่าง Primavera P6 และ Microsoft Project ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์บริหารโครงการที่ได้รับความนิยมสูงสุด โดยใช้แบบจำลองการให้คะแนน (Scoring Model) เพื่อประเมินคุณสมบัติในด้านต่างๆ ผลการวิจัยชี้ให้เห็นความแตกต่างที่ชัดเจนดังนี้ Primavera P6 มีจุดแข็งที่เหนือกว่าอย่างชัดเจนในด้านเทคนิคระดับสูง (High-level Technical Features) เช่น การบริหารจัดการโครงการระดับองค์กร (Enterprise Project Portfolio Management), ความสามารถในการรองรับฐานข้อมูลขนาดใหญ่ (เช่น Oracle, SAP) ระบบความปลอดภัยในการเข้าถึงไฟล์โครงการ และการสนับสนุนทางเทคนิคที่ซับซ้อน ทำให้ P6 เหมาะสำหรับโครงการขนาดใหญ่ (Large-scale) ที่มีความซับซ้อนสูง และมีผู้ใช้งานหลายคนพร้อมกัน Microsoft Project มีจุดแข็งในด้าน "ความเป็นมิตรต่อผู้ใช้งาน" (User-friendliness) โดย MS Project ได้รับคะแนนสูงกว่าในด้านความง่ายในการเรียนรู้ การแสดงผลหน้าจอและข้อความที่เข้าใจง่ายกว่า และโดยเฉพาะอย่างยิ่งการเชื่อมต่อที่ราบรื่นกับโปรแกรมอื่นๆ ในตระกูล Microsoft Office [6]

บทความนี้สรุปว่า ไม่มีซอฟต์แวร์ใดที่ "ดีที่สุด" ในทุกด้าน แต่การเลือกใช้ขึ้นอยู่กับความต้องการและขนาดของโครงการ โดย P6 จะเหมาะกับโครงการที่ซับซ้อนและต้องการการควบคุมเชิงลึก ในขณะที่ MS Project เหมาะสำหรับโครงการทั่วไปที่เน้นความสะดวกและรวดเร็วในการเรียนรู้

จากประเด็นความสำคัญดังกล่าว คณะผู้วิจัยจึงเห็นควรศึกษาการประยุกต์ใช้โปรแกรม Primavera P6 ในการวางแผนด้านระยะเวลาและต้นทุนของโครงการก่อสร้าง โดยวิเคราะห์ปริมาณงาน วัสดุ แรงงาน และเครื่องจักรจาก BOQ เพื่อช่วยให้การวางแผนและติดตามโครงการก่อสร้างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

2.1 โปรแกรมที่ใช้ในการศึกษา

โปรแกรม PRIMAVERA เริ่มขึ้นในปี ค.ศ. 1983 โดย Joel Koppelman และ Richard Fairs โดยทั้งสองเป็นผู้คิดค้น โปรแกรม PRIMAVERA Version 3.0 ยังได้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ซึ่งใน พ.ศ.2550 โปรแกรม PRIMAVERA มีถึง Version 6.00 PRIMAVERA เป็นโปรแกรมที่ใช้ในการวางแผนควบคุมโครงการ และการจัดการงบประมาณ PRIMAVERA เป็นโปรแกรมที่ออกแบบมาสำหรับนักบริหารโครงการเป็นเครื่องมือที่จะทำให้วางแผนงานแบบหลายๆ โครงการจาก บริษัท TWO PLUS SOFT พบว่า PRIMAVERA เป็นโปรแกรมบริหารโครงการที่ใช้กันมากที่สุดในโลก จากการสำรวจของ ENR 1999 และมากกว่าร้อยละ 70 ของบริษัทรับเหมาก่อสร้างที่ใหญ่ที่สุดในโลก 225 บริษัทแรกใช้กันและเป็นโปรแกรมที่ใช้กับโครงสำคัญของโลก [7]

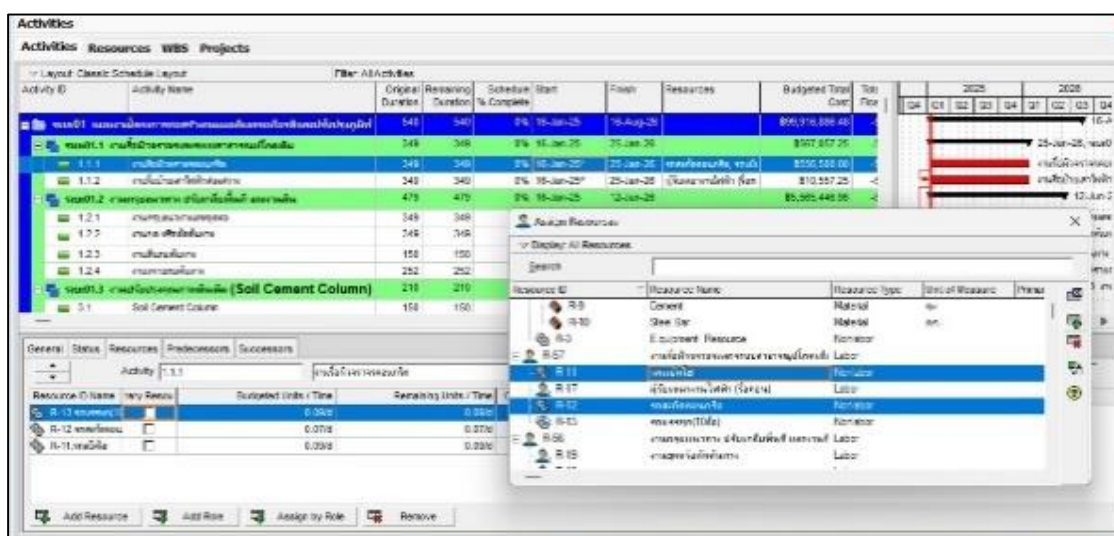
ในอดีตการวางแผนและติดตามงานก่อสร้างมักพึ่งพาการจัดการโดยมนุษย์ซึ่งมักประสบปัญหาความไม่ถูกต้องของข้อมูลต่อมาได้มีการนำเครื่องมือดิจิทัล เช่น Microsoft Excel และ Microsoft Project เข้ามาช่วยในบางส่วนแต่ยังคงมีข้อจำกัดเช่น การวางแผนและติดตามต้นทุน [8] การบริหารต้นทุน การจัดทำโครงสร้างการแบ่งงาน (Work Breakdown Structure :WBS) การวางแผนแบบ CPM ในการจัดการโครงการขนาดใหญ่และซับซ้อน [9]

2.2. วิธีการดำเนินงาน

การถอดปริมาณค่าวัสดุ แรงงานและเครื่องจักร ผู้วิจัยได้ทำการสำรวจปริมาณการใช้วัสดุและแรงงานและเครื่องจักร จากบัญชีแสดงปริมาณงานและต้นทุนของโครงการก่อสร้างถนนเฉลิมพระเกียรติ ก่อสร้างชุมชนประตูทางเข้าและปรับปรุงภูมิทัศน์พร้อมติดตั้งเสาไฟฟ้า แสงสว่าง

หน้าต่าง Activities และเลือกกิจกรรม งานผิวจราจร
คอนกรีต จากนั้นเลือกคำสั่ง Resources และคลิกที่ปุ่ม
Add Resource ต่อไปให้เลือก รถแบ็คโฮ รถสัปดาห์คอนกรีต
และรถบรรทุก (10 ล้อ) ตามลำดับ เมื่อเลือกทรัพยากรที่
ต้องการเรียบร้อยแล้ว ให้คลิกที่คำสั่ง Assign เพื่อ
มอบหมายทรัพยากรให้กับกิจกรรมนั้น ดังรูปที่ 1

ต้องการเรียบร้อยแล้ว ให้คลิกที่คำสั่ง Assign เพื่อ
มอบหมายทรัพยากรให้กับกิจกรรมนั้น ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 ขั้นตอนการใส่ราคาและเลือกทรัพยากรของกิจกรรม

ข้อ Budgeted Total Cost โดยจำนวนเงินที่คำนวณได้จากการแยกประเภทต้นทุนทั้งหมดจะเป็น 109,794,949.18 บาท

Layout: Classic Schedule Layout		Filter: All Activities							
Activity ID	Activity Name	Original	Start	Finish	Resources	Budgeted Labor Cost	Budgeted Material Cost	Budgeted Nonlabor Cost	
P-3(ต่อเนื่อง)-1	งานถนน	540	28-Jan-23	01-Sep-24		\$3,254,500.00	\$76,913,893.92	\$3,524,000.00	
P-3(ต่อเนื่อง)-1.1	งานถมผิวจราจรและขอบทางลาด	350	28-Jan-23	04-Feb-24		\$12,000.00	\$0.00	\$152,000.00	
P-3(ต่อเนื่อง)-1.2	งานถมผิวทางลาดกับพื้นที่ดินเดิม	489	28-Jan-23	06-Jul-24		\$44,800.00	\$6,072,098.38	\$731,000.00	
P-3(ต่อเนื่อง)-1.3	งานปรับปรุงถนนลาดดินเดิม (Soil C)	196	12-Mar-23	08-Oct-23		\$99,000.00	\$25,383,735.00	\$945,000.00	
P-3(ต่อเนื่อง)-1.4	งานขอบระบายน้ำ	280	11-Feb-23	06-Dec-23		\$40,800.00	\$16,445,103.54	\$717,000.00	
P-3(ต่อเนื่อง)-1.4.1	งานท่อระบายน้ำ ๓๓๓, ๓๓๓๓	252	11-Feb-23	07-Nov-23		\$25,600.00	\$11,019,205.32	\$544,000.00	
P-3(ต่อเนื่อง)-1.4.2	งานบ่อพักน้ำสำหรับท่อระบายน้ำ	252	11-Feb-23	07-Nov-23		\$13,600.00	\$5,395,156.91	\$151,000.00	
A1110	Type 1 (ชนิดใต้กำแพง)	252	11-Feb-23	07-Nov-23	ช่างบ่อดำ, ช่างขุด, ช่างถม, ช่างเสริมดิน	\$8,000.00	\$4,339,249.08	\$86,000.00	
A1120	Type 1 (ชนิดใต้กำแพง)	252	11-Feb-23	07-Nov-23	ช่างบ่อดำ, ช่างขุด, ช่างถม, ช่างเสริมดิน	\$2,400.00	\$18,741.55	\$27,000.00	
A1130	Type 2 (ชนิดใต้กำแพง)	252	11-Feb-23	07-Nov-23	ช่างบ่อดำ, ช่างขุด, ช่างถม, ช่างเสริมดิน	\$1,600.00	\$241,626.87	\$19,000.00	
A1140	Type 3 (ชนิดใต้กำแพง)	252	11-Feb-23	07-Nov-23	ช่างบ่อดำ, ช่างขุด, ช่างถม, ช่างเสริมดิน	\$1,600.00	\$295,539.41	\$19,000.00	
P-3(ต่อเนื่อง)-1.4.3	งานท่อระบายน้ำ ๓๓๓, ๓๓๓๓	28	08-Nov-23	06-Dec-23		\$1,600.00	\$30,741.32	\$22,000.00	
P-3(ต่อเนื่อง)-1.5	งานโครงสร้างทางระบายน้ำ	267	09-Oct-23	25-Jul-24		\$533,900.00	\$23,749,422.09	\$885,000.00	
P-3(ต่อเนื่อง)-1.6	งานถมผิวทางลาดระบายน้ำ	117	16-Mar-24	25-Jul-24		\$160,000.00	\$3,913,370.17	\$0.00	
P-3(ต่อเนื่อง)-1.7	งานถมผิวทางลาดระบายน้ำ	35	26-Jul-24	01-Sep-24		\$32,400.00	\$885,210.00	\$38,000.00	
P-3(ต่อเนื่อง)-1.8	งานขอบบ่อดำ	70	27-May-24	11-Aug-24		\$0.00	\$0.00	\$0.00	
A1410	งานเสาไฟฟ้าสาย STREET LIGHT LED 6	70	27-May-24	11-Aug-24		\$0.00	\$0.00	\$0.00	
P-3(ต่อเนื่อง)-1.9	งานติดตั้งท่อระบายน้ำ	231	24-Dec-23	01-Sep-24		\$0.00	\$0.00	\$0.00	
A1420	งานติดตั้งท่อระบายน้ำ	231	24-Dec-23	01-Sep-24		\$0.00	\$0.00	\$0.00	
P-3(ต่อเนื่อง)-1.10	งานติดตั้งท่อระบายน้ำ	231	24-Dec-23	01-Sep-24		\$0.00	\$0.00	\$0.00	
P-3(ต่อเนื่อง)-1.11	งานติดตั้งท่อระบายน้ำ	231	24-Dec-23	01-Sep-24		\$0.00	\$0.00	\$0.00	

รูปที่ 2 การแสดงจำนวนเงินทั้งหมดของโครงการและทรัพยากรของแต่ละงาน

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

ผลการการศึกษาการใช้งานโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Primavera P6 เพื่อวางแผนงานและวางแผนต้นทุนสำหรับบริหารโครงการ แสดงข้อมูลโดยมีตัวแปรต่างๆ ดังนี้

BCWP : Budgeted Cost of Work Performed หรือ Earned Value Cost หมายถึง ต้นทุนของงานที่ดำเนินการเสร็จไปแล้วตามงบประมาณที่กำหนดไว้

BCWS : Budgeted Cost of Work Scheduled หรือ Planned Value Cost หมายถึง ต้นทุนของงานตามกำหนดเวลาที่ตั้งงบประมาณไว้

ACWP : Actual Cost of Work Performed หรือ Actual Cost หมายถึง ต้นทุนรวมที่เกิดขึ้นจริง

CPI : Cost Performance Index หมายถึง ดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพด้านต้นทุน

SPI : Schedule Performance Index หมายถึง ดัชนีชี้วัดประสิทธิภาพของตารางเวลา

CV : Cost variance หมายถึง ความแตกต่างระหว่างต้นทุนตามแผนกับต้นทุนจริงของโครงการ

SV : Schedule Variance หมายถึง ความแตกต่างของความคืบหน้าของโครงการระหว่างงานที่ควรจะทำตามแผนเทียบกับงานที่ทำได้จริง

ผลแสดงค่าใช้จ่ายที่ต้องใช้ในกรณีเมื่อโครงการดำเนินไปได้ 1 ใน 4 ของระยะเวลา (ร้อยละ 25) ดังตารางที่ 1 จะเห็นได้ว่า ณ จุดวัดโครงการมูลค่าโครงการที่ทำได้น้อยกว่าต้นทุนที่ใช้ไป อาจเนื่องมาเป็นระยะเริ่มต้นของโครงการ

ตารางที่ 1 ข้อมูลโครงการระยะที่ 1 (ร้อยละ25)

Earned Value Cost มูลค่าผลงานที่ทำได้	฿303,245.50
Planned Value Cost มูลค่าตามแผนงาน	฿20,341,803.04
Actual Cost ต้นทุนจริง	฿109,794,949.18
Schedule Performance Index ดัชนีประสิทธิภาพด้านกำหนดเวลา	0.01
Cost Performance Index ดัชนีประสิทธิภาพด้านต้นทุน	0.00
Cost Variance ค่าความเบี่ยงเบนด้านต้นทุน	฿-109,491,703.68
Schedule Variance ค่าความเบี่ยงเบนด้านกำหนดเวลา	฿-20,038,557.54

ผลแสดงข้อมูลค่าใช้จ่ายที่ต้องใช้ในกรณีเมื่อโครงการดำเนินไปได้ 2 ใน 4 ของระยะเวลารวม (ร้อยละ50) ดังตารางที่ 2 จะเห็นได้ว่า ณ จุดวัดโครงการทำงานได้เร็วกว่าแผนงานที่วางไว้เพราะดัชนีวัดประสิทธิภาพด้านเวลา

ตารางที่ 2 ข้อมูลโครงการระยะที่ 2 (ร้อยละ50)

Earned Value Cost มูลค่าผลงานที่ทำได้	฿40,160,443.50
Planned Value Cost มูลค่าตามแผนงาน	฿33,980,146
Actual Cost ต้นทุนจริง	฿148,297,787.22
Schedule Performance Index ดัชนีประสิทธิภาพด้านกำหนดเวลา	1.18
Cost Performance Index ดัชนีประสิทธิภาพด้านต้นทุน	0.27
Cost Variance ค่าความเบี่ยงเบนด้านต้นทุน	฿-108,137,343.72
Schedule Variance ค่าความเบี่ยงเบนด้านกำหนดเวลา	฿6,180,297.5

ผลแสดงข้อมูลค่าใช้จ่ายที่ต้องใช้ในกรณีเมื่อโครงการดำเนินไปได้ 3 ใน 4 ของระยะเวลารวม (ร้อยละ75) ดังตารางที่ 3 จะเห็นได้ว่า ณ จุดวัดโครงการมูลค่าโครงการที่ทำได้มากกว่าแผนงานที่วางไว้แสดงว่าสามารถทำงานได้เร็วกว่าแผนงานที่วางไว้

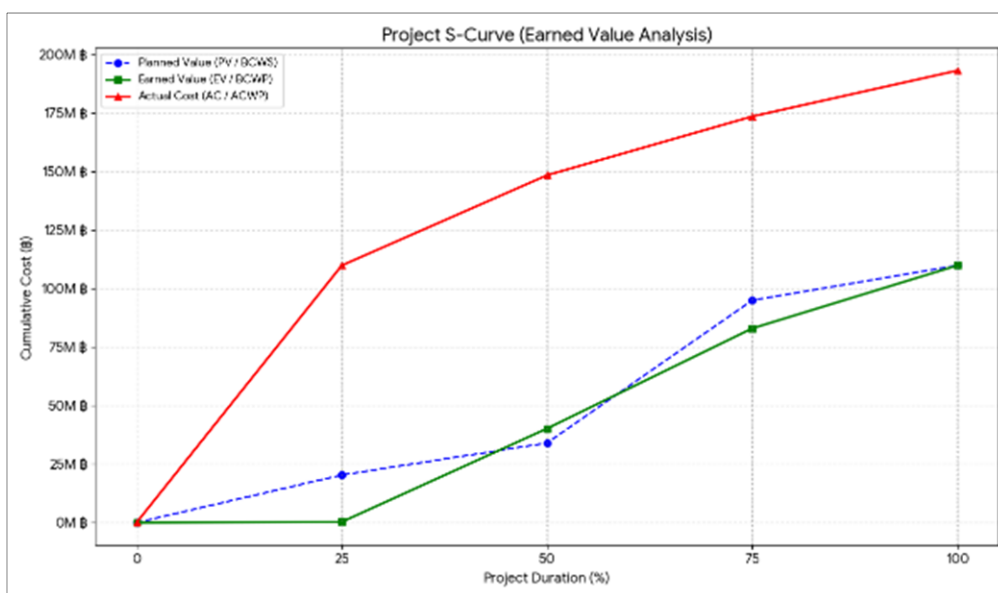
ตารางที่ 3 ข้อมูลโครงการระยะที่ 3 (ร้อยละ75)

Earned Value Cost มูลค่าผลงานที่ทำได้	฿82,918,763.57
Planned Value Cost มูลค่าตามแผนงาน	฿94,905,240.52
Actual Cost ต้นทุนจริง	฿173,393,089.02
Schedule Performance Index ดัชนีประสิทธิภาพด้าน กำหนดเวลา	0.87
Cost Performance Index ดัชนีประสิทธิภาพด้าน ต้นทุน	0.48
Cost Variance ค่าความเบี่ยงเบนด้าน ต้นทุน	฿-90,474,325.45
Schedule Variance ค่าความเบี่ยงเบนด้าน กำหนดเวลา	฿11,986,476.95

ตารางที่ 4 ข้อมูลโครงการระยะที่ 4 (ร้อยละ100)

Earned Value Cost มูลค่าผลงานที่ทำได้	฿109,794,949.18
Planned Value Cost มูลค่าตามแผนงาน	฿109,794,949.18
Actual Cost ต้นทุนจริง	฿192,993,358.71
Schedule Performance Index ดัชนีประสิทธิภาพด้าน กำหนดเวลา	1.00
Cost Performance Index ดัชนีประสิทธิภาพด้าน ต้นทุน	0.57
Cost Variance ค่าความเบี่ยงเบนด้าน ต้นทุน	฿-83,198,409.53
Schedule Variance ค่าความเบี่ยงเบนด้าน กำหนดเวลา	฿0.00

ผลแสดงข้อมูลค่าใช้จ่ายในกรณีเมื่อโครงการดำเนินไปได้ครบระยะเวลา (ร้อยละ100) ดังตารางที่ 4 จะเห็นได้ว่า ณ จุดวัดโครงการทำงานได้เท่ากับแผนงานที่วางไว้



รูปที่ 3 การแสดงแผนกราฟ S-Curve ก่อสร้าง

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อที่จะวางแผนงาน และวางแผนต้นทุนสำหรับการบริหารโครงการก่อสร้าง โดยจะมีการจำลองสถานการณ์โดยแบ่งเป็น 4 ส่วนของระยะเวลาทั้งหมด โดยจะมีการแบ่งส่วนเป็นร้อยละ ส่วนที่ 1 เป็นระยะเวลา (ร้อยละ25) ส่วนที่ 2 เป็นระยะเวลา (ร้อยละ50) ส่วนที่ 3 เป็นระยะเวลา (ร้อยละ75) ส่วนที่ 4 เป็นระยะเวลา (ร้อยละ100) จากผลวิเคราะห์เห็นได้ว่าดัชนีวัดประสิทธิภาพด้านเวลาที่ระยะเวลา (ร้อยละ25) มูลค่าโครงการที่ทำได้น้อยกว่าแผนงานที่วางไว้แสดงว่าสามารถทำงานได้ช้ากว่าแผนงานที่วางไว้ที่ระยะเวลา (ร้อยละ50) และ (ร้อยละ75) จะเห็นได้ว่า ณ จุดวัดโครงการทำงานได้เร็วกว่าแผนงานที่วางไว้และระยะเวลาที่ (ร้อยละ100) จะเห็นได้ว่า ณ จุดวัดโครงการทำงานได้เท่ากับแผนงานที่วางไว้ ส่วนดัชนีวัดประสิทธิภาพด้านต้นทุนทั้ง 4 ส่วน ทุกส่วนมีค่าใช้จ่ายมากกว่าแผนงานที่วางไว้เหมือนกัน เนื่องจาก (CPI) มีค่าน้อยกว่า 1

4. สรุปผล

จากการวิเคราะห์ระยะเวลาโครงการก่อสร้างถนนเฉลิมพระเกียรติและปรับปรุงภูมิทัศน์พร้อมติดตั้งเสาไฟฟ้าแสงสว่างระบบพลังงานแสงอาทิตย์ หมู่ที่ 2, 3 ตำบลหนองปรือ (ระยะที่ 1) ลงในโปรแกรมคอมพิวเตอร์ Primavera P6 ใช้เวลาเริ่มต้นวันที่ 28 มกราคม 2566 จนถึงวันที่แล้วเสร็จวันที่ 1 กันยายน 2567 โครงการนี้ใช้เวลาทั้งหมดเป็นจำนวน 540 วัน โดยจะมีกิจกรรมที่ใช้ระยะเวลานานกว่าแผนแล้วจะทำให้ระยะเวลาโครงการเข้าไปด้วยหรือเรียกว่าสายงานวิกฤตมีทั้งหมด 33 กิจกรรม แล้วหลังจากนั้นได้มีจำลองสถานการณ์โดยแบ่งเป็น 4 ส่วนของระยะเวลาทั้งหมด ในส่วน 1 ได้กำหนดให้กิจกรรมแรกที่ทำล่าช้ากว่าแผนไป 1 เดือน จากกำหนดการจริงของกิจกรรมงานรื้อผิวจราจรคอนกรีตคือกำหนดไว้ว่าให้เริ่มทำวันที่ 28 มกราคม 2566 แต่พอทำจริงจำลองสถานการณ์ไว้ว่าให้เริ่มทำคอนวันที่ 28 กุมภาพันธ์ 2566 และกำหนดกิจกรรมอื่นๆ ที่ควรเริ่มต้นพร้อมกับงานรื้อผิวจราจรคอนกรีตให้เข้าไปกว่าแผน 1 เดือน

เหมือนกัน ทำให้โครงการนี้ใช้ระยะเวลาทั้งโครงการทั้งหมด 673 วัน แต่ได้มีการปรับแผนให้ตรงตามกำหนดการเดิมคือ 540 วัน ต่อมาในส่วนที่ 2 ได้มีการจำลองไว้ว่าให้ทางกิจกรรมเริ่มดำเนินการตามแผนและล่าช้ากว่าแผน ทำให้โครงการแล้วเสร็จในวันที่ 14 มกราคม 2567 ซึ่งช้ากว่ากำหนดการเดิม จึงทำให้มีการปรับแผนในระยะเวลาต่อมา ในส่วนที่ 3 นี้ได้มีการจำลองไว้ว่าให้เริ่มต้นดำเนินการทำกิจกรรมตามกำหนดการเดิมตามแผนแต่หลังจากคำนวณแล้วโครงการนี้จะแล้วเสร็จวันที่ 19 มกราคม 2567 เพราะเหตุนี้จึงทำให้ต้องมีการปรับแผนการในช่วงถัดไป ในส่วนที่ 4 ได้จำลองสถานการณ์ตามแผนกำหนดการเดิมเมื่อคำนวณแผน ณ จุดวัดโครงการวันที่ 11 พฤษภาคม 2567 ณ จุดที่โครงการเสร็จแล้วร้อยละ 100 ได้ผลระยะเวลาโครงการทั้งหมดจะแล้วเสร็จตามแผนกำหนดการเดิม คือวันทันทันที่ 1 กันยายน 2567 จึงทำให้ไม่มีการปรับแผน

ผลวิเคราะห์ระยะเวลารวมทั้งหมดของงานแต่ละส่วน ส่วนที่ 1 คือการจำลองโครงการเมื่อดำเนินการไปได้ 1 ใน 4 ของระยะเวลารวม (ร้อยละ 25) จะเห็นได้ว่า ค่า BCWS ได้ 20,341,803.04 บาท CV ได้ -109,491,703.68 บาท ค่า SV ได้ -20,038,557.54 บาท จะเห็นได้ว่า ณ จุดวัดโครงการมูลค่าโครงการที่ทำได้น้อยกว่าต้นทุนที่ใช้ไป แสดงว่าใช้ต้นทุนได้มากกว่ามูลค่าที่ทำได้ ส่วนที่ 2 คือการจำลองโครงการเมื่อดำเนินการไปได้ 2 ใน 4 ของระยะเวลารวม (ร้อยละ 50) จะเห็นได้ว่า ค่า BCWS ได้ 33,980,146 บาท ค่า CV ได้ -108,137,343.72 บาท ค่า SV ได้ 6,180,297.5 บาท จะเห็นได้ว่า ณ จุดวัดโครงการทำงานได้เร็วกว่าแผนงานที่วางไว้ ส่วนที่ 3 คือการจำลองโครงการเมื่อดำเนินการไปได้ 3 ใน 4 ของระยะเวลารวม (ร้อยละ 75) จะเห็นได้ว่าค่า ACWP ได้ 173,393,089.02 บาท ค่า BCWS ได้ 94,905,240.52 บาท ค่า BCWP ได้

82,918,763.57 บาท ค่า SPI ได้ 0.87 ค่า CPI ได้ 0.48 ค่า CV ได้ -90,474,325.45 บาท ค่า SV ได้ 11,986,476.95 บาท จะเห็นได้ว่า ณ จุดวัดโครงการมูลค่าโครงการที่ทำได้มากกว่าแผนงานที่วางไว้ แสดงว่าสามารถทำงานได้เร็วกว่าแผนงานที่วางไว้ ส่วนที่ 4 คือการจำลองโครงการเมื่อดำเนินการไปได้ 4 ใน 4 ของระยะเวลารวม (ร้อยละ 100) จะเห็นได้ว่า ค่า BCWS ได้ 109,794,949.18 บาท ค่า CV ได้ -83,198,409.53 บาท ค่า SV ได้ 0.00 บาท จะเห็นได้ว่า ณ จุดวัดโครงการทำงานได้เท่ากับแผนงานที่วางไว้ ซึ่ง Primavera P6 มีจุดแข็งที่เหนือกว่าอย่างชัดเจนในด้านเทคนิคระดับสูง (High-level Technical Features) เช่น การบริหารจัดการโครงการระดับองค์กร (Enterprise Project Portfolio Management), ความสามารถในการรองรับฐานข้อมูลขนาดใหญ่ (เช่น Oracle, SAP) ระบบความปลอดภัยในการเข้าถึงไฟล์โครงการ และการสนับสนุนทางเทคนิคที่ซับซ้อน ทำให้ P6 เหมาะสำหรับโครงการขนาดใหญ่ (Large-scale) ที่มีความซับซ้อนสูง และมีผู้ใช้งานหลายคนพร้อมกัน

ใน ระยะที่ 4 (100%) (On Time, Over Budget) โครงการสามารถเร่งรัดตัวเองในช่วงสุดท้ายจน "เสร็จทันเวลาพอดี" (SPI=1.00) แต่ต้องใช้ต้นทุนที่สูงมากกว่างบประมาณที่ตั้งไว้ ปัจจัยคือการเร่งงานรอบสุดท้าย (Final Push) มีการใช้ทรัพยากรในช่วง 25% สุดท้าย เพื่อให้โครงการบรรลุเป้าหมายด้าน "เวลา" เพื่อให้โครงการประสบความสำเร็จในการบรรลุเป้าหมายด้าน "เวลา"

ซึ่งข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งถัดไป ทางคณะผู้วิจัยมีความเห็นว่าถ้าสามารถใช้โปรแกรมด้านวิศวกรรมอื่นนำมาพัฒนาจะทำให้มีประสิทธิภาพมากขึ้นและสามารถทำการเปรียบเทียบระหว่างโปรแกรมได้

5. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ สถาบันวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม และ คณะวิศวกรรมศาสตร์ หน่วยงานต้นสังกัดของผู้วิจัย สำหรับความช่วยเหลือและอำนวยความสะดวกในด้านต่างๆ ตลอดระยะเวลาในการทำวิจัย ขอขอบคุณ นายเจตพร ขจรรัตนศิริ นางสาวทิพาพร กำแหงษ์ และ นางสาวรณัฐ วงศ์ศา ในการเก็บรวบรวมข้อมูลในการทดสอบ และขอขอบพระคุณ บริษัท ประโยชน์การโยธา จำกัด ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูล

เอกสารอ้างอิง

- [1] S. Jaitalawanich and T. Jaitalawanich, “A feasibility study of investment in rental housing development,” in Proc. Proceedings of the 6th PSU Engineering Conference, 8-9 May. 2008. (in Thai).
- [2] S. Kanangkaew, et al., “Applying 5D-BIM to Improve the Quantity Takeoff: A Case Study of Educational and Laboratory Building Construction Project,” *Sarasatr: Journal of Architecture and Design*, vol. 7, no.1, pp.103-113, 2024. (in Thai).
- [3] N. Sasang and S. Kusalasai, “Scheduling Elevated Mass Rapid Transit Project using Repetitive Construction Approach: A Case Study of MRT Green Line Project Bearing - Samutprakan Section,” *Ladkrabang Engineering Journal*, vol. 34, no.3, pp.65-81, 2017. (in Thai).
- [4] C. Hansacharoonroj, et al., “Student’s Satisfaction in Learning Media Primavera 5.0 in RMUTR,” *Modern Management Frontier Journal*, vol. 8, no.2, pp.81-94, 2010. (in Thai).
- [5] S. Naseem, et al., “Project Planning, Scheduling, Tracking and Cost Control – A Case Study for Residential (G+4) Building by Using Software Primavera P6,” *International Journal of Research and Analytical Reviews (IJRAT)*, vol. 5, no.3, pp.859-864, 2018.
- [6] K. M. Al-Subhi and A. S. Al-Harthy, “Evaluating Project Management Software Packages Using a Scoring Model—A Comparison between MS Project and Primavera,” Paper presented at the International Conference on Industrial Engineering and Operations Management (IEOM), Dubai, UAE, 2015.
- [7] Y. Kohking, (2024, Nov. 30). “Project planning and management with PRIMAVERA P6” [Online]. Available <https://digital.se-ed.com/#!/detail/5522840320223/0/> (in Thai).
- [8] S. Kwansuksri, (2024, Nov. 30). “A study of construction project cost management using earned value analysis: A case study of a block rubber factory construction in Sakon Nakhon province” [Online]. Available <https://e-research.siam.edu/wp-content/uploads/2021/10/M-Eng-2021-IS-A-Study-of-Construction-Project-Cost-Management-Using-Earned-Value-Analysis-new.pdf> (in Thai).
- [9] P. Phainai, “Construction management,” Bangkok: Technology Promotion Association (Thailand–Japan). 2005 (in Thai).

ประวัติผู้ประพันธ์ :



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร. สุวิมล
เจียรรวานิช สำเร็จการศึกษา
ในระดับปริญญาเอก สาขาวิชา
อุดมศึกษา คณะครุศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ระดับปริญญาตรี
สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรม
ทรัพยากรน้ำ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ และ
สาขาวิชาการวัดและประเมินผลการศึกษา
มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช งานวิจัยที่สนใจ
คือ การควบคุมคุณภาพการผลิต เศรษฐศาสตร์
วิศวกรรม และงานวิจัยเชิงสำรวจ



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธรรมมา
เจียรรวานิช สำเร็จการศึกษาใน
ระดับปริญญาเอก สาขาวิชา
อุดมศึกษา คณะครุศาสตร์
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ระดับ

ปริญญาโท สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา จุฬาลงกรณ์
มหาวิทยาลัย ระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรม
โยธา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สาขาวิชาวิศวกรรม
ทรัพยากรน้ำ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สาขาวิชาการ
จัดการงานก่อสร้าง มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช
และสาขาวิชาการวัดและประเมินผลการศึกษา
มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมมาธิราช งานวิจัยที่สนใจ คือ
วิศวกรรมขนส่งและจราจร วิศวกรรมกรรมการทางการ
ทดสอบวัสดุก่อสร้าง และงานวิจัยเชิงสำรวจ



อ. สิงหาภีร์ รัตนวิจิตร สำเร็จ
การศึกษาในระดับปริญญาโท
สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะ
วิศวกรรมศาสตร์ สถาบัน

เทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ระดับปริญญาตรี สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ งานวิจัยที่
สนใจ คือ วิศวกรรมบริหารและการจัดการงานก่อสร้าง
วิศวกรรมโครงสร้าง

การศึกษาผลกระทบของฮาร์โมนิกลำดับ $2k\pm1$ ต่ออายุการใช้งานของ หม้อแปลงแบบแช่น้ำมัน

A Study on the Impact of $2k\pm1$ Harmonic Components on the Lifetime of Oil-Immersed Transformers

สิริวิช ทัดสวน และ ชนภัช เดชนาราพัฒน์*

Siriwich Tadsuan and Shanaphat Dechnaraphat*

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

*ผู้พิมพ์ประสานงาน อีเมล : Shanaphatd@sau.ac.th

วันที่รับบทความ: 27 กันยายน 2568 / วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 : 1 พฤศจิกายน 2568 / วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 2 : 13 พฤศจิกายน 2568

วันที่ตอบรับการตีพิมพ์: 14 พฤศจิกายน 2568

บทคัดย่อ งานวิจัยนี้ได้มีการแนะนำผลกระทบของฮาร์โมนิกลำดับ $2k\pm1$ ที่มีต่อการลดอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมัน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อป้องกันการเสื่อมสภาพของฉนวนที่เกิดจากอุณหภูมิจุดร้อนที่สูงเกินไป ในขั้นตอนแรก ได้ทำการทดลองวัดอุณหภูมิฉนวนด้านบนและอุณหภูมิจุดร้อนของขดลวดหม้อแปลง ผลการทดลองที่ได้มีความสอดคล้องกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาเสนอไว้ ขั้นตอนต่อมาได้ทำการจำลองวัฏจักรโหลดของหม้อแปลงภายใต้สภาวะการทำงานเกินพิกัด โดยมีกระแสมูลฐานตั้งแต่ 110% ถึง 150% ของค่าพิกัด ข้อมูลอุณหภูมิแวดล้อมจากจังหวัดกาญจนบุรี ซึ่งบันทึกโดยกรมอุตุนิยมวิทยาสถานีหมายเลข 450201 ถูกนำมาใช้ในการจำลอง ผลการศึกษาพบว่า ที่ระดับกระแสเกินพิกัด 150% ค่าอุณหภูมิฉนวนด้านบนและอุณหภูมิจุดร้อนมีค่าสูงเกินขีดจำกัดที่กำหนด ส่งผลให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงลดลงเหลือเพียง 0.72 ปี ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นถึงอิทธิพลที่สำคัญของฮาร์โมนิกต่อการเสื่อมสภาพทางความร้อนของหม้อแปลง และให้ข้อมูลเชิงลึกที่เป็นประโยชน์ต่อการป้องกันความเสียหายของฉนวน รวมถึงการเพิ่มความมั่นคงและความน่าเชื่อถือของระบบไฟฟ้าในระยะยาว

คำสำคัญ : อายุหม้อแปลง, ฮาร์โมนิก, หม้อแปลงแบบแช่น้ำมัน, จุดร้อนสุด

Abstract This paper investigates the impact of $2k\pm1$ harmonic components on the lifetime reduction of oil-immersed power transformers, aiming to prevent insulation degradation caused by excessive hot-spot temperatures. In the first stage, the top-oil and winding hot-spot temperatures were experimentally measured. The obtained results showed good agreement with the proposed mathematical model. In the second stage, transformer load cycles under overloading conditions were simulated, with the fundamental current ranging from 110% to 150% of the rated current. Ambient temperature data from Kanchanaburi Province, recorded by Meteorological Department Station No. 450201, were employed in the simulation. The results indicate that at 150% overloading, both the top-oil and hot-spot temperatures exceeded the permissible limits, leading to a reduction in transformer lifetime to only 0.72 years. These findings highlight the significant influence of harmonic distortion

on transformer thermal aging and provide useful insights for preventing insulation failure and improving long-term power system reliability and planning.

Keywords : Lifetime of Transformer , Harmonic, Oil-immersed transformer, Hottest-spot

1. บทนำ

ปัจจุบันภาระทางไฟฟ้าที่เป็นแบบไม่เป็นเชิงเส้นได้มีการขยายตัวเพิ่มมากขึ้น เช่น หลอดไฟฟ้าแบบหลอด LED เครื่องชาร์จประจุรถยนต์ไฟฟ้า อุปกรณ์สำนักงาน เป็นต้น ผลกระทบที่ตามมาคือทำให้เกิดสัญญาณฮาร์มอนิกในระบบไฟฟ้ากำลังเพิ่มมากขึ้นตาม ส่งผลทำให้เกิดความเสียหายกับอุปกรณ์ในระบบไฟฟ้ากำลัง เช่น การเกิดรีโซแนนซ์ทำให้เกิดการระเบิดของตัวเก็บประจุไฟฟ้าที่ใช้ในการแก้ตัวประกอบกำลัง[1] ความร้อนที่เกิดขึ้นกับเครื่องจักรไฟฟ้าต่างๆ เช่น หม้อแปลงไฟฟ้า [2],[3] มอเตอร์ไฟฟ้า[4] อื่นๆ จากงานวิจัย[5] ได้ทำการทดสอบผลกระทบในเรื่องความร้อนที่เพิ่มขึ้นอันเนื่องมาจากการใช้กระแสไฟฟ้าที่ไม่เป็นเชิงเส้นแบบ 3 เฟส จาก[6],[7] ได้เปลี่ยนรูปแบบภาระไฟฟ้ามาเป็นแบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นแบบ 1 เฟส จำนวน 3 ชุด โดยค่าอุณหภูมิที่ทดสอบได้มีค่าสูงกว่า[5] สาเหตุอันเนื่องจากเกิดค่ากำลังไฟฟ้าที่สูญเสีย อันเนื่องมาจากกระแสไหลวนที่ขดลวดมีค่ามากกว่า(โดยงานวิจัย[5] และ [6],[7]ได้ใช้หม้อแปลงไฟฟ้าแบบแช่น้ำมันตัวเดียวกัน) โดยการทดสอบกำหนดให้กระแสไฟฟ้าคลื่นมูลฐาน (I_{h1}) ของการทดสอบทั้ง 2 แบบมีค่าประมาณเท่ากับกระแสฟลักหม้อแปลง(15.2A) ผลลัพธ์ที่ได้ค่าปริมาณกระแสฮาร์มอนิกและความร้อนของภาระไฟฟ้าแบบที่ไม่เป็นเชิงเส้นแบบ 1 เฟส จำนวน 3 ชุด มีค่าสูงกว่าสาเหตุอันเนื่องมาจากการใช้ไฟฟ้าแบบนี้จะมีกลุ่มฮาร์มอนิกประเภท $2K \pm 1$ อันได้แก่กระแสฮาร์มอนิกลำดับเลขที่ (3, 5, 7, 9, 11.....) ที่มีขนาดสูง ส่งผลทำให้เกิดกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ขดลวดมีค่าปริมาณมาก แต่ภาระไฟฟ้าที่ไม่เป็นเชิงเส้นแบบ 3 เฟส จะมีกลุ่มฮาร์มอนิก

ประเภท $6K \pm 1$ ได้แก่ ฮาร์มอนิกลำดับเลขที่ 5, 7, 11, 13, 17, 19... ค่าความร้อนที่เพิ่มขึ้นนี้จะทำให้เกิดอายุที่สูญเสียเพิ่มขึ้นตาม ส่งผลทำให้เกิดอายุการใช้งานของหม้อแปลงสั้นลง[8],[9] จากงานวิจัย[5] ได้ทำการจำลองการทำงานของหม้อแปลงในสภาวะเกินพิกัดในช่วงเวลา 8.00น– 18.00น ซึ่งเป็นช่วงที่มีการใช้ไฟฟ้ามากกว่าช่วงกลางวัน โดยกำหนดให้ภาระไฟฟ้าที่ไม่เป็นเชิงเส้นแบบ 3 เฟส ($I_{h1}=150\%$ ของพิกัด $I_{rms} = 167.88\%$) ผลลัพธ์ที่ได้อายุการใช้งานของหม้อแปลงลดลงเหลือ 9.57 ปี (โดยปกติมีการเสื่อมสลายตามธรรมชาติที่ 20ปี[8]) จุดที่น่าสนใจคือจาก[6],[7] เป็นแค่การทดสอบและคำนวณที่กระแสมูลฐานที่พิกัดเท่านั้นไม่สามารถทดสอบในสภาวะเกินพิกัดในช่วงระยะเวลาอันได้ สาเหตุอันเนื่องมาจากการเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับหม้อแปลง ด้วยเหตุนี้การจำลองสถานการณ์ดังกล่าวงานวิจัยนี้จะป็นทางออกที่ดี ทำให้ทราบค่าอุณหภูมิต่างๆ และอายุของหม้อแปลง ประโยชน์ที่ได้รับทำให้สามารถหลีกเลี่ยงความเสียหายและช่วยในการวางแผนการใช้พลังงานไฟฟ้าล่วงหน้าได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังเช่น ในการขยายการใช้พลังงานของแต่ละเขตพื้นที่ของการไฟฟ้า การใช้ซอฟต์แวร์ที่พัฒนาขึ้นนี้จะสามารถตัดสินใจได้ว่าหม้อแปลงที่มีอยู่เดิมแล้วเพียงพอกับการใช้ไฟฟ้าประเภทไม่เป็นเชิงเส้นได้หรือไม่ ถ้าไม่เพียงพอจำเป็นต้องเพิ่มที่ขนาดกำลังไฟฟ้าเท่าไร

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1 อายุของฉนวน

อุณหภูมิและเวลาจะเป็นตัวกำหนดอายุของฉนวน ค่าของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นตามตำแหน่งต่างๆ ของฉนวนจะมีค่าไม่เท่ากัน บริเวณจุดร้อนสุดจะได้รับความ

เสื่อมสภาพมากกว่าบริเวณอื่นๆ ดังนั้นการศึกษาอายุของฉนวนจะพิจารณาอุณหภูมิที่จุดร้อนสุด จาก[10]-[12]สามารถคำนวณอายุใช้งานของหม้อแปลงดังสมการที่(1) และสมการที่(2)

$$\text{Life} = \frac{1}{\text{Total Loss of Life}} = \frac{1}{\left(\sum_{t=1}^{t=n} 10^{-\left(\frac{A+B}{T_i} \right)} \right)} \quad (1)$$

เมื่อ

$$T_i = \Theta_h + 273 \quad (2)$$

Θ_h คืออุณหภูมิจุดร้อนสูงสุดของตัวนำ, °C

A, B คือค่าคงที่ โดยมีค่าต่างๆ ดังตารางที่ 1[10]-[12]

ตารางที่1 ค่าพารามิเตอร์ A และ B ของหม้อแปลงแบบแช่น้ำมัน ตามมาตรฐานANSI/IEEE [10]-[12]

ขนาดหม้อแปลง	อุณหภูมิเพิ่มเฉลี่ยของขดลวด, °C	A	B
หม้อแปลงขนาด500 kVA และต่ำกว่า	65	-11.269	6328.8
	55	-11.968	6328.8
หม้อแปลงขนาดมากกว่า 500 kVA – 100 MVA	65	-30.834	16054.0
	55	-32.543	16054.0
หม้อแปลงมีขนาดมากกว่า 100 MVA	65	-13.391	6972.15

2.2 อุณหภูมิหม้อแปลงเมื่อโหลดไม่เป็นเชิงเส้นและอุณหภูมิแวดล้อม

จาก[13] ได้คำนวณหาอุณหภูมิของหม้อแปลงแบบแช่น้ำมันชนิดONAN ดังสมการที่(3) และค่ากำลังไฟฟ้าต่างๆ ที่เกิดขึ้นในตัวหม้อแปลง เช่น ค่ากำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ขดลวดอันเนื่องมาจากกระแสไหลวน ค่ากำลังสูญเสียที่แกนเหล็กอื่นๆ ได้จาก [13]-[17] ซึ่งแสดงดังสมการที่(4) ถึงสมการที่(5)

ที่สภาวะคงตัว

$$\Theta_{ou} = \Theta_{or} \left[\frac{P_T}{P_{TR}} \right]^{0.8} \quad (3)$$

$$P_{TR} = P_{CuR} + P_{coreR} + P_{tan kR} \quad (4)$$

เมื่อ

Θ_{ou} คืออุณหภูมิเพิ่มสุดท้ายน้ำมันด้านบนที่ใดๆ, °C

Θ_{or} คืออุณหภูมิเพิ่มน้ำมันด้านบนที่พิกัดโหลด, °C

P_T คือกำลังสูญเสียรวม,W

P_{TR} คือกำลังสูญเสียรวมที่พิกัด, W

P_{CuR} คือกำลังสูญเสียที่ขดลวดที่พิกัดหม้อแปลง,W

P_{coreR} คือกำลังสูญเสียแกนเหล็กที่พิกัดหม้อแปลง,W

$P_{tan kR}$ คือกำลังสูญเสียที่ถังหม้อแปลงที่พิกัดหม้อแปลง, W

ถ้า P_T กรณีที่มีภาระไฟฟ้าแบบไม่เป็นเชิงเส้นจะมีค่ามากกว่า กรณีที่ภาระไฟฟ้าเป็นแบบเชิงเส้น ซึ่งจะหาได้จากสมการที่(5)

$$P_T = P_{LL}(\text{total}) + P_{coreR} + P_{tan kR} \quad (5)$$

เมื่อ P_{coreR} และ $P_{tan kR}$ มีค่าน้อยกว่า $P_{LL}(\text{total})$ มากสามารถละเลยได้ ดังนั้น

$$P_{LL}(\text{total}) = \sum_{h=1}^{h=\max} (I_h)^2 \cdot R_h \quad (6)$$

$P_{LL}(\text{total})$ คือกำลังสูญเสียรวมขณะมีโหลด, W

I_h คือกระแสไฟฟ้าประสิทธิภาพของฮาร์โมนิกลำดับ h, A

R_h คือความต้านทานที่ฮาร์โมนิกลำดับ h, Ω

และจาก [10] ที่สภาวะชั่วคราว

$$\Theta_{ot} = \Theta_{oi} + (\Theta_{ou} - \Theta_{oi}) \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right) \quad (7)$$

Θ_{oi} คืออุณหภูมิเพิ่มเริ่มต้นน้ำมันด้านบน, °C

Θ_{ot} คืออุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบนที่โหลดใดๆในสถานะชั่วคราว, °C

τ คือค่าเวลาที่ความร้อนของน้ำมันคงตัว, ชั่วโมง

t คือช่วงเวลาการต่อโหลดของหม้อแปลง, ชั่วโมง

จาก[5], [7]

$$\Theta_{gu} = \left[\frac{\left[(I_{rms})^2 R_{dc} \right] + \left[P_{ecw_H} \times \left(\frac{P_{ecw}}{P_{ecw_R}} \right) \right]}{\left[(I_{rms_R})^2 R_{dc} \right] + P_{ecw_H}} \right]^{0.8} \cdot \Theta_{gr} \quad (8)$$

Θ_{gu} คืออุณหภูมิเพิ่มสุดท้ายของจุดร้อนสูงสุดของตัวนำที่

มากกว่าอุณหภูมิของน้ำมันด้านบนที่ทุกๆ โหลด, °C

I_{rms} คือกระแสไฟฟ้าประสิทธิผล, A

I_{rms_R} คือกระแสไฟฟ้าประสิทธิผลที่พิกัดหม้อแปลง, A

R_{dc} คือความต้านทานกระแสตรง, Ω

P_{ecw_R} คือกำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนที่

ขดลวดที่พิกัด, W

P_{ecw_H} คือกำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนที่จุดร้อนสูงสุด, W

เมื่อ

$$P_{ecw} = P_{LL(total)} - (I_{rms})^2 \cdot R_{dc} - P_{OSL} \quad (9)$$

P_{OSL} คือกำลังสูญเสียปลีกย่อยอื่น ๆ นอกเหนือจากขดลวด, W

จากสมการที่(9) ค่า P_{OSL} มีค่าน้อย ซึ่งสามารถละเลยได้ ดังนั้น

$$P_{ecw} = P_{LL(total)} - (I_{rms})^2 \cdot R_{dc} \quad (10)$$

P_{ecw} คือกำลังสูญเสียเนื่องจากกระแสไหลวนที่ขดลวด, W

เมื่อรวมสมการที่(7) กับสมการที่(8) จะได้อุณหภูมิเพิ่มของจุดร้อนสูงสุดและอุณหภูมิจุดร้อนสูงสุดของหม้อแปลงแบบแช่น้ำมันแสดงได้ดังสมการที่(11) และสมการที่(12) เรียงตามลำดับ

$$\Theta_{hrise} = \Theta_{ot} + \Theta_{gu} \quad (11)$$

$$\Theta_h = \Theta_{hrise} + \Theta_a \quad (12)$$

Θ_{hrise} คืออุณหภูมิเพิ่มที่จุดร้อนสูงสุดของตัวนำ, °C

Θ_a อุณหภูมิแวดล้อมแบบฟังก์ชันไซน์สองชั้น, °C

อุณหภูมิแวดล้อมรอบๆ หม้อแปลงมีผลกับอายุของหม้อแปลง จาก[18]ได้มีการหาค่าอุณหภูมิแวดล้อมแบบฟังก์ชันไซน์สองชั้น (Double sinusoidal, Θ_a) ดังสมการที่(13)

$$\Theta_a = \Theta_{ay} + A \cdot \cos \left[\frac{2\pi}{365} (\text{day} - D_x) \right] + B \cdot \cos \left[\frac{2\pi}{24} (\text{hour} - T_x) \right] \quad (13)$$

Θ_{ay} คืออุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยต่อปี °C

A คือขนาดอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงประจำปีของค่าเฉลี่ยอุณหภูมิประจำวัน °C

B คือขนาดอุณหภูมิเปลี่ยนแปลงประจำวัน, °C

D_x คือวันที่ร้อนที่สุดประจำปี

T_x คือชั่วโมงที่ร้อนที่สุดประจำวัน(ประมาณเวลา 14.00 น.)

day คือวันที่ต้องการแสดงผลอุณหภูมิ

hour คือ ชั่วโมงที่ต้องการแสดงผลอุณหภูมิ

3. การวางแผนการจ่ายภาระไฟฟ้าหม้อแปลง

3.1 การทดสอบหาค่ากำลังสูญเสียของหม้อแปลงขณะมีโหลดที่ความถี่ฮาร์โมนิกต่างๆ

ในงานวิจัยนี้มีสมมุติฐานในเรื่องของอุณหภูมิจุดร้อนสุดมีค่าแปรตามกำลังไฟฟ้าสูญเสียที่ขดลวดอันเนื่องมาจากกระแสไหลวนของฮาร์โมนิกแต่ละลำดับ ดังสมการที่(6) แต่สิ่งที่จำเป็นต้องทราบก็คือค่าความต้านทานขดลวดที่ความถี่ไฟฟ้าแตกต่างกัน ซึ่งมีเหตุมาจากการเกิดปรากฏการณ์ที่ผิวตัวนำ(Skin effect) จากงานวิจัย[5],[7] ได้ทดสอบหาค่าความต้านทานของวงจรสมมูลที่ความถี่ฮาร์โมนิกต่างๆ($R_{eq(ac)}$) ที่ได้จากการทดสอบดังตารางที่ 3

ตารางที่ 2 คุณสมบัติหม้อแปลงแบบแช่น้ำมันที่ใช้ทดสอบ

Maximum VA = 10 kVA	Frequency = 50 Hz		
High Volt = 380 V	Low Volt = 220 V		
Load Loss = 350 W	No Load Loss = 77 W		
Total Loss = 427 W	Vector Dyn11		
Rdc=1.457 Ω/phase	Type ONAN	Class A	
Θ _{OT} = 31 °C	gr _{MAX} = 13.5	τ = 3 hours	H = 1.1

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบหา $R_{eq(ac)}$ ของหม้อแปลงแบบแช่น้ำมันที่ใช้ทดสอบ[5],[7]

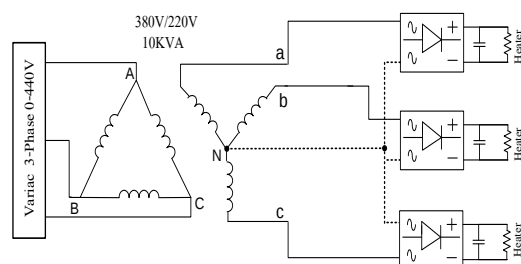
ลำดับฮาร์โมนิก (h)	$R_{eq(ac)}$ Ω /phase
1 (50 Hz)	1.526
3 (150 Hz)	1.537
5 (250 Hz)	1.553
7 (350 Hz)	1.574
9 (450 Hz)	1.617
11 (550 Hz)	1.726
13 (650 Hz)	1.825
15 (750 Hz)	1.969
17 (850 Hz)	2.182
19 (950 Hz)	2.380

3.2 การทดสอบอุณหภูมิหม้อแปลง เมื่อโหลดไม่เป็นเชิงเส้นแบบ 1 เฟส

ในหัวข้อข้อย่อยนี้มีจุดประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมในเรื่องของปริมาณกระแสฮาร์โมนิก และอุณหภูมิที่เกิดขึ้น ณ บริเวณส่วนต่างๆ ของหม้อแปลง ได้มีการติดตั้งตัวเทอร์โมคัปเปิลตามตำแหน่งต่างๆในหม้อแปลง ได้แก่ ขดลวดปฐมภูมิและทุติยภูมิทั้ง 3 เฟส รวมถึงบริเวณน้ำมันด้านบน ดังรูปที่ 1 การต่อวงจรหม้อแปลงกับภาระไม่เป็นเชิงเส้นดังรูปที่ 2



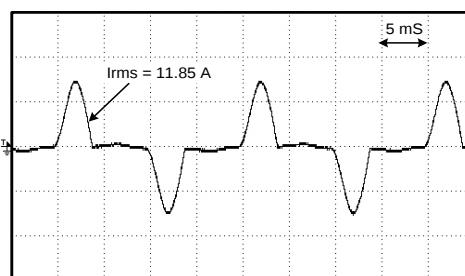
รูปที่ 1 การติดตั้งหัววัดเทอร์โมคัปเปิล เพื่อวัดอุณหภูมิตำแหน่งต่างๆ ภายในหม้อแปลงแบบแช่น้ำมัน



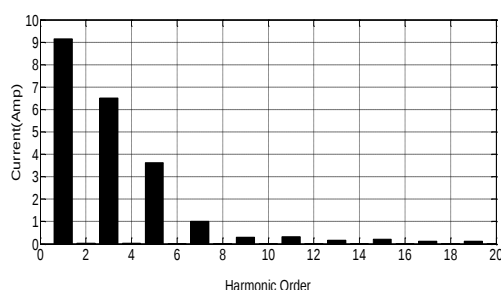
รูปที่ 2 วงจรการทดสอบอุณหภูมิหม้อแปลง โดยใช้โหลดแบบไม่เป็นเชิงเส้นชนิด 1 เฟส จำนวน 3 ชุด

ค่าของแรงดันและกระแสไฟฟ้าทางขดลวดทุติยภูมิที่วัดได้แสดงดังรูปที่ 3 สเปกตรัมกระแสฮาร์โมนิกทางขดทุติยภูมิดังรูปที่ 4 เห็นได้ว่านอกจากกระแสไฟฟ้าคลื่นมูลฐานแล้วยังมีฮาร์โมนิกลำดับ $2k \pm 1$ ได้แก่ 3, 5, 7

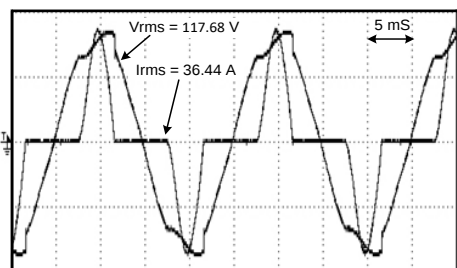
เกิดขึ้นอย่างปริมาณมาก ซึ่งกระแสเหล่านี้จะเหนี่ยวนำข้ามไปยังฝั่งขดลวดปฐมภูมิ และไหลวนในขดลวดที่ต่อแบบเดลต้าดังรูปที่ 5 และเมื่อวัดสัญญาณฮาร์มอนิกแสดงดังรูปที่ 6 โดยสังเกตเห็นได้ว่ามีปริมาณกระแสฮาร์มอนิกเลขคี่ลำดับที่ 3, 5, 7 เกิดขึ้นมีปริมาณสูง ในการคำนวณหาค่ากำลังสูญเสียที่ขดลวด จะนำกระแสไฟฟ้าที่ไหลวนอยู่ในรูปเดลต้าเหล่านี้ไปคูณกับค่าความต้านทาน $R_{eq(ac)}$ ของตารางที่ 3 จากนั้นนำค่ากำลังสูญเสียของแต่ละค่ามารวมกัน ส่วนรูปที่ 7 เป็นการวัดสัญญาณแรงดันสายถึงสายและกระแสสายที่ขั้วต่อสายของฝั่งปฐมภูมิ ส่วนรูปที่ 8 เป็นการวัดฮาร์มอนิกที่อยู่ฝั่งปฐมภูมิ ซึ่งสังเกตเห็นได้ว่า ส่วนมากมีปริมาณฮาร์มอนิกลำดับที่ 5 และที่ 7 เท่านั้น แต่จะมีฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 จำนวนน้อย สาเหตุเป็นเพราะฮาร์มอนิกลำดับที่ 3 ไหลวนในรูปเดลต้าด้านปฐมภูมิ ไม่ไหลย้อนออกไปยังกริดภายนอก



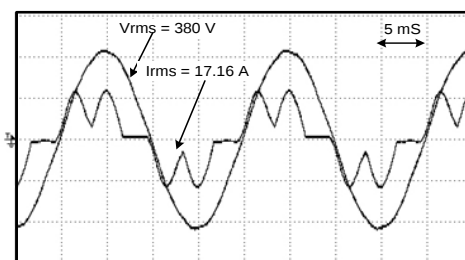
รูปที่ 5 กระแสฟลักซ์ที่ไหลวนอยู่ในรูปเดลต้าขดลวดปฐมภูมิ



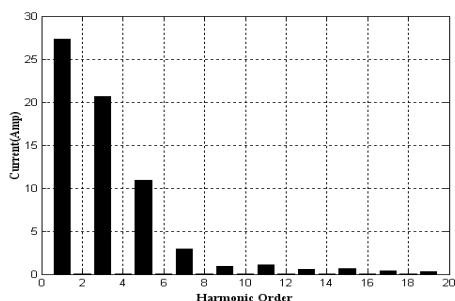
รูปที่ 6 สเปกตรัมกระแสฟลักซ์ในรูปเดลต้าขดลวดปฐมภูมิ และค่า%ความผิดเพี้ยนกระแส (%THDi) = 86%



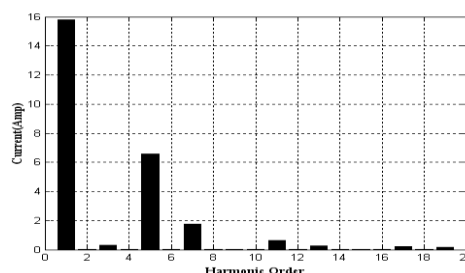
รูปที่ 3 สัญญาณกระแสและแรงดันขดลวดทุติยภูมิ



รูปที่ 7 สัญญาณกระแสไลน์และแรงดันทางขดลวดปฐมภูมิ

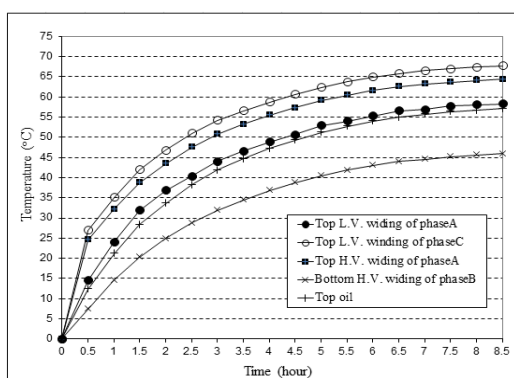


รูปที่ 4 สเปกตรัมกระแสที่ขดลวดทุติยภูมิ และค่าความผิดเพี้ยนกระแส (%THDi) = 86%

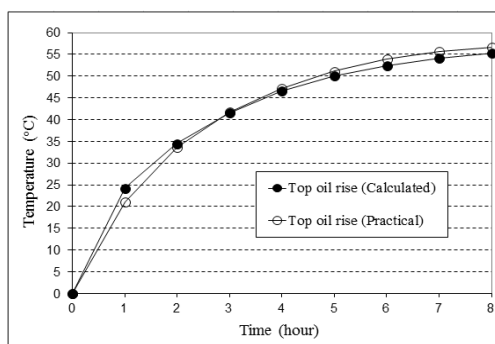


รูปที่ 8 สเปกตรัมกระแสไลน์ขดลวดปฐมภูมิ และค่า%ความผิดเพี้ยนกระแส (%THDi) = 44%

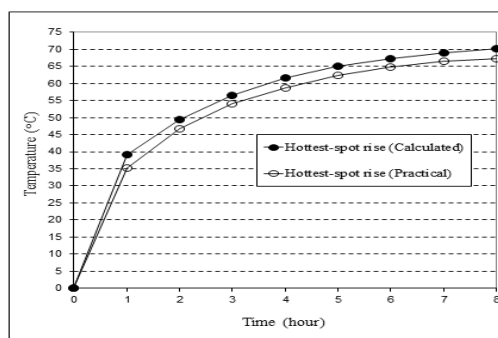
เพื่อให้เกิดความมั่นใจว่าเมื่อมีการวางแผนการจ่ายภาระของหม้อแปลงแล้ว ค่าอุณหภูมิต่างๆ ที่ทำนายจะมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่เกิดขึ้นจริง จึงได้มีการทดสอบหม้อแปลง เมื่อใช้ภาระแบบไม่เป็นเชิงเส้นที่มีฮาร์มอนิกลำดับ $2k \pm 1$ โดยกำหนดให้ $I_{h1} = 9.15$ A (ประมาณ 100% ของพิกัดหม้อแปลง) ใช้ระยะเวลา 8.5 ชั่วโมง จากผลการทดสอบอุณหภูมิที่ตำแหน่งต่างๆ ของหม้อแปลงดังรูปที่ 9 เห็นได้ว่าที่บริเวณขดลวดด้านบนของหม้อแปลงเป็นจุดที่มีค่าอุณหภูมิสูงสุด ซึ่งจุดดังกล่าวเป็นจุดที่ทำให้เกิดความเสื่อมสภาพของฉนวนมากที่สุด จากนั้นได้นำค่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบนและอุณหภูมิจุดร้อนสุดดังกล่าวไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการคำนวณแสดงดังรูปที่ 10 และรูปที่ 11 เรียงตามลำดับ เห็นได้ว่าผลลัพธ์ที่ได้ทั้งค่าจากการคำนวณ(รูปที่ 10 ด้วยสมการที่(7) รูปที่ 11 ด้วยสมการที่(11))และทดสอบมีค่าใกล้เคียงกัน รวมถึงยังมีค่าสูงกว่ากรณีที่เป็นภาระที่ไม่เป็นเชิงเส้นแบบ 3 เฟส ที่มีกลุ่มฮาร์มอนิกประเภท $6K \pm 1$ ของงานวิจัย[5] อีกด้วย ที่เป็นเช่นนี้เพราะฮาร์มอนิกลำดับที่ 3, 5, 7 มีค่าสูงกว่าประเภท $6K \pm 1$ จึงทำให้ค่ากำลังสูญเสียที่ขดลวดมีค่ามากตามไปด้วย



รูปที่ 9 ผลการทดสอบอุณหภูมิเพิ่ม(คืออุณหภูมิหม้อแปลงที่วัดได้ลบด้วยอุณหภูมิแวดล้อม)ที่จุดต่างๆ ของหม้อแปลงทดสอบ เมื่อใช้โหลดไม่เป็นเชิงเส้น



รูปที่ 10 การเปรียบเทียบอุณหภูมิเพิ่มของน้ำมันด้านบนจากการทดสอบและการทำนาย



รูปที่ 11 การเปรียบเทียบอุณหภูมิเพิ่มจุดร้อนสุดของขดลวดจากการทดสอบและการทำนาย

3.3 การวางแผนการจ่ายโหลดไฟฟ้าหม้อแปลง

3.3.1 การทำนายอุณหภูมิแวดล้อมของเขตพื้นที่ที่ติดตั้งหม้อแปลง

ปัจจัยสำคัญที่เกี่ยวข้องกับอายุการใช้งานของหม้อแปลงไฟฟ้าคือภาระไฟฟ้า และอีกตัวแปรหนึ่งที่สำคัญไม่ยิ่งหย่อนกว่ากันก็คืออุณหภูมิแวดล้อม ดังนั้นจำเป็นต้องพยากรณ์อุณหภูมิแวดล้อมล่วงหน้าตลอดหนึ่งปี เพื่อนำเอาข้อมูลนี้ไปวางแผนการใช้พลังงานไฟฟ้าของหม้อแปลงในเขตพื้นที่นั้นๆ ตลอดระยะเวลาหนึ่งปีล่วงหน้าเช่นกัน งานวิจัยนี้เลือกใช้ข้อมูลอุณหภูมิแวดล้อมของเขตพื้นที่ จ.กาญจนบุรี[19] ซึ่งเก็บข้อมูลโดยกรมอุตุนิยมวิทยา สถานี 450201 ในปีพ.ศ.2562-2566 นำมาหาค่าเฉลี่ยของแต่ละเดือนได้ค่าดังตารางที่ 4 จากนั้นนำค่าเหล่านี้ป้อนเข้าโปรแกรมที่ได้พัฒนาขึ้น

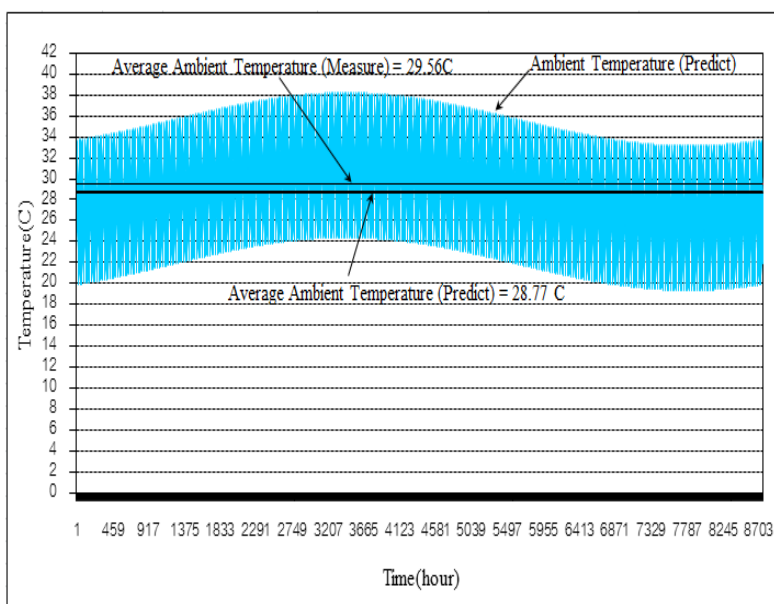
เพื่อคำนวณหาค่า θ_{ay} , A, B, Dx และ Tx สุดท้ายได้ มีนาคมถึงพฤษภาคมของปี พ.ศ.2567 ค่าที่ได้จากการนำไปใช้ในการทำนายค่าอุณหภูมิแวดล้อมในช่วงเดือน ทำนายกับค่าจริงแสดงดังรูปที่12 ถึงรูปที่ 14

ตารางที่4 ข้อมูลอุณหภูมิแวดล้อมเบื้องต้นที่ได้จากการเก็บข้อมูลของกรมอุตุนิยมวิทยา จ.กาญจนบุรี สถานี450201

	พ.ศ.2562-2566											
	ม.ค.	ก.พ.	มี.ค.	เม.ย.	พ.ค.	มิ.ย.	ก.ค.	ส.ค.	ก.ย.	ต.ค.	พ.ย.	ธ.ค.
Average Mean maximum (θ_{adm} Average)	33.32	34.96	37.2	37.9	36.84	35.48	34.8	34.2	33.62	32.48	32.5	32.06
Average Mean minimum (θ_{adn} Average)	20.02	21.58	23.36	24.32	24.3	24.12	24.4	24.24	23.86	22.92	21.94	20.06

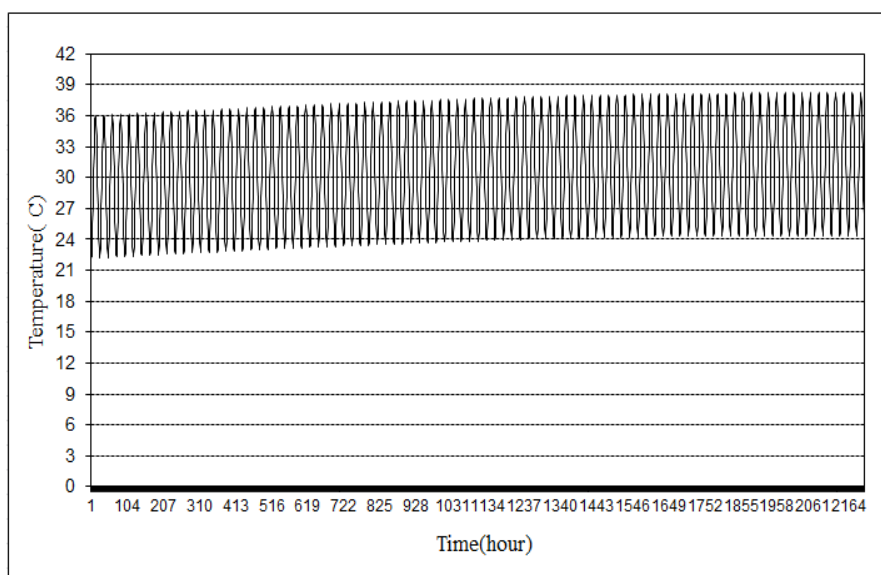
จากรูปที่12 เป็นผลการเปรียบเทียบค่าที่วัดได้และค่าที่ทำนายของอุณหภูมิแวดล้อม โดยค่าอุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยตลอดปีได้จากการวัดมีค่า 29.56°C มีค่าใกล้เคียงกับการทำนายที่ 28.77°C ส่วนรูปที่ 13 เป็นผลการทำนายช่วงเดือนที่มีอุณหภูมิสูงของปี เห็นได้ว่าช่วงเดือนเมษายนถึงพฤษภาคมมีค่าสูงสุดของปี ส่วนรูปที่14 เป็นการทำนายอุณหภูมิแวดล้อมตลอด 24 ชั่วโมง ค่าเฉลี่ย

อุณหภูมิที่วัดได้กับที่ทำนายมีค่าใกล้เคียงกันมาก (ค่าจากการวัด 31.80°C ค่าจากการทำนาย 31.30°C) ซึ่งทำให้มั่นใจได้ว่าการใช้โมเดลทางคณิตศาสตร์ของการทำนายอุณหภูมิแวดล้อมแบบซายน์สองชั้น สามารถนำไปทำนายอุณหภูมิน้ำมันด้านบนและอุณหภูมิจุดร้อนสุดของหม้อแปลงได้

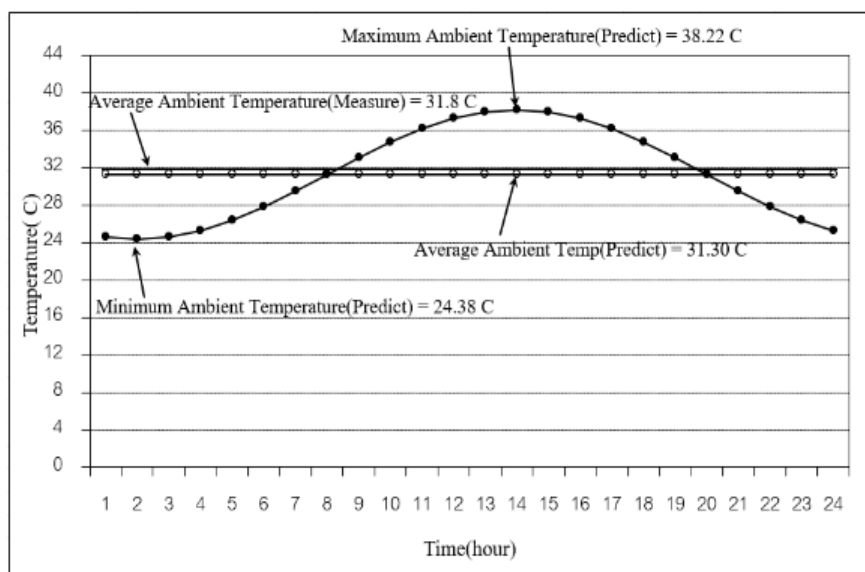


รูปที่ 12 อุณหภูมิแวดล้อมของแต่ละชั่วโมงตลอดปี พ.ศ. 2567

$$(\theta_{ay} = 28.77^{\circ}\text{C}, A = 2.525, B = 6.92, Dx = 144, Tx = 14.00)$$



รูปที่ 13 อุณหภูมิแวดล้อมเดือน มี.ค.- พ.ค. 2567 (เดือนที่ร้อนมากของปี)



รูปที่ 14 อุณหภูมิแวดล้อมของวันที่ 24 พ.ค. 2567

3.3.2 การทำนายอุณหภูมิหม้อแปลงในสภาวะภาระเกินพิกัด

ในทางปฏิบัติภาระไฟฟ้าของหม้อแปลงจะไม่คงที่ตลอดทั้ง 24 ชั่วโมง โดยส่วนมากช่วงเวลากลางวันจะมากกว่าช่วงเวลากลางคืน ในกรณีศึกษานี้จะจำลองให้

ช่วงเวลา 08.00-18.00 น. เป็นช่วงที่มีกระแสไฟฟ้าเคลื่อนมูลฐาน (I_{h1}) สูง 150% ของพิกัดดังรูปที่ 15 (ซึ่งมีค่าเท่ากับกับงานวิจัย[5] ที่ $I_{h1} = 150\%$, $I_{rms} = 162\%$) แต่ งานวิจัยนี้เป็นการะไม่เชิงเส้นแบบ 1 เฟส จำนวน 3

ชุด แต่งงานวิจัย[5] แตกต่างกันตรงที่เป็นแบบภาระไม่
เป็นเชิงเส้นแบบ 3 เฟส จำนวน 1 ชุด

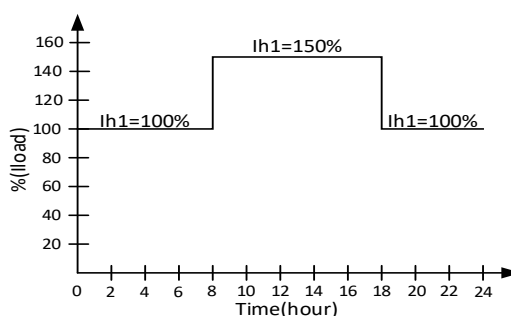
ช่วงเวลาที่ 1 และช่วงเวลาที่ 3

$I_{rms}(pri/phase)=11.85$ A ประกอบด้วย

$I_{h1}=9.15$ A(ประมาณ100%ของพิกัดหม้อแปลง)

$I_{h3}=6.5$ A, $I_{h5}=3.65$ A, $I_{h7}=1.0$ A, $I_{h9}=0.2$ A, $I_{h11}=0.22$ A,

$I_{h13}=0.1$ A, $I_{h15}=0.15$ A, $I_{h17}=0.1$ A, $I_{h19}=0.1$ A



รูปที่ 15 วัฏจักรโหลดของหม้อแปลงในแต่ละวัน

ช่วงเวลาที่ 2

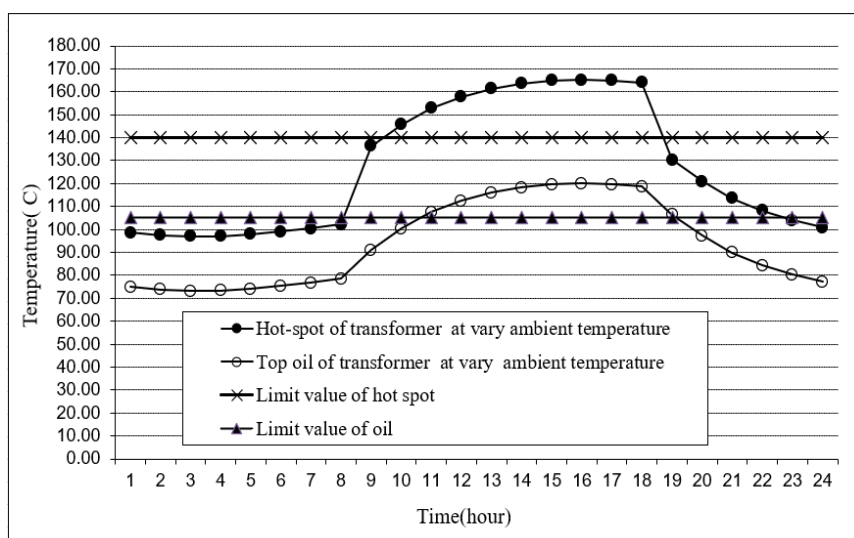
$I_{rms}(pri/phase)=17.78$ A ประกอบด้วย

$I_{h1}=13.725$ A(ประมาณ150%ของพิกัดหม้อแปลง)

$I_{h3}=9.75$ A, $I_{h5}=5.475$ A, $I_{h7}=1.5$ A, $I_{h9}=0.3$ A, $I_{h11}=0.33$

A, $I_{h13}=0.15$ A, $I_{h15}=0.225$ A, $I_{h17}=0.15$ A, $I_{h19}=0.15$ A

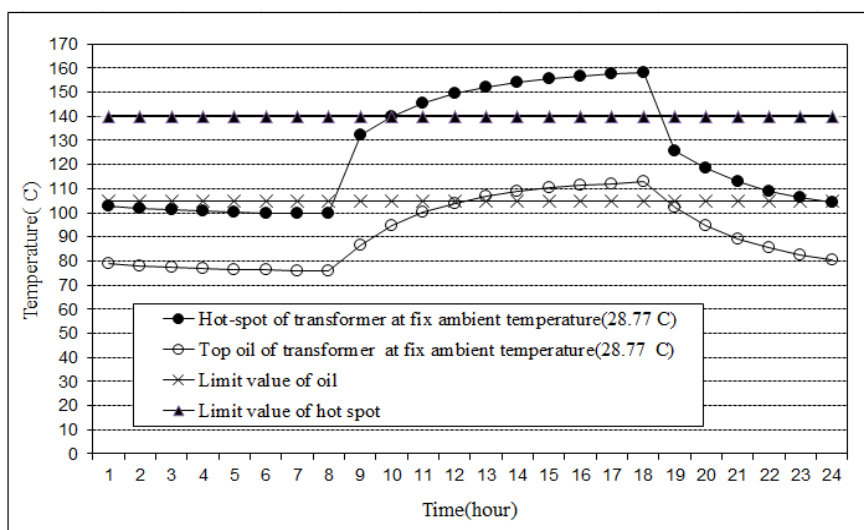
จากรูปที่ 16 เป็นค่าอุณหภูมิจุดร้อนสุดโดยใช้
อุณหภูมิแวดล้อมเปลี่ยนแปลงตลอดปี มีค่าสูงสุดที่
 165.25°C และมีค่าเกินขีดจำกัด(140°C) ในช่วงเวลา
09.30-18.30 น. และอุณหภูมิน้ำมันด้านบนมีค่าอุณหภูมิ
สูงสุดที่ 119.93°C และมีค่าเกินขีดจำกัด(105°C) ในช่วง
เวลา 11.00-19.00 น.



รูปที่ 16 เปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำมันด้านบนและจุดร้อนสุดหม้อแปลง กรณีอุณหภูมิแวดล้อมเปลี่ยนแปลงตลอดปี

จากรูปที่ 17 เป็นค่าอุณหภูมิจุดร้อนสุดโดยใช้
อุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยทั้งปี 28.77°C มีค่าสูงสุด
ที่ 158.00°C ซึ่งมีค่าเกินขีดจำกัด(140°C)[18]ในช่วง

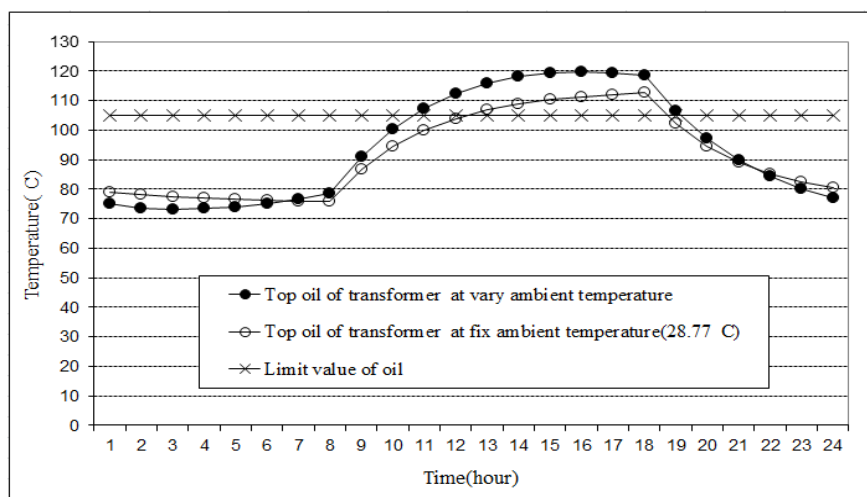
เวลา 10.00-18.30 น. และอุณหภูมิน้ำมันด้านบนมีค่า
อุณหภูมิสูงสุดที่ 112.70°C ซึ่งมีค่าเกินขีดจำกัด(105°C)
[18]ในช่วงเวลา 12.00-18.45 น.



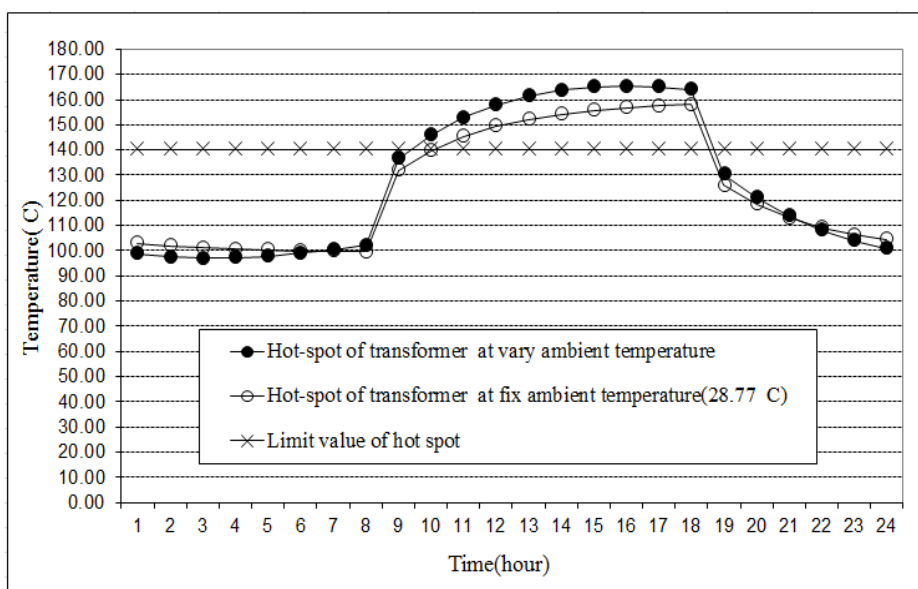
รูปที่ 17 เปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำมันด้านบนและจุดร้อนสุดห้อยแปลง กรณีอุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยตลอดปี(28.77 °C)

จากรูปที่ 18 ถึงรูปที่ 19 เป็นการจำลองเปรียบเทียบค่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบนและอุณหภูมิจุดร้อนสุดโดยใช้อุณหภูมิแวดล้อมเปลี่ยนแปลงตลอดปีเทียบกับกรณีที่ใช้อุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยคงที่ตลอดปี จากการจำลองของวันที่ 24 พ.ค.2567 ซึ่งเป็นวันที่อุณหภูมิร้อนที่สุดของปี (ได้จากโมเดลคณิตศาสตร์) เห็นได้ว่าทั้งค่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบนและจุดร้อนสุดมีค่าเกินพิกัดอย่างมาก ทั้งกรณีที่ใช้โมเดลอุณหภูมิแวดล้อมเปลี่ยนแปลงตลอดปี

และโมเดลอุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยตลอดปี แต่การใช้อุณหภูมิแวดล้อมเปลี่ยนแปลงตลอดปีที่ช่วงเวลา 11.00-18.00น จะมีค่ามากกว่าการใช้อุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยตลอดปีพอสมควร ซึ่งทำให้ทราบว่าการวางแผนการจ่ายพลังงานไฟฟ้าควรที่จะนำโมเดลแบบอุณหภูมิแวดล้อมเปลี่ยนแปลงตลอดปีไปใช้งานมากกว่า



รูปที่ 18 เปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำมันด้านบนเมื่ออุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยและเปลี่ยนแปลงตลอดปี



รูปที่ 19 เปรียบเทียบจุดร้อนสุดหม้อแปลง เมื่ออุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยและเปลี่ยนแปลงตลอดปี

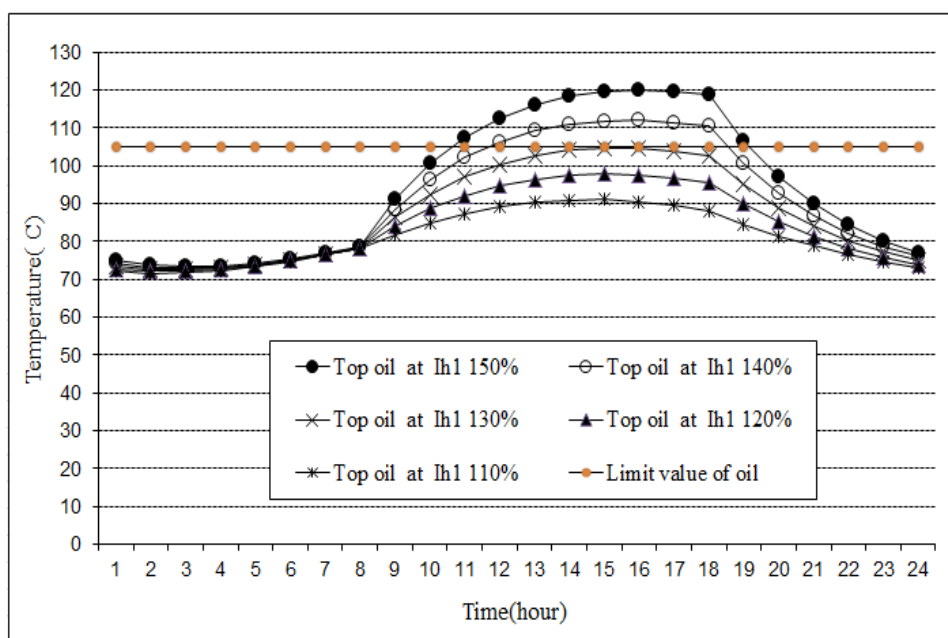
จากรูปที่ 20 ถึงรูปที่ 21 จำลองการจ่ายภาระไฟฟ้าที่ค่า I_{h1} มีค่า 110% ถึง 150% เห็นได้ว่าที่ค่า I_{h1} เท่ากับ 140% และ 150% ค่าอุณหภูมิน้ำมันด้านบนและจุดร้อนสุดมีค่าสูงกว่าปกติอย่างมากตามลำดับ และค่าของอายุหม้อแปลงจะลดลงเมื่ออุณหภูมิจุดร้อนจุดเพิ่มขึ้นดังตารางที่ 5 ที่ I_{h1} มีค่า 150% อายุการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าเหลือแค่ 0.72 ปีเท่านั้น ซึ่งต่างจากงานวิจัย[5] ที่เป็นการะไม่เป็นเชิงเส้นแบบ 3 เฟส มีค่า 9.6 ปี และรูปที่ 22 เป็นโมเดลทางคณิตศาสตร์อายุของหม้อแปลงที่ได้จากการจำลองโดยใช้ ทฤษฎีการถดถอยกำลังสองน้อยที่สุด(Least Square Regression) ช่วงที่ I_{h1} มีค่า 110% ถึง 150% (ค่า I_{h1} มีค่ามากกว่าปกติหม้อแปลง) ทำให้ขนาดของฮาร์มอนิกลำดับ $2K \pm 1$ เพิ่มขึ้นตามส่งผลให้ความค่าความเสื่อมสภาพของฉนวนมากขึ้น สุดท้ายทำให้อายุของหม้อแปลงลดลง ดังสมการที่(13)

ข้อจำกัดในการประเมินของโมเดลทางคณิตศาสตร์ดังกล่าวคือ จะใช้เฉพาะหม้อแปลงที่มีพารามิเตอร์ตามงานวิจัยนี้ และใช้ในเขตพื้นที่จังหวัดกาญจนบุรี

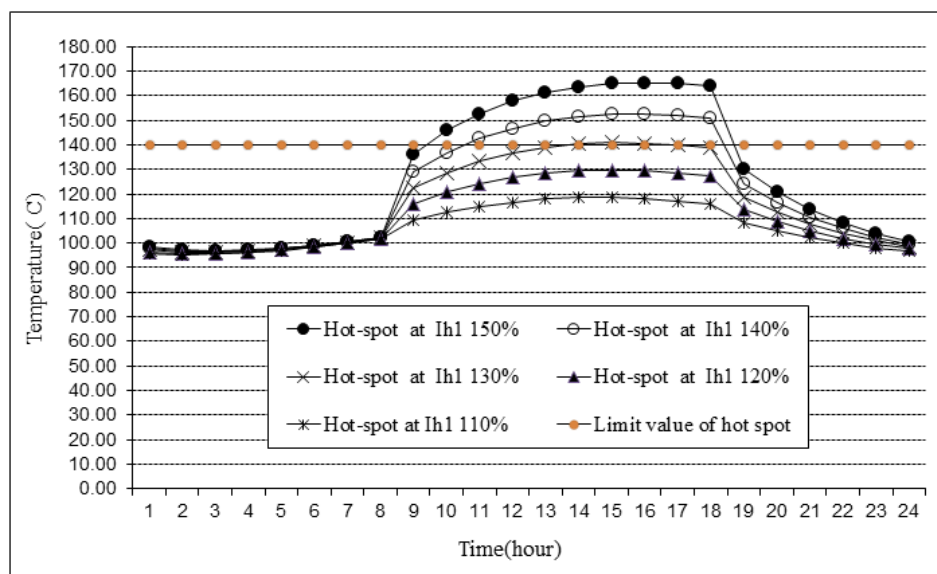
$$\text{Life time(year)} = -0.075(\%I_{h1})^3 + 2.06(\%I_{h1})^2 - 14.855(\%I_{h1}) + 32.918 \quad (13)$$

ตารางที่ 5 เปรียบเทียบอายุการใช้งานของหม้อแปลงที่ค่า $\%I_{h1}$ 110% ถึง 150% อยู่ในช่วงเวลา 08.00 น. ถึง 18.00 น.

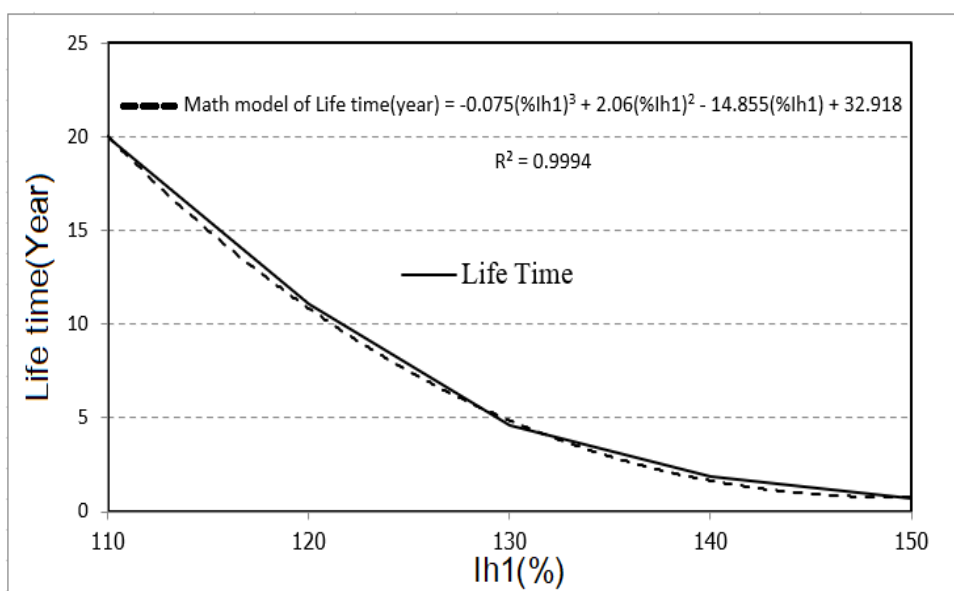
	I _{h1} (กระแสมาตรฐาน)				
	110%	120%	130%	140%	150%
อายุใช้งาน (Life time), ปี	20	11.04	4.58	1.85	0.72



รูปที่ 20 เปรียบเทียบอุณหภูมิน้ำมันด้านบนหม้อแปลง เมื่ออุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยและเปลี่ยนแปลงตลอดปี



รูปที่ 21 เปรียบเทียบจุดร้อนสูงสุดหม้อแปลง เมื่ออุณหภูมิแวดล้อมเฉลี่ยและเปลี่ยนแปลงตลอดปี



รูปที่ 22 ความสัมพันธ์ระหว่างอายุการใช้งานของหม้อแปลงกับค่า %Ih1

4. สรุปผลการวิจัย

ผลกระทบของฮาร์มอนิกจะทำให้อายุการใช้งานของหม้อแปลงสั้นลง ที่ฮาร์มอนิกลำดับ $2k \pm 1$ จะมีปริมาณฮาร์มอนิกและ %THD_i มากกว่าฮาร์มอนิกลำดับ $6k \pm 1$ [5] ส่งผลทำให้ค่ากำลังสูญเสียที่ขดลวดเนื่องจากกระแสไหลวนมีค่าสูงขึ้น และอีกปัจจัยหนึ่งคือค่าอุณหภูมิแวดล้อม ยิ่งช่วงกลางวันในฤดูร้อนค่าอุณหภูมิจะมีค่าสูง กรณีที่ช่วงเวลาดังกล่าวมีการใช้ภาระของหม้อแปลงเกินพิกัดจะทำให้ค่าจุดร้อนสุดของหม้อแปลงเพิ่มขึ้นอย่างมาก ส่งผลเสียกับอายุการใช้งานหม้อแปลงที่สั้นลง แนวทางการแก้ไขคือปรับเปลี่ยนพฤติกรรมการใช้พลังงานให้มาใช้ในช่วงเวลากลางคืน (กรณีที่สามารถทำได้) หรือมีการระบายความร้อนให้กับหม้อแปลง(หม้อแปลงแบบติดตั้งในอาคาร) ส่วนโมเดลทางคณิตศาสตร์ของอายุการใช้งานหม้อแปลงเทียบกับค่า %Ih1 (ดังสมการที่(13) หรือตารางที่ 5) จะช่วยในการวางแผนการจ่ายพลังงานของหม้อแปลง เห็นได้ว่าที่ %Ih1 = 110% อายุการใช้งานหม้อแปลงไฟฟ้าจะยังคงอยู่ที่ 20 ปี

แต่ถ้าเพิ่ม %Ih1 = 150% อายุการใช้งานจะลดลงอย่างมากเหลือแค่ 0.72 ปี ส่วนซอฟต์แวร์การจำลองการจ่ายพลังงานไฟฟ้าของหม้อแปลงที่พัฒนาขึ้นนี้ จะช่วยในการทำนายค่าอุณหภูมิหม้อแปลงและอุณหภูมิแวดล้อมรวมถึงอายุของหม้อแปลงที่เป็นแบบเชิงเส้นและไม่เป็นเชิงเส้นได้ ส่วนปัจจัยอื่นที่มีผลกระทบกับอายุการใช้งานหม้อแปลงซึ่งในงานวิจัยนี้ได้ละทิ้งไป ได้แก่ แรงทางกลที่เกิดขึ้นการหม้อแปลง[21] และคุณสมบัติทางเคมีที่เกิดขึ้นกับฉนวน[22] ซึ่งทั้งสองสิ่งนี้เป็นเรื่องที่น่าสนใจต่อไปในอนาคตได้เป็นอย่างดี

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] M. M. Islam, D. Sutanto, and K. Muttaqi, "Protecting PFC capacitors from overvoltage caused by harmonics and system resonance using high temperature superconducting reactors," IEEE Transactions on Applied Superconductivity, vol. 29, no. 2, pp. 1–5, Mar. 2019.

- [2] S. A. Saleh, E. W. Zundel, J. Cardenas, E. F. S. Hill, J. Meng, and G. Y. Morris, "Effects of loading levels on harmonic distortion in power transformers due to GIC flows," in 2023 IEEE Industry Applications Society Annual Meeting (IAS), 29 Oct.–2 Nov. 2023, pp. 1–6.
- [3] R. Tamang, B. Shrestha, A. Kashichhwa, R. Gautam, et al., "Analysis of the effect of current harmonic induced heating on transformer ageing," in 4th International Conference on Role of Energy on Sustainable Social Development (RESSD), 2025, pp. 1–6.
- [4] S. Im, S. Park, J. Kim, J. Chin, K. Cha, and M. Lim, "Temperature prediction of ultra-high-speed SPMSM for FCEV air compressor considering PWM current harmonics," in 2021 IEEE Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC), 25–28 Oct. 2021, pp. 1–6.
- [5] S. Tadsuan, "Testing and Planning of Load of Oil-Immersed Transformer under Non-linear Load Condition in Bangkok and Surrounding Area," KMUTT Research and Development Journal, vol. 31, no. 2, pp. 335–355, Apr.–Jun. 2008. (in Thai)
- [6] P. Sukserm and S. Tadsuan, "Comparison of testing results of oil-immersed transformer under linear load and non-linear load conditions," SAU Journal of Science & Technology, vol. 4, no. 1, Jan.–Jun. 2018, pp. 1–10. (in Thai)
- [7] S. Tadsuan and P. Sukserm, "Testing and prediction of the temperature of oil-immersed transformer under non-linear load condition with 1 phase rectifier," EAU Heritage Journal of Science and Technology, vol. 12, no. 3, Sep.–Dec. 2018, pp. 1–10. (in Thai)
- [8] T. Chegsakul and T. Tayjasant, "An impact of harmonic currents, load levels and ambient temperatures on transformer loss of life," in 2019 2nd International Conference on Clean Energy and Electrical Systems, 27–29 Jun. 2019, Nanjing, China, pp. 1–6.
- [9] A. Elmoudi, M. Lehtonen, and H. Nordman, "Effect of harmonics on transformers loss of life," in Conference Record of the 2006 IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Toronto, ON, Canada, 2006, pp. 1–6.
- [10] ANSI/IEEE C57.91, IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Overhead and Pad-Mounted Distribution Transformers Rated 500 kVA and Less with 65°C or 55°C Average Winding Rise, 1981.
- [11] ANSI/IEEE C57.92, IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Overhead and Pad-Mounted Power Transformers, up to and including 100 MVA with 65°C or 55°C Average Winding Rise, 1981.
- [12] ANSI/IEEE C57.115, IEEE Guide for Loading Mineral-Oil-Immersed Overhead and Pad-Mounted Power Transformers Rated in Excess of 100 MVA 65°C Winding Rise, 1981.
- [13] W. P. Linden, "An investigation of the thermal performance of an oil-filled transformer winding," IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 7, no. 3, pp. 1347–1357, Jul. 1992.
- [14] IEEE Std C57.110, IEEE Recommended Practice for Establishing Transformer Capability When Supplying Non-sinusoidal Load Currents, 1998.

- [15] S. Kulshreshtha and D. K. Chaturvedi, “Effect of generated harmonics on transformer losses due to solar penetration,” *International Research Journal on Advanced Engineering and Management*, vol. 2, no. 6, pp. 1939–1945, Jun. 2024.
- [16] M. H. Mohd Wazir, D. Mat Said, N. M. Sapari, M. S. M. Yunus, and Z. I. M. Yassin, “An electro-thermal modeling of distribution transformer for hottest spot evaluation under photovoltaic-induced harmonics,” *International Journal of Renewable Energy Development*, vol. 14, no. 3, pp. 450–462, May 2025.
- [17] N. Miteva, L. Sima, and K. J. Dagan, “Power loss calculation in oil-type distribution transformers supplying nonlinear loads,” *Electronics*, vol. 14, 2500, pp. 1–16, 2025.
- [18] IEC 354, Loading Guide for Oil-Immersed Power Transformer, 1991.
- [19] Thai Meteorological Department, Agroclimatological Data, Kanchanaburi Province, Station 450201, 2019–2024. [Online]. Available: <https://www.tmd.go.th/>. [Accessed: June. 1, 2025].
- [20] Z. Yuan, H. Wu, X. Jiang, and J. Zhao, “Investigating aging characteristics of oil-immersed power transformers’ insulation in electrical–thermal–mechanical combined conditions,” *Energies*, vol. 16, no. 19, p. 6865, 2023. [Online]. Available: <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC10647747/> [Accessed: Oct. 31, 2025].
- [21] G. Kumar, S. Nandini, A. Chandrasekaran, and A. S. Rao, “Comprehensive assessment of transformer oil after thermal aging,” *Energies*, vol. 18, no. 8, p. 1915, Apr. 2023. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1996-1073/18/8/1915> [Accessed: Oct. 31, 2025].

ประวัติผู้ประพันธ์

สิริวิษ ทัศวน



สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท (วศ.ม. ไฟฟ้า) สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ปัจจุบันดำรง

ตำแหน่งรองศาสตราจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

งานวิจัยที่สนใจ : คุณภาพไฟฟ้ากำลัง ความร้อนในเครื่องจักรกลไฟฟ้า การประยุกต์ใช้ปัญญาประดิษฐ์กับเครื่องจักรกลไฟฟ้า และการควบคุม ติดตามและป้องกันเครื่องจักรไฟฟ้าด้วยระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) และระบบฟาร์มอัจฉริยะ

ชนภัช เดชนาราพัฒน์



สำเร็จการศึกษาระดับปริญญาโท (วศ.ม. ไฟฟ้า) มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ ปัจจุบันดำรงตำแหน่ง

อาจารย์ประจำสาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า

งานวิจัยที่สนใจ : เครื่องจักรกลไฟฟ้า คุณภาพไฟฟ้ากำลัง ระบบควบคุมอัตโนมัติในภาคอุตสาหกรรม

The Study of Various Aspects of User Perception on the Mobile Application of AIoT-Based Air Quality Monitoring and Prediction for PM_{2.5}

Nuth Otanasap^{*}, Pornpimol Bungkomkhun, Tanainan Tanantpapat,
Tida Jindamanee, and Natthawat Saengsupphaseth

Master of Management of Digital Technology Innovation Program,
Faculty of Business Administration, Southeast Asia University
19/1 Petchkasem Road, Nongkhangphlu, Nongkhaem, Bangkok 10160
Corresponding author: nuto@sau.ac.th

Received: 26 September 2025 / Revised 1st : 9 November 2025 / Revised 2nd : 11 November 2025
Accepted: 20 November 2025

Abstract: This research investigates the key factors that affect user satisfaction with the “AIoT-based Air Quality Monitoring System for Real-time PM_{2.5} Prediction in Urban Environments” mobile application. Conducted in the Nong Khaem District of Bangkok, the study employs a quantitative research methodology with a sample of 411 respondents who have used the application. The main objective was to identify the factors that influence user satisfaction.

The study's conceptual framework categorizes 17 independent variables into four primary criteria: Core Functionality & Data Reliability, Information & Presentation Quality, Actionable Insights & User Impact, and User Experience & Social Impact.

Data analysis, which employed descriptive statistics and multiple regression, revealed that respondents generally reported high satisfaction with the system, with a mean satisfaction score of 4.34 (SD = 0.74). The multiple regression model demonstrated a strong fit (R-squared = 0.7909), indicating that the four groups of variables explain a significant portion of the variance in user satisfaction.

In conclusion, the research emphasizes the importance of a well-designed mobile application that not only provides accurate and reliable data but also effectively communicates information through clear visuals, offers actionable advice for personal protection, and ensures a positive overall user experience. The findings present valuable insights for developers and policymakers aiming to enhance the effectiveness and user adoption of environmental monitoring technologies in urban areas.

Keywords: AIoT, PM_{2.5}, Multiple regression model, user experience, AQI

1. Introduction

Air pollution, specifically fine particulate matter (PM_{2.5}) with a diameter of 2.5 micrometers or less, poses a significant

health hazard in urban environments worldwide [1]. The unfavorable health consequences associated with PM_{2.5} exposure [2], ranging from respiratory

infections to cardiovascular crises, necessitate the development of effective monitoring and prediction systems to mitigate these risks. Conventional air quality monitoring methods [3] often rely on fixed stations, which may not capture the spatial and temporal variability of pollution within a city. To address this limitation, combining Artificial Intelligence (AI) with the Internet of Things (IoT) and developing AIoT systems offers a profitable approach for real-time, localized air quality monitoring and forecasting. This study, detailed by Otanasap et al. (2025) [1], focuses on developing an AIoT-based air quality monitoring and forecasting system designed explicitly for PM_{2.5} prediction in metropolitan atmospheres. The system is designed to empower users with timely warnings through a mobile application, enabling them to take proactive measures to safeguard their health. This research contributes to the growing field of intelligent environmental monitoring by leveraging AI's capabilities for data analysis and prediction, coupled with the widespread connectivity of IoT devices. It seeks to enhance the understanding and management of urban air quality.

2. Literature Review

2.1 The development of AIoT-based air quality monitoring systems in urban areas, such as the Nong Khaem district in Bangkok, is driven by the growing demand for accurate, real-time air quality information, particularly PM_{2.5} levels. The work of Otanasap et al. [1] highlights the system's potential for real-time predictions and user alerts via a mobile application. Understanding user perspectives and assessing effectiveness requires examining existing literature on air quality monitoring, user perceptions, and the role of AIoT.

(1) AIoT in Environmental Monitoring: The integration of Artificial Intelligence (AI) with the Internet of Things (IoT) enables the collection of real-time environmental data

and the analysis of this data, allowing for dynamic air quality management beyond traditional monitoring methods [4] [5][6][7].

(2) PM_{2.5} Prediction: Accurate prediction of PM_{2.5} levels is crucial for mitigating health risks. Techniques like time series analysis and Random Forest algorithms have been applied for this purpose, as demonstrated by Otanasap et al. (2025) [1][8][9].

(3) User Perception: The success of monitoring systems relies heavily on user interaction, clarity of information, and the user-friendliness of the interface [1].

(4) Mobile Applications: Mobile apps act as the primary means of delivering air quality information to the public. Their design and usability are vital for user engagement [1].

Explorations into innovative environments for air quality management, as referenced by Schieweck et al. (2018) [10], have set the stage for broader applications in urban settings. The efficacy of the AIoT system by Otanasap et al. (2025) [1] hinges on accurate predictions, which can be evaluated against various machine learning models [11].

Ultimately, user adoption of these technologies is essential to their success, and insights from mobile health applications provide valuable guidance for effective engagement [12][13].

2.2 This study investigates user perception of the "AIoT-based Air Quality Monitoring System for Real-time PM_{2.5} Prediction in Urban Environments" [14]. The research framework is built upon established theories in information systems success, technology acceptance, and health behavior. This review synthesizes literature to develop the theoretical foundation for the 17 variables, which are organized into four primary constructs: (1) Core Functionality & Data Reliability, (2) Information & Presentation Quality, (3) Actionable Insights

& User Impact, and (4) User Experience & Social Impact.

2.2.1 Core Functionality & Data Reliability

This construct (Variables X_1 - X_4) assesses the fundamental performance of the system. It is grounded in technology acceptance and information systems (IS) success models.

1) *Core Functionality* (X_1 , X_3): The usefulness of PM_{2.5} forecasts for planning (X_1) and the adequacy of data update frequency (X_3) are direct indicators of Performance Expectancy, a key concept in the Unified Theory of Acceptance and Use of Technology (UTAUT) [15]. Performance Expectancy is defined as the extent to which an individual believes that using the system will help them improve their job or daily life performance [16]. In the context of a PM_{2.5} app, "performance" refers to the user's ability to plan daily activities and reduce health risks.

2) *Data Reliability* (X_2 , X_4): The perceived accuracy of forecasts (X_2) and the system's consistency (X_4) are crucial components of System Quality and Information Quality, which are essential dimensions of the DeLone & McLean (D&M) IS Success Model. In the context of mHealth, ensuring system reliability and data accuracy is vital. If users view the data as inaccurate (X_2) or the system as unreliable (X_4), their trust in the system diminishes, resulting in decreased usage. Therefore, these variables are fundamental to user acceptance.

2.2.2 Information and Presentation Quality

This construct (Variables X_5 - X_8) assesses how effectively information is communicated to the user, focusing not just on its existence but also on its cognitive accessibility. This closely aligns with the Information Quality dimension of the DeLone and McLean Information Systems Success Model.

1) *Understandability* (X_5 , X_6): The D&M model emphasizes that information must be clear to be effective. This involves the clarity of index values (X_5) and the effectiveness of visual aids, such as charts and colors (X_6). In health communication, this concept is connected to eHealth Literacy, which refers to users' ability to find, understand, and evaluate health information from electronic sources [17]. Effective data visualization (X_6) is crucial for communicating complex risks, such as Air Quality Index (AQI) levels, to a general audience.

2) *Communication Effectiveness* (X_7 , X_8): The system's capability to communicate potential changes (X_7) relates to the "timeliness" and "relevance" aspects of Information Quality. Offering detailed information about PM_{2.5} sources (X_8) increases the "completeness" of the data, providing users with a deeper understanding of their environment and encouraging greater engagement.

2.2.3: Actionable Insights and User Impact

This construct (Variables X_9 - X_{12}) evaluates the system's effectiveness in converting data into actionable insights for users and the perceived advantages, both of which are fundamental aims of health information systems. Theories of health behavior significantly influence this area.

1) *Cues to Action* (X_9 , X_{10}): The Health Belief Model (HBM) offers a solid framework for understanding this construct [18]. Timely warnings and alerts (X_9) serve as a "Cue to Action," an essential element of the HBM that initiates the decision-making process for health protection. Information about potential health risks (X_{10}) directly addresses two other HBM constructs: "Perceived Susceptibility" (the belief in the likelihood of acquiring a condition) and "Perceived Severity" (the belief in the seriousness of a condition).

2) *Perceived Benefits and Behavior Change* (X_{11} , X_{12}): The belief that the system provides protection for oneself and one's family (X_{11}) serves as a direct measure of "Perceived Benefits" [18]. Additionally, the system's positive impact on daily decision-making (X_{12}) is a tangible outcome of this belief. This aligns with the objectives of mHealth interventions, which aim to promote positive behavior changes and enhance health outcomes [19].

2.2.4 User Experience & Social Impact

This final construct (Variables X_{13} - X_{17}) focuses on the system's usability and its impact on individual and community awareness, drawing from usability and social diffusion theories.

1) *User Experience* (X_{13}) refers to how easy it is to use the mobile application interface. This ease of use is a direct measure of Effort Expectancy from the Unified Theory of Acceptance and Use of Technology (UTAUT), which indicates the level of comfort users experience when interacting with the system [17]. Additionally, this concept aligns with Perceived Ease of Use from the original Technology Acceptance Model (TAM), which is a key factor influencing user adoption and satisfaction [20].

2) *Social and Awareness Impact* (X_{14} , X_{15} , X_{16} , X_{17}): This group of variables assesses the broader influence of the system.

2.1) Recommendation of the system to others (X_{15}) serves as an indicator of user satisfaction. It is associated with Social Influence (as outlined in the UTAUT model) and the Diffusion of Innovations theory, wherein peer recommendations are a crucial avenue for adoption [21].

2.2) Providing users with more information (X_{14}) and increasing their awareness of pollution (X_{16}) are indicators of the system's success as an educational and awareness tool.

2.3) The belief that the system can enhance the community environment (X_{17})

reflects users' perceptions of its collective benefits and contributions to social good, which is a strong motivator for sustained engagement [22].

3. Materials and Methods

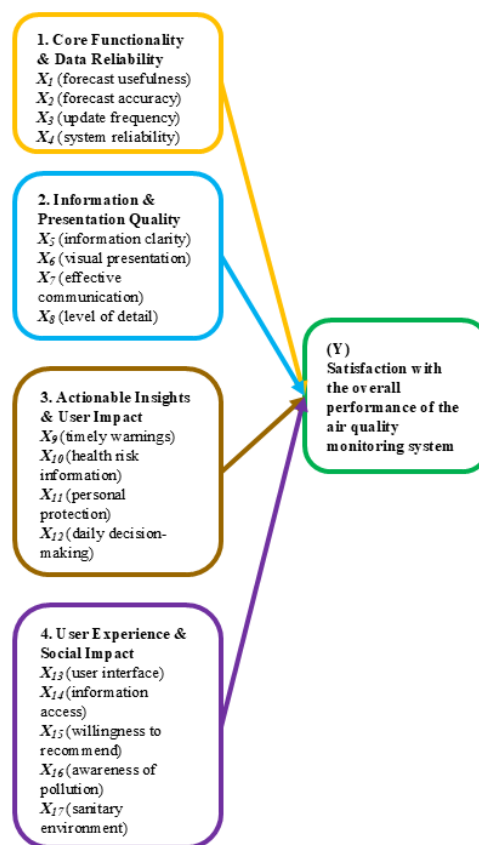


Fig. 1 Research Framework

This research aims to examine the factors affecting users' perceptions of an IoT-based air quality monitoring and forecasting system for PM_{2.5} in urban areas, focusing on a case study in Nong Khaem District, Bangkok. To achieve this research objective, the researcher employed a quantitative research method, using a questionnaire as the data collection tool. The details of the research methodology are as follows:

1) Research framework

- 2) Research hypothesis
- 3) Population group definition and sample selection
- 4) Data sources used in the research
- 5) Research instruments
- 6) Testing the research instruments
- 7) Data collection
- 8) Data analysis and hypothesis testing

3.1 Research Framework

The researcher has selected the variables to be studied to create a research conceptual framework, as shown in Figure 1.

3.2 Research Hypothesis

This study has a total of 17 related variables to test 4 variable groups according to the research conceptual framework, with the following variable groups:

- 1) Core Functionality & Data Reliability
- 2) Information & Presentation Quality
- 3) Actionable Insights & User Impact
- 4) User Experience & Social Impact

3.3 Population group definition and sample selection

- 1) Population used in the research

The population in this research comprises individuals aged 15 years and over who live or work in Nong Khaem District, Bangkok, and who have used the application system before. According to the census, the population of Nong Khaem District is 155,124, but because of a hidden population of residents and workers, the actual number is unknown. The researcher therefore found the sample size by calculating with the Cochran formula [23] With a 95% confidence level as follows:

$$n = \frac{Z^2 * p * (1-p)}{e^2} \quad (1)$$

Where n represents the sample size, p represents the percentage to be randomly selected from the entire population ($p = 0.5$) Z represents the confidence level, set to 95% (equal to 1.96), and e represents the percentage of error ($e = 0.05$) from the random sampling.

The P value must be set to at least 50%. The sample size is at a reliable level. Therefore, to ensure the number distribution is an integer and prevent errors in answering the questionnaire, 411 questionnaires are distributed.

2) Sample Selection Method

This research used non-probability purposive sampling to select only those who had tried the developed app, distributing 411 online Google Form questionnaires.

3.4 Data sources used in the research

1) Primary data sources, the researcher used a quantitative data collection method with an online questionnaire of 411 samples to analyze the data.

2) Secondary data sources, the researcher studied and found information from academic articles and information generally published from reliable sources, both from journals and online databases, both domestic and international.

3.5 Research instruments

This research is quantitative, using a questionnaire to collect data. The questionnaire consists of closed-ended questions about factors affecting the perception of the application presented.

The criteria for scoring the level of opinions on the use of the presented application used a 5-level Likert scale, with values ranging from strongly agree to disagree strongly.

To evaluate the level of opinions on the perception of the use of the presented application, a formula was used to calculate the width of each level according to the concept of Paul E. Green and Donald S. Tull [24], which was calculated as follows:

$$CIW = \frac{(HV - LV)}{NC} \quad (2)$$

$$= (5-1)/5$$

$$= 0.8$$

CIW: Class Interval Width
NC: Number of Classes

HV: Highest Value
LV: Lowest Value

3.6 Testing the research instruments

The researcher tested the validity and reliability of the questionnaire used in the research as follows:

1) Study the guidelines and collect data from related research to be an example for creating the questionnaire.

2) Present the developed questionnaire to 3 experts to check the language accuracy and content accuracy to improve the questionnaire to be accurate and complete according to the objectives of this research study.

3) Test the questionnaire with 20 experimental groups and adjust it according to the suggestions of the experimental group.

4) Use the revised questionnaire with 411 samples.

3.7 Data collection

In this research, the data were collected by online questionnaires. The researcher selected only complete questionnaires from the data, converted the values into codes, and analyzed them using Google Spreadsheet and XLMiner Analysis ToolPak.

3.8 Data analysis and hypothesis testing

The details of the statistics used in the processing are as follows:

1) Data analysis using descriptive statistics, to analyze the demographic characteristics of the sample group, consisting of age, gender, education level, occupation, reasons for staying in Nong Khaem District, duration of stay in Nong Khaem District, with the statistical values used being frequency and percentage, and to analyze data on factors affecting the perception of app usage presented by the statistical values used being the mean and standard deviation.

2) Data analysis using inferential statistics

Two-step statistical analysis tools were used to test the research hypothesis as follows:

Step 1: Factor analysis of variables or group variables that are related together. Variables within the same group will have a strong relationship; the relationship may be in the same or opposite direction. As for variables across groups, there will be no relationship or only a very weak one.

Step 2: The multiple correlation coefficient analysis to analyze the independent variables or factors that affect the perception of the use of the presented 17 variables to see how much they are related and in which direction they are related, including finding the relationship of these factors with the perception of the use of the presented applications. Based on the descriptions provided, the independent variables can be grouped into the following main criteria related to a PM_{2.5} prediction mobile application.

Group 1. Core Functionality & Data Reliability: This group includes variables that assess the application's primary purpose: to provide accurate, up-to-date, and reliable information.

X₁: The PM_{2.5} forecast displayed by the system at levels 1, 3, 6, 12, and 24 hours in advance helps plan your daily activities.

X₂: The forecast of air quality and future PM_{2.5} levels of the system can be accurately predicted.

X₃: The frequency of PM_{2.5} level updates that the system can provide (every 1 hour) is sufficient for your information.

X₄: The system is reliable in providing consistent air quality information.

Group 2. Information & Presentation Quality, this group focuses on how the information is communicated to the user, including ease of understanding and clarity.

X₅: The information that the system displays in advance regarding the AQI PM_{2.5} index values in the Nong Khaem District area is easy to understand.

X₆: The presentation of air quality data in visual form (e.g., charts, colors) is clear and provides sufficiently useful information.

X₇: The system can effectively communicate potential changes in air quality.

X₈: The level of detail provided regarding the sources or factors affecting PM_{2.5} is helpful.

Group 3. Actionable Insights & User Impact: This group includes variables that assess the application's ability to help users make informed decisions and take protective actions.

X₉: The warnings or alerts the system provides when PM_{2.5} levels are high are timely, and what you want from the system.

X₁₀: The system can provide sufficient information on the potential health risks from different PM_{2.5} levels.

X₁₁: The system helps you protect yourself and your family from air pollution.

X₁₂: The system has an impact on your daily decision-making about outdoor activities, which is a positive impact (making you make better decisions about activities).

Group 4. User Experience & Social Impact, this group encompasses factors related to the overall user experience, including ease of use, awareness, and the user's willingness to recommend the application to others.

X₁₃: The interface or user interface of the mobile application is easy to use.

X₁₄: The system helps you get more information about air quality in Nong Khaem District.

X₁₅: Will recommend this air quality monitoring system to your friends and family.

X₁₆: Using this system makes you more aware of PM_{2.5} pollution in your neighborhood.

X₁₇: This type of system can help make the living environment in your residential area more sanitary.

The multiple correlation coefficient, denoted as $R_{y.x_1.x_2.x_3.x_4}$ quantifies the linear relationship between a dependent variable Y and a set of independent variables: *Group 1*

(X_1, X_2, X_3, X_4), *Group 2* (X_5, X_6, X_7, X_8), *Group 3* ($X_9, X_{10}, X_{11}, X_{12}$), and *Group 4* ($X_{13}, X_{14}, X_{15}, X_{16}, X_{17}$). The squared multiple correlation coefficient can be expressed in terms of the correlation matrix. Let R be the correlation matrix of all variables, with the dependent variable Y as the first variable and x_1, x_2, x_3, x_4 as the subsequent variables. The formula is given by:

$$R_{y.x_1.x_2.x_3.x_4}^2 = 1 - \frac{|R|}{|R_{xx}|} \quad (2)$$

where $|R|$ is the determinant of the full correlation matrix R , and $|R_{xx}|$ is the determinant of the submatrix of R containing only the correlations among the independent variables X_1, X_2, X_3, X_4 .

The multiple correlation coefficient $R_{y.x_1.x_2.x_3.x_4}$ is calculated using the formula (2), where $|R|$ is the determinant of the correlation matrix of all variables and $|R_{xx}|$ is the determinant of the correlation matrix of the independent variables.

4. Results and Discussion

This section presents the results of the data analysis, including a descriptive overview of the sample demographics, a statistical summary of the dependent and independent variables, and the findings from the multiple regression analysis.

4.1 General Sample Characteristics

The study was conducted with 411 respondents in Nong Khaem District. The sample's demographic information is detailed below:

- **Age:** The largest age group was 15-24 years old (169 respondents), followed by 45-54 years (83), and 35-44 years (72).
- **Gender:** There was a higher number of male respondents (235) compared to female respondents (173).
- **Educational Level:** The majority of respondents (259) had a bachelor's degree or were currently pursuing one, while 119 had a master's degree or were studying for one.

• **Occupation:** The most common occupations were students (167) and educational personnel (156).

• **Reason for being in the district:** A significant portion of the sample (274 respondents) were in the Nong Khaem District for work or educational purposes.

• **Time in the District:** The most frequent response for time spent in the area was "more than 10 years" (181 respondents), followed by "1-5 years" (163).

4.2 Descriptive Statistics of Variables

The mean values for the dependent and independent variables, measured on a Likert scale from 1 (lowest) to 5 (greatest), indicate a generally high level of satisfaction and positive perception among respondents. 1) Mean Value and Standard Deviation of Each Question

The mean value represents the average score given by respondents, while the standard deviation (SD) indicates the degree of variation in the responses. A lower standard deviation suggests that most respondents had similar opinions, while a higher one indicates a wider range of views. **Dependent Variable (Y):** Satisfaction with the overall performance of the air quality monitoring system is Mean: 4.34, SD: 0.74.

According to Figure 2, Independent Variables (X_1 - X_4), X_1 (AQI PM_{2.5} information is easy to understand): Mean 4.44, SD 0.77. This variable had the highest mean, suggesting that users found the information very easy to understand and that there was strong consensus. X_2 (PM_{2.5} forecast is useful for planning): Mean 4.18, SD 0.79. Users generally found the forecast helpful, though opinions were slightly more varied than in X_1 . X_3 (Warnings are timely and desired): Mean 4.27, SD 0.79. The high mean indicates users felt the warnings were timely and desired, but the responses were slightly dispersed. X_4 (Mobile application interface is easy to use): Mean 4.19, SD 0.81. Users found the interface easy to use, though

opinions on this factor ranged slightly more widely.

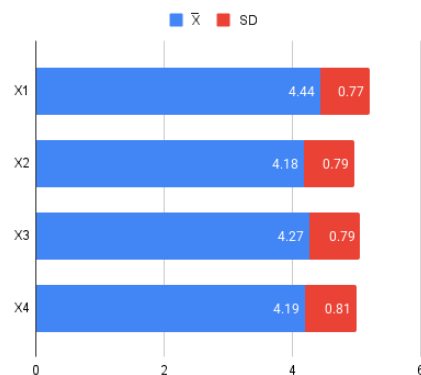


Fig 2. Independent Variables (X_1 - X_4)

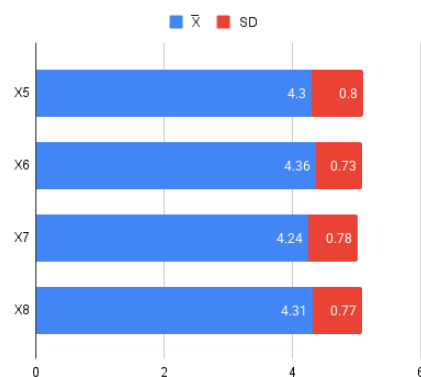


Fig 3. Independent Variables (X_5 - X_8)

According to Figure 3, X_5 (Sufficient health risk information): Mean 4.30, SD 0.80. The high mean indicates that users were satisfied with the amount of health risk information provided. X_6 (Forecast can be accurately predicted): Mean 4.36, SD 0.73. This is one of the highest mean values, suggesting that users have strong confidence in the system's forecast accuracy. The low standard deviation shows firm agreement. X_7 (Helps you get more information): Mean 4.24, SD 0.78. Users felt the system helped them get more information, though responses varied moderately. X_8 (Will recommend to friends and family): Mean

4.31, SD 0.77. A high mean here indicates that users are likely to recommend the system to others.

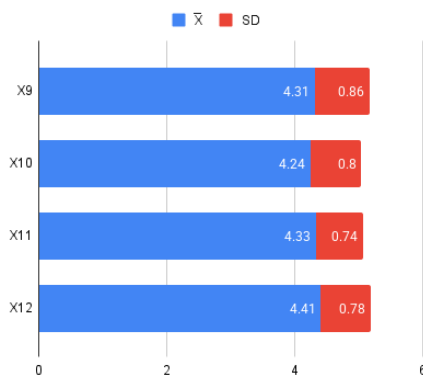


Fig 4. Independent Variables (X_9 - X_{12})

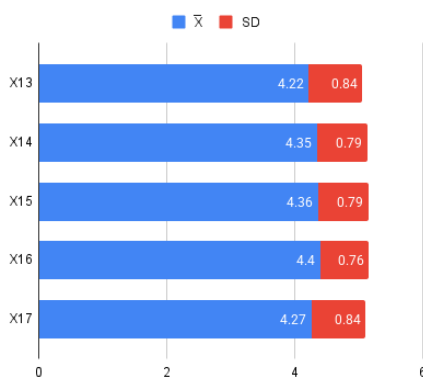


Fig 5. Independent Variables (X_{13} - X_{17})

According to Figure 4, X_9 (Update frequency is sufficient): Mean 4.31, SD 0.86. The high standard deviation here indicates a broader range of opinions on whether the one-hour update frequency is adequate, despite the high mean. X_{10} (System is reliable): Mean 4.24, SD 0.80. Users generally found the system reliable, with a moderate spread in responses. X_{11} (Visual data presentation is clear): Mean 4.33, SD 0.74. This high mean and low standard deviation shows strong agreement that the visual data presentation is clear. X_{12} (Helps protect yourself and family): Mean 4.41, SD 0.78. This is one of the highest mean scores,

indicating that users feel the system is very effective in helping them protect their families from pollution.

According to Figure 5, X_{13} (Can effectively communicate changes): Mean 4.22, SD 0.84. While the mean is high, the standard deviation is also high, indicating varied opinions on the effectiveness of communicating changes. X_{14} (Makes you more aware of pollution): Mean 4.35, SD 0.79. Users strongly feel that the system increases their awareness of PM_{2.5} pollution. X_{15} (Detail on sources is helpful): Mean 4.36, SD 0.79. A very high mean score suggests that users found the detailed information about pollution sources helpful. X_{16} (Impact on daily decision-making): Mean 4.40, SD 0.76. This high mean indicates that the system has a very positive impact on users' daily decisions about outdoor activities. X_{17} (Helps make living environment more sanitary): Mean 4.27, SD 0.84. While the average score is high, the high standard deviation suggests a broader range of opinions on whether the system improves the sanitary conditions of their living environment.

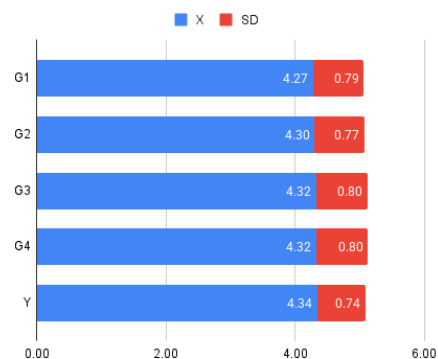


Fig 6. Independent Variable Groups (G_1 - G_4) and Dependent Variable (Y)

According to Figure 6, the mean satisfaction with the air quality monitoring system (Y) was 4.34, with a standard

deviation of 0.74. The average scores for the independent variable groups were also consistently high:

G₁: Core Functionality & Data Reliability: Mean of 4.27 (SD = 0.79).

G₂: Information & Presentation Quality: Mean of 4.30 (SD = 0.77).

G₃: Actionable Insights & User Impact: Mean of 4.32 (SD = 0.80).

G₄: User Experience & Social Impact: Mean of 4.32 (SD = 0.80).

The high mean of 4.34 indicates that respondents were, on average, very satisfied with the system's overall performance. The low standard deviation suggests high agreement among users regarding their satisfaction.

4.3 The results of the multiple regression analysis

This section presents the results of the multiple regression analysis conducted on the independent variable groups to determine their influence on the dependent variable, "Satisfaction with the overall performance of the air quality monitoring system" (Y). The analysis is divided into four main sections, corresponding to each group of independent variables.

Dependent Variable (Y): Satisfaction with the overall performance of the air quality monitoring system

4.3.1 Independent Variable Group 1. Core Functionality & Data Reliability

This group includes variables that assess the application's primary purpose: to provide accurate, up-to-date, and reliable information.

According to Table 1, Core Functionality & Data Reliability, the regression model for this group of variables (X_1 - X_4) yielded a **Multiple R** of 0.8092 and an **R-squared** of 0.6547. This indicates that approximately 65.47% of the variability in user satisfaction can be explained by the variables in this group. The model was found to be statistically significant, with a significance F-value of 0.

Upon examining the individual coefficients:

X₁ (forecast usefulness) was not a statistically significant predictor of satisfaction, as its p-value was 0.4196, which is greater than the significance level of 0.05.

X₂ (forecast accuracy) was a highly significant predictor, with a p-value of 0. Its positive coefficient of 0.2892 suggests that forecast accuracy strongly contributes to user satisfaction.

X₃ (update frequency) was also a significant predictor, with a p-value of 0.0120. The positive coefficient of 0.0971 indicates that a higher update frequency is associated with greater satisfaction.

X₄ (system reliability) was a highly significant predictor, with a p-value of 0. The large positive coefficient of 0.4333 suggests that a reliable system is the most influential factor in this group, leading to higher user satisfaction.

4.3.2 Independent Variable Group 2. Information & Presentation Quality

This group focuses on how the information is communicated to the user, including ease of understanding and clarity.

According to Table 2, Information & Presentation Quality, the regression analysis for this group (X_5 to X_8) revealed a strong model fit, with a **Multiple R** of 0.8982 and an **R-squared** of 0.8068, indicating that these variables can explain 80.68% of the variability in satisfaction. The model was statistically significant with a **Significance F of 0**. All variables in this group were found to be statistically significant:

X₅ (information clarity) had a p-value of 0.0277, indicating it is a significant predictor.

X₆ (visual presentation) was highly significant, with a p-value of 0. Its positive coefficient of 0.2016 shows a clear link between a good visual interface and increased satisfaction.

X₇ (effective communication) was highly significant with a p-value of 0. The

coefficient of 0.4479 suggests it is a powerful predictor of user satisfaction.

X₈ (level of detail) was also highly significant, with a p-value of 0. The positive coefficient of 0.2841 indicates that providing helpful information about PM_{2.5} factors positively influences satisfaction.

4.3.3 Independent Variable Group 3. Actionable Insights & User Impact

This group includes variables that measure the application's ability to help users make informed decisions and take protective actions.

According to Table 3, Actionable Insights & User Impact, the regression model for this group (X₉-X₁₂) was significant, with a **Multiple R** of 0.8630 and an **R-squared** of 0.7448. This means that these factors can explain 74.48% of the variability in satisfaction. The model's Significance **F** was 0. The analysis of individual predictors showed mixed results:

X₉ (timely warnings) was not statistically significant, with a p-value of 0.9547. This suggests that the timeliness of warnings, on its own, does not significantly predict satisfaction.

X₁₀ (health risk information) was a highly significant predictor, with a p-value of 0. The strong positive coefficient of 0.3505 indicates that providing information on health risks is a key driver of satisfaction.

X₁₁ (personal protection) was also highly significant, with a p-value of 0. With a coefficient of 0.4747, it had the most substantial positive impact on satisfaction within this group, highlighting the importance of the app helping users protect themselves and their families.

X₁₂ (daily decision-making) was a statistically significant predictor, with a p-value of 0.0017. Its positive coefficient of 0.1104 indicates that the system's impact on better decision-making is also a positive factor for satisfaction.

Table 1 Core Functionality & Data Reliability

Regression Statistics		ANOVA				
		<i>df</i>	<i>SS</i>	<i>MS</i>	<i>F</i>	<i>Sig. F</i>
Multiple R	0.8092	Regression 4	147.9629	36.9907	192.4740	0
R Square	0.6547	Residual 406	78.0274	0.1922		
Adjusted R Square	0.6513	Total 410	225.9903			
Standard Error	0.4384					
Observations	411					

	<i>Coefficients</i>	<i>Std. Err.</i>	<i>t Stat</i>	<i>P-value</i>	<i>Lower 95%</i>	<i>Upper 95%</i>
Intercept	0.7494	0.1417	5.2905	0.0000	0.4710	1.0279
X₁	0.0335	0.0415	0.8079	0.4196	-0.0480	0.1151
X₂	0.2892	0.0397	7.2913	0.0000	0.2113	0.3672
X₃	0.0971	0.0385	2.5221	0.0120	0.0214	0.1728
X₄	0.4333	0.0403	10.7570	0.0000	0.3541	0.5125

Table 2 Information & Presentation Quality

Regression Statistics		ANOVA	df	SS	MS	F	Sig. F
Multiple R	0.8982	Regression	4	182.3402	45.5850	423.9976	0
R Square	0.8068	Residual	406	43.6501	0.1075		
Adjusted R Square	0.8049	Total	410	225.9903			
Standard Error	0.3279						
Observations	411						

	Coefficients	Std. Err.	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%
Intercept	0.1013	0.1112	0.9112	0.3627	-0.1173	0.3199
X ₅	0.0553	0.0250	2.2091	0.0277	0.0061	0.1044
X ₆	0.2016	0.0364	5.5339	0.0000	0.1300	0.2732
X ₇	0.4479	0.0357	12.5382	0.0000	0.3777	0.5181
X ₈	0.2841	0.0288	9.8551	0.0000	0.2274	0.3407

Table 3 Actionable Insights & User Impact

Regression Statistics		ANOVA	df	SS	MS	F	Sig. F
Multiple R	0.8630	Regression	4	168.3259	42.0815	296.2851	0
R Square	0.7448	Residual	406	57.6643	0.1420		
Adjusted R Square	0.7423	Total	410	225.9903			
Standard Error	0.3769						
Observations	411						

	Coefficients	Std. Err.	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%
Intercept	0.3185	0.1222	2.6070	0.0095	0.0783	0.5587
X ₉	-0.0019	0.0332	-0.0568	0.9547	-0.0671	0.0634
X ₁₀	0.3505	0.0333	10.5095	0.0000	0.2849	0.4160
X ₁₁	0.4747	0.0387	12.2628	0.0000	0.3986	0.5508
X ₁₂	0.1104	0.0350	3.1557	0.0017	0.0416	0.1792

Table 4 User Experience & Social Impact

Regression Statistics		ANOVA	df	SS	MS	F	Sig. F
Multiple R	0.8319	Regression	5	156.4085	31.2817	182.0748	0
R Square	0.6921	Residual	405	69.5818	0.1718		
Adjusted R Square	0.6883	Total	410	225.9903			
Standard Error	0.4145						
Observations	411						

	Coefficients	Std Err.	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%
Intercept	0.3514	0.1351	2.6009	0.0096	0.0858	0.6170
X ₁₃	0.1797	0.0337	5.3259	0.0000	0.1134	0.2461
X ₁₄	0.1313	0.0426	3.0850	0.0022	0.0476	0.2149
X ₁₅	0.2541	0.0480	5.2929	0.0000	0.1598	0.3485
X ₁₆	0.2288	0.0392	5.8361	0.0000	0.1517	0.3059
X ₁₇	0.1269	0.0340	3.7339	0.0002	0.0601	0.1936

Table 5 Group Analysis

Regression Statistics		ANOVA	df	SS	MS	F	Sig. F
Multiple R	0.8893	Regression	4	178.7360	44.6840	383.9167	0
R Square	0.7909	Residual	406	47.2543	0.1164		
Adjusted R Square	0.7888	Total	410	225.9903			
Standard Error	0.3412						
Observations	411						

	Coefficients	Std. Err.	t Stat	P-value	Lower 95%	Upper 95%
Intercept	-0.1583	0.1169	-1.3540	0.1765	-0.3882	0.0715
Group 1.	-0.0447	0.0569	-0.7845	0.4332	-0.1566	0.0673
Group 2.	0.6995	0.0623	11.2239	0.0000	0.5770	0.8220
Group 3.	0.1791	0.0644	2.7828	0.0056	0.0526	0.3057
Group 4.	0.2097	0.0643	3.2603	0.0012	0.0832	0.3361

4.3.4 Independent Variable Group 4. User Experience & Social Impact

This group encompasses factors related to the overall user experience, including ease of use, awareness, and the user's willingness to recommend the application to others.

According to Table 4.3.4 User Experience & Social Impact, this group (X_{13} to X_{17}) showed a **Multiple R** of 0.8319 and an **R-squared** of 0.6921, indicating that these variables explain 69.21% of the variability in satisfaction. The model was statistically significant with a **Significance F** of 0.

All five variables in this group were statistically significant predictors of satisfaction:

X_{13} (**user interface**) had a p-value of 0, indicating a strong relationship.

X_{14} (**information access**) had a p-value of 0.0022, confirming its significance.

X_{15} (**willingness to recommend**) was highly significant with a p-value of 0. The coefficient of 0.2541 indicates a strong association between user satisfaction and willingness to recommend the system to others.

X_{16} (**awareness of pollution**) had a p-value of 0, indicating a highly significant relationship.

X_{17} (**sanitary environment**) was significant with a p-value of 0.0002.

4.3.5 Summary of Group Analysis

- Independent Variable Group 1. Core Functionality & Data Reliability
- Independent Variable Group 2. Information & Presentation Quality
- Independent Variable Group 3. Actionable Insights & User Impact
- Independent Variable Group 4. User Experience & Social Impact
- Dependent Variable (Y): Satisfaction with the overall performance of the air quality monitoring system

A final regression model combining all four groups as independent variables was also conducted, with "Satisfaction" as the dependent variable. The model was significant, with a **Multiple R of 0.8893** and an **R-squared of 0.7909**. This suggests that the combination of these four criteria explains a substantial portion of the variability in user satisfaction with the mobile application. The results of this final model showed that three of the four groups were statistically significant predictors of satisfaction:

1) Group 2. Information & Presentation Quality was a highly significant predictor (p-value = 0) with the largest coefficient (0.6995), indicating the most important positive impact on user satisfaction.

2) Group 3. Actionable Insights & User Impact was also a significant predictor, with a p-value of 0.0056.

3) Group 4. User Experience & Social Impact was a significant predictor (p-value = 0.0012).

4) Group 1. Core Functionality & Data Reliability was not a significant predictor in this combined model (p-value = 0.4332). This suggests that while individual variables within this group (such as X2 and X4) are essential, when grouped together, this criterion is not a significant standalone predictor of satisfaction compared to the others.

5. Conclusion and Future Work

This study presents a framework to assess user perceptions of an AIoT-based air quality monitoring and prediction system. By integrating 17 key variables from information systems (D&M, UTAUT) and health behavior (HBM), we identify the primary drivers of user satisfaction, ranging from system reliability to its influence on personal decisions and social awareness.

The findings validate the system developed by Otanasap et al. (2025) [14] and provide a roadmap for future enhancements and research. Here are suggestions for future work, categorized by key constructs:

1) **Core Functionality & Data Reliability:** Enhance Predictive Accuracy, Explore advanced machine learning techniques to improve long-range predictions. Integrate Diverse Data Sources, Incorporate additional data like real-time traffic and localized weather patterns for more accurate air quality predictions.

2) **Information & Presentation Quality:** Personalized Visualization, Conduct A/B testing on various visualizations to find the most effective formats for different user segments. Dynamic Source

Attribution: Develop features that provide real-time insights into pollution sources, such as "high traffic" or "agricultural burning."

3) **Actionable Insights & User Impact:** Longitudinal Behavior Study: Conduct long-term studies to measure the system's impact on user behavior and health. Smart Device Integration: Integrate with smart home devices and wearables to create an automatic response system for air quality alerts.

4. **User Experience & Social Impact:** Qualitative Deep Dive, Supplement quantitative findings with interviews and focus groups to understand user motivations and experiences. Community Policy Impact: Examine the system's role in local advocacy and policy-making to empower community engagement on air quality issues. Broader Demographic and Geographic Studies: Replicate the study in various settings to explore the differences in user perceptions across demographics and locations.

References

- [1] Otanasap, N., Tadsuan, S., & Chalermasuk, C. (2024). An AIoT-based air quality monitoring system for real-time PM2.5 prediction in urban environments. *ASEAN Journal of Scientific and Technological Reports*, 28(1), e255168. <https://doi.org/10.55164/ajstr.v28i1.255168>
- [2] Air Pollution and Cardiovascular Disease Basics | US EPA. (2025, March 20). US EPA. <https://www.epa.gov/air-research/air-pollution-and-cardiovascular-disease-basics>

- [3] Dias, D., & Tchepel, O. (2018). Spatial and temporal dynamics in air pollution exposure assessment. *International journal of environmental research and public health*, 15(3), 558. <https://doi.org/10.3390/ijerph15030558>
- [4] Otanasap, N., Chalermasuk, C., & Bungkomkhun, P. (2019). A Survey of IoT: Advances in Smart and Dynamic Environmental Monitoring. In the 8th International Conference on Environmental Engineering, Science and Management.
- [5] Ip_Admin. (2024, November 29). Artificial intelligence in IoT: Enhancing connectivity and efficiency. Device Authority. <https://deviceauthority.com/artificial-intelligence-in-iot-enhancing-connectivity-and-efficiency/>
- [6] Ibm. (2023, May 12). Internet of Things. What is the Internet of Things (IoT)? Retrieved May 20, 2025, from <https://www.ibm.com/think/topics/internet-of-things>
- [7] Banciu, C., Florea, A., & Bogdan, R. (2024). Monitoring and Predicting Air Quality with IoT Devices. *Processes*, 12(9), 1961. <https://doi.org/10.3390/pr12091961>
- [8] Zhang, Y., Sun, Q., Liu, J., & Petrosian, O. (2023). Long-Term forecasting of air pollution particulate matter (PM_{2.5}) and analysis of influencing factors. *Sustainability*, 16(1), 19. <https://doi.org/10.3390/su16010019>
- [9] Makhdoomi, A., Sarkhosh, M., & Ziaei, S. (2025). PM_{2.5} concentration prediction using machine learning algorithms: an approach to virtual monitoring stations. *Scientific Reports*, 15(1). <https://doi.org/10.1038/s41598-025-92019-3>
- [10] Schieweck, A., Uhde, E., Salthammer, T., Salthammer, L. C., Morawska, L., Mazaheri, M., & Kumar, P. (2018). Smart homes and the control of indoor air quality. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 94, 705-718.
- [11] Iskandaryan, D., Ramos, F., & Trilles, S. (2020). Air quality prediction in smart cities using machine learning technologies based on sensor data: a review. *Applied Sciences*, 10(7), 2401.
- [12] Beratarrechea, A., Lee, A. G., Willner, J. M., Jahangir, E., Ciapponi, A., & Rubinstein, A. (2014). The impact of mobile health interventions on chronic disease outcomes in developing countries: a systematic review. *Telemedicine and e-Health*, 20(1), 75-82.
- [13] Santo, K., Richtering, S. S., Chalmers, J., Thiagalingam, A., Chow, C. K., & Redfern, J. (2016). Mobile phone apps to improve medication adherence: a systematic stepwise process to identify high-quality apps. *JMIR mHealth and uHealth*, 4(4), e6742.
- [14] Otanasap, N., Tadsuan, S., & Chalermasuk, C. (2025). An AIoT-based air quality monitoring system for real-time PM_{2.5} prediction in

- urban environments. ASEAN Journal of Scientific and Technological Reports, 28(1), e255168.
- [15] Cheung, G., Chan, K., Brown, I., & Wan, K. (2016, June). Teachers' knowledge and technology acceptance: A study on the adoption of clickers. In Proceedings of the International Conference on e-Learning (pp. 46-51). Kidmore End: Academic Conferences International.
- [16] Venkatesh, V., Morris, M. G., Davis, G. B., & Davis, F. D. (2003). User acceptance of information technology: Toward a unified view. MIS Quarterly, 27(3), 425-478.
- [17] Norman, C. D., & Skinner, H. A. (2006). eHealth literacy: essential skills for consumer health in a networked world. Journal of medical Internet research, 8(2), e506.
- [18] Rosenstock, I. M. (1974). Historical origins of the health belief model. Health education monographs, 2(4), 328-335.
- [19] Beratarrechea, A., Lee, A. G., Willner, J. M., Jahangir, E., Ciapponi, A., & Rubinstein, A. (2014). The impact of mobile health interventions on chronic disease outcomes in developing countries: a systematic review. Telemedicine and e-Health, 20(1), 75-82.
- [20] Davis, F. D. (1989). Perceived usefulness, perceived ease of use, and user acceptance of information technology. MIS quarterly, 319-340.
- [21] Rogers, E. (2003). Diffusion of Innovations 5th.
- [22] Santo, K., Richtering, S. S., Chalmers, J., Thiagalingam, A., Chow, C. K., & Redfern, J. (2016). Mobile phone apps to improve medication adherence: a systematic stepwise process to identify high-quality apps. JMIR mHealth and uHealth, 4(4), e6742.
- [23] Ionas, I. G. (2022). Quantitative research.
- [24] Green, P., Tull, D., & Albaum, G. (1988). Research for marketing decisions.

Authors' Biography:



Nuth Otanasap, Ph.D.,
Assistant Professor,
Director of the Master of
Management of Digital
Technology Innovation

Program, Faculty of Business
Administration, Southeast Asia
University, Bangkok, Thailand.

<https://orcid.org/0000-0002-8713-3951>



Pornpimol Bungkomkhun
Ph.D., Lecturer of the
Master of Management of
Digital Technology
Innovation Program,
Faculty of Business

Administration, Southeast Asia
University, Bangkok, Thailand.



Tanainan Tanantpapat
Ph.D., Lecturer of the
Master of Management of
Digital Technology
Innovation Program,

Faculty of Business Administration,
Southeast Asia University, Bangkok,
Thailand.



Tida Jindamanee
Lecturer of the Faculty of
Arts and Sciences,
Southeast Asia University
E-mail:tidaj@sau.ac.th



Natthawat
Saengsupphaseth
Ph.D., Lecturer of the
Master of Management of
Digital Technology
Innovation Program, Faculty of Business
Administration, Southeast Asia
University, Bangkok, Thailand.

ผลกระทบของการไหลกึ่งเสถียรที่มีต่อลักษณะการไหลของ R600a ใน ท่อคาปิลลารีที่ใช้ในระบบทำความเย็น

Effects of Metastable flow on Flow Characteristics of R600a in Capillary Tubes Used in Refrigeration Systems

ปราโมทย์ ลายประดิษฐ์ และ วรเชษฐ์ ภิรมย์ศักดิ์*

Pramote Laipradit and Worachest Pirompugd*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา

169 ถนนลงหาดบางแสน ตำบลแสนสุข อำเภอเมืองชลบุรี จังหวัดชลบุรี 20131

*ผู้นิพนธ์ประสานงาน : worapiro@eng.buu.ac.th

วันที่รับบทความ: 16 ตุลาคม 2568 / วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 1 : 1 ธันวาคม 2568 / วันที่แก้ไขบทความ ครั้งที่ 2 : 3 ธันวาคม 2568

วันที่ตอบรับการตีพิมพ์: 9 ธันวาคม 2568

บทคัดย่อ งานวิจัยนี้ ได้นำเสนอแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับทำนายคุณสมบัติของสารทำความเย็น R600a ที่ไหลผ่านท่อคาปิลลารี โดยได้รวมผลกระทบของการไหลกึ่งเสถียรเข้าไปด้วย สำหรับการไหลกึ่งเสถียรนั้น จะเกิดขึ้นเนื่องจากสารทำความเย็น R600a จะยังคงไม่เปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นไอ แม้ว่า สารทำความเย็น R600a จะมีความดันต่ำกว่าความดันไอแล้วก็ตาม โดยตำแหน่งที่สารทำความเย็น R600a จะเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นไอนั้น จะเลื่อนออกไปจากตำแหน่งเดิม ทำให้อัตราการไหลเชิงมวลของสารทำความเย็น R600a มีค่ามากขึ้น สำหรับผลลัพธ์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้นนี้ ได้ถูกเปรียบเทียบกับผลลัพธ์จากงานวิจัยในอดีต ซึ่งพบว่า มีค่าใกล้เคียงกันและมีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน ทำให้มั่นใจในความถูกต้องได้ในระดับหนึ่ง นอกจากนี้ ในงานวิจัยนี้ ยังได้นำเสนอผลกระทบของการไหลกึ่งเสถียรที่มีต่ออัตราการไหลเชิงมวลที่สภาวะต่างๆ โดยจะพบว่า เมื่อคิดผลกระทบจากการไหลกึ่งเสถียร จะทำให้อัตราการไหลเพิ่มขึ้นสูงสุดถึง 13.08% ในงานวิจัยนี้ ยังได้นำเสนอแผนภาพสำหรับระบุสภาวะการทำงานและขนาดของท่อคาปิลลารีที่ใช้สารทำความเย็น R600 ไว้ด้วยแล้ว

คำสำคัญ: การไหลกึ่งเสถียร, การไหลเนื้อเดียว, ท่อคาปิลลารี, ระบบทำความเย็น, R600a

Abstract This research presents a mathematical model for predicting the properties of R600a refrigerant flowing through a capillary tube, incorporating the effects of metastable flow. Metastable flow occurs because the refrigerant R600a will not change from liquid to vapor even when the pressure is lower than its vapor pressure. The location where the refrigerant R600a changes from liquid to vapor is shifted further away from its original location, resulting in a higher flow rate for the R600a refrigerant. The results of the developed mathematical model were compared with those from literature. The comparison reveals that the values are similar and trend in the same direction, ensuring a certain degree of accuracy. This study also presents the effect of metastable flow on the mass flow rate under various operating conditions. It was found that accounting for the metastable flow effect can increase the mass flow rate by up to 13.08%. Two selection charts are also presented to indicate the operating conditions and capillary tube sizes for R600a.

Keywords: Capillary tube, Homogeneous flow, Metastable flow, Refrigeration, R600a.

1. บทนำ

ในปัจจุบัน ประชาชนในประเทศไทยได้ใช้เครื่องทำความเย็นและเครื่องปรับอากาศตามบ้านเรือนและอุตสาหกรรมต่างๆ อย่างมากมาย โดยประเทศไทยส่งออกเครื่องปรับอากาศเป็นมูลค่า 6.9 พันล้านเหรียญสหรัฐ ซึ่งคิดเป็น 10.3% หรือเป็นอันดับ 3 ของโลก ซึ่งเป็นรองสาธารณรัฐประชาชนจีนและเม็กซิโก ที่มีมูลค่าการส่งออกเป็นอันดับ 1 และ 2 ของโลก ตามลำดับ [1] ท่อรูเล็ก หรือที่นิยมเรียกกันว่า ท่อคาปิลลารี เป็นอุปกรณ์สำคัญชิ้นหนึ่งที่มักจะถูกใช้ในเครื่องทำความเย็นขนาดเล็ก โดยท่อคาปิลลารีมีหน้าที่ควบคุมอัตราการไหลและลดความดันของสารทำความเย็น นอกจากนี้ ในปัจจุบัน มีการใช้สารทำความเย็น R600a (Isobutane) ในระบบทำความเย็นขนาดเล็กเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง เช่น การใช้ R600a ในตู้เย็นและเครื่องปรับอากาศ เป็นต้น เนื่องจาก R600a มีศักยภาพสูงในการทดแทนสารทำความเย็นที่ก่อให้เกิดภาวะโลกร้อน ด้วยคุณสมบัติที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและประสิทธิภาพด้านพลังงาน ด้วยเหตุนี้ จึงมีงานวิจัยจำนวนมาก ที่ศึกษาเกี่ยวกับการไหลของ R600a ผ่านท่อคาปิลลารี

จากการสืบค้นงานวิจัยในอดีต พบว่า ในปี ค.ศ. 2017, Yang และคณะ [2] ได้ศึกษาโดยทำการทดลองและนำเสนอสมการประสิทธิภาพความร้อน และความดันลดสำหรับการไหลของ R600a ผ่านท่อคาปิลลารีที่อยู่ในแนวราบ ในปี ค.ศ. 2025 Knabben และ Boeng [3] นำเสนอการวิเคราะห์ระดับชิ้นส่วน (Component-level analysis) และแบบจำลองการไหลที่เกือบจะเป็นเนื้อเดียวกัน (Quasi-homogeneous flow model) สำหรับการไหลในช่วงสองสถานะ เพื่อวิเคราะห์การไหลของ R600a ผ่านท่อคาปิลลารีที่ถูกเชื่อมยึดติดกับท่อด้านเข้าของเครื่องแลกเปลี่ยนความร้อน จากผลลัพธ์ พบว่าวิธีการคำนวณดังกล่าวนี้ สามารถทำนายอัตราการไหล

ของ R600a ได้อย่างแม่นยำ โดยมีความผิดพลาดไม่เกิน $\pm 10\%$ สำหรับการเลือกขนาดและสภาวะการทำงานของท่อคาปิลลารีนั้น Pirompugd และ Wongwises [4] ได้นำเสนอแผนภาพสำหรับเลือกขนาดและกำหนดสภาวะการทำงานของท่อคาปิลลารีที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.63 mm และมีความยาว 2.03 m โดยใช้สารทำความเย็น R134a, R404A, R407B, R407C และ R410A นอกจากนี้ Pirompugd และ Wongwises [4] ยังได้นำเสนอแผนภาพสำหรับแก้ไขขนาดของท่อคาปิลลารี เพื่อให้สามารถประยุกต์ใช้กับท่อคาปิลลารีขนาดอื่นๆ ในปี พ.ศ. 2568 ไกรวิชญ์ และคณะ [5] ได้นำเสนอแผนภาพสำหรับเลือกขนาดและสภาวะการทำงานของท่อคาปิลลารีที่ใช้ R600a เป็นสารทำความเย็น โดยไกรวิชญ์และคณะ [5] ได้อาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ในลักษณะเดียวกับ Pirompugd และ Wongwises [4]

ในเชิงปฏิบัติ การไหลของสารทำความเย็นใดๆ รวมถึง R600a ผ่านท่อคาปิลลารี จะเกิดปรากฏการณ์การไหลกึ่งเสถียร (Metastable flow) ซึ่งสารทำความเย็นจะยังคงไม่เปลี่ยนสถานะ แม้ว่า จะมีความดันต่ำกว่าความดันไอแล้วก็ตาม ปรากฏการณ์นี้จะเกิดในช่วงสั้นๆ ทำให้ในความเป็นจริงแล้ว ความยาวของท่อคาปิลลารีที่คำนวณได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ตามที่ปรากฏในงานวิจัยของ Pirompugd และ Wongwises [4] และไกรวิชญ์และคณะ [5] จะมีค่าน้อยกว่าความเป็นจริงอยู่เล็กน้อย

จากการสืบค้นงานวิจัยในอดีต พบว่า ในปี ค.ศ. 1990, Chen และคณะ [6] ได้นำเสนอสมการสำหรับคำนวณความดันลดในช่วงการไหลกึ่งเสถียร โดยจะเป็นฟังก์ชันของปริมาตรจำเพาะ องศาเยือก ความตึงผิว อุณหภูมิวิกฤติ และเส้นผ่านศูนย์กลาง ในปี ค.ศ. 2007, Valladares [7] ได้ศึกษาและพัฒนาแบบจำลองเชิงตัวเลข 1 มิติเพื่อนำเสนอสมการสำหรับแสดงคุณลักษณะการไหลของสารทำความเย็นผ่านท่อคาปิลลารีแบบที่มี

การแลกเปลี่ยนความร้อนกับสิ่งแวดล้อม โดยในแบบจำลองดังกล่าวนี้ ได้มีการรวมอิทธิพลของการไหลกึ่งเสถียรเข้าไปด้วย

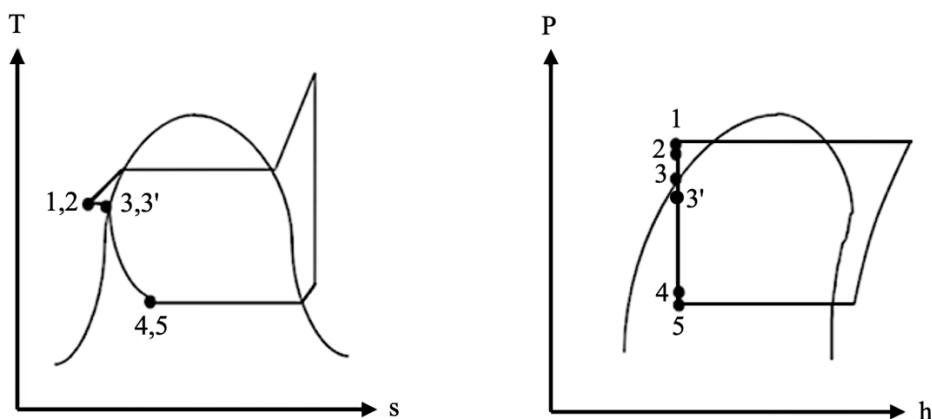
อย่างไรก็ตาม จากการสืบค้นข้อมูลต่างๆ รวมถึงข้อมูลจาก ASHRAE Handbook 2022 [8] ไม่ปรากฏบทความวิจัยหรือเอกสารที่นำเสนอแผนภาพสำหรับเลือกขนาดและสภาวะการทำงานของท่อคาปิลลารีที่ใช้สารทำความเย็น R600a แม้ว่า ไกรวิชญ์และคณะ [5] จะได้นำเสนอแผนภาพสำหรับเลือกขนาดและสภาวะการทำงานของท่อคาปิลลารีที่ใช้ R600a ไว้ แต่ในงานวิจัยดังกล่าวนี้ ไม่ได้รวมผลกระทบของการไหลกึ่งเสถียร (Metastable flow) เข้าไปด้วย ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ จะเป็นการศึกษาอิทธิพลของการไหลกึ่งเสถียรที่มีต่อขนาดของท่อคาปิลลารีหรือท่อรูเล็ก ที่ใช้ R600a เป็นสารทำความเย็น และนำเสนอแผนภาพสำหรับเลือกขนาดท่อคาปิลลารีที่ใช้สารทำความเย็น R600a ซึ่งรวมอิทธิพลของการไหลกึ่งเสถียรเข้าไปด้วย

2. แบบจำลองทางคณิตศาสตร์

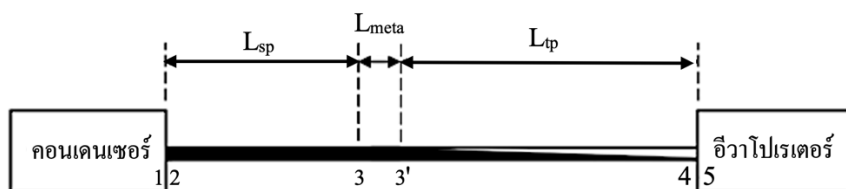
ในการพัฒนาแบบจำลองทางคณิตศาสตร์สำหรับการไหลของสารทำความเย็น R600a ผ่านท่อคาปิลลารีนั้น จะอาศัยแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่นำเสนอไว้โดย ไกรวิชญ์ และคณะ [5] สำหรับการไหลสถานะเดียว และการไหลสองสถานะ โดยมีตัวแปรอิสระ คือ อุณหภูมิคอนเดนเซอร์ (T_c), อุณหภูมิอีวาโปเรเตอร์ (T_e), องศาเย็นยิ่ง (ΔT), เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อคาปิลลารี (d), ความขรุขระต่อเส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อคาปิลลารี (ε/d) และอัตราการไหลโดยมวลของสารทำความเย็น R600a ($\dot{m}$) สำหรับสมมติฐานที่สำคัญ คือ การไหลทั้งในช่วงสถานะเดียวและสองสถานะ เป็นการไหลเนื้อเดียว

อย่างไรก็ตาม ไกรวิชญ์ และคณะ [5] ไม่ได้รวมผลกระทบของการไหลกึ่งเสถียร (Metastable flow) เข้าไปในแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของพวกเขา แต่ในงานวิจัยนี้ จะพิจารณาผลกระทบของการไหลกึ่งเสถียร (Metastable flow) เข้าไปด้วย ซึ่งความดันที่ลดลงในช่วงการไหลกึ่งเสถียร ($P_3 - P_3'$) จะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิอิ่มตัว (T_{sat}), อุณหภูมิวิกฤต (T_{cr}), องศาเย็นยิ่ง (ΔT), ปริมาตรจำเพาะ (v), เส้นผ่านศูนย์กลางภายในท่อคาปิลลารี (d) และความตึงผิว (σ) โดยตำแหน่งต่างๆ สามารถแสดงได้ดังรูปที่ 1 และ 2

จากรูปที่ 1 และ 2 สารทำความเย็นจะไหลออกจากคอนเดนเซอร์ ณ ตำแหน่งที่ 1 โดยมีสถานะเป็นของเหลวเย็นเยือก จากนั้น สารทำความเย็นจะไหลเข้าสู่ท่อคาปิลลารี ณ ตำแหน่งที่ 2 จากนั้น สารทำความเย็นจะไหลไปตามท่อคาปิลลารี โดยจะมีความดันลดลงเรื่อยๆ จนถึงตำแหน่งที่ 3 โดยในช่วง 1-3 นี้ สารทำความเย็น R600a จะอยู่ในสถานะของเหลวเย็นเยือก (Subcooled liquid) และ ณ ตำแหน่งที่ 3 นี้ สารทำความเย็นจะมีความดันเท่ากับความดันอิ่มตัว (Saturated pressure) ดังนั้น เมื่อสารทำความเย็นไหลต่อไปจากตำแหน่งนี้ สารทำความเย็น บางส่วน ควรจะต้องกลายเป็นไอ แต่ในความเป็นจริง สารทำความเย็น R600a จะยังไม่กลายเป็นไอ แต่จะไหลต่อไปอีกระยะหนึ่ง จนกระทั่งถึงตำแหน่งที่ 3' สารทำความเย็น R600a บางส่วน จึงจะเริ่มเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอ ดังแสดงในรูปที่ 2 จากนั้น เมื่อสารทำความเย็น R600a ไหลต่อไป ของเหลวบางส่วนจะเดือดกลายเป็นไอมากขึ้นเรื่อยๆ ตามความยาวท่อคาปิลลารี ดังแสดงใน รูปที่ 1 และ 2 โดยสารทำความเย็นในช่วงนี้จะมีสถานะเป็น ของเหลวอิ่มตัวผสมกับไ้อิ่มตัว



รูปที่ 1 แผนภาพ T-s และ P-h สำหรับการไหลของ R600a ผ่านท่อคาปิลลารี



รูปที่ 2 การไหลของสารทำความเย็นผ่านท่อคาปิลลารี

โดยในงานวิจัยนี้ จะสมมติให้สารทำความเย็นทั้งสองสถานะผสมเป็นเนื้อเดียวกัน ซึ่งก็คือ การไหลเนื้อเดียว (Homogeneous flow) นั่นเองและเมื่อสารทำความเย็นกลายเป็นไอน้ำมากขึ้นเรื่อยๆ ความเร็วของสารทำความเย็น R600a จะเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนเท่ากับความเร็วเสียง ณ ตำแหน่งที่ 4 สารทำความเย็นจะไหลออกจากท่อคาปิลลารี พร้อมกันนี้ สารทำความเย็นจะไหลเข้าสู่อีวาโปรเตอร์ ณ ตำแหน่งที่ 5

ในการคำนวณความยาวของท่อคาปิลลารี ในช่วงต่างๆ ทั้ง 3 ช่วง สามารถกระทำได้นี้

2.1 ช่วงการไหลสถานะเดียว

สำหรับช่วงการไหลสถานะเดียวนั้น จะเป็นการไหลจากตำแหน่งที่ 1 ไปยังตำแหน่งที่ 3 ซึ่งสามารถแบ่งการพิจารณาออกเป็น 2 ช่วง คือ การไหลจากตำแหน่งที่ 1 ไปยังตำแหน่งที่ 2 ซึ่งเป็นการไหลของ R600a ออกจากคอนเดนเซอร์เข้าสู่คาปิลลารี โดยพื้นที่หน้าตัดของคอนเดนเซอร์จะใหญ่กว่าพื้นที่หน้าตัดของท่อคาปิลลารีเป็นอย่างมาก เมื่ออาศัยสมการพลังงาน จะได้

$$P_1 - P_2 = (k + 1) \frac{\rho V_2^2}{2} \quad \dots (1)$$

เมื่อ k คือ ตัวประกอบการสูญเสียที่ทางเข้าท่อคาปิลลารี

P คือ ความดัน (Pa)

V คือ ความเร็ว (m/s)

ρ คือ ความหนาแน่น (kg/m³)

สำหรับการไหลจากตำแหน่งที่ 2 ไปยังตำแหน่งที่ 3 นั้น จะเกิดการสูญเสียหลักแต่เพียงอย่างเดียว การหาความยาวของท่อคาปิลลารีในช่วงนี้ สามารถเริ่มจากการพิจารณาสมการพลังงาน ดังต่อไปนี้

$$\frac{P_2}{\rho g} + \frac{V_2^2}{2g} + z_2 = \frac{P_3}{\rho g} + \frac{V_3^2}{2g} + z_3 + h_{L,23} \quad \dots (2)$$

เมื่อ g คือ ความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (9.81 m/s²)

$h_{L,23}$ คือ head ของการสูญเสียหลัก (m)

z คือ ระดับความสูงของท่อคาปิลลารี (m)

เมื่อแทนค่า $h_{L,23}$ ลงในสมการที่ (3) แล้วจัดรูปของสมการใหม่ จะได้สมการที่ใช้สำหรับคำนวณความยาวของท่อคาปิลลารีในช่วงการไหลสถานะเดียว ดังนี้

$$L_{sp} = \frac{d}{f_{sp}} \left[(P_1 - P_3) \frac{2\rho}{G^2} - k - 1 \right] \quad \dots (3)$$

เมื่อ d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางภายในของท่อคาปิลลารี (m)

f_{sp} คือ ตัวประกอบความเสียดทาน

G คือ อัตราการไหลต่อพื้นที่หน้าตัด (kg/m²/s)

k คือ สัมประสิทธิ์การสูญเสียรอง

L_{sp} คือ ความยาวท่อคาปิลลารีในช่วงการไหลสถานะเดียว (m)

จากสมการที่ (3) จะสามารถคำนวณความยาวของท่อคาปิลลารี ในช่วงการไหลสถานะเดียวได้ โดยจะมีผลต่างของความดันสารทำความเย็นที่ตำแหน่งที่ 1 และตำแหน่งที่ 3 เป็นแรงขับ (Driving force)

สำหรับตัวประกอบความเสียดทาน สามารถหาได้จากสมการของ Colebrook ดังนี้

$$\frac{1}{\sqrt{f_{sp}}} = -2 \log \left(\frac{\epsilon/d}{3.7} + \frac{2.51}{Re\sqrt{f_{sp}}} \right) \quad \dots (4)$$

เมื่อ Re คือ ตัวเลขเรย์โนลด์ (Reynolds number)

ϵ คือ ความขรุขระ (m)

2.2 ช่วงการไหลกึ่งเสถียร (Metastable flow)

เมื่อสารทำความเย็น R600a ไหลมาถึงตำแหน่งที่ 3 ดังแสดงในรูปที่ 2 สารทำความเย็นจะมีความดันเท่ากับ ความดันอิ่มตัว (Saturation pressure) โดยเมื่อสารทำความเย็นไหลผ่านตำแหน่งนี้ สารทำความเย็นบางส่วนควรจะต้องเปลี่ยนสถานะจากของเหลวกลายเป็นไอ เนื่องจาก ความดันของสารทำความเย็นต่ำกว่าความดันอิ่มตัว แต่ในความเป็นจริง พบว่า สารทำความเย็นจะยังคงไม่เปลี่ยนสถานะ โดยจะไหลต่อไปอีกระยะหนึ่ง จึงจะมีการเปลี่ยนสถานะเกิดขึ้น ปรากฏการณ์นี้ เรียกว่า การไหลกึ่งเสถียร (Metastable flow) ในปี ค.ศ. 1990 Chen และคณะ [6] ได้นำเสนอ สมการสำหรับคำนวณความดันลดในช่วงการไหลกึ่งเสถียร ดังนี้

$$\frac{(P_3 - P_3')\sqrt{k_B T_s}}{\sigma^{1.5}} = 0.679 \times \frac{v_g}{v_{fg}} \times Re^{0.914} \times \left(\frac{\Delta T_{sub}}{T_{cr}} \right)^{-0.208} \times \left(\frac{d}{D_{ref}} \right)^{-3.18} \quad \dots (5)$$

$$\text{เมื่อ } D_{ref} = 10000 \sqrt{\frac{k_B T_s}{\sigma}}$$

k_B คือ ค่าคงที่ Boltzmann

T_{cr} คือ อุณหภูมิวิกฤต (K)

T_s คือ อุณหภูมิอิ่มตัว (K)

ΔT_{sub} คือ อนุพันธ์ (K)

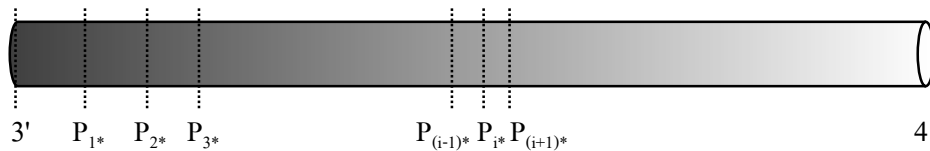
σ คือ ความตึงผิว (N/m)

V คือ ปริมาตรจำเพาะ (m^3/kg)

$$L_{\text{meta}} = \frac{2\rho d(P_3 - P_3')}{f_{\text{sp}} G^2} \quad \dots (6)$$

สำหรับความยาวในช่วงการไหลกึ่งเสถียร
สามารถหาได้จากสมการพลังงาน ดังนี้

เมื่อ L_{meta} คือ ความยาวในช่วงการไหลกึ่งเสถียร (m)



รูปที่ 3 การไหลสองสถานะผ่านท่อคาปิลลารี

2.3 ช่วงการไหลสองสถานะ

สำหรับช่วงการไหลสองสถานะ สารทำความเย็น R600a จากตำแหน่งที่ 3 ซึ่งมีสถานะเป็นของเหลวอิ่มตัว จะค่อยๆ กลายเป็นไอ ทำให้สารทำความเย็นอยู่ในสถานะของเหลวอิ่มตัวและไออิ่มตัว และเมื่อปริมาณไอเพิ่มขึ้น จะทำให้สารทำความเย็นมีความเร็วเพิ่มขึ้นเรื่อยๆ จนเท่ากับความเร็วเสียง ซึ่งก็คือตำแหน่งที่ 4 หรือตำแหน่งสุดท้ายของท่อคาปิลลารี ในการคำนวณหาความยาวในช่วงนี้ ท่อคาปิลลารีจะถูกแบ่งการพิจารณาออกเป็น n ส่วน โดยแต่ละส่วนจะมีผลต่างของความดัน (ΔP) เท่ากัน ดังแสดงในรูปที่ 3

ในการหาคุณสมบัติของสารทำความเย็นในช่วงการไหลสองสถานะนี้ จะอาศัยแบบจำลองการไหลเนื้อเดียว โดยจะเริ่มจากการพิจารณาสมการพลังงาน ดังนี้

$$h_{i*} + \frac{V_{i*}^2}{2} = h_3 + \frac{V_3^2}{2} \quad \dots (7)$$

เมื่อ h คือ เอนทัลปี (J/kg)

จากสมการที่ (7) เมื่อเปลี่ยนเอนทัลปีและความเร็วให้อยู่ในรูปของฟังก์ชันของคุณภาพไอ จะทำให้ได้สมการที่ใช้ในการคำนวณคุณภาพไอ ดังนี้

$$X_{i*} = \frac{-h_{f,i*} - G^2 v_{f,i*} v_{fg,i*} + \sqrt{(h_{f,i*} + G^2 v_{f,i*} v_{fg,i*})^2 - 2G^2 v_{f,i*}^2 \left[h_{f,i*} + 0.5G^2 v_{f,i*}^2 - h_3 - \frac{V_3^2}{2} \right]}}{G^2 v_{fg,i*}^2} \quad \dots (8)$$

สำหรับความหนืด สามารถคำนวณได้จากสมการของ McAdams และคณะ [9] โดย Bittle และ Pate [10] ได้แสดงให้เห็นว่า สมการของ McAdams และคณะ [9] เหมาะสมกับสารทำความเย็นหลากหลายชนิด

$$\frac{1}{\mu_{i*}} = \frac{1 - X_{i*}}{\mu_{f,i*}} + \frac{X_{i*}}{\mu_{g,i*}} \quad \dots (9)$$

เมื่อ x คือ คุณภาพไอ

V คือ ปริมาตรจำเพาะ (m^3/kg)

μ คือ ความหนืด ($Pa \cdot s$)

ตัวห้อย f คือ สถานะของเหลว

ตัวห้อย g คือ สถานะก๊าซ

ในการหาความยาวแต่ละช่วงของท่อคาปิลลารีในช่วงการไหลสองสถานะ จะเหมือนกับงานวิจัยของคณะผู้วิจัยก่อนหน้านี้ คือ ไกรวิชญ์ และคณะ [5] โดยความแตกต่างระหว่าง งานวิจัยนี้ กับ งานวิจัยของ ไกรวิชญ์ และคณะ [5] ก็คือ ในงานวิจัยนี้ ได้รวมผลกระทบของการไหลกึ่งเสถียรเข้ามาด้วยนั่นเอง โดยจะอาศัยสมการโมเมนตัม ซึ่งสามารถเขียนให้อยู่ในรูปของสมการอนุพันธ์ได้ดังนี้

$$\frac{1}{\rho_i^*} \frac{dp}{dL} - \frac{\rho_i^*}{G^2 f_{tp,i}^*} \frac{dP}{dL} - \frac{1}{2d} = 0 \quad \dots (10)$$

ในการแก้สมการที่ (8) จะอาศัยวิธีเชิงตัวเลข ซึ่งก็คือวิธีไฟไนต์ดิฟเฟอเรนซ์ (Finite difference method) ดังนี้

$$\frac{1}{\rho_{i^*}} \frac{\rho_{i^*+1} - \rho_{i^*-1}}{2 \cdot \Delta L} - \frac{\rho_{i^*}}{G^2 f_{tp,i^*}} \frac{P_{i^*+1} - P_{i^*-1}}{2 \cdot \Delta L} = \frac{1}{2d} \quad \dots (11)$$

สำหรับตำแหน่ง $i^* = 1^*$ และ $(n-1)^*$ โดย n คือจำนวนส่วนเล็กๆของท่อคาปิลลารีในช่วงการไหลสองสถานะ จะต้องอาศัยการประมาณค่าย้อนกลับและการประมาณค่าไปข้างหน้า ซึ่งจะได้

$$\frac{1}{\rho_{1^*}} \frac{\rho_{1^*} - \rho_3}{\Delta L} - \frac{\rho_{1^*}}{G^2 f_{tp,1^*}} \frac{P_{1^*} - P_3}{\Delta L} = \frac{1}{2d} \quad \dots (12)$$

$$\frac{1}{\rho_4} \frac{\rho_4 - \rho_{(n-1)^*}}{\Delta L} - \frac{\rho_4}{G^2 f_{tp,4}} \frac{P_4 - P_{(n-1)^*}}{\Delta L} = \frac{1}{2d} \quad \dots (13)$$

โดย $i = n$ จะเป็นตำแหน่งที่ 4 หรือตำแหน่งสุดท้ายในท่อคาปิลลารีนั่นเอง

จากสมการที่ (11), (12) และ (13) จะสามารถหา ΔL สำหรับแต่ละช่วงได้ โดยมีข้อสังเกต คือ ΔL แต่ละช่วงจะไม่เท่ากัน แต่สิ่งที่เท่ากัน ก็คือ ΔP และสำหรับ ΔL ที่คำนวณได้นั้น จะมีจำนวนเท่ากับ n เพราะฉะนั้น จะสามารถหา L_{tp} หรือความยาวของท่อคาปิลลารีในช่วงการไหลสองสถานะได้ดังนี้

$$L_{tp} = \Delta L_1 + \Delta L_2 + \Delta L_3 + \dots + \Delta L_n \quad \dots (14)$$

จากสมการที่ (14) จะพบว่า ตำแหน่งสุดท้าย ที่ใช้ในการหาความยาวในช่วงการไหลสองสถานะ ก็คือ n' โดย ตำแหน่งนี้ จะเป็นตำแหน่งที่สารทำความเย็น R600a มีความเร็วเท่ากับความเร็วเสียง ซึ่งสามารถพิจารณาได้จากเอนโทรปีที่ที่ได้จากการคำนวณจะลดลงนั่นเอง ทั้งนี้ เนื่องจาก เมื่อสารทำความเย็นไหล R600a ไหลผ่านท่อคาปิลลารี ความดันของสารทำความเย็นจะลดลง ในขณะที่ เอนโทรปีจะเพิ่มขึ้น จนกระทั่งความเร็วของสารทำความเย็นมีค่าเท่ากับความเร็วเสียง ทำให้ ณ ตำแหน่งถัดไป ความดันจะเพิ่มขึ้น และเอนโทรปีที่ ได้จากการคำนวณ จะมีค่าลดลง ดังนั้น ท่อคาปิลลารีจะไม่สามารถใช้ในการลดความดันของสารทำความเย็น R600a ได้อีกต่อไป ปรากฏการณ์ที่เกิดขึ้น ณ ตำแหน่งสุดท้ายนี้ ถูกเรียกว่า การไหลอุดตัน (Choked flow)

สำหรับเอนโทรปีของสารทำความเย็นในช่วงการไหลสองสถานะ สามารถคำนวณได้ดังนี้

$$S_{i^*} = S_{f,i^*} + X_{i^*} S_{g,i^*} \quad \dots (15)$$

เมื่อ s คือ เอนโทรปี ($J/kg \cdot K$)

3. ผลลัพธ์และการวิเคราะห์

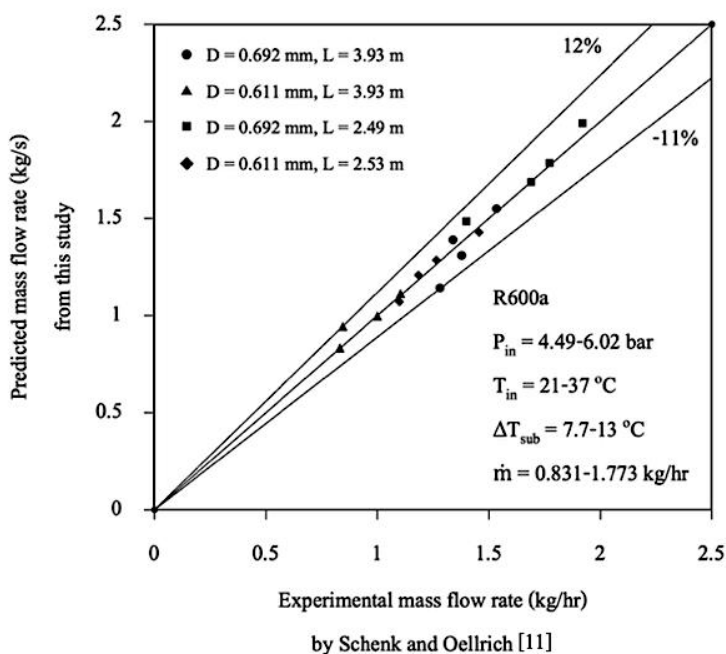
ในลำดับแรกนั้น จะแสดงการเปรียบเทียบผลลัพธ์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่ถูกพัฒนาขึ้น กับ ผลการทดลองของ Schenk และ Oellrich [11] ดังแสดง

ในรูปที่ 4 โดย Schenk และ Oellrich [11] ได้นำเสนอผลการทดลองสำหรับ R600a สำหรับท่อคาปิลลารีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากับ 0.611 และ 0.692 mm ความยาวเท่ากับ 2.49, 2.56, และ 3.93 m โดยจากรูปที่ 4 จะพบว่า แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้น จะให้อัตราการไหลโดยมวลสำหรับ R600a คลาดเคลื่อนไปจากผลการทดลองของ Schenk และ Oellrich [11] ไม่เกิน 12% และมีข้อมูลจำนวน 82.25% ของจำนวนข้อมูลทั้งหมด ที่มีความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 5%

นอกจากนี้ ในรูปที่ 5 ยังได้แสดงการเปรียบเทียบระหว่าง ผลลัพธ์จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่

พัฒนาขึ้น กับ ผลการคำนวณของ Shu และคณะ [12] จากรูปที่ 5 พบว่า ผลลัพธ์ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้น จะให้ความยาวท่อคาปิลลารีคลาดเคลื่อนไม่เกิน 1.41% และจะให้ความดันที่ทางออกของท่อคาปิลลารี คลาดเคลื่อนไม่เกิน 4.22%

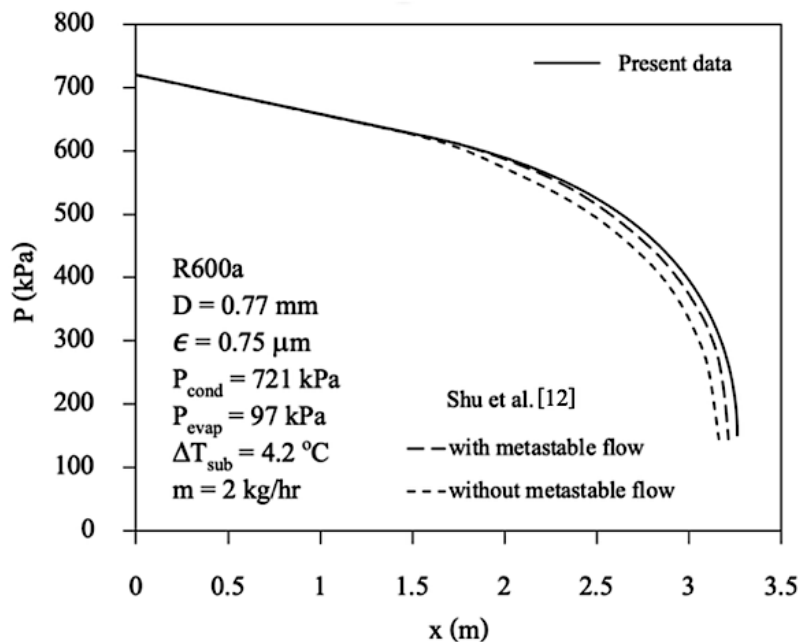
จากการเปรียบเทียบกับผลลัพธ์ในอดีตนั้น ทำให้มั่นใจได้ว่า แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นนี้ มีความแม่นยำเพียงพอที่จะใช้ในการทำนายคุณลักษณะการไหลของ R600a ผ่านท่อคาปิลลารี



รูปที่ 4 การเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Schenk และ Oellrich [11]

จากรูปที่ 5 เมื่อสารทำความเย็น R600a ในสถานะของเหลวเย็นเยือก ไหลเข้าสู่ท่อคาปิลลารี ความดันจะลดลงในลักษณะที่ความชันคงที่ จนกระทั่ง ความดันของสารทำความเย็นต่ำกว่าความดันไอ โดย ณ ตำแหน่งนี้ สารทำความเย็นบางส่วนควรจะเริ่มเปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอ แต่ในความเป็นจริง จะยังคงไม่มีการเปลี่ยนสถานะเกิดขึ้น จนกระทั่ง ความดันของสารทำ

ความเย็นลดต่ำลงไปอีกเล็กน้อย ปรากฏการณ์นี้ เรียกว่า การไหลกึ่งเสถียร หลังจากนั้น สารทำความเย็นจะค่อยๆ เปลี่ยนสถานะกลายเป็นไอมากขึ้นเรื่อยๆ จนถึงตำแหน่งหนึ่ง สารทำความเย็นจะมีความเร็วเฉลี่ยเท่ากับความเร็วเสียง และ ณ ตำแหน่งนี้ จะส่งผลให้เกิด การไหลอุดตัน (Choked flow) ซึ่งจะเป็นจุดสุดท้ายของการออกแบบ

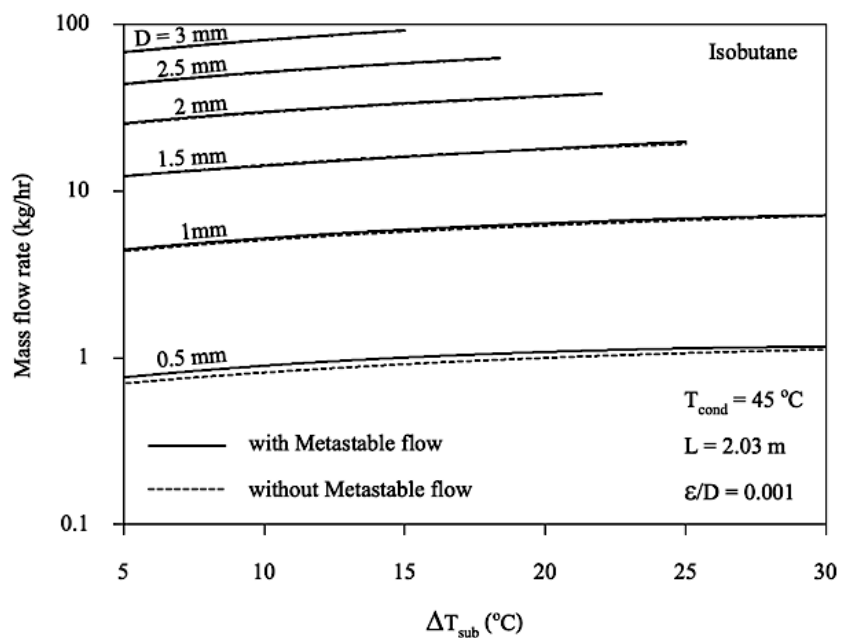


รูปที่ 5 การเปรียบเทียบกับผลการคำนวณของ Shu และคณะ [12]

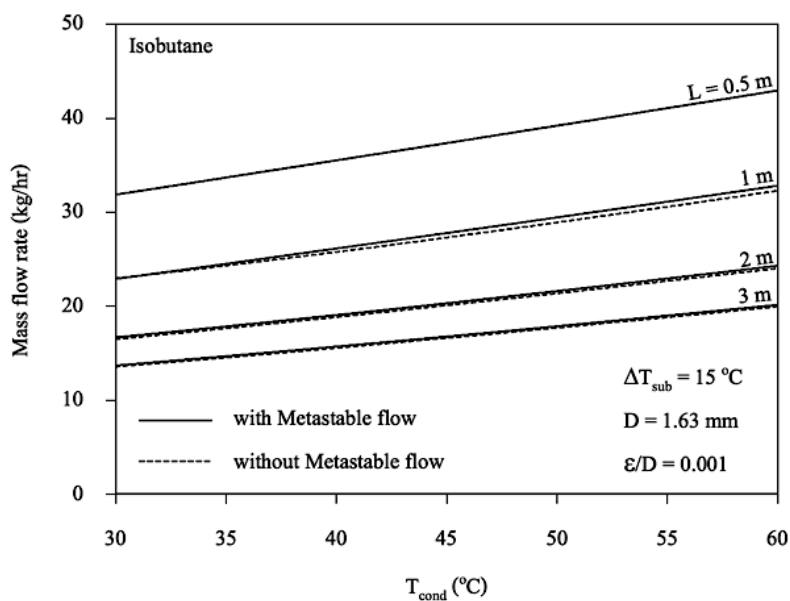
จากรูปที่ 6 แสดงการเปรียบเทียบระหว่าง ผลลัพธ์ ซึ่งคำนวณรวมผลกระทบของการไหลกึ่งเสถียรซึ่งก็คือ ผลลัพธ์จากงานวิจัยนี้ และผลลัพธ์ซึ่งไม่คิดผลกระทบ ดังกล่าว ซึ่งมีค่าเท่ากับผลลัพธ์จากงานวิจัยของ คณะผู้เขียนก่อนนี้ หรือ ไกรวิญญ์ และคณะ [5] โดยจะ พบว่า การคิดผลกระทบจากการไหลกึ่งเสถียร จะทำให้อัตราการไหลมีค่าเพิ่มขึ้น โดยจะมีอิทธิพลมากขึ้น สำหรับท่อคาปิลลารีที่เส้นผ่านศูนย์กลางมีค่าน้อยมาก แต่จะมีอิทธิพลลดลง เมื่อท่อคาปิลลารีมีขนาดเส้นผ่าน

ศูนย์กลางมากกว่า 1 mm นอกจากนี้ จะพบว่า เมื่อองศา เย็นยิ่งเพิ่มขึ้น จะทำให้อิทธิพลของการไหลกึ่งเสถียรที่มี ต่ออัตราการไหลลดลง ทั้งนี้ ความสัมพันธ์สำหรับ ตัวแปรต่างๆ นี้ เป็นไปตามสมการที่ (5)

สำหรับความแตกต่างสูงสุดที่เกิดขึ้นนั้น จะเกิดขึ้นที่ องศาเย็นยิ่ง เท่ากับ 5 °C และเส้นผ่านศูนย์กลางภายใน ท่อคาปิลลารี เท่ากับ 0.5 mm โดยเมื่อคิดผลกระทบจาก การไหลกึ่งเสถียร จะทำให้อัตราการไหลเพิ่มขึ้นสูงสุด ถึง 13.08% ดังแสดงในตารางที่ 1



รูปที่ 6 อิทธิพลของ เส้นผ่านศูนย์กลางภายใน และองศาเย็นยิ่ง ที่มีต่ออัตราการไหล ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งคิดรวมและไม่รวมผลกระทบของการไหลกึ่งเสถียร



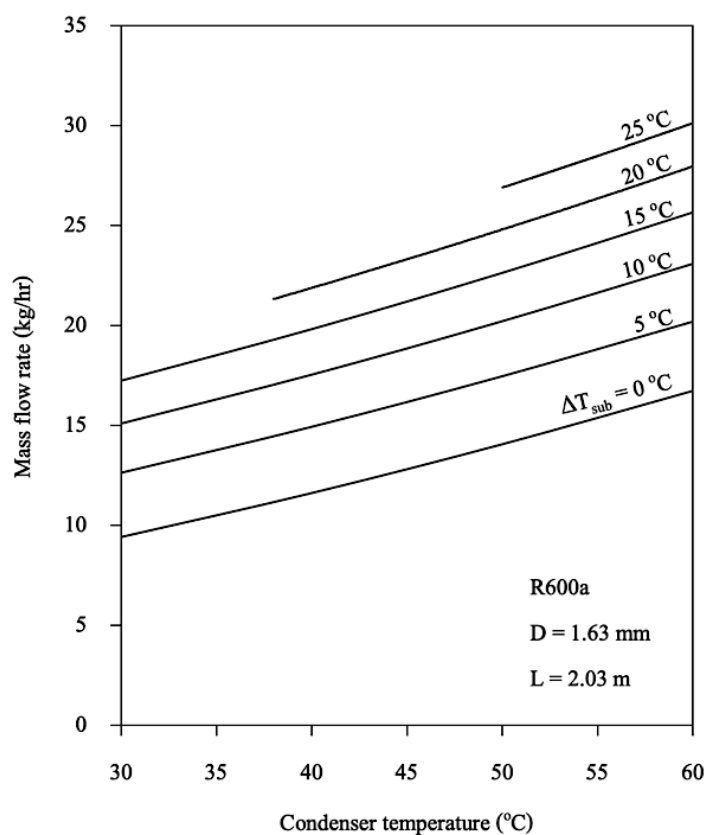
รูปที่ 7 อิทธิพลของ อุณหภูมิที่คอนเดนเซอร์ และความยาว ที่มีต่ออัตราการไหล ที่ได้จากแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ซึ่งคิดรวม และไม่รวมผลกระทบของการไหลกึ่งเสถียร

ตารางที่ 1 ร้อยละของความคลาดเคลื่อนจากผลกระทบ
ของการไหลกึ่งเสถียรสำหรับท่อคาปิลลารี
ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5-3 mm

ΔT_{sub}	%Error					
	0.5 mm	1 mm	1.5 mm	2 mm	2.5 mm	3 mm
0	0	0	0	0	0	0
5	13.08	4.32	2.17	1.32	0.89	0.64
10	9.63	3.14	1.57	0.97	0.65	0.47
15	7.69	2.51	1.28	0.79	0.55	0.42
20	6.42	2.09	1.09	0.72		
25	5.52	1.83	1.03			
30	4.86	1.70				

จากรูปที่ 7 พบว่า การไหลกึ่งเสถียรจะมีอิทธิพลต่อ
อัตราการไหลของ R600a ในช่วงความยาว 0.5-3 m,
อุณหภูมิที่คอนเดนเซอร์ 30-60 °C น้อยมาก โดยผลลัพธ์
จากอิทธิพลของการไหลกึ่งเสถียร จะให้อัตราการไหล
โดยมวล แตกต่างกันไม่เกิน 1.8%

จากผลลัพธ์ในรูปที่ 6 และ 7 จะพบว่า ในบางสภาวะ
การทำงานนั้น อิทธิพลของการไหลกึ่งเสถียรจะมี
ผลกระทบต่ออัตราการไหลเป็นอย่างมาก

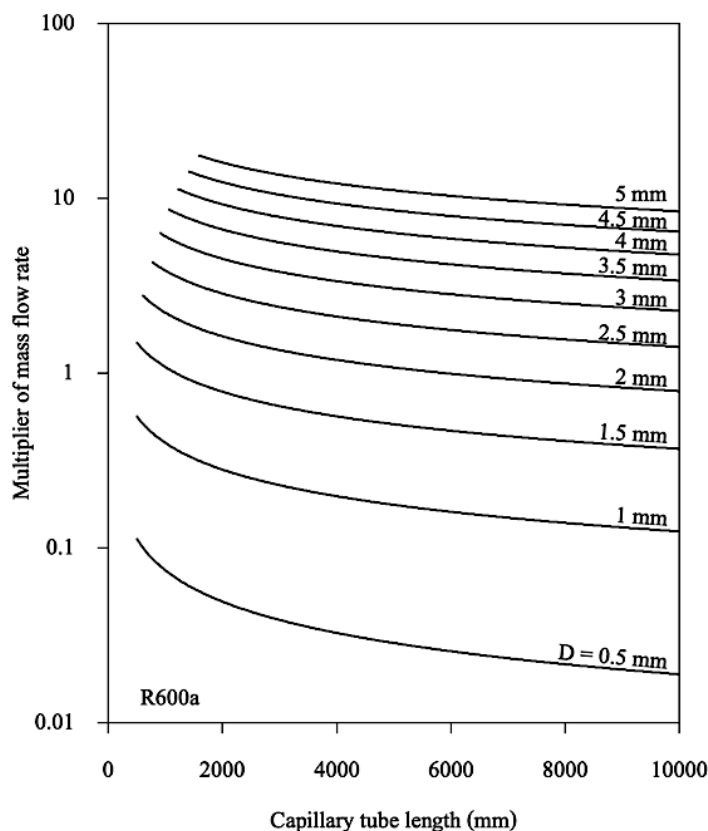


รูปที่ 8 แผนภาพสำหรับเลือกขนาดและ ระบุสภาวะการทำงานของท่อคาปิลลารี สำหรับ R600a

ในงานวิจัยนี้ จะนำเสนอแผนภาพสำหรับเลือกสภาวะการทำงานของท่อคาปิลลารีที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.63 mm และมีความยาว 2.03 m ดังแสดงในรูปที่ 8 โดยเป็นไปตามขนาดที่นิยมใช้ในแผนภาพของ ASHRAE แผนภาพในรูปที่ 8 นี้ จะรวมผลกระทบของการไหลกึ่งเสถียรไว้ด้วยแล้ว

จากรูปที่ 9 แสดงตัวคูณอัตราการไหลของสารทำความเย็น R600a สำหรับท่อคาปิลลารีที่มีเส้นผ่าน

ศูนย์กลางภายใน เท่ากับ 0.5-5 mm และมีความยาวเท่ากับ 0.5-10 m สำหรับเส้นกราฟที่ขาดหายไปนั้น เป็นช่วงที่ไม่เหมาะสมสำหรับการใช้งาน โดยแผนภาพในรูปที่ 9 นี้ จะต้องใช้ประกอบกับแผนภาพในรูปที่ 8 โดยการนำตัวคูณที่ได้จากแผนภาพในรูปที่ 9 ไปคูณกับอัตราการไหลที่ได้จากแผนภาพในรูปที่ 8 ก็จะได้อัตราการไหลที่เหมาะสมกับท่อคาปิลลารีที่มีขนาดและสภาวะการทำงานตามต้องการ



รูปที่ 9 ตัวคูณอัตราการไหลสำหรับท่อคาปิลลารีขนาดต่างๆ

4. สรุป

งานวิจัยนี้ ได้นำเสนอแบบจำลองการไหลเนื้อเดียว ซึ่งรวมอิทธิพลของการไหลกึ่งเสถียร สำหรับทำนาย คุณลักษณะการไหลของสารทำความเย็น R600a ผ่านท่อ คาปิลลารีที่นิยมใช้ในระบบทำความเย็นขนาดเล็ก จาก ผลลัพธ์และการวิเคราะห์ที่ได้ สามารถสรุปได้ดังนี้

4.1 แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ที่พัฒนาขึ้น ได้รับการเปรียบเทียบกับผลการทดลองของ Schenk และ Oellrich [10] และผลการคำนวณของ Shu และคณะ [11] ซึ่งพบว่า มีแนวโน้มไปในทิศทางเดียวกัน และมีความคลาดเคลื่อนน้อยมาก

4.2 การไหลกึ่งเสถียร จะมีอิทธิพลต่ออัตราการไหลของ R600a เป็นอย่างมาก ที่องศาเย็นยิ่งมากกว่า 0 °C แต่ไม่เกิน 5 °C และท่อคาปิลลารีมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายในไม่เกิน 0.5 mm

4.3 ในงานวิจัยนี้ ได้นำเสนอแผนภาพสำหรับระบุสถานะการทำงานของท่อคาปิลลารีที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.63 mm ยาว 2.03 m ซึ่งมีความแม่นยำสูง โดยได้รวมผลกระทบของการไหลกึ่งเสถียรเข้าไปด้วย

4.4 ในงานวิจัยนี้ ได้นำเสนอแผนภาพสำหรับเลือกขนาดท่อคาปิลลารีซึ่งได้รวมผลกระทบของการไหลกึ่งเสถียร เพื่อใช้ประกอบกับแผนภาพในข้อ 4.3 อย่างไรก็ดีตามแผนภาพดังกล่าวนี้ จะให้ความคลาดเคลื่อนที่สูงขึ้น

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนทั้ง 2 คน ขอขอบพระคุณภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่ได้ให้การสนับสนุนในด้านต่างๆ และผู้เขียนลำดับที่ 2 ขอขอบพระคุณกองบริหารการวิจัยและนวัตกรรม มหาวิทยาลัยบูรพา (Fundamental Fund: ปีงบประมาณ 2568, รหัสโครงการ 206511) ที่ได้ให้การสนับสนุนในด้านต่างๆ งานวิจัยนี้ สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] D. Workman, World's Top Export, <https://www.worldstopexports.com/air-conditioners-exports-country>.
- [2] Z. Yang, M. Gong, G. Chen, X. Zou and J. Shen, "Two-phase flow patterns, heat transfer and pressure drop characteristics of R600a during flow boiling inside a horizontal tube", Applied Thermal Engineering, vol. 120, no. 25, pp. 654-671, Jun. 2017.
- [3] F.T. Kanabben and J. Boeng, "A component-level analysis of brazed-type capillary tube-suction line heat exchangers", International Journal of Refrigeration, vol. 177, pp. 181-194, Sep. 2025.
- [4] W. Pirompugd and S. Wongwises, "Capillary tube sizing charts for fluorine-based refrigerants", ASHRAE Transactions, vol. 112, no. 2, pp. 680-689, Jul. 2006.
- [5] ไกรวิชญ์ เยสูงเนิน, ปิยธิดา เดชกรฤช, ภาณุพงศ์ เสงษ์ทรัพย์ศิริกุล, วรเชษฐ์ ภิรมย์ภักดี, "Theoretical Investigation of R600a Flow Characteristics in a Capillary Tube Used in Refrigeration Systems", SAU Journal of Science & Technology, accepted. (in Thai).
- [6] Z.H. Chen, R.Y. Li, S. Lin and Z.Y. Chen, "A correlation for metastable flow of refrigerant 12 through capillary tubes", ASHRAE Transactions, vol. 96, no. 1, pp. 550-554, 1990.
- [7] O. Garcia-Valladares, "Numerical simulation of non-adiabatic capillary tubes considering metastable region. Part I: Mathematical formulation and numerical model, International Journal of Refrigeration, Vol. 30, pp. 642-653, Jun. 2007.

- [8] ASHRAE, “Capillary tubes”, 2022 ASHRAE Handbook: Refrigeration, pp. 11.24-11.31, 2022.
- [9] W.H. McAdams, W.K. Wood and R.L. Bryan, “Vaporization inside horizontal tubes II: Benzene-oil mixture”, Trans. ASME, Vol. 64, pp. 193-199, Apr. 1942.
- [10] R.R. Bittle, M.B. Pate, “A theoretical model for predicting adiabatic capillary tube performance with alternative refrigerants”, ASHRAE Transactions, vol. 102, no. 2, pp. 52-64, Dec. 1996.
- [11] M. Schenk, and L.R. Oellrich, “Experimental investigation of the refrigerant flow of isobutane (R600a) through adiabatic capillary tubes”, International Journal of Refrigeration, vol. 38, pp. 275-280, Feb. 2014.
- [12] Y. Shu, P. Hu, I. I Adnan, L. Zhi, Q. Chen, “Comparison between homogeneous and separated flow models of isobutane flowing through adiabatic capillary tubes”, JUSTC, vol. 52, no. 7, Article 5-1-5-15, Jul. 2022.

ประวัติผู้ประพันธ์ :

ดร.ปราโมทย์ ทยประดิษฐ์



- จบการศึกษา : ปริญญาเอกจาก มจร. (ปร.ด. เทคโนโลยีอุณหภาพ)
- จบการศึกษา : ปริญญาโทจาก มจร. (วศ.ม. เทคโนโลยีพลังงาน)
- จบการศึกษา : ปริญญาตรีจาก มจร. (วศ.บ. วิศวกรรมเครื่องกล)

รองศาสตราจารย์ ดร.วรเชษฐ์ ภิรมย์ศักดิ์



- จบการศึกษา : ปริญญาเอกจาก มจร. (วศ.ด. วิศวกรรมเครื่องกล)
- จบการศึกษา : ปริญญาโทจาก มจร. (วศ.ม. วิศวกรรมเครื่องกล)
- จบการศึกษา : ปริญญาตรีจาก มจร. (วศ.บ. วิศวกรรมเครื่องกล)

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ

SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY

ปีที่ 11 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม พ.ศ. 2568

ชื่อ – นามสกุล

ต้นสังกัด

รองศาสตราจารย์ ดร.ปริญญา	สงวนสัจย์	สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์
รองศาสตราจารย์ ดร.วันชัย	ฉิมฉวี	มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย
รองศาสตราจารย์ ดร.ศิระ	สายสร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง วิทยาเขตชุมพรเขตรอุดมศักดิ์
รองศาสตราจารย์ ดร.พานิช	อินตะ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา
รองศาสตราจารย์ ดร.วิเชียร	ชาลี	มหาวิทยาลัยบูรพา
รองศาสตราจารย์ ดร.จันทนา	ปัญญาวราภรณ์	มหาวิทยาลัยบูรพา
รองศาสตราจารย์ ดร.ลักษณะิย์	บุญขาว	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
รองศาสตราจารย์ ดร.จรัส	รัตนโชตินันท์	มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม
รองศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญญารัตน์	สายศิริรัตน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.วิสัน	ชาลี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
รองศาสตราจารย์ ดร.กวี	หวัณนิเวศน์กุล	มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อริสรา	ฤทธิงาม	มหาวิทยาลัยบูรพา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรรณวรางค์	รัตนานิคม	มหาวิทยาลัยบูรพา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พัชรพงษ์	อาสนจินดา	มหาวิทยาลัยบูรพา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.โชคชัย	ชื่นวัฒนาประณิธิ	มหาวิทยาลัยบูรพา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นเรศ	ฉิมเรศ	มหาวิทยาลัยทักษิณ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธิติมา	ณ สงขลา	มหาวิทยาลัยทักษิณ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชฎาพร	เกตุมณี	มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ว่าที่ ร.ต.ดร.ไพฑูล	ไชยวงศา	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วีระพงศ์	จุลศรี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
ดร.ชนกานต์	กิ่งแก้ว	สถาบันการจัดการปัญญาภิวัฒน์

คำแนะนำสำหรับผู้เขียน

วารสาร SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY ตีพิมพ์ปีละ 2 ฉบับ โดยมหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ บทความที่พิจารณาตีพิมพ์ในวารสารนี้จะต้องเป็นบทความที่ไม่เคยตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารใดมาก่อน และไม่อยู่ในการพิจารณาของวารสารอื่นๆ เรื่องที่จะตีพิมพ์จะต้องได้รับการกลั่นกรองจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาที่เกี่ยวข้องอย่างน้อย 2 คน กองบรรณาธิการอาจให้ผู้เขียนปรับปรุงให้เหมาะสมยิ่งขึ้นและทรงไว้ซึ่งสิทธิ์ในการคัดลอกตีพิมพ์หรือไม่ก็ได้

ประเภทผลงานที่ตีพิมพ์

1. บทความวิจัย (Research articles) เป็นผลงานที่เตรียมจากข้อมูลของผู้เขียน หรือทีมงานผู้เขียนได้ค้นคว้าวิจัยด้วยตนเอง
2. บทความวิชาการ (Academic articles) อาจแยกเป็นบทความปริทรรศน์ (Review articles) บทความเทคนิค (Technical article) เรียบเรียงจากการสืบค้น ตรวจสอบเอกสารวิชาการในสาขานั้นๆ และบทความพิเศษ (Special articles) เสนอความรู้ทั่วไปในด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

การเตรียมต้นฉบับบทความ

บทความหรือผลงานวิจัยที่นำเสนออาจอยู่ในรูปแบบภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษ โดยจัดพิมพ์ด้วยโปรแกรมเวิร์ดโปรเซสเซอร์ ภายใต้ระบบปฏิบัติการวินโดวส์ สำหรับตาราง แผนภาพและภาพประกอบในส่วน of ต้นฉบับจะต้องตามรูปแบบที่กำหนดเพื่อให้พร้อมตีพิมพ์ได้ทันที (Camera ready) ต้นแบบสำหรับบทความสามารถดาวน์โหลดได้จากเว็บไซต์ saujournalst.sau.ac.th

การส่งบทความ

ส่ง “ต้นฉบับบทความ” โดยไม่ต้องระบุชื่อที่อยู่และประวัติของผู้ประพันธ์และทีมงานและส่ง “ใบรับรองบทความ” ด้วยอิเล็กทรอนิกส์ไฟล์นามสกุล PDF และ ไฟล์ Doc ส่งผ่านระบบ Thaijo ได้ที่ วารสาร SAUJOURNALST

บทความทุกบทความที่เสนอมายังวารสาร SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY จะได้รับการกลั่นกรองโดยผู้ทรงคุณวุฒิ หากมีการแก้ไขหรือตอบรับการตีพิมพ์ผู้เขียนต้องส่งต้นฉบับอิเล็กทรอนิกส์ไฟล์นามสกุล PDF และ DOC ของบทความที่แก้ไข สอบถามข้อมูลเพิ่มเติมได้ที่ มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

โทรศัพท์ : 0-2807-4500-27 # 404 โทรสาร: 0-2807-4528

e-mail : saujournalst@sau.ac.th

ต้นฉบับสำหรับบทความที่เขียนเป็นภาษาไทยสำหรับวารสาร

SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY

ชื่อบทความ

Title of the Paper

ชื่อ-นามสกุล ผู้ประพันธ์ (ภาษาไทย)

ชื่อ-นามสกุล ผู้ประพันธ์ (ภาษาอังกฤษ)

ภาค/สาขาวิชา สถาบัน/มหาวิทยาลัย

ที่อยู่/ประเทศ

ผู้พิมพ์ประสานงาน : Your email address

วันที่รับบทความ: / วันที่แก้ไขบทความ: / วันที่ตอบรับการตีพิมพ์:

บทคัดย่อ นี่คือนิตยสารต้นฉบับสำหรับบทความของคุณเพื่อเสนอพิจารณาตีพิมพ์ในวารสาร SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY จัดพิมพ์ด้วย Microsoft Word for Windows โดยจัดระยะขอบบน 3.0 ซม. ระยะขอบขวา ขอบซ้ายและขอบล่าง 2.5 ซม. โดยมีการตั้งค่าขนาดของกระดาษ Custom size (19 ซม.x26.5 ซม.) หลัง “คำสำคัญ:” ให้กำหนดรูปแบบเป็น 2 สดมภ์ ด้วยความกว้าง 6.73 ซม. และระยะห่างสดมภ์ 0.5 ซม. พิมพ์บทความด้วยอักษร Angsana New ขนาด 13pt ความยาวของบทความไม่ควรเกิน 15 หน้า และสำหรับคำ **บทคัดย่อ คำสำคัญ** และ**เอกสารอ้างอิง** ให้กำหนดเป็นตัวเข้ม-เอียงด้วยอักษร Angsana New ขนาด 14pt

คำสำคัญ : เว้น 1 บรรทัดหลังจากบทคัดย่อ แล้วพิมพ์คำสำคัญของบทความ (4-5 คำ)

Abstract This is a template of your full paper for publishing on SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY. Use Microsoft Word for Windows. Leave 3.0 cm. margins from the top, 2.5 cm. from the right side, left side and bottom. Please adjust the page setup to custom size (19 cm.x26.5 cm.) sheet. Use double-column format width of 6.73 cm. with a space of 0.5 cm. between columns after the keywords. Use 11 point Times New Roman font in typing the abstract. The length of paper should not be longer than 15 pages. For the headings, such as **Abstract**, **Keywords** and **References** use 12 point Times New Roman bold-Italic.

Keywords: Please leave one blank line after the *Abstract* and write your keywords (4-5 words).

1. บทนำ

ชื่อบทความภาษาไทย (ใช้ตัวอักษรAngsana New ขนาด 20pt ตัวเข้ม กลางหน้ากระดาษ) ตามด้วยชื่อบทความภาษาอังกฤษ (ใช้ตัวอักษร Times New Roman ขนาด 16pt ตัวเข้ม กลางหน้ากระดาษ) จากนั้นเว้น 1 บรรทัด ตามด้วยชื่อผู้ประพันธ์ (ใช้ตัวอักษรAngsana New ขนาด 13pt ตัวเข้มกลางหน้ากระดาษ) ภาควิชา/สาขาวิชา สถาบัน/มหาวิทยาลัย (ใช้ตัวอักษรAngsana New ขนาด 13pt กลางหน้า) และที่อยู่/ประเทศ(ใช้ตัวอักษรAngsana New ขนาด 13pt กลางหน้า) จากนั้นระบุ email address ของผู้พิมพ์/ประสานงาน (ใช้ตัวอักษร Times New Roman ขนาด 10pt กลางหน้า) หัวข้อเรื่องแต่ละข้อ (ใช้ตัวอักษร Angsana New ขนาด 15pt หน้าชิดขอบซ้าย) โดยใช้หมายเลขแบบอินดู อารบิก (1, 2, 3,...) ไม่ใช่แบบเลขโรมัน (I, II, III, ...).

2. วัสดุ อุปกรณ์และวิธีการวิจัย

สรุปอธิบายถึงขั้นตอนการทดลองและการวิเคราะห์และมีข้อมูลที่เพียงพอสำหรับคนอื่นๆ ที่จะสามารถที่จะทำให้เกิดการทดลองซ้ำได้

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

สำหรับชื่อหัวข้อใหญ่ใช้ตัวอักษรAngsana New ขนาด 15pt, ตัวเข้ม ชิดขอบซ้าย เรียงลำดับหัวข้อด้วย 1, 2, 3,... (ไม่ใช่ I, II, III,...) การขึ้นหัวข้อใหม่แต่ละครั้งให้เว้น 1 บรรทัด สำหรับสมการคณิตศาสตร์ให้จัดเรียงด้วย (1), (2), (3),...

3.1 หัวข้อย่อยลำดับที่ 1

หัวข้อข้อย่อยลำดับที่ 1 ใช้ตัวอักษร Angsana New ขนาด 13pt ตัวเข้ม ชิดขอบซ้าย

3.1.1 หัวข้อย่อยลำดับที่ 2

หัวข้อข้อย่อยลำดับที่ 2 ใช้ตัวอักษร Angsana

New ขนาด 13pt ตัวเข้ม ชิดขอบซ้าย

3.2 ตาราง รูป และการอ้างอิง

สำหรับรูปภาพตารางและการอ้างอิงตัวเลขควรเป็นเลขดังนี้ รูปที่ 1 รูปที่ 2, ... ฯลฯ (ที่กึ่งกลาง) และตารางควรจะเป็นเลขดังนี้ Table1, Table2 ... ฯลฯ (ที่ด้านซ้าย) การอ้างอิงในบทความให้ใช้เครื่องหมายวงเล็บเหลี่ยม เช่น [2] จะต้องเรียงลำดับหมายเลขอ้างอิงจากหมายเลขน้อยไปสู่หมายเลขมากให้ถูกต้อง การอ้างอิงหมายเลขที่มีลำดับติดต่อกัน ตัวอย่างเช่น[1-5]

4. สรุปผล

เพื่อให้ทุกบทความที่ได้รับการพิจารณาตีพิมพ์มีรูปแบบที่ตรงกัน ผู้ประพันธ์จะต้องจัดทำบทความตามต้นแบบ ไม่เช่นนั้นบทความของท่านจะถูกส่งคืนเพื่อปรับปรุงรูปแบบให้ตรงกับต้นแบบนี้ขอขอบคุณท่านสำหรับการให้ความร่วมมือ

5. กิตติกรรมประกาศ

ในส่วนนี้ไม่จำเป็นต้องมี แต่ท่านสามารถใช้ส่วนนี้ในการนำเสนอให้ทราบถึงผู้ที่สนับสนุนการทำงานวิจัยของท่าน เช่น นักศึกษาที่มีส่วนร่วม ผู้ที่มีส่วนร่วมจากภายในหรือภายนอก หรือองค์กรที่ให้ทุนสนับสนุน

6. หลักเกณฑ์ในการเขียนเอกสารอ้างอิง

การเขียนเอกสารอ้างอิงกำหนดให้ใช้ ตัวอักษร Angsana New ขนาด 13pt และเขียนตามตัวอย่างของเอกสารอ้างอิงในแม่แบบนี้ กรณีที่เป็น

เอกสารอ้างอิง [1] หมายถึง “หนังสือ”

เอกสารอ้างอิง [2] หมายถึง “รายงาน”

เอกสารอ้างอิง [3] หมายถึง “วารสาร”

เอกสารอ้างอิง [4] หมายถึง “ประชุมวิชาการ”

เอกสารอ้างอิง [5] หมายถึง “มาตรฐาน”

เอกสารอ้างอิง [6] หมายถึง “เว็บไซต์”

เอกสารอ้างอิง [7] หมายถึง “ปริญญาโท”

เอกสารอ้างอิง [8] หมายถึง “วิทยานิพนธ์”

เอกสารอ้างอิง [9] หมายถึง “คุณวุฒิบัตร”

โดยในกรณีที่เอกสารอ้างอิงเป็นภาษาไทยให้แปลเป็นภาษาอังกฤษและใส่คำว่า “(in Thai)” ต่อท้าย

เอกสารอ้างอิง

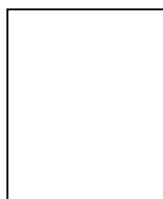
- [1] M. Ned, U. M. Tore and R. P. William, Power Electronic, John Wiley and sons, 1995.
- [2] The Federation of Thai Industries, Executive Summary: Eco-industrial development under the cost to develop green industry, 2013(in Thai).
- [3] D. Susa and H. Nordman, “A Simple model for calculating transformer hot-spot temperature,” *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 24, no.3, pp.1257-1264, Jul. 2009.
- [4] C. Tangsiriworakul, S. Tadsuan, “A Comparison of iron losses and acoustic noise supplied by pwm inverter of dm and spwm techniques,” in *Proc. International Conference on Mechanical and Electrical Technology (ICMET 2009)*, China, 8-11Aug. 2009, pp. 105-110.
- [5] IEEE Guide for loading mineral-oil-immersed overhead and pad-mounted distribution transformers rated 500 kVA and less with 65°C or 55°C average winding rise, ANSI/IEEE C57.91-1981.
- [6] Wikipedia. (2010, Jun. 28). “Biodiesel” [Online]. Available: <http://en.wikipedia.org/wiki/Biodiesel>
- [7] K. Khianjutturut, W. Chaingam, S. Damrongnavavith, S. Nitcumharn, and A. Duangin, “The software implement for electric energy data logger of single-phase kilowatt-hour meter

with image signal processing,” Student’s Project, Dep. Elec. Eng., Southeast Asia Univ., 2014 (in Thai).

- [8] C. Bundanphrai, “A comparison of electric power and temperature on three- phase induction motor by varying wind flow with damper and pwm inverter supply,” M.S. Thesis, Southeast Asia Univ., 2014 (in Thai).
- [9] V. Kinnares, “Measurement, Analysis and prediction of harmonic power losses in pwm feed induction motors,” Ph.D. Dissertations, Univ., Nottingham, 1997.

หมายเหตุ กรณีที่เอกสารอ้างอิงเป็นภาษาไทย ให้แปลเป็นภาษาอังกฤษและใส่คำว่า “(in Thai)” ต่อท้าย

ประวัติผู้ประพันธ์ :



ผู้ประพันธ์ระบุประวัติโดยย่อของตนเอง ในส่วนที่เกี่ยวข้องกับประวัติศึกษาตำแหน่ง สถานที่ทำงาน และงานวิจัยที่สนใจ พร้อม

รูปถ่าย ขนาด 2 ซม. x 2.4 ซม.

Guidelines for Contributors

SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY is published two-annually by Southeast Asia University. All articles are considered for publication in this journal will have to follow the following conditions, 1) they have not been published elsewhere and 2) they are not currently being submitted for consideration in any other journals. All articles are independently assessed (peer reviewed) by at least three specialists in their relevant fields. The editor board reserves a privilege to ask the authors to improve their articles, and to decide whether submitted articles should be published or not.

Types of work published

1. Research articles by individual or team researchers.
2. Academic articles include review articles, technical articles, and special articles on science and technology.

Manuscripts

Manuscripts must be prepared to meet professional standards using word processors on Windows. The table, diagrams and illustrations in the contributed manuscripts should be in a camera-ready format. For the template article can be downloaded from the website <http://saujournalst.sau.ac.th>

Submission

The manuscripts of the prospective contributors should be submitted to the editor-in-chief. Authors must submit manuscript (without name, address and authors, biography notifications) with electronic file (PDF) and "Copyright Transfer Form".

- Directly to the editor-in-chief of SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY, Faculty of Engineering, Southeast Asia University.

- By mail to the editor-in-chief of SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY, Faculty of Engineering, Southeast Asia University, 19 / 1, Nongkhangphlu, Nongkhaem, Bangkok 10160, Thailand.

- By online at Website saujournalst.sau.ac.th

All papers submitted to SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY are subject to peer review. If revised or accepted of article should be submitted the manuscript (PDF and DOC) to the editor-in-chief. You may contact us using the information listed at Southeast Asia University, Tel.#: 0-2807-4500-27 EXT 331, FAX : 0-2807-4528 19/1, Nongkhangphlu, Nongkhaem, Bangkok 10160, Thailand; Email address : SAUJournalST@sau.ac.th

Manuscripts of paper writing as english language for SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY

Title of the Paper

Author's Names

Department, University

Address, (country)

Corresponding author : e-mail address

Received: / Revised: / Accepted:.....

บทคัดย่อ นี้คือต้นแบบสำหรับบทความของคุณเพื่อเสนอพิจารณาตีพิมพ์ในวารสาร SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY จัดพิมพ์ด้วย Microsoft Word for Windows โดยจัดระยะขอบบน 3.0 ซม. ระยะขอบขวา ขอบซ้ายและขอบล่าง 2.5 ซม. โดยมีการตั้งค่าขนาดของกระดาษ Custom size (19 ซม.x26.5 ซม.) หลัง “คำสำคัญ :” ให้กำหนดรูปแบบเป็น 2 สดมภ์ ด้วยความกว้าง 6.73 ซม. และระยะห่างสดมภ์ 0.5 ซม. พิมพ์บทความด้วยอักษร Angsana New ขนาด 13pt ความยาวของบทความไม่ควรเกิน 15 หน้า และสำหรับคำบทคัดย่อ คำสำคัญ และ**เอกสารอ้างอิง** ให้กำหนดเป็นตัวเข้ม-เอียงด้วยอักษร Angsana New ขนาด 14pt

คำสำคัญ : เว้น 1 บรรทัดหลังจากบทคัดย่อ แล้วพิมพ์คำสำคัญของบทความ (4-5 คำ)

Abstract This is a template of your full paper for publishing on SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY. Use Microsoft Word for Windows. Leave 3.0 cm. margins from the top, 2.5 cm. from the right side, left side and bottom. Please adjust the page setup to custom size (19 cm.x26.5 cm.) sheet. Use double-column format width of 6.73 cm. with a space of 0.5 cm. between columns. Use 11 point Times New Roman font in typing the abstract. The length of paper should not be longer than 15 pages. For the headings, such as **Abstract**, **Keywords** and **References** use 12 point Times New Roman bold-Italic.

Keywords : Please leave one blank line after the Abstract and write your keywords (4-5 words).

1. Introduction

The title of the paper you must use 16 point Times New Roman in Bold at the center of the page. Leave one blank line and type the authors' names, department and country in capital letters with 11 point Times New Roman in Bold and centered. For the corresponding author, use 11 point Times New Roman centered. The heading of each section should be printed in small 12 point, left justified, bold Times New Roman font. Use Hindu-Arabic number (1, 2, 3,...) for the section's numbering and not the Roman Numerals (I, II, III, ...).

2. Materials and Methods

Brief description of the experimental procedure and analysis and sufficient information for others to be able to reproduce the experiments.

3. Results and Discussion

For section heading, use 12 point left justified Times New Roman in bold, numbered as follows : 1, 2, 3,... (not I, II, III,...). Please leave one blank spaces between successive sections. Mathematical equations must be numbered as follows : (1), (2), (3)....

3.1 Subsection

For subsection heading, use 11 point left justified Times New Roman in bold.

3.1.1 Sub-subsection

When including a sub-subsection, use 11 point left justified Times New Roman in bold.

3.2 Figures, Tables and Reference

Figures should be numbered as follows: Fig.1, Fig.2, ... etc.(at center) and Tables should be numbered as follows: Table.1, Table.2, ... etc.(at Left). Type the corresponding number of references in square brackets.

4. Conclusion

Please follow our instructions faithfully, otherwise, you have to resubmit your paper. This will enable us to maintain uniformity in the journal. Thank you for your cooperation.

5. Acknowledgement

This section is optional. You can use this section to acknowledge support you have had for your research from your colleagues, student's participation, internal or external partners' contribution or funding organization.

6. Rules for writing reference

The letter, in 11 point Times New Roman, will be used for writing reference and the reference in this template being subject to the condition as below :

Ref. [1] stand for "Book"

Ref. [2] stand for "Report"

Ref. [3] stand for "Journal"

Ref. [4] stand for “Conference”

Ref. [5] stand for “Standard”

Ref. [6] stand for “Website”

Ref. [7] stand for “Student’ Project”

Ref. [8] stand for “Thesis”

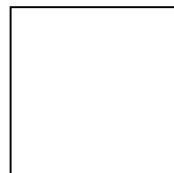
Ref. [9] stand for “Dissertation”

In case of reference written in Thai being used. It need to be translated to English and put the word “(in Thai)” at the back of reference.

References

- [1] M. Ned, U. M. Tore and R. P. William, Power Electronic, John Wiley and sons, 1995.
- [2] The Federation of Thai Industries, Executive Summary: Eco- industrial development under the cost to develop green industry, 2013. (in Thai)
- [3] D. Susa and H. Nordman, “A Simple model for calculating transformer hot- spot temperature,” IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 24, no.3, pp. 1257-1264, Jul. 2009.
- [4] C. Tangsiriworakul, S. Tadsuan, “A Comparison of iron losses and acoustic noise supplied by pwm inverter of dm and spwm techniques,” in Proc. International Conference on Mechanical and Electrical Technology (ICMET 2009), China, 8-11 Aug. 2009, pp. 105-110.
- [5] IEEE Guide for loading mineral-oil-immersed overhead and pad-mounted distribution transformers rated 500 kVA and less with 65 °C or 55 °C average winding rise, ANSI/ IEEE C57.91-1981.
- [6] Wikipedia. (2010, Jun. 28). “Biodiesel” [Online]. Available: <http://en.wikipedia.org/wiki/Biodiesel>
- [7] K. Khianjutturut, W. Chaingam, S. Damrongnavavith, S. Nitcumharn, and A. Duangin, “The software implement for electric energy data logger of single-phase kilowatt-hour meter with image signal processing,” Student’s Project, Dep. Elec. Eng., Southeast Asia Univ., 2014. (in Thai)
- [8] C. Bundanphrai, “A comparison of electric power and temperature on three-phase induction motor by varying wind flow with damper and pwm inverter supply,” M.S. Thesis, Southeast Asia Univ., 2014. (in Thai)
- [9] Kinnares, “Measurement, Analysis and prediction of harmonic power losses in pwm feed induction motors,” Ph. D. Dissertations, Univ., Nottingham, 1997.

Authors’ Biography:



The author should include a brief introduction about his/ her interest in the research topic and a scanned 2 cm.x2.4 cm.

photo attached the original manuscript



หมายเลขบทความ
(เฉพาะเจ้าหน้าที่กรอก)

แบบฟอร์มใบรับรองบทความ SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY

1. ประเภทของบทความ (Article type)

☐ วิจัย (Research) ☐ วิชาการ (Academic)

2. สาขาบทความที่ส่ง

☐ Electrical Engineering ☐ Electronic & communication Engineering ☐ Industrial Engineering
☐ Civil Engineering ☐ Computer Science & Engineering ☐ Mechanical Engineering
☐ Agricultural Engineering ☐ Occupational Health & Safety ☐ Environment Engineering
☐ Energy ☐ Etc..

3. ชื่อบทความ (Article title)

ภาษาไทย :

English :

4. ชื่อ-สกุลของผู้รับผิดชอบประสานงาน (Name-Family name of corresponding author):

:

5. สถานที่ติดต่อของผู้รับผิดชอบประสานงาน (Contact location of corresponding author)

ที่อยู่ (Address):

.....

โทรศัพท์ (Tel.) โทรสาร (Fax) E-mail:

6. รายชื่อและที่อยู่ของเจ้าของบทความทั้งหมด (List of names and addresses of all article authors)

ชื่อ-สกุล (ภาษาไทย ตัวบรรจง)	Name-Family name. (Scripted)	หน่วยงาน (Affiliation)	โทรศัพท์ (Tel.)	E-mail
1.				
2.				
3.				

7. เสนอรายชื่อผู้ประเมิน (Proposed a list of reviewers/evaluators)

ชื่อ-สกุล (Name-Family name)	หน่วยงาน (Affiliation)	โทรศัพท์ (Tel.)	E-mail
1.			
2.			
3.			
4.			

8. การรับรองบทความ (Certification of article)

☐ ขอรับรองว่าบทความต้นฉบับนี้ยังไม่เคยได้รับการเผยแพร่และตีพิมพ์ในวารสารอื่นใดมาก่อน

(I certify that this original article has not been previously published or submitted in any other journal.)

ขอรับรองว่าข้อความดังกล่าวข้างต้นเป็นจริงทุกประการ (I hereby certify that the above statement is true in all respects.)

ลงชื่อ (Sign).....ผู้รับผิดชอบประสานงาน (Corresponding author)

()

วัน (date)..... เดือน (month)..... พ.ศ. (year).....

หมายเหตุ ส่งแบบฟอร์มนี้มาพร้อมกับบทความตามช่องทางในคำแนะนำสำหรับผู้เขียน (การส่งบทความ)

Note: Submit this form with your article according to the instructions for authors. (Article submission)



สมาชิกเลขที่

.....

ใบสมัครสมาชิก SAU JOURNAL OF SCIENCE & TECHNOLOGY

วันที่สมัคร

ข้าพเจ้า นาย/นาง/นางสาว สกุล อาชีพ

ที่อยู่ (สำหรับจัดส่งวารสาร) เลขที่ ถนน แขวง/ตำบล

เขต/อำเภอ จังหวัด รหัสไปรษณีย์

โทรศัพท์ โทรสาร E-mail

มีความประสงค์สมัครเป็นสมาชิก

อัตราค่าสมาชิก

☐ ปี (2 ฉบับ/ปี)

500 บาท

พร้อมกันนี้ได้ส่งค่าสมาชิก จำนวน บาท

จำนวนเงิน(ตัวอักษร)

โอนเงินเข้าบัญชีธนาคาร ชื่อบัญชี เลขที่บัญชี

หมายเหตุ 1. กรุณาส่งสำเนาใบเสร็จการจ่ายเงินมาที่ E-mail Address : saujournalst@sau.ac.th

พร้อมเขียนชื่อ-นามสกุล และหมายเลขสมาชิก (ถ้ามี)

ลงชื่อ ผู้สมัคร

(.....)

สำนักวิจัย มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์ 19/1 ถนนเพชรเกษม แขวงหนองค้างพลู เขตหนองแขม กรุงเทพฯ 10160

โทรศัพท์ 0-2807-4500-27 ต่อ 404 โทรสาร 0-2807-4528 E-mail Address : saujournalst@sau.ac.th

50

สาขาวิชาด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ที่เปิดสอน

ปริญญาเอก

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า (ปร.ด)

ปริญญาโท

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า (วศ.ม.)

สาขาวิชาบริหารงานวิศวกรรมการก่อสร้าง (วศ.ม.)

ปริญญาตรี

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม (วศ.บ.)

สาขาวิชาวิศวกรรมความปลอดภัย (วศ.บ.)

สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ (IoT) (วศ.บ.)

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา (วศ.บ.)

สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า (วศ.บ.)

สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ (วศ.บ.)

สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล (วศ.บ.)

สาขาวิชาดิจิทัลมีเดีย (วท.บ.)

สาขาวิชาเทคโนโลยีดิจิทัลและนวัตกรรม (วท.บ.)



มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์
SOUTHEAST ASIA
UNIVERSITY

มหาวิทยาลัยเอเชียอาคเนย์

19/1 ถนนเพชรเกษม 106 หองแหม กรุงเทพฯ 10160

โทรศัพท์ 02-807-4500-27 ต่อ 404

Email : saujournalst@sau.ac.th

