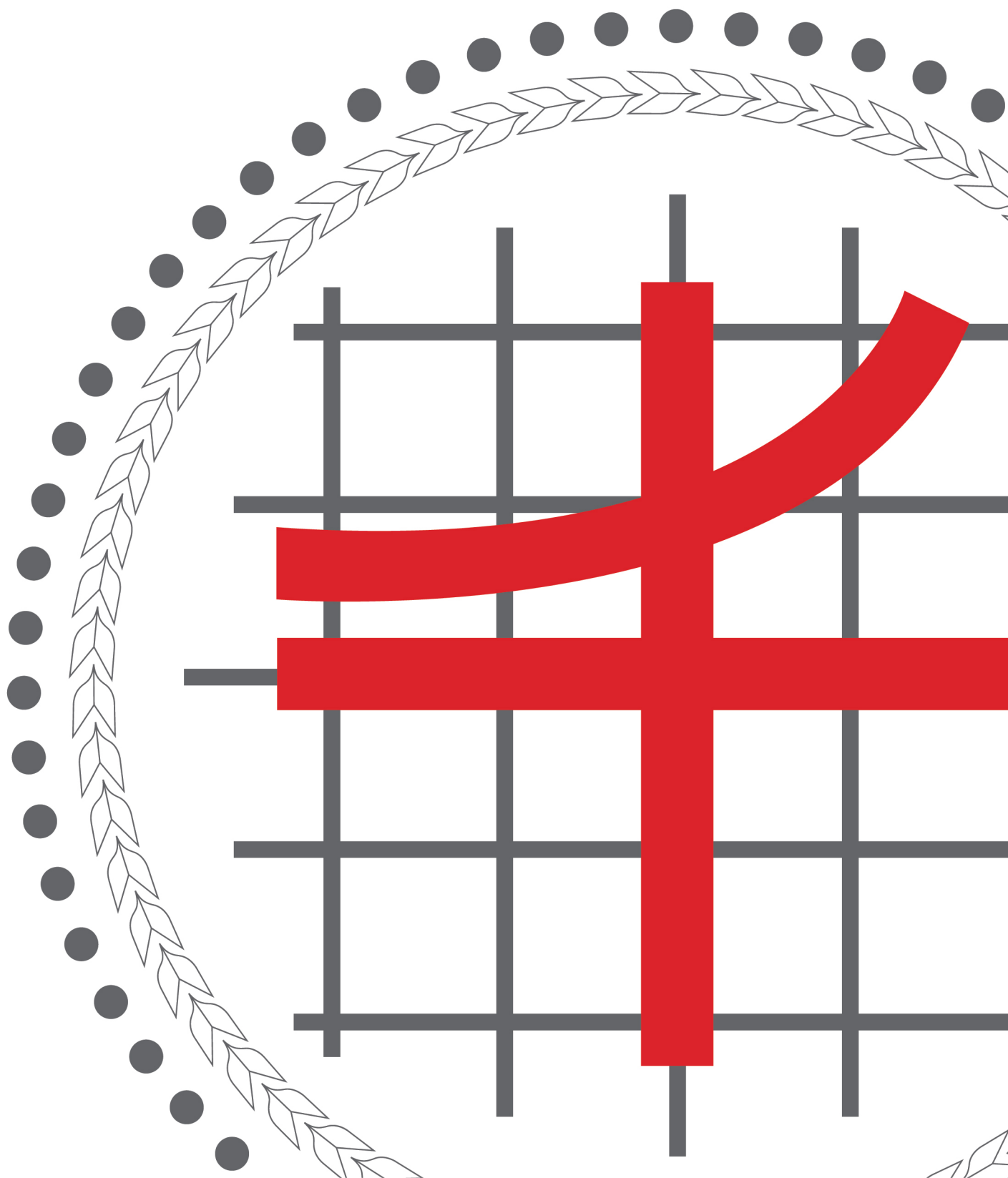


Srinakharinwirot University Engineering Journal

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

Vol. 21 No.1 (January - June 2025)

ISSN : 2774 - 0269 (Online)



วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ เป็นวารสารในศูนย์ข้อมูลดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (Thai – Journal Citation Index Centre: TCI) กลุ่มที่ 2 พ.ศ. 2563-2567 เลขมาตรฐานสากลประจำวารสาร 2774-0269 (Online) เพื่อเผยแพร่บทความวิจัยและบทความวิชาการ ด้านวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีวิศวกรรมเคมี วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมชีวการแพทย์ และสาขาใกล้เคียงอื่นๆ ทั้งในเชิงทฤษฎีและเชิงปฏิบัติ เป็นภาษาอังกฤษหรือภาษาไทยที่มีบทความภาษาอังกฤษ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ จึงกำหนดให้จัดทำโครงการจัดทำวารสารทางวิชาการขึ้น โดยจัดพิมพ์เป็นประจำทุกปี วารสารตีพิมพ์ 2 ครั้งต่อปี (ทุก 6 เดือน) ในเดือน มิถุนายน และ ธันวาคม ฉบับที่ 1 ช่วงเดือนมกราคม – มิถุนายน ฉบับที่ 2 ช่วงเดือนกรกฎาคม – ธันวาคม ซึ่งบทความที่ได้รับการตีพิมพ์ทุกบทความจะผ่านการทบทวนโดยผู้ทรงคุณวุฒิอย่างน้อย 2 คนต่อบทความ (Peer-review) และประเมินบทความในลักษณะเป็นผู้ทรงคุณวุฒิที่ประเมินบทความไม่ทราบชื่อผู้แต่งและผู้แต่งไม่ทราบชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ หรือ Double Blinded review และสงวนสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พุทธศักราช 2521 และเผยแพร่แบบออนไลน์ทั่วประเทศ

วัตถุประสงค์

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (วศม) มีวัตถุประสงค์เพื่อคัดสรรและเผยแพร่บทความวิจัยและบทความวิชาการทางด้านวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีในสาขาวิศวกรรมเคมี วิศวกรรมเครื่องกล วิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมโยธา วิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมชีวการแพทย์ และสาขาใกล้เคียงอื่นๆ ทั้งในเชิงทฤษฎีและเชิงปฏิบัติ

เจ้าของ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

กองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

63 หมู่ 7 ตำบลอ้อมเกร็ด อำเภอบางกรวย

จังหวัดนครนายก 26120

โทร. 0 2649 5000 ต่อ 27560

<http://eng.swu.ac.th> และ <https://www.tci-thaijo.org/index.php/sej>

อีเมล journalengswu@gmail.com

บทบรรณาธิการ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ได้จัดพิมพ์ขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่ผลงานวิชาการ ผลงานวิจัย และแลกเปลี่ยนแนวคิด ความรู้ ความก้าวหน้าใหม่ ด้านวิศวกรรมศาสตร์อย่างต่อเนื่องมาเป็นระยะเวลากว่า 20 ปี โดยบทความทุกเรื่องได้ผ่านการพิจารณาถ้อยแถลงและประเมินคุณภาพตามกระบวนการจากผู้ทรงคุณวุฒิในสาขาวิชาที่เกี่ยวข้องจากหลายสถาบันการศึกษา ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ฉบับนี้ ได้นำเสนอบทความจำนวนทั้งสิ้น 8 บทความ เป็นบทความวิจัยจำนวน 8 บทความ โดยบทความทั้งหมดเป็นผลงานวิจัยพื้นฐานและผลงานวิจัยประยุกต์ในสาขาต่างๆ ทางวิศวกรรมศาสตร์ ซึ่งผลงานที่เผยแพร่ในครั้งนี้เป็นผลงานวิจัยที่มุ่งเน้นไปที่การประยุกต์ใช้งานและการแก้ปัญหาเชิงปฏิบัติการที่เข้ากับสถานการณ์ปัจจุบัน

วารสารวิศวกรรมศาสตร์จัดพิมพ์เป็นประจำทุกปี โดยตีพิมพ์ 2 ครั้งต่อปี (ทุก 6 เดือน) ในเดือน มิถุนายน และ ธันวาคม ฉบับที่ 1 ช่วงเดือนมกราคม – มิถุนายน ฉบับที่ 2 ช่วงเดือนกรกฎาคม – ธันวาคม ซึ่งบทความที่ได้รับการตีพิมพ์ทุกบทความจะผ่านการทบทวนโดยผู้ทรงคุณวุฒิอย่างน้อย 2 คนต่อบทความ (Peer-review) และประเมินบทความในลักษณะเป็นผู้ทรงคุณวุฒิที่ประเมินบทความไม่ทราบชื่อผู้แต่งและผู้แต่งไม่ทราบชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ หรือ Double Blinded review และสงวนสิทธิ์ตามพระราชบัญญัติลิขสิทธิ์ พุทธศักราช 2521 และเผยแพร่แบบออนไลน์ทั่วประเทศ

กองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ หวังเป็นอย่างยิ่งว่า วารสารฉบับนี้จะเป็นเวทีทางวิชาการ ที่จะกระตุ้นการผลิตผลงานและแลกเปลี่ยนเรียนรู้ของนักวิจัย นักวิชาการและผู้อ่านทุกท่าน ทั้งนี้ เพื่อการมีส่วนร่วมในการสร้างสรรค์งานวิจัยอันจะเป็นการส่งเสริมการพัฒนาประเทศ ตามแนวนโยบายประเทศไทย 4.0 ในโอกาสนี้กองบรรณาธิการขอขอบคุณกรรมการผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่ให้ความอนุเคราะห์ในการประเมินบทความ ให้ความเห็นที่เป็นประโยชน์ และมีส่วนร่วมในการพัฒนาคุณภาพและมาตรฐานของวารสารฯ ฉบับนี้เสมอ สุดท้ายนี้หากมีข้อเสนอแนะประการใดทางกองบรรณาธิการฯ ยินดีรับฟังข้อเสนอแนะเพื่อการปรับปรุงและพัฒนาวารสารให้มีคุณภาพยิ่งขึ้น

รองศาสตราจารย์ ดร.ประชา บุญยานิชกุล

บรรณาธิการวารสาร

สารบัญ

บทความวิจัย

การเปรียบเทียบความแตกต่างของการต่อหลักดินที่มีผลต่อค่าความต้านทานดิน Comparison of differential grounding electrode with earth resistance ดุสิต อุทิศสุนทร, จิรวัดน์ วิมุตติสุขวิริยา	1
การจำลองสถานการณ์สำหรับการปรับปรุงสายการผลิตด้วยการปรับเรียบการไหล Computer Simulation For Enhancing Gear Production Line With Flow Smoothing กิริฎ์ คงเจริญ, ประกายกานต์ สุขสมัย, บุชบา พฤษชาพันธุ์รัตน์	16
การศึกษาเชิงตัวเลขการกระจายตัวของอากาศภายในอาคารนิทรรศการ Numerical Study of Air Distribution Inside Exhibition Hall ศุภสิน รุจิพาณิชย์, กันต์ธกรณ เขาทอง	28
Forecasting Noncommunicable Diseases in Thailand: Evaluating the Predictive Power of Social Determinants of Health-Related Features Peatiphat Bhoothookngoen, Nattapong Sanchan	39
การจำลองและวิเคราะห์ผลของการใช้อากาศสำหรับการถ่ายโอนความร้อนจากแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน NMC ในรถยนต์ไฟฟ้าด้วยวิธีการ CFD Simulation and Analysis of Airflow for Heat Transfer from NMC Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles Using CFD Methods รัฐพล โพธิ์ศรี, ธรรมรัตน์ แยกสูงเนิน	50
การออกแบบใบพัดบังคับลมโดยใช้การวิเคราะห์ความร้อนและการจำลอง CFD ของมอเตอร์ DC แบบไร้แปรง ถ่านสำหรับรถยนต์พลังงานแสงอาทิตย์ STC-4 Forced Air Design using Thermal Analysis and CFD Simulations of a Brushless DC Motor for the STC-4 Solar Car วิฑูร หวนโคกสูง, ธรรมรัตน์ แยกสูงเนิน	63
ระบบตรวจจับเรือในแม่น้ำเจ้าพระยาด้วยเทคนิค YOLOv7 Boat Detection System in the Chao Phraya River Using YOLOv7 Techniques สราวุฒิ สายทวี, สมชาติ จิรวิภากร	77
การห่อหุ้มด้วยวิธีไอโอโนโทรปิกเจลชันต่อความเสถียรของธาตุเหล็ก Effect of Ionotropic Gelation Encapsulation on Iron Stability พีรณัฐ นันสมบัติ, แก้วตา เจตศรีสุภาพ	92

การเปรียบเทียบความแตกต่างของการต่อหลักดินที่มีผลต่อค่าความต้านทานดิน Comparison of Differential Grounding Electrode with Earth Resistance

ดุสิต อุทิศสุนทร^{1*} จีรวัฒน์ วิมุตติสุขวิริยา²

¹สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ ถ.จิระ ต.ในเมือง
อ.เมือง จ.บุรีรัมย์ 31000

²สาขาวิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธา คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์ ถ.จิระ ต.ในเมือง
อ.เมือง จ.บุรีรัมย์ 31000

Dusit Uthitsunthorn^{1*} Cheellawad Vimuttisoongviriya²

¹Department of Electrical Engineering Technology, Faculty of Industrial Technology,
Buriramrajabhat University, Jira Road, Naimuang Sub-district, Muang District, Buriram 31000

²Department of Civil Engineering Technology, Faculty of Industrial Technology,
Buriramrajabhat University, Jira Road, Naimuang Sub-district, Muang District, Buriram 31000

*Corresponding author Email: dusit.ut@bru.ac.th

(Received: April 12, 2024; Revised: November 20, 2024 ; Accepted: April 3, 2025)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ทำการศึกษาเปรียบเทียบความแตกต่างของหลักดินที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานดิน ซึ่งใช้ข้อมูลทางธรณีวิทยาภายในจังหวัดบุรีรัมย์ โดยมีลักษณะสภาพพื้นที่ทั่วไปเป็นที่ราบสูงและภูมิประเทศที่เกิดจากภูเขาไฟ ใช้พื้นที่ในการทดลองที่มีลักษณะสภาพของดินแตกต่างกัน 3 แห่ง คือ อำเภอประโคนชัย อำเภอเมืองบุรีรัมย์ และอำเภอกุเมือง ตามลำดับ ทั้งนี้เพื่อหาค่าความต้านทานดินที่มีความสัมพันธ์กับข้อมูลธรณีวิทยา การศึกษานี้ได้ทดลองวัดหาค่าความต้านทานของหลักดินแบบแท่งและแบบแผ่นที่มีขนาดแตกต่างกันพบว่า เมื่อใช้หลักดินแบบแท่งทองแดงขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 14.20 มิลลิเมตร ความยาวขนาด 240 เซนติเมตร ค่าความต้านทานดินอำเภอประโคนชัยมีค่าต่ำสุด 6.43 โอห์ม อำเภอเมืองบุรีรัมย์มีค่า 7.18 โอห์ม และอำเภอกุเมืองมีค่ามากที่สุด 353 โอห์ม ตามลำดับ เมื่อใช้หลักดินแบบแผ่นทองแดงขนาดพื้นที่ 30x30 ตารางเซนติเมตร ฝังลงดินความลึก 150 เซนติเมตร ค่าความต้านทานดินอำเภอประโคนชัยมีค่าต่ำสุด 10.3 โอห์ม อำเภอเมืองบุรีรัมย์มีค่า 12.5 โอห์ม และอำเภอกุเมืองมีค่าสูงสุดที่สุด 368 โอห์ม ตามลำดับ จากนั้นทำการทดสอบการจำแนกประเภทของดินพบว่า ดินอำเภอประโคนชัยและอำเภอเมืองบุรีรัมย์เป็นดินทรายปนดินเหนียวมีความชื้นในดินมากทำให้น้ำไหลซึมผ่านยากส่งผลให้ค่าความต้านทานดินน้อยกระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านได้ดี สำหรับดินอำเภอกุเมืองเป็นดินทรายปนดินตะกอนขนาดอนุภาคละก้นดินมีความชื้นน้อยทำให้น้ำไหลซึมผ่านได้ง่ายส่งผลให้ค่าความต้านทานดินมากที่สุด

คำสำคัญ: การต่อลงดิน หลักดิน ค่าความต้านทานดิน การจำแนกดิน

ABSTRACT

This research investigates and compares variations in grounding electrode characteristics affecting soil resistance values, utilizing geological data from Buriram Province. The study area is characterized by plateaus and volcanic terrain. Three distinct areas with varying soil conditions are consists: Prakhon Chai District, Mueang Buriram District, and Khu Mueang District, were selected for experimentation to ascertain soil resistance values correlated with geological features. The study involved measuring the resistance of rods and plates of different dimensions. Results indicate that employing a copper bar ground stake with a diameter of 14.20 millimeters and a length of 240 centimeters yielded the lowest soil resistance values in Prakhon Chai District is 6.43 ohms, followed by Mueang Buriram District is 7.18 ohms, and the highest value was observed in Khu Mueang District is 353 ohms. Similarly, burying a copper sheet is 30x30 square centimeters to a depth of 150 centimeters revealed varying soil resistivity values: Prakhon Chai District is 10.3 ohms, Mueang Buriram District is 12.5 ohms, and Khu Mueang District is 368 ohms. Soil classification tests identified sandy clay soil with high soil moisture content in Prakhon Chai District and Mueang Buriram District, resulting in low soil resistance and efficient electric current conduction. Conversely, Khu Mueang District exhibited sandy soil mixed with silt, facilitating easy water permeation and consequently yielding the highest soil resistance value.

Keyword: Grounding, grounding electrode, soil resistivity, soil classification.

1. บทนำ

ไฟฟ้าเป็นปัจจัยสำคัญสำหรับการดำรงชีวิตประจำวัน และเป็นตัวแปรสำคัญในการพัฒนาเศรษฐกิจและอุตสาหกรรมของประเทศ การขยายเขตติดตั้งระบบไฟฟ้าจึงจำเป็นต้องเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องตามความต้องการของผู้ใช้ ดังนั้นในการควบคุมการจ่ายกระแสไฟฟ้าและป้องกันอันตรายจากกระแสไฟฟ้าลัดวงจร (Short Circuit Current) หรือกระแสไฟฟ้ารั่ว (Eating Current) ต้องมีการพิจารณาอย่างละเอียดถี่ถ้วนเพื่อป้องกันอันตรายความเสียหายและความปลอดภัย ถ้าอุปกรณ์ไฟฟ้านั้นไม่ได้ต่อสายดินหรือสายดินมีความต้านทานสูงเกินไปย่อมทำให้กระแสไฟฟ้าที่รั่วไหลออกมาไม่สามารถลงสู่พื้นดิน กรณีที่เกิดกระแสไฟฟ้ารั่วเมื่อผู้ใช้สัมผัสพื้นผิวหรือโครงเครื่องใช้ไฟฟ้าก็จะมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านร่างกายไปลงสู่ดินเกิดอันตรายต่อชีวิต โดยทั่วไป

กระแสไฟฟ้าส่วนที่รั่วจะใช้สายดินเป็นเส้นทางการไหลลงดิน เพราะสายดินมีความต้านทานต่ำกว่าร่างกายมนุษย์ [1]-[2] อีกทั้งควรมีการตรวจวัดกระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านลงดินเพื่อความปลอดภัยทั้งต่ออุปกรณ์และผู้ใช้ ทั้งนี้ดินในแต่ละพื้นที่ย่อมมีค่าความต้านทาน (Soil Resistivity) ของการต่อสายดินแตกต่างกัน ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานของระบบสายดิน เช่น องค์ประกอบทางเคมีของดิน ความชื้น อุณหภูมิ ฤดูกาล สภาพแวดล้อม ขนาดและความลึกของหลักดิน เป็นต้น [3] ระบบไฟฟ้าที่ดีจึงควรติดตั้งสายดินให้มีความเหมาะสมโดยพิจารณาจากปัจจัยต่าง ๆ ที่ได้กล่าวมาข้างต้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาค่าความต้านทานดินในพื้นที่ต่างกันโดยใช้ระบบการต่อสายดินที่แตกต่างกัน โดยมุ่งหวังว่าข้อมูลที่ได้จะเป็นประโยชน์ต่อการคัดเลือกระบบสายดินที่เหมาะสมกับพื้นที่ศึกษาได้

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการศึกษาเปรียบเทียบค่าความต้านทานดินที่เกิดจากการต่อหลักดินแบบแบ่งทองแดงและแบบแผ่นทองแดง รวมทั้งพิจารณาประเภทของดินที่ส่งผลต่อค่าความต้านทานดินที่แตกต่างกัน โดยเลือกตำแหน่งพื้นที่ศึกษาที่อยู่ใกล้เคียงกับบริเวณก่อสร้างสถานีไฟฟ้าย่อยของ 3 อำเภอในจังหวัดบุรีรัมย์ ได้แก่ อำเภอประโคนชัย อำเภอเมืองบุรีรัมย์ และอำเภอคูเมือง ตามลำดับรายละเอียดทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องมีดังต่อไปนี้

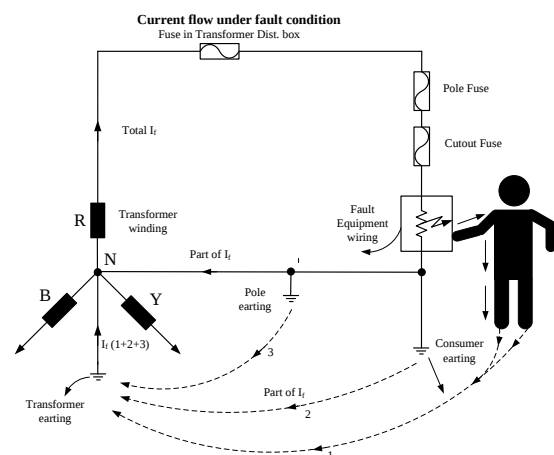
2.1 การต่อลงดิน

การต่อลงดิน (Earthing หรือ Grounding) เป็นการต่อตัวนำระหว่างวงจรไฟฟ้าหรือบริภัณฑ์กับดิน การต่อลงดินที่ถูกต้องตามมาตรฐานตามหลักวิศวกรรมเพื่อเพิ่มความปลอดภัยในการใช้ไฟฟ้าและคุณภาพไฟฟ้า [4] การต่อลงดินในระบบไฟฟ้าสามารถแบ่งตามวัตถุประสงค์ได้ 2 ประเภท คือ การต่อลงดินของระบบ (System Grounding) เป็นการต่อสายนิวตรอนกับสายดินลงหลักดินที่แผงควบคุมไฟฟ้าหลัก โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อควบคุมระดับแรงดันของระบบเมื่อเทียบกับดิน ทั้งนี้จะมีอุปกรณ์ป้องกันตรวจจับเมื่อกระแสไหลผ่านตัวนำลงสู่ดินเกิดการลัดวงจรลงดิน และการต่อลงดินของบริภัณฑ์ (Equipment Grounding) เป็นการต่อส่วนโลหะของบริภัณฑ์ หรือโครงโลหะของอุปกรณ์ไฟฟ้าเพื่อป้องกันอันตรายต่อบุคคลเนื่องจากไฟฟ้าลัดวงจรและเป็นเส้นทางไหลของกระแสผิดพ่วงลงสู่ดินที่มีค่าอิมพีแดนซ์ (Impedance) ต่ำเพียงพอที่จะทำให้อุปกรณ์ป้องกันตรวจจับกระแสเกินทำงาน สำหรับหลักการกระแสไฟฟ้าไหลผ่านมนุษย์เมื่อเกิดเหตุการณ์ไฟฟ้าลัดวงจรแสดงในรูปที่ 1

2.2 การจำแนกประเภทของดิน

ดินจากแหล่งต่าง ๆ ย่อมมีค่าความต้านทานจำเพาะที่ต่างกันตามประเภทของดิน ลักษณะทางกายภาพของดิน โดยทั่วไปประกอบด้วยเม็ดดิน น้ำและอากาศ คุณสมบัติเม็ดดินจะแตกต่างกันตามวัสดุแหล่งกำเนิดและสภาพแวดล้อม นอกจากนั้นการจัดเรียงตัวของอนุภาคเม็ดดินและความชื้น

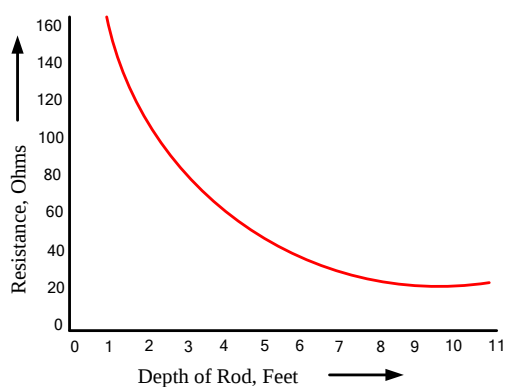
ยังส่งผลทำให้ดินมีค่าความจำเพาะมีค่าต่างกันอีกด้วย ดังนั้นการพิจารณาความชื้นในดินจะมีผลกระทบโดยตรงตามลักษณะพื้นที่และสภาพอากาศ ถ้าบริเวณที่ดินมีความชื้นมากก็จะนำไฟฟ้าได้ดีทำให้ค่าความต้านทานจำเพาะน้อย อนึ่งการจำแนกประเภทของดิน (Soil Classification) สามารถช่วยให้ทราบคุณสมบัติเบื้องต้นของดินที่ทำการศึกษาได้ [6] งานวิจัยนี้เลือกระบบการจำแนกประเภทดินทางวิศวกรรม 2 ระบบ คือ ระบบจำแนกดินร่วม (Unified Soil Classification) และระบบจำแนกดินของสมาคมอเมริกันทางหลวงของรัฐและเจ้าหน้าที่ขนส่ง (AASHTO Classification) ตามลำดับ การจำแนกประเภทดินของทั้งสองระบบอาศัยข้อมูลการกระจายอนุภาคเม็ดดินและค่าขีดความชื้นเหลว (Atterberg's Limits) [7]–[8] ทั้งนี้ประเภทของดินที่ได้จากการจำแนกจะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มหลัก คือ ดินเม็ดหยาบและดินเม็ดละเอียด โดยชนิดของดินเม็ดหยาบ เช่น กรวด หรือทราย เป็นต้น ส่วนชนิดของดินเม็ดละเอียด เช่น ดินตะกอน หรือดินเหนียว เป็นต้น



รูปที่ 1 กระแสไฟฟ้าที่ไหลผ่านมนุษย์เมื่อเกิด
การลัดวงจร [5]

2.3 ค่าความต้านทานจำเพาะของดิน

ในการติดตั้งสายดินถ้าความต้านทานภายในดินที่มีค่ามาก การไหลผ่านของกระแสไฟฟ้าจะน้อย แสดงว่าสภาพดินมีลักษณะแห้งและค่าความต้านทานทางไฟฟ้าในดินสูง ซึ่งสัมพันธ์ต่อการไหลซึมของน้ำ ดังนั้นดินที่ดีจึงต้องมีช่องว่างให้น้ำไหลซึมผ่านได้ดีทำให้เกิดความชื้นมีค่าความต้านทานภายในน้อยเพื่อให้กระแสไหลผ่านลงสู่ดินได้ง่าย [9]-[10] ความสัมพันธ์ระหว่างค่าความต้านทานดินและความลึกของหลักดินแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 การลดลงของค่าความต้านทานดินตามความลึก [11]

ลักษณะดินแต่ละแหล่งจะมีค่าความต้านทานจำเพาะของดินไม่เท่ากัน โดยทั่วไปในทางปฏิบัติเมื่อหลักดินมีความยาวมากจะทำให้ค่าความต้านทานลดลงดังรูปที่ 2 ซึ่งจะส่งผลโดยตรงต่อค่าความต้านทานดิน สามารถหาค่าความต้านทานจำเพาะของดินได้จากสมการที่ (1)

$$\rho = 2\pi aR \quad (1)$$

กำหนดให้

ρ คือ ค่าความต้านทานจำเพาะ (โอห์ม-เมตร)

a คือ ระยะห่างระหว่างอิเล็กโทรด (เมตร)

R คือ ค่าความต้านทานที่วัดได้ (โอห์ม)

2.4 หลักดิน (Grounding Electrode)

หลักดินเป็นตัวนำที่ฝังใต้ดินโดยจะต่อเข้ากับระบบไฟฟ้าและบริภัณฑ์ในการพิจารณาโดยทั่วไปมีศักย์เป็นศูนย์ ซึ่งมีการกำหนดหลักดินตามมาตรฐาน NEC250 [12] วัตถุประสงค์ในการเลือกใช้หลักดินสำหรับการต่อสายดินแต่ละประเภทขึ้นอยู่กับชนิดของดินและความลึกที่มีอยู่ ทั้งนี้เพื่อป้องกันในจุดที่เป็นอันตรายต่อชีวิตและทรัพย์สิน หลักดินที่ใช้ในการทดลองครั้งนี้ [13] - [19] ประกอบด้วย

1. แท่งดิน (Ground Rod) ทำด้วยแท่งเหล็กชุบทองแดง (Copper-bonded Steel) ตามข้อกำหนดวิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทยระบุว่า แท่งดินควรมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5/8 นิ้ว หรือ 14.2 มิลลิเมตร ยาวไม่น้อยกว่า 2.4 เมตร เป็นหลักดินในแนวดิ่ง หรือแท่งดิน โดยฝังกลบอยู่ในดินแต่ละพื้นที่ดังแสดงในรูปที่ 3 ทั้งนี้ค่าความต้านทานดินสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$R = \frac{\rho}{2\pi L} \left(\ln \left(\frac{8L}{d} \right) - 1 \right) \quad (2)$$

กำหนดให้

R คือ ค่าความต้านทานดิน (โอห์ม)

ρ คือ ค่าความต้านทานจำเพาะ (โอห์ม-เมตร)

L คือ ความยาวของแท่งหลักดิน (เมตร)

d คือ เส้นผ่านศูนย์กลางแท่งหลักดิน (เมตร)

2. แผ่นฝัง (Buried Plate) หลักดินที่มีลักษณะเป็นแผ่นทองแดงจะถูกนำมาใช้เมื่อไม่ต้องการขุดดินลงไปลึก [16]-[17] การฝังแผ่นทองแดงจะทำในแนวดิ่งแล้วกลบด้วยดิน ดังรูปที่ 4 ค่าความต้านทานดินจากหลักดินแบบนี้สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3)

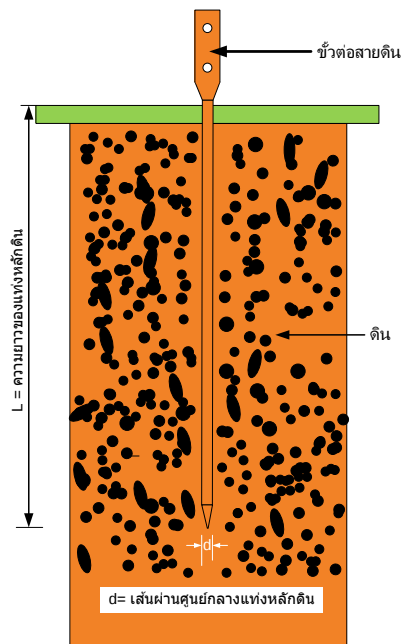
$$R = \frac{\rho}{4} \sqrt{\frac{\pi}{A}} \quad (3)$$

กำหนดให้

R คือ ค่าความต้านทานดิน (โอห์ม)

ρ คือ ค่าความต้านทานจำเพาะ (โอห์ม-เมตร)

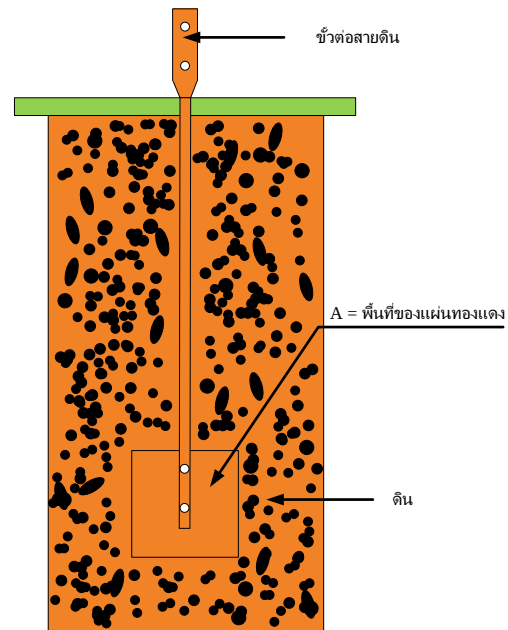
A คือ พื้นที่ของแผ่นทองแดง (ตารางเมตร)



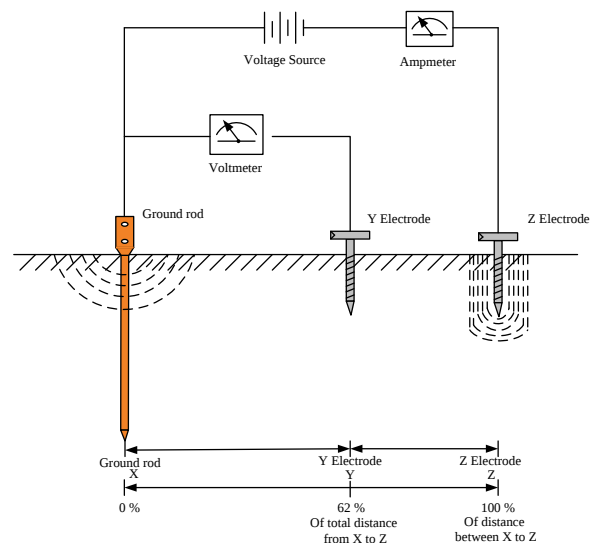
รูปที่ 3 หลักดินแบบแท่ง

2.5 วิธีการวัดค่าความต้านทานดิน

ความต้านทานของดินไม่สามารถบอกได้ด้วยชนิดของดิน ในการหาความต้านทานของดินทำได้จากการวัดดินในแต่ละพื้นที่ตามลักษณะของดินที่แตกต่างกันทางธรณีวิทยา จึงส่งผลให้ค่าความต้านทานของดินมีความแตกต่างกันด้วย [20] งานวิจัยนี้ใช้เครื่องวัดความต้านทานดินวิธีการวัดด้วยแบบสามจุด (Three Point Method) โดยใช้อิเล็กทรอนิกส์ต่อกับขั้วของเครื่องวัดกราวด์เป็นอิเล็กทรอนิกส์ตัวเดียวแบบแท่งเดียว ท่อ หรือแผ่น เป็นต้น ตามที่แสดงในรูปที่ 5 กำหนดค่าระยะห่างการทดสอบระหว่างแท่งอิเล็กทรอนิกส์ X-Y ประมาณ 62 % ของระยะทั้งหมดจาก X-Z ดังรูปที่ 5 เมื่อหลักดินมีความลึกถึงที่ แต่เมื่อต้องการ



รูปที่ 4 หลักดินแบบแผ่น



รูปที่ 5 วิธีการวัดแบบ 3 โพล [21]

3. ลักษณะทางธรณีวิทยาจังหวัดบุรีรัมย์

การศึกษาวิชาญนี้ทำการเปรียบเทียบค่าความต้านทานของการต่อหลักดินตามลักษณะของดินที่แตกต่างกันทางธรณีวิทยาภายในจังหวัดบุรีรัมย์ จากข้อมูลเบื้องต้นสภาพ

พื้นที่โดยทั่วไปเป็นที่ราบสูงและภูมิประเทศที่เป็นพื้นที่ลาดจากทิศใต้ลงไปทางทิศเหนือ พื้นที่มีลักษณะเป็นลูกคลื่นน้อยเป็นที่ราบขั้นบันไดช่องเขาและภูมิประเทศที่เกิดจากภูเขาไฟ [22]-[23] ดังรูปที่ 6 ลักษณะภูมิประเทศที่สำคัญแบ่งได้ 3 ลักษณะมีรายละเอียดดังนี้

- พื้นที่สูงและภูเขาทางตอนใต้เป็นภูเขาและช่องเขาบริเวณเทือกเขาพนมดงรักมีความสูงตั้งแต่ 200 เมตรจากระดับน้ำทะเลปานกลาง ครอบคลุมพื้นที่ร้อยละ 25 ของพื้นที่จังหวัด ได้แก่ บริเวณทิศตะวันตกของอำเภอหนองหงส์และหนองกี่ ตอนใต้ของอำเภอนางรอง ปะคำ ละหานทราย และบ้านกรวด

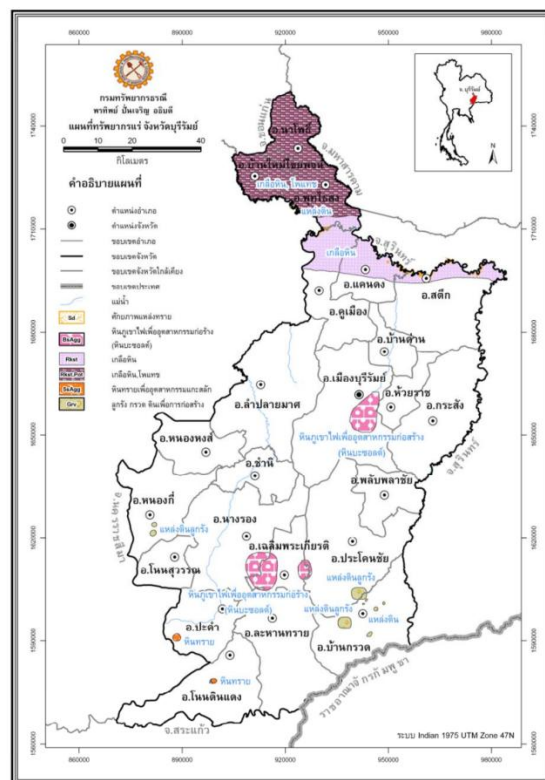
- พื้นที่ลูกคลื่นลอนตื้นตอนกลางของจังหวัด มีความสูงประมาณ 150 -200 เมตร จากระดับน้ำทะเลปานกลางพื้นที่ทอดขนานเป็นแนวยาวทางทิศตะวันออกและตะวันตก ครอบคลุมพื้นที่ประมาณร้อยละ 60 ของพื้นที่จังหวัดได้แก่ บริเวณ อำเภอประโคนชัย พลับพลาชัย เมืองบุรีรัมย์ กระสัง ลำปลายมาศ คูเมือง บางส่วนของอำเภอนางรอง หนองกี่ หนองหงส์ สตึก พุทไธสง บริเวณอำเภอบ้านกรวด นางรอง ลำปลายมาศ จะมีพื้นที่ราบลุ่มบริเวณริมฝั่งลำน้ำและลำห้วย ได้แก่ ลำปลายมาศ ลำนางรอง ลำปะเทียบ ลำทะเมนชัย ห้วยราช และห้วยตาตุง สำหรับพื้นที่ตอนใต้ของอำเภอพุทไธสง คูเมือง และเมืองบุรีรัมย์ จะเป็นพื้นที่ภูเขาสูงและพื้นที่ป่าไม้

- พื้นที่ราบลุ่มฝั่งแม่น้ำมูลทางตอนเหนือมีความสูงเฉลี่ยต่ำกว่า 150 เมตรจากระดับน้ำทะเลปานกลาง ได้แก่ พื้นที่ตอนบนของอำเภอพุทไธสง คูเมือง สตึก และนาโพธิ์

4. วิธีการดำเนินการวิจัย

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ทำการวัดค่าความต้านทานดินตามลักษณะทางธรณีวิทยาภายในจังหวัดบุรีรัมย์ โดยเก็บผลการทดลองในช่วงเดือน กรกฎาคม – สิงหาคม 2566 ด้วยเครื่องมือที่ตรวจระบบกราวด์ของดินในการวัดค่าความต้านทานดินแบบดิจิตอล Metrel MI 2120 RCD / Loop / Line ดังแสดงในรูปที่ 7 ทำการทดสอบแบบ 3 จุดตาม

มาตรฐาน IEC61557 เพื่อเปรียบเทียบวิธีการติดตั้งหลักดินแบบแท่งและแบบแผ่น โดยการเปลี่ยนแปลงระดับความยาวของหลักดินแบบแท่งและขนาดพื้นที่หน้าตัดของหลักดินแบบแผ่นเพื่อหาค่าความต้านทานจำเพาะของดินและค่าความต้านทานดินใน [25]- [28]



รูปที่ 6 แผนที่ลักษณะทางธรณีวิทยาจังหวัดบุรีรัมย์ [24]



รูปที่ 7 เครื่องวัดค่าความต้านทานดิน

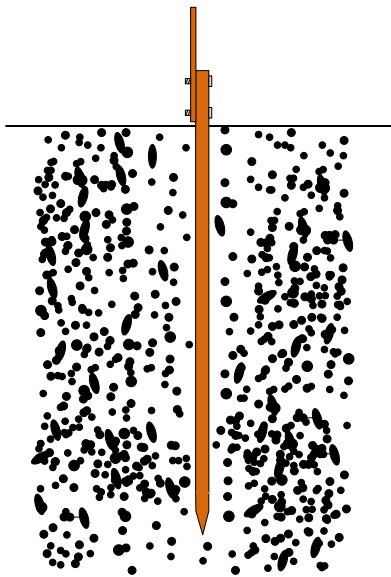
จากนั้นทำการจำแนกประเภทของดิน (Soil Classification) ตามสภาพของดินแต่ละพื้นที่ในห้องปฏิบัติการ มีรายละเอียดดังนี้

4.1 แท่งทองแดง (Ground Rods)

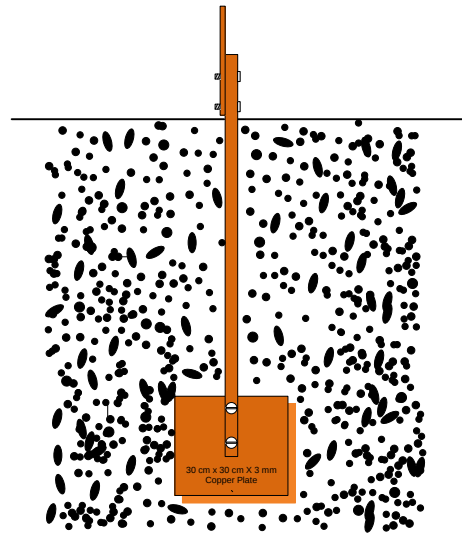
หลักดินแบบแท่งทองแดงในการทดลองใช้หลักดินที่ทำด้วยเหล็กหุ้มทองแดง (Copper Clad) ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5/8 นิ้วหรือ 14.20 มิลลิเมตร ปักลงในดินของแต่ละพื้นที่ โดยมีความยาวแตกต่างกันคือ 30 เซนติเมตร 50 เซนติเมตร 100 เซนติเมตร 180 เซนติเมตร และ 240 เซนติเมตร ตามลำดับ ตัวอย่างการฝังแท่งทองแดงดังรูปที่ 8

4.2 แผ่นทองแดง (Buried Plate)

หลักดินที่นำมาใช้มีลักษณะเป็นแผ่นทองแดงทำการฝังในแนวตั้ง ทดสอบเปรียบเทียบความต้านทานแผ่นทองแดงขนาด 10x10 เซนติเมตร ขนาด 20x20 เซนติเมตร และขนาด 30x30 เซนติเมตร ทุกขนาดมีความหนา 3 มิลลิเมตร ความลึกที่ใช้การทดสอบจะอยู่ที่ 150 เซนติเมตร ดังรูปที่ 9



รูปที่ 8 การออกแบบหลักดินแบบแท่ง



รูปที่ 9 การออกแบบหลักดินแบบแผ่น

5. ผลการทดสอบตรวจวัดค่าความต้านทานหลักดิน

การศึกษาวิจัยครั้งนี้ทำการวัดค่าความต้านทานดินเพื่อเปรียบเทียบวิธีการติดตั้งหลักดินแบบแท่งและแบบแผ่น เปลี่ยนแปลงระดับความยาวของหลักดินแบบแท่งและขนาดพื้นที่ของหลักดินแบบแผ่น เพื่อหาค่าความต้านทานจำเพาะของดินและค่าความต้านทานดินตามสภาพดินที่มีลักษณะที่ต่างกันอย่างชัดเจนในจังหวัดบุรีรัมย์ 3 อำเภอ ดังนี้

5.1 พื้นที่บ้านหนองม่วง ตำบลบ้านไทร อำเภอประโคนชัย

พื้นที่บ้านหนองม่วงมีลักษณะดินเป็นทรายละเอียดปนดินเหนียว ดินมีสีน้ำตาลหรือสีน้ำตาลอ่อนตลอดชั้นดินในฤดูแล้งพบคราบเกลือบริเวณผิวหน้าดิน ดังรูปที่ 11 และค่าความต้านทานดินใช้หลักดินแบบแท่งทองแดง พื้นที่บ้านหนองม่วง ตำบลบ้านไทร อำเภอประโคนชัย แสดงดังตารางที่ 3-4

จากตารางที่ 3 แท่งหลักดินความยาวขนาด 30 เซนติเมตร ค่าความต้านทานดินมีค่าเท่ากับ 760 โอห์ม แต่เมื่อเพิ่มความยาวแท่งหลักดินขนาดความยาว 240 เซนติเมตร ค่าความต้านทานดินมีค่าเท่ากับ 6.43 โอห์ม

การเพิ่มความยาวแท่งหลักดินจาก 30 เป็น 240 เซนติเมตร
ทำให้ค่าความต้านทานดินลดลงร้อยละ 99.15



รูปที่ 11 ลักษณะดินบ้านหนองม่วง อำเภอบึงสามพัน จังหวัดพิจิตร

ตารางที่ 3 ค่าความต้านทานดินใช้หลักดินแบบแท่งทองแดง
พื้นที่บ้านหนองม่วง ตำบลบ้านไทร อำเภอบึงสามพัน จังหวัดพิจิตร

ความยาวแท่งทองแดง (เซนติเมตร)	ค่าความต้านทานดิน (โอห์ม)
30	760
50	322
100	50.1
180	9.46
240	6.43

ตารางที่ 4 ค่าความต้านทานดินใช้หลักดินแบบแผ่นทองแดง
พื้นที่บ้านหนองม่วง ตำบลบ้านไทร อำเภอบึงสามพัน จังหวัดพิจิตร เมื่อ
เปลี่ยนแปลงขนาดแผ่นแท่งหลักดิน

พื้นที่หน้าตัด (ตาราง เซนติเมตร)	ความลึก (เซนติเมตร)	ค่าความต้าน ทานดิน (โอห์ม)
10x10	150	102
20x20	150	45
30x30	150	10.3

จากนั้นทำการเปลี่ยนแปลงหลักดินเป็นแบบแผ่นที่มี
พื้นที่หน้าตัดแตกต่างกัน 3 ขนาดแสดงดังตารางที่ 4 พบว่า
แผ่นทองแดงขนาด 10x10 ตารางเซนติเมตร ค่าความ
ต้านทานดินมีค่าเท่ากับ 102 โอห์ม

แผ่นทองแดงขนาด 20x20 ตารางเซนติเมตร ค่าความ
ต้านทานดินมีค่าเท่ากับ 45 โอห์ม

แผ่นทองแดงขนาด 30x30 ตารางเซนติเมตร ค่าความ
ต้านทานดินมีค่าเท่ากับ 10.3 โอห์ม

การเพิ่มขนาดแผ่นแท่งหลักดินจาก 10x10 เป็น 30x30
ตารางเซนติเมตร ทำให้ค่าความต้านทานดินลดลงร้อยละ
89.9

5.2 พื้นที่บ้านหนองตาด ตำบลหนองตาด อำเภอบึงสามพัน จังหวัดพิจิตร

พื้นที่บ้านหนองตาดมีลักษณะสภาพเนื้อดินเป็นทราย
ละเอียดปนดินเหนียว ดินมีสีเทาเข้มหรือสีน้ำตาลปนเทาเข้ม
มีจุดประสีน้ำตาลปนแดงเข้ม ในฤดูแล้งจะมีรอยแตกแหว่ง
กว้างและลึกและมีรอยไกลในหน้าตัดดิน ดังรูปที่ 10 และค่า
ความต้านทานดินใช้หลักดินแบบแท่งทองแดง พื้นที่บ้าน
หนองตาด อำเภอบึงสามพัน จังหวัดพิจิตร แสดงดังตารางที่ 5-6



รูปที่ 10 ลักษณะดินตำบลหนองตาด อำเภอบึงสามพัน จังหวัดพิจิตร

จากตารางที่ 5 แท่งหลักดินความยาวขนาด 30
เซนติเมตร ค่าความต้านทานดินมีค่าเท่ากับ 347 โอห์ม แต่
เมื่อเพิ่มความยาวแท่งหลักดินขนาดความยาว 240

เซนติเมตร ค่าความต้านทานดินมีค่าเท่ากับ 7.18 โอห์ม การเพิ่มความยาวแท่งหลักดินจาก 30 เป็น 240 เซนติเมตร ทำให้ค่าความต้านทานดินลดลงร้อยละ 97.93

ตารางที่ 5 ค่าความต้านทานดินใช้หลักดินแบบแท่งทองแดง
พื้นที่บ้านหนองตาด อำเภอมืองบุรีรัมย์

ความยาวแท่งทองแดง (เซนติเมตร)	ค่าความต้านทานดิน (โอห์ม)
30	347
50	209
100	29.3
180	12.9
240	7.18

ตารางที่ 6 ค่าความต้านทานดินใช้หลักดินแบบแท่งทองแดง
พื้นที่บ้านหนองตาด อำเภอมืองบุรีรัมย์ เมื่อเปลี่ยนแปลงขนาดแผ่นแท่งหลักดิน

พื้นที่หน้าตัด (ตารางเซนติเมตร)	ความลึก (เซนติเมตร)	ค่าความต้านทานดิน (โอห์ม)
10x10	150	37.5
20x20	150	21.2
30x30	150	12.5

จากนั้นทำการเปลี่ยนแปลงหลักดินเป็นแบบแผ่นที่มีพื้นที่หน้าตัดแตกต่างกัน 3 ขนาดแสดงดังตารางที่ 6 พบว่า

แผ่นทองแดงขนาด 10x10 ตารางเซนติเมตร ค่าความต้านทานดินมีค่าเท่ากับ 37.5 โอห์ม

แผ่นทองแดงขนาด 20x20 ตารางเซนติเมตร ค่าความต้านทานดินมีค่าเท่ากับ 21.2 โอห์ม

แผ่นทองแดงขนาด 30x30 ตารางเซนติเมตร ค่าความต้านทานดินมีค่าเท่ากับ 12.5 โอห์ม

การเพิ่มขนาดแผ่นแท่งหลักดินจาก 10x10 เป็น 30x30 ตารางเซนติเมตร ทำให้ค่าความต้านทานดินลดลงร้อยละ 66.67

5.3 พื้นที่บ้านคูบอน ตำบลคูเมือง อำเภอมือง

พื้นที่บ้านคูบอนมีลักษณะเนื้อดินเป็นทรายละเอียดปนตะกอนทรายมีขนาดคละกนดี ดินมีสีน้ำตาลปนแดงและดินตอนล่างมีสีแดงหรือสีแดงเข้มดังรูปที่ 12 และค่าความต้านทานดินใช้หลักดินแบบแท่งทองแดง พื้นที่บ้านคูบอน ตำบลคูเมือง อำเภอมือง แสดงดังตารางที่ 7-8



รูปที่ 12 ลักษณะดินบ้านคูบอน ตำบลคูเมือง อำเภอมือง

จากตารางที่ 7 แท่งหลักดินความยาวขนาด 30 เซนติเมตร ค่าความต้านทานดินมีค่าเท่ากับ 3,872 โอห์ม แต่เมื่อเพิ่มความยาวแท่งหลักดินขนาดความยาว 240 เซนติเมตร ค่าความต้านทานดินมีค่าเท่ากับ 353 โอห์ม การเพิ่มความยาวแท่งหลักดินจาก 30 เป็น 240 เซนติเมตร ทำให้ค่าความต้านทานดินลดลงร้อยละ 90.88

จากนั้นทำการเปลี่ยนแปลงหลักดินเป็นแบบแผ่นที่มีพื้นที่หน้าตัดแตกต่างกัน 3 ขนาดแสดงดังตารางที่ 8 พบว่า

แผ่นทองแดงขนาด 10x10 ตารางเซนติเมตร ค่าความต้านทานดินมีค่าเท่ากับ 536 โอห์ม

แผ่นทองแดงขนาด 20x20 ตารางเซนติเมตร ค่าความต้านทานดินมีค่าเท่ากับ 457 โอห์ม

แผ่นทองแดงขนาด 30x30 ตารางเซนติเมตร ค่าความต้านทานดินมีค่าเท่ากับ 368 โอห์ม

การเพิ่มขนาดแผ่นแท่งหลักดินจาก 10x10 เป็น 30x30 ตารางเซนติเมตร ทำให้ค่าความต้านทานดินลดลงร้อยละ 31.34

ตารางที่ 7 ค่าความต้านทานดินใช้หลักดินแบบแท่งทองแดง
พื้นที่บ้านคูบอน ตำบลคูเมือง อำเภอกูเมือง

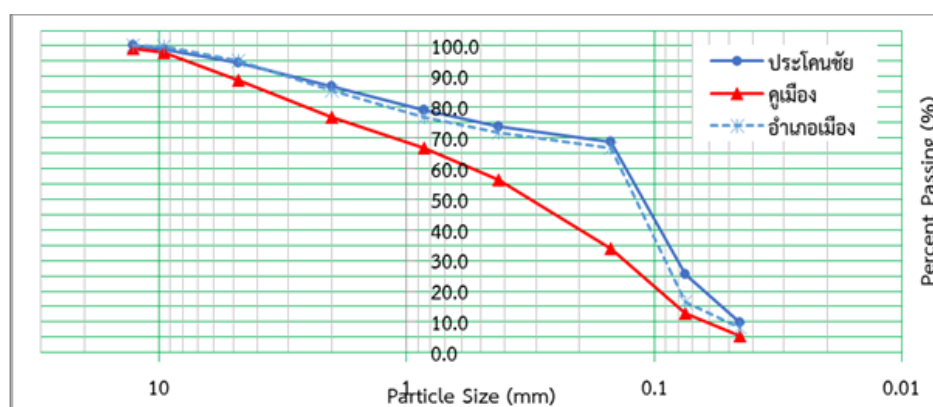
ความยาวแท่งทองแดง (เซนติเมตร)	ค่าความต้านทานดิน (โอห์ม)
30	3,872
50	2,432
100	1,256
180	654
240	353

ตารางที่ 8 ค่าความต้านทานดินใช้หลักดินแบบแผ่นทองแดง
พื้นที่บ้านคูบอน ตำบลคูเมือง อำเภอกูเมือง เมื่อเปลี่ยนแปลง
ขนาดแผ่นแท่งหลักดิน

พื้นที่หน้าตัด (ตารางเซนติเมตร)	ความลึก (เซนติเมตร)	ค่าความต้านทานดิน (โอห์ม)
10x10	150	536
20x20	150	457
30x30	150	368

6. การจำแนกประเภทของดิน

การจำแนกประเภทดินจากทั้งสามแหล่งในพื้นที่จังหวัดบุรีรัมย์ระบบจำแนกดินร่วม (Unified Soil Classification) มาตรฐาน ASTM D2487 และระบบจำแนกดินของสมาคมอเมริกันทางหลวงของรัฐและเจ้าหน้าที่ขนส่ง (AASHTO Classification) มาตรฐาน AASHTO M145 [29]-[31] โดยอาศัยผลการทดสอบหาการกระจายอนุภาคเม็ดดินวิธีร่อนผ่านตะแกรงมาตรฐาน AASHTO T88 ดังแสดงในรูปที่ 13 และผลการทดสอบหาค่าขีดความชันเหลวดินด้วยเครื่องมือ Casagrande มาตรฐาน AASHTO T89 และ AASHTO T90 ดังแสดงในตารางที่ 9 โดยประเภทของดินที่ได้จากการจำแนกจะแบ่งออกเป็น 2 กลุ่มหลัก คือ ดินเม็ดหยาบและดินเม็ดละเอียด โดยชนิดของดินเม็ดหยาบประกอบด้วยกรวดและทราย ส่วนดินเม็ดละเอียดประกอบด้วยดินตะกอนและดินเหนียว โดยดินเม็ดหยาบจะมีค่าความต้านทานดินสูงเนื่องจากมีช่องว่างระหว่างอนุภาคเม็ดดินกว้างจึงมีความชื้นน้อย ส่วนดินเม็ดละเอียดจำพวกดินเหนียวจัดอยู่ในกลุ่มดินเชื่อมแน่นจะมีค่าความต้านทานดินน้อยเนื่องจากสามารถกักเก็บความชื้นได้ดี สำหรับดินตะกอนโดยทั่วไปจะมีค่าความต้านทานดินมากกว่าดินเหนียวเนื่องจากความชื้นสูญเสียได้ง่ายกว่า [32]-[35] ลักษณะตัวอย่างดินดังแสดงในรูปที่ 14



รูปที่ 13 การกระจายตัวของอนุภาคเม็ดดิน



ก. ดินจากอําเภอประโคนชัย



ข. ดินจากอําเภอเมืองบุรีรัมย์



ค. ดินจากอําเภอคูเมือง

รูปที่ 14 ผลการวิเคราะห์หาลักษณะประกอบลักษณะของดิน

ตารางที่ 9 การวิเคราะห์หาลักษณะประกอบของดิน

รายการ	อําเภอประโคนชัย	อําเภอเมืองบุรีรัมย์	อําเภอคูเมือง
พิกัดเหลว (Liquid Limit : LL)	22.16	21.51	20.12
พิกัดพลาสติก (Plastic Limit : PL)	20.74	19.44	14.59
ดัชนีพลาสติก (Plastic Index : PI)	1.42	2.07	5.53
ขนาดอนุภาคเม็ดดินเล็กกว่าร้อยละ 60 : D_{60}	0.12	0.12	0.50
ขนาดอนุภาคเม็ดดินเล็กกว่าร้อยละ 30 : D_{30}	0.080	0.081	0.120
ขนาดอนุภาคเม็ดดินเล็กกว่าร้อยละ 10 : D_{10}	0.045	0.048	0.050
สัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ Coefficient of Uniformity : Cu $Cu = D_{60}/D_{10}$	2.66	2.50	10.00
สัมประสิทธิ์ความโค้ง Coefficient of Concavity : Cc $Cc = D_{30}^2/(D_{10} \times D_{60})$	1.185	1.139	0.576
มาตรฐาน Unified	SP	SP	SW
มาตรฐาน AASHTO	A-2-6	A-2-6	A-2-6
ประเภทของดิน	ทรายละเอียดปนดินเหนียวและมีขนาดคละกันไม่ดี	ทรายละเอียดปนดินเหนียวและมีขนาดคละกันไม่ดี	ทรายละเอียดปนดินตะกอนมีขนาดคละกันดี

การพิจารณาการกระจายของขนาดอนุภาคเม็ดดินในรูปที่ 14 พบว่า ดินอำเภوبرะโคนชัยมีค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ C_u เท่ากับ 2.66 และค่าสัมประสิทธิ์ของความโค้ง C_c เท่ากับ 1.185 จัดอยู่ในกลุ่มดินทรายละเอียดปนดินเหนียวมีขนาดคละกันไม่ดี ดินอำเภอบูรีรัมย์มีค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ C_u เท่ากับ 2.50 และค่าสัมประสิทธิ์ของความโค้ง C_c เท่ากับ 1.139 จัดอยู่ในกลุ่มทรายละเอียดปนดินเหนียวมีขนาดคละกันไม่ดี สำหรับดินอำเภอกุเมืองมีค่าสัมประสิทธิ์ความสม่ำเสมอ C_u เท่ากับ 10.00 และค่าสัมประสิทธิ์ของความโค้ง C_c เท่ากับ 0.576 จัดอยู่ในกลุ่มทรายละเอียดปนดินตะกอนมีขนาดคละกันดี ทั้งนี้ดินอำเภوبرะโคนชัยและดินอำเภอบูรีรัมย์จัดอยู่ในกลุ่มเดียวกันแต่ดินอำเภوبرะโคนชัยมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าเล็กน้อย

จากผลการทดลองตารางที่ 9 พบว่า เมื่อพิจารณาค่าพิกต์เหลว LL ซึ่งเป็นความชื้นในดินที่เปลี่ยนสภาพจากพลาสติกเป็นของเหลว อำเภوبرะโคนชัยมีค่าพิกต์เหลวมากที่สุดเท่ากับ 22.16 อำเภอบูรีรัมย์เท่ากับ 21.51 และอำเภอกุเมืองมีค่าต่ำสุดเท่ากับ 20.12 เมื่อพิจารณาค่าพิกต์พลาสติก PL ซึ่งเป็นค่าความชื้นในดินที่เปลี่ยนสภาพจากกึ่งของแข็งเป็นพลาสติก อำเภوبرะโคนชัยมีค่าพิกต์พลาสติกมากที่สุดเท่ากับ 20.74 อำเภอบูรีรัมย์เท่ากับ 19.44 และอำเภอกุเมืองมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 14.59 เมื่อพิจารณาค่าดัชนีพลาสติก PI ซึ่งเป็นผลต่างระหว่างค่าพิกต์เหลว LL และค่าพิกต์พลาสติก PL อำเภوبرะโคนชัยมีค่าน้อยที่สุดเท่ากับ 1.42 อำเภอบูรีรัมย์เท่ากับ 2.07 และดินอำเภอกุเมืองมีค่ามากที่สุดเท่ากับ 5.53 ตามลำดับ ทำให้ทราบว่า ดินอำเภوبرะโคนชัยมีค่าดัชนีพลาสติกน้อยความชื้นในดินมากจึงส่งผลทำให้ทำให้ค่าความต้านทานดินต่ำ ผลการจำแนกประเภทดินระบบ Unified พบว่า ดินจากอำเภوبرะโคนชัยและอำเภอบูรีรัมย์จัดอยู่ในกลุ่ม SP คือ ดินทรายละเอียดปนดินเหนียว และดินอำเภอกุเมืองจัดอยู่ในกลุ่ม SW คือ ดินทรายละเอียดปนดินตะกอน สำหรับผลการ

จำแนกประเภทดินระบบ AASHTO พบว่า ดินจากทั้งสามแหล่งเป็นดินกลุ่ม A-2-6 เช่นเดียวกัน แต่ดินจากอำเภوبرะโคนชัยและอำเภอบูรีรัมย์มีค่าพิกต์พลาสติกที่มากกว่าดินจากอำเภอกุเมือง

7. สรุปผล อภิปรายผลและข้อเสนอแนะ

ผลการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับการเปรียบเทียบความแตกต่างของหลักดินต่อค่าความต้านทานดินในซึ่งอยู่ใกล้สถานีจ่ายไฟฟ้าย่อยพื้นที่ภายในจังหวัดบุรีรัมย์มีบทสรุปการอภิปรายผลและข้อเสนอแนะดังนี้

7.1 สรุปผลและอภิปรายผล

เมื่อพิจารณาดินในพื้นที่ประเภทเดียวกันการใช้หลักดินแบบแท่งทองแดงเมื่อความยาวมากโดยกำหนดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเท่ากันผลจะทำให้มีค่าความต้านทานดินลดลง และเมื่อพิจารณาค่าความต้านทานดินจากการใช้แท่งหลักดินแบบแผ่นที่มีขนาดพื้นที่มากขึ้นจะมีค่าความต้านทานดินลดลง ซึ่งตัวแปรสำคัญที่มีผลต่อค่าความต้านทานดินนั้นประกอบด้วยความต้านทานจำเพาะของดิน ความยาว ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของแท่งทองแดง และพื้นที่หน้าตัดของแผ่นทองแดงสอดคล้องกับทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องใน [27] – [28] ทั้งนี้เมื่อพิจารณาจำแนกประเภทของดินแต่ละแหล่งทดสอบตามหลักวิศวกรรมพบว่า ดินอำเภوبرะโคนชัยจัดอยู่ในกลุ่มทรายละเอียดปนดินเหนียวมีความชื้นมากและน้ำไหลซึมยากส่งผลให้ค่าความต้านทานดินน้อย ดินอำเภอบูรีรัมย์จัดอยู่ในกลุ่มทรายละเอียดปนดินเหนียวมีความชื้นมากและน้ำไหลซึมยากส่งผลให้ค่าความต้านทานดินน้อยเช่นเดียวกับดินอำเภوبرะโคนชัย ส่วนดินอำเภอกุเมืองจัดอยู่ในกลุ่มทรายละเอียดปนดินตะกอนมีความชื้นน้อยและน้ำไหลซึมผ่านได้ง่ายส่งผลให้ค่าความต้านทานดินสูง จากผลดังกล่าวทำให้ทราบว่าส่วนประกอบของดินที่มีค่าดัชนีพลาสติกน้อยค่าความต้านทานดินจะต่ำ ประเภทของดินที่มีลักษณะเป็นทรายละเอียดปนดินตะกอนมีขนาดคละกันดีจะมีค่าความต้านทานมาก ดังนั้นขนาดอนุภาคเม็ดดิน

ส่งผลต่อความต้านทานดินดังใน [5]-[9] จากผลการทดสอบดินพื้นที่ที่มีส่วนผสมของดินเหนียวจะมีความชื้นมากและมีค่าความต้านทานดินน้อยส่งผลดีต่อกระแสไฟฟ้าสามารถไหลผ่านได้ดี สำหรับดินทรายปนดินตะกอนจะมีความแห้ง ดังนั้นถ้าต้องการลดค่าความต้านทานดินให้น้อยลงควรใช้หลักดินที่มีความยาวมากขึ้นหรือมีพื้นที่มากขึ้นเพื่อช่วยเพิ่มกระแสไหลผ่านลงดิน ถ้าค่าความต้านทานดินน้อยจะมีความนำไฟฟ้าสูงดินจะมีความชื้นมากก็มีขนาดคลื่นไม่ดีเป็นแนวทางในการพัฒนาศึกษาทำวิจัยในอนาคต

7.2 ข้อเสนอแนะ

- 1). ควรเก็บตัวอย่างดินที่มีความหลากหลายซึ่งจะทำให้ผลที่แตกต่างกันตามค่าความจำเพาะของดินแต่ละชนิดของแต่ละพื้นที่
- 2). ค่าความต้านทานดินของกลุ่มตัวอย่างดินนั้นขึ้นอยู่กับความชื้นตามระยะเวลาของฤดูกาลของแต่ละพื้นที่จึงควรเก็บผลวิเคราะห์ตลอดปี
- 3). ควรทำการทดลองซ้ำหลายครั้งเพื่อให้ได้ค่าที่แม่นยำเที่ยงตรงของวิธีการทดลององค์ประกอบต่าง ๆ แนวโน้มค่าความต้านทานจากการทดลองกับการคำนวณ

8. เอกสารอ้างอิง

- [1] K. M. Michaels, "Earth ground resistance testing for low-voltage power systems," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 31, no. 1, pp. 139-144, 1995.
- [2] Recommended Practice for Grounding of Industrial and Commercial Power Systems, IEEE Standard 142-2007, 2007.
- [3] S. Damrongkittikul et al., "Code of Professional Practices: Design, Installation, Inspection, and Testing of Grounding Connections," Council of Engineers, 2011.
- [4] T. Gonen, *Electric Power Distribution System Engineering*, 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press, 2008.
- [5] P. Gupta, "Handbook on Electrical Earthing System," Indian Railways Centre for Advanced Maintenance Technology, 2011.
- [6] W. Yuyongwattana, *Soil Mechanics*, Bangkok: Four Pace Publishing House, 2011.
- [7] C. T. Kongvorakul, "Relationship between Attenberg Limit and Subsidence Properties of Fine-Grained Soil Mass," M.S. thesis, Chiang Mai University, Chiang Mai, Thailand, 2010.
- [8] C. Muktapahan and K. Nakasawa, *Soil Mechanics and Foundation Engineering*. Bangkok: Duangkamon Publishing House, 2003.
- [9] N. Somala, E. Srisuk, C. Charoenrak, T. Thepluen and S. Suphapon, "Study of soil specific resistance," *Acad. J. Southern Vocational Educ. Inst.*, vol. 1, no. 1, pp. 25-30, 2012.
- [10] L. W. Choun, C. Gomes, M. Z. A. Ab Kadir and W. F. Wan Ahmad, "Analysis of earth resistance of electrodes and soil resistivity at different environments," in *Proc. Int. Conf. Lightning Protection (ICLP)*. Vienna, 2012, pp. 1-9.
- [11] O. S. Peters, "Ground Connections for Electrical Systems," Technological Paper 108, U.S. National Bureau of Standards, June 20, 1918.
- [12] V. Chernikhovska. (2024, Sep. 28), Explaining NEC Article 250 on Grounding and Bonding, [Online]. Available: <https://nassaunational>

- cable.com/blogs/blog/explaining-nec-article-250-on-grounding-and-bonding
- [13] Indian Standard Code of Practice for Earthing, Bureau of Indian Standards, 1998.
- [14] F. P. Dawalibi, J. Ma and R. D. Southey, "Behaviour of Grounding Systems in Multilayer Soils," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 9, no. 1, pp. 334-342, 1994.
- [15] IEEE Guide for Safety in AC Substation Grounding, IEEE Standard 80-2000, 2000.
- [16] IEEE Guide for Measuring Earth Resistivity, Ground Impedance, and Earth Surface Potentials of a Ground System, IEEE Standard 81-2012, 2012.
- [17] M. H. bin Hamzah, "Study on grounding grid performance using copper and galvanised steel," B.E. thesis, Universiti Teknologi Malaysia, Skudai, Johor, Malaysia, 2009.
- [18] M. A. Salam, "Grounding resistance measurement using vertically driven rods near residential area," *Int. J. Power Energy Convers.*, vol. 4, no. 3, pp. 238-250, 2013.
- [19] S. Yunus, A. Suratman, N. Mohamad Nor and M. Othman, "Effectiveness of earthing system in vertical configurations," *World Acad. Sci., Eng. Technol. Int. J. Electrical and Computer Eng.*, vol. 15, no. 1, pp. 38-41, 2021.
- [20] C. J. Blattner, "Prediction of soil resistivity and ground rod resistance for deep ground electrodes," *IEEE Trans. Power Apparatus Syst.*, vol. PAS-99, no. 5, pp. 1758-1763, 1980.
- [21] Test Equipment Depot (2023, Oct.). Getting Down to Earth: A Practical Guide to Earth Resistance Testing, [Online]. Available: <https://www.testequipmentdepot.com>.
- [22] G. F. Tag, Earth Resistance. London: George Newnes Limited, 1964.
- [23] G. E. Thomas, "Soil Properties and the Unified Soil Classification System (USCS)," PDH Online Course, 2012.
- [24] Department of Mineral Resources, "Classification of Zones to Manage Geology and Mineral Resources, Buriram Province," Thailand, 2010.
- [25] P. Phonsonchai, "Soil Genesis and Classification: Case Study Chok Chai Series," Soil Survey and Classification Division, Department of Land Development, Academic Document No. 466, Jan. 2000.
- [26] Bureau of Soil Survey and Land Use Planning, "Characteristics and Properties of Soil Series in the Northeastern Region of Thailand," Department of Land Development, Academic Document No. 55, Sep. 2005.
- [27] Y. Kongchin, N. Koonmuang, K. Suthamano, K. Chinnabut, K. Phumkittipit, S. Tonpho, P. Apichatkul and K. Buayai, "Comparison of Earth Resistance Measurement with Analog and Digital Measuring Instruments," in *11th Engineering, Science, Technology and Architecture Conference*. Thailand, 2020.
- [28] B. Marangsri, H. Wongthieng and R. Sriphongwilaiyakul, "Study of the feasibility of using galvanized steel pipes in place of copper ground stakes in the lower northeastern region: Nakhon Ratchasima province and

- Buriram province,” *Suranaree Technol. J.*, vol. 9, no. 1, pp. 51-60, 2002.
- [29] D. Daryati, I. Widiyanti, E. Septiandini, M. A. Ramadhan, K. A. Sambowo and A. Purnomo, “Soil characteristics analysis based on the unified soil classification system,” in *4th Annual Applied Science and Engineering Conference, Journal of Physics: Conference Series*, Dec. 2019.
- [30] S. W. Buol, F. D. Hole and R. J. McCracken, *Soil Genesis and Classification*, 5th ed. Ames, IA, USA: Iowa State University Press, 2003.
- [31] T. Rattanathanakit and T. Tiyaikhom, “Properties of Water Permeability in Soil,” M.S. thesis, Chiang Mai University, Chiang Mai, Thailand, 2012.
- [32] N. Deeyai, S. Anusontpornperm, I. Kheoruenromne and W. Wiriyakitnateekul, “Characteristic of soils along toposequence on limestone mountain footslope,” *Khon Kaen Agric. J.*, vol. 40, no. 2, 2012.
- [33] P. A. Sanchez, *Properties and Management of Soil in the Tropics*. New York, NY, USA: John Wiley & Sons, Inc., 1976.
- [34] C. Ditzler, K. Scheffe and H. C. Monger, “Soil Survey Manual,” Soil Science Division Staff, USDA Handbook 18, U.S. Government Printing Office, Washington, DC, 2017.
- [35] C. A. Black, D. D. Evans, J. L. White, L. E. Ensminger and F. E. Clark, “Methods of soil analysis. Part 2,” *Agronomy Monograph*, vol. 9, Madison, WI, USA: American Society of Agronomy, 1965.

การจำลองสถานการณ์สำหรับการปรับปรุงสายการผลิตด้วยการปรับเรียงการไหล Computer Simulation for Enhancing Gear Production Line with Flow Smoothing

กิริฎี คงเจริญ ปรายกานต์ สุขสมัย บุษบา พุกษาพันธุ์รัตน์ *

หน่วยวิจัยทางด้านการวิจัยดำเนินงานและสถิติอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

99 หมู่ 18 ถนนพหลโยธิน ตำบลคลองหนึ่ง อำเภอคลองหลวง จังหวัดปทุมธานี 12121

Keeradee Kongcharoen Prakaikan Suksamai Busaba Pruksaphanrat *

Industrial Statistics and Operational Research Unit (ISO-RU), Faculty of Engineering,

Thammasat School of Engineering, Thammasat University.

99 Moo 18, Phaholyothin Rd., Klong Nueng, Khlong Luang, Pathumthani 12121

*Corresponding author Email: lbusaba@engr.tu.ac.th

(Received: June 23, 2024; Revised: January 29, 2025 ; Accepted: April 3, 2025)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาแนวทางการปรับเรียงสายการผลิตที่เป็นการผลิตเกียร์ 11 กลุ่มผลิตภัณฑ์ที่มีการใช้แรงงานคนควบคู่กับเครื่องจักรแบบกึ่งอัตโนมัติและมีการจัดสายการผลิตแบบการไหลที่ละชิ้น (One piece flow) และแบบไม่ต่อเนื่อง (Job shop) เนื่องจากปัจจุบันยังไม่สามารถผลิตชิ้นงานได้ทันตามความต้องการของลูกค้า ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้นำการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์หาแนวทางการปรับปรุง โดยการปรับปรุงสายการผลิตเกียร์มีการใช้วิธีการปรับขนาดล็อต, วิธีการจัดลำดับงานที่มีเวลาดำเนินการน้อยสุดก่อนโดยพิจารณาจากสถานะที่เป็นข้อจำกัด, การเพิ่มทรัพยากร และการใช้วิธีการต่าง ๆ ที่กล่าวข้างต้นร่วมกัน จากการทดลองพบว่าวิธีที่เหมาะสมและมีประสิทธิภาพสูงคือการปรับขนาดล็อตและการจัดลำดับงานที่มีเวลาดำเนินการน้อยสุดก่อนร่วมกัน ทำให้สายการผลิตเกียร์สามารถเพิ่มอัตราผลผลิตได้ 37.30% ค่าการใช้ทรัพยากรประโยชน์ของพนักงานเพิ่มขึ้น 15.42% ค่าการใช้ทรัพยากรประโยชน์ของเครื่องจักรเพิ่มขึ้น 15.41% ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพสายการผลิตเพิ่มขึ้น 6.86%

คำสำคัญ: การจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ การปรับเรียงการไหล ล็อตขนาดเล็ก ทฤษฎีข้อจำกัด

ABSTRACT

This research aims to find ways to smooth the flow of the production line, which produces 11 product groups of gears that involve both manual labor and semi-automatic machinery and have the production line with one-piece flow and job shop configurations. Currently, this production line cannot meet customer demand. Therefore, computer simulation was used to assist in the analysis of the improvement methods. The improvement of the gear production line involved adjusting batch sizes, prioritizing jobs with the Shortest Processing Time (SPT) considering the bottleneck stations, increasing resources, and employing various methods together. Experimental results showed that the most

effective methods were adjusting batch sizes and prioritizing jobs with SPT together, resulting in a 37.30% increase in gear production rate, a 15.42% and 15.41% increase in employee and machine utilizations, leading to an improvement in production line efficiency 6.86%.

Keyword: Computer simulation, flow smoothing, small lot, theory of constraint.

1. บทนำ

ในปัจจุบันภาคการเกษตรมีการนำเทคโนโลยีเข้ามาใช้เป็นเครื่องมือในการสร้างมูลค่าผลผลิตทางการเกษตร อุตสาหกรรมเครื่องจักรกลทางการเกษตรจึงเป็นตัวแปรสำคัญที่ทำให้เกษตรกรสามารถทุนแรงและเพิ่มผลผลิตทางการเกษตร ด้วยความต้องการเครื่องจักรกลทางการเกษตรที่สูงขึ้น ทำให้ผู้ผลิตประสบปัญหาในการผลิตและมีความจำเป็นที่จะต้องเพิ่มความสามารถในการผลิตให้สูงขึ้นเพื่อตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้า

บริษัทกรณีศึกษาเป็นบริษัทผลิตเครื่องจักรกลและเครื่องจักรอุตสาหกรรมทางการเกษตร ผลิตภัณฑ์หลักของโรงงานกรณีศึกษามีหลากหลายประเภท เช่น รถแทรกเตอร์ รถไถ รถดำนา รถเกี่ยวรวงข้าว รถขุดขนาดเล็ก อุปกรณ์ต่อพ่วงแทรกเตอร์ อุปกรณ์ต่อพ่วงรถขุดขนาดเล็ก เครื่องยนต์ดีเซล และไดรฟ์การเกษตร โดยสายการผลิตที่ทำการศึกษาคือสายการผลิตเกียร์จำนวน 11 กลุ่มประกอบไปด้วยผลิตภัณฑ์ทั้งหมด 20 รายการ ซึ่งเป็นชิ้นส่วนของรถแทรกเตอร์

ในสายการผลิตเกียร์ปัจจุบันมีการใช้แรงงานคนควบคู่กับเครื่องจักรแบบกึ่งอัตโนมัติและมีสายการผลิต 2 ประเภท คือ การผลิตทีละชิ้น (One piece flow) [1] และการผลิตแบบไม่ต่อเนื่อง (Job shop) โดยในแต่ละกลุ่มผลิตภัณฑ์จะผลิตในสายการผลิตเดียวกัน แต่เวลาที่ใช้ในการผลิตของแต่ละกลุ่มผลิตภัณฑ์แตกต่างกัน จากการศึกษาในเบื้องต้นพบว่า สายการผลิตไม่สามารถตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้าได้ ขาดความสมดุล พบปัญหาการรอคอยในการเปลี่ยนสถานีงาน พนักงานและเครื่องจักรมีการทำงานไม่เต็มประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงมีความจำเป็นที่จะต้องปรับปรุงสายการผลิตใน

ปัจจุบัน เพื่อให้สามารถตอบสนองต่อความต้องการของลูกค้าและมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

การจัดสมดุลสายการผลิตได้ถูกนำมาวิเคราะห์การปรับปรุงสายการผลิตในงานวิจัยต่าง ๆ [2]-[3] นอกจากนั้นยังมีการใช้เทคนิคการปรับปรุงงาน ECRS หรือแนวคิดลีน [4]-[5] ก็ได้ถูกนำมาใช้ในการลดความสูญเสียในกระบวนการผลิต โดยทั่วไปแล้วการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์จะถูกนำมาใช้ในการแสดงผลและวิเคราะห์ผลเพื่อให้เห็นภาพอย่างชัดเจนของผลลัพธ์ที่จะเกิดขึ้น [6] โดยเป้าหมายหลักส่วนใหญ่คือการสร้างสมดุล เพิ่มผลผลิต และประสิทธิภาพในการผลิตนั่นเอง

จากปัญหาของของกระบวนการผลิตเกียร์ของโรงงานกรณีศึกษาที่มีการผลิตเป็นแบบเซลล์ มีการผลิตใน 2 ส่วน คือส่วนที่เป็นการผลิตทีละชิ้นและส่วนที่เป็นการผลิตที่ไม่ต่อเนื่อง ปัจจุบันประสบปัญหาการกองงานในส่วนของการผลิตที่ไม่ต่อเนื่องเนื่องจากมีการไหลของงานมาอย่างต่อเนื่องในส่วนของการผลิตทีละชิ้น แต่ในส่วนของการผลิตที่ไม่ต่อเนื่องมีการผลิตที่จะต้องรอรวมเป็นรุ่นก่อนส่งไปยังเครื่องจักรต่อไป ซึ่งส่งผลให้เกิดการรอคอยในกระบวนการผลิตและผลิตออกมาไม่ได้ตามจำนวนที่ต้องการ

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะใช้การพิจารณาปรับเรียบการไหล (Smoothing flow) เพื่อลดความสูญเสียเปล่าที่เกิดขึ้นในกระบวนการและการจัดสรรทรัพยากรให้เกิดประสิทธิภาพสูงสุด ด้วยการวิเคราะห์ความสมดุลสายการผลิตและประยุกต์ใช้แนวคิดการปรับขนาดล็อตเล็ก (Small lot) [7] เพื่อลดเวลาการรอคอยงานรวมรุ่น, ทฤษฎีข้อจำกัด (Theory of constraint) เพื่อวิเคราะห์

หาคอขวด [8] และจัดการการไหลบริเวณคอขวดให้ต่อเนื่อง, การจัดลำดับงานที่เวลาดำเนินงานต่ำสุดก่อน (Shortest Processing Time) เพื่อให้เวลาในระบบต่ำสุด [9] และการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ [10] เพื่อให้ได้แนวทางที่เหมาะสมที่สุดสำหรับโรงงานกรณีศึกษา

2. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

องค์ประกอบของการผลิตแบบลีน ประกอบไปด้วย ทรัพยากรที่ปรับเปลี่ยนได้ง่าย การจัดผังโรงงานแบบเซลล์ ระบบการผลิตแบบดึง การควบคุมด้วยคัมบัง การผลิตที่ขนาดลือตเล็กๆ การติดตั้งที่รวดเร็ว คุณภาพ ณ จุดกำเนิด การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตโดยการบำรุงรักษา และโครงข่ายผู้ส่งมอบ [5-7,9] โดยในงานวิจัยนี้จะสร้างสมดุลการไหลโดยการปรับขนาดลือตเล็กเพื่อลดเวลารอคอยในการผลิต ขนาดลือตสามารถคำนวณได้จาก

$$\text{ขนาดลือต} = \frac{\text{เวลาในการผลิตต่อหนึ่งลือต}}{\text{รอบเวลาการทำงาน} + \text{เวลาในการติดตั้ง}} \quad (1)$$

ทฤษฎีข้อจำกัด (Theory of constraint) คือการระบุคอขวด (Bottleneck) ของสายการผลิต [8-9] เนื่องจากเป็นจุดที่กำหนดอัตราการออกของงานจึงจำเป็นต้องมีการจัดการไหลเข้าของงานอย่างต่อเนื่อง ในงานวิจัยนี้ได้นำมาใช้ในการวิเคราะห์หาจุดที่ควรทำการปรับปรุงเพื่อให้ระบบดีขึ้น

การจัดลำดับงานด้วยวิธีเวลาดำเนินงานน้อยสุด (Shortest Processing Time, SPT) [9] ในการเลือกงานเข้าสู่เครื่องจักรที่เป็นคอขวด เพื่อให้ได้ค่าเฉลี่ยเวลาที่อยู่ในระบบต่ำสุดและลดปริมาณงานค้างที่อยู่ในระบบต่ำสุด วิธี SPT คือวิธีที่เหมาะสมในการจัดลำดับงานสำหรับกรณี 1 เครื่องจักรและเครื่องจักรวางแบบขนาน

3. วิธิดำเนินงานวิจัย

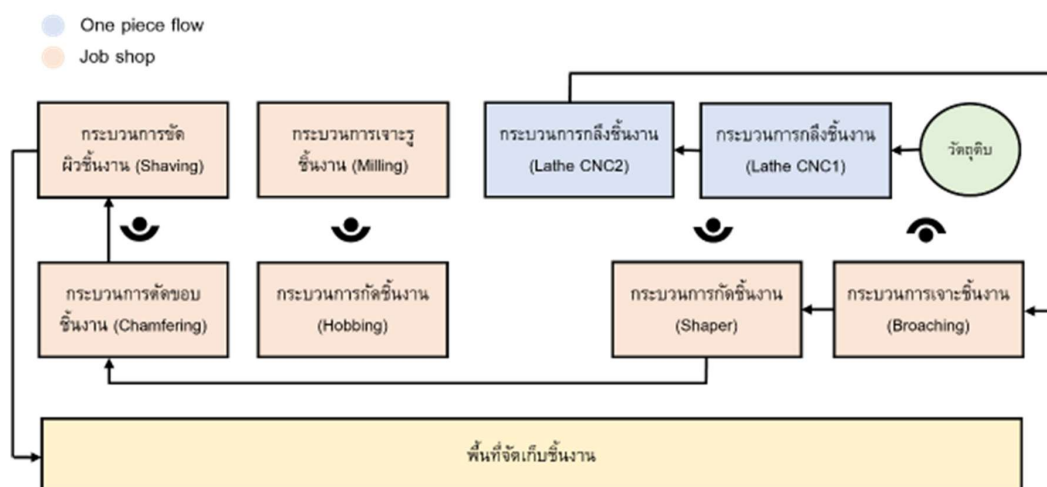
โรงงานกรณีศึกษาเป็นโรงงานผลิตเครื่องจักรกลและเครื่องจักรอุตสาหกรรมการเกษตร โดยผลิตภัณฑ์ที่

ทำการศึกษาคือ เกียร์ ซึ่งเป็นชิ้นส่วนของรถแทรกเตอร์ โดยมีขั้นตอนในการดำเนินการวิจัยดังต่อไปนี้

3.1 เก็บข้อมูลผลิตภัณฑ์และกระบวนการผลิตเกียร์

1. ในการศึกษาสายการผลิตเกียร์ ได้ทำการแบ่งกลุ่มผลิตภัณฑ์ที่มีกระบวนการผลิตคล้ายคลึงกันเข้าไว้ด้วยกัน ได้เป็น 11 กลุ่มผลิตภัณฑ์จากผลิตภัณฑ์ทั้งหมด 20 ชนิด ในสายการผลิตของทั้ง 11 กลุ่มผลิตภัณฑ์มีการใช้เครื่องจักรแบบกึ่งอัตโนมัติควบคู่กับแรงงานคน โดยมีแรงงานคนทั้งหมด 4 คน และสามารถแบ่งการผลิตได้เป็น 2 ประเภทคือการผลิตแบบการผลิตทีละชิ้น (One piece flow) และการผลิตแบบไม่ต่อเนื่อง (Job shop) โดยทั้ง 2 ส่วนทำการผลิตต่อเนื่องกัน การผลิตแบบการผลิตทีละชิ้น จะมี 2 กระบวนการคือ กระบวนการกลึงชิ้นงาน 1 (Lathe CNC 1) และกระบวนการกลึงชิ้นงาน 2 (Lathe CNC 2) การผลิตแบบไม่ต่อเนื่องมี 6 กระบวนการ คือ กระบวนการเจาะชิ้นงาน (Broaching) กระบวนการกัดชิ้นงาน (Hobbing) กระบวนการกัดชิ้นงาน (Shaper) กระบวนการตัดขอบชิ้นงาน (Chamfering) กระบวนการเจาะรูชิ้นงาน (Milling) และกระบวนการขัดผิวชิ้นงาน (Shaving) และกลุ่มผลิตภัณฑ์ทั้ง 11 กลุ่มผลิตภัณฑ์มีสายการผลิตที่ไม่เหมือนกัน โดยยกตัวอย่างสายการผลิตของกลุ่มผลิตภัณฑ์ที่ 1 ดังแสดงในรูปที่ 1

จากสายการผลิตของกลุ่มผลิตภัณฑ์ที่ 1 มีการดำเนินงานทั้งหมด 6 กระบวนการ โดยเริ่มจากกระบวนการผลิตทีละชิ้นคือ กระบวนการกลึงชิ้นงาน 1 (Lathe CNC 1) และกระบวนการกลึงชิ้นงาน 2 (Lathe CNC 2) และผ่านกระบวนการผลิตแบบต่อเนื่องกัน ไปยังกระบวนการเจาะชิ้นงาน (Broaching) กระบวนการกัดชิ้นงาน (Shaper) กระบวนการตัดขอบชิ้นงาน (Chamfering) และกระบวนการขัดผิวชิ้นงาน (Shaving) โดยกลุ่มผลิตภัณฑ์ที่ 1 จะไม่ผ่านกระบวนการกัดชิ้นงาน (Hobbing) และกระบวนการเจาะรูชิ้นงาน (Milling) โดยกลุ่มผลิตภัณฑ์ที่ 3 จะผ่านกระบวนการกัดชิ้นงาน (Hobbing) และกระบวนการเจาะรูชิ้นงาน (Milling)



รูปที่ 1 กระบวนการผลิตเกียร์ของกลุ่มผลิตภัณฑ์ที่ 1

2. ทำการศึกษาเวลาการปฏิบัติงานในแต่ละกระบวนการสำหรับกลุ่มผลิตภัณฑ์ทั้งหมด โดยจับเวลาการปฏิบัติงานแต่ละสถานีย่อย วิเคราะห์ข้อมูลเวลาให้มีความน่าเชื่อถือ และคำนวณเวลามาตรฐานตามหลักการศึกษางาน (work study) แต่ละกระบวนการผลิต [4]

3.2 วิเคราะห์ปัญหาของสายการผลิตและหาแนวทางในการปรับปรุงการผลิตเบื้องต้น

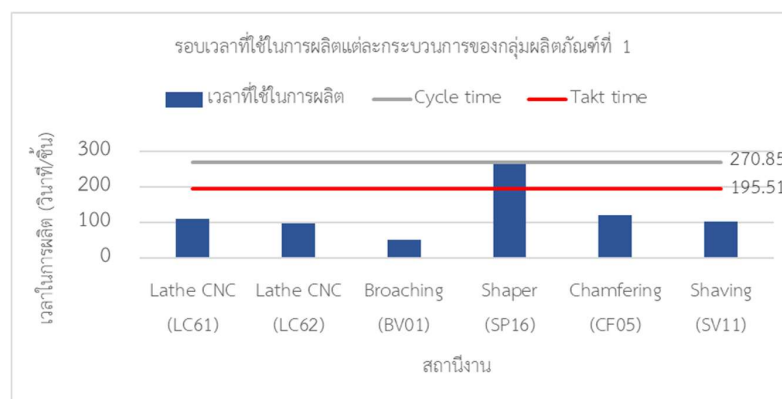
ในปัจจุบันโรงงานกรณีศึกษามีชั่วโมงการทำงานคือ 10.5 ชั่วโมง/กะ (1 วันมี 2 กะ ทำงาน 21 ชั่วโมง/วัน) ก่อนการปรับปรุงกระบวนการมีรอบเวลาการทำงาน (cycle time) และจังหวะความต้องการของลูกค้า (Takt time) แสดงในตารางที่ 1 และตัวอย่างกราฟสมดุลสายการผลิตของแต่ละกลุ่มผลิตภัณฑ์ที่ 1 แสดงดังรูปที่ 2 กระบวนการคอขวดของผลิตภัณฑ์ต่างๆ แตกต่างกันไปโดยผลิตภัณฑ์ที่ 1 และ 2 คือกระบวนการกัดชิ้นงาน (Shaper), กระบวนการคอขวดของผลิตภัณฑ์ที่ 3-9 คือกระบวนการกัดชิ้นงาน (Hobbing), กระบวนการคอขวดของผลิตภัณฑ์ที่ 10 คือกระบวนการขัดผิวชิ้นงาน (Shaving) และกระบวนการคอขวดของผลิตภัณฑ์ที่ 11 คือกระบวนการเจาะรูชิ้นงาน (Milling)

หลังจากทำการวิเคราะห์สายการผลิตเกียร์ของทั้ง 11 กลุ่มผลิตภัณฑ์พบว่าสายการผลิตไม่สามารถผลิตชิ้นงานได้ตามความต้องการของลูกค้า การไหลของกระบวนการ

ไม่ต่อเนื่อง เนื่องจากมีการปรับสายการผลิตเป็นการผลิตทีละชิ้นในส่วนแรกและมีการผลิตแบบไม่ต่อเนื่องในส่วนหลังโดยส่งต่อเป็นรุ่น ทำให้เกิดการรอคอยงานให้ครบรุ่นก่อนส่งไปยังกระบวนการถัดไปจึงพิจารณาแนวทางในการปรับเรียงการไหล

ตารางที่ 1 Takt time และ Cycle time ของทั้ง 11 กลุ่มผลิตภัณฑ์

กลุ่มผลิตภัณฑ์	เป้าหมายเฉลี่ย (ชิ้น/เดือน)	เป้าหมายเฉลี่ย (ชิ้น/วัน)	Cycle time (วินาที/ชิ้น)	Takt time (วินาที/ชิ้น)
1	2,284	96	270.85	195.51
2	1,200	50	252.95	182.59
3	792	33	213.52	154.13
4	408	17	212.35	153.28
5	67	3	97.80	70.60
6	67	3	334.97	241.80
7	4,294	179	169.73	122.52
8	3,468	145	92.86	67.03
9	1,240	52	165.23	119.28
10	150	7	98.09	70.81
11	59	3	333.79	240.95



รูปที่ 2 กราฟสมดุลสายการผลิตของกลุ่มผลิตภัณฑ์ที่ 1

หลักการที่นำมาใช้ในการปรับเรียบคือการปรับขนาดล้อตกรผลิตขนาดเล็ก ทฤษฎีข้อจำกัด การจัดลำดับงานแบบ SPT และการเพิ่มจำนวนทรัพยากรที่กระบวนการคอขวด โดยในการทดลองจะทำการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์ผลลัพธ์ที่ได้

3.3 สร้างแบบจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ก่อนการปรับปรุงและตรวจสอบความถูกต้องของโมเดล

ในการจำลองสถานการณ์ด้วยคอมพิวเตอร์ของสายการผลิตก็ควรก่อนการปรับปรุง โดยใช้โปรแกรม Pro Model ต้องทำการวิเคราะห์ข้อมูลเวลาในแต่ละกระบวนการตามหลักการศึกษาและนำข้อมูลไปทดสอบทางด้านสถิติเพื่อหาการแจกแจงที่เหมาะสมโดยใช้โปรแกรม Stat::Fit [10] ตัวอย่างข้อมูลแสดงดังตารางที่ 2 โดยเวลาของเครื่องจักรเป็นค่าคงที่เนื่องจากเป็นเครื่องจักรอัตโนมัติมีอัตราการทำงานเท่ากันทุกชิ้นงานในแต่ละผลิตภัณฑ์

ทำการจำลองระบบก่อนปรับปรุง (แบบจำลองที่ 1) แบบจำลองแสดงได้ดังรูปที่ 3 และตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรม (Verification) โดยตรวจสอบจากภาพเคลื่อนไหว ตรวจสอบข้อผิดพลาดจากการเขียนโปรแกรม (Trace and debug) และจากจำนวนที่ผลิตได้จากการคำนวณด้วยค่าเฉลี่ยเทียบกับผลการจำลอง ทำการรันโปรแกรมจำนวน 30 รอบแบบกำหนดการหยุด

(Terminating Simulation) และมีการอุ่นเครื่อง (warm up) การจำลองก่อนการจำลองจริง 1 เดือนโดยข้อมูลนำเข้าเป็นปริมาณความต้องการของลูกค้าในทุกผลิตภัณฑ์ใน 1 เดือน พบว่ามีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำกว่า 0.14% ดังแสดงในตารางที่ 3 และทำการทดสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Validation) โดยเปรียบเทียบค่าจริงที่ผลิตได้กับที่ได้จากการจำลองระบบพบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีระดับนัยสำคัญ 0.05 ด้วย t-test และทดสอบความแปรปรวนด้วย Chi Square test [11] พบว่าความแปรปรวนของระบบจริงไม่แตกต่างจากระบบที่จำลองขึ้นดังแสดงในตารางที่ 4

หลังจากนั้นจำลองระบบที่ทำการปรับปรุงด้วยวิธีการจัดการแบบใหม่แบ่งได้เป็น 7 รูปแบบคือ

แบบจำลองที่ 2 : ใช้วิธีการปรับขนาดล้อตกรผลิตทั้ง 11 กลุ่มผลิตภัณฑ์เพื่อลดเวลาในการผลิตแต่ละล้อตและลดเวลารอคอยงานรวมรุ่น

แบบจำลองที่ 3 : จัดลำดับการผลิตใหม่โดยใช้หลักการ SPT โดยดูเวลาจากกระบวนการคอขวดเพื่อให้งานออกจากกระบวนการคอขวดเร็วที่สุด ลดเวลางานที่อยู่ในระบบและเวลารอคอย

แบบจำลองที่ 4 : เพิ่มจำนวนทรัพยากรที่เป็นคอขวดเพื่อลดเวลารอคอยและเพิ่มความสามารถในการผลิต

หลังจากนั้นนำแนวทางในการปรับปรุงแต่ละวิธีมาใช้งานร่วมกันเพื่อให้สายการผลิตเกิดประสิทธิภาพสูงสุดดังนี้

ตารางที่ 2 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ข้อมูลของกลุ่มผลิตภัณฑ์ที่ 1

สถานีหลัก	ขั้นตอนการทำงานหลัก	ลำดับงานย่อย	เวลามาตรฐาน (วินาที/ชิ้น)	ทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล	ทดสอบความสม่ำเสมอของข้อมูล	ทดสอบการแจกแจงที่เหมาะสม	พารามิเตอร์
1	กระบวนการกลึงชิ้นงาน (Lathe CNC 1)	โหลตงานเข้าเครื่อง	10.18	ผ่าน	ผ่าน	Inverse Weibull	Inverse Weibull (9, 2.16, 1.25)
		Lathe CNC1 ทำงาน	92.20	-	-	-	92.20
		โหลตงานออกจากเครื่อง	8.27	ผ่าน	ผ่าน	Johnson SB	Johnson SB (6, 3.89, - 0.505, 0.536)
2	กระบวนการกลึงชิ้นงาน (Lathe CNC 2)	โหลตงานเข้าเครื่อง	12.43	ผ่าน	ผ่าน	Inverse Weibull	Inverse Weibull (11, 3.96, 0.892)
		Lathe CNC 2 ทำงาน	57.53	-	-	-	57.53
		โหลตงานออกจากเครื่อง	27.63	ผ่าน	ผ่าน	Loglogistic	Loglogistic (24, 4.2, 3.36)
3	กระบวนการเจาะชิ้นงาน (Broaching)	โหลตงานเข้าเครื่อง	9.09	ผ่าน	ผ่าน	Weibull	Weibull (7, 2.28, 2.41)
		Broaching machine ทำงาน	26.37	-	-	-	26.37
		โหลตงานออกจากเครื่อง	15.25	ผ่าน	ผ่าน	Johnson SB	Johnson SB (11, 6.88, - 0.551, 0.894)

ตารางที่ 2 ตัวอย่างผลการวิเคราะห์ข้อมูลของกลุ่มผลิตภัณฑ์ที่ 1 (ต่อ)

สถานีหลัก	ขั้นตอนการทำงานหลัก	ลำดับงานย่อย	เวลามาตรฐาน (วินาที/ชิ้น)	ทดสอบความเป็นอิสระของข้อมูล	ทดสอบความสม่ำเสมอของข้อมูล	ทดสอบการแจกแจงที่เหมาะสม	พารามิเตอร์
4	กระบวนการกัดชิ้นงาน (Shaper1)	โหลตงานเข้าเครื่อง	18.02	ผ่าน	ผ่าน	Loglogistic	Loglogistic (11, 2.77, 2.08)
		Shaper machine ทำงาน	231.83	-	-	-	231.83
		โหลตงานออกจากเครื่อง	21.00	ผ่าน	ผ่าน	Triangular	Triangular (17, 25.2, 21.4)
5	กระบวนการตัดขอบชิ้นงาน (Chamfering)	โหลตงานเข้าเครื่อง	7.45	ผ่าน	ผ่าน	Triangular	Triangular (5, 9.98, 7.16)
		Chamfering machine ทำงาน	97.00	-	-	-	97.00
		โหลตงานออกจากเครื่อง	15.70	ผ่าน	ผ่าน	Weibull	Weibull (11, 3.74, 5.18)
6	กระบวนการขัดผิวชิ้นงาน (Shaving1)	โหลตงานเข้าเครื่อง	17.53	ผ่าน	ผ่าน	Weibull	Weibull (15, 3.59, 2.82)
		Shaving machine ทำงาน	120.73	-	-	-	120.73
		โหลตงานออกจากเครื่อง	25.52	ผ่าน	ผ่าน	Beta	Beta (22, 28.9, 1.52, 1.58)



รูปที่ 3 แผนผังการจำลองสถานการณ์

ตารางที่ 3 ตัวอย่างการตรวจสอบความถูกต้องของโปรแกรมของกลุ่มผลิตภัณฑ์ที่ 1

เวลาผลิต (ชั่วโมง)	จำนวนชิ้นงานของ กลุ่มผลิตภัณฑ์ที่ 1		ผลต่าง	
	คำนวณ	โปรแกรม	ขึ้น	เปอร์เซ็นต์
504	1,660.75	1,660	0.75	0.05
1,008	3,323.91	3,320	3.91	0.12
1,512	4,987.06	4,980	7.06	0.14

ตารางที่ 4 ตัวอย่างการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองของกลุ่มผลิตภัณฑ์ที่ 1

การทดสอบ	T-test	Chi Square test
สมมติฐาน	$H_0: \mu = 504$ $H_1: \mu \neq 504$ ชั่วโมง/เดือน	$H_0: \sigma^2 = 0.035$ $H_1: \sigma^2 \neq 0.035$ ชั่วโมง/เดือน
ช่วงความเชื่อมั่นของการทดสอบสมมติฐาน	-2.045 < -1.370 < 2.045	16.05 < 21.21 < 45.72
ผลลัพธ์	ผ่าน	ผ่าน

แบบจำลองที่ 5 : ใช้วิธีการปรับขนาดล็อตการผลิตและวิธีการจัดลำดับการผลิตใหม่โดยใช้หลักการ SPT

แบบจำลองที่ 6 : ใช้วิธีการปรับขนาดล็อตการผลิตและวิธีการเพิ่มจำนวนทรัพยากรที่คอขวด

แบบจำลองที่ 7 : ใช้วิธีการจัดลำดับการผลิตใหม่โดยใช้หลักการ SPT และเพิ่มจำนวนทรัพยากรที่คอขวด
แบบจำลองที่ 8 : ใช้วิธีการปรับขนาดล็อตการผลิต, วิธีการจัดลำดับการผลิตใหม่โดยใช้หลักการ SPT และวิธีการเพิ่มจำนวนทรัพยากรที่คอขวด

4. ผลการวิจัย

ผลการจำลองสถานการณ์สายการผลิตเกี่ยวของทั้ง 11 กลุ่มผลิตภัณฑ์ที่ใช้เวลาในการจำลองสถานการณ์ทั้งสิ้น 1 เดือนได้ผลดังตารางที่ 5 และสามารถเปรียบเทียบตัวชี้วัดของแต่ละแนวทางหลังการปรับปรุงได้ผลดังตารางที่ 5 จากการนำผลการปรับปรุงของแบบจำลองทั้ง 8 แบบ โดยแบ่งเป็นแบบจำลองก่อนการปรับปรุงและแบบจำลองหลังการปรับปรุง โดยมีแนวทางในการปรับปรุงทั้งหมด 7 แนวทาง มาทำการวิเคราะห์โดยใช้วิธีการออกแบบอย่างสุ่มสมบูรณ์เพื่อหาแนวทางการปรับปรุงที่เหมาะสมที่สุด โดยการนำเวลาที่ใช้ในการผลิตทั้ง 8 แนวทางจากการจำลองสถานการณ์มาหาค่าเฉลี่ยและทดสอบสมมติฐานเกี่ยวกับ ค่าความแปรปรวนของกลุ่มตัวอย่างด้วย F-test ได้ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนดังตารางที่ 6

ตารางที่ 5 ผลลัพธ์ของแบบจำลองสถานการณ์

การวัดผล	ผลิตภัณฑ์	ก่อนการปรับปรุง	หลังการปรับปรุง						
			แบบที่ 2	แบบที่ 3	แบบที่ 4	แบบที่ 5	แบบที่ 6	แบบที่ 7	แบบที่ 8
จำนวนชิ้นงานที่ได้ (ชิ้น)	1	1,660	2,280	2,800	2,280	2,280	2,280	2,280	2,280
	2	870	480	533	593	1,080	1,099	534	1,080
	3	570	800	800	800	800	800	800	800
	4	290	420	420	420	420	420	420	420
	5	50	70	70	70	70	70	70	70
	6	50	58	70	0	70	56	70	70
	7	3,100	4,300	4,079	4,300	4,300	4,300	4,300	4,300
	8	2,500	3,480	3,480	3,480	3,480	3,480	3,480	3,480
	9	900	1,240	1,240	1,240	1,240	1,240	1,240	1,240
	10	120	150	150	150	150	150	150	150
	11	50	60	60	60	60	60	60	60
	รวม	10,160	13,338	13,702	13,393	13,950	13,955	13,404	13,950

ตารางที่ 6 การวัดผลแนวทางหลังการปรับปรุง

การวัดผล	ก่อนการปรับปรุง	หลังการปรับปรุง						
		แบบที่ 2	แบบที่ 3	แบบที่ 4	แบบที่ 5	แบบที่ 6	แบบที่ 7	แบบที่ 8
อัตราผลผลิต (ชิ้น/ชม./คน)	5.04	6.61 (+31.15)	6.79 (+34.72)	6.64 (+31.75)	6.92 (+37.30)	6.92 (+37.30)	6.64 (+31.75)	6.92 (+37.30)
อรรถประโยชน์เครื่องจักร (%)	40.31	45.56 (+13.03)	44.95 (+11.51)	50.82 (+26.08)	46.52 (+15.41)	57.87 (+43.57)	51.82 (+28.56)	59.96 (+48.75)
อรรถประโยชน์พนักงาน (%)	21.50	24.30 (+13.01)	24.03 (+11.77)	30.50 (+41.86)	24.82 (+15.42)	34.72 (+61.48)	31.11 (+44.66)	35.98 (+67.32)
ประสิทธิภาพ (%)	63.12	66.38 (+5.16)	65.02 (+3.01)	68.58 (+8.65)	67.45 (+6.86)	70.61 (+11.87)	69.39 (+9.93)	71.83 (+13.80)
การจ้างงานล่วงหน้า (วัน)	5	2 (-60.00)	3 (-40.00)	3 (-40.00)	1 (-80.00)	1 (-80.00)	3 (-40.00)	1 (-80.00)

ตัวเลขในวงเล็บหมายถึง (+คือ % ที่เพิ่มขึ้นจากก่อนปรับปรุง, - คือ% ที่ลดลงจากก่อนปรับปรุง)

ตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์ ANOVA

Source	DF	Adj SS	Adj MS	F-Value	P-Value
Solution	7	176483	25211.8	902619.58	0.000
Error	232	6	0.026		
Total	239	176489			

One-way ANOVA: response versus level					
Grouping Information Using the Tukey Method and 95% Confidence					
level	N	Mean	Grouping		
1	30	596.984	A		
7	30	550.112	B		
4	30	550.078	B		
3	30	549.732	C		
2	30	543.595	D		
5	30	514.552	E		
8	30	514.527	E		
6	30	507.836	F		
Means that do not share a letter are significantly different.					

รูปที่ 4 ผลการเปรียบเทียบเชิงซ้อนโดยวิธี Tukey

ผลจากตาราง ANOVA พบว่าค่าเฉลี่ยเวลาที่ใช้ในการผลิตเกิดจากทุกแนวทางเกิดความแตกต่างกัน หรือกล่าวได้ว่า แนวทางการปรับปรุงมีผลต่อค่าเฉลี่ยของเวลาที่ใช้ใน

การผลิตจากการเปรียบเทียบความแตกต่างของแต่ละแนวทางโดยใช้วิธี Tukey ดังแสดงในรูปที่ 4 เมื่อทดสอบความแตกต่างของแต่ละคู่ของทุกแนวทางการปรับปรุงพบว่าแนวทางการปรับปรุงที่ไม่เกิดความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติคือ แนวทางการปรับปรุงที่ 7 กับ 4 และแนวทางการปรับปรุงที่ 5 กับ 8 ซึ่งแสดงว่าแนวทางทั้งคู่ให้ผลลัพธ์ที่ไม่แตกต่างกัน ทำให้สามารถเลือกแนวทางใดแนวทางหนึ่งได้ ซึ่งจากผลการวิเคราะห์เวลาที่ใช้ในการผลิตแต่ละแนวทาง แสดงให้เห็นว่าแนวทางการปรับปรุงที่ดีที่สุดคือ แนวทางการปรับปรุงที่ 6 แนวทางการปรับปรุงที่ตรงลงมาคือ แนวทางการปรับปรุงที่ 5 และแนวทางการปรับปรุงที่ 8 ซึ่งอยู่ในระดับเดียวกัน

จากผลการจำลองสถานการณ์แนวทางการปรับปรุงที่ 5, 6 และ 8 ทำให้สายการผลิตมีอัตราผลผลิตเพิ่มขึ้น 37.30% จากสายการผลิตก่อนการปรับปรุง แนวทางการปรับปรุงที่ 5 ให้ค่าอรรถประโยชน์เครื่องจักร 46.52 %

ให้ค่าอรรถประโยชน์พนักงาน 24.82% และให้ค่าประสิทธิภาพ 67.45% แนวทางการปรับปรุงที่ 6 ให้ค่าอรรถประโยชน์เครื่องจักร 57.87% ให้ค่าอรรถประโยชน์พนักงาน 34.72% และให้ค่าประสิทธิภาพ 70.61% และแนวทางการปรับปรุงที่ 8 ให้ค่าอรรถประโยชน์เครื่องจักร 59.96% ให้ค่าอรรถประโยชน์พนักงาน 35.98% และให้ค่าประสิทธิภาพ 63.29% อย่างไรก็ตามทุกแนวทางต้องมีการทำงานล่วงเวลา (OT) โดยแบบจำลองที่ให้มีการจ้างงานล่วงเวลาน้อยที่สุดคือ แบบจำลองที่ 5, แบบจำลองที่ 6 และแบบจำลองที่ 8 คือ 1 วันจากเดิม 5 วันใน 1 เดือน จากผลการจำลองสถานการณ์ทั้งหมดจึงสรุปได้ว่า ทางบริษัทกรณีศึกษาควรเลือกแนวทางการปรับปรุงที่ 5 คือ ปรับขนาดล้อการผลิตและวิธีการจัดลำดับการผลิตใหม่โดยใช้หลักการ SPT เนื่องจากมีอัตราผลผลิตและการจ้างงานล่วงเวลาเท่ากับแนวทางการปรับปรุงที่ 6 และแนวทางการปรับปรุงที่ 8 โดยแนวทางการปรับปรุงที่ 5 สามารถเพิ่มอัตราผลผลิตได้ 37.30% เพิ่มค่าอรรถประโยชน์เครื่องจักรและพนักงานได้ 15.41% และ 15.42% และสามารถเพิ่มประสิทธิภาพได้ 6.86% และ

ด้วยเงื่อนไขของทางโรงงานกรณีศึกษาที่มีข้อจำกัดด้านพื้นที่และต้นทุนที่ใช้ในการผลิตทำให้แนวทางการปรับปรุงที่มีการเพิ่มจำนวนเครื่องจักร ยังมีความเหมาะสมไม่มากพอกับสายการผลิต ดังนั้นแนวทางการปรับปรุงที่ 5 คือ การปรับขนาดล็อตการผลิตและวิธีการจัดลำดับการผลิตใหม่โดยใช้หลักการ SPT จึงมีความเหมาะสมในการปรับปรุงสายผลิตเกียร์ เพื่อให้สายการผลิตเกียร์สามารถลดความสูญเสียที่เกิดขึ้นได้มากที่สุดและสามารถเพิ่มประสิทธิภาพสายการผลิตได้มากที่สุด

ในงานวิจัยนี้การล่าช้าเกิดจากการส่งต่อของงานที่จะต้องมีการรวมเป็นรุ่นทำให้เกิดการรอคอย ส่วนรอบเวลาในการผลิตเมื่อมีการเพิ่มการทำงานล่วงเวลาสามารถทำให้รอบเวลาอยู่ภายใต้ Takt time ได้ ดังนั้นการลดขนาดล็อตจึงส่งผลให้เวลาในการรอคอยจนครบจำนวนลดลงในส่วนของการส่งต่อระหว่างสถานี ส่วนการหาจุดคอขวดตามหลักการทฤษฎีข้อจำกัดคือการทำให้มีการไหลของงานที่คอขวดอย่างต่อเนื่องเพื่อไม่ให้คอขวดหยุดชะงักในการทำงาน ซึ่งทำให้การไหลของงานออกได้รวดเร็วขึ้น นอกจากนี้การนำหลักการ SPT มาประยุกต์ใช้ร่วมเพื่อให้มีการออกของงานที่เร็วขึ้นโดยหลักการ SPT โดยพื้นฐานจะทำให้เวลาการไหลของงานในระบบมีค่าที่ต่ำ ลดการล่าช้า และลดงานระหว่างกระบวนการได้

5. สรุปและอภิปรายผล

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาแนวทางการปรับเรียงสายการผลิตที่เป็นการผลิตเกียร์ 11 กลุ่มผลิตภัณฑ์ที่มีการใช้แรงงานคนควบคู่กับเครื่องจักรแบบกึ่งอัตโนมัติและมีการจัดสายการผลิตแบบการไหลที่ละชิ้นและแบบไม่ต่อเนื่อง ที่ประสบปัญหาไม่สามารถผลิตชิ้นงานได้ตามความต้องการของลูกค้า โดยนำหลักการในการปรับเรียงสายการผลิตอันได้แก่ การปรับขนาดล็อต, วิธีการจัดลำดับงานที่มีเวลาดำเนินการน้อยสุดก่อนโดยพิจารณาจากสถานีที่เป็นข้อจำกัด, การและเพิ่มทรัพยากร มาทดสอบผ่านการจำลองสถานการณ์ โดยทำการจำลองสถานการณ์ 8 แบบจำลอง จากแบบจำลองแสดงให้เห็น

ว่าแนวทางการปรับปรุงทั้ง 7 แบบจำลอง สามารถเพิ่มอัตราผลผลิตให้สายการผลิตได้ โดยแบบจำลองที่สามารถเพิ่มอัตราผลผลิตได้มากที่สุดคือ แบบจำลองที่ 5, 6 และ 8 สามารถเพิ่มอัตราผลผลิตได้ 37.30% แบบจำลองที่สามารถเพิ่มอรรถประโยชน์เครื่องจักรและพนักงานมากที่สุดคือ แบบจำลองที่ 8 โดยค่าการใช้อรรถประโยชน์ของพนักงานเพิ่มขึ้น 67.32% และค่าการใช้อรรถประโยชน์ของเครื่องจักรเพิ่มขึ้น 48.75% แบบจำลองที่สามารถเพิ่มประสิทธิภาพสายการผลิตมากที่สุดคือ แบบจำลองที่ 8 ซึ่งมีประสิทธิภาพสายการผลิตเพิ่มขึ้น 13.80% และสายการผลิตก่อนการปรับปรุงและแนวทางการปรับปรุงทั้ง 7 แนวทางยังไม่สามารถผลิตชิ้นงานได้ตามทันตามความต้องการจึงต้องพิจารณาการจ้างงานล่วงเวลา ซึ่งแบบจำลองที่ทำให้มีการจ้างงานล่วงเวลาน้อยที่สุดคือแบบจำลองที่ 5, 6 และ 8 คือ 1 วันลดลงได้ 4 วันในหนึ่งเดือนจากเดิม จากผลการจำลองสถานการณ์ทั้งหมดจึงสรุปได้ว่า ทางบริษัทกรณีศึกษาควรเลือกแนวทางการปรับปรุงที่ 5 คือ ปรับขนาดล็อตการผลิตและวิธีการจัดลำดับการผลิตใหม่โดยใช้หลักการ SPT ตามข้อจำกัดของทางโรงงานที่ไม่ต้องการให้ค่าใช้จ่ายเพิ่มเติม

งานวิจัยในอนาคตสามารถประยุกต์ใช้การวิเคราะห์นี้กับสายการผลิตผลิตภัณฑ์อื่นๆ ในโรงงานได้ นอกจากนั้นการพิจารณาเทคนิคในการลดเวลาของกระบวนการก็จะทำให้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการได้

6. กิตติกรรมประกาศ

ผลงานนี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนกลุ่มวิจัยคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] A. D. Ioana, E. D. Maria and V. C. Cristina, "Case study regarding the implementation of one-piece flow line in automotive company," *Procedia Manufacturing*, vol. 46, pp. 244-248, 2020.

- [2] A. Alessandro and A. Claudio, "Concurrent operations assignment and sequencing for particular assembly problems in flow lines," *Annals of Operations Research*, vol. 69, pp. 1-31, 1997.
- [3] M. Manaye, "Line balancing techniques for productivity improvement," *International Journal of Mechanical and Industrial Technology*, vol. 7, no. 1, pp. 89-104, 2019.
- [4] A. F. O. Pertivi and R. D. Astuti, "Increased line efficiency by improved work methods with the ECRS concept in a washing machine production: a case study," *Jurnal Sistem dan Manajemen Industri*, vol. 4, no. 1, pp. 13-29, 2020.
- [5] J. K. Orbegozo, J. M. Palomino, F. S. Raffo and E. R. Palomino, "Applying lean manufacturing principle to reduce waste and improve process in a manufacturer: A research study in Peru," in *2019 IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 689, 012020, 2019.
- [6] B. Phruksaphanrat and S. Duangburong, "Lean techniques and simulation-based optimization for improving wood plastic composite manufacturing," *Songkanakarin Journal of Science and Technology*, vol. 41, no. 3, pp. 559-566, 2019.
- [7] S. Panigrahi, K. K. Al Ghafri, W. R. Al Alyani, M. W. Ali Khan, T. Al Madhagy and A. Khan, "Lean manufacturing practices for operational and business performance: A PLS-SEM modeling analysis," *International Journal of Engineering Business Management*, vol. 15, 2023.
- [8] R. J. Neisyafitri, P. Ongkunaruk, and W. Ongcunaruk, "Productivity improvement based on the theory of constraint and eliminate, combine, rearrange, simplify for chilled beef production in Indonesia," *Management and Production Engineering Review*, vol. 14, no. 2, pp. 111-123, 2023.
- [9] B. Phruksaphanrat, *Production Planning and Control*. Bangkok, Thailand: Top Publishing, 2009.
- [10] C. Harrell, B. K. Ghosh and R. O. Bowden, *Simulation Using ProModel*, 3rd ed. Singapore: McGraw-Hill, 2012.
- [11] J. L. Devore, *Probability and Statistics for Engineering and the Sciences*, 6th ed. Toronto, Canada: Thomson Learning, Inc., 2004.

การศึกษาเชิงตัวเลขการกระจายตัวของอากาศภายในอาคารนิทรรศการ Numerical Study of Air Distribution Inside Exhibition Hall

ศุภสิน รุจิพานิชย์ กันต์ธกรณ์ เขาทอง*

¹วิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

อ. กำแพงแสน จ.นครปฐม 73140

Supasin Rujipanich Kunthakorn Khaothong*

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University,
Kamphaeng Saen Campus, Kamphaeng Saen District, Nakhon Pathom, 73140

*Corresponding author Email: Supasin.ruj@gmail.com

(Received: August 1, 2024; Revised: February 21, 2025 ; Accepted: April 3, 2025)

บทคัดย่อ

ปัจจุบันการส่งกระจายลมผ่านระบบท่อส่งลมของอาคารขนาดใหญ่นิยมใช้ท่อส่งลมแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสี ซึ่งมี การส่งกระจายลมเข้าสู่พื้นที่ปรับอากาศโดยใช้หน้ากากลม แต่จากการใช้งานพบว่าท่อส่งลมแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสีมีราคา สูง การก่อสร้างทำได้ยุ่งยาก และมีการเกิดแรงลมปะทะภายในท่อขณะส่งลม นอกจากนี้การใช้หน้ากากลมมีการส่งลมไม่ ครบคลุมทั่วพื้นที่ปรับอากาศ เนื่องจากหัวจ่ายลมสามารถส่งลมได้เฉพาะจุด ส่งผลให้เกิดบริเวณจุดอับ ดังนั้นการใช้งาน ท่อลมสมัยใหม่ คือ ท่อลมผ้าทอโพลีเอสเตอร์เคลือบพีวีซีอะคริลิก ซึ่งมีการส่งกระจายลมด้วยวิธีซึมผ่านหรือไหลออกจาก รูเจาะของท่อลม ทำให้สามารถส่งกระจายลมได้ทั่วบริเวณพื้นที่ปรับอากาศ ถือเป็นทางเลือกหนึ่งสำหรับผู้ออกแบบ ด้วย เหตุนี้งานวิจัยนี้นำเสนอรูปแบบการส่งกระจายลมเย็นด้วยท่อลมผ้าทอโพลีเอสเตอร์เคลือบพีวีซีอะคริลิก กรณีศึกษาอาคาร นิทรรศการที่มีการใช้ระบบปรับอากาศ ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ การจำลองการส่งกระจายลมผ่านรูเจาะท่อลม 3 รูปแบบ ได้แก่ การกระจายลมด้วยรูขนาด ซึ่งถือว่าไม่มีไหลตกความร้อน, การกระจายลมด้วยรูพุน ซึ่งถือว่าไม่มีไหลตก ความร้อน และ การกระจายลมด้วยรูพุนตลอดความยาวท่อลม ซึ่งมีไหลตกความร้อน ผลจากการศึกษาพบว่า ท่อลมผ้าทอ โพลีเอสเตอร์เคลือบพีวีซีอะคริลิกแบบที่ 3 (Model C) คือ การกระจายลมด้วยรูพุนตลอดความยาวท่อลม ซึ่งมีไหลตก ความร้อน สามารถส่งกระจายลม และรักษาอุณหภูมิได้ดีเมื่อเทียบกับรูปแบบอื่นที่กล่าวมา

คำสำคัญ: ท่อลมผ้าทอโพลีเอสเตอร์เคลือบพีวีซีอะคริลิก, รูเจาะ, วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ, การกระจายลม

ABSTRACT

Currently, the distribution of air through duct systems in large buildings commonly uses galvanized steel sheet ducts, which deliver air into the conditioned space using air diffusers. However, it has been observed that galvanized steel sheet ducts are expensive, difficult to install, and experience air pressure within the ducts during air delivery. Furthermore, using air diffusers does not provide uniform air distribution across the conditioned space, as the air diffusers can only deliver air to specific spots, leading to areas with insufficient airflow. As a result, the modern alternative is the use of polyester

fabric ducts coated with PVC acrylic. These ducts distribute air through permeation or through holes in the duct, allowing air to be spread evenly across the conditioned space. This offers a potential design solution. This research presents an air distribution model using polyester fabric ducts coated with PVC acrylic, using a case study of an exhibition building with an air conditioning system. The study applies computational fluid dynamics to simulate the air distribution through three types of perforated ducts: air distribution through holes of fixed size (with no heat load), air distribution through porous holes (with no heat load), and air distribution through porous holes along the entire length of the duct (with heat load). The results indicate that the polyester fabric duct coated with PVC acrylic, in the third configuration (Model C) (air distribution through porous holes along the entire duct length, with heat load), is the most effective in delivering air and maintaining temperature when compared to the other configurations.

Keyword: PVC-coated polyester canvas duct, drilled hole, Computational Fluid Dynamics (CFD), air distribution.

1. บทนำ

ปัญหาสภาวะแวดล้อมของโลกในปัจจุบันส่งผลกระทบต่อพฤติกรรมและการดำเนินชีวิตของมนุษย์ จากผลสำรวจพบว่ามนุษย์ส่วนใหญ่ใช้เวลาประมาณสองในสามส่วนของแต่ละวันดำเนินกิจกรรมต่างๆภายในอาคาร คิดเป็นสัดส่วนเวลามากกว่า 16 ชั่วโมงต่อหนึ่งวัน [1] การควบคุมสภาวะอากาศจึงเป็นปัจจัยสำคัญเพื่อให้ผู้อยู่อาศัยและดำเนินกิจกรรมเกิดความสบาย วิศวกรและนักวิจัยทางด้านระบบปรับอากาศจำนวนมากได้ศึกษาปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการปรับสภาวะของอากาศภายในอาคาร โดยคำนึงถึงสภาวะความสบาย (Comfort Zone) ที่มีปัจจัยหลักคือ อุณหภูมิ (Temperature) ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity) ความเร็วลม (Air Velocity) และการแผ่ความร้อนจากสิ่งแวดล้อม (Radiation from environment) [2] สำหรับประเทศไทยมีสภาวะอากาศแบบร้อนชื้น [3] หากต้องการควบคุมพื้นที่ปรับอากาศให้เกิดสภาวะความสบาย ตามหลักการออกแบบของมาตรฐานสมาคมวิศวกรการทำความร้อน ความเย็นและการปรับอากาศแห่งสหรัฐอเมริกา ฉบับที่ 55 (American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers; ASHRAE Standard 55-202)

ซึ่งแนะนำเกณฑ์การควบคุมอุณหภูมิพื้นที่ปรับอากาศเท่ากับ 24 – 27 องศาเซลเซียส, ความเร็วลม เท่ากับ 0.2 – 1.0 เมตรต่อวินาที และการแผ่ความร้อนจากสิ่งแวดล้อม เท่ากับ 1,324.93 วัตต์ต่อตารางเมตร [4] สำหรับการควบคุมสภาวะอากาศภายในพื้นที่ปรับอากาศขนาดใหญ่ นิยมใช้ระบบปรับอากาศร่วมกับระบบท่อส่งลมเพื่อส่งกระจายลมเข้าสู่พื้นที่อย่างครอบคลุม หลายทศวรรษที่ผ่านมาอุตสาหกรรมระบบปรับอากาศของประเทศไทยนิยมก่อสร้างท่อส่งลมด้วยวัสดุแผ่นเหล็กเคลือบสังกะสี ซึ่งจากการศึกษาพบว่า ท่อลมประเภทนี้มีราคาสูง เกิดมลพิษ มีการสูญเสียประสิทธิภาพในการส่งกระจายลมเนื่องจากการเกิดแรงลมปะทะภายในท่อ การสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานและการรั่วซึมของท่อลม [5] ดังนั้นความก้าวหน้าเทคโนโลยีด้านวัสดุศาสตร์และเคมีสิ่งทอ ได้มีการพัฒนาผ้าทอเส้นใยโพลีเอสเตอร์เคลือบพีวีซีอะคริลิก ซึ่งสามารถนำมาใช้ส่งกระจายลมภายในระบบปรับอากาศ มีคุณสมบัติเด่นคือ ราคาถูก น้ำหนักเบา เป็นฉนวน กันความชื้น ทนต่อแรงดึง ตัดดัดและสามารถทำความสะอาดได้ง่าย [6] การส่งกระจายลมของท่อลมผ้าทอเส้นใยโพลีเอสเตอร์เคลือบพีวีซีอะคริลิกจะใช้หลักการซึมผ่านของอากาศผ่านเนื้อผ้า และการไหลของอากาศออกบริเวณ

รูเจาะ ซึ่งถือว่าอากาศที่ออกจากท่อลมในทิศทางตั้งฉากกับพื้นที่ความพรุนท่อลม มีความเร็วต่ำอย่างสม่ำเสมอตลอดตามแนวความยาวท่อลม เมื่อพิจารณาความเร็วลมของพื้นที่ปรับอากาศและค่าความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิภายในและภายนอกท่อลม มีค่าน้อยมาก [7] ท่อลมที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางรูเจาะทางออกของอากาศขนาดใหญ่หรือมีความพรุนสูง จะมีความดันภายในท่อลมต่ำ และมีการกระจายตัวของความเร็วไม่สม่ำเสมอ ส่งผลให้ท่อลมไม่สามารถส่งลมได้จนถึงปลายทางท่อลม ซึ่งอยู่ไกลจากเครื่องส่งลมมาก [8] ดังนั้นการออกแบบการเจาะรูท่อส่งลม จำเป็นต้องคำนึงถึงความเหมาะสมของค่าความดันสูญเสียภายในท่อลม

การสร้างแบบจำลองทางคณิตศาสตร์บนโปรแกรมคอมพิวเตอร์ ด้วยวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics; CFD) สามารถมองเห็นสายธารการไหลของกระแสอากาศในสภาวะการทำงาน ส่งผลให้เทคโนโลยีการจำลองเป็นที่นิยมอย่างแพร่หลาย เนื่องจากการเปลี่ยนแปลงรูปแบบบนโปรแกรมคอมพิวเตอร์มีความสะดวก ประหยัด และใช้ระยะเวลาสั้นกว่าการทดลองจัดสร้างจริง [9] ด้วยเหตุนี้ [10] ใช้การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณด้วยโปรแกรม ANSYS Fluent เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของการติดตั้งเครื่องปรับอากาศ ณ ตำแหน่งต่างๆภายในห้อง โดยตรวจสอบการระบายความร้อนของอากาศและความแปรผันของอุณหภูมิที่ส่งผลกระทบต่อผู้อยู่อาศัย ซึ่งได้ข้อสรุปว่าระยะการวางท่อส่งลมที่เหมาะสมสำหรับห้องกรณีศึกษาขนาดพื้นที่ 14.60 ตารางเมตร ความสูง 6.00 ตารางเมตร ควรวางตำแหน่งทางออกของท่อลมที่ระดับความสูงจากพื้น 2.74 เมตร สำหรับการควบคุมสภาวะอากาศของอาคารสมัยใหม่จำเป็นต้องพิจารณาเกณฑ์ข้อกำหนดด้านคุณภาพอากาศ เพื่อให้อากาศภายในพื้นที่มีความบริสุทธิ์ วิศวกรรมผู้ออกแบบระบบจึงมีการศึกษาการออกแบบระบบปรับอากาศขนาดใหญ่ เรียกว่า ระบบความร้อน ความเย็น และการระบายอากาศ (Heating, Ventilation, and Air-conditioning system; HVAC)

[11] นำวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณมาใช้ในการศึกษาดำเนินการวางจุดตะแกรงกระจายลมเย็น ซึ่งเป็นทางออกของท่อส่งลมในระบบปรับอากาศของอาคารขนาดใหญ่ โดยศึกษาอุณหภูมิอากาศและความเร็วลมภายในอาคาร เปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดลองตรวจวัดจริง เพื่อเปรียบเทียบความน่าเชื่อถือของแบบจำลองที่สร้างขึ้น ผลจากการศึกษาพบว่า วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณสามารถนำมาใช้เป็นเครื่องมือการทำนายการกระจายตัวของอากาศ และสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์ประสิทธิภาพของระบบความร้อน ความเย็น และการระบายอากาศ (Heating, Ventilation, and Air-conditioning system; HVAC) การส่งลมออกจากท่อลมเหล็กแผ่นเคลือบสังกะสีเข้าสู่พื้นที่ปรับอากาศนั้นอาศัยตะแกรงลม (Air grille) ในการส่งกระจายลมอย่างทั่วถึง จึงจำเป็นต้องมีการออกแบบและจัดวางอย่างเหมาะสม [12] นำวิธีการเชิงตัวเลข (Numerical method) มาศึกษาตำแหน่งและขนาดของตะแกรงลม ที่มีผลต่อความเย็นสบายและสภาพแวดล้อมภายในอาคาร โดยมีการพัฒนาแผนการเพิ่มประสิทธิภาพของตะแกรงลมด้วยการใช้วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ โดยปกติการพิสูจน์ความน่าเชื่อถือของแบบจำลองที่ใช้วิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณนิยมเปรียบเทียบผลลัพธ์กับผลการทดลองจริง ดังนั้น [13] ได้จำลองการไหลของอากาศภายในท่อเรียบ (Smooth air duct) และเปรียบเทียบผลการจำลองกับผลการทดลองและผลการคำนวณจากสมการของ Modified Dittus-Boelter เพื่อคำนวณเลขนัสเซล (Nusselt number; Nu) แพลคเตอร์แรงเสียดทาน (Friction loss) และแรงดันตกคร่อม (Pressure drop) โดยเสนอเกณฑ์ความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์ที่ได้จากการจำลองเปรียบเทียบกับค่าความคลาดเคลื่อนไม่เกิน 10%

จากการตรวจเอกสารพบว่า งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการส่งกระจายอากาศเข้าสู่พื้นที่ปรับอากาศ เป็นการวิเคราะห์ท่อลมที่ทำจากวัสดุเหล็กแผ่นเคลือบสังกะสี (Galvanized Steel) ซึ่งเป็นวัสดุดั้งเดิม ซึ่งมีการส่งลม

ผ่านตะแกรงลมที่จำเป็นต้องมีการออกแบบและจัดวางอย่างเหมาะสม ส่งผลให้การออกแบบระบบท่อลมมีความยุ่งยากซับซ้อน รวมไปถึงการใช้ตะแกรงลมอาจไม่สามารถส่งลมให้เข้าถึงมุมอับของพื้นที่ได้ด้วยข้อจำกัดด้านต่างๆ ด้วยเหตุนี้การพิจารณาท่อลมทางเลือกใหม่คือ ท่อลมผ้าทอเส้นใยโพลีเอสเตอร์เคลือบพีวีซีอะคริลิก (PVC-coated polyester canvas duct) ซึ่งมีการการส่งลมด้วยวิธีการเจาะรูเพื่อเป็นทางออกของอากาศ ด้วยวิธีการนี้ผู้ออกแบบจะสามารถออกแบบตำแหน่งและทิศทางการส่งกระจายลมให้เข้าถึงบริเวณมุมอับ รวมถึงสามารถออกแบบให้หลีกเลี่ยงสิ่งกีดขวางทางเดินท่อลมได้ งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาการกระจายตัวของอากาศในอาคารนิทรรศการปรับอากาศที่ส่งและกระจายลมด้วยผ้าทอเส้นใยโพลีเอสเตอร์เคลือบพีวีซีอะคริลิกเพื่อเปรียบเทียบการกระจายตัวของอากาศและอุณหภูมิภายในอาคารปรับอากาศ เพื่อเป็นทางเลือกในการออกแบบของวิศวกรผู้ออกแบบงานระบบท่อลม

2. วิธีการศึกษา

2.1 ระเบียบวิธีพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (Computational Fluid Dynamics; CFD)

2.1.1 การศึกษาเชิงตัวเลข (Numerical method study)

โดยทั่วไปการไหลของอากาศมักมีการไหลแบบปั่นป่วน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการไหลของอากาศภายในท่อลมผ้าเส้นใยโพลีเอสเตอร์เคลือบพีวีซีอะคริลิกจะมีความปั่นป่วนสูงเนื่องจากอากาศที่ไหลผ่านช่องรูพรุนจะมีการติดขัดทางโครงสร้างกายภาพของรูพรุน (ตัวกลางที่เป็นเส้นใยที่มีรูพรุน) ดังนั้นการศึกษพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณจึงมีการใช้แบบจำลองการไหลแบบปั่นป่วนเรียกว่า k-epsilon turbulent model ($k - \epsilon$) ภายใต้สมมติฐานดังต่อไปนี้

- 1) การไหลเวียนของอากาศภายในอาคารเป็นไปตามสมมติฐานของ Boussinesq
- 2) กำหนดค่าความร้อนจำเพาะคงที่ ณ ความดันคงที่

3) การนำความร้อนและความหนืดคงที่

4) ลมที่ส่งเป็นไอโซโทรปิกและอัดตัวตามสมการความต่อเนื่องและสมการโมเมนตัม และ

5) ระบบมีการถ่ายเทความร้อน อธิบายสมการควบคุมการไหลของอากาศและการกระจายตัวของอากาศในระบบท่อส่งลมและกระจายลมแบบรูพรุน ด้วยสมการความต่อเนื่อง สมการโมเมนตัมในแนวแกน X, Y, Z และสมการพลังงาน แสดงดังสมการ (1) - (5) ตามลำดับ [14]

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} \\ &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{(\mu + \mu_t) \frac{\partial u}{\partial x}}{\frac{\partial(\mu + \mu_t)}{\partial(\varphi x)}} \right) + \\ & \quad \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{(\mu + \mu_t) \frac{\partial u}{\partial y}}{\frac{\partial(\mu + \mu_t)}{\partial(\varphi y)}} \right) \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{(\mu + \mu_t) \frac{\partial u}{\partial z}}{\frac{\partial(\mu + \mu_t)}{\partial(\varphi z)}} \right) \\ & - \left(\frac{\mu}{\alpha} + \frac{\rho F |u|}{\alpha^2} \right) u; \quad 0 < \varphi \leq 1 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho v)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} \\ &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{(\mu + \mu_t) \frac{\partial v}{\partial x}}{\frac{\partial(\mu + \mu_t)}{\partial(\varphi x)}} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{(\mu + \mu_t) \frac{\partial v}{\partial y}}{\frac{\partial(\mu + \mu_t)}{\partial(\varphi y)}} \right) \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{(\mu + \mu_t) \frac{\partial v}{\partial z}}{\frac{\partial(\mu + \mu_t)}{\partial(\varphi z)}} \right) \\ & - \left(\frac{\mu}{\alpha} + \frac{\rho F |v|}{\alpha^2} \right) v; \quad 0 < \varphi \leq 1 \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} & \frac{\partial(\rho w)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho ww)}{\partial z} \\ &= -\frac{\partial p}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{(\mu + \mu_t) \frac{\partial w}{\partial x}}{\frac{\partial(\mu + \mu_t)}{\partial(\varphi x)}} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{(\mu + \mu_t) \frac{\partial w}{\partial y}}{\frac{\partial(\mu + \mu_t)}{\partial(\varphi y)}} \right) \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{(\mu + \mu_t) \frac{\partial w}{\partial z}}{\frac{\partial(\mu + \mu_t)}{\partial(\varphi z)}} \right) \\ & - \left(\frac{\mu}{\alpha} + \frac{\rho F |w|}{\alpha^2} \right) w; \quad 0 < \varphi \leq 1 \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} & \rho \left[\frac{\partial T}{\partial t} + \frac{\partial(uT)}{\partial x} + \frac{\partial(vT)}{\partial y} + \frac{\partial(wT)}{\partial z} \right] \\ &= \frac{\partial}{\partial x} \left\{ \frac{[(1-\varphi)\lambda_{fiber} + \varphi\lambda_{air}]T}{\partial(C_p x)} \right\} + \\ & \quad \frac{\partial}{\partial y} \left\{ \frac{[(1-\varphi)\lambda_{fiber} + \varphi\lambda_{air}]T}{\partial(C_p y)} \right\} + \\ & \quad \frac{\partial}{\partial z} \left\{ \frac{[(1-\varphi)\lambda_{fiber} + \varphi\lambda_{air}]T}{\partial(C_p z)} \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศ หน่วย กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m^3), u , v และ w คือ ความเร็ว

ในทิศทาง X-, Y-, Z- ตามลำดับ หน่วยเมตรต่อวินาที (m/s), μ คือ ค่าความหนืดของการไหลของอากาศ หน่วยนิวตัน-วินาทีต่อตารางเมตร (N·s/m²), α คือ ค่าการซึมผ่านของเส้นใย หน่วยกรัม/ตารางเมตร (g/m²), λ_{fiber} , λ_{air} คือ ค่าการนำความร้อนของอากาศและเส้นใย ตามลำดับ หน่วยวัตต์ต่อเมตร-เคลวิน (W/m·K),

พิจารณา $0 < \varphi \leq 1$ หมายความว่าอากาศสามารถผ่านทะลุส่วนของความพรุนของเส้นใย และ $\varphi = 1$ หมายความว่าอากาศจะไหลภายในโพรงและช่วงด้านนอกของด้านในระบบท่อลม งานวิจัยนี้ได้กำหนดค่าคงที่ตามแบบจำลอง k-epsilon turbulent model ($k - \epsilon$) ที่สอดคล้องกับฟังก์ชันโปรแกรมสำเร็จรูป ANSYS Fluent ดังนี้ $C_{mu} = 0.09$, C_1 -Epsilon = 1.44, C_2 -Epsilon = 1.92, TKE Prandtl Num = 1, TDR Prandtl Num = 1.3, Energy Prandtl Num = 0.85, Wall Prandtl Num = 0.85 และกำหนดให้ท่อลมผ้าทอโพลีเอสเตอร์เคลือบพีวีซีอะคริลิกมีความหนาแน่น 1,340 kg/m³, ค่าความจุความร้อนจำเพาะ 1,450 J/kg·K, ค่าการนำความร้อน 0.28 W/m·K, ค่าความหนืด 1.72×10^{-5} kg/m·s

2.1.2 การกำหนดโครงสร้างตาข่าย (Meshing)

เพื่อให้อากาศที่อยู่ในแบบจำลองของท่อลมแลกชั้นกับอากาศบริเวณอื่น งานวิจัยนี้จึงแบ่งสร้างโครงสร้างตาข่ายเป็นกลุ่ม ประกอบด้วย อากาศในอาคาร (Air room), อากาศในท่อ (Air in duct), ผิวท่อพรุน (Duct porous) และกลุ่มผนัง (Face) ประกอบไปด้วย ผนังท่อภายในติดกับอากาศในท่อ (Duct side in air), ผนังท่อพรุนภายนอกติดกับอากาศในอาคาร (Porous duct side room), ช่วงท้ายของท่อลม (End sym duct), อากาศภายในท่อติดกับผนังท่อด้านใน (Air side duct in), อากาศในอาคารติดกับผนังท่อพรุนด้านนอก (Room side porous out), อากาศในอาคารติดกับช่วงท้ายของท่อลม (Room side end sym), ขาเข้า (Inlet), ขาออก (Outlet), ผนังท่อ (Duct), ผนังอาคาร (Front wall, Back wall), พื้นอาคาร (Floor), ช่องระบายอากาศ (Vent), หลังคา

อาคาร (Roof), ประตู (Door), ผู้คน (Human), ผนังจอ (Screen wall), จอ (Screen) โดยกำหนดแบบจำลอง 1) Model A จำนวน Elements 58,628,957 จำนวน Node 11,116,779 2) Model B จำนวน Elements 23,575,585 จำนวน Node 10,403,056 และ 3) Model C จำนวน Elements 31,603,621 จำนวน Node 11,639,851 สำหรับท่อลมได้ควบคุมค่าขอบเขตของอากาศ (Cell zone conditions) และแบ่งโครงสร้างตาข่ายออกเป็น 3 กลุ่มคือ 1) อากาศในอาคาร (Air room), 2) อากาศในท่อ (Air in duct), 3) ผิวท่อพรุน (Duct porous)

2.1.3 คุณสมบัติของลมและการซึมผ่านของท่อลม

การกำหนดความพรุนของท่อลม ค่า Porosity = 0.64 เป็นค่าอ้างอิงจาก [6], กำหนดรูปแบบเป็น Thermal Model Equilibrium และให้ลมที่ไหลผ่านรูพรุนมี Relative Viscosity และ Brinkman model อธิบายผลของตัวกลางที่มีรูพรุนต่อการแพร่กระจาย ดังสมการ (6) และสมการ (7) สำหรับการไหลแบบหนืดประสิทธิภาพความหนืดแทน (μ_e)

$$\mu_e = \mu_r \mu \quad (6)$$

$$\mu_r = (1 - \gamma)^{-2.5} \quad (7)$$

เมื่อ μ_e คือ ความหนืดของของไหล หน่วยนิวตัน-วินาทีต่อตารางเมตร (N·s/m²), μ_r คือ ความหนืดสัมพัทธ์ หน่วยนิวตัน-วินาทีต่อตารางเมตร (N·s/m²)

เพื่อให้สามารถวิเคราะห์การไหลบริเวณทางออกรูพรุนของลมมายังพื้นที่ปรับอากาศจึงต้องใช้วิธี Mesh Interfaces เพื่อเชื่อมจุดต่อของลมในงานวิจัยให้เกิดผลงานวิจัยนี้กำหนดให้ Gravitational Acceleration แกน X = 0, Y = -9.81, Z = 0 กำหนดให้ Operating Temperature และ Operating Density เท่ากับ 300 เคลวิน (K) และ 1.225 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (kg/m³) ตามลำดับ โดยค่าขอบเขตของแบบจำลอง (Boundary conditions) แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ที่ใช้ในโปรแกรม ANSYSFluent

Zone (Boundary Conditions)	Type	Parameters	Value*
Inlet	Inlet 1-8	Mass Flow Rate	12.90 kg/s
		Turbulent Intensity	10%
		Hydraulic Diameter	1.19 m
		Temperature	290 K
Outlet	Front Door	Gauge Pressure	0 Pa
		Backflow Turbulent Intensity	5%
		Backflow Turbulent Length Scale	7.01 m
		Thermal	300 K
	Outletx4	Gauge Pressure	0 Pa
		Backflow Turbulent Intensity	5%
		Backflow Turbulent Length Scale	2.5 m
		Thermal	308 K
Wall	Backwall	Roughness Height	0.0008 m
		Thermal (Temperature)	313 K
	Floor	Thermal (Temperature)	308 K
	Frontwall	Roughness Height	0.0008 m
		Thermal (Temperature)	302 K
	Humanx200	Heat Flux	13.85 W/m ²
	Roof	Roughness Height	0.0008 m
		Thermal (Temperature)	313 K
	Screen	Thermal (Temperature)	320 K
	Screen Wall	Thermal (Temperature)	310 K

*หมายเหตุ หน่วยที่แสดงตามตารางเป็นหน่วยที่โปรแกรมบังคับเอาไว้ แต่ผลออกมาสามารถเปลี่ยนการแสดงผลได้ตามต้องการ

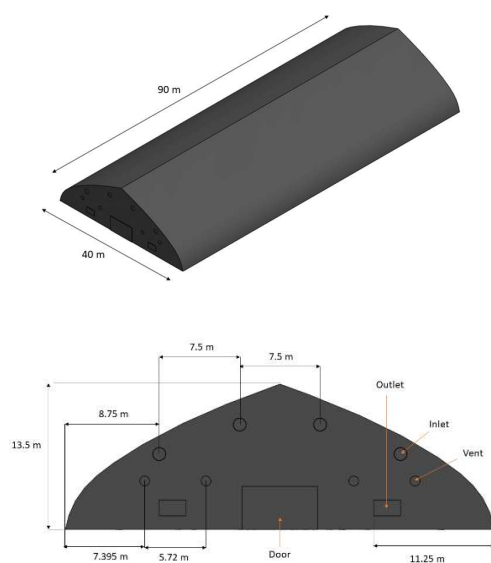
2.2 การสร้างแบบจำลอง

งานวิจัยนี้ศึกษาการกระจายตัวของอากาศจากการส่งกระจายลมด้วยท่อเส้นใยพอลิเอสเตอร์เคลือบพีวีซีอะคริลิก จำลองการไหลรูปแบบพลศาสตร์ (Dynamics of air flow) ด้วยโปรแกรม ANSYS Fluent ทำนายการไหลของอากาศที่เกิดขึ้นจากการส่งและกระจายลม 3 รูปแบบ คือ (a) Model A กระจายลมด้วยรูขนาด 76.20 มิลลิเมตร แบบ 3, 6 และ 9 องศาพิก้า ตลอดความยาว

ท่อ (ไม่มีไหลความร้อน), (b) Model B กระจายลมด้วยรูพูน ตลอดความยาวท่อ (ไม่มีไหลความร้อน) และ (c) Model C กระจายลมด้วยรูพูน ตลอดความยาวท่อ (มีไหลความร้อน) แสดงดัง (รูปที่ 2c) ซึ่งมีพารามิเตอร์การออกแบบท่อลมดังตารางที่ 2 ในอาคารนิทรรศการปรับอากาศขนาดพื้นที่ใช้สอย 3,600 ตารางเมตร ตามแบบจำลอง ดังรูปที่ 1

ตารางที่ 2 พารามิเตอร์ของห้องจำลอง

พารามิเตอร์	ลักษณะขนาด
Duct x 8	Diameter = 1230 mm.
Door x 2	LxH = 7010 mm. x 4000 mm.
Vent x 8	Diameter = 916 mm.
Outlet x 4	LxH = 2500 mm. x 1450 mm.



รูปที่ 1 ลักษณะขนาดของห้องจำลอง

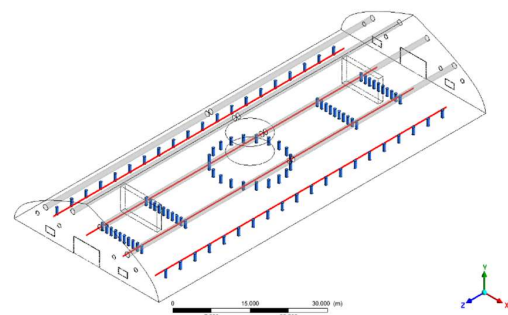
3. ผลการศึกษาและอภิปราย

รูปแบบการวัดความเร็วลมและอุณหภูมิที่นำมาใช้ในการประเมินและเปรียบเทียบของแต่ละแบบจำลอง โดยใช้พิกัดอ้างอิงจากการวัดหน้างานจริง ทั้งหมด 68 จุดพิกัด ดังนี้ (X,Y) ชุดที่ 1 (5,5), (5,10),..., (5,85) ชุดที่ 2 (15,5), (15,10),..., (15,85) ชุดที่ 3 (25,5), (25,10),..., (25,85) ชุดที่ 4 (35,5), (35,10),..., (35,85) แสดงดังรูปที่ 2 (เส้นสีแดง)

3.1 ผลการกระจายตัวของความเร็วลม

ผลการจำลองการกระจายตัวของอากาศบนระนาบสูงจากพื้นอาคาร 1 เมตร ของแบบจำลองทั้ง 3 รูปแบบ แสดงดังรูปที่ 3 และแสดงกราฟเปรียบเทียบความเร็วลม

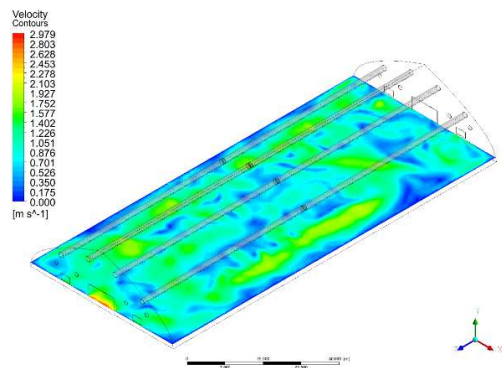
บนระนาบสูงจากพื้นอาคารระยะ 1 เมตร โดยใช้ระบบพิกัดตามการวัดของอาคารจริงทั้งหมด 68 จุดพิกัด (ดังรูปที่ 2) อธิบายว่าอาคารที่กระจายลมด้วยรูขนาด 76.20 มิลลิเมตร แบบ 3, 6 และ 9 องศาพีกา ตลอดความยาวท่อ Model A มีความเร็วลมสูงมากกว่าอาคารแบบอื่นคือมีความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 8 เมตรต่อวินาที ณ ตำแหน่งรูอากาศออกของท่อ เนื่องจาก Model A เป็นการกระจายตัวของอากาศด้วยรูจึงทำให้ความเร็วของอากาศบนระนาบไม่สม่ำเสมอ ส่วนบริเวณขอบผนังอาคารมีความเร็วของอากาศต่ำ เนื่องจากระยะของอากาศที่ส่งจากรูนั้นค่อนข้างไกล



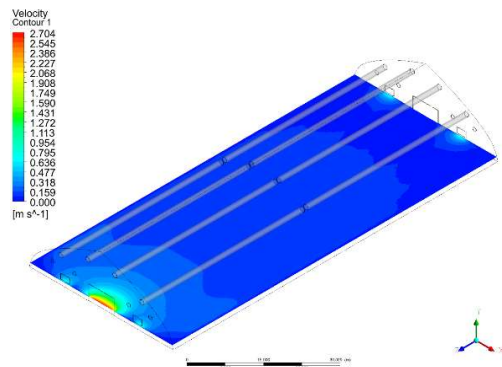
รูปที่ 2 การกำหนดจุดวัดอ้างอิงจากหน้างานจริง

ส่วน Model B และ Model C มีความเร็วของอากาศที่ออกจากรูพบนบนท่อลมมีความเร็วเฉลี่ยเท่ากับ 0.035 เมตรต่อวินาที และมีความเร็วของอากาศบนระนาบที่สม่ำเสมอ เพราะเป็นอาคารที่มีระบบท่อส่งลมด้วยรูพบนทำให้ลมที่ไหลออกจากรูพบนไหลออกมาอย่างสม่ำเสมอและมีอัตราการไหลออกของลมออกไม่มาก อากาศที่มีอุณหภูมิสูงจะมีความกดอากาศต่ำ เนื่องจากอุณหภูมิสูงอากาศขยายตัวทำให้มีความหนาแน่นต่ำ อากาศจะลอยไปข้างบน ส่วนบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำ ความหนาแน่นของอากาศจะมากทำให้เป็นบริเวณที่มีความกดอากาศสูงสำหรับการเปรียบเทียบระหว่างอาคารที่ไม่มีภาระโหลดความร้อน Model C กับอาคารที่ไม่มีภาระโหลดความร้อน Model B อธิบายได้ว่าอาคารไม่มีภาระโหลดความร้อน

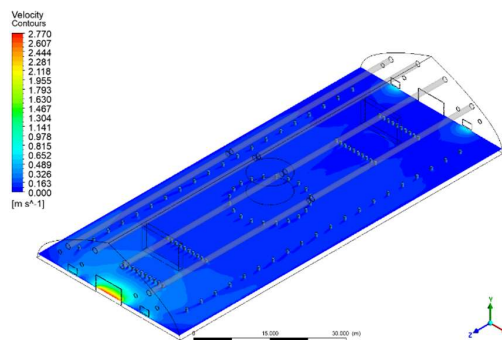
ร้อน Model B มีการไหลของอากาศสม่ำเสมอกว่า เนื่องจากไม่มีอุปกรณ์ใดมาขวางกั้นลมที่ไหลออกจากท่อลม ทำให้ไม่เกิดความปั่นป่วนของอากาศภายในอาคาร



(a) Model A



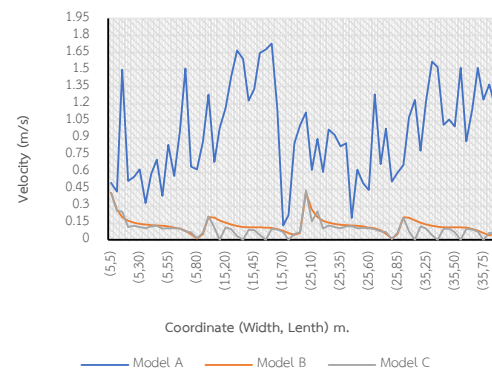
(b) Model B



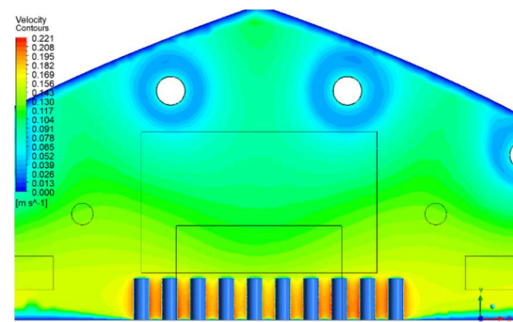
(c) Model C

รูปที่ 3 โครงร่างความเร็วลมที่ความสูง 1 เมตรจากพื้นห้องจำลองที่มีไหลลดความร้อนและไม่มีไหลลดความร้อนมีหน่วยเป็น m/s

การวิเคราะห์สภาวะความสบายความเร็วของอากาศที่สัมผัสกับผู้ดำเนินกิจกรรมในอาคาร อธิบายได้ว่า ทุกบริเวณที่ความสูง 1 เมตรจากพื้นของทั้ง 3 แบบจำลองอาคาร Model B และ Model C มีความเร็วลมอยู่ในช่วง 0.20 - 1.00 เมตรต่อวินาที ซึ่งอยู่ในขอบเขตสภาวะความสบายตามมาตรฐาน ASHRAE ดังรูปที่ 4 และรูปที่ 5



รูปที่ 4 กราฟเปรียบเทียบความเร็วลมของห้องจำลองทั้ง 3 แบบ ที่ความสูง 1 เมตรจากพื้นห้อง



รูปที่ 5 โครงร่างความเร็วลมหน้าตัด X-Y บริเวณผู้อาศัยในอาคาร ณ ตำแหน่งใกล้ทางออกของอาคาร

4.2 ผลการกระจายตัวของอุณหภูมิ

การกระจายตัวของอุณหภูมิในอาคารนิทรรศการปรับอากาศ ต้องพิจารณาภาระไหลลดความร้อนในตอนกลางวันจากหลังคา เนื่องจากอาคารมีกำแพงที่ทำจากผ้าโพลีเอสเตอร์เคลือบพีวีซีอะคริลิก โดยที่กำหนดความร้อนที่ถ่ายเทเข้าตัวอาคาร ที่ 40 องศาเซลเซียส และความร้อน

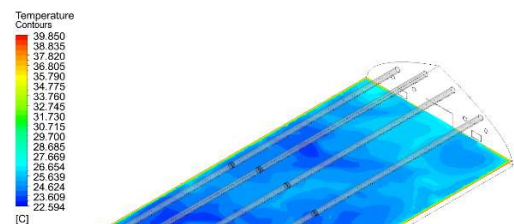
จากพื้นอาคารที่ 30 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิของ
จ่อโทรทัศน์ ที่ 47 องศาเซลเซียส

ผลการจำลองแสดงระนาบการกระจายอุณหภูมิที่สูง
จากพื้นอาคาร 1 เมตร ของแบบจำลองทั้ง 3 รูปแบบ ดัง
รูปที่ 6 และรูปที่ 7 - 8 แสดงกราฟเปรียบเทียบอุณหภูมิ
บนระนาบสูงจากพื้นอาคาร 1 เมตร โดยใช้ระบบพิกัดตาม
การวัดของอาคารจริงทั้งหมด 68 จุด โดยค่าอุณหภูมิ
สูงสุดของอาคาร Model A เท่ากับ 39.85 องศาเซลเซียส
เกิดที่ขอบผนังของอาคาร เนื่องจากการกระจายตัว
ของอากาศด้วยรูจึงทำให้อุณหภูมิของอากาศบนระนาบไม่
สม่ำเสมอ

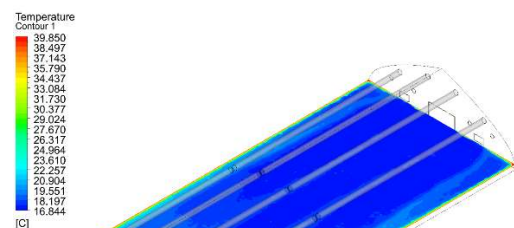
ส่วนอาคาร Model B และ Model C มีอุณหภูมิของ
อากาศบนระนาบที่สม่ำเสมอ เพราะเป็นอาคารที่มีระบบ
ท่อส่งลมด้วยรูพูน เนื่องจากระบบส่งลมแบบนี้จะส่งลม
ออกมาแบบสม่ำเสมอและมีอัตราการไหลต่ำ ทำให้ลมเย็น
ที่ออกจากท่อลมค่อยๆดูดกลืนความร้อนสัมผัสจากอากาศ
ภายในอาคาร สำหรับการวิเคราะห์สภาวะความสบาย
พิจารณาได้ว่าอุณหภูมิของอากาศที่สัมผัสกับผู้ดำเนิน
กิจกรรมในอาคาร Model C สูงสุดเท่ากับ 26.75 องศา
เซลเซียสและอยู่ในช่วงความสบาย ส่วน Model A
อุณหภูมิของอากาศที่ปะทะผู้อาศัยในอาคาร Model A
สูงสุดเท่ากับ 24.35 องศาเซลเซียส และอยู่ในช่วงความ
สบาย ซึ่งอยู่ในขอบเขตสภาวะความสบายตามมาตรฐาน
ASHRAE โดยอุณหภูมิของอาคารที่กระจายลมด้วยรูพูน
ตลอดความยาวท่อ (มีไหลความร้อน) Model C ไม่
สม่ำเสมอเนื่องจากในอาคารนี้มีไหลความร้อน จอภาพ
และผู้ดำเนินกิจกรรมในอาคารนี้รศการนอกจากนั้นมี
บางพิกัดไม่สามารถวัดค่าได้ เพราะพิกัดนั้นมีไหลความร้อนผ่าน

การนำท่อเส้นใยผ้าโพลีเอสเตอร์เคลือบพีวีซีอะคริลิก
แบบ Model B กระจายลมด้วยรูพูนตลอดความยาวท่อ
ทำให้การกระจายลมด้วยความเร็วต่ำและอุณหภูมิในแนวตั้ง
ที่แตกต่างกันเล็กน้อยซึ่งส่งผลให้สภาวะความสบาย
เป็นไปตามมาตรฐาน ASHRAE Standard 55-2023
สอดคล้องกับการศึกษาของ [13] ที่กล่าวว่า ความพูนมี

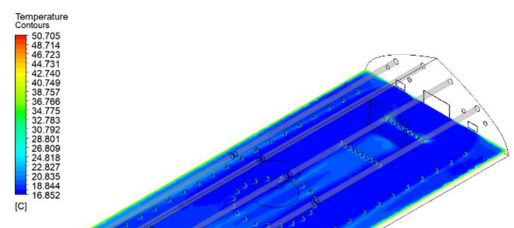
ผลต่อเส้นใยมีผลอย่างมากต่อค่าเฉลี่ยของความเร็วของ
อากาศ รวมถึงการกระจายตัวตามทิศทางความยาวของ
เส้นผ่านศูนย์กลาง



(a) Model A

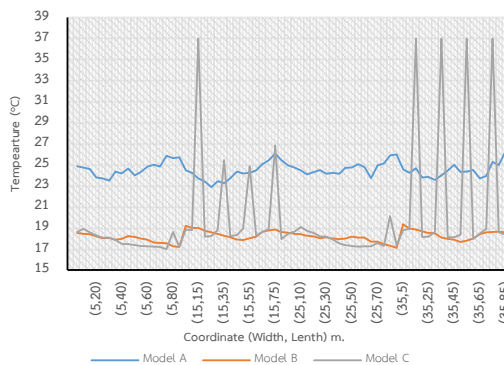


(b) Model B

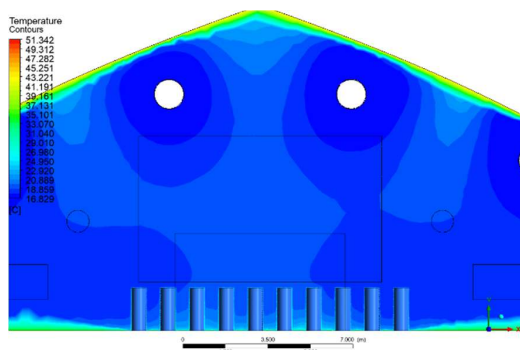


(c) Model C

รูปที่ 6 โครงร่างอุณหภูมิที่ความสูง 1 เมตรจากพื้นห้อง
จำลองที่มีไหลความร้อนและไม่มีไหลความร้อนมีหน่วย
เป็น °C



รูปที่ 7 กราฟเปรียบเทียบเปรียบเทียบของห้องจำลองทั้ง 3 แบบ ที่ความสูง 1 เมตรจากพื้นห้อง



รูปที่ 8 โครงร่างอุณหภูมิหน้าตัด X-Y บริเวณผู้อาศัยในอาคาร ณ ตำแหน่งใกล้ทางออกของอาคาร

สำหรับการกระจายลมด้วยรูขนาดเล็ก แบบ Model A การไหลของอากาศจะถูกกระจายออกผ่านด้วยรูขนาดเล็กด้วยความเร็วที่สูงขึ้น และความยาวของท่อเส้นใยผ้าโพลีเอสเตอร์เคลือบพีวีซีอะคริลิกมีผลกระทบต่อความเร็วและอุณหภูมิของลมอย่างมีนัยสำคัญ ต้องควรที่จะคำนวณความยาวของท่อเส้นใยผ้าโพลีเอสเตอร์เคลือบพีวีซีอะคริลิกเพื่อให้การกระจายลมและอุณหภูมิเป็นไปอย่างที่เหมาะสม จึงสอดคล้องกับการศึกษาของ [15]

4. สรุป

การส่งและการกระจายตัวของลมในอาคารนิทรรศการปรับอากาศด้วยท่อลมผ้าโพลีเอสเตอร์เคลือบพีวีซีอะคริลิกด้วยรูขนาดเล็ก(Model A) ทำให้ลมไหลออกจาก

รูและกระจายไปยังพื้นที่ปรับอากาศด้วยความเร็วสูงและไม่สม่ำเสมอและมีอุณหภูมิสูง ส่วนการส่งและการกระจายลมด้วยท่อลมรูปท่อน ตลอดความยาวท่อ (Model B & Model C) ที่ทำให้ลมไหลออกจากรูท่อนมีความเร็วต่ำสม่ำเสมอ เนื่องจากลมจะค่อยๆ ซึมออกจากท่อลม และเมื่อพิจารณาภาวะความสบาย (Comfort zone) ของผู้ดำเนินการกิจกรรมในอาคาร วิเคราะห์ได้ว่าความเร็วลมและอุณหภูมิที่ปะทะผู้ดำเนินการกิจกรรมในอาคารนิทรรศการอยู่ในช่วงที่ ASHRAE standard 55-2023 แนะนำไว้คือ 0.20 - 1.00 เมตรต่อวินาที และ 24 - 27 องศาเซลเซียสตามลำดับ ดังนั้นผู้วิจัยจึงแนะนำให้ใช้ท่อลมผ้าโพลีเอสเตอร์เคลือบพีวีซีอะคริลิกท่อลมรูปท่อนตลอดความยาวท่อสำหรับการส่งและการกระจายลมเย็นในอาคารนิทรรศการขนาดใหญ่ ตามรูปแบบที่ 3 (Model C) แสดงให้เห็นว่าสามารถส่งกระจายลม และรักษาอุณหภูมิได้ดีเมื่อเทียบกับรูปแบบอื่นที่กล่าวมา

5. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสนมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] J.C. Solano, E. Caamaño-Martin, L. Olivieri, and D. Almeida-Galárraga, "HVAC systems and thermal comfort in buildings climate control: An experimental case study," *Energy Reports*, vol. 7, pp. 269-277, 2021
- [2] S. Saran, M. Gurjar, A. Baronia, V. Sivapurapu, P. S. Ghosh, G. M. Raju, and I. Maurya, "Heating, ventilation and air conditioning (HVAC) in intensive care unit," *Crit. Care*, vol. 24, no. 1, pp. 1-11, 2020.
- [3] C. Anuntasethakul and D. Banjerdpongchai, "Design of supervisory model predictive control for building HVAC system with

- consideration of peak-load shaving and thermal comfort," *IEEE Access*, vol. 9, pp. 41066–41081, 2021.
- [4] I. Tajuddeen and S. M. Sajjadian, "Benchmarking indoor headroom heights of residential buildings based on ASHRAE Standard 55," *Intell. Build. Int.*, vol. 15, no. 3, pp. 109–130, 2023.
- [5] M. Hekal, W. M. El-Maghlany, Y. A. Eldrainy, and M. El-Adawy, "Hydro-thermal performance of fabric air duct (FAD): Experimental and CFD simulation assessments," *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 47, p. 103107, 2023.
- [6] K. Khaothong, J. Priyadumkol, W. Chaiworapuek, and T. Kaisinburasak, "Optimization of High Frequency Welding Parameters of PVC Coating on Polyester Fabric," *Trends Sci.*, vol. 19, no. 8, 2022.
- [7] F. Chen, H. Chen, J. Xie, Z. Shu, and J. Mao, "Air distribution in room ventilated by fabric air dispersion system," *Build. Environ.*, vol. 46, no. 11, pp. 2121–2129, 2011.
- [8] F. Chen, H. Chen, H. Wang, S. Wang, J. Wang, X. Wang, and Z. Qian, "Parametrical analysis on characteristics of airflow generated by fabric air dispersion system in penetration mode," *Energy Build.*, vol. 67, pp. 365–373, 2013.
- [9] J. Priyadumkol, K. Khaothong, and W. Chaiworapuek, "Experimental investigation of modified Savonius wind turbines," *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.*, vol. 501, no. 1, p. 012054, Mar. 2019.
- [10] A. Patel and P. S. Dhakar, "CFD Analysis of Air Conditioning in Room Using Ansys Fluent," *J. Emerg. Technol. Innov. Res. (JETIR)*, vol. 5, no. 11, 2018.
- [11] F. M. Yusop and S. Ramli, "Air flow distribution analysis by using CFD simulation," *Prog. Eng. Appl. Technol.*, vol. 1, no. 1, pp. 30–38, 2020.
- [12] L. Angeles-Rodríguez and C. Celis, "Numerical study and optimization of air-conditioning systems grilles used in indoor environments," *Int. J. Energy Environ. Eng.*, vol. 12, pp. 787–804, 2021.
- [13] N. Dutt, A. Binjola, A. J. Hedau, A. Kumar, V. P. Singh, and C. S. Meena, "Comparison of CFD results of smooth air duct with experimental and available equations in literature," *Int. J. Energy Resour. Appl. (IJERA)*, vol. 1, no. 1, pp. 40–47, 2022.
- [14] H. B. De Oliveira, "Parabolic turbulence k-epsilon model with applications in fluid flows through permeable media," *Opuscula Mathematica*, vol. 44, no. 2, pp. 197–240, 2024.
- [15] F. Chen, W. Lu, Q. Wu, H. Chen, J. Chen, and N. Zhou, "Simulation of Airflow Characteristics induced by Fabric Air Dispersion System with Orifices Using Direct Description Method," *Procedia Eng.*, vol. 205, pp. 3112–3116, 2017.

Forecasting Noncommunicable Diseases in Thailand: Evaluating the Predictive Power of Social Determinants of Health-Related Features

Peatiphat Bhoothookngoen* Nattapong Sanchan

School of Information Technology and Innovation, Bangkok University
9/1 Moo 5 Phaholyothin Road, Klong Nueng, Klong Luang, Pathumthani 12120

*Corresponding author Email: peatiphat.bhoo@bumail.net

(Received: May 3, 2024; Revised: March 27, 2024 ; Accepted: June 30, 2024)

ABSTRACT

In Thailand, non-communicable diseases (NCDs) presented a significant health and economic challenge. This study investigated machine learning (ML) for predicting NCDs prevalence using social determinants of health (SDHs). Two scenarios, baseline and inference (imputing missing values) were assessed. Monthly household expenditure and hospital counts appeared as pivotal features in the inference scenario. Model performance remained comparable between scenarios, with slight variations for specific NCDs. Random Forest (RF) showed slightly superior predictive power (RMSE: 1.53 – 74.93, R Square: -0.11 – 0.11), though interpretability remains a challenge. Addressing data limitations and enhancing interpretability are crucial for fully harnessing ML's potential in NCDs prediction and prevention. The study's findings underscore the importance of integrating ML and SDHs into public health policy to effectively combat NCDs in Thailand, potentially saving lives and fostering sustainable socio-economic development. The study revealed the intricate interplay between socio-economic factors and NCDs prevalence, emphasizing the need for targeted interventions. The exploration of machine learning algorithms in predicting NCDs prevalence provided valuable insights into model performance and highlighted the significance of features such as household expenditure and hospital counts. Moving forward, efforts to address data disparities and enhance model interpretability are essential to maximize the utility of predictive modeling in informing public health policies aimed at mitigating the impact of NCDs in Thailand.

Keyword: Noncommunicable diseases, predictive power, social determinants of health, machine learning, prevalence.

1. Introduction

In a report by the Ministry of Public Health of Thailand [MOPH], World Health Organization [WHO], United Nations Development Programme

[UNDP], and United Nations Inter-Agency Task Force [UNIATF] (2021) [1], noncommunicable diseases (NCDs) exert a significant impact on Thailand, driven by factors such as cancers (CA),

cardiovascular diseases (CVD), diabetes (DM), and hypertension (HTN), collectively responsible for 74% of all deaths in the country, resulting in an annual toll of 400,000 lives. The economic consequences are substantial, with NCDs costing the Thai economy THB 1.6 trillion yearly, equivalent to 9.7% of its 2019 gross domestic product (GDP). This financial burden encloses THB 139 billion for NCDs treatment and THB 1.5 trillion in lost productive capacity due to absenteeism, "presenteeism," or early withdrawal from the labor force. NCDs not only adversely affect socioeconomic development but also challenge the long-term fiscal sustainability of the government and public services. Strategic investments in key clinical interventions for prevalent NCDs and policy measures targeting risk factors can both save lives and yield economic benefits. Allocating THB 211 billion to such interventions holds the potential to save 310,000 lives and generate THB 430 billion in economic benefits.

Social determinants of health (SDHs) played a pivotal role in both the prevalence and impact of NCDs, manifesting in diverse ways. NCDs exhibited a higher prevalence in low-income regions where poverty, recognized as a SDHs, significantly contributed to elevated incidence and mortality rates, as demonstrated by Rasesemola, Mmusi-Phetoe, and Havenga (2023) [2]. Their study also highlighted that the concentration of risk factors and poor health outcomes was notably more pronounced in economically disadvantaged communities compared to affluent ones. NCDs often coexisted

with high levels of infectious diseases, particularly in impoverished communities. Interventions that focused solely on individual factors while neglecting the structural and commercial determinants of health exhibited limited effectiveness. Noteworthy, both individual and national poverty levels contributed to disparities in life expectancy, quality of life, and morbidity, as highlighted by Manderson and Jewett (2023) [3].

Enhancing the performance of predictive models can be achieved by incorporating SDHs features in certain vulnerable subgroups. However, the utility of incorporating Social Determinants of Outcomes (SDOs) features was contingent upon the specific characteristics of the cohort and the nature of the prediction task, as elucidated by Yang, Kwak, Pollard, Celi, & Ghassemi (2023) [4].

Effectively addressing the formidable challenge of NCDs in Thailand requires a comprehensive approach that recognizes the intricate interplay between SDHs and NCDs prevalence. The urgency of strategic interventions underscored by the profound impact of NCDs on both mortality rates and the economic landscape. Machine learning emerges as a transformative technology capable of predicting and understanding NCDs prevalence based on population-wide socio-economic factors, encompassed by SDHs. Integrating machine learning into policymaking provides invaluable insights into the determinants influencing NCDs, facilitating the formulation of targeted and effective public health policies. The adoption of

machine learning becomes a meaningful tool in the hands of policymakers, driving informed decision-making, enhancing preventive measures, and contributing to the well-being of the population. In the mission of a healthier future for Thailand, the synergy between machine learning and public health policy holds the promise of saving lives and fostering sustainable socio-economic development. This study aimed to test on the predictive power of machine learning algorithms in Thai population datasets utilizing the SDHs as the features.

2. Material and Method

Bhoothookngoen and Sanchan's (2023) [5] reviewed identifies existing gaps in NCDs prevalence prediction, specifically in the focus of prediction and the utilization of SDHs as features in models. Noteworthy, Hu, Qiu, Su, Shen, & Chen's (2020) [6] study was highlighted for its incorporation of some sets of features considered as SDHs for NCDs prediction not the prevalence.

2.1 Data Collection

In this experiment, the models from Hu, Qiu, Su, Shen, and Chen's (2020) [6] study were operationalised, substituted features with SDHs datasets in Thailand (population-based dataset) to predict NCDs prevalence in Thailand. The data were retrieved between September and December 2022 from internet access via various primary sources: the Open Data web portal by MOPH [7] for NCDs prevalence between 2023 and 2021, the Pollution Control Department [8] for fine particulate matter 2.5 (PM2.5), NSO's website [9] for all SDHs except

for number of hospitals and MOPH's website [10] for number of hospitals.

The MOPH's Open Data web portal [7] emerged as a foundational repository, encapsulating deidentified datasets illuminating various health-related aspects of Thai population. This included information on health service access, healthcare providers, health status by some diseases (including NCDs), etiology of illnesses, Tuberculosis related activities, and diseases from occupational or environmental exposure. This repository served as the primary source of information for the number of NCDs patients for at least a decade preceding 2021.

In a report by MOPH et al., (2021) [1], prevalence rates of discrete NCDs, including CVD, CA (Cervical Cancer, Lung Cancer, and Breast Cancer), DM, and HTN were extracted from 2013 to 2021 because these four NCDs are the top of highest cost of illness (CA, DM, and CVD) and prevalence (HTN). Concurrently, hospital registries were cross-referenced with patient, describing correlations between NCDs incidence and healthcare facilities. The features as detailed in Table 1, painted a portrait of socio-economic and health-related dynamics across Thai provinces from 2013 to 2021. This encompassed key indicators including average household income, shedding light on economic variations. Environmental health angles were explored through the levels of Particulate Matter 2.5 (PM2.5), offering insights into air quality trends. Social behaviors were captured with data on smoking prevalence and the prevalence of alcohol consumption.

TABLE I
Social Determinants of Health Data (2013–2021)

Feature	SDHs Domain ^λ	Year
Average monthly household income by province.	Economic stability	2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021.
Average Particulate Matter 2.5 (PM2.5) by province.	Neighborhoods and built environment	2013 – 2021.
The numbers of smokers or used to smoking by a whole country.	Social and community context, Neighborhoods and built environment	2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021.
The number of alcoholic consumers by a whole country.	Social and community context, Neighborhoods and built environment	2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021.
The number of educational institutions by Bangkok and upcountry group.	Education access and quality	2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021
The educational year attained by a whole country	Education access and quality	2013 – 2021
Average monthly household expenditure by province.	Economic stability	2013 – 2021
Average annual household loan by province	Economic stability	2013, 2014, 2015, 2016, 2017, 2018, 2019, 2020, 2021
Hospital counts by province by matching hospital code	Healthcare access and quality	2013 – 2021

^λSocial Determinants of Health - Healthy People 2030 (2022).

Underline Imputation by mean for the missing years.

The educational landscape was subjected to analysis through the educational institution counts,

the educational year attained, and regional disparities between Bangkok and upcountry locales. Economic dimensions were further illuminated through examining average household expenditures per month and annual loan disbursements. The healthcare infrastructure received with detailing the hospital counts in each province. These datasets provided an understanding of societal trends, serving as a valuable resource for policymakers and researchers aiming to navigate the regional development and well-being.

The model framework, inspired by Hu et al. (2020) [6] study, embraced a diverse set of models—Linear Regression (LR) and Support Vector Regression (SVR), Random Forest (RF), Gradient Boosted Decision Trees (GBDT), and XGBoost. Additionally, embracing ensemble learning with the introduction of a Stacking Model (utilising Random Forest). To ensure a thorough evaluation, a 5-fold cross-validation approach was implemented, iteratively involved partitioning datasets into training and testing sets to enhance a robust assessment of model generalization. The Sequential Floating Forward Selection (SFFS), facilitated by the 'mlxtend' library, was employed during each fold of the cross-validation. This dynamic feature selection process, aimed to identify an optimal subset of features for model training.

Addressing missing values in model training, a mean-based imputation strategy using scikit-learn's 'SimpleImputer' was employed. This approach ensures a robust and consistent treatment of missing data, specifically tailored for the inference scenario. An alternative scenario was contemplated by creating datasets wherein instances with missing

values were omitted, thereby presenting an alternative scenario for further examination.

2.2 Model Implementation and Evaluation Framework

The model framework, inspired by Hu et al. (2020) [6] study, embraced a diverse set of models—Linear Regression (LR), Support Vector Regression (SVR), Random Forest (RF), Gradient Boosted Decision Trees (GBDT), and XGBoost. Additionally, ensemble learning was introduced with a Stacking Model (utilizing Random Forest). Figure 1 illustrated the complete workflow of the model implementation and evaluation framework.

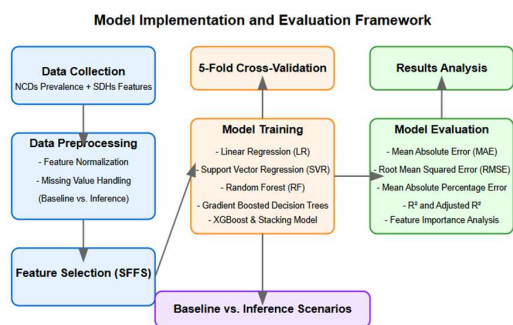


Figure 1 Workflow and Model Framework

2.2.1 Feature Relationship with NCDs

The SDHs features in our model had significant relationships with NCDs prevalence as followed.

Economic Stability Features (household income, expenditure, loans): Lower economic status often correlated with higher NCDs risk due to limited access to quality healthcare, healthier food options, and preventive services. Financial stress could also lead to unhealthy coping behaviors.

Environmental Features (PM2.5): Air pollution had been directly linked to increased risk of

respiratory diseases, cardiovascular problems, and certain cancers.

Social Behavior Features (smoking, alcohol consumption): These were well-established risk factors for multiple NCDs including cancers, cardiovascular diseases, and liver disease.

Education Features (educational institutions, years attained): Higher education levels typically correlated with better health literacy, preventive health behaviors, and lower NCDs risk.

Healthcare Access Features (hospital counts): The availability of healthcare facilities directly impacted disease management, early detection, and treatment outcomes for NCDs.

To ensure a thorough evaluation, a 5-fold cross-validation approach was implemented, which iteratively involved partitioning datasets into training and testing sets to enhance a robust assessment of model generalization. The Sequential Floating Forward Selection (SFFS), facilitated by the 'mlxtend' library, was employed during each fold of the cross-validation. This dynamic feature selection process aimed to identify an optimal subset of features for model training.

Addressing missing values in model training, a mean-based imputation strategy using scikit-learn's 'SimpleImputer' was employed. This approach ensured a robust and consistent treatment of missing data, specifically tailored for the inference scenario. An alternative scenario was contemplated by creating datasets wherein instances with missing values were omitted, thereby presenting a baseline scenario for further examination.

3. Result and Discussion

In this experiment, various machine learning models were utilized in two distinct scenarios. The baseline scenario, characterized by comparatively lower prognostications across NCDs, suggested a potential exclusion of instances with missing values. In contrast, the Inference scenario involves imputation of absent data points by their mean, aiming to elaborate the elevation of model predictions. Analysis of individual features using feature importance

scores in GBDT, RF, and XGBoost revealed fluctuations in significance between scenarios, with monthly household expenditure and hospital counts emerging as crucial factors in the Inference scenario overall (Figure 2), followed by PM2.5, educational years attained, and others, respectively. Models like SVR, LR, and Stacking were excluded due to limitations in feature importance calculation.

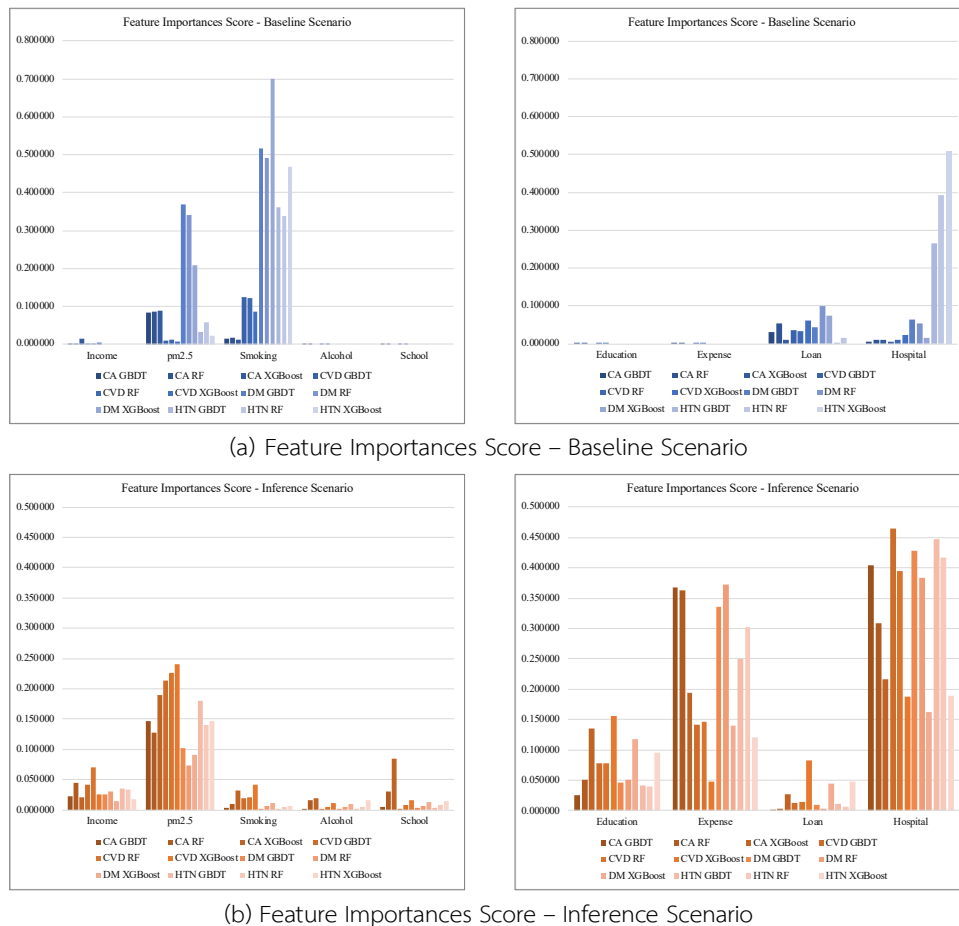


Figure 2 Feature Importance Score

Comparing two prediction scenarios based on model evaluation metrics (MAE, RMSE, MAPE) revealed that the Baseline scenario, where missing values were dropped, consistently outperformed the Inference scenario, where missing values were imputed. This suggested stronger predictive performance for Baseline, particularly for CA and HTN models. Conversely, in the cases of CVD and DM, improvements in metrics after imputation were somewhat higher. Across all NCDs datasets and scenarios as depicted in Figure 3, the performance of GBDT, LR, RF, Stacking, and XGBoost models remain consistently comparable as measured by MAE, RMSE, MAPE, R-squared, and adjusted R-squared between both scenarios. Some detectable deviations, specifically, compared to the baseline, MAPE for CA and HTN increased by approximately 20 points. Conversely, for DM, MAPE decreased by around 20 points in the Inference scenario, while CVD exhibits minimal change relative to other datasets. These findings warranted further investigation into the potential factors influencing model performance discrepancies across NCDs and scenarios.

A comparative analysis between the baseline and Inference scenarios unveils refined shifts in model performance. In the Inference scenario for all NCDs except CVD, there was a minor signal of superior performance, indicated by lower MAE values. However, the superiority is premature to conclude. Contextualized exploration within specific scenarios reveals that RF, despite achieving the lowest MAE (0.58 points) for CVD in the Inference scenario, is accompanied by

negative R Square (-0.07) and Adjusted R Square (-0.07), questioning its suitability. Conversely, the highest MAE (44.03 points) is observed in the Stacking model for CA in the baseline scenario with 0.04 R Square and 0.03 Adjusted R Square. For RMSE, the highest and lowest are found in the baseline scenario in SVR for CA (76.63 points) and GBDT for CVD (1.44 points), respectively. For MAPE, the highest and lowest are found in the Inference scenario, with 173.62 points in LR for CA and 22.70 points in RF for CVD, respectively. R-square and Adjusted R-square exhibit a similar pattern for the highest and lowest in XGBoost for CA in Inference (both 0.11) and in RF for CVD in the baseline scenario (-0.011 and -0.012, respectively).

Compared to other models, RF demonstrated slightly superior predictive power across diverse datasets referring to NCDs. With supportive results, on the CA dataset, RF exhibited a notably reduced MAPE of 166.88 when contrasted with alternative models during the Inference phase. This discernible trend persisted across additional datasets, such as CVD with a MAPE of 22.70, DM with a MAPE of 123.26, and HTN with a MAPE of 131.58.

The graphical representation in Figure 3 further accentuates the consistent outperformance of RF across a spectrum of scenarios. Another notably model, SVR consistently manifested accuracy in relation to alternative models, with MAPE exhibiting a pronounced variability across scenarios. This variability potentially signals challenges in the interpretability of SVR within specific contextual

settings. Additionally, inference scenario generally leads to better performance, except for CVD

where model performance is relatively weak overall.



Figure 3 Comparative Analysis of Model Evaluation Results in Two Scenarios

This study drawn upon the algorithms and methodology from Hu et al. (2020) [6], advocating for the integration of SDHs into machine learning models for predicting NCDs prevalence through a decade-long dataset from the Ministry of Public Health's Open Data portal [7] and other Thai government bodies as outlined in Table 1. And also building on the findings of Bhoothookngoen and Sanchan [5], which highlighted the efficacy of various machine learning algorithms in NCDs prediction, including supervised techniques such as artificial neural networks (ANNs), SVM, decision trees, and RF, as well as unsupervised methods like K-means clustering and the Maximal Frequent Itemset Algorithm (MAFIA). Despite limited studies effectively incorporating SDH-related data as features, Hu et al. (2020) [6] offered a particularly applicable methodology, utilizing a wide range of data, including SDHs, as features.

This study delved deeper into the nuanced impact of data handling techniques on model performance. The features such as monthly household expenditure and environmental variables emerge as significant predictors when missing data is imputed in inference scenario as outlined in Figure 3. This study also compared the outcomes of a machine learning experiment with the original methodology proposed by Hu et al. (2020) [6]. Employing various machine learning models in two settings, the baseline and the inference scenario, revealed that the RF algorithm outperformed the stacking model as resulted in Hu et al. (2020)'s study [6]. This difference in performance is likely due to differences in the datasets used between the experiment and the

study by Hu et al. (2020) [6]. Factors such as dataset size, quality, and feature composition strongly influence machine learning model performance.

While this experiment has yielded insights but not outperformed as compared to inspired algorithms and methodology from Hu et al. (2020) [6], its full potential remains hindered by several limitations that impeded the comprehensive utilization of the predictive power embedded within the explored features. Addressing these limitations is imperative to maximize the effectiveness of future research endeavors. One significant impediment is inconsistency, which posed a formidable obstacle to the result's integrity. The absence of guaranteed consistency across datasets spanning the entire feature space and anticipated time series introduced the risk of bias. This bias served as a distorting lens, potentially skewing the true relationships between features and predictive result.

Furthermore, granularity emerged as another critical limitation. The analysis of SDHs features, such as smoking prevalence, alcohol consumption, educational attainment, and the number of educational institutions, primarily operated at the national level, offering only a broad, population-wide perspective. This dearth of province-level data inhibited the capture of variations in these features across individual provinces which is on of SDHs category. Consequently, the generalizability of findings weakens, as conclusions derived from national data may not accurately reflect the unique demographic and risk profiles of each province,

potentially leading to incongruences with NCDs prediction.

The full potential of robust predictive modeling lied in overcoming current data limitations. A shift is therefore required, ensuring consistent time series for all features and establishing a reliable foundation for analysis. Incorporating province-level SDHs data is key, enabling a deeper understanding of geographic variations and enhancing the generalizability of findings. And the increasing the granularity of data for SDHs and other key features provided the necessary detail for nuanced analysis and facilitated deeper insights into predictive modeling efforts. This data metamorphosis holds the key for the future research endeavor to reveal the full potential of SDHs as features for the prediction of NCDs prevalence in Thailand landscape.

4. Conclusion

NCDs pose a global threat, demanding innovative solutions through data-driven approaches. This study investigated machine learning models for predicting NCDs occurrence, focusing on algorithmic diversity and data dynamics, comprising cancer, cardiovascular diseases, diabetes, and hypertension, represent a significant menace to Thailand's public health and economic stability. As highlighted in a collaborative report from the Ministry of Public Health, the World Health Organization, and other UN agencies (MOPH et al., 2021), these conditions claim numerous lives and impose substantial economic burdens on the nation.

This study emphasized the pivotal role of SDHs in shaping the prevalence and impact of NCDs. Factors such as poverty, education, environmental quality, and healthcare access exert significant influence over the distribution and severity of NCDs within populations. Addressing NCDs effectively necessitates a profound understanding of these social determinants and their intricate connections with health outcomes.

Machine learning emerged as a potent tool in the battle against NCDs. Through the analysis of vast socio-economic datasets, including SDHs, machine learning algorithms can predict and elucidate patterns of NCDs prevalence, providing policymakers with invaluable insights. This integration of machine learning and public health policy holds promise for saving lives and fostering sustainable development in Thailand. The results of the study shed light on the performance of various machine learning algorithms in predicting NCDs prevalence within the Thai population. Through evaluation and comparison, certain algorithms, such as RF, exhibit promising predictive power across diverse datasets. Particularly, RF demonstrated the reduced MAPE values, suggesting its efficacy in NCDs prediction compared to alternative models with underperformed as compared to the inspired algorithms and methodology from Hu et al. (2020).

Despite promising results from certain machine learning models, limitations such as data disparities and the absence of provincial-level details hinder a comprehensive analysis. Moving

forward, it is imperative to address these limitations by establishing consistent time series data, integrating province-level SDHs, and expanding data collection efforts on environmental factors like air pollution. By doing so, Thailand can develop a more nuanced understanding of NCDs prevalence and its determinants, paving the way for targeted interventions that enhance public health outcomes and promote the well-being of its citizens.

5. Acknowledgement

This work was completed independently and does not necessitate specific acknowledgments.

6. References

- [1] Ministry of Public Health of Thailand, World Health Organization, United Nations Development Programme, and United Nations Inter-Agency Task Force (2023). Prevention and Control of Noncommunicable Diseases in Thailand – The Case for Investment, 2021 [Online]. Available: https://www.who.int/thailand/activities/NCDs_Investment_Case_Report
- [2] R. M. Rasesemola, R. Mmusi-Phetoe and Y. Havenga, "Social determinants of health in non-communicable diseases prevention policies in South Africa," *Curationis*, vol. 46, no. 1, a2387, 2023.
- [3] L. Manderson and S. Jewett, "Risk, lifestyle and non-communicable diseases of poverty," *Globalization and Health*, vol. 19, no. 1, 2023. [Online]. Available: <https://doi.org/10.1186/s12992-023-00914-z>
- [4] M. Y. Yang, G. H. Kwak, T. Pollard, L. A. Celi and M. Ghassemi, "Evaluating the impact of social determinants on health prediction in the Intensive Care Unit," in *Proc. AAAI/ACM Conf. AI, Ethics, and Society (AIES '23)*, Montréal, QC, Canada, 2023, pp. 333–350.
- [5] P. Bhoothookngoen and N. Sanchan, "Predictive modeling of non-communicable diseases using social determinants of health as features: A review of existing approaches," *Srinakharinwirot Univ. Eng. J.*, vol. 19, no. 1, pp. 79–88, 2023.
- [6] Z. Hu, H. Qiu, Z. Su, M. Shen and Z. Chen, "A stacking ensemble model to predict daily number of hospital admissions for cardiovascular diseases," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 138719–138729, 2020.
- [7] Open Government Data of Thailand [Online]. Available: <https://opendata.data.go.th/en/group/public-health>
- [8] Pollution Control Department (2022, Oct. 22). Air4Thai [Online]. Available: <http://air4thai.pcd.go.th/webV2/region.php?region=0>.
- [9] National Statistical Office Thailand [Online]. Available: <http://www.nso.go.th/>
- [10] Ministry of Public Health of Thailand, *Hospitals Code*, [Online]. Available: <https://hcode.moph.go.th/code/>

การจำลองและวิเคราะห์ผลของการใช้อากาศสำหรับการถ่ายโอนความร้อนจาก แบตเตอรี่ลิเทียมไอออน NMC ในรถยนต์ไฟฟ้าด้วยวิธีการ CFD Simulation and Analysis of Airflow for Heat Transfer from NMC Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles Using CFD Methods

รัฐพล โพธิ์ศรี ธรรมรัตน์ แยกสูงเนิน*

วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม 46 ถนนจรัญสนิทวงศ์ แขวงวัดท่าพระ เขตบางกอกใหญ่ กรุงเทพฯ 10600

Rattapon Phosri Thammarat Yabsungnoen *

Siam Technology College 46 Wat Tha Phra Subdistrict, Bangkok Yai District, Bangkok 10600

*Corresponding author Email: rattaponp@siamtechno.ac.th

(Received: March 13, 2025; Revised: June 17, 2025 ; Accepted: June 30, 2025)

บทคัดย่อ

รถยนต์ไฟฟ้าในปัจจุบันมีความก้าวหน้าและถูกนำมาใช้งานในชีวิตประจำวันแพร่หลายซึ่งมีแนวโน้มจะเข้ามาแทนที่รถยนต์สันดาปภายใน หนึ่งในเทคโนโลยีที่สำคัญคือแบตเตอรี่ซึ่งเป็นตัวกำหนดถึงระยะทางการขับขี่ของรถยนต์ไฟฟ้าโดยปัจจุบันประเภทของแบตเตอรี่ที่สำคัญที่ใช้ในรถยนต์คือลิเทียมไอออน NMC เนื่องจากความหนาแน่นของพลังงานสูงแต่ก็มีข้อเสียคือประสิทธิภาพของแบตเตอรี่ไวต่ออุณหภูมิจึงทำให้การออกแบบระบบระบายความร้อนมีความสำคัญต่อแบตเตอรี่เป็นอย่างมากโดยความร้อนนั้นเกิดจากการประจุและคายประจุของแบตเตอรี่ งานวิจัยของ Mohsen Akbarzadeh และคณะได้จำลองการไหลและการถ่ายเทความร้อนด้วยวิธีการ CFD ซึ่งพบว่าการใช้อัตราการไหล 21 L/s ร่วมกับช่องเดินอากาศขนาด 5 mm นั้นเพียงพอต่อการระบายความร้อนของแบตเตอรี่ NMC ขนาด 3.7 V 43 Ah จำนวน 12 ก้อน ให้รักษาอุณหภูมิของแบตเตอรี่ให้อยู่ในระดับปกติ งานวิจัยนี้จึงได้นำโมเดลของ Mohsen Akbarzadeh มาประยุกต์ใช้กับแบตเตอรี่ NMC ขนาด 180 Ah 3.7 V จำนวน 24 ก้อน ซึ่งจากการจำลอง CFD พบว่าแบตเตอรี่ยังมีอุณหภูมิที่สูงกว่าย่านการใช้งานปกติจึงมีการปรับปรุงอัตราการไหลเชิงปริมาตรเป็น 127 L/s ซึ่งสามารถรักษาอุณหภูมิของแบตเตอรี่ให้อยู่ในย่านการใช้งานปกติได้ แต่ยังคงมีความดันสูญเสียที่สูงจึงมีการปรับปรุงช่องทางการไหลของอากาศให้เป็น 7 mm ซึ่งทำให้ความดันสูญเสียลดลงแต่อุณหภูมิเกินย่านการใช้งานไป 10 °C จึงไม่สามารถนำไปใช้ได้จริงในทางปฏิบัติ

คำสำคัญ: CFD, ลิเทียมไอออน NMC, การระบายความร้อนด้วยอากาศ

ABSTRACT

Electric vehicles have advanced significantly and are now widely used in daily life, with the potential to replace internal combustion engine vehicles. One of the key technologies in electric vehicles is the battery, which determines the driving range. Currently, one of the most important battery types used in electric vehicles is lithium-ion NMC due to its high energy density. However, a major drawback is that its efficiency is highly sensitive to temperature, making the design of an effective

cooling system crucial. Heat is primarily generated during the charging and discharging processes of the battery. A study by Mohsen Akbarzadeh and colleagues simulated airflow and heat transfer using CFD. Their findings suggested that an airflow rate of 21 L/s combined with 5 mm air channels was sufficient to cool a system of twelve 3.7 V 43 Ah NMC battery cells, maintaining the battery temperature within an optimal operating range. This research was then applied to a system of twenty-four 3.7V 180 Ah NMC battery cells. However, CFD simulations indicated that the battery temperature exceeded the normal operating range. To address this issue, the volumetric flow rate was increased to 127 L/s, which successfully maintained the battery temperature within the optimal range. However, this resulted in a high pressure drop. Consequently, the air channel size was increased to 7 mm, reducing the pressure drop but causing the battery temperature to exceed the optimal range by 10 °C, making the setup impractical for real-world applications.

Keyword: CFD, lithium-ion NMC, air-cooling system.

1. บทนำ

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อรถยนต์ไฟฟ้า (EV) เนื่องจากเป็นแหล่งพลังงานหลักที่ใช้ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ไฟฟ้า แบตเตอรี่ชนิดนี้มีความหนาแน่นของพลังงานสูง ทำให้สามารถเก็บพลังงานได้มากในขนาดที่กะทัดรัดและมีน้ำหนักเบากว่าแบตเตอรี่ประเภทอื่น เช่น แบตเตอรี่ตะกั่วกรดหรือแบตเตอรี่ NiMH [1] นอกจากนี้ แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนยังมีประสิทธิภาพในการชาร์จและคายประจุสูง ส่งผลให้สามารถรองรับการเร่งความเร็วของรถยนต์ได้ดีและมีระยะทางการขับขี่ต่อการชาร์จหนึ่งครั้งที่สูงขึ้น [2] อีกทั้งยังมีอัตราการสูญเสียพลังงานต่ำและอายุการใช้งานที่ยาวนาน ทำให้เป็นทางเลือกที่เหมาะสมสำหรับอุตสาหกรรมยานยนต์ไฟฟ้า [3] อย่างไรก็ตาม การจัดการความร้อนและระบบความปลอดภัยของแบตเตอรี่เป็นสิ่งสำคัญ เนื่องจากแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนมีความไวต่ออุณหภูมิสูง ซึ่งอาจส่งผลต่อประสิทธิภาพและความปลอดภัยของรถ EV [4]

แบตเตอรี่ลิเทียมไอออนประเภท NMC (Nickel Manganese Cobalt) มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อรถยนต์ไฟฟ้า เนื่องจากให้สมดุลที่ดีระหว่างความหนาแน่นของพลังงานและอายุการใช้งาน แบตเตอรี่ NMC สามารถเก็บพลังงานได้มากขึ้นในน้ำหนักที่เบากว่าแบตเตอรี่ลิเทียม

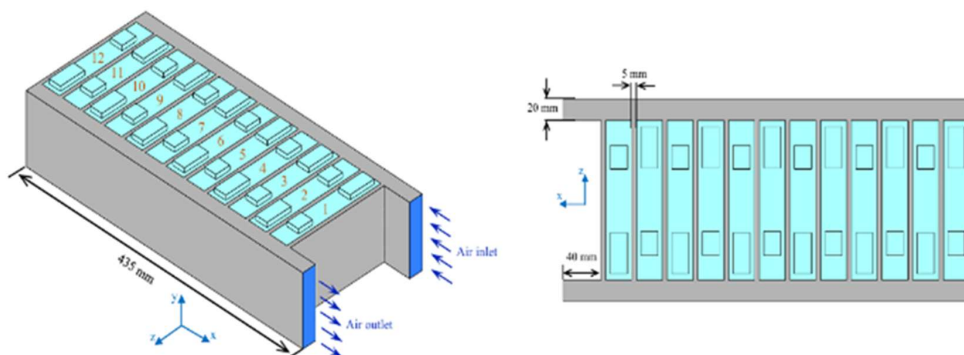
ไอออนประเภทอื่น เช่น LFP (Lithium Iron Phosphate) ทำให้เหมาะสำหรับรถ EV ที่ต้องการระยะทางขับขี่ที่ไกลขึ้นต่อการชาร์จหนึ่งครั้ง [5] แม้ว่าแบตเตอรี่ NMC (Nickel Manganese Cobalt) จะมีความหนาแน่นของพลังงานสูงและรองรับการชาร์จเร็วได้ดี แต่หนึ่งในข้อจำกัดสำคัญคือการเกิดความร้อนระหว่างการใช้งาน ซึ่งเป็นปัจจัยที่ส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพและอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ แบตเตอรี่ NMC สามารถเกิดความร้อนจากกระบวนการชาร์จและการคายประจุ โดยเฉพาะในกรณีที่มีการเสไฟฟ้าสูง เช่น การเร่งความเร็วหรือการใช้ระบบชาร์จเร็ว (Fast Charging) [6] นอกจากนี้ ความร้อนยังเกิดจากความต้านทานภายใน (Internal Resistance) ของเซลล์แบตเตอรี่ ซึ่งอาจเพิ่มขึ้นเมื่อแบตเตอรี่เสื่อมสภาพ [7] เมื่ออุณหภูมิสูงเกินค่าที่กำหนด อาจทำให้เกิดการเสื่อมสภาพของวัสดุขั้วไฟฟ้า (Electrode Degradation) และอาจนำไปสู่ปรากฏการณ์ Thermal Runaway ซึ่งเป็นภาวะที่อุณหภูมิแบตเตอรี่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วและอาจนำไปสู่ความเสียหายรุนแรง [8] ด้วยเหตุนี้ เทคโนโลยีการจัดการความร้อน (Thermal Management) จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการควบคุมอุณหภูมิของแบตเตอรี่ NMC [5]

ปรากฏการณ์ Thermal Runaway ในแบตเตอรี่ NMC สามารถเกิดขึ้นได้เมื่ออุณหภูมิสูงเกิน 150-200°C [9] ระบบการระบายความร้อนจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งในการควบคุมอุณหภูมิของแบตเตอรี่ให้อยู่ในช่วงที่ปลอดภัยโดยปกติแล้ว แบตเตอรี่ NMC ทำงานได้ดีที่สุดที่อุณหภูมิ 15-45°C และหากไม่มีระบบจัดการความร้อนที่เหมาะสม ความร้อนที่สะสมภายในเซลล์อาจเร่งกระบวนการเสื่อมสภาพของแบตเตอรี่ และเพิ่มความเสี่ยงของ Thermal Runaway [10] ดังนั้น ระบบระบายความร้อนที่มีประสิทธิภาพ เช่น การระบายความร้อนด้วยอากาศ (Air Cooling), ของเหลว Liquid Cooling), หรือแผ่นระบายความร้อนแบบเฟสเซนจ์ (Phase Change Material, PCM) จึงเป็นทางเลือกที่สำคัญในการรักษาอุณหภูมิของแบตเตอรี่ให้คงที่ [7] การออกแบบระบบนี้ต้องคำนึงถึง การกระจายความร้อนที่สม่ำเสมอ, การลดจุดร้อน (Hot Spots), และการตอบสนองที่รวดเร็วต่อการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ นอกจากนี้ การผสมผสานเทคโนโลยีเซ็นเซอร์ตรวจวัดอุณหภูมิและซอฟต์แวร์ควบคุมอัจฉริยะ จะช่วยให้ระบบสามารถปรับการระบายความร้อนให้เหมาะสมกับสภาพการทำงานของรถยนต์ไฟฟ้าได้ดีขึ้น ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ช่วย ยืดอายุการใช้งานของแบตเตอรี่ NMC และเพิ่มความปลอดภัยของรถยนต์ไฟฟ้า [6]

การใช้ SolidWorks และ Flow Simulation ด้วยวิธี FVM ทำให้สามารถวิเคราะห์และทดสอบแนวคิดการออกแบบ โดยไม่ต้องสร้างต้นแบบจริง ลดต้นทุนและเวลา

การพัฒนา นอกจากนี้ยังสามารถระบุจุดร้อน (Hot Spots) ที่อาจทำให้แบตเตอรี่เสื่อมสภาพเร็วขึ้น และช่วยปรับปรุงการไหลของของไหลเพื่อให้เกิดการระบายความร้อนที่สม่ำเสมอมากขึ้น เทคโนโลยีนี้ยังช่วยให้สามารถเปรียบเทียบประสิทธิภาพของระบบระบายความร้อนแบบต่างๆ เช่น การระบายความร้อนด้วยอากาศและของเหลว รวมถึงการออกแบบโครงสร้างแบตเตอรี่ที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการถ่ายเทความร้อนได้สูงสุด ดังนั้น การใช้ซอฟต์แวร์จำลองทางวิศวกรรมจึงเป็นเครื่องมือสำคัญในการออกแบบระบบระบายความร้อนของแบตเตอรี่ NMC ให้มีประสิทธิภาพและปลอดภัยสำหรับการใช้งานในรถยนต์ไฟฟ้า

โดยงานวิจัยของ Mohsen Akbarzadeh และคณะได้ทำระบบจัดการความร้อนของแบตเตอรี่ลิเทียมไอออนแบบระบายความร้อนด้วยอากาศและของเหลวในโมดูลแบตเตอรี่พลังงานสูงสำหรับยานยนต์ไฟฟ้า โดยใช้การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณเพื่อวิเคราะห์การใช้พลังงานเสริมและประสิทธิภาพการระบายความร้อนของทั้งสองระบบ ซึ่งพบว่าการใช้อากาศด้วยอัตราการไหล 21 l/s รวมกับการใช้ช่องอากาศขนาด 5 mm ดังรูปที่ 1 สามารถระบายความร้อนของแบตเตอรี่ NMC 3.7 V 43Ah จำนวน 12 ก้อน ให้มีอุณหภูมิ 36-38 องศาเซลเซียส ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงนำโมเดลของ Mohsen Akbarzadeh มาประยุกต์ใช้กับแบตเตอรี่ NMC 180 Ah 3.7 V จำนวน 24 เซลล์ [11]



รูปที่ 1 โมเดลของ Mohsen Akbarzadeh ที่ใช้อากาศในการระบายความร้อนของแบตเตอรี่ NMC จำนวน 12 เซลล์ [11]

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

การจำลองระบบระบายความร้อนมีความเกี่ยวข้องกับลักษณะการถ่ายเทความร้อนหลักๆ 2 อย่างได้แก่ การนำความร้อน (conduction) และการพาความร้อน (convection) และเกี่ยวข้องกับการไหลในท่อโดยตรงโดยลักษณะการไหลในท่อมียู่สองแบบคือแบบราบเรียบ (laminar flow) และการไหลแบบปั่นป่วน (turbulent flow) โดยทั่วไปเราสามารถทราบพฤติกรรมการไหลได้อย่างดีด้วยการคำนวณค่า Reynolds Number ตามสมการที่ 1 การคำนวณมีความเกี่ยวข้องกับอัตราการไหลของอากาศเริ่มต้น ค่าความหนาแน่นของของไหล ค่าคุณลักษณะความยาว (hydraulic diameter) ค่าความหนืดของอากาศ ในสมการที่ 1 ค่าคุณลักษณะความยาวขึ้นอยู่กับลักษณะหน้าตัดของท่อซึ่งใช้วิธีการคำนวณไม่เหมือนกัน สามารถคำนวณตามสมการที่ 2 [12] โดยขนาดของตัวแปรต่าง ๆ เป็นไปตามตารางที่ 1.

$$Re = \frac{\rho U D_h}{\mu} \quad (1)$$

โดยที่ Re คือ ค่า Reynold Number

ρ คือ ความหนาแน่นของอากาศที่อุณหภูมิ 25 °C

U คือ ความเร็วของอากาศเริ่มต้น (m/s)

D_h คือ เส้นผ่านศูนย์กลางไฮดรอลิก (m)

μ คือ ค่าความหนืดไดนามิกของอากาศ (pa • s)

$$D_h = \frac{4A}{S} \quad (2)$$

โดยที่ A คือ พื้นที่หน้าตัดของท่อ(m²)

S คือ ขนาดของเส้นรอบวงที่สัมผัสของไหล (m)

ตารางที่ 1 ตัวแปรต่างๆ ที่ใช้คำนวณค่า Reynold Number ของอากาศ ณ ความดันอากาศ 1 atm และอุณหภูมิ 25 °C

ตัวแปรที่ใช้คำนวณ	ขนาดของตัวแปร
ความเร็วของอากาศ	30.48 m/s
ความหนืดไดนามิกของอากาศ	1.98×10^{-5} Pa.s
ความหนาแน่นของอากาศ	1.215 kg/m^3
ความกว้างของหน้าตัด	0.044 m
ความยาวของหน้าตัด	0.095 m
พื้นที่หน้าตัดของท่อ	0.0352 m^2
ขนาดเส้นรอบวงที่สัมผัสของไหล	0.128 m

ตามสมการที่ 2 และข้อมูลจากตารางที่ 1 สามารถคำนวณหาค่า Reynold Number เบื้องต้นได้เท่ากับ 112,476 ซึ่งมากกว่า 4,000 ทำให้ทราบว่า เป็นการไหลแบบปั่นป่วนดังนั้นสมการควบคุมที่ใช้ในการจำลองพฤติกรรมการไหลของอากาศในระบบ ต้องเป็นสมการอนุรักษ์มวล (mass conservation) (สมการที่ 3) และสมการอนุรักษ์ (momentum conservation) ซึ่งโดยรูปทั่วไปสำหรับการไหลแบบ

ปั่นป่วนจะต้องจัดสมการใหม่เป็น Reynolds-Averaged Navier-Stokes equation (RANS) (สมการที่ 4) ซึ่งเป็นสมการที่อยู่ในรูปของค่าเฉลี่ย [13]

$$\frac{\partial(\bar{\rho})}{\partial t} + \nabla \cdot (\bar{\rho} \mathbf{u}) + \nabla \cdot (\bar{\rho} \mathbf{u}') = 0 \quad (3)$$

$$\frac{\partial(\rho \bar{u})}{\partial t} + \rho(\bar{u} \nabla) \bar{u} = -\nabla \bar{p} + \mu[\nabla^2 \bar{u} + \nabla(\nabla \cdot \bar{u})] - \nabla(\rho \bar{u} \bar{u}) + \rho \bar{g} \quad (4)$$

จากสมการที่ 3 พจน์แรกของสมการคืออัตราการผลิตเปลี่ยนแปลงมวลเทียบกับเวลา โดยปกติโปรแกรมจะเริ่มต้นการคำนวณด้วยสมการนี้ซึ่งการจำลองการไหลของระบบเป็นแบบคงตัว (Steady State) ทำให้พจน์แรกของสมการกลายเป็น 0 ในที่สุด การจำลองการไหลแบบปั่นป่วนบนคอมพิวเตอร์จะต้องใช้รูปสมการที่เหมาะสมและผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงในทางปฏิบัติมากที่สุด ซึ่งทำให้สมการที่ 4 จะต้องคำนวณร่วมกับโมเดล $k - \varepsilon$ เพื่อให้ผลของการจำลองมีความสมจริงมากขึ้นโดยสมการนี้มีความสัมพันธ์กับ Reynold Stress Tensor ตามสมการที่ 5 ซึ่งเป็นการอธิบายความสัมพันธ์แบบ Boussinesq [14]

$$\tau_{ij} = -\rho \nu_t \left(\frac{\partial \bar{u}_i}{\partial x_j} + \frac{\partial \bar{u}_j}{\partial x_i} \right) + \frac{2}{3} \rho k \delta_{ij} \quad (5)$$

ซึ่งสามารถนิยาม Reynold Stress Tensor ได้ตามสมการที่ 6

$$\tau_{ij} = \rho \overline{u'_i u'_j} \quad (6)$$

จากสมการที่ 5 เห็นได้ว่า Reynold Stress Tensor มีความสัมพันธ์กับสมการที่ 4 อย่างไรก็ดีตามต้องการนิยามเพิ่มเติมเพื่อให้สามารถใช้โมเดล $k - \varepsilon$ ได้ต้องมีการอธิบายผ่านสมการ Turbulent kinematic viscosity ตามสมการที่ 7

$$\nu_t = C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (7)$$

สมการที่ 7 มีความสัมพันธ์กับ Eddy Viscosity ซึ่งมีความสัมพันธ์กับ Eddy Viscosity ซึ่งเป็นค่าตัวแปรสมมติเพื่อให้การไหลแบบปั่นป่วนบนการจำลองมีความถูกต้องมากขึ้นซึ่งถูกอธิบายผ่านสมการที่ 8

$$\mu_t = \rho \nu_t \quad (8)$$

สุดท้ายสำหรับการจำลองพฤติกรรมการไหลแบบปั่นป่วนภายในท่อถูกอธิบายผ่านโมเดล $k - \varepsilon$ ทำให้ได้ความสัมพันธ์ผ่านสมการที่ 9 และ 10 ดังนี้

$$\frac{\partial k}{\partial t} + \nabla(\mu k) = \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right] + P_k \quad (9)$$

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \nabla(\mu \varepsilon) = \nabla \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right] + C_1 \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_2 \quad (10)$$

โดยสมการมีค่าตัวแปรคงที่เพื่อใช้ประกอบการคำนวณ Turbulent Model ได้แก่ $C_1 = 1.44, C_2 = 1.92, C_\mu = 0.09, \sigma_k = 1.0, \sigma_\varepsilon = 1.3$ สมการดังกล่าวเบื้องต้นเป็นสมการที่ใช้ในการจำลองการไหลของระบบ โดยต่อไปนี้จะสมการควบคุมการจำลองถ่ายเทความร้อนซึ่งมีได้แก่การนำความร้อนและการพาความร้อนในอุปกรณ์ซึ่งจะเริ่มการอธิบายด้วยสมการการกำเนิดความร้อนดังสมการที่ 11 [15]

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = k \nabla^2 T + q \quad (11)$$

โดย ρ คือความหนาแน่นของแบตเตอรี่ (kg/m^3)

c_p คือความจุจำเพาะความร้อน ($^\circ\text{C}$)

T คืออุณหภูมิของแบตเตอรี่ ณ ขณะนั้น ($^\circ\text{K}$)

k คือค่าการนำความร้อนของ ($\text{W/m}, ^\circ\text{K}$)

$\nabla^2 T$ คือ Laplacian สำหรับอุณหภูมิ

q คืออัตราการกำเนิดความร้อนเชิงปริมาตร (W/m^3)

จากสมการที่ 11 เป็นสมการควบคุมทั่วไปที่อยู่ในรูปของ Transient การจำลองในครั้งนี้เป็นการศึกษาในกรณีเป็น Steady เพราะฉะนั้นพจน์ฝั่งขวาของเครื่องหมายเท่ากับจะกลายเป็น 0 ในที่สุด จากค่า Reynold Number ที่คำนวณเบื้องต้นทำให้ทราบว่า การไหลของ

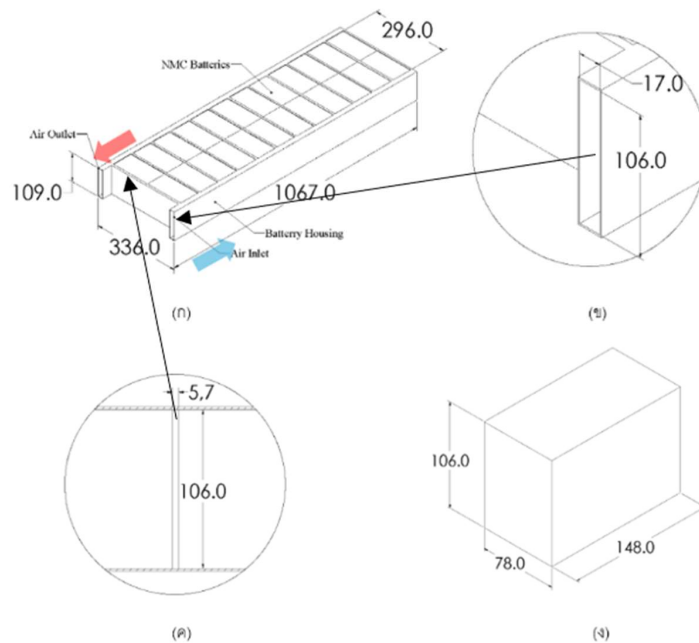
ระบบเป็นการไหลแบบปั่นป่วน เพราะฉะนั้นกลไกการพาความร้อนจึงเป็นแบบบังคับซึ่งสมการที่ใช้เป็นไปตามสมการที่ 12 และมีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับ $k - \varepsilon$ [16]

$$\nabla \cdot (\vec{v}(\rho E + p)) = \nabla \cdot (k_{eff} \nabla T - (\vec{F}_{eff} \cdot \vec{v})) \quad (12)$$

จากสมการที่ 12 สมการพลังงานซึ่งอธิบายการส่งพลังงานผ่านของไหลเนื่องจากการพาความร้อนแบบบังคับ ซึ่งมีทั้งองค์ประกอบพาความร้อน การนำความร้อนและการกระจายความหนืด เทอมในฝั่งซ้ายมือได้อธิบายถึงพลังงานที่ถูกย้ายด้วยกลไกการพาความร้อน โดยที่ E คือพลังงานทั้งหมดต่อมวลซึ่งประกอบไปด้วยพลังงานภายใน (Internal Energy) และพลังงานจลน์ (Kinetic Energy) อีกกลไกหนึ่งคืองานที่ถูกสร้างด้วยแรงดัน ส่วนในเทอมฝั่งขวาของสมการโดยพจน์แรกของสมการคือการนำความร้อนและการกระจายพลังงาน

เนื่องจากความเค้นเฉือนที่คล้ายกันแตกต่างกันที่ (ค) ขนาดของช่อง 5 มิลลิเมตร และ 7 มิลลิเมตร (ง) ขนาดของเซลล์แบตเตอรี่

จากรูปที่ 2 คือรายละเอียดของโมเดลที่ 1 และ โมเดลที่ 2 โดยโมเดลที่ 1 ในงานวิจัยของ Mohsen และคณะ เป็นโมเดลที่ดีที่สุดในการระบายความร้อนของแบตเตอรี่ โดยรายละเอียดของแต่ละโมเดลอยู่ในตารางที่ 2 ซึ่งในตารางมีข้อมูลของโมเดลที่ 1 และที่ 2 ผลจากการศึกษาของ Mohsen และคณะ พบว่าอัตราความเร็วของอากาศที่ 21 V/s สามารถรักษาอุณหภูมิของผิวอยู่ที่ 34-37 °C เพราะฉะนั้นงานวิจัยนี้จึงได้นำเอาโมเดลของ Mohsen และคณะ มาปรับใช้กับแบตเตอรี่ขนาด 180 Ah 3.7 V NMC จำนวน 24 เซลล์ ซึ่งมีขนาดใหญ่กว่างานวิจัยของการจำลองเริ่มต้นด้วยใช้อากาศระบายความร้อนแบบบังคับอัตราการไหลเชิงปริมาตร 21 V/s และ 127 V/s เพื่อใช้ข้อมูลนี้เป็นตัวเทียบประสิทธิภาพการระบายความร้อนของแบตเตอรี่โดยเทียบกับโมเดลที่ 1 และ 2



รูปที่ 2 รายละเอียดของโมเดลที่ 1 และ 2 (ก) รูปแบบทั่วไปของระบบระบายความร้อนของแบตเตอรี่ (ข) ขนาดช่องของท่ออากาศ ซึ่งมีรูปแบบแนวทางการเดิน (ค) ขนาดท่ออากาศคันเซลล์แบตเตอรี่ (ง) ขนาดแบตเตอรี่ลิเทียม NMC

โดยการเลือกใช้อัตราการไหลเชิงปริมาตร 127 V/s มาจากการเลือก Blower กระแสตรง ยี่ห้อ SEAFLOW In-Line Blower 12 V 6 A 270 CFM โดยโปรแกรมที่ใช้ในการจำลองคือ SolidWorks Flow Simulation ซึ่งเป็นโปรแกรมที่ใช้วิธีการ Finite Volume Method (FVM) ซึ่งเหมาะกับการจำลองของไหลผ่านวัตถุ (CFD) โดยการใช้จำลองด้วยวิธี FVM จะต้องกำหนดประเภทการไหลเป็นแบบปั่นป่วนและเป็นการไหลภายในท่อ (internal flow) เงื่อนไขและขอบเขตตามตารางที่ 4 คุณสมบัติ Thermal Conductivity ของ Aluminum 6061 และอากาศเป็นคุณสมบัติแบบ Isentropic ยกเว้น Battery NMC ที่ถูกกำหนดให้เป็น Orthotropic เนื่องจากส่วนประกอบภายในของแบตเตอรี่มีความแตกต่างกัน จึงทำให้คุณสมบัติแตกต่างกันตามแนวแกน

จากตารางที่ 3 คือการกำหนดเงื่อนไขและขอบเขตของการจำลองระบบโดยเริ่มจากการควบคุมสภาพแวดล้อมโดยกำหนดผนังของระบบกับสภาพแวดล้อมไม่มีการถ่ายโอนพลังงาน (Adiabatic wall) เพราะฉะนั้นการถ่ายเทพลังงานเกิดขึ้นเฉพาะแบตเตอรี่ผนังอลูมิเนียมและอากาศ มีการควบคุมระบบด้วยความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก นอกจากนั้นที่

ทางออกของท่อหลักถูกกำหนดให้มีความดันบรรยากาศ กำหนดค่าความร้อนเชิงปริมาตรของแบตเตอรี่มีค่าเท่ากับ 41,825 W/m³ ซึ่งได้จากปริมาณความร้อนที่วัดได้จากการคลายประจุโดยใช้อัตรา 2C จาก 80 % เหลือ 20 % [11] ทั้งนี้อัตราการไหลเชิงมวลและเชิงปริมาตรและความเร็วอากาศในแต่ละช่องเป็นปริมาณเฉลี่ยต่อพื้นที่ผิว

การตรวจสอบความถูกต้องของค่าตัวแปรตามใช้วิธีการดูการลู่เข้าของคำตอบ (convergence) ซึ่งต้องตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของคำตอบว่าน้อยกว่า 1 % หรือไม่ ด้วยการลู่เข้าของคำตอบมีความเกี่ยวข้องโดยตรงกับปริมาณเซลล์ที่ทำการแบ่ง (meshing) โดยกระบวนการจะเริ่มต้นด้วยการแบ่งกริดจนได้จำนวนเริ่มต้น 100,000 กริด และทำการคำนวณจนได้ค่าตัวแปรตามออกมาซึ่งคำตอบนั้นอาจจะไม่ใช่ค่าที่แท้จริง จึงต้องทำการแบ่งกริดให้ละเอียดมากขึ้นและทำการคำนวณอีกครั้งหนึ่งและวัดการเปลี่ยนแปลงของคำตอบว่าน้อยกว่า 1% หรือ ถ้ายังไม่ได้ตามที่กล่าวก็ทำการแบ่งกริดใหม่อีกครั้งให้ละเอียดมากขึ้นกว่าเดิมและคำนวณซ้ำอีกครั้งจนคำตอบเข้าสู่การลู่เข้า จากรูปที่ 3 แสดงถึงแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของคำตอบที่ขึ้นอยู่กับปริมาณการแบ่งเซลล์ [17]

ตารางที่ 3 เงื่อนไขและขอบเขตของการจำลองเชิงตัวเลข

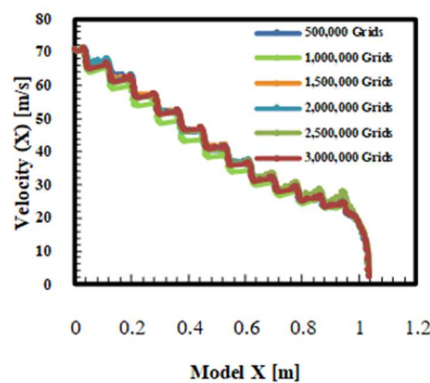
ตัวต้นแบบ	โมเดลที่ 1	โมเดลที่ 2
ตัวแปรควบคุม	ค่าความร้อนเชิงปริมาตรที่เกิดขึ้นในแบตเตอรี่ : 41,825 W/m ³ ทุกวัสดุในระบบมีอุณหภูมิเริ่มต้นที่ 25 °C ไม่มีการถ่ายเทพลังงานระหว่างระบบกับผนัง Adiabatic wall ขนาดท่อความกว้างและสูง 20 x 109 mm	
ตัวแปรต้น อัตราการไหลเชิงปริมาตร ขนาดท่ออากาศคันเซลล์แบตเตอรี่	21 และ 127 V/s 6 mm	127 V/s 7 mm
ตัวแปรตาม	อุณหภูมิอากาศ อุณหภูมิผิวของแบตเตอรี่ อัตราการไหลเชิงมวลและเชิงปริมาตร ความดันสูญเสีย	

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

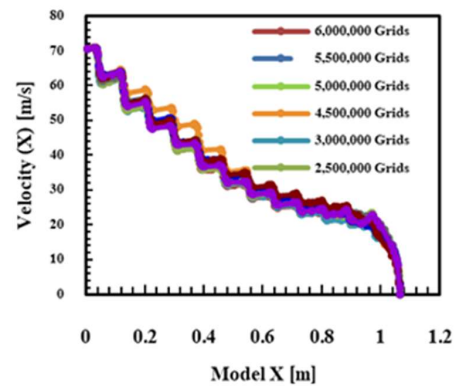
จากรูปที่ 3 (ก) และ (ข) คือกราฟแสดงถึงการลู่เข้าของค่าตอบที่ได้จากจำลองทางคอมพิวเตอร์โดยโมเดลที่ 1 ค่าตอบมีการเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์ ที่จำนวนเซลล์ 3,000,000 เซลล์ ในขณะที่โมเดลที่ 2 ค่าตอบมีการเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 1% ที่จำนวนเซลล์ 6,000,000 เซลล์ ทั้งสองโมเดลทดสอบที่อัตราการไหลเชิงปริมาตร 127 L/s รวมถึงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของอากาศตามแนวแกน x มีการเปลี่ยนแปลงไม่เกิน 1 เปอร์เซ็นต์เช่นเดียวกัน ดังรูปที่ 3 (ค) ทั้งนี้ จำนวนเซลล์ดังกล่าวใช้กับอัตราการไหลเชิง 21 L/s เช่นเดียวกัน โดยรูปที่ 3 (จ) และ (ฉ) แสดงการแบ่งเซลล์จำนวน 1,000,000 และ 6,000,000 เซลล์ จากการนำโมเดลของ Mohsen Akbarzadeh และคณะ ซึ่งนำมาประยุกต์ใช้กับเซลล์แบตเตอรี่ 24 เซลล์ ของงานวิจัยนี้ ซึ่งผลการจำลองการไหลของอากาศและการถ่ายเทความร้อนสำหรับอัตราการไหลของอากาศ 21 L/s ของโมเดลที่ 1 เป็นไปตามรูปที่ 4 ซึ่งเห็นได้ว่าอุณหภูมิภายในของแบตเตอรี่มีอุณหภูมิที่สูงที่สุดคือ 94.33 °C และต่ำสุดคือ 42.33 °C ซึ่งยังเป็นอุณหภูมิที่สูงกว่าอุณหภูมิสำหรับการใช้งานปกติของแบตเตอรี่คือ 25-40 °C สำหรับแบตเตอรี่ NMC โดยค่าอุณหภูมิดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าอัตราการไหลของงานวิจัย Mohsen Akbarzadeh และคณะ ไม่เพียงพอต่อการระบายความร้อนออกจากแบตเตอรี่จำนวน 24 เซลล์ โดยรูปแบบการกระจายของอุณหภูมิสามารถเสริมการอธิบายได้โดยรูปที่ 4 (ค) โดยอุณหภูมิของเซลล์ที่ 1 และ 2 มีอุณหภูมิต่ำสุดคือ 42.33 ถึง 77 °C ซึ่งสอดคล้องกับค่าอัตราการไหลเชิงมวลและการไหลเชิงปริมาตรของช่องที่หนึ่งและช่องที่สองซึ่งมีอัตราการไหล 0.0016 7 kg/s กับ 1.556 L/s และ 0.002 kg/s กับกับ 2 L/s หลังจากช่องที่สองเป็นต้นไปอัตราการไหลเชิงมวลและเชิงปริมาตรมีค่าลดลงจนต่ำสุดที่ช่องที่ 5 0.0008 kg/s และ 0.7966 L/s ทำให้อุณหภูมิของแบตเตอรี่เซลล์ที่ 14 และ 15 มีอุณหภูมิสูงมีค่า 94.33 °C หลังจากช่องที่ 5 เป็นต้นไป ค่าอัตราการไหลเชิงมวลและเชิงปริมาตรมีค่าเพิ่มขึ้นต่อเนื่องจนถึงช่องที่ 8 มีค่าอัตรา

การไหลเชิงมวล 0.0016 kg/s และอัตราการไหลเชิงปริมาตร 1.60 L/s ซึ่งมีค่าใกล้เคียงกับช่องที่ 1 แบตเตอรี่เซลล์ที่ 14 และ 15 กลับมีอุณหภูมิที่สูงมากคือ 93.33 °C เหตุผลที่มีความเป็นไปได้มากที่สุดคือแบตเตอรี่เซลล์ที่ 15 และ 16 ได้รับอิทธิพลการถ่ายเทความร้อนจากเซลล์ที่ 13 14 17 และ 18 ซึ่งมีอุณหภูมิที่สูงเช่นเดียวกันทำให้มีอิทธิพลมากกว่าการพาความร้อนในช่องที่ 8 และ 9 หลังจากช่องที่ 8 ค่าอัตราการไหลของอากาศ โดยผลการจำลองนี้มีความใกล้เคียงกับงานวิจัย [19] มีค่าลดลงจนต่ำสุดที่ช่อง 11 ซึ่งจุดนี้ เซลล์ที่ 19 และ 20 มีพื้นที่อุณหภูมิสูงมากที่สุดซึ่งสอดคล้องกับอัตราการไหลต่ำสุดของช่องที่ 11 คือ 0.0007 kg/s และ 0.7209 L/s หลังจากช่องที่ 11 อัตราการไหลของแต่ละช่องมีค่าเพิ่มขึ้นมาและทำให้พื้นที่อุณหภูมิของเซลล์ที่ 21 22 23 และ 24 มีค่าลดลง ดังนั้นการนำโมเดลของ Mohsen Akbarzadeh และคณะ มาใช้กับแบตเตอรี่ NMC 24 เซลล์ โดยใช้อัตราการไหลเชิงปริมาตร 21 L/s นั้นไม่เพียงพอต่อการระบายความร้อนจากแบตเตอรี่ จึงทำการเปลี่ยนค่าอัตราการไหลเชิงปริมาตรเป็น 127 L/s

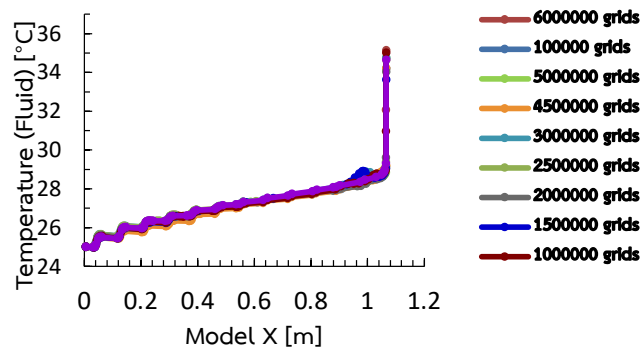
จากรูปที่ 7 เห็นได้ว่าอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเพิ่มขนาดของช่องจาก 5 mm เป็น 7 mm ในขณะที่ไหลทางความร้อนของแบตเตอรี่ยังมีขนาดเท่าเดิม เมื่อพิจารณาพิจารณาสมการที่ 12 ตัวแปรที่สำคัญของการพาความร้อนหรือความเร็วของอากาศซึ่งโมเดลที่ 2 อัตราการไหลของอากาศ 127 L/s มีความเร็วอากาศในแต่ละช่องที่ต่ำกว่าในโมเดลที่ 1 ในอัตราการไหล 127 L/s เพราะฉะนั้นโมเดลที่ 2 หากต้องการให้มีการเพิ่มประสิทธิภาพการระบายความร้อนออกจากแบตเตอรี่ได้มากกว่าเดิมนั้นจะต้องทำการเลือกเครื่องเป่าอากาศขนาดใหญ่ขึ้นเพื่อเพิ่มความเร็วของอากาศซึ่งจะทำให้เพิ่มประสิทธิภาพการระบายความร้อนและทำให้อุณหภูมิลดลง เพราะฉะนั้นการเลือกปั๊ม SEAFLOW In-Line Blower 12 V 6 A 270 CFM ใช้กับโมเดลที่หนึ่งสามารถลดอุณหภูมิของแบตเตอรี่ให้อยู่ในระดับที่ใช้งานได้



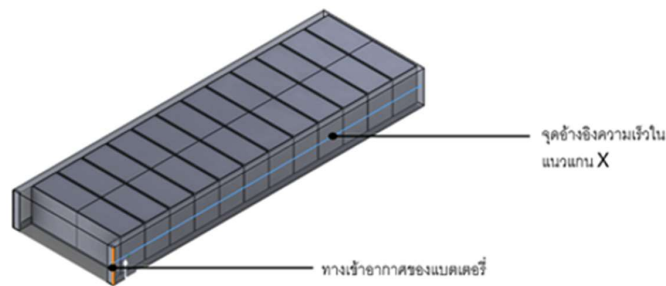
(ก)



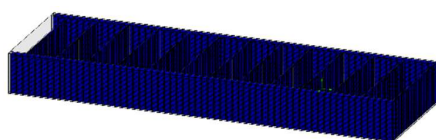
(ข)



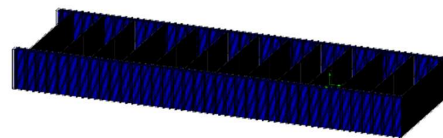
(ค)



(ง)

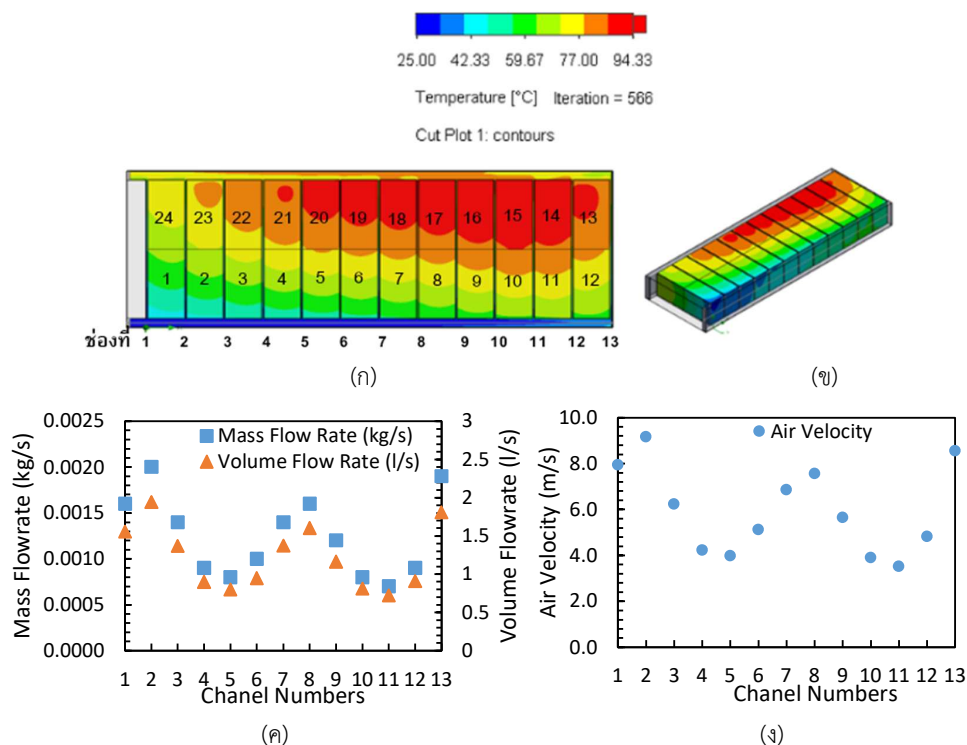


(จ)



(ฉ)

รูปที่ 3 (ก) ค่าความเร็วของอากาศทางเข้าในโมเดลที่ 1 ที่อัตราการไหลเชิงปริมาตร 127 V/s เทียบกับระยะทางเข้าทางแกน x (ข) ค่าความเร็วของอากาศทางเข้าในโมเดลที่ 2 ที่อัตราการไหลเชิงปริมาตร 127 V/s เทียบกับระยะทางเข้าทางแกน x (ค) การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิตามแนวอ้างอิง X (ง) เส้นสีน้ำจุดอ้างอิงความเร็วในแนวแกน X (จ) โมเดลหลังจากการแบ่งจำนวนเซลล์หนึ่งล้านเซลล์ และ (ฉ) โมเดลหลังจากการแบ่งโมเดลหกล้านเซลล์

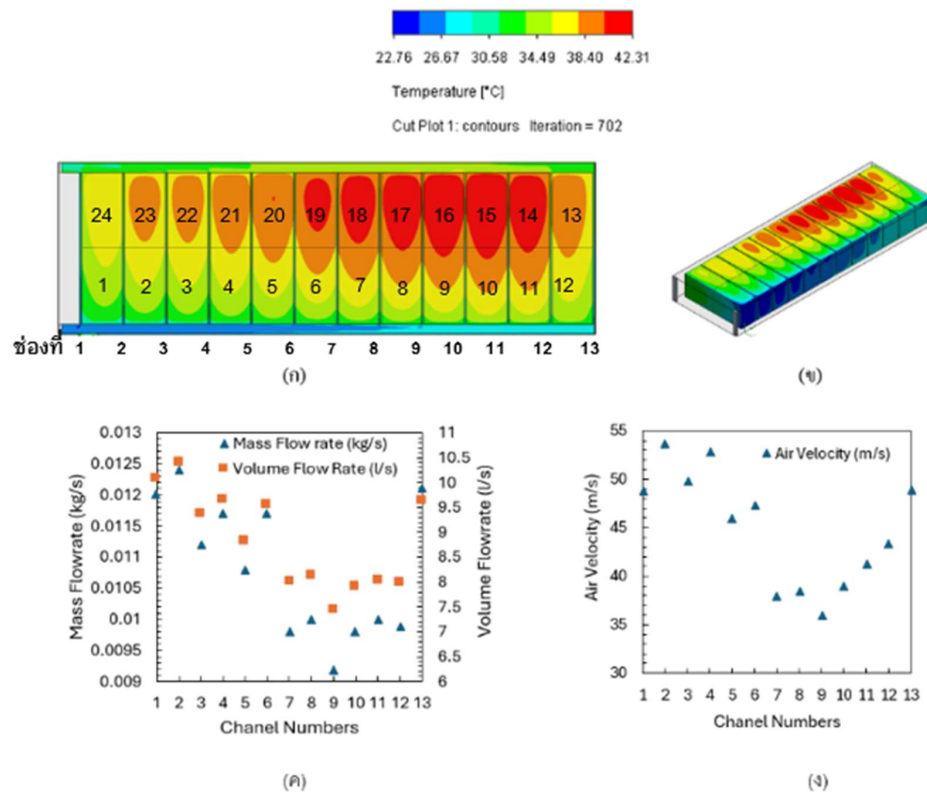


รูปที่ 4 ผลการจำลองของโมเดลที่ 1 อัตราการไหล 21 l/s (ก) พื้นที่อุณหภูมิแบตเตอรี่และอุณหภูมิของอากาศ ณ ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของโมเดล (ข) ภาพรวมของพื้นที่อุณหภูมิของแบตเตอรี่ในมุมมอง Isometric (ค) อัตราการไหลเชิงมวล และเชิงปริมาตรของอากาศตามช่องต่าง ๆ (ง) ความเร็วอากาศของช่องต่าง ๆ

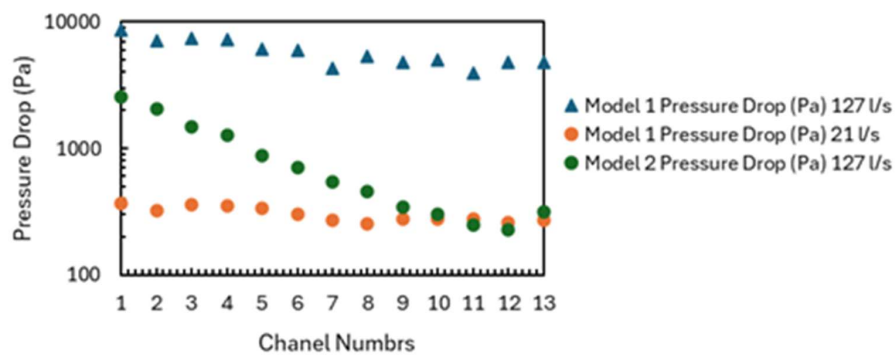
4. สรุป

การจำลองและวิเคราะห์ผลของการใช้อากาศสำหรับถ่ายโอนความร้อนจากแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน NMC ในรถยนต์ไฟฟ้าทำให้ทราบว่าโมเดลที่ 1 ของงานวิจัย Mohsen Akbarzadeh และคณะ ด้วยอัตราไหลเชิงปริมาตร 21 l/s ไม่สามารถระบายความร้อนได้อย่างเพียงพอที่จะทำให้แบตเตอรี่ NMC จำนวน 24 เซลล์ 180 Ah มีอุณหภูมิทำงานได้อย่างเหมาะสมที่ 40-45 °C จึงมีการปรับปรุงโดยการเลือกพัดลม SEAFLOW In-Line Blower 12 V 6 A ขนาดอัตราการไหล 270 CFM ซึ่งเป็นขนาดที่เพียงพอกับโมเดลที่ 1 ที่ทำให้อุณหภูมิของแบตเตอรี่อยู่

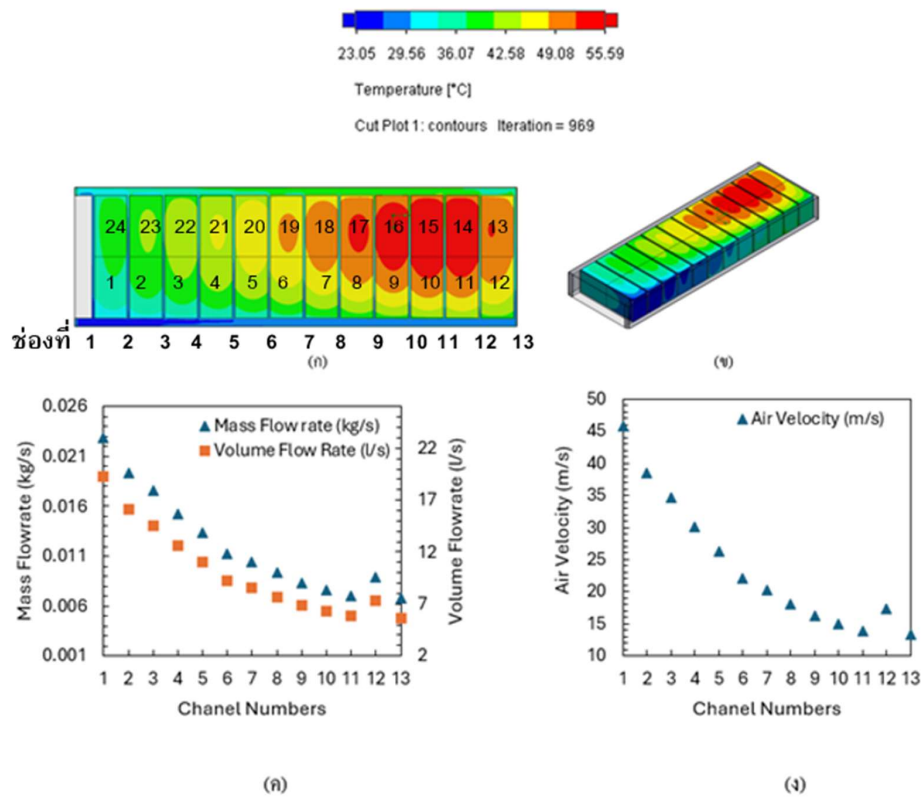
ในช่วงที่เหมาะสม เนื่องจากการเพิ่มอัตราการไหลทำให้ค่าความดันสูญเสียมีค่ามากขึ้นจึงมีการปรับขนาดของช่องจาก 5 mm เป็น 7 mm ในโมเดลที่ 2 ซึ่งทำให้ค่าความดันสูญเสียมีค่าลงอย่างเห็นได้ชัด แต่ความเร็วของช่องอากาศนั้นลดลงจนทำให้อุณหภูมิของแบตเตอรี่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญซึ่งสามารถแก้ไขได้โดยการเพิ่มขนาดของปั๊มอากาศ แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังไม่ได้วิเคราะห์แนวการวางช่องของอากาศซึ่งอาจสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการระบายความร้อนโดยใช้ปั๊มขนาด 270 CFM เท่าเดิมซึ่งในอนาคตจะนำไปสู่การวางแนวช่องมาศึกษา



รูปที่ 5 ผลการจำลองของโมเดลที่ 1 อัตราการไหล 127 l/s (ก) พื้นที่อุณหภูมิแบตเตอรี่และอุณหภูมิของอากาศ ณ ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของโมเดล (ข) ภาพรวมของพื้นที่อุณหภูมิของแบตเตอรี่ในมุมมอง Isometric (ค) อัตราการไหลเชิงมวล และเชิงปริมาตรของอากาศตามช่องต่าง ๆ (ง) ความเร็วอากาศของช่องต่าง ๆ



รูปที่ 6 เปรียบเทียบค่าความดันสูญเสีย (Pressure Drop) ในแต่ละโมเดล



รูปที่ 7 ผลการจำลองของโมเดลที่ 2 อัตราการไหล 127 l/s (ก) พื้นที่อุณหภูมิแบตเตอรี่และอุณหภูมิของอากาศ ณ ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของโมเดล (ข) ภาพรวมของพื้นที่อุณหภูมิของแบตเตอรี่ในมุมมอง Isometric (ค) อัตราการไหลเชิงมวล และเชิงปริมาตรของอากาศตามช่องต่าง ๆ (ง) ความเร็วอากาศของช่องต่าง ๆ

5. เอกสารอ้างอิง

- [1] M. A. Hannan, M. M. Hoque, A. Mohamed and A. Ayob, "Review of energy storage systems for electric vehicle applications: Issues and challenges," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 69, pp. 771–789, 2017.
- [2] [M. M. Thackeray, C. Wolverton and E. D. Isaacs, "Electrical energy storage for transportation—approaching the limits of, and going beyond, lithium-ion batteries," *Energy & Environmental Science*, vol. 5, no. 7, pp. 7854–7863, 2012.
- [3] B. Nykvist and M. Nilsson, "Rapidly falling costs of battery packs for electric vehicles," *Nature Climate Change*, vol. 5, no. 4, pp. 329–332, 2015.
- [4] K. T. Chau, C. C. Chan and C. Liu, "Overview of permanent-magnet brushless drives for electric and hybrid electric vehicles," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 55, no. 6, pp. 2246–2257, Jun. 2008.
- [5] G. Zubi, R. Dufo-López, M. Carvalho and G. Pasaoglu, "The lithium-ion battery: State of

- the art and future perspectives," *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, vol. 89, pp. 292–308, 2018.
- [6] A. Pesaran, M. Keyser, G. H. Kim, S. Santhanagopalan and K. Smith, "Lithium-ion batteries for electric vehicles: Thermal issues and mitigation strategies," *SAE Int. J. Altern. Powertrains*, vol. 2, no. 2, pp. 1–10, 2013.
- [7] Y. Wang, X. Zhang, J. Li and B. Wu, "A review of lithium-ion battery thermal management systems and strategies for electric vehicles," *Energy Reports*, vol. 6, pp. 65–91, 2020.
- [8] [R. Zhao, J. Liu and J. Gu, "The effects of thermal management strategies on the cycle life of lithium-ion batteries in electric vehicles," *Applied Energy*, vol. 240, pp. 8–21, 2019.
- [9] X. Feng et al., "Thermal runaway mechanism of lithium-ion battery for electric vehicles: A review," *Energy Storage Materials*, vol. 10, pp. 246–267, 2018.
- [10] T. M. Bandhauer, S. Garimella and T. F. Fuller, "A critical review of thermal issues in lithium-ion batteries," *J. Electrochem. Soc.*, vol. 158, no. 3, pp. R1–R25, 2011.
- [11] M. Akbarzadeh et al., "A comparative study between air cooling and liquid cooling thermal management systems for high-energy lithium-ion battery module," *Energy*, vol. 233, 121108, 2022.
- [12] Thermodynamics Society, "Flow regime in pipes [Figure]," *ThermoFluid Engineering*, Apr. 12, 2020.
- [13] R. D. Moser and P. Moin, "A numerical study of turbulent channel flow at low Reynolds number," *J. Fluid Mech.*, vol. 275, pp. 41–78, 1999.
- [14] H. Schlichting and K. Gersten, *Boundary-Layer Theory*, 8th ed. Berlin, Germany: Springer, 2000, pp. 607–609.
- [15] Y. A. Çengel and M. A. Boles, *Thermodynamics: An Engineering Approach*, 8th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2015.
- [16] D. C. Wilcox, *Turbulence Modeling for CFD*, La Cañada, CA, USA: DCW Industries, 1998.
- [17] H. K. Versteeg and W. Malalasekera, *An Introduction to Computational Fluid Dynamics: The Finite Volume Method*, 2nd ed. Harlow, UK: Pearson Education, 2007.
- [18] Y. Wang and J. Xu, "Effect of airflow distribution on thermal performance in battery thermal management system for electric vehicles," *Applied Thermal Engineering*, vol. 130, pp. 254–261, 2018.
- [19] Z. Li and J. Dong, "Effect of flow velocity and distribution on heat dissipation in a lithium-ion battery pack," *J. Power Sources*, vol. 446, 227324, 2020.

การออกแบบใบพัดบังคับลมโดยใช้การวิเคราะห์ความร้อนและการจำลอง CFD ของ มอเตอร์ DC แบบไร้แปรงถ่านสำหรับรถยนต์พลังงานแสงอาทิตย์ STC-4 Forced Air Design using Thermal Analysis and CFD Simulations of a Brushless DC Motor for the STC-4 Solar Car

วิฑูร หวนโคกสูง* ธรรมรัตน์ แยมสูงเนิน

สาขาเทคโนโลยียานยนต์สมัยใหม่ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม
46 ถนนจรัญสนิทวงศ์ แขวงวัดท่าพระ เขตบางกอกใหญ่ กรุงเทพมหานคร รหัสไปรษณีย์ 10600

Witoon Huankhoksung* Thamarat Yabsungnoen

Department of Modern Automotive Technology, Faculty of Engineering and Technology,
Siam Technology College, Bangkok, 10600, Thailand.

46 Charan Sanit Wong Rd, Khwaeng Wat Tha Phra, Bangkok, 10600, Thailand.

*Corresponding author Email: witoon_hks@live.com

(Received: February 5, 2025; Revised: June 18, 2025 ; Accepted: June 30, 2025)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาผลของการออกแบบใบพัดบังคับลมเพื่อระบายความร้อนของมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรงไร้แปรงถ่าน (BLDC) โดยใช้การวิเคราะห์ความร้อนและการจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคำนวณ (CFD) ผลการจำลองแสดงให้เห็นว่าการติดตั้งใบพัดบังคับลมของอากาศช่วยลดอุณหภูมิในส่วนประกอบต่าง ๆ ของมอเตอร์ โดยอุณหภูมิของขดลวดทองแดงลดลงประมาณ 59% แกนเพลาลดลงประมาณ 47% และอากาศภายในมอเตอร์ลดลงประมาณ 63% ส่งผลให้การระบายความร้อนของมอเตอร์ไฟฟ้าดีขึ้น และลดความเสี่ยงต่อความเสียหายจากอุณหภูมิที่สูงเกินไปอีกด้วย นอกจากนี้ อุณหภูมิของอากาศระหว่างช่องฟันขดลวดตัวนำอยู่กับที่ (Stator Teeth) กับแท่งแม่เหล็กเคลื่อนที่ รวมถึงฝารอบมอเตอร์ ด้านหน้าและด้านหลัง ลดลงประมาณ 17% ซึ่งช่วยรักษาประสิทธิภาพและยืดอายุการใช้งานของมอเตอร์ โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมอเตอร์ทำงานภายใต้ภาระเกินปกติ ผลการวิจัยนี้เป็นแนวทางในการพัฒนาระบบระบายความร้อนของมอเตอร์ BLDC เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและการใช้งานต่อไป

คำสำคัญ: การออกแบบใบพัด, การวิเคราะห์ความร้อน, การจำลอง CFD, มอเตอร์ DC แบบไร้แปรงถ่าน

ABSTRACT

This research studies the effect of an air-forced impeller design for cooling brushless direct current (BLDC) electric motors using thermal analysis and computational fluid dynamics (CFD) simulation. The simulation results show that installing an air-forced impeller reduces the temperature of various motor components. Specifically, the temperature of the copper coils is reduced by approximately 59%, the shaft core by approximately 47%, and the air inside the motor by approximately 63%, resulting in better cooling and reducing the risk of damage from overheating.

Furthermore, the air temperature between the stator teeth and rotor magnets, as well as the front and rear motor covers, is reduced by approximately 17%, which helps maintain efficiency and extend the motor's lifespan, especially under overload conditions. The results of this research provide guidelines for developing BLDC motor cooling systems to improve their efficiency and broaden their applications.

Keyword: Forced Air Design, thermal analysis, CFD simulations, brushless DC motor.

1. บทนำ

พลังงานและมลภาวะทางอากาศเป็นปัญหาสำคัญทั่วโลก [1] ดังนั้นการพัฒนายานยนต์พลังงานทางเลือกจึงมีความจำเป็น รถยนต์พลังงานแสงอาทิตย์ได้รับความสนใจอย่างมากเนื่องจากใช้พลังงานแสงอาทิตย์ ซึ่งเป็นทรัพยากรที่สะอาดและปราศจากมลพิษ [2] วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม ตระหนักถึงความสำคัญนี้และได้พัฒนารถยนต์พลังงานแสงอาทิตย์ที่เรียกว่า "STC" สำหรับการแข่งขัน Bridgestone World Solar Challenge (BWSC) เป้าหมายคือการส่งเสริมนวัตกรรม ส่งเสริมการใช้พลังงานหมุนเวียน และเพิ่มศักยภาพให้สูงสุด นักศึกษาและอาจารย์ในภาควิชาเทคโนโลยียานยนต์สมัยใหม่ ได้สร้างรถยนต์พลังงานแสงอาทิตย์ STC จำนวน 3 รุ่น ซึ่งเผชิญกับความท้าทายจากความร้อนของมอเตอร์ไฟฟ้า โดยมอเตอร์ไฟฟ้าเป็นส่วนประกอบสำคัญที่แปลงพลังงานไฟฟ้าเป็นพลังงานกลเพื่อขับเคลื่อนรถยนต์ [3] โดยเฉพาะอย่างยิ่งรถยนต์พลังงานแสงอาทิตย์ STC-4 มีน้ำหนักมากกว่ารุ่นอื่น ทำให้มอเตอร์ไฟฟ้าต้องทำงานหนักขึ้นและสร้างความร้อนมากกว่าการใช้งานปกติ สิ่งนี้อาจลดประสิทธิภาพของมอเตอร์และอาจทำให้เกิดความเสียหายได้ สาเหตุหลักของความร้อนสะสมในมอเตอร์ไฟฟ้าคือระบบระบายความร้อนที่ไม่มีประสิทธิภาพ ระบบระบายความร้อนที่ได้รับการออกแบบอย่างมีประสิทธิภาพจะช่วยให้อุณหภูมิของมอเตอร์ทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด [4] การออกแบบใบพัดระบายความร้อนบนฝาครอบมอเตอร์จึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการระบายความร้อนอย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะช่วยแก้ไขปัญหาคายความร้อนภายในมอเตอร์ ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีความสนใจใน

การศึกษาการออกแบบใบพัดระบายความร้อนและการวิเคราะห์ความร้อนของมอเตอร์ DC แบบไร้แปรงถ่าน สำหรับรถยนต์พลังงานแสงอาทิตย์ STC-4 เป็นกรณีศึกษาการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแนวทางการระบายความร้อนของมอเตอร์ และวิเคราะห์ผลการออกแบบใบพัดการระบายความร้อนของมอเตอร์

การจำลองพลศาสตร์ของไหลเชิงคอมพิวเตอร์ (CFD) ได้กลายเป็นเครื่องมือสำคัญในการศึกษาพฤติกรรมของอากาศรอบชิ้นส่วนที่หมุนได้ เช่น มอเตอร์ไฟฟ้า โดยเฉพาะอย่างยิ่งในประเด็นเกี่ยวกับการระบายความร้อนและการจัดการพลังงานที่สูญเสียจากการเสียดสีหรือกระแสไหลวนภายในระบบ การวิเคราะห์ CFD สามารถช่วยคาดการณ์อุณหภูมิภายในและรอบตัวมอเตอร์ ซึ่งส่งผลต่อความทนทานและประสิทธิภาพของอุปกรณ์ในระยะยาว หนึ่งในแนวทางที่แพร่หลายในการวิเคราะห์ลักษณะการไหลที่ซับซ้อนในระบบดังกล่าว คือการใช้โมเดลความปั่นป่วนแบบ Standard $k-\epsilon$ ซึ่งได้รับความนิยมเนื่องจากมีความเสถียรและประสิทธิภาพในการประมวลผลกรณีที่มีการไหลแบบปั่นป่วนเต็มรูปแบบ (fully turbulent flow) โดยเฉพาะในระบบปิดหรือกรณีที่เรขาคณิตมีความซับซ้อน เช่น มอเตอร์ไฟฟ้าที่มีช่องระบายอากาศ ร่องระบายความร้อน และการหมุนรอบแกน

จากงานวิจัยของ Jang et al. [5] ได้ทำการจำลองการหมุนของโรเตอร์ในมอเตอร์ไฟฟ้ากระแสตรง (DC motor) พร้อมกับการปล่อยพลังงานความร้อนจากการสูญเสียในขดลวดใช้โมเดล Standard $k-\epsilon$ เพื่อวิเคราะห์พฤติกรรมของการไหลและอุณหภูมิในโพรงของมอเตอร์

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าบริเวณปลายโรเตอร์และช่องระบายอากาศมีการสะสมความร้อนสูง ซึ่งจำเป็นต้องออกแบบโครงสร้าง เพื่อเสริมประสิทธิภาพการระบายความร้อน จากงานวิจัยของ Kim and Lee [6] ได้พัฒนาแบบจำลอง CFD ที่รวมการหมุนของชิ้นส่วนด้วยฟังก์ชัน Rotating Region เพื่อคำนวณผลของการหมุนต่อความเร็วลมและอัตราการถ่ายเทความร้อน โดยใช้โมเดล Standard $k-\epsilon$ ในกรณีของมอเตอร์ที่ติดตั้งในกล่องปิด การศึกษานี้ระบุว่า ความปั่นป่วนที่เกิดขึ้นภายใน เนื่องจากการหมุนของโรเตอร์ช่วยเพิ่มอัตราการแลกเปลี่ยนความร้อนแบบ Convective ได้อย่างมีนัยสำคัญในบริบทของมอเตอร์ที่ใช้งานในสภาพแวดล้อมที่อากาศภายนอกมีบทบาท เช่น การระบายความร้อนผ่าน external airflow และของงานวิจัยของ Zhou et al. [7] ได้ทำการจำลองมอเตอร์ขณะหมุนภายใต้ลมที่ไหลจากภายนอกโดยใช้โมเดล Standard $k-\epsilon$ พร้อม boundary condition แบบ external inlet-outlet flow พบว่าการจัดวางช่องระบายอากาศและรูปทรงของ housing ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่ออุณหภูมิสูงสุดของระบบ

จากงานวิจัยดังกล่าวโมเดล Standard $k-\epsilon$ จะมีข้อได้เปรียบในเรื่องของความเสถียรและเวลาคำนวณต่ำ แต่ก็มีข้อจำกัดในกรณีที่มี separation flow หรือ vortex ขนาดเล็กที่ต้องการความละเอียดสูง ซึ่งในอนาคตอาจมีการเปรียบเทียบกับโมเดลที่ละเอียดกว่า เช่น Realizable $k-\epsilon$ หรือ SST $k-\omega$

2. ทฤษฎีและวิธีดำเนินการวิจัย

การออกแบบใบพัดระบายความร้อนและการวิเคราะห์ความร้อนของมอเตอร์ DC แบบไร้แปรงถ่านสำหรับรถยนต์พลังงานแสงอาทิตย์ STC-4 ผู้วิจัยได้ศึกษาเกี่ยวกับทฤษฎีที่เกี่ยวข้องและงานวิจัย

2.1 การออกแบบ

ดังนั้นผู้วิจัยได้ศึกษาจากสมการควบคุมกำเนิดความร้อนเชิงปริมาตร และสมการควบคุมสมดุลพลังงานในการ

จำลองการไหลของ SolidWorks Flow Simulation [8] โดยมีพื้นฐานมาจากกฎข้อที่หนึ่งของเทอร์โมไดนามิกส์ ซึ่งระบุว่า การเปลี่ยนแปลงพลังงานของระบบจะเท่ากับพลังงานที่เพิ่มเข้ามาจากเปลี่ยนแปลงรูปพลังงาน ดังสมการที่ 1 [9]

$$\rho c_p \frac{\partial T}{\partial t} = \nabla \cdot (k \nabla T) + q_v \quad (1)$$

โดย ρ คือความหนาแน่นของวัสดุ (kg/m^3)

c_p คือค่าความจุความร้อนจำเพาะ ($\text{J/kg} \cdot \text{K}$)

T คืออุณหภูมิของวัสดุ ณ ขณะนั้น (K)

k คือค่าการนำความร้อน ($\text{W/m} \cdot \text{K}$)

q_v คืออัตราการการเพิ่มความร้อนต่อปริมาตร (W/m^3)

∇ คือ Gradient operator

t คือเวลา (s)

แต่ในที่นี้การคำนวณเป็นแบบคงตัว (Steady State) ซึ่งไม่ขึ้นกับเวลาและการกำหนดพลังงานความร้อนเป็นแบบ Dirichlet boundary condition คือการกำหนดค่าเป็นอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียสเพราะฉะนั้นจากสมการที่ 1 จึงลดเทอมลงเหลือเป็นสมการที่ 2

$$\nabla \cdot (k \nabla T) = 0 \quad (2)$$

เบื้องหลังของสมการที่ 2 คือระบบจะเพิ่มพลังงานให้กับทองแดงจนได้ค่าอุณหภูมิที่เท่ากับที่ถูกกำหนดไว้ในความเป็นจริงการถ่ายเทความร้อนมีการหมุนของมอเตอร์ ส่งผลทำให้เกิดการพาความร้อน โดยสมการที่ใช้เป็นดัง สมการที่ 3 [10]

$$-k \frac{\partial T}{\partial n} = h(T_{\text{surface}} - T_{\infty}) \quad (3)$$

โดย $\frac{\partial T}{\partial n}$ คือ Temperature gradient

h คือสัมประสิทธิ์ค่าการพาความร้อน

$$(W/m^2 \cdot K)$$

$T_{surface}$ คืออุณหภูมิผิวของวัสดุ (K)

T_{∞} คืออุณหภูมิของสภาพแวดล้อม (K)

เนื่องจากการหมุนของมอเตอร์มีความเกี่ยวข้องกับอากาศพลศาสตร์โดยตรงเพราะฉะนั้นสมการควบคุมที่ใช้คือ Navier-Stokes ที่มีการปรับเปลี่ยนที่เกี่ยวข้องกับระบบการหมุน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการกล่าวถึงผลกระทบของการหมุนและการไหลของอากาศอันเนื่องมาจากรูปร่างตัวเรือนของมอเตอร์ ดังนั้นเมื่อมีการควบคุมเชิงปริมาตรของระบบที่กำหนดจะได้ว่าการเปลี่ยนแปลงอัตราการไหลของอากาศเป็นศูนย์ในสภาวะคงตัว จัดว่าอากาศเป็นของไหลที่อัดไม่ได้ ซึ่งทำให้ได้ สมการที่ 4

$$\nabla \cdot V = 0 \quad (4)$$

โดย V คือเวกเตอร์ความเร็วของอากาศ

จากสมการควบคุมพฤติกรรมของอากาศรอบมอเตอร์สามารถจะอธิบายได้ โดยการใช้สมการ Navier-Stokes ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับความสัมพันธ์ กับแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลาง และสุดท้ายคือแรงโคริโอลิส ดังสมการที่ 5 [11]

$$\rho \left(\frac{\partial V}{\partial t} + V \cdot \nabla V \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 V + F_{body} \quad (5)$$

โดย ρ คือความหนาแน่นของอากาศซึ่งในที่นี้มีค่าคงที่ในสภาวะคงตัว(kg/m^3)

p คือความดันอากาศ (Pa)

μ คือพลศาสตร์ความหนืดของอากาศ
($N \cdot s/m^2$)

F_{body} คือแรงรวมของพฤติกรรมอากาศที่อยู่รอบมอเตอร์ในขณะที่หมุนซึ่งได้แก่แรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางและแรงโคริโอลิส โดยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางสามารถอธิบายได้ตาม สมการที่ 6 และแรงโคริโอลิสสามารถคำนวณได้ตาม สมการที่ 7

$$F_{Centrifugal\ force} = \rho \omega^2 r \quad (6)$$

โดย ω คือความเร็วเชิงมุม (rpm)

r คือรัศมีของมอเตอร์ (m)

$$F_{Coriolis\ force} = -2\rho(\omega \times V) \quad (7)$$

ในกรณีที่มอเตอร์ถูกทำให้มีรูสำหรับนำอากาศเข้าไปจะเป็นผลโดยตรงจากความแตกต่างระหว่างความดันข้างในมอเตอร์และความดันด้านนอกของมอเตอร์ซึ่งมีความเร็วของอากาศที่เข้า-ออกภายในมอเตอร์ สามารถอธิบายได้ตาม สมการที่ 8

$$V_{hole} = \sqrt{\frac{2\Delta p}{\rho}} \quad (8)$$

โดยมีเงื่อนไขเริ่มต้นของการคำนวณสามารถอ้างอิงได้จากตารางที่ 1

2.2 การตั้งค่าการจำลอง (Simulation Setup)

การกำหนดขนาดของต้นแบบและการแบ่งพื้นที่การจำลองตามรูปที่ 1 และจากตารางที่ 1 คือการจำลองสภาพแวดล้อมสำหรับมอเตอร์ โดยมอเตอร์ถูกกำหนดไว้ให้หมุนความเร็วเชิงมุม 900 รอบต่อนาที ในสภาพความดันบรรยากาศปกติและเปิดโล่งอุณหภูมิของอากาศเริ่มต้นและอุณหภูมิเริ่มต้นของทุกชิ้นส่วนที่ 20 องศาเซลเซียส โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนขึ้นกับพฤติกรรมอากาศในขณะที่มอเตอร์หมุน โดยการกำหนดขนาดความเข้มข้นการไหลปั่นป่วนอยู่ที่ 0.02 ชิ้นส่วนของขดลวดทองแดงและช่องฟันขดลวดตัวนำอยู่กับที่ (Stator Teeth) ถูกกำหนดในขอบเขตให้เป็นชิ้นส่วนขดลวดตัวนำอยู่กับที่ (Stator) โดยไหลทิศทางความร้อนถูกกำหนดที่ขดลวดทองแดง แบบเชิงปริมาตรด้วยขนาด 275 วัตต์ (กำหนดจากการอุณหภูมิสูงสุดที่มอเตอร์ทำงานได้) โดยการคำนวณในที่นี้ ไม่คิดผลเรื่องแรงเสียดทานจากการสัมผัสของชิ้นส่วน ซึ่งมีรายละเอียดของมอเตอร์ สามารถแสดงได้รูปที่ 1 ซึ่งได้จากการควบคุมการหมุนเชิง

ปริมาตรที่มีเพียงชิ้นส่วนฝาครอบมอเตอร์เท่านั้นที่หมุน โดยผลลัพธ์ของการจำลองการไหลของอากาศและความร้อนของมอเตอร์ที่ยังไม่ได้ทำรูนั้นจะถือว่าเป็นตัวชี้วัดของมอเตอร์ที่เจาะรู เพื่ออาศัยการไหลของอากาศในการระบายความร้อนออกจากด้านใน

จากตารางที่ 1 คือรายละเอียดของการกำหนดวัสดุในชิ้นส่วนต่าง ๆ ของมอเตอร์ซึ่งมีคุณสมบัติต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องในการถ่ายเทความร้อน เช่น ความจุความร้อนและความหนาแน่นของวัตถุและตารางที่ 2 คุณสมบัติของมอเตอร์

ตารางที่ 1 เงื่อนไขและขอบเขตหลักของจำลองมอเตอร์

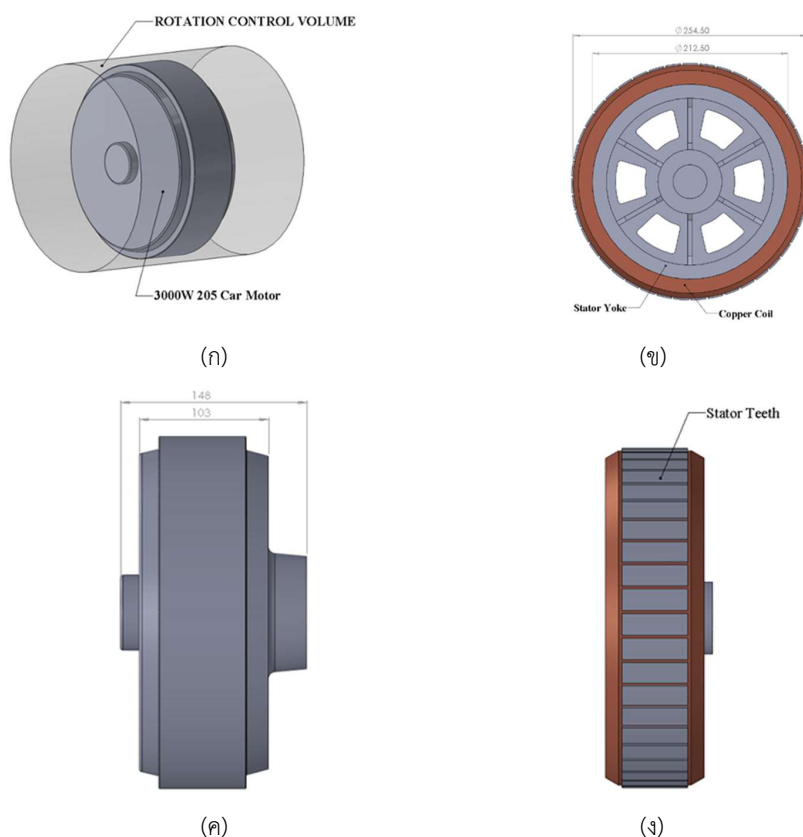
เงื่อนไขและขอบเขต	ค่าตัวเลขและชิ้นส่วนที่ถูกตั้งขอบเขต
- อัตราความเร็วเชิงมุม (ω)	900 RPM (หมุนทวนเข็มนาฬิกา)
- ความดันสภาพแวดล้อม	1 atm
- อุณหภูมิของอากาศ	293°K
- อุณหภูมิของเริ่มต้นของทุกชิ้นส่วน	293 °K
- โหลดทางความร้อนเริ่มต้นของทองแดง (W)	275 W
- การกำหนดชิ้นส่วนขดลวดตัวนำอยู่กับที่ (Stator)	แกนอลูมิเนียมและขดลวดทองแดง
- ค่าสัมประสิทธิ์การพาความร้อนและนำความร้อน	ขึ้นกับวัสดุที่กำหนดและคุณสมบัติอากาศ
- ระดับความเข้มข้นของการไหลปั่นป่วน (Turbulent intensity)	0.02
- Turbulent length scale	0.003 เมตร
- กำหนดชิ้นส่วนอลูมิเนียม	เปลือกมอเตอร์, Stator yoke, Stator Teeth
- กำหนดชิ้นส่วนทองแดง	Copper Coil

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของมอเตอร์

Motor Type	DC Brushless Motor
Power	3000 W
Voltage Range	72 V
Working Temperature	70 °C
Net Weight	16 kg
Unit Packing Size	34 x 34 x 33 cm

ด้านหลังของฝาครอบมอเตอร์ ซึ่งเรียกการเจาะรูนี้เป็นรูปร่างลักษณะใบมีด เมื่อมอเตอร์ทำงานพื้นที่ใบมีดจะทำหน้าที่ในการบังคับอากาศไหลเข้าในตัวมอเตอร์ ซึ่งทำให้อากาศหลังจากแลกเปลี่ยนความร้อนแล้วจะไหลออกอีกด้านหนึ่ง ซึ่งใบมีดด้านขาออกจะมีทิศการเอียงตรงข้ามกับทางเข้า เป็นการบังคับให้อากาศไหลออก

จากรูปที่ 2 คือโมเดลของมอเตอร์ (3000W Car Motor) ที่ทำการออกแบบเจาะรูเพียงทั้งด้านหน้าและ

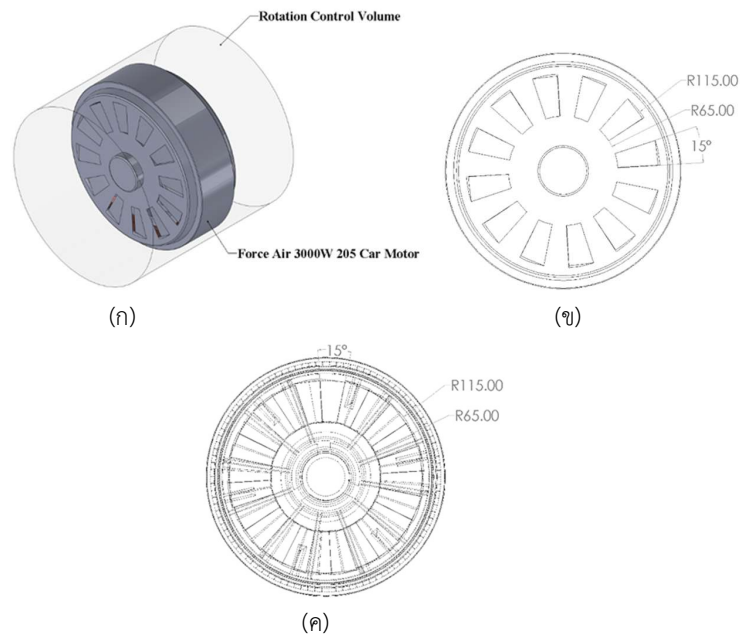


รูปที่ 1 (ก) การกำหนดควบคุมการหมุนเชิงปริมาตรมอเตอร์ (ข) ขนาดของขดลวดทองแดงและโครงยึดขดลวด
ตัวนำอยู่กับที่ (ค) ขนาดความกว้างของฝาครอบมอเตอร์ และ(ง) รายละเอียดของช่องฟันขดลวดตัวนำอยู่กับที่
กับขดลวดทองแดง

โดยผลลัพธ์ของการจำลองการไหลของอากาศและความร้อนของมอเตอร์ที่ใบพัดจะถูกเปรียบเทียบกับตัวชี้วัด เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพ ให้มีความแม่นยำของผลลัพธ์ของการจำลองการไหลของอากาศและความร้อนด้วยวิธีการไฟไนต์เอลิเมนต์ขึ้นอยู่กับรอบการคำนวณสามารถทำให้ค่าตอบลู่เข้าค่าสถิติ ค่าที่ลู่เข้านั้นมีผลมาจากจำนวนตาราง หรือกริดที่แบ่งในโปรแกรมจำลองซึ่งหากกริด มีจำนวนมากจะทำให้รอบของการคำนวณนั้นมากขึ้น นั้นหมายถึงผลการจำลองก็ลู่เข้าค่าสถิติได้มากขึ้น ซึ่งตามการแบ่งกริดการคำนวณนั้น จะต้องเริ่มจากจำนวนกริดน้อยจนไปถึงจำนวนกริดที่กำหนดค่ามีการเปลี่ยนแปลงต่อให้เพิ่มจำนวนกริดที่กำหนด โดยมอเตอร์

ต้นแบบเป็นตัวชี้วัด ใช้จำนวนกริด ทั้งหมด 3,296,844 (กริดของไหลจำนวน 1,595,716 เซลล์ และกริดของแข็ง 1,701,128 เซลล์) จำนวนรอบการคำนวณ จำนวน 933 รอบมอเตอร์ใบพัดใช้จำนวน กริดทั้งหมด 3,390,620 กริด (กริดของไหลจำนวน 1,649,880 เซลล์ และกริดของแข็ง 1,740,740 เซลล์) จำนวนรอบการคำนวณ จำนวน 946 รอบ รวมถึงตัวอย่างของต้นแบบที่ถูกแบ่งจำนวนกริดและผลการจำลองที่ลู่เข้าได้ค่าสถิติ (คงที่) แสดงได้ดังรูปที่ 3 ผลจากการจำลองการไหลและการถ่ายเทความร้อนของมอเตอร์ทั้งสองจะถูกนำมาวิเคราะห์ผล โดยสรุปข้อมูลเปรียบเทียบดังตารางที่ 3

อย่างไรก็ตามผลจากการจำลองครั้งนี้ได้การแบ่งเซลล์ (Near-Wall refinement) โดยขึ้นอยู่กับค่า Global และแบบวิธีการ Cartesian-based CFD Code ที่ไม่มีการ Layer Mesh Refinement ที่ผู้วิจัยได้กำหนดไว้ล่วงหน้า สร้าง Boundary layer Mesh แบบเฉพาะเจาะจง โดยเฉพาะบริเวณผิวที่มีการสัมผัสระหว่างของแข็งและของไหลซึ่งมีอัตราการถ่ายเทความร้อนสูง (Inflation Layer) แต่มีการ Refinement บริเวณผิววัตถุ



รูปที่ 2 (ก) ภาพรวมของมอเตอร์หลังจากทำใบพัดที่ฝาดรอบมอเตอร์ (ข) ขนาดความกว้างของใบพัด และ(ค) ระยะห่างของรูด้านหลังฟามอเตอร์หน้า

ตารางที่ 3 เปรียบเทียบลักษณะของโมเดลที่ 1 และโมเดลที่ 2

คุณสมบัติของโมเดล	โมเดล 1	โมเดล 2
ลักษณะเปลือกของมอเตอร์	เรียบ	รูเจาะ
ปริมาณของกริดของแข็ง (เซลล์)	1,595,716	1,649,880
ปริมาณของกริดของไหล (เซลล์)	1,701,128	1,740,740
จำนวนรอบการคำนวณ	933	946
จำนวนรูใบพัด	-	12
องศาจากจุดศูนย์กลาง	-	15 องศา
รัศมีภายใน (mm)	-	65
รัศมีภายนอก	-	115
มุมเอียงของการเจาะ	-	15 องศา

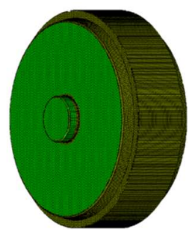
3. ผลการวิจัยและอภิปราย

3.1 ตัวชี้วัด

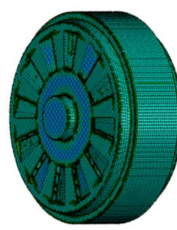
ผลจากการจำลองอุณหภูมิและของไหลที่เกิดขึ้นเป็นค่าที่วัด ณ ตำแหน่งนั้น ๆ ไม่ใช่ค่าเกิดที่เกิดจากการเฉลี่ยค่ามากที่สุดหรือน้อยสุด รวมถึงพื้นที่แสดงระดับทางปริมาณต่าง ๆ ที่นำเสนอต่อไปนี้

จากรูปที่ 4 (ก) แสดงพฤติกรรมการไหลของอากาศรอบมอเตอร์ในสภาวะคงที่ พบว่าอากาศเกิดการไหลเข้ามาทั้งสองฝั่งของมอเตอร์อากาศถูกเหวี่ยงออกจากด้านข้างของมอเตอร์ ซึ่งยืนยันผลจากรูปที่ 4 (ข) ซึ่งแสดงเวกเตอร์ของอากาศที่ถูกเหวี่ยงออกด้านข้างใน รูปที่ 4 (ค) สามารถเห็นเวกเตอร์อากาศที่เข้ามาทั้งสองฝั่งและมีทิศทางพุ่งออกจากมอเตอร์ โดยความเร็วสูงสุดของอากาศอยู่ที่ 13.195 เมตรต่อวินาที ซึ่งเกิดขึ้นภายในมอเตอร์และความเร็ว

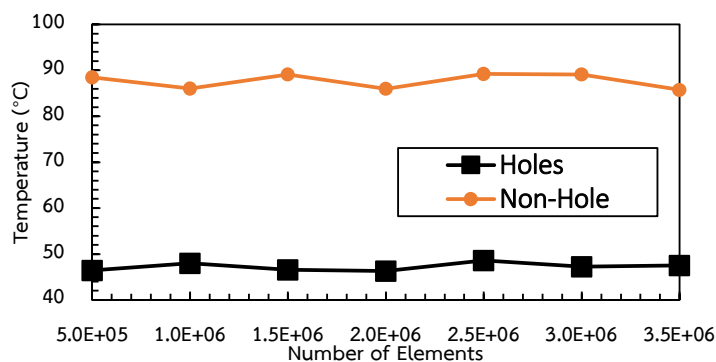
อากาศที่ผิวมอเตอร์จะอยู่ที่ 4.507-3.059 เมตรต่อวินาที ในด้านการกระจายตัวของอุณหภูมิในสภาวะคงที่ผลจากการจ่ายไฟฟ้า 2750 วัตต์ภายใต้การทำงานเกินพิกัดในรูปที่ 5 (ก) อุณหภูมิของชิ้นส่วนภายในขดลวดทองแดงจะมีอุณหภูมิสูงสุด 118.42 องศาเซลเซียส โดยแกนเพลามอเตอร์เท่ากับ 68.05 องศาเซลเซียส ส่วนอุณหภูมิของอากาศภายในมอเตอร์ 63.81 องศาเซลเซียส ถึง 52.87 องศาเซลเซียส อุณหภูมิของอากาศระหว่างช่องพันขดลวดตัวนำ กับแม่เหล็กอยู่ที่ 57.93 องศาเซลเซียส ซึ่งจะเห็นได้ว่าประสิทธิภาพการทำงานของแม่เหล็กจะลดลงเนื่องจากอุณหภูมิที่สูงกว่า 55 องศาเซลเซียส การที่อุณหภูมิของทองแดงเพิ่มขึ้นจนใกล้ 120 องศาเซลเซียส มีความเสี่ยงที่ระบบของมอเตอร์ซึ่งตัดการทำงานและทำให้ประสิทธิภาพตัวนำมีค่าลดลง



(ก)

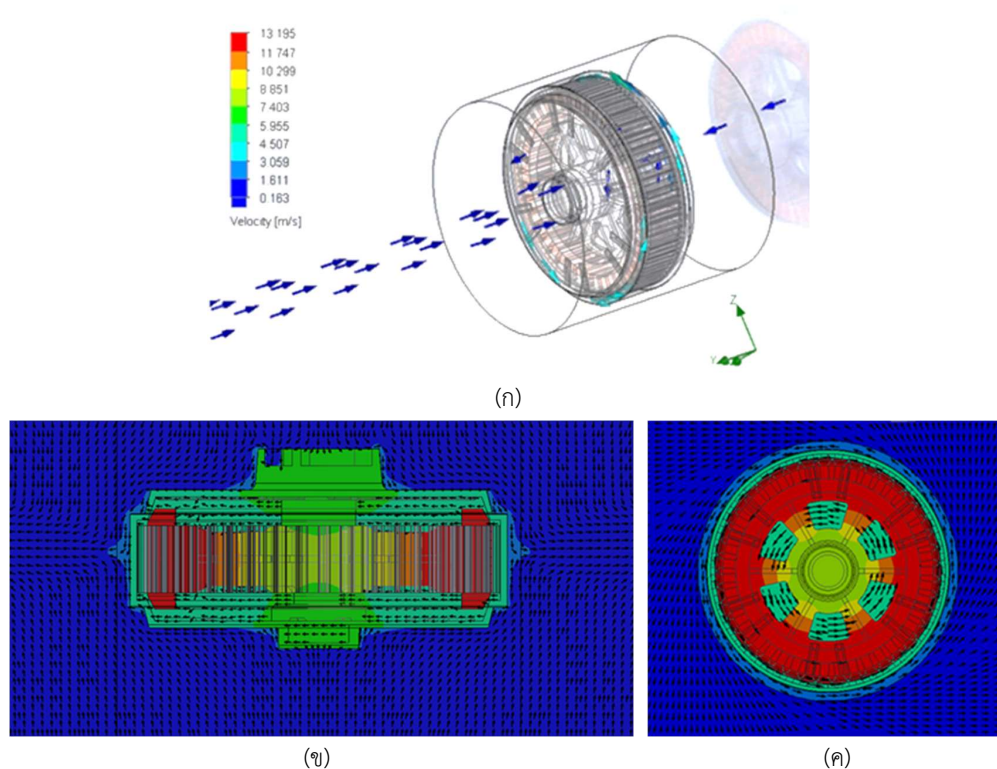


(ข)



(ค)

รูปที่ 3 (ก) การแบ่งกริดบนมอเตอร์ 3000 W 205 Car Motor (ข) การแบ่งกริดบนมอเตอร์ 3000 W 205 Car Motor ที่ทำใบพัดสำหรับบังคับลมเข้า (ค) จำนวนรอบการคำนวณเพื่อทำให้คำตอบจากการจำลองลู่เข้าของคำตอบ



รูปที่ 4 (ก) พฤติกรรมการไหลของอากาศผ่านปริมาตรควบคุมการหมุน (ข) ภาพฉายเวกเตอร์ของอากาศด้านหน้ามอเตอร์ และ(ค) ภาพฉายเวกเตอร์ของด้านบนของมอเตอร์

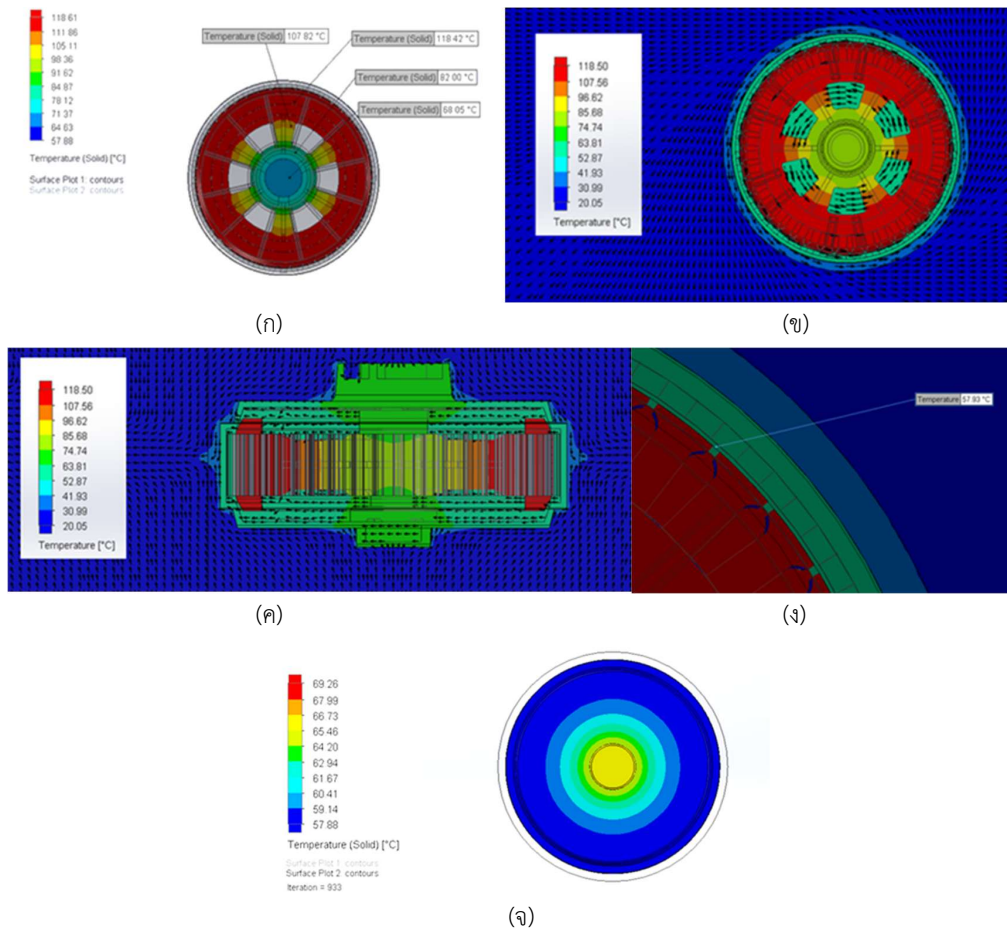
3.2 มอเตอร์ที่เจาะรูนำบังคับอากาศเข้า

จากการจำลองการไหลและการทำความร้อนของตัวซีวีดมอเตอร์ ทำให้เห็นถึงกระบวนการของการระบายความร้อน เนื่องจากการรับโหลดเกินปกติ ส่งผลทำให้ประสิทธิภาพของมอเตอร์ลดลง เนื่องจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นของขดลวดทองแดงที่สะสม ดังนั้นจึงมีการหาวิธีการแก้ไขโดยการทำใบพัดบังคับลมให้ระบายความร้อนภายในของมอเตอร์ ในรูปที่ 6 (ก) พฤติกรรมการไหลของอากาศด้านหน้าของมอเตอร์สังเกตได้จากเวกเตอร์ของอากาศไหลผ่านรูเจาะด้วยความเร็ว 0.945 ถึง 1.897 เมตรต่อวินาที ในรูปที่ 6 (ข) และรูปที่ 6 (ค) หลังจากอากาศผ่านใบพัดความเร็วเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วเป็น 4.713 เมตรต่อวินาที ถึง 8.481 เมตรต่อวินาที ซึ่งลักษณะการไหลเป็นแบบหมุนวน จากรูปที่ 6 (ง) ความเร็วของอากาศลดลงเหลือ 2.829 เมตรต่อวินาที การนำอากาศเข้าไปในตัว

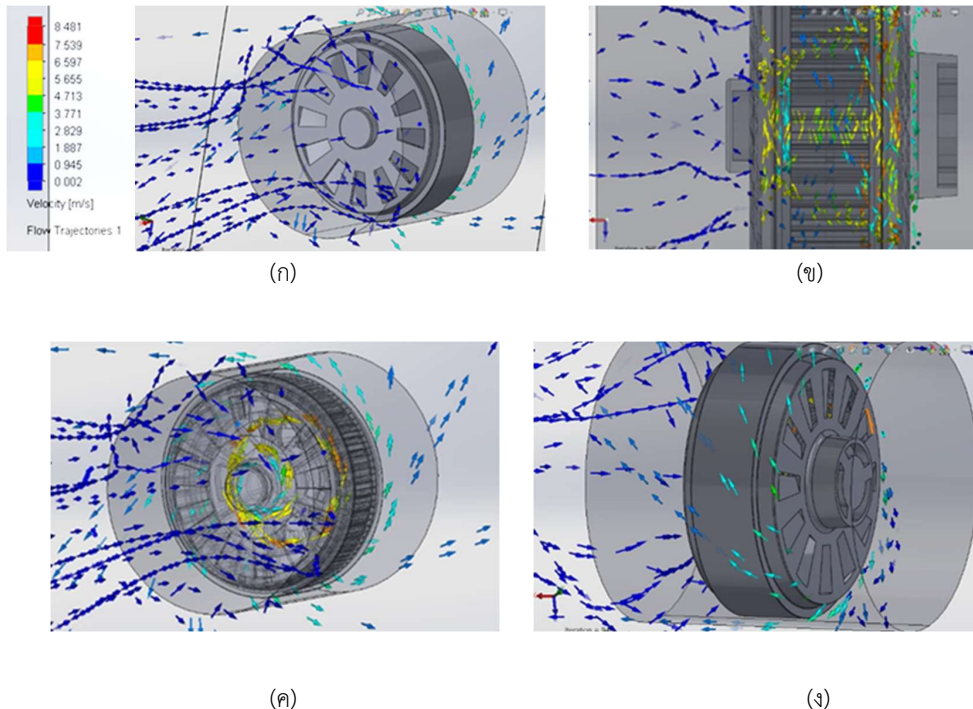
มอเตอร์สามารถถ่ายเทความร้อนออกจากชิ้นส่วนภายในได้อย่างมีประสิทธิภาพซึ่งสามารถดูได้จากรูปที่ 7 (ก) อุณหภูมิของขดลวดทองแดงจาก 118.50 องศาเซลเซียสเหลือ 48.27 องศาเซลเซียส อุณหภูมิของแกนเพลาลดลงเหลือ 35.96 องศาเซลเซียส อุณหภูมิของอากาศด้านในเหลือ 23.65 องศาเซลเซียส ในรูปที่ 7 (ง) อุณหภูมิของอากาศระหว่างช่องฟันขดลวดตัวนำ และแม่เหล็กอยู่ที่ 48.05 องศาเซลเซียส โดยภาพรวมของอุณหภูมิชิ้นส่วนภายในลดลงอย่างชัดเจนซึ่งช่วยรักษาประสิทธิภาพของมอเตอร์ให้สามารถทำงานได้นานขึ้นภายใต้สภาวะโหลดเกินปกติ จากรูปที่ 7 (ข) กับรูปที่ 7 (ค) คือการยืนยันการไหลของอากาศของอากาศที่ผ่านใบพัดซึ่งสังเกตได้จากทิศทางของเวกเตอร์อากาศ ในรูปที่ 8 (ก) คือการกระจายตัวของอุณหภูมิของฝารอบมอเตอร์ด้านหน้าโดยอุณหภูมิอยู่ระหว่าง 34.85 – 30.20 องศาเซลเซียส และรูปที่ 8

(ค) คือการกระจายตัวของอุณหภูมิของฝาครอบมอเตอร์ด้านหลังซึ่งมีอุณหภูมิระหว่าง 36.18 - 32.86 องศาเซลเซียส เมื่อพิจารณาพร้อมกับรูปที่ 8 (ข) จะสามารถสังเกตรูปแบบการกระจายอุณหภูมิของฝาครอบมอเตอร์ โดยด้านหน้าอุณหภูมิของมอเตอร์จะต่ำกว่าด้านหลัง เนื่องจากด้านหลังได้รับการถ่ายความร้อนจากอากาศที่ผ่านการแลกเปลี่ยนความร้อนกับขดลวดทองแดง สุดท้ายจากรูปที่ 9 การสร้างใบพัดบังคับอากาศสามารถทำให้อากาศไหลผ่านการควบคุมการหมุนเชิงปริมาตรโดย

อากาศไหลเข้าผ่านช่องใบพัดทางเข้าได้เท่ากับ 0.0044 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที และด้านหลังอากาศก็มีการไหลเข้าเช่นเดียวกันโดยมีค่าเท่ากับ 0.0273 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที สิ่งที่น่าสนใจอากาศไม่สามารถไหลเข้าได้ในช่องใบพัดด้านหลัง โดยอากาศทั้งหมดจะถูกเหวี่ยงออกจากการควบคุมการหมุนเชิงปริมาตรด้วยอัตราอากาศไหล 0.0314 ลูกบาศก์เมตรต่อวินาที ซึ่งเป็นไปตามกฎอนุรักษ์มวลตามสมการที่ 4



รูปที่ 5 (ก) พื้นที่อุณหภูมิของชิ้นส่วนภายในมอเตอร์ (ข) พื้นที่อุณหภูมิของชิ้นส่วนภายในรวมถึงอุณหภูมิของอากาศ ณ ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของความหนาของมอเตอร์ (ภาพด้านหน้า) (ค) พื้นที่อุณหภูมิของชิ้นส่วนภายในรวมถึงอุณหภูมิของอากาศ ณ ตำแหน่งครึ่งหนึ่งของความกว้างมอเตอร์ (ง) อุณหภูมิของอากาศระหว่างแม่เหล็กและช่องพันขดลวดตัวนำอยู่ใกล้กับที่ (จ) พื้นที่อุณหภูมิของฝาครอบมอเตอร์



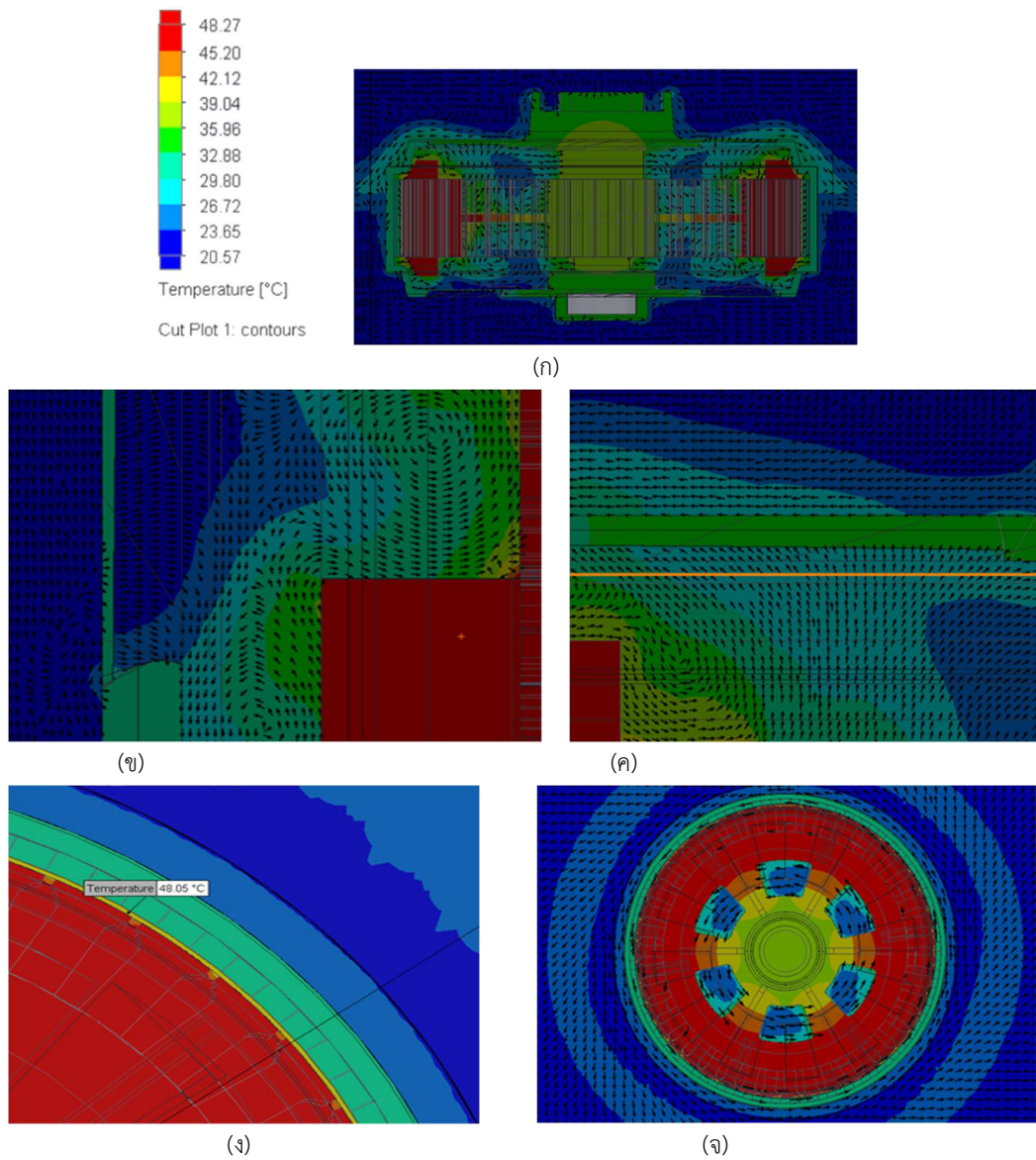
รูปที่ 6 (ก) การไหลของอากาศเข้าสู่มอเตอร์ผ่านช่องว่างของใบพัด (ข) การไหลของอากาศออกจากตัวมอเตอร์ผ่านช่องว่างของใบพัดด้านหลัง (ค) พฤติกรรมการไหลของอากาศภายในมอเตอร์ในมุมมอง Isometric และ(ง) พฤติกรรมการไหลของอากาศภายในมอเตอร์ในมุมมองด้านข้าง

4. สรุปผลการวิจัย

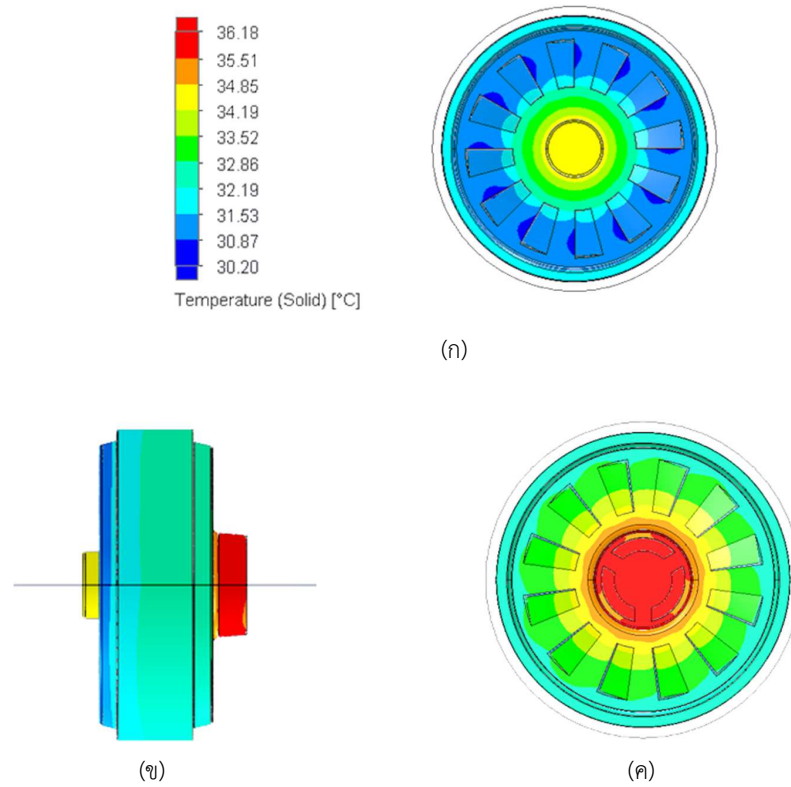
ผลจากการศึกษาการออกแบบใบพัดบังคับลมโดยใช้การวิเคราะห์ความร้อนและการจำลอง CFD ของมอเตอร์ DC แบบไร้แปรงถ่าน จากการจำลองพบว่า การติดตั้งใบพัดบังคับการไหลของอากาศช่วยลดอุณหภูมิของขดลวดทองแดงได้ประมาณ 59% ส่วนแกนเพลาลดลงได้ประมาณ 47% และอากาศภายในลดลงได้ประมาณ 63% ส่งผลทำให้การระบายความร้อนของมอเตอร์ไฟฟ้าดีขึ้น และลดความเสี่ยงต่ออุณหภูมิที่สูงขึ้นเกินพิกัด นอกจากนี้ อุณหภูมิของอากาศระหว่างช่องพันขดลวดตัวนำอยู่ใกล้กับแท่งแม่เหล็กเคลื่อนที่ รวมถึงฝาครอบมอเตอร์ด้านหน้า

และด้านหลัง สามารถลดอุณหภูมิลงได้ประมาณ 17% เป็นผลทำให้ประสิทธิภาพและการใช้งานของมอเตอร์ภายใต้ภาระเกินพิกัดได้ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาระบายความร้อนของมอเตอร์ชนิดต่าง ๆ ต่อไป

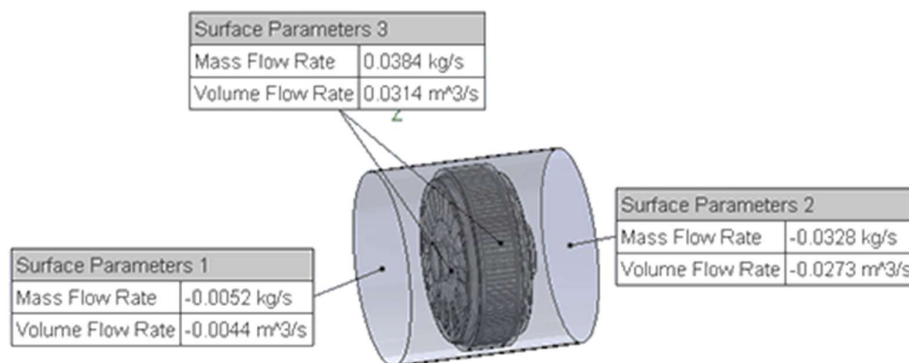
อย่างไรก็ตามผลการจำลองแม้ว่าจะถูกต้องตามการคำนวณวิธีระเบียบไฟไนต์อีลิเมนต์แต่ยังต้องรอผลทดสอบจริงเพื่อยืนยันผลจริง ทั้งนี้ขอบเขตของงานวิจัยนี้คือการออกแบบเป็นหลักเพื่อศึกษาแนวทางในการลดอุณหภูมิของมอเตอร์ก่อนที่จะนำไปสร้างจริง



รูปที่ 7 (ก) พื้นที่อุณหภูมิขึ้นส่วนและอากาศพร้อมภาพฉายเวกเตอร์ของด้านบนของมอเตอร์ภาพด้านบน (ข) เวกเตอร์การไหลของอากาศในบริเวณใบพัดขาเข้า (ค) เวกเตอร์การไหลของอากาศในบริเวณใบพัดขาออก (ง) อุณหภูมิของอากาศระหว่างแม่เหล็กและช่องฟันขดลวดตัวนำอยู่กับที่ และ(จ) พื้นที่อุณหภูมิขึ้นส่วนและอากาศพร้อมภาพฉายเวกเตอร์ของด้านบนของมอเตอร์ภาพด้านบน



รูปที่ 8 (ก) ภาพด้านหน้าอุณหภูมิจากคอมเพรสเซอร์ (ข) ภาพด้านข้างอุณหภูมิจากคอมเพรสเซอร์ (ค) ภาพด้านหลังอุณหภูมิจากคอมเพรสเซอร์



รูปที่ 9 อัตราการไหลเชิงมวลและเชิงปริมาตรผ่านการควบคุมการหมุนเชิงปริมาตร

5. กิตติกรรมประกาศ

ผู้เขียนขอขอบคุณ สาขาเทคโนโลยียานยนต์สมัยใหม่ คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี วิทยาลัยเทคโนโลยีสยาม ที่ให้การสนับสนุนสถานที่และอุปกรณ์ในการดำเนินการวิจัยในครั้งนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] International Energy Agency, *World Energy Outlook 2022*. Paris, France: IEA Publications, 2022.
- [2] [S. Shafiee and E. Topal, “When will solar cars become commercially available,” *Energy Policy*, vol. 37, no. 1, pp. 113–119, Jan. 2009.
- [3] [J. R. Hendershot and T. J. E. Miller, *Design of Brushless Permanent-Magnet Motors*. Madison, WI, USA: Motor Design Books LLC, 2011.
- [4] X. Yu, Y. Zhang, J. Wang and Y. Guo, “Thermal analysis and optimization of a permanent magnet synchronous motor for electric vehicle application,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 86, pp. 129–138, 2015.
- [5] H. Jang *et al.*, “Thermal-fluid analysis of rotating electric motors using CFD with heat source modelling,” *Appl. Therm. Eng.*, vol. 150, pp. 45–53, 2019.
- [6] S. Kim and D. Lee, “Numerical investigation of cooling characteristics in an enclosed electric motor with internal heat generation,” *J. Mech. Sci. Technol.*, vol. 35, no. 4, pp. 1293–1302, 2021.
- [7] L. Zhou *et al.*, “External airflow cooling of high-speed electric machines using CFD simulation,” *Energy Convers. Manage.*, vol. 209, p. 112621, 2020.
- [8] T. Gammaidoni, J. Zembi, M. Battistoni, G. Biscontini and A. Mariani, “CFD analysis of an electric motor's cooling system: Model validation and solutions for optimization,” *Case Stud. Therm. Eng.*, vol. 49, p. 103349, Sept. 2023, doi: 10.1016/j.csite.2023.103349.
- [9] Y. A. Çengel and A. J. Ghajar, *Heat and Mass Transfer: Fundamentals & Applications*, 5th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2015.
- [10] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman and A. S. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 8th ed. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2017.
- [11] F. M. White, *Fluid Mechanics*, 8th ed. New York, NY, USA: McGraw-Hill Education, 2016.

ระบบตรวจจับเรือในแม่น้ำเจ้าพระยาด้วยเทคนิค YOLOv7 Boat Detection System in the Chao Phraya River Using YOLOv7 Techniques

สรารวุฒิ สายทวี^{1*} สมชาติ จิรวิภากร²

¹สาขาวิชาวิศวกรรมป้องกันประเทศ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ลาดกระบัง, กรุงเทพมหานคร 10520

²สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า, คณะวิศวกรรมศาสตร์, สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ลาดกระบัง, กรุงเทพมหานคร 10520

Sarawut Saitawee^{1*} Somchat Jiriwibhakorn²

¹ Engineering Program in Defence Engineering, School of Engineering, King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang, Lat Krabang, Bangkok, 10520, Thailand

² Department of Electrical Engineering, School of Engineering, King Mongkut's Institute of
Technology Ladkrabang, Lat Krabang, Bangkok, 10520, Thailand

Corresponding author Email: s.saitawee@gmail.com^{1} somchat.ji@kmitl.ac.th²

(Received: October 2, 2024; Revised: June 24, 2025; Accepted: June 30, 2025)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มุ่งพัฒนาระบบตรวจจับเรือในแม่น้ำเจ้าพระยาโดยใช้เทคนิค YOLOv7 เพื่อแก้ไขปัญหาการจราจรทางน้ำที่หนาแน่นและอันตราย โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ 3 อัลกอริทึม ได้แก่ YOLO (You Only Look Once), SSD (Single Shot MultiBox Detector) และ Faster R-CNN (Region-based Convolutional Neural Network) บนชุดข้อมูลภาพถ่ายจากกล้องที่มีความละเอียด 608x608 พิกเซล จำนวน 1,000 ภาพ แบ่งเป็นภาพที่มีเรือ 750 ภาพ และภาพไม่มีเรือ 250 ภาพ ประเมินประสิทธิภาพของโมเดลโดยใช้ confusion matrix ผลการทดสอบพบว่าอัลกอริทึม YOLOv7 ให้ค่า F1-Score สูงสุด (95.0%) รองลงมาคือ Faster R-CNN (93.0%) และ SSD (82.0%) เพราะฉะนั้นอัลกอริทึม YOLOv7 มีประสิทธิภาพในการตรวจจับเรือในแม่น้ำเจ้าพระยาสูงที่สุดในการทดลองนี้

คำสำคัญ: ระบบตรวจจับเรือ แม่น้ำเจ้าพระยา YOLOv7 จราจรทางน้ำ ประสิทธิภาพ

ABSTRACT

This research aims to develop a system for detecting boats in the Chao Phraya River using the YOLOv7 technique to address the issues of heavy and hazardous water traffic. The performance of three algorithms YOLO (You Only Look Once), SSD (Single Shot MultiBox Detector), and Faster R-CNN (Region-based Convolutional Neural Network) was compared using a dataset of 1,000 images from cameras with a resolution of 608x608 pixels, consisting of 750 images with boats and 250 images without boats. The models' performance was evaluated using a confusion matrix. The test results showed that the YOLOv7 algorithm achieved the highest F1-Score (95.0%), followed by Faster R-CNN (93.0%) and

SSD (82.0%). Therefore, the YOLOv7 algorithm was the most effective in detecting boats in the Chao Phraya River in this experiment.

Keyword: Boat Detection, Chao Phraya River, YOLOv7, water traffic, performance.

1. บทนำ

แม่น้ำเจ้าพระยาเป็นแม่น้ำสายหลักของประเทศไทย เป็นแหล่งคมนาคมขนส่งที่สำคัญของประเทศ และเป็นแหล่งทรัพยากรธรรมชาติที่สำคัญของประเทศเช่นกัน อย่างไรก็ตามแม่น้ำเจ้าพระยายังเป็นเส้นทางลักลอบขนสินค้าผิดกฎหมายที่สำคัญของประเทศอีกด้วย สินค้าผิดกฎหมายเหล่านี้มักเป็นสินค้าหนีภาษี เช่น น้ำมันเถื่อน บุหรี่หนีภาษี สุราหนีภาษี ยาผิดกฎหมาย และสินค้าอื่น ๆ ที่ผิดกฎหมาย การลักลอบขนสินค้าผิดกฎหมายเหล่านี้ก่อให้เกิดความเสียหายต่อประเทศทั้งทางเศรษฐกิจและสังคม ปัญหาเรื่องเรือผิดกฎหมายลักลอบเข้ามาทางแม่น้ำเจ้าพระยาโดยเรือผิดกฎหมายเหล่านี้มักลักลอบขนสินค้าที่ผิดกฎหมาย และเรือเหล่านี้มักลักลอบเข้ามาทางแม่น้ำเจ้าพระยาจากต่างประเทศหรือจากพื้นที่ชายแดน จากนั้นจึงนำสินค้าผิดกฎหมายไปจำหน่ายยังพื้นที่ต่าง ๆ ในประเทศไทย ก่อให้เกิดผลกระทบต่อประเทศหลายประการ เช่น รายได้ของภาครัฐลดลง เนื่องจากไม่ได้รับภาษีจากสินค้าผิดกฎหมาย เกิดการแข่งขันไม่เป็นธรรมกับผู้ประกอบการที่ปฏิบัติตามกฎหมาย ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชน เนื่องจากสินค้าผิดกฎหมายบางชนิดอาจก่อให้เกิดอันตราย กระทบต่อความมั่นคงของประเทศ เนื่องจากสินค้าผิดกฎหมายบางชนิดอาจเกี่ยวข้องกับการก่อการร้ายหรืออาชญากรรมอื่น ๆ [1-3]

1.1 ความเป็นมาและความสำคัญของปัญหา

ปัญหาเรือผิดกฎหมายลักลอบเข้ามาทางแม่น้ำเจ้าพระยามีมาอย่างยาวนาน สาเหตุหลักมาจากการที่แม่น้ำเจ้าพระยาเป็นเส้นทางน้ำสายหลักที่เชื่อมต่อระหว่างประเทศไทยกับประเทศเพื่อนบ้านในภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ มีความยาวกว่า 372 กิโลเมตร และมีความกว้างตั้งแต่ 200 ถึง 1,000 เมตร ประกอบกับสภาพภูมิประเทศที่เป็นแม่น้ำลำคลองมากมาย ทำให้ยาก

ต่อการควบคุมและตรวจตรา นอกจากนี้ ยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่เอื้อต่อการลักลอบนำเข้าสินค้าผิดกฎหมายทางแม่น้ำเจ้าพระยา เช่น ช่องโหว่ในกฎหมายและมาตรการทางศุลกากร ขาดความร่วมมือจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้อง และความยากลำบากในการพิสูจน์ทราบสินค้าผิดกฎหมาย

ระบบการตรวจจับเรือขนาดเล็ก ซึ่งมีความสำคัญต่อเทคโนโลยีเรืออัตโนมัติและความปลอดภัยในการเดินเรือ วิธีการตรวจจับแบบเดิมที่อาศัยเรดาร์บนเรือ ไม่สามารถตรวจจับเรือขนาดเล็กหรือเรือที่อยู่ใกล้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้น บทความเสนอวิธีการใหม่ที่ใช้ deep learning ร่วมกับกล้องวิดีโอ เพื่อตรวจจับเรือขนาดเล็กโดยอาศัยปัญญาประดิษฐ์[4]

การใช้กล้องในการตรวจจับด้วยการนำภาพดิจิทัลมาประมวลผลและแก้ไขปัญหานี้ เป็นระบบตรวจจับเรือด้วยเทคนิค Deep Learning ซึ่งระบบประกอบด้วยโมดูลหลัก 2 โมดูล ดังนี้ โมดูลการตรวจจับวัตถุ (Object Detection) โมดูลนี้ใช้เทคนิค Deep Learning เช่น YOLOv5, SSD หรือ Faster R-CNN เพื่อตรวจจับวัตถุที่ปรากฏในภาพดิจิทัล โมดูลนี้จะระบุตำแหน่งและขนาดของวัตถุที่เป็นเรือ และโมดูลการจำแนกวัตถุ (Object Classification) โมดูลนี้ใช้เทคนิค Deep Learning เช่น ResNet หรือ Inception เพื่อจำแนกประเภทของวัตถุที่ตรวจจับได้ โมดูลนี้จะจำแนกวัตถุที่เป็นเรือออกจากวัตถุอื่น ๆ เช่น ต้นไม้ อาคาร หรือหุ่น แต่ในงานวิจัยนี้จะเน้นไปที่โมดูลการตรวจจับเรือเท่านั้น เพื่อหาอัลกอริทึมที่เหมาะสมในการนำไปพัฒนาแก้ปัญหาได้ต่อไป

1.2 วรรณกรรมที่เกี่ยวข้อง

YOLO, SSD และ Faster R-CNN ล้วนเป็นอัลกอริทึมการตรวจจับวัตถุ (Object Detection) ที่ได้รับความนิยมแต่ละอัลกอริทึมมีจุดเด่นและจุดด้อยที่แตกต่างกัน เหมาะกับการใช้งานที่แตกต่างกันไป สำหรับความเหมือนคือ ทั้ง

สามอัลกอริทึมใช้ Convolutional Neural Networks (CNN) สำหรับการดึงคุณลักษณะ (feature extraction) จากภาพ แต่ละอัลกอริทึมสามารถตรวจจับวัตถุได้หลายประเภทพร้อมกัน (multi-class object detection) และแต่ละอัลกอริทึมสามารถระบุขอบเขต (bounding box) ของวัตถุที่ตรวจจับพบได้ ในเรื่องของความแตกต่างในเรื่องวิธีการโดย Faster R-CNN จะประกอบด้วยสองขั้นตอน ขั้นตอนแรกสร้าง Region Proposals และขั้นตอนที่สองทำการจำแนกวัตถุและระบุขอบเขต SSD จะเป็นอัลกอริทึมแบบ One-stage ทำการดึงคุณลักษณะและทำนายวัตถุในขั้นตอนเดียว และ YOLO จะเป็นอัลกอริทึมแบบ One-stage คล้ายกับ SSD แต่มีโครงสร้างเครือข่ายที่เรียบง่ายกว่า ทำให้มีความเร็วสูงขึ้น นอกจากนี้ยังมีในเรื่องของ ความเร็ว ความแม่นยำ และความเหมาะสมกับงาน ที่มีความแตกต่างกันบ้าง

โดยสรุปแล้ว Faster R-CNN เหมาะกับงานที่ต้องการความแม่นยำสูง [5] SSD เหมาะกับงานที่ต้องการความสมดุลระหว่างความเร็วและความแม่นยำ [6] และ YOLO เหมาะกับงานที่ต้องการความเร็วสูง [7] ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับนำไปใช้งานให้เหมาะสมกับความต้องการ ประเภทของงาน ความต้องการด้านความเร็วและความแม่นยำและทรัพยากรการประมวลผลที่มีอยู่

ในงานวิจัยที่ผ่านมา มีงานวิจัยหลายตัวที่ได้ศึกษาข้อมูลเพิ่มเติมเกี่ยวกับการพัฒนาเทคโนโลยีการตรวจจับวัตถุ อาทิเช่น Ren, S. และคณะ[8] นำเสนออัลกอริทึม Faster R-CNN ใหม่สำหรับการตรวจจับวัตถุแบบเรียลไทม์ ผลการทดลอง Faster R-CNN บนชุดข้อมูล COCO 2015 ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่า Faster R-CNN ทำงานได้เร็วกว่าอัลกอริทึมตรวจจับวัตถุแบบเรียลไทม์อื่นๆ ที่มีความแม่นยำใกล้เคียงกัน สามารถตรวจจับวัตถุได้ 7 fps (frames per second) บน CPU Intel i7-4790K ในขณะที่ Faster RCNN (VGG16) ทำงานได้เพียง 0.3 fps บน CPU เดียวกัน นอกจากนี้ Faster R-CNN ยังประสบความสำเร็จในการตรวจจับวัตถุ 80 ประเภท บนชุดข้อมูล COCO 2015 Faster R-CNN บรรลุค่า mAP

(mean average precision) ที่ 33.2% ซึ่งใกล้เคียงกับ Faster RCNN (VGG16) (31.2%) Dai, J. และคณะ[9] นำเสนอวิธีการตรวจจับวัตถุ R-FCN ซึ่งใช้ Fully Convolutional Networks (FCN) การทดลองในงานวิจัยนี้ได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของ R-FCN กับวิธีการอื่นๆ บนชุดข้อมูล PASCAL VOC โดยพบว่า R-FCN มีผลลัพธ์ที่แข็งแกร่งและมีความเร็วในการทดสอบที่ดีกว่า นอกจากนี้ การใช้ Position-Sensitive Score Maps ยังช่วยลดปัญหาความต่างของตำแหน่งในการตรวจจับวัตถุอย่างมีประสิทธิภาพ

Cai, Z. และคณะ[10] นำเสนอสถาปัตยกรรม cascaded R-CNN สำหรับการตรวจจับวัตถุ เพื่อแก้ปัญหาสองปัจจัยหลักที่ทำให้ประสิทธิภาพของตัวตรวจจับวัตถุลดลง ปัจจัยแรกคือการโอเวอร์ฟิตติ้ง (Overfitting) ระหว่างการฝึกอบรม เกิดจากการขาดตัวอย่างเชิงบวก ปัจจัยที่สองคือความไม่ตรงกันระหว่างเกณฑ์ IoU (Intersection over Union) ที่ใช้ในเวลาฝึกอบรมและเวลาอนุมาน ซึ่งสถาปัตยกรรมนี้ประกอบด้วยตัวตรวจจับหลายขั้นตอน แต่ละขั้นตอนได้รับการฝึกฝนด้วยเกณฑ์ IoU ที่สูงขึ้น การออกแบบแบบเรียงซ้อนช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพโดยลดการโอเวอร์ฟิตติ้งและทำให้แน่ใจว่าการฝึกอบรมและการอนุมานตรงกันมากขึ้น ในการทดลอง cascaded R-CNN ทำงานได้ดีกว่าตัวตรวจจับอื่นๆ บนชุดข้อมูล COCO Fu, C. และคณะ[11] เสนอวิธีการตรวจจับวัตถุแบบ Single-Shot Multibox Detector (SSD) ซึ่งใช้ Single Deep Neural Network (DNN) โดย SSD ทำงานโดย discretize output space ของ bounding box เป็นชุดของ default boxes หลายขนาด และ aspect ratios บนแต่ละ feature map location ในขั้นตอนการอนุมาน DNN จะสร้างคะแนนสำหรับการมีอยู่ของวัตถุแต่ละประเภทใน default box แต่ละกล่อง และปรับ bounding box ให้ดีขึ้นเพื่อให้ตรงกับรูปร่างของวัตถุ SSD ผสานรวมการคาดการณ์จาก feature maps หลายความละเอียดเพื่อจัดการวัตถุที่มีขนาดหลากหลาย ข้อดีของ SSD คือ ความ

เรียบง่ายเมื่อเทียบกับวิธีการที่ต้องใช้ Region Proposal Network (RPN) ทดสอบ SSD บนชุดข้อมูล PASCAL VOC, MS COCO และ ILSVRC ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า SSD มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับวิธีการที่ใช้ RPN Meng, S. และคณะ[12] นำเสนอ Two-Stage SSD (TS-SSD) ซึ่งเป็นสถาปัตยกรรมการตรวจจับวัตถุแบบสองขั้นตอนที่ผสมรวมข้อดีของ Single-Stage SSD (SSD) และ Two-Stage detectors TS-SSD ประกอบด้วยสองขั้นตอน คือขั้นตอนแรกการค้นหา Region ใช้ Single-Shot MultiBox Detector (SSD) เพื่อค้นหา Region ของ Interest (RoI) ขั้นตอนถัดไปคือการจำแนกประเภท ใช้ Region-based Convolutional Neural Network (R-CNN) เพื่อจำแนกวัตถุภายใน ผลการทดลองทดสอบ TS-SSD บนชุดข้อมูล PASCAL VOC, MS COCO และ ImageNet แสดงให้เห็นว่า TS-SSD มีประสิทธิภาพและความแม่นยำสูงกว่า SSD แบบดั้งเดิม TS-SSD เป็นสถาปัตยกรรมการตรวจจับวัตถุที่มีประสิทธิภาพและความแม่นยำสูง เหมาะสำหรับการใช้งานที่ต้องการทั้งความเร็วและความแม่นยำ อย่างไรก็ตาม TS-SSD มีความซับซ้อนสูงกว่า SSD แบบดั้งเดิม

Redmon, J. และคณะ[13] เสนอ You Only Look Once (YOLO) ซึ่งเป็นวิธีการตรวจจับวัตถุแบบ Single-Stage YOLO ประกอบด้วย Convolutional Neural Network (CNN) เพียงชุดเดียว ทำหน้าที่ทั้งค้นหา Region ของ Interest (RoI) และจำแนกวัตถุภายใน RoI ทำงานโดยแบ่งภาพออกเป็นชุดของ Grid Cells แต่ละ Grid Cell จะทำหน้าที่คาดการณ์ Bounding Box ของวัตถุที่ปรากฏใน Grid Cell นั้น ทดสอบ YOLO บนชุดข้อมูล PASCAL VOC, COCO และ ImageNet ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า YOLO มีประสิทธิภาพและความเร็วในการตรวจจับวัตถุสูงกว่าวิธีการอื่น ๆ และเหมาะสำหรับการใช้งานแบบ Real-Time Ge, Z. และคณะ[14] นำเสนอ YOLOX ในการตรวจจับวัตถุโดยผสมผสานเทคนิคการ stitching แบบหลายระดับเข้ากับ YOLOv5 ทดสอบบนชุดข้อมูล COCO 2017 ผลที่ได้คือ

YOLOX สามารถบรรลุความแม่นยำ mAP (mean Average Precision) 56.5% บน COCO 2017 ซึ่งสูงกว่า YOLOv5 4.4% ผลสรุปคือ YOLOX เป็นโมเดลการตรวจจับวัตถุแบบ Single-Stage ที่มีความแม่นยำสูง scalable และประสิทธิภาพดี

Hu, H. และคณะ [15] ได้นำเสนอการตรวจจับวัตถุเบื้องต้นด้วยโมเดล YOLOv7 ที่ได้รับการปรับปรุงในการตรวจจับวัตถุในภาพหรือวิดีโอ เฟรม โมเดลนี้ได้รับการปรับแต่งด้วยชุดข้อมูลเรือเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจจับ และในการติดตามวัตถุได้ใช้ตัวกรอง Kalman ช่วยคาดการณ์ตำแหน่งและสถานะของวัตถุในเฟรมถัดไป ซึ่งช่วยให้สามารถติดตามวัตถุได้อย่างราบรื่นแม้ว่าวัตถุจะบดบังหรือเคลื่อนที่เร็ว ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าวิธีการที่เสนอนี้มีประสิทธิภาพและแม่นยำในการตรวจจับเรือแบบเรียลไทม์ วิธีนี้สามารถตรวจจับเรือได้หลากหลายประเภท แม้ว่าจะอยู่ในสภาพแสงที่หลากหลายและสภาพพื้นผิวที่ซับซ้อน Xie, S. และคณะ [16] นำเสนอโมเดล YOLOv7 ที่ได้รับการปรับปรุงเพื่อสกัดคุณลักษณะจากภาพหรือวิดีโอ เฟรม โมเดลนี้ได้รับการปรับแต่งด้วยชุดข้อมูลเรือเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการสกัดคุณลักษณะ โดยมุ่งเน้นไปที่บริเวณของภาพหรือวิดีโอ เฟรมที่น่าจะเป็นเรือ กลไกนี้ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการตรวจจับโดยมุ่งเน้นไปที่บริเวณที่เกี่ยวข้องมากที่สุด โดยโมเดลการจำแนกประเภทใช้เพื่อจำแนกวัตถุที่ตรวจจับได้ว่าเป็นเรือหรือไม่ โมเดลนี้ได้รับการฝึกฝนด้วยชุดข้อมูลเรือเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการจำแนกประเภท ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าวิธีการที่เสนอนี้มีประสิทธิภาพและแม่นยำในการตรวจจับเรือ Wang, Y. และคณะ [17] เสนอวิธีการตรวจจับเรือแบบเรียลไทม์โดยใช้ YOLOv7 และเครือข่ายนำหนักเบา เริ่มต้นด้วยการปรับแต่ง YOLOv7 ด้วยการลดขนาดโมเดลและเพิ่มโมดูลคอขวดแบบขยาย โมเดลที่ปรับแต่งแล้วนี้เรียกว่า YOLOLite-v7 จากนั้น YOLOLite-v7 นำไปฝึกอบรมบนชุดข้อมูลเรือขนาดใหญ่ ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า YOLOLite-v7 สามารถตรวจจับเรือได้

อย่างแม่นยำและรวดเร็ว โดยมีค่า mAP (mean Average Precision) อยู่ที่ 92.5% ที่ความเร็ว 50 FPS

จากการศึกษาวรรณกรรมข้างต้นพบว่าเทคโนโลยีการตรวจจับวัตถุมีการพัฒนาอย่างรวดเร็ว มีการนำเสนอวิธีการใหม่ ๆ อยู่เสมอ วิธีการเหล่านี้มีทั้งแบบ Single-Stage และ Two-Stage แต่ละวิธีการมีข้อดีและข้อเสียแตกต่างกันไป ขึ้นอยู่กับความต้องการใช้งาน โดยวิธีการตรวจจับวัตถุแบบ Single-Stage มีข้อดีคือความเร็วในการตรวจจับวัตถุสูง และมีความซับซ้อนต่ำ แต่มีข้อเสียคือความแม่นยำในการตรวจจับวัตถุอาจจะต่ำกว่าวิธีการแบบ Two-Stage ส่วนวิธีการตรวจจับวัตถุแบบ Two-Stage มีข้อดีคือ ความแม่นยำในการตรวจจับวัตถุสูง แต่มีข้อเสียคือ ความเร็วในการตรวจจับวัตถุต่ำ และความซับซ้อนสูง

Faster R-CNN เป็นวิธีการแบบ Two-Stage ที่มีความแม่นยำสูง แต่ความเร็วในการตรวจจับวัตถุค่อนข้างต่ำ SSD เป็นวิธีการแบบ Single-Stage ที่มีความเร็วในการตรวจจับวัตถุสูง SSD มีประสิทธิภาพใกล้เคียงกับวิธีการแบบ Two-Stage ที่ใช้ RPN TS-SSD เป็นวิธีการแบบ Two-Stage ที่ผสมข้อดีของ SSD และ Two-Stage detectors เข้าด้วยกัน TS-SSD มีประสิทธิภาพและความแม่นยำสูงกว่า SSD แบบดั้งเดิม YOLO เป็นวิธีการแบบ Single-Stage ที่มีความเร็วในการตรวจจับวัตถุสูง YOLO มีประสิทธิภาพและความเร็วในการตรวจจับวัตถุสูงกว่าวิธีการอื่น ๆ บนชุดข้อมูล PASCAL VOC, COCO และ ImageNet YOLOv7 เป็นวิธีการแบบ Single-Stage ที่มีความแม่นยำสูง YOLOv7 สามารถตรวจจับวัตถุได้หลากหลายประเภท แม้ว่าจะอยู่ในสภาพแสงที่หลากหลายและสภาพพื้นผิวที่ซับซ้อน

ได้เลือกอัลกอริทึม YOLOv7, SSD และ Faster R-CNN เพราะทั้งสามเป็น อัลกอริทึมที่มีชื่อเสียงและได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลาย ในงานด้าน object detection และครอบคลุม ลักษณะเด่นต่างกัน ได้แก่

- YOLOv7 เป็นอัลกอริทึมแบบ one-stage ที่เน้นความเร็วและมีความแม่นยำสูงในเวอร์ชันล่าสุด จึงเหมาะสำหรับงาน real-time

- SSD เป็น one-stage เช่นกัน แต่มีสมดุระหว่างความเร็วและความแม่นยำ

- Faster R-CNN เป็น two-stage ที่เน้นความแม่นยำมากกว่า แต่ประมวลผลช้ากว่า

ดังนั้น การเลือกทั้ง 3 อัลกอริทึมนี้มาเปรียบเทียบครอบคลุมหลากหลายมุมมอง ทั้งความเร็ว ความแม่นยำ และความซับซ้อนของโมเดล เพื่อหาวิธีที่เหมาะสมกับงานตรวจจับเรือในแม่น้ำเจ้าพระยา ที่ต้องเผชิญกับฉากหลังซับซ้อนและมีวัตถุขนาดเล็ก

แนวโน้มในอนาคตเทคโนโลยีการตรวจจับวัตถุมีแนวโน้มที่จะพัฒนาอย่างต่อเนื่อง ในอนาคต วิธีการตรวจจับวัตถุน่าจะมีทั้งความแม่นยำและรวดเร็วมากขึ้น สามารถตรวจจับวัตถุได้หลากหลายประเภท ในสภาพแสงที่หลากหลายและสภาพพื้นผิวที่ซับซ้อน และสามารถใช้งานได้กับอุปกรณ์ที่มีทรัพยากรจำกัด

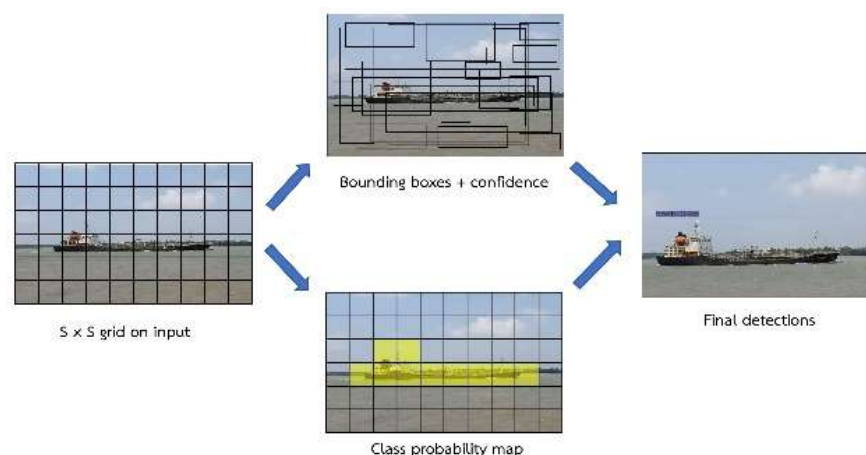
1.3 วัตถุประสงค์ของงานวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งพัฒนาระบบตรวจจับเรือในแม่น้ำเจ้าพระยาโดยใช้เทคนิค Deep Learning เพื่อแก้ไขปัญหาการจราจรทางน้ำที่หนาแน่นและอันตราย วัตถุประสงค์หลักของงานวิจัยนี้มีดังนี้

1) พัฒนาระบบตรวจจับเรือในแม่น้ำเจ้าพระยาโดยใช้เทคนิค Deep Learning เน้นการทำงานของอัลกอริทึม YOLOv7

2) เปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึม Deep Learning 3 ชนิด ประกอบไปด้วยอัลกอริทึม YOLOv7, SSD และ Faster R-CNN ในการตรวจจับเรือจากภาพถ่าย การวัดประสิทธิภาพของโมเดลจะประเมินโดยใช้ confusion matrix

3) ค้นหาอัลกอริทึม Deep Learning ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการตรวจจับเรือในแม่น้ำเจ้าพระยา งานวิจัยนี้มุ่งค้นหาอัลกอริทึม Deep Learning ที่มีความแม่นยำสูง ใช้เวลาประมวลผลน้อย และเหมาะสมกับการใช้งานจริงตามที่แสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 หลักการทำงานของโครงสร้างเครือข่ายในอัลกอริทึม YOLOv7

2. ขอบเขตงานวิจัย

1) งานวิจัยมุ่งเน้นไปที่การพัฒนาระบบตรวจจับเรือในแม่น้ำเจ้าพระยาโดยใช้เทคนิค Deep Learning

2) เปรียบเทียบประสิทธิภาพของ 3 อัลกอริทึม Deep Learning ได้แก่ YOLOv7 (You Only Look Once), SSD (Single Shot MultiBox Detector) และ Faster R-CNN (Region-based Convolutional Neural Network) บนชุดข้อมูลภาพถ่ายจากกล้องที่มีความละเอียด 608x608 พิกเซล

3) ชุดข้อมูลประกอบด้วย ภาพที่มีเรือ 750 ภาพ ประกอบไปด้วยภาพเรือ เรือสินค้า, เรือบรรทุกแก๊ส - น้ำมัน, เรือประมงขนาดเล็ก, เรือข้ามฟาก และเรือลากจูงอย่างละเท่า ๆ กัน โดยใช้ภาพเรือด้านข้างแนวนอนของเรือเท่านั้น และภาพที่ไม่มีเรือ 250 ภาพ ภาพเรือที่ได้จากเรือที่วิ่งผ่านบริเวณร่อนน้ำเจ้าพระยา ซึ่งครอบคลุมพื้นที่แม่น้ำเจ้าพระยาขอบเขตของพื้นที่ทำเลิซ้อนเล็บ รร.นายเรือ จังหวัดสมุทรปราการ ตามแนวชายฝั่งที่มีความกว้างประมาณ 800 เมตรเท่านั้น

4) ใช้ชุดข้อมูล COCO 2015 (Common Objects in Context) เป็นชุดข้อมูลสำหรับใช้ฝึกโมเดล

5) ภาพที่ใช้มีแสงสว่างเพียงพอ ไม่มีเงามืดบัง

6) วัดประสิทธิภาพด้วยค่า (Confusion Matrix)

7) คอมพิวเตอร์โน้ตบุ๊ก ระบบปฏิบัติการ Windows

10 โพรเซสเซอร์ AMD Ryzen 7 รุ่น 4800H ความเร็วสัญญาณนาฬิกา 2.90 GHz กราฟิก Radeon Graphics

8) ขนาด input 608x608 พิกเซล การทำ preprocessing มีการดำเนินการ เช่น Resize ภาพ ให้เข้ากับ input size ของ YOLOv7 แปลงค่าสี เป็น RGB หรือ BGR ตามที่โมเดลรองรับ และ normalize ค่า pixel (เป็นมาตรฐานทั่วไปใน deep learning)

3. ทฤษฎีที่นำเสนอ

ในหัวข้อนี้จะกล่าวถึงคำอธิบายเกี่ยวกับเทคนิคการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) และวิธีการทำงาน ประโยชน์และความสามารถของ Deep Learning ในการประมวลผลภาพและตรวจจับวัตถุ ภาพรวมของปัญหาการตรวจจับวัตถุในภาพและความสำคัญของการพัฒนาอัลกอริทึมในการแก้ไขปัญหานี้ อธิบายถึงความท้าทายที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับเรือในแม่น้ำเจ้าพระยา อัลกอริทึม YOLO (You Only Look Once) ในส่วนของหลักการทำงานของ YOLO และเหตุผลที่ทำให้มันมีประสิทธิภาพสูงในงานตรวจจับวัตถุ ข้อดีและข้อเสียของ YOLO เมื่อเปรียบเทียบกับอัลกอริทึมอื่น ๆ อัลกอริทึม SSD (Single Shot MultiBox Detector) อธิบายเกี่ยวกับการทำงานของ SSD และความสามารถในการตรวจจับ

วัตถุ จุดเด่นและจุดด้อยของ SSD อัลกอริทึม Faster R-CNN (Region-based Convolutional Neural Network) หลักการทำงานของ Faster R-CNN และวิธีการที่ใช้ในการตรวจจับวัตถุในภาพ เปรียบเทียบประสิทธิภาพของ Faster R-CNN กับ YOLO และ SSD ทฤษฎี Confusion Matrix การประเมินประสิทธิภาพของโมเดลโดยใช้ Confusion Matrix การคำนวณค่า F1-Score และความหมายของมันในบริบทของการตรวจจับวัตถุ

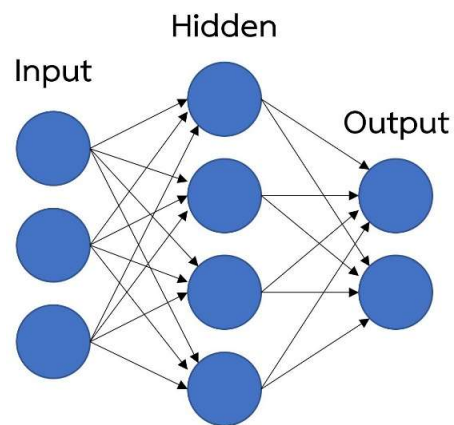
3.1 Deep Learning

Deep Learning [18,19] หรือ การเรียนรู้เชิงลึกเป็นเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องประเภทหนึ่ง โดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม (Neural Networks) ที่มีโครงสร้างซับซ้อนหลายชั้น เพื่อเรียนรู้จากข้อมูลจำนวนมาก Deep Learning ประสบความสำเร็จอย่างมากในงานประมวลผลภาษาธรรมชาติ การจดจำภาพ การแปลภาษา และงานอื่นๆ อีกมากมาย

หลักการพื้นฐานของ Deep Learning ประกอบไปด้วย 1) โครงข่ายประสาทเทียม (Neural Networks) โครงสร้างที่เลียนแบบการทำงานของสมองมนุษย์ ประกอบด้วยหน่วยประมวลผลขนาดเล็กที่เรียกว่า นิวรอน เชื่อมต่อกันเป็นชั้น ๆ นิวรอนแต่ละตัวทำหน้าที่รับข้อมูลประมวลผล และส่งผลลัพธ์ไปยังนิวรอนถัดไป 2) การเรียนรู้ Deep Learning เรียนรู้จากข้อมูลจำนวนมาก โดยปรับค่าพารามิเตอร์ของโครงข่ายประสาทเทียมให้เหมาะสม เพื่อให้สามารถจำลองรูปแบบของข้อมูลได้อย่างถูกต้อง 3) ฟังก์ชันการกระตุ้น (Activation Functions) กำหนดว่านิวรอนจะส่งผลลัพธ์อะไร ขึ้นอยู่กับข้อมูลที่รับเข้ามา 4) ฟังก์ชันการสูญเสีย (Loss Functions) วัดความผิดพลาดของโมเดล ช่วยให้นำโมเดลไปปรับปรุงให้ดีขึ้น และ 5) อัลกอริทึมการปรับแต่ง (Optimization Algorithms) ปรับค่าพารามิเตอร์ของโมเดล เพื่อลดค่าฟังก์ชันการสูญเสีย

Deep Learning ประสบความสำเร็จอย่างมากในงานตรวจจับวัตถุ โดยมีอัลกอริทึมยอดนิยมหลายตัว เช่น

YOLO (You Only Look Once) ที่มีความเร็วในการทำงานสูง SSD (Single Shot MultiBox Detector) ที่มีความเร็วในการทำงานปานกลาง มีความแม่นยำสูง และ Faster R-CNN (Region-based Convolutional Neural Network) ที่มีความแม่นยำสูง แต่มีความเร็วในการทำงานช้า ดังแสดงโครงข่ายประสาทเทียมซึ่งเป็นโครงสร้างพื้นฐานของ Deep Learning ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 โครงสร้างพื้นฐานของ Deep Learning

จากรูปที่ 2 โครงสร้างพื้นฐานของ Deep Learning ประกอบด้วยหน่วยประมวลผลขนาดเล็กที่เรียกว่า นิวรอน เชื่อมต่อกันเป็นชั้น ๆ นิวรอนแต่ละตัวทำหน้าที่รับข้อมูลประมวลผล และส่งผลลัพธ์ไปยังนิวรอนถัดไป โครงข่ายประสาทเทียมเรียนรู้จากข้อมูลจำนวนมาก โดยปรับค่าพารามิเตอร์ของการเชื่อมต่อระหว่างนิวรอน เพื่อให้สามารถจำลองรูปแบบของข้อมูลได้อย่างถูกต้อง

3.2 ทฤษฎี YOLOv7

YOLOv7[20,21] YOLO (You Only Look Once) เป็นสถาปัตยกรรมที่ใช้สำหรับการตรวจจับวัตถุ (Object Detection) ในภาพ YOLOv7 เป็นเวอร์ชันล่าสุดของ YOLO ที่ได้รับการปรับปรุงจาก YOLO รุ่นก่อน ๆ โดยเน้นการเพิ่มประสิทธิภาพและความแม่นยำในการตรวจจับวัตถุ หลักการทำงานของ YOLOv7 ประกอบด้วยขั้นตอนหลัก ๆ ดังนี้

ขั้นที่ 1 การแบ่งภาพเป็นกริด ภาพถูกแบ่งเป็นกริดของเซลล์ที่มีขนาดเท่ากัน (เช่น 13x13, 19x19 ฯลฯ)

ขั้นที่ 2 การพยากรณ์กรอบเขตแดน (Bounding Boxes) และความน่าจะเป็น ในแต่ละเซลล์ของกริด YOLO จะพยากรณ์กรอบเขตแดนหลายกรอบพร้อมกับความน่าจะเป็นที่กรอบนั้นจะครอบคลุมวัตถุที่สนใจ

ขั้นที่ 3 การประมวลผลกรอบเขตแดน โดยใช้ Non-Maximum Suppression (NMS) เพื่อลดกรอบเขตแดนที่ซ้อนทับกันและเก็บเฉพาะกรอบที่มีคะแนนสูงสุด

ขั้นที่ 4 การพยากรณ์คลาส YOLO จะพยากรณ์ความน่าจะเป็นที่กรอบเขตแดนจะเป็นคลาสวัตถุใด ๆ จากชุดข้อมูลที่ฝึก

จุดเด่นของ YOLOv7 จะประกอบไปด้วยด้านต่าง ๆ ดังนี้ ความเร็ว YOLOv7 มีการออกแบบให้ทำงานได้รวดเร็ว ซึ่งสามารถประมวลผลภาพในเวลาจริง (real-time) ได้ ความแม่นยำ YOLOv7 มีการปรับปรุงให้มีความแม่นยำสูงขึ้นเมื่อเทียบกับเวอร์ชันก่อน ๆ ประสิทธิภาพในการจัดการวัตถุเล็ก YOLOv7 มีการปรับปรุงการตรวจจับวัตถุเล็ก ๆ และการจัดการหลายวัตถุในภาพ และความสะดวกในการปรับใช้ YOLOv7 ได้รับการออกแบบให้ใช้งานง่ายและสามารถปรับใช้ในแอปพลิเคชันที่หลากหลายได้อย่างง่ายดาย

สถาปัตยกรรมของ YOLOv7 มีการปรับปรุงสถาปัตยกรรมจาก YOLO รุ่นก่อน ๆ โดยมีการใช้ Backbone ใหม่ที่เรียกว่า CSPDarknet ซึ่งมีการรวม Residual Blocks และ Cross Stage Partial Connections เพื่อเพิ่มความสามารถในการตรวจจับวัตถุ นอกจากนี้ยังมีการใช้ PANet และ SPP (Spatial Pyramid Pooling) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการหลายขนาดของวัตถุ ประกอบด้วยโมดูลหลักดังต่อไปนี้ Backbone โครงข่าย CNN แบบ Backbone ใหม่ มีประสิทธิภาพและความแม่นยำสูง Neck โมดูล Neck ประกอบด้วยโมดูล CSP และ PANet Head โมดูล Head ประกอบด้วยโมดูล Focus Module และการประมวลผลหลัง NMS และ Adaptive IoU Thresholding

Backbone ของ YOLOv7 ใช้โครงข่าย CNN แบบใหม่ที่มีประสิทธิภาพและความแม่นยำสูง โครงข่ายนี้ประกอบด้วยโมดูล Cross-Stage Partial connections (CSP) หลายโมดูล โมดูล CSP ช่วยให้โมเดลสามารถเรียนรู้คุณสมบัติของวัตถุจากหลายระดับ

Neck ของ YOLOv7 ประกอบด้วยโมดูล CSP และ PANet โมดูล CSP ช่วยให้โมเดลสามารถรวมคุณสมบัติจากหลายระดับ โมดูล PANet ช่วยให้โมเดลสามารถดึงคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับวัตถุ

Head ของ YOLOv7 ประกอบด้วยโมดูล Focus Module โมดูล Focus Module ช่วยให้โมเดลสามารถทำนายคลาสและตำแหน่งของวัตถุ

YOLOv7 ใช้เทคนิคการประมวลผลหลังสองแบบเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพคือ Non-Maximum Suppression (NMS) ช่วยให้โมเดลสามารถลบการตรวจจับวัตถุที่ซ้อนทับกัน และ Adaptive IoU Thresholding ที่ช่วยให้โมเดลสามารถปรับค่าเกณฑ์ IoU ให้เหมาะสมกับขนาดของวัตถุที่แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 การตรวจจับภาพเรือด้วย YOLOv7

3.3 ขั้นตอนการตรวจจับภาพเรือด้วย YOLOv7

วิธีการตรวจจับภาพเรือด้วย YOLOv7[20] มีขั้นตอนดังนี้

ขั้นที่ 1 เตรียมข้อมูล ดาวน์โหลดโมเดล YOLOv7 เลือกโมเดลที่เหมาะสมกับความต้องการ เช่น โมเดลที่ผ่าน

การฝึกอบรมบนชุดข้อมูลเรือ เตรียมชุดข้อมูลภาพเรือ ภาพเรือที่ใช้จะมีหลากหลายประเภท มุมมอง แสง และสภาพแวดล้อม มีป้ายกำกับคลาสที่ถูกต้อง

ขั้นที่ 2 ประมวลผลภาพ โหลดภาพเรือที่ต้องการตรวจจับ แปลงขนาดภาพให้เป็นขนาดที่โมเดล YOLOv7 รองรับ และแปลงค่าสีของภาพให้เป็นรูปแบบที่โมเดล YOLOv7 รองรับ

ขั้นที่ 3 ตรวจจับวัตถุ ป้อนภาพที่ประมวลผลแล้วไปยังโมเดล YOLOv7 ประมวลผลภาพโดยโมเดล YOLOv7 จะประมวลผลภาพและทำนายวัตถุ ดึงผลลัพธ์จากโมเดล YOLOv7

ขั้นที่ 4 วิเคราะห์ผลลัพธ์ กรองผลลัพธ์ที่ไม่น่าเชื่อถือ เช่น คะแนนความมั่นใจต่ำ วาดกรอบรอบวัตถุ วาดกรอบรอบวัตถุที่ตรวจจับได้ และแสดงผลลัพธ์ เช่น คลาสของวัตถุ คะแนนความมั่นใจ ตำแหน่งของวัตถุแสดงดังรูปที่ 4 การตรวจจับภาพเรือด้วย YOLOv7



รูปที่ 4 การตรวจจับภาพเรือด้วย YOLOv7

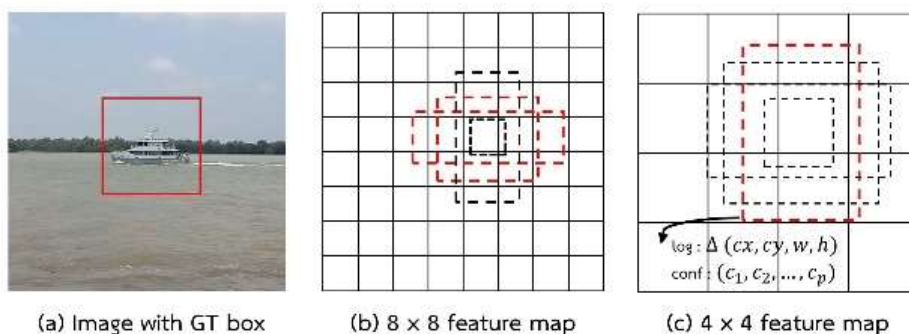
3.4 ขั้นตอนการตรวจจับภาพเรือด้วย SSD

SSD (Single Shot MultiBox Detector) [22] เป็นอัลกอริทึม Deep Learning ที่มีประสิทธิภาพและความเร็วสูง เหมาะสำหรับการตรวจจับวัตถุในภาพและวิดีโอ SSD ถูกนำไปใช้งานจริงอย่างแพร่หลาย เช่น การตรวจจับภาพเรือในแม่น้ำ ขั้นตอนการตรวจจับภาพเรือด้วย SSD มีดังนี้

ขั้นที่ 1 เตรียมชุดข้อมูล รวบรวมภาพถ่ายหรือวิดีโอที่มีภาพเรือในแม่น้ำเจ้าพระยา กำหนด Bounding Box ครอบเรือในแต่ละภาพ แบ่งชุดข้อมูลออกเป็น 3 ชุด คือ ชุดฝึกอบรม (Training Set) ชุดตรวจสอบ (Validation Set) และชุดทดสอบ (Test Set)

ขั้นที่ 2 ฝึกโมเดล SSD ดาวน์โหลดโมเดล SSD ปรับแต่งโมเดล SSD ให้เหมาะกับชุดข้อมูล ฝึกโมเดล SSD บนชุดข้อมูลฝึกอบรม ประเมินประสิทธิภาพของโมเดลบนชุดข้อมูลตรวจสอบ ปรับแต่งโมเดล SSD เพิ่มเติมหากจำเป็น

ขั้นที่ 3 ตรวจจับภาพเรือ โหลดโมเดล SSD ที่ได้รับการฝึกฝน ป้อนภาพถ่ายหรือวิดีโอให้กับโมเดล SSD โมเดล SSD จะค้นหารูปทรง (Bounding Box) ของเรือในภาพ และแสดงผลลัพธ์บนภาพถ่ายหรือวิดีโอแสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 การตรวจจับภาพเรือด้วย SSD

ในภาพเรือ SSD Framework จะแบ่งภาพออกเป็น กริด แต่ละเซลล์ของกริดจะทำนายวัตถุที่ปรากฏในเซลล์ นั้น โมเดลจะสร้าง Default boxes หลายขนาดและรูปร่าง Default boxes เหล่านี้จะถูกประมวลผลด้วย CNN เพื่อดึงคุณลักษณะของภาพ จากนั้นโมเดลจะใช้คุณลักษณะเหล่านี้เพื่อทำนายวัตถุในภาพ โมเดลจะทำนายทั้งตำแหน่ง (Localization loss) และประเภท (Confidence loss) ของวัตถุ สุดท้ายโมเดลจะเลือก Default boxes ที่ดีที่สุด โดย Default boxes ที่ดีที่สุดนี้จะล้อมรอบเรือในภาพได้อย่างแม่นยำ

3.5 ขั้นตอนการตรวจจับภาพเรือด้วย Faster R-CNN

Faster R-CNN (Region-based Convolutional Neural Network) [23] เป็นโมเดลการตรวจจับวัตถุ (Object Detection) ยอดเยี่ยมที่ใช้ Convolutional Neural Network (CNN) ในการระบุและจัดประเภทวัตถุในภาพ โมเดลนี้ทำงานได้รวดเร็วและแม่นยำ และถูกนำไปใช้กับงานตรวจจับวัตถุหลากหลายประเภท รวมถึงการตรวจจับภาพเรือ ขั้นตอนโดยละเอียดของการตรวจจับภาพเรือด้วย Faster R-CNN มีดังนี้

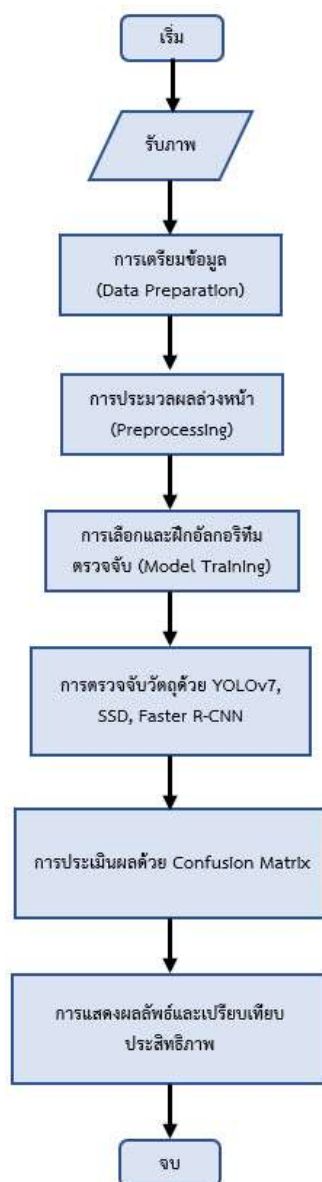
ขั้นที่ 1 เตรียมข้อมูล โดยรวบรวมภาพเรือ หารูปภาพเรือจำนวนมากที่มีความหลากหลายในแง่ของมุมมองแสงสว่างและประเภทของเรือ สร้างป้ายกำกับ (Annotation) กำหนดกรอบสี่เหลี่ยม (Bounding Boxes) รอบเรือในแต่ละภาพ ป้ายกำกับเหล่านี้จะใช้ในการฝึกโมเดล

ขั้นที่ 2 ฝึกโมเดล Faster R-CNN เตรียมโมเดลเลือกโมเดล Faster R-CNN ที่ผ่านการฝึกอบรมแล้ว หรือฝึกโมเดลใหม่จากจุดเริ่มต้น ป้อนข้อมูล ป้อนภาพเรือและป้ายกำกับที่สร้างขึ้นในขั้นตอนที่ 1 ไปยังโมเดล ฝึกโมเดลโดยปรับโมเดลให้เรียนรู้ที่จะระบุและจัดประเภทเรือในภาพโดยใช้ฟังก์ชันการสูญเสีย

ขั้นที่ 3 ตรวจจับภาพเรือ ป้อนภาพ ป้อนภาพใหม่ที่ต้องการตรวจจับเรือไปยังโมเดล ใช้โมเดลจะทำนายกรอบสี่เหลี่ยม (Bounding Boxes) รอบเรือที่ตรวจพบในภาพ และคะแนนความมั่นใจสำหรับการตรวจจับ

ขั้นที่ 4 วิเคราะห์ผลลัพธ์ ประเมินผลลัพธ์ วิเคราะห์ความถูกต้องของการตรวจจับโดยเปรียบเทียบผลลัพธ์กับป้ายกำกับที่แท้จริง (Ground Truth) ปรับโมเดล หากจำเป็น ปรับโมเดลเพิ่มเติมเพื่อปรับปรุงความถูกต้องของการตรวจจับ

สามารถแสดงขั้นตอนการทำงานของทั้ง 3 อัลกอริทึมได้ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ขั้นตอนการทำงานของ YOLOv7, Faster R-CNN, และ SSD

จากรูปที่ 6 สามารถอธิบายแต่ละขั้นตอนได้ดังนี้

1) รับภาพถ่ายจากกล้องใช้กล้องจับภาพบริเวณแม่น้ำเจ้าพระยาความละเอียดของภาพ 608x608 พิกเซล จำนวนภาพทั้งหมด 1,000 ภาพภาพที่มีเรือ 750 ภาพ ภาพที่ไม่มีเรือ 250 ภาพภาพถ่ายต้องอยู่ในสภาพแสงปกติ ไม่มีการบดบังเรือ เช่น เงา

2) การเตรียมข้อมูล (Data Preparation) การเตรียมข้อมูลสำหรับระบบตรวจจับเรือ จะใช้ COCO Dataset เป็นฐานข้อมูลหลัก โดยเริ่มต้นด้วยการคัดกรองเฉพาะรูปภาพและ Annotation ที่มีวัตถุประเภท "เรือ" เท่านั้น เพื่อให้สอดคล้องกับการตรวจจับแบบ Binary Class (มีเพียง Class "เรือ" เดียว)

3) การประมวลผลล่วงหน้า (Preprocessing) Resize ปรับขนาดภาพเป็น 608x608 พิกเซล Color Normalization แปลงค่าสีของภาพ (เช่น RGB → BGR) Format Conversion แปลงภาพเป็น Tensor หรือ array ให้พร้อมป้อนเข้าโมเดล YOLOv7 ต้องการ input ที่มีขนาดสม่ำเสมอและ preprocessing ที่เหมาะสมเพื่อให้ผลลัพธ์แม่นยำ

4) การเลือกและฝึกอัลกอริทึมตรวจจับ (Model Training) ใช้โมเดล Deep Learning จำนวน 3 โมเดล ได้แก่ YOLOv7, Faster R-CNN, และ SSD

5) การตรวจจับวัตถุป้อนภาพเข้าโมเดล ได้ output เป็น Bounding Box รอบเรือ

6) การประเมินผล (Evaluation) ใช้ Confusion Matrix เพื่อวัดผล True Positive (TP) False Positive (FP) False Negative (FN) True Negative (TN) คำนวณค่า Precision, Recall และ F1-Score

7) การแสดงผลลัพธ์และเปรียบเทียบแสดงภาพผลลัพธ์การตรวจจับ พร้อม bounding box วิเคราะห์ความแม่นยำและความเร็วของแต่ละโมเดลเลือกโมเดลที่เหมาะสมที่สุดกับบริบทจริง

3.6 การวัดประสิทธิภาพด้วย confusion matrix

Confusion Matrix [24] เป็นเครื่องมือที่ใช้ประเมินประสิทธิภาพของโมเดลการจำแนกประเภท ช่วยให้เข้าใจ

ว่าโมเดลทำนายผลผิดพลาดอย่างไร โดยแบ่งผลลัพธ์ออกเป็นสี่ประเภท

True Positive (TP) กรณีที่โมเดลทำนายถูกต้องว่าเป็นกลุ่มนั้น ๆ จำนวนภาพที่มีเรือจริง ๆ ที่โมเดลระบุว่า มีเรือ

False Positive (FP) กรณีที่โมเดลทำนายผิดพลาดว่าเป็นกลุ่มนั้น ๆ ทั้งที่จริงไม่ใช่ จำนวนภาพที่ไม่มีเรือจริง ๆ แต่โมเดลระบุว่า มีเรือ

True Negative (TN) กรณีที่โมเดลทำนายถูกต้องว่าไม่ใช่กลุ่มนั้น ๆ จำนวนภาพที่ไม่มีเรือจริง ๆ และโมเดลระบุว่า ไม่มีเรือ

False Negative (FN) กรณีที่โมเดลทำนายผิดพลาดว่าไม่ใช่กลุ่มนั้น ๆ ทั้งที่จริงเป็น จำนวนภาพที่มีเรือจริง ๆ แต่โมเดลระบุว่า ไม่มีเรือ

ค่า TP, FP, FN, และ TN เมื่อได้ค่ามาแล้วสามารถนำไปคำนวณประเมินประสิทธิภาพของโมเดลการจำแนกประเภทต่าง ๆ ได้ดังนี้

$$Precision = \frac{TP}{(TP + FP)} \quad (1)$$

$$Recall = \frac{TP}{(TP + FN)} \quad (2)$$

$$F1\ score = 2 \times \frac{(Precision \times Recall)}{(Precision + Recall)} \quad (3)$$

โดยที่

Precision (ความแม่นยำเชิงบวก) ในบริบทของงานวิจัยนี้ หมายถึง สัดส่วนของภาพที่โมเดลระบุว่า มีเรือ และเป็นจริงที่มีเรือ แสดงประสิทธิภาพของโมเดลในการระบุภาพที่มีเรือได้ถูกต้อง

Recall (ความไว) ในบริบทของงานวิจัยนี้ หมายถึง สัดส่วนของภาพที่มีเรือจริง ๆ ที่โมเดลระบุว่า มีเรือ แสดงประสิทธิภาพของโมเดลในการค้นหาภาพที่มีเรือทั้งหมด

F1-score คะแนน F1-score เป็นค่าเฉลี่ยฮาร์โมนิกของ Precision และ Recall แสดงประสิทธิภาพโดยรวมของโมเดล

4. ผลการวิจัย

งานวิจัยนี้มุ่งพัฒนาระบบตรวจจับเรือในแม่น้ำเจ้าพระยาโดยใช้เทคนิค YOLOv7 เปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมตรวจจับเรือ 2 ชนิด ได้แก่ SSD (Single Shot MultiBox Detector) และ Faster R-CNN (Region-based Convolutional Neural Network) บนชุดข้อมูลภาพถ่ายความละเอียด 608x608 พิกเซล จำนวน 1,000 ภาพ แบ่งเป็นภาพที่มีเรือ 750 ภาพ และภาพไม่มีเรือ 250 ภาพ ดังแสดงผลการทดลองตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การประเมินประสิทธิภาพการตรวจจับเรือในแม่น้ำเจ้าพระยา

อัลกอริทึม	YOLO	Faster R-CNN	SSD
Precision	98.0%	97.0%	92.0%
Recall	92.0%	89.0%	74.0%
F1-Score	95.0%	93.0%	82.0%



รูปที่ 7 การตรวจจับภาพเรือด้วย YOLOv7



รูปที่ 8 การตรวจจับภาพเรือด้วย YOLOv7



รูปที่ 9 การตรวจจับภาพเรือด้วย Faster R-CNN



รูปที่ 10 การตรวจจับภาพเรือด้วย Faster R-CNN



รูปที่ 11 การตรวจจับภาพเรือด้วย SSD



รูปที่ 12 การตรวจจับภาพเรือด้วย SSD

5. สรุป

จากตารางการทดลองที่ 1 ในหัวข้อผลการวิจัยโดยการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ 3 อัลกอริทึม ได้แก่ YOLO (You Only Look Once), SSD (Single Shot MultiBox Detector) และ Faster R-CNN (Region-based Convolutional Neural Network) บนชุดข้อมูลภาพถ่ายจากกล้องที่มีความละเอียด 608x608 พิกเซล จำนวน 1,000 ภาพ แบ่งเป็นภาพที่มีเรือ 750 ภาพ และภาพไม่มีเรือ 250 ภาพ ประเมินประสิทธิภาพของโมเดลโดยใช้ confusion matrix สามารถสรุปผลการทดลองได้ดังนี้

5.1 ประสิทธิภาพในการตรวจจับ

อัลกอริทึม YOLOv7 มีประสิทธิภาพในการตรวจจับเรือในแม่น้ำเจ้าพระยาสูงสุด โดยมีค่า F1-Score สูงสุด YOLOv7 มีค่า F1-Score 95.0% ซึ่งสูงกว่า Faster R-CNN (93.0%) และ SSD (82.0%) มีค่า Precision และ Recall สูง YOLOv7 มีค่า Precision 98.0% และ Recall 92.0%

5.2 โมเดลที่เหมาะสม

จากผลการทดลองซึ่งบ่งชี้ว่าโมเดลอัลกอริทึม YOLOv7 สามารถระบุเรือได้อย่างถูกต้อง และเหมาะสมสำหรับการใช้งานจริงในการตรวจจับเรือเพื่อแก้ไขปัญหาการจราจรทางน้ำที่หนาแน่นและอันตรายในสภาวะแวดล้อมของงานวิจัยนี้

5.3 การอภิปรายผล

จุดเด่นของงานวิจัยนี้ คือความแม่นยำสูงของอัลกอริทึม YOLOv7 ที่ให้ค่า F1-Score สูงสุด (95.0%) แสดงให้เห็นว่าโมเดลสามารถตรวจจับเรือได้อย่างถูกต้องแม่นยำ เหมาะสำหรับการใช้งานจริง เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ 3 อัลกอริทึมบนชุดข้อมูลเดียวกัน ทำให้เลือกอัลกอริทึมที่เหมาะสมกับงานในสภาวะแวดล้อมนี้ได้ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของ YOLOv7 ในการใช้งานจริงสำหรับการตรวจจับเรือในแม่น้ำเจ้าพระยา แต่ข้อจำกัดของงานวิจัยคือขนาดชุดข้อมูล โดยชุดข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบมีขนาดค่อนข้างเล็ก (1,000 ภาพ) และ

ความหลากหลายของข้อมูลที่จำกัดเพียงเรือที่ผ่านมาในช่วงที่เก็บข้อมูลเท่านั้น และในเรื่องการทดสอบงานวิจัยนี้ทดสอบอัลกอริทึมบนภาพถ่ายจากกล้องเท่านั้น ยังไม่มีการทดสอบบนวิดีโอหรือภาพถ่ายที่แตกต่างกันซึ่งก็อาจได้ผลที่แตกต่างกันได้

YOLOv7 มีความสามารถโดดเด่นด้าน multi-scale feature extraction และ backbone ที่ทันสมัย (CSPDarknet + PANet + SPP) ซึ่งช่วยในการ

- จับลักษณะของเรือขนาดเล็กและหลากหลายชนิดได้ดี

- มีโมดูล Focus และ NMS ที่แม่นยำในการคัดกรอง bounding boxes

- รองรับ input ที่มีความละเอียด 608x608 พิกเซลได้ดี ทำให้การจับตำแหน่งวัตถุแม่นยำ

ดังนั้นเมื่อจับคู่กับชุดข้อมูลที่มีลักษณะภาพค่อนข้างคงที่ และเรือมีขนาดต่างกัน YOLOv7 จึงสามารถคาดการณ์ bounding box ได้แม่นยำ ส่งผลให้ precision สูงถึง 98%

5.4 ข้อเสนอแนะสำหรับงานวิจัยในอนาคต

ควรทดสอบ YOLOv7 กับชุดข้อมูลที่ใหญ่ขึ้นและหลากหลายมากขึ้น

ควรเปรียบเทียบ YOLOv7 กับอัลกอริทึมการตรวจจับวัตถุอื่น ๆ มากขึ้น

ควรพัฒนาโมเดล YOLOv7 เพิ่มเติมเพื่อให้สามารถตรวจจับเรือในสภาพต่าง ๆ ได้อย่างแม่นยำมากขึ้น

การทดลองในงานวิจัยนี้ ไม่ได้เน้นการแยกประเภท (Classification) ของเรือ โดยเน้นที่การตรวจจับว่ามีเรือหรือไม่เท่านั้น แต่อย่างไรก็ตาม หากต้องการนำไปแยกประเภทเรือในอนาคต สามารถต่อยอดด้วยโมเดล classification (เช่น ResNet, Inception) ร่วมกับ YOLO ได้ไม่ยาก

ในงานวิจัยนี้ไม่มีการเปรียบเทียบกับ YOLO เวอร์ชันอื่น ๆ แต่ในการเปรียบเทียบ YOLOv7 กับ YOLO เวอร์ชันอื่น (เช่น YOLOv5 หรือ YOLOX) จะช่วยยืนยันในการตรวจจับเรือในแม่น้ำเจ้าพระยาได้อย่างชัดเจน

ยิ่งขึ้น และยังทำให้เห็นความแตกต่างด้านประสิทธิภาพ ทำให้งานวิจัยมีความสมบูรณ์ น่าเชื่อถือทางวิชาการมากขึ้น อีกทั้งยังให้ข้อมูลเชิงลึกอันมีค่าเกี่ยวกับจุดแข็งและจุดอ่อนของแต่ละเวอร์ชัน ซึ่งจะเป็ประโยชน์สำหรับการพัฒนาเทคนิคการตรวจจับวัตถุในอนาคต

6. กิตติกรรมประกาศ

ข้าพเจ้าขอกราบขอบพระคุณ รศ. ดร. สมชาติ จิรวิภากร อาจารย์ที่ปรึกษา เป็นอย่างสูง ที่ได้ให้คำปรึกษา แนะนำแนวทาง และช่วยแก้ไขปัญหาด่าง ๆ ตลอดระยะเวลาการทำวิจัย นอกจากนี้ ข้าพเจ้ายังขอขอบคุณ น.ท. ผศ. ดร. พิศณุ คูมีชัย อาจารย์กองวิชา วิศวกรรมศาสตร์ ฝายศึกษาโรงเรียนนายเรือ ที่เอื้อเฟื้อ อุปกรณ์และเครื่องมือในการวิจัย แนะนำการเขียน โปรแกรม และให้คำปรึกษาจนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปด้วยดี ความสำเร็จของงานวิจัยนี้เกิดขึ้นได้ด้วยการสนับสนุนที่สำคัญจากอาจารย์ทั้งสองท่าน ข้าพเจ้าหวังว่า งานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์ต่อผู้สนใจ และสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดเพื่อสร้างผลงานใหม่ ๆ ต่อไปได้

7. เอกสารอ้างอิง

- [1] Royal Customs Department, *Statistics on Smuggled Goods Seizure*, Bangkok, Thailand: Royal Customs Department, 2022.
- [2] Marine Police Department, *Statistics on Illegal Vessel Seizure*, Bangkok, Thailand: Marine Police Department, 2022.
- [3] Royal Thai Police, *Annual Report 2021*, Bangkok, Thailand: Royal Thai Police, 2021.
- [4] Z. Chen, D. Chen, Y. Zhang, X. Cheng, M. Zhang and C. Wu, "Deep learning for autonomous ship-oriented small ship detection," *Safety Sci.*, vol. 130, Art. no. 104812, 2020.
- [5] P. Arumugam and N. Natarajan, "A survey of face detection, extraction and recognition," *Int. J. Comput. Appl.*, vol. 163, no. 7, pp. 1–6, 2017.
- [6] W. Liu *et al.*, "SSD: Single Shot MultiBox Detector," *arXiv preprint*, arXiv: 1512.02325, 2016.
- [7] J. Redmon, S. Divakar, A. Sivaram and R. Girshick, "You Only Look Once: Unified, real-time object detection," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 38, no. 9, pp. 1656–1667, 2016.
- [8] S. Ren, K. He, R. Girshick and J. Sun, "Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region proposal networks," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 39, no. 6, pp. 1137–1149, 2016.
- [9] J. Dai, Y. Li, K. He and J. Sun, "R-FCN: Fully convolutional networks for object detection," *arXiv preprint*, arXiv: 1605.06409, 2016.
- [10] Z. Cai, N. Vasconcelos and M. Li, "Cascade R-CNN: Delving into high-resolution feature representations for object detection," *arXiv preprint*, arXiv: 1712.00726, 2018.
- [11] C. Fu, W. Liu, D. Anguelov and C. Szegedy, "SSD: Single-Shot MultiBox Detector," *IEEE Trans. Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 39, no. 9, pp. 2163–2177, 2017.
- [12] S. Meng, P. Sun and L. Lin, "Two-Stage SSD for real-time object detection," *arXiv preprint*, arXiv: 1805.14173, 2018.
- [13] J. Redmon, S. Divakar, A. Sivaram and R. Girshick, "You Only Look Once: Unified, real-time object detection," *IEEE Trans.*

- Pattern Anal. Mach. Intell.*, vol. 38, no. 9, pp. 1656–1667, 2016.
- [14] Z. Ge, S. Deng and X. Li, “YOLOX: Scalable and efficient object detection with cross-scale stitching,” *arXiv preprint*, arXiv: 2304.14979, 2024.
- [15] H. Hu, W. Jiang, Z. Qin and J. Tang, “A real-time ship detection method based on improved YOLOv7 and Kalman filter,” *Sensors*, vol. 22, no. 1, p. 142, 2022.
- [16] S. Xie, M. Li, Q. Zhang and Z. Shao, “A ship detection method based on YOLOv7 and improved attention mechanism,” *J. Coast. Res.*, vol. 149, pp. 1–8, 2022.
- [17] Y. Wang, C. Zhang and Z. Xu, “A real-time ship detection method based on YOLOv7 and lightweight network,” *Appl. Sci.*, vol. 12, no. 1, p. 362, 2022.
- [18] N. Srivastava, G. Hinton, A. Krizhevsky, I. Sutskever and R. Salakhutdinov, “Dropout: A simple way to prevent neural networks from overfitting,” *J. Mach. Learn. Res.*, vol. 15, no. 1, pp. 1929–1958, 2014.
- [19] Y. LeCun, Y. Bengio and G. Hinton, “Deep learning,” *Nature*, vol. 521, no. 7553, pp. 436–444, 2015.
- [20] C. Y. Wang, A. Bochkovskiy and H. Y. M. Liao, “YOLOv7: Trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors,” *arXiv preprint*, arXiv:2207.02696, 2022.
- [21] A. Bochkovskiy, C. Y. Wang and H. Y. M. Liao, “YOLOv4: Optimal speed and accuracy of object detection,” *arXiv preprint*, arXiv:2004.10934, 2020.
- [22] W. Liu *et al.*, “SSD: Single-shot MultiBox Detector,” *arXiv preprint*, arXiv: 1603.03991, 2016.
- [23] S. Ren *et al.*, “Faster R-CNN: Towards real-time object detection with region-based convolutional neural networks,” *arXiv preprint*, arXiv: 1506.01497, 2015.
- [24] J. Li, X. Zhang and H. Wang, “A survey of deep learning-based ship detection methods,” *Remote Sens.*, vol. 13, no. 11, pp. 1–24, 2021.

การห่อหุ้มด้วยวิธีไอโอโนโทรปิกเจลชันต่อความเสถียรของธาตุเหล็ก Effect of Ionotropic Gelation Encapsulation on Iron Stability

พีรณัฐ นันสมบัติ แก้วตา เจตศรีสุภาพ*

ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

123 หมู่ 16 ถ.มิตรภาพ ต.ในเมือง อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40002

Pheeranat Nansombat Kaewta Jetsrisuparb*

Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University,
123 Village No.16, Mittraphap Rd., Naimuang, Muang District, Khon Kaen, Thailand, 40002

*Corresponding author Email: Kaewta@kku.ac.th

(Received: March 31, 2025; Revised: June 13, 2025 ; Accepted: June 30, 2025)

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาการห่อหุ้มเหล็กเฟอร์รัสซัลเฟต (ferrous sulfate, FeSO_4) ด้วยโซเดียมแอลจีเนต (sodium alginate, SA) เพื่อเพิ่มความเสถียรของธาตุเหล็กในสารละลายจำลองในกระเพาะอาหารที่ pH 1.2 และศึกษาการปลดปล่อยธาตุเหล็กในสารละลายจำลองในลำไส้เล็กที่ pH 7.4 โดยใช้วิธีการห่อหุ้มธาตุเหล็กด้วยไฮโดรเจลสองแบบ เป็นวัสดุไฮโดรเจลบรรจุธาตุเหล็กด้วยวิธีการเชื่อมขวางและ วัสดุไฮโดรเจลบรรจุธาตุเหล็กจากการแช่ ผลจากการตรวจสอบด้วยเทคนิค Fourier transform Infrared (FTIR) พบว่าวิธีเชื่อมขวางสามารถห่อหุ้มธาตุเหล็กได้ดีกว่าการแช่ ผลการตรวจสอบด้วยเทคนิค UV-visible spectroscopy (UV-vis) และ atomic absorption spectroscopy (AAS) พบว่าภายใต้สภาวะ pH 1.2 วิธีการห่อหุ้มด้วยโซเดียมแอลจีเนตทั้งสองวิธีมีประสิทธิภาพในการลดการปลดปล่อยธาตุเหล็ก Fe^{2+} และ Fe^{3+} ดีกว่า FeSO_4 และที่ pH 7.4 วัสดุไฮโดรเจลบรรจุธาตุเหล็กด้วยวิธีการเชื่อมขวางปลดปล่อยธาตุเหล็ก Fe^{2+} มากกว่าวัสดุไฮโดรเจลบรรจุธาตุเหล็กจากการแช่ และ FeSO_4 ที่ไม่ถูกห่อหุ้มถึง 30% ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการใช้โซเดียมแอลจีเนตเป็นวัสดุห่อหุ้มอาจมีประสิทธิภาพในการลดการปลดปล่อยธาตุเหล็กในสารละลายจำลองกระเพาะอาหาร อีกทั้งการห่อหุ้มด้วยวิธีเชื่อมขวางทำให้ธาตุเหล็ก Fe^{2+} มีความเสถียรในสารละลายจำลองลำไส้เล็ก ซึ่งอาจเพิ่มความสามารถในการดูดซึมธาตุเหล็กในร่างกายมากกว่า FeSO_4 ที่ไม่ถูกห่อหุ้ม หรือการห่อหุ้มด้วยวิธีแช่

คำสำคัญ: แอลจีเนต ห่อหุ้ม การปลดปล่อยธาตุเหล็ก การเชื่อมขวาง

ABSTRACT

This study focused on developing techniques to encapsulate ferrous sulfate (FeSO_4) with sodium alginate (SA) by comparing two encapsulation methods: crosslinking SA using Fe^{2+} from FeSO_4 as a crosslinker and immersion of SA beads in a FeSO_4 solution. The aim was to enhance the stability of iron in a simulated gastric fluid at pH 1.2 and to release iron in a simulated intestinal fluid at pH 7.4. Analysis using Fourier Transform Infrared (FTIR) technique indicated successful binding of iron with alginate. Evaluation through UV-visible spectroscopy (UV-vis) and Atomic Absorption Spectroscopy (AAS) demonstrated that iron-alginate beads prepared by both encapsulation and immersion effectively

reduced the release of Fe^{2+} and Fe^{3+} at pH 1.2 compared to unencapsulated FeSO_4 . In particular, the crosslinked beads released up to 30% more Fe^{2+} at pH 7.4 than immersed beads and unencapsulated FeSO_4 . This study demonstrated that using SA as an encapsulation material can reduce iron release in the gastric fluid, and crosslinking method resulted in Fe^{2+} that may be better absorbable in larger quantities in the intestine compared to soaking method and unencapsulated FeSO_4 .

Keyword: Alginate, encapsulation, iron release, crosslinking.

1. บทนำ

ธาตุเหล็กเป็นส่วนประกอบของฮีโมโกลบินในเม็ดเลือดแดงที่ช่วยในกระบวนการเมตาบอลิซึมและการลำเลียงออกซิเจนภายในร่างกาย ธาตุเหล็กมีสองรูปแบบหลักคือ Fe^{2+} และ Fe^{3+} โดย Fe^{2+} เป็นรูปแบบที่ร่างกายสามารถดูดซึมได้ง่ายและใช้ประโยชน์ได้ทันที เนื่องจาก Fe^{2+} สามารถถูกดูดซึมโดยตรงที่ลำไส้เล็ก ในทางตรงกันข้าม Fe^{3+} ต้องผ่านกระบวนการเปลี่ยนแปลงเป็น Fe^{2+} ก่อนร่างกายจึงจะสามารถดูดซึมได้

อย่างไรก็ตามการลำเลียงธาตุเหล็ก Fe^{2+} ไปสู่ลำไส้ต้องผ่านกระเพาะอาหารที่มีความเป็นกรด (pH 1-3) ซึ่งเป็นสภาวะที่เหล็ก Fe^{2+} ละลายได้ดี แต่กระเพาะอาหารมีความสามารถในการดูดซึมธาตุเหล็กน้อยมาก เมื่อเทียบกับการดูดซึมในลำไส้เล็กที่มี pH 7-8 [1],[2] ดังนั้น Fe^{2+} ที่ละลายออกมาในกระเพาะอาหารจึงมักเกิดการออกซิเดชันเป็น Fe^{3+} หรือทำปฏิกิริยากับสารอาหารอื่นในกระเพาะอาหาร[3] ซึ่งทำให้ประสิทธิภาพในการดูดซึมธาตุเหล็กลดลง การนำเทคนิคห่อหุ้มธาตุเหล็กด้วยวัสดุที่มีความเข้ากันได้กับร่างกาย (biocompatible) จึงถูกนำมาประยุกต์ใช้เพื่อเพิ่มความเสถียรของธาตุเหล็ก Fe^{2+} จากปฏิกิริยาออกซิเดชันในสภาวะเป็นกรดใกล้เคียงกับกระเพาะอาหาร (pH 1.2) ในขณะที่ Fe^{2+} ที่ถูกห่อหุ้มก็ยังสามารถละลายออกมาในสารละลายจำลองลำไส้เล็ก (pH 7.4)

แอลจินเนต คือ พอลิแซ็กคาไรด์ธรรมชาติที่ถูกสกัดจากสาหร่ายทะเล ประกอบด้วยสายโซ่ตรงที่ประกอบไปด้วยกรด α -L-guluronic (G) และกรด β -D-mannuronic (M) มีคุณสมบัติความเข้ากันได้กับร่างกาย และยังสามารถ

ในการเปลี่ยนจากสารละลายเป็นไฮโดรเจลหรือเม็ดปิดเมื่อเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางกับแคตไอออน เช่น Zn^{2+} , Ca^{2+} , Fe^{2+} และ Fe^{3+} เป็นต้น [4],[5] โดยการทำปฏิกิริยากับแคตไอออนแบบไม่ขึ้นอยู่กับอุณหภูมิ แอลจินเนตจึงมีความเหมาะสมในการห่อหุ้มธาตุเหล็ก Fe^{2+} [6] ส่วนใหญ่แล้วการนำแอลจินเนตมาใช้มักมีการปรับปรุงหมู่โครงสร้าง COOH เป็น COOX (X= Ca, Na) เพื่อเพิ่มคุณสมบัติการละลายน้ำ ตัวอย่างเช่น แคลเซียมแอลจินเนต, โซเดียมแอลจินเนต [7] แทนที่จะใช้เป็นกรดแอลจินิกโดยตรง

การห่อหุ้มสารลำเลียงด้วยวิธีไอโอโนโทรปิก (ionotropic gelation) เกิดจากปฏิกิริยาการเชื่อมขวางระหว่างหมู่คาร์บอกซิลของแอลจินเนตและธาตุเหล็กในสารละลาย โดยแรงดึงดูด (electrostatic force) ระหว่างขั้วบวกของธาตุเหล็ก Fe^{2+} หรือ Fe^{3+} และขั้วลบของหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิล (COO^-) ของโซเดียมแอลจินเนต ซึ่งเพิ่มความแข็งแรงและความเสถียรให้กับวัสดุไฮโดรเจลบรรจุธาตุเหล็ก โดยงานวิจัยนี้ศึกษาวิธีการห่อหุ้มธาตุเหล็ก Fe^{2+} เพื่อป้องกันและรักษาคุณสมบัติของธาตุเหล็ก Fe^{2+} ด้วยวิธีการห่อหุ้ม 2 วิธี ได้แก่ วิธีเชื่อมขวางและวิธีแช่ต่อปริมาณธาตุเหล็ก Fe^{2+} และ Fe^{3+} ที่ปลดปล่อยออกมาในสารละลายจำลองกระเพาะอาหารที่ pH 1.2 และสารละลายจำลองลำไส้เล็กที่ pH 7.4

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 วัสดุและอุปกรณ์

โซเดียมแอลจินเนต (sodium alginate) เกรดประกอบอาหาร ความบริสุทธิ์ 99.7% จากยี่ห้อ UCS ไอร์รอนซัลเฟตเฮปตะไฮเดรต ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) ความบริสุทธิ์

มากกว่า 99% จากยี่ห้อ KEMAUS โพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ความบริสุทธิ์ 99.8% จากยี่ห้อ UNIVAR กรดไฮโดรคลอริก (HCl) กรดซัลฟิวริก (H_2SO_4) และกรดอะซิติก (Acetic acid) ความบริสุทธิ์ที่ 37% , 98% และ 99.8% จากยี่ห้อ RCI labscan ตามลำดับ โมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต (KH_2PO_4) ความบริสุทธิ์ที่ 99.5% จากยี่ห้อ RCI labscan ไดโซเดียมฟอสเฟต (Na_2HPO_4) โซเดียมอะซิเตรต ($CH_3COONa \cdot 3H_2O$) และโซเดียมคลอไรด์ (NaCl) ความบริสุทธิ์ที่ >99%, 99.5% และ >99.8% จากยี่ห้อ QREC ตามลำดับ 1,10-พีนโทลีนโมโนไฮเดรต ($C_{12}H_{18}N_2 \cdot 1H_2O$) ความบริสุทธิ์มากกว่า 99% ยี่ห้อ VWR และน้ำปราศจากประจุ (deionized Water) ที่ค่าความต้านทาน 18.2 โอห์ม

2.2 วิธีเตรียมวัสดุไฮโดรเจลบรรจุธาตุเหล็กวิธีเชื่อมขวาง (crosslinked Alg-Fe)

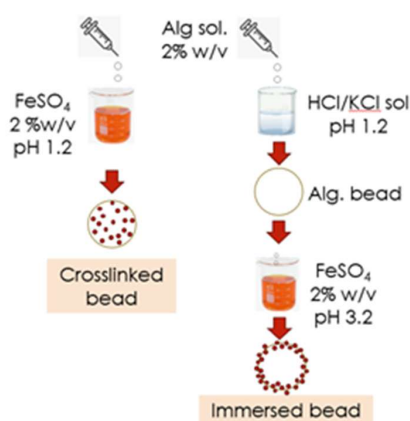
เตรียมสารละลายแอลจินต 2% (w/v) จากการนำโซเดียมแอลจินตที่ผ่านการอบที่ 60 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ไปละลายในน้ำปราศจากไอออน (DI) อุณหภูมิ 80 °C จนกระทั่งโซเดียมแอลจินตละลายหมด แล้วกวนผสมเพื่อไล่ฟองอากาศ 12 ชั่วโมงที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำสารละลายโซเดียมแอลจินต 2% (w/v) ปริมาตร 20 มิลลิลิตร หยดลงในสารละลาย $FeSO_4$ 2% (w/v) ที่มี pH 1.2 ปริมาณ 100 มิลลิลิตร เมื่อสารละลายโซเดียมแอลจินตสัมผัสกับสารละลาย $FeSO_4$ จะเกิดเม็ดของวัสดุไฮโดรเจลบรรจุธาตุเหล็กเกิดตามกระบวนการไอโอโนโทรปิก จากนั้นปล่อยให้เกิดการเชื่อมขวางต่อในสารละลาย $FeSO_4$ ที่มี pH 1.2 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วนำวัสดุไฮโดรเจลบรรจุธาตุเหล็กที่ได้มาล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน แล้วนำไปอบที่ 40 °C เป็นเวลา 12 ชั่วโมง จากนั้นทำการบดด้วยโกร่งเพื่อเตรียมนำไปทดสอบ ดังแสดงในรูปที่ 1

2.3 วิธีเตรียมวัสดุไฮโดรเจลบรรจุธาตุเหล็กวิธีแช่ (immersed Alg-Fe)

นำสารละลายโซเดียมแอลจินต 2% (w/v) 20 มิลลิลิตร หยดลงในสารละลายกรดไฮโดรคลอริก pH 1.2 ปริมาตร 80 มิลลิลิตร ระหว่างการหยดสารละลายโซเดียม

แอลจินตลงในสารละลายกรด จะเกิดเป็นลักษณะเม็ดของวัสดุไฮโดรเจล ทำการล้างวัสดุไฮโดรเจลนั้นด้วยน้ำปราศจากไอออน แล้วนำไปแช่ลงในสารละลาย $FeSO_4$ 2% (w/v) 100 มิลลิลิตร pH 3.2 เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นล้างด้วยน้ำปราศจากไอออน จากนั้นนำไปอบและบด เช่นเดียวกับการเตรียมวัสดุไฮโดรเจลบรรจุธาตุเหล็กวิธีเชื่อมขวาง ดังแสดงในรูปที่ 1

ไฮโดรเจลที่สังเคราะห์ขึ้นจะถูกนำมาวิเคราะห์ขนาดด้วยโปรแกรม ImageJ



รูปที่ 1 แผนภาพแสดงการเตรียมวัสดุไฮโดรเจลบรรจุธาตุเหล็กด้วยวิธีเชื่อมขวาง (ซ้าย) และวิธีแช่ (ขวา)

2.4 การพิสูจน์องค์ประกอบทางเคมี

การตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีของโซเดียมแอลจินตทำได้โดยใช้เทคนิค FTIR โดยใช้ความยาวคลื่นในช่วง 500 – 3500 เซนติเมตร⁻¹ ทำการตรวจสอบตัวอย่างวัสดุไฮโดรเจลวิธีเชื่อมขวางและวิธีแช่ เทียบกับโซเดียมแอลจินต เพื่อยืนยันการห่อหุ้มธาตุเหล็กด้วยวิธีเชื่อมขวางและวิธีแช่

2.5 การปลดปล่อยธาตุเหล็ก (Fe^{2+} และ Fe^{3+}) ของวัสดุไฮโดรเจลบรรจุธาตุเหล็ก (Fe^{2+} , Fe^{3+})

สารละลายจำลองกระเพาะอาหารที่ pH 1.2 ถูกเตรียมจากกรดไฮโดรคลอริก 0.2M ผสมกับโพแทสเซียมคลอไรด์ 0.2M จากนั้นปรับ pH ด้วยกรดไฮโดรคลอริก

10% (v/v) จนได้สารละลาย pH 1.2 สารละลายจำลอง
ลำไส้เล็กที่มีค่า pH 7.4 เตรียมจากสารละลายของโซเดียม
คลอไรด์ 0.137 M, โพแทสเซียมคลอไรด์ 0.0027 M, ได
โซเดียมฟอสเฟต 0.010 M และโมโนโพแทสเซียมฟอสเฟต
(0.0018 M) ในน้ำปราศจากไอออน

วัสดุไฮโดรเจลบรรจุธาตุเหล็กวิธีเชื่อมขวาง, วัสดุ
ไฮโดรเจลบรรจุธาตุเหล็กวิธีแช่และเฟอร์รัสซัลเฟต
($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) 0.150 กรัม ถูนำมาแช่ในสารละลาย
จำลองกระเพาะอาหารที่ pH 1.2 และลำไส้เล็กที่ pH 7.4
ปริมาตร 150 มิลลิลิตร จากนั้นทำการเก็บสารละลาย
ตัวอย่างที่ละลายในสารละลายจำลอง ในเวลา 15 30 60
120 180 และ 240 นาที สารละลายตัวอย่างจะถูกลำไป
เจือจางในกรดไนตริกเข้มข้น 1% (v/v) เพื่อวิเคราะห์
ความเข้มข้น Fe^{2+} และ Fe^{3+} ด้วยเทคนิค AAS (AAAnalyst
100) [8]

2.6 การปลดปล่อยธาตุเหล็ก Fe^{2+} ของวัสดุไฮโดร เจลบรรจุธาตุเหล็ก

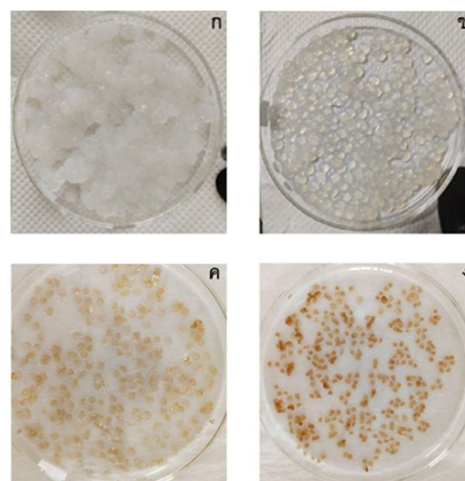
นำสารละลายที่ต้องการวัดปริมาณธาตุเหล็ก 40
ไมโครลิตร หยดลงในสารละลายฟีนานโทรีน (0.1%
(w/v)) 1 มิลลิลิตร สารละลายบัฟเฟอร์ของอะซิเตด pH
3.5 ปริมาตร 0.8 มิลลิลิตร จากนั้นเติมน้ำปราศจากไอออน
จนได้ปริมาตร 10 มิลลิลิตร โดยปริมาณธาตุเหล็ก Fe^{2+} ที่
วัดได้จะเทียบกับกราฟมาตรฐาน (calibration curve) ที่
เตรียมจากเฟอร์รัสซัลเฟต ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) 0-4 ppm ที่
ความเข้มข้นต่างๆ และนำมาวัดค่าการดูดซับด้วยเทคนิค
UV-visible spectroscopy (UV-vis) ที่ 510 นาโนเมตร

3. ผลการทดลองและวิเคราะห์ผลการทดลอง

3.1 คุณสมบัติทางกายภาพของวัสดุไฮโดรเจลบรรจุ ธาตุเหล็ก

สารละลายแอลจินेट 2% w/v มีลักษณะใสไม่มีสี มี
ความหนืดที่อุณหภูมิห้อง 25°C อยู่ที่ 1083.01 ± 7.48
mPa-s เมื่อถูกนำมาขึ้นรูปเป็นเม็ดจะได้วัสดุไฮโดรเจลทรง
กลม เมื่ออิมมิดด้วยน้ำขนาดของวัสดุไฮโดรเจลบรรจุธาตุ
เหล็กวิธีแช่มีขนาด 6.05 ± 0.48 มิลลิเมตร ส่วนวัสดุไฮโดรเจ

ลบรรจุธาตุเหล็กวิธีเชื่อมขวางมีขนาด 5.60 ± 0.34 มิลลิเมตร
ดังรูปที่ 2(ก) และ 2(ข) ขนาดของวัสดุไฮโดรเจลที่แตกต่างกัน
นั้น อาจจะเป็นผลจากความสามารถในการหดและ
ขยายตัวของวัสดุแอลจินेटที่ pH ต่างกัน สอดคล้องกับ
การศึกษาโดย Liu และคณะ ที่ pH 1.2 ไฮโดรเจลของแอลจิ
เนตมีการหดตัว และเมื่อ pH เพิ่มขึ้นจะขยายตัว [9] จึง
ส่งผลต่อพฤติกรรมการหดตัวของแอลจินेट นอกจากนี้
ยังพบว่าวิธีการขึ้นรูปส่งผลต่อปริมาณธาตุเหล็กในวัสดุ
ไฮโดรเจลบรรจุธาตุเหล็กอีกด้วย [10],[11]



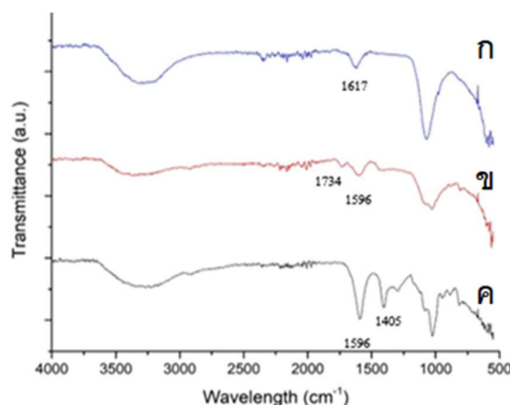
รูปที่ 2 ลักษณะของวัสดุไฮโดรเจลบรรจุธาตุเหล็กที่เตรียม
ด้วย (ก) วิธีแช่เมื่ออิมมิดด้วยน้ำ (ข) วิธีเชื่อมขวางเมื่ออิมมิด
ด้วยน้ำ (ค) วิธีแช่หลังจากระเหยน้ำ และ (ง) วิธีเชื่อมขวาง
หลังจากระเหยน้ำ

หลังจากระเหยน้ำออกจากวัสดุไฮโดรเจลบรรจุธาตุ
เหล็กเป็นเวลา 12 ชั่วโมง พบว่าวัสดุไฮโดรเจลบรรจุธาตุ
เหล็กเปลี่ยนรูปร่างจากทรงกลมเป็นแบนราบและมีสีที่
เปลี่ยนไปจากสีขาวขุ่นไปเป็นมีสีเหลืองส้มที่เข้มข้นดังรูปที่
2(ค) และ 2(ง) สีที่เปลี่ยนแปลงอาจเกิดจากการที่ธาตุเหล็ก
ที่สัมผัสกับอากาศในระหว่างกระบวนการอบ ทำให้ธาตุ
เหล็ก Fe^{2+} ในวัสดุไฮโดรเจลบรรจุธาตุเหล็กถูกออกซิไดซ์
เป็นธาตุเหล็ก Fe^{3+} [12] จากรูปที่ 2(ค) 2(ง) พบว่าวัสดุ
ไฮโดรเจลบรรจุธาตุเหล็กแบบแห้งมีสีต่างกันเล็กน้อย อาจ
เป็นผลจากพฤติกรรมการหดตัวและคลายตัวของแอลจินेट

ในสภาพ pH ที่ต่างกันระหว่างการสังเคราะห์ทำให้ปริมาณธาตุเหล็กในโซเดียมแอลจิเนตต่างกัน เนื่องจากรูปทรงของวัสดุไฮโดรเจลมีความต่างกันจึงนำไปดเป็นผงและกรองเพื่อใช้ในการทดลองต่อไป

3.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุไฮโดรเจลบรรจุธาตุเหล็ก

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของตัวอย่างวัสดุไฮโดรเจลบรรจุธาตุเหล็กที่ขึ้นรูปด้วยวิธีเชื่อมขวาง วิธีแช่และโซเดียมแอลจิเนตด้วยเทคนิค FTIR เป็นไปดังรูปที่ 3 (ก) 3(ข) และ 3(ค) ตามลำดับ โดยผล FTIR ของโซเดียมแอลจิเนตพบพิกัดเอกลักษณ์ที่ 1596 cm^{-1} , 1405 cm^{-1} ซึ่งเป็นพิกัดของหมู่ฟังก์ชัน COO(asym) และ COO(sym) ของโซเดียมแอลจิเนตตามลำดับ [7]



รูปที่ 3 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเทคนิค FTIR ของ (ก) วัสดุไฮโดรเจลบรรจุธาตุเหล็กวิธีเชื่อมขวาง (ข) วัสดุไฮโดรเจลบรรจุธาตุเหล็กวิธีแช่ (ค) โซเดียมแอลจิเนต

ส่วนบริเวณช่วงความยาวคลื่น $1100\text{--}1000\text{ cm}^{-1}$ พิกัดเอกลักษณ์ไม่เด่นชัด เนื่องจากพิกัดที่ควมรวมกันของหมู่ฟังก์ชัน C-C และ C-O ในโซเดียมแอลจิเนต [13] ผล FTIR ของวัสดุไฮโดรเจลบรรจุธาตุเหล็กวิธีแช่ (รูปที่ 3(ข)) แสดงให้เห็นพิกัดเอกลักษณ์ที่ความยาวคลื่น 1596 cm^{-1} เป็นพิกัดเอกลักษณ์ของหมู่ฟังก์ชัน COO(asym) ของโซเดียมแอลจิเนต และพบพิกัดเอกลักษณ์ที่ความยาวคลื่น 1734 cm^{-1} ซึ่งอาจเป็นพิกัดเอกลักษณ์ของหมู่ฟังก์ชัน COOH ของกรด

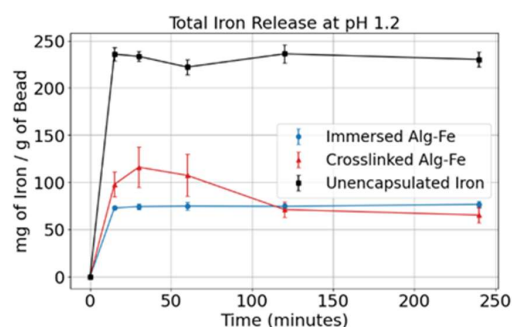
แอลจินิก [14] เนื่องจากเกิดการโปรตอนเต (protonate) ระหว่างการสังเคราะห์วัสดุไฮโดรเจลบรรจุธาตุเหล็กในสภาวะกรด อีกทั้งการหายไปของพิกัดเอกลักษณ์ COO(sym) ของโซเดียมแอลจิเนตในช่วง 1405 cm^{-1} [14] ทำให้สรุปได้ว่าโซเดียมแอลจิเนตเกิดการโปรตอนเตระหว่างการสังเคราะห์วัสดุไฮโดรเจลบรรจุธาตุเหล็กอย่างแน่นอน ส่วน FTIR ของวัสดุไฮโดรเจลบรรจุธาตุเหล็กวิธีเชื่อมขวาง (รูปที่ 3(ก)) พบว่าพิกัด 1596 cm^{-1} ซึ่งเป็นพิกัดเอกลักษณ์ของหมู่ฟังก์ชัน COO ในโซเดียมแอลจิเนตเกิดการ shift ไปที่ 1617 cm^{-1} ซึ่งอาจเกิดจากการแลกเปลี่ยนประจุวระหว่าง Na^+ ในหมู่ฟังก์ชันคาร์บอกซิลิกของโซเดียมแอลจิเนตกับธาตุเหล็ก Fe^{2+} , Fe^{3+} ทำให้เกิดพันธะ COO ในโซเดียมแอลจิเนตกับธาตุเหล็ก Fe^{2+} , Fe^{3+} ทำให้พิกัดเอกลักษณ์ของ COO ในแอลจิเนต shift ไปจากเดิมสอดคล้องกับ Katuwavila และคณะซึ่งพบการ shift ของพิกัดเอกลักษณ์ COO ในแอลจิเนตจาก 1580 cm^{-1} ไปเป็น 1597 cm^{-1} [15] ส่วนพิกัดเอกลักษณ์ของ COO(sym) บริเวณ 1405 cm^{-1} หายไปเนื่องจากการโปรตอนเต (protonate) ระหว่างการสังเคราะห์วัสดุไฮโดรเจลบรรจุธาตุเหล็กจากการเปลี่ยนแปลงนี้เป็นการยืนยันว่าแอลจิเนตห่อหุ้มธาตุเหล็กได้สำเร็จด้วยการขึ้นรูปวิธีเชื่อมขวางเป็นไปดังสมมุติฐานเรื่องการกระจายตัวของธาตุเหล็กในวัสดุไฮโดรเจลบรรจุธาตุเหล็ก ส่วนการขึ้นรูปวิธีแช่จำเป็นต้องตรวจสอบการปลดปล่อยธาตุเหล็กเพื่อยืนยันว่าธาตุเหล็กถูกห่อหุ้มโดยโซเดียมแอลจิเนตต่อไป

3.3 การปลดปล่อยธาตุเหล็กรวม (Fe^{2+} และ Fe^{3+})

การวัดการปลดปล่อยธาตุเหล็กรวมเป็นการวิเคราะห์ผลรวมของปริมาณ Fe^{2+} และ Fe^{3+} ที่ละลายออกมาในสารละลาย รูปที่ 4 แสดงลักษณะการปลดปล่อยธาตุเหล็กรวมในสารละลายจำลองกระเพาะอาหารที่ pH 1.2 ของวัสดุไฮโดรเจลบรรจุธาตุเหล็กวิธีแช่และวิธีเชื่อมขวาง และ FeSO_4 โดยพบอัตราการปลดปล่อยธาตุเหล็กรวมของตัวอย่างทั้ง 3 ชนิดสูงสุดในช่วงเวลา 30 นาที จากนั้นปริมาณการปลดปล่อยธาตุเหล็กโดยรวมแทบจะไม่มี

เปลี่ยนแปลงหรือเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อยจนครบ 240 นาที

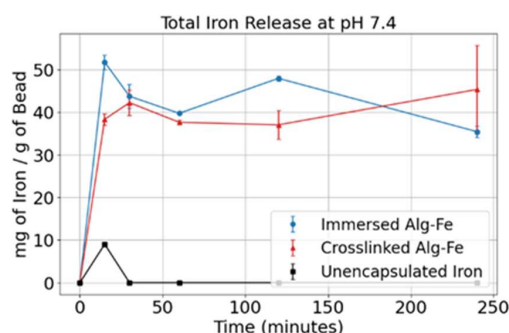
วัสดุไฮโดรเจลบรรจุธาตุเหล็กวิธีแช่และวิธีเชื่อมขวาง มีปริมาณการปลดปล่อยธาตุเหล็กรวมในสารละลายจำลองกระเพาะอาหารที่ pH 1.2 เฉลี่ยประมาณ 75 และ 65 มิลลิกรัมเหล็กต่อกรัมของไฮโดรเจลตามลำดับ ซึ่งต่ำกว่า FeSO_4 ที่ปลดปล่อยธาตุเหล็กรวมได้ประมาณ 230 มิลลิกรัมเหล็กต่อกรัมของ FeSO_4 ผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าโครงสร้างเครือข่ายสามมิติของแอลจินตและวิธีสังเคราะห์ไฮโดรเจลส่งผลต่อการอัตราการปลดปล่อยธาตุเหล็กออกสู่สารละลายจำลองกระเพาะอาหารที่ pH 1.2 โดยทำหน้าที่ควบคุมการแพร่และการละลายของธาตุเหล็กจากไฮโดรเจล ซึ่งแตกต่างจาก FeSO_4 ที่ไม่ถูกห่อหุ้มเหล็กจึงละลายออกสู่สารละลายได้อย่างรวดเร็วและในปริมาณมาก ความสามารถในการควบคุมการปลดปล่อยของเหล็กด้วยไฮโดรเจลวิธีเชื่อมขวางสอดคล้องกับงานวิจัยของ Valenzuela และคณะ (2015) ที่ใช้แอลจินตห่อหุ้มธาตุเหล็กโดยใช้ Ca^{2+} เป็นตัวเชื่อมขวาง [16]



รูปที่ 4 การปลดปล่อยธาตุเหล็กรวม (Fe^{2+} และ Fe^{3+}) ในสารละลายจำลองกระเพาะอาหารที่ pH 1.2

ในสารละลายจำลองลำไส้เล็กที่ pH 7.4 (รูปที่ 5) พบว่าวัสดุไฮโดรเจลบรรจุธาตุเหล็กวิธีแช่และวิธีเชื่อมขวางมีการปลดปล่อยธาตุเหล็กในรูป Fe^{2+} และ Fe^{3+} ที่มากกว่า FeSO_4 แสดงให้เห็นว่าวัสดุไฮโดรเจลบรรจุธาตุเหล็กสามารถปลดปล่อยธาตุเหล็กในสารละลายจำลอง

ลำไส้เล็กได้ เนื่องจากการขยายตัวของวัสดุไฮโดรเจลบรรจุธาตุเหล็กทำให้น้ำสามารถแทรกเข้าไปภายในโครงสร้างของไฮโดรเจล Fe^{2+} และ Fe^{3+} จึงสามารถละลายออกมาได้ ส่วนสาเหตุที่ไม่พบการละลายของธาตุเหล็กในตัวอย่าง FeSO_4 อาจเป็นเพราะเมื่อ Fe^{2+} จาก FeSO_4 ละลายออกมาและสัมผัสกับสารละลายจำลองลำไส้เล็กที่ pH 7.4 Fe^{2+} จะเกิดการออกซิไดซ์กลายเป็น Fe^{3+} [17] และเมื่อสัมผัสกับฟอสเฟตในสารละลายจะเกิดเป็น FePO_4 และตกตะกอน [18]



รูปที่ 5 การปลดปล่อยธาตุเหล็กรวม (Fe^{2+} และ Fe^{3+}) ในสารละลายจำลองลำไส้เล็กที่ pH 7.4

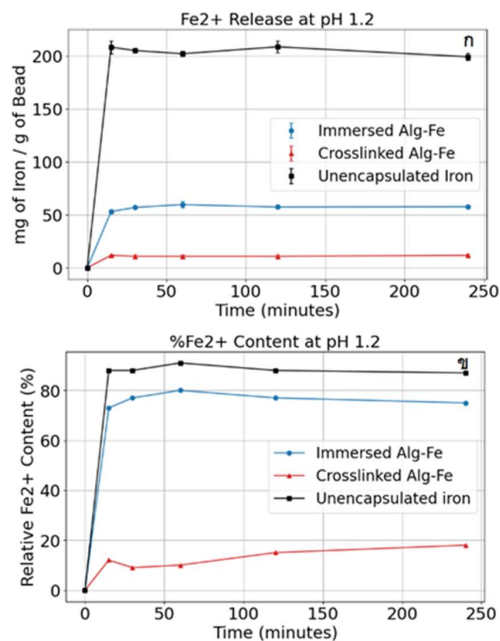
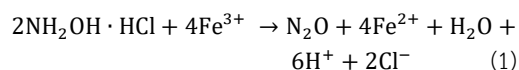
ดังนั้นในสภาวะจำลองกระเพาะอาหาร pH 1.2 ซึ่งเป็นสภาวะที่ธาตุเหล็กละลายได้ดี การห่อหุ้มด้วยแอลจินตช่วยลดการปลดปล่อยของธาตุเหล็ก ขณะที่ในสารละลายจำลองของลำไส้เล็กต้นที่ pH 7.4 การห่อหุ้มด้วยแอลจินตช่วยให้ธาตุเหล็กคงรูปในสภาพไอออนและปลดปล่อยออกมาได้

3.4 การปลดปล่อยธาตุเหล็ก Fe^{2+}

เนื่องจากร่างกายสามารถดูดซึม Fe^{2+} ได้มากกว่า Fe^{3+} การทดลองนี้จึงศึกษาการปลดปล่อยธาตุเหล็กในรูป Fe^{2+} ของไฮโดรเจลด้วยเทคนิคพีแนนนอร์ลีน [19],[20] ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยาจำเพาะกับ Fe^{2+}

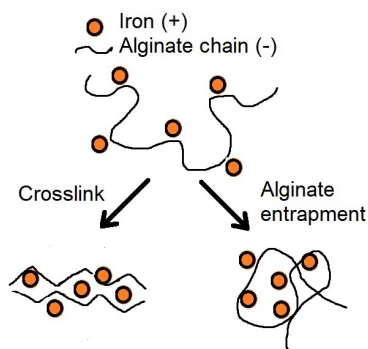
ผลการศึกษาการปลดปล่อย Fe^{2+} ในสารละลายจำลองกระเพาะอาหารที่ pH 1.2 รูปที่ 6(ก) พบว่า FeSO_4 มีการปลดปล่อย Fe^{2+} ประมาณ 200 มิลลิกรัม Fe^{2+} ต่อ

กรัม FeSO_4 ซึ่งมากกว่าการปลดปล่อย Fe^{2+} ของวัสดุไฮโดรเจลบรรจุธาตุเหล็กวิธีแช่ที่มีอัตราการปลดปล่อย Fe^{2+} (57 มิลลิกรัม Fe^{2+} ต่อกรัมของไฮโดรเจล) และวัสดุไฮโดรเจลบรรจุธาตุเหล็กวิธีเชื่อมขวาง (11.7 มิลลิกรัม Fe^{2+} ต่อกรัมของไฮโดรเจล) ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบความสามารถในการปลดปล่อย Fe^{2+} ของวัสดุไฮโดรเจลห่อหุ้มธาตุเหล็กแบบเชื่อมขวางในงานวิจัยนี้ พบว่ามีค่าต่ำกว่าผลการศึกษาของ Nengsih และคณะ(2023) ซึ่งมีค่าสูงถึง 140 มิลลิกรัม Fe^{2+} ต่อกรัมของไฮโดรเจล [21] ความแตกต่างนี้อาจเกิดจากหลายปัจจัยที่ทำให้ความสามารถในการห่อหุ้มธาตุเหล็ก Fe^{2+} แตกต่างกันได้ เช่น ขนาดของไฮโดรเจล สัดส่วนของกรดกอลูโรนิกต่อกรดมานูโรนิกในโมเลกุลของอัลจินต (G/M) [22] และความหนืดที่แตกต่างกัน [23] รูปที่ 6(ข) แสดงอัตราส่วนร้อยละการปลดปล่อยของ Fe^{2+} เปรียบเทียบกับปริมาณธาตุเหล็กกรรม (Fe^{2+} และ Fe^{3+}) ที่ละลายออกมาในสารละลาย ณ เวลานั้นๆ เมื่อพิจารณา FeSO_4 พบว่าการปลดปล่อย Fe^{2+} อยู่ที่ร้อยละ 90 ในขณะที่ของวัสดุไฮโดรเจลบรรจุธาตุเหล็กวิธีแช่และวิธีเชื่อมขวางอยู่ที่ร้อยละ 75 และ 20 ตามลำดับ ดังนั้นการห่อหุ้มธาตุเหล็กด้วยแอลจินตสามารถช่วยปกป้องธาตุเหล็ก Fe^{2+} จากสภาวะจำลองกรดในกระเพาะอาหารที่ pH 1.2 ได้ดีกว่า FeSO_4 ที่ไม่ได้ห่อหุ้ม สำหรับ FeSO_4 นั้น ปริมาณ Fe^{2+} ร้อยละ 10 ที่ไม่พบในสารละลายนั้นอาจเกิดจากการออกซิเดชันเป็น Fe^{3+} ซึ่งไม่ทำปฏิกิริยากับฟิแนนโทรีน สอดคล้องกับผลการทดลองทำเดิมสารไฮดรอกซิดาไมด์ไฮโดรคลอไรด์เพื่อรีดิวซ์ Fe^{3+} ให้กลับเป็น Fe^{2+} [24] ดังปฏิกิริยาที่ (1) พบว่ามีปริมาณ Fe^{3+} อยู่ประมาณร้อยละ 10 ใน FeSO_4



รูปที่ 6 ปริมาณการปลดปล่อย Fe^{2+} ในสารละลายจำลองกระเพาะอาหารที่ pH 1.2 (ก) ปริมาณของ Fe^{2+} ต่อน้ำหนักวัสดุ (ข) อัตราส่วนร้อยละของ Fe^{2+} ต่อปริมาณการปลดปล่อยธาตุเหล็กกรรม (Fe^{2+} และ Fe^{3+})

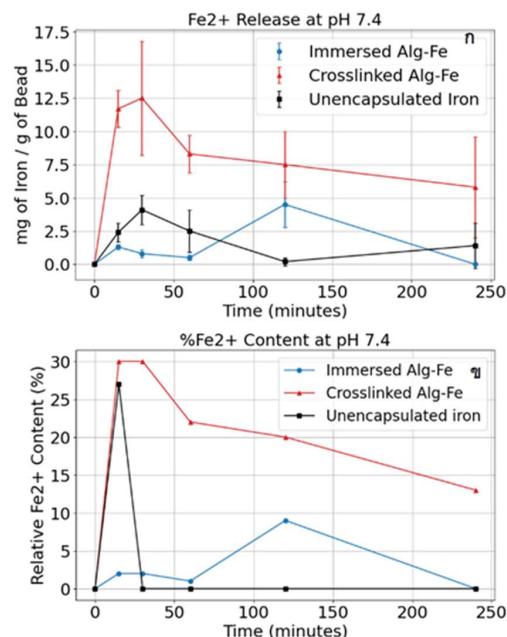
วิธีการสังเคราะห์วัสดุไฮโดรเจลบรรจุธาตุเหล็กมีผลต่อโครงสร้างภายใน การเชื่อมขวาง ความสามารถในการกักเก็บและปลดปล่อยธาตุเหล็ก โดยวิธีเชื่อมขวางจะใช้ธาตุเหล็กเป็นตัวเชื่อมขวางให้แอลจินตติดขัดธาตุเหล็กและเกิดเป็นไฮโดรเจลพร้อมกัน ทำให้โครงสร้างตาข่ายแข็งแรง กักเก็บธาตุเหล็กได้ดี ในขณะที่การสังเคราะห์ด้วยวิธีแช่จะทำให้แอลจินตหดตัวใน pH 1.2 จนเกิดเป็นไฮโดรเจลก่อน แล้วจึงนำไปแช่ในสารละลายธาตุเหล็กที่ pH 3.2 ทำให้แอลจินตขยายตัวเล็กน้อยและธาตุเหล็กค่อยๆ แทรกเข้าสู่โครงสร้าง ส่งผลให้ธาตุเหล็กติดอยู่ในโครงสร้างแอลจินต (alginate entrapment) และถูกปลดปล่อยออกมาได้ง่ายกว่าวิธีเชื่อมขวางดังรูปที่ 7



รูปที่ 7 แบบจำลองโครงสร้างของแอลจินเนตที่บรรจุธาตุเหล็กอยู่ข้างในโครงสร้าง (ดัดแปลงจาก [14])

ในสารละลายจำลองลำไส้เล็กที่ pH 7.4 (รูปที่ 8) แอลจินเนตที่ห่อหุ้มธาตุเหล็กจะเกิดการขยายตัว ส่งผลให้น้ำสามารถซึมเข้าสู่โครงสร้างของไฮโดรเจล และ Fe^{2+} สามารถแพร่ออกมาจากวัสดุไฮโดรเจลได้ เมื่อพิจารณาผลการทดลองจากรูปที่ 8(ก) พบว่าความสามารถในการปลดปล่อยธาตุ Fe^{2+} ของวัสดุไฮโดรเจลบรรจุธาตุเหล็กวิธีเชื่อมขวางสูงกว่าวัสดุไฮโดรเจลบรรจุธาตุเหล็กวิธีแช่และ FeSO_4 ที่ช่วงเวลา 0-30 นาที นอกจากนี้จากการพิจารณาอัตราส่วนร้อยละการปลดปล่อยของ Fe^{2+} ต่อปริมาณธาตุเหล็กรวม (Fe^{2+} และ Fe^{3+}) พบว่าวัสดุไฮโดรเจลบรรจุธาตุเหล็กแบบวิธีเชื่อมขวางมีค่าการปลดปล่อยสูงถึงร้อยละ 30 ในขณะที่วัสดุที่เตรียมด้วยวิธีแช่และ FeSO_4 มีค่าน้อยกว่าร้อยละ 5 (รูปที่ 8(ข)) ความแตกต่างอย่างมีนัยยะระหว่างวัสดุไฮโดรเจลทั้ง 2 ชนิด แสดงให้เห็นว่าวิธีแช่ไม่สามารถปกป้อง Fe^{2+} จากการออกซิไดซ์เป็น Fe^{3+} ได้ดีเท่าวิธีเชื่อมขวาง

ลักษณะแนวโน้มการปลดปล่อย Fe^{2+} จากตัวอย่างทั้งสามชนิดในสารละลายจำลองลำไส้เล็กที่ pH 7.4 แสดงการเพิ่มขึ้นในช่วงแรกและลดลงอย่างรวดเร็วหลังจาก 15-30 นาที การลดลงของปริมาณ Fe^{2+} ในสารละลายตัวอย่างอาจเกิดจาก Fe^{2+} ส่วนหนึ่งในสารละลายถูกออกซิไดซ์เป็น Fe^{3+} ซึ่งมักพบในสภาวะที่มีค่า pH สูง ส่งผลให้ปริมาณ Fe^{2+} ลดลงต่อเนื่อง



รูปที่ 8 ปริมาณการปลดปล่อย Fe^{2+} ในสารละลายจำลองลำไส้เล็กที่ pH 7.4 ที่ได้จากการวัด UV (ก) Fe^{2+} ต่อกรัมของวัสดุไฮโดรเจลบรรจุธาตุเหล็ก (ข) อัตราส่วนร้อยละของ Fe^{2+} ต่อปริมาณการปลดปล่อยธาตุเหล็กรวม (Fe^{2+} และ Fe^{3+})

4. สรุปผลการทดลอง

วัสดุไฮโดรเจลบรรจุธาตุเหล็กวิธีเชื่อมขวางสามารถควบคุมการปลดปล่อย Fe^{2+} ในสารละลายจำลองกระเพาะอาหารที่ pH 1.2 ได้ดีกว่าไฮโดรเจลบรรจุธาตุเหล็กวิธีแช่และ FeSO_4 ตามลำดับ นอกจากนี้ในสารละลายจำลองลำไส้เล็กที่ pH 7.4 วัสดุไฮโดรเจลบรรจุธาตุเหล็กวิธีเชื่อมขวางสามารถตรึงและปกป้องจากการออกซิเดชันของเหล็กในรูป Fe^{2+} ได้สูงถึงร้อยละ 30 วิธีสังเคราะห์จึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความสามารถในการปกป้องและควบคุมการปลดปล่อยธาตุเหล็กของไฮโดรเจล

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์มหาวิทยาลัยขอนแก่นที่ให้การสนับสนุนทุนสำหรับงานวิจัยนี้

6. เอกสารอ้างอิง

- [1] K. Shubham, T. Anukiruthika, S. Dutta, A. V. Kashyap, J. A. Moses and C. Anandharamakrishnan, "Iron deficiency anemia: A comprehensive review on iron absorption, bioavailability and emerging food fortification approaches," *Trends Food Sci. Technol.*, vol. 99, pp. 58–75, 2020.
- [2] P. Sharp and S. K. Srail, "Molecular mechanisms involved in intestinal iron absorption," *World J. Gastroenterol.*, vol. 13, no. 35, pp. 4716–4724, 2007.
- [3] E. Habeych, V. van Kogelenberg, L. Sagalowicz, M. Michel and N. Galaffu, "Strategies to limit colour changes when fortifying food products with iron," *Food Res. Int.*, vol. 88, pp. 122–128, 2016.
- [4] [L. Mei *et al.*, "Novel intestinal-targeted Calcium alginate-based carrier for pH-responsive protection and release of lactic acid bacteria," *ACS Appl. Mater. Interfaces*, vol. 6, no. 8, pp. 5962–5970, 2014.
- [5] [5] Y. S. Khotimchenko, V. V. Kovalev, O. V. Savchenko and O. A. Ziganshina, "Physical-Chemical Properties, Physiological Activity, and Usage of Alginates, the Polysaccharides of Brown Algae," *Russ. J. Mar. Biol.*, vol. 27, no. 1, 2001.
- [6] J. Brus *et al.*, "Structure and Dynamics of Alginate Gels Cross-Linked by Polyvalent Ions Probed via Solid State NMR Spectroscopy," *Biomacromolecules*, vol. 18, no. 8, pp. 2478–2488, 2017.
- [7] S. K. Papageorgiou, E. P. Kouvelos, E. P. Favvas, A. A. Sapalidis, G. E. Romanos and F. K. Katsaros, "Metal-carboxylate interactions in metal-alginate complexes studied with FTIR spectroscopy," *Carbohydr. Res.*, vol. 345, no. 4, pp. 469–473, 2010.
- [8] J. T. N. Knijnenburg, E. Seristatidou, F. M. Hilty, F. Krumeich and Y. Deligiannakis, "Proton-Promoted Iron Dissolution from Nanoparticles and the Influence by the Local Iron Environment," *J. Phys. Chem. C*, vol. 118, no. 41, pp. 24072–24080, 2014.
- [9] G. Liu, H. Zhou, H. Wu, R. Chen and S. Guo, "Preparation of alginate hydrogels through solution extrusion and the release behavior of different drugs," *J. Biomater. Sci. Polym. Ed.*, vol. 27, no. 18, pp. 1808–1823, 2016.
- [10] R. Machado, P. M. P. Silva, A. A. Vicente, L. A. Souza-Soares, A. C. Pinheiro and M. A. Cerqueira, "Alginate Particles for Encapsulation of Phenolic Extract from *Spirulina* sp. LEB-18: Physicochemical Characterization and Assessment of In Vitro Gastrointestinal Behavior," *Polymers*, vol. 14, no. 21, 2022.
- [11] C. Bennacef, S. Desobry-Banon, L. Probst and S. Desobry, "Advances on alginate use for spherification to encapsulate biomolecules," *Food Hydrocoll.*, vol. 118, 106782, 2021.
- [12] N. Oturan and M. A. Oturan, "Electro-Fenton process: Background, new developments, and applications," in *Electrochemical Water and Wastewater Treatment*, M. A. Rodrigo and E. Brillas, Eds. Amsterdam, Netherlands: Elsevier, 2018, pp. 193–221.

- [13] J. Díaz-Visurraga *et al.*, “Study on antibacterial alginate-stabilized copper nanoparticles by FT-IR and 2D-IR correlation spectroscopy,” *Int. J. Nanomedicine*, vol. 7, pp. 3597–3612, 2012.
- [14] F. Reyes-Ortega, “pH-responsive polymers: Properties, synthesis and applications,” in *Smart Polymers and Their Applications*, M. R. Aguilar and J. San Román, Eds. Cambridge, UK: Woodhead Publishing, 2014, pp. 45–92.
- [15] N. P. Katuwavila *et al.*, “Alginate nanoparticles protect ferrous from oxidation: Potential iron delivery system,” *Int. J. Pharm.*, vol. 513, no. 1–2, pp. 404–409, 2016.
- [16] C. Valenzuela, V. Hernández, M. S. Morales and F. Pizarro, “Heme Iron Release from Alginate Beads at In Vitro Simulated Gastrointestinal Conditions,” *Biol. Trace Elem. Res.*, vol. 172, no. 1, pp. 251–257, 2016.
- [17] R. F. N. Quadrado and A. R. Fajardo, “Fast decolorization of azo methyl orange via heterogeneous Fenton and Fenton-like reactions using alginate-Fe²⁺/Fe³⁺ films as catalysts,” *Carbohydr. Polym.*, vol. 177, pp. 443–450, 2017.
- [18] H. Galal-Gorchev and W. Stumm, “The reaction of ferric iron with orthophosphate,” *J. Inorg. Nucl. Chem.*, vol. 25, no. 5, pp. 567–574, 1963.
- [19] N. A. Handayani, M. Luthfansyah, E. Krisanti, S. Kartohardjono and K. Mulia, “Preparation, physical characterization, and stability of Ferrous-Chitosan microcapsules using different iron sources,” *AIP Conf. Proc.*, vol. 1904, 2017.
- [20] ASTM D 1068–05, “Standard Test Methods for Iron in Water,” *ASTM Int.*, West Conshohocken, PA, USA, pp. 1–11, 2014. [Online]. Available: www.astm.org
- [21] N. Z. Nengsih, K. Jetsrisuparb and J. T. N. Knijnenburg, “Development of Iron Alginate Beads by Ionotropic Gelation for Nutritional Applications,” in *Toward. Sustain. Dev. Goals Transform. Beyond*, pp. 136–145, 2023.
- [22] J. T. N. Knijnenburg *et al.*, “Iron/zinc Alginates as Vehicles for Food Fortification with Enhanced Stability in Polyphenol-Rich Foods,” *Food Biophys.*, vol. 19, no. 3, pp. 665–675, 2024.
- [23] C. Valenzuela, V. Hernández, M. S. Morales, A. Neira-Carrillo and F. Pizarro, “Preparation and characterization of heme iron-alginate beads,” *LWT*, vol. 59, no. 2P2, pp. 1283–1289, 2014.
- [24] G. G. Rao and G. Somidevamma, “Volumetric determination of iron (III) with hydroxylamine as a reducing agent,” *Fresenius’ Z. Anal. Chem.*, vol. 165, no. 6, pp. 432–436, 1959.

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิ (Reader)

ต้นฉบับบทความวิจัยที่ตีพิมพ์วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีที่ 21 ฉบับที่ 1 เดือน มกราคม – มิถุนายน พ.ศ. 2568 ได้รับการตรวจสอบแก้ไขจากผู้ทรงคุณวุฒิดังรายนามต่อไปนี้

1.	รองศาสตราจารย์ ดร.ภาคภูมิ ศรีมรรณ	ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
2.	รองศาสตราจารย์ ดร.คณิศร มาตรา	ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
3.	อาจารย์จิตพร ประมวน	ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
4.	อาจารย์ ดร.วีระ สะอั้ง	ภาควิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
5.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรารุณี สิริเกษมสุข	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล - ระบบราง คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ
6.	รองศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ ศรีชาติ	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรธานี
7.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พลเทพ เวงสูงเนิน	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องจักรกลเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
8.	รองศาสตราจารย์ ดร.ทศพล เกียรติเจริญผล	สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
9.	รองศาสตราจารย์ ดร.พัชรภรณ์ บุญยานิชกุล	ภาควิชาวิศวกรรมการบินและอวกาศ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
10.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปรัชญา บำรุงกุล	สาขาเทคโนโลยีไฟฟ้า คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน
11.	รองศาสตราจารย์ ดร.วันฐณพงษ์ คงแก้ว	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
12.	อาจารย์ ดร.ศรีฐา แจ่มสามสี	ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
13.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กำพล วรดิษฐ์	ภาควิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
14.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.มงคล แก้วบำรุง	สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิ (Reader)

ต้นฉบับบทความวิจัยที่ตีพิมพ์วารสารมหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ ปีที่ 21 ฉบับที่ 1 เดือน มกราคม – มิถุนายน พ.ศ. 2568
ได้รับการตรวจสอบแก้ไขจากผู้ทรงคุณวุฒิดังรายนามต่อไปนี้

15.	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อุไรวรรณ พงสา	สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการและการผลิต คณะอุตสาหกรรมและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี ราชมงคลธัญบุรี
16.	รองศาสตราจารย์วิญญู แสงสิงนกสิกิจ	สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษมบัณฑิต
17.	รองศาสตราจารย์ ดร.ชมนุท เกษมเศรษฐ์	ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
18.	อาจารย์ ดร.ณัฐวัฒน์ ศรีขาว	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
19.	อาจารย์ ดร.สุภรัตน์ สารศรีเมือง	ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

คำแนะนำสำหรับผู้เขียนบทความลงตีพิมพ์
วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (วศ) เป็นวารสารที่ตีพิมพ์บทความวิจัยและบทความวิชาการ เพื่อเผยแพร่ความก้าวหน้าทางทฤษฎีและทางการทดลองในทุกสาขาวิศวกรรม ดัชนีบทความที่ส่งมายังกองบรรณาธิการ จะได้รับการประเมินโดยมีผู้ทรงคุณวุฒิ 3 คนตอบบทความ (Peer-review) และประเมินบทความในลักษณะเป็นผู้ทรงคุณวุฒิที่ประเมินบทความไม่ทราบชื่อผู้แต่งและผู้แต่งไม่ทราบชื่อผู้ทรงคุณวุฒิ หรือ Double Blinded review วารสารตีพิมพ์ 2 ฉบับต่อปี ในเดือน มีนาคม และ กันยายน เลขมาตรฐานสากลประจำวารสาร 2774-0269 (Online)

1. การเตรียมต้นฉบับ

- 1) เป็นบทความวิจัย หรือบทความวิชาการ ที่มีความยาวไม่ควรน้อยกว่า 7 หน้า และไม่ควรเกิน 10 หน้า กระดาษ A4 พิมพ์ห่างจากขอบกระดาษด้านซ้าย 1.25 นิ้ว ด้านอื่น ๆ 1 นิ้ว
- 2) เป็นบทความที่ไม่ได้อยู่ระหว่างการพิจารณาตีพิมพ์ของสื่อสิ่งพิมพ์อื่น ๆ และไม่เคยได้รับการตีพิมพ์ในวารสารใด ๆ มาก่อน
- 3) ต้องไม่มีการละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่น ไม่มีการลอกเลียน หรือดัดทอนผลงานวิจัยของผู้อื่นโดยที่ไม่ได้รับอนุญาตและมีการอ้างอิงที่เหมาะสม
- 4) ชนิดและขนาดตัวอักษร ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษให้ใช้ตัวอักษร TH Sarabun New ซึ่งขนาดตัวอักษร มีรายละเอียดดังนี้
 - 6.1) ชื่อบทความ ใช้ตัวอักษรขนาด 18 pt. ตัวหนา
 - 6.2) ชื่อ-สกุลผู้เขียนบทความ ใช้ตัวอักษรขนาด 14 pt. ตัวปกติ
 - 6.3) หัวข้อหลัก ใช้ตัวอักษรขนาด 14 pt. ตัวหนา
 - 6.4) หัวข้อรอง ใช้ตัวอักษรขนาด 14 pt. ตัวเอียง
 - 6.5) เนื้อเรื่องในหัวข้อหลักและหัวข้อรอง ใช้ตัวอักษรขนาด 14 pt. ตัวปกติ
 - 6.6) เนื้อเรื่องในตาราง ใช้ตัวอักษรขนาด 14 pt. ตัวปกติ

รูปแบบการเขียนบทความ ควรมีหัวข้อเรียงเรียงตามลำดับดังต่อไปนี้

ชื่อเรื่อง ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ โดยมีข้อความที่กระชับ ได้ใจความ และบ่งบอกบทความได้อย่างชัดเจน

ชื่อผู้เขียน ให้ระบุชื่อ นามสกุล ตำแหน่ง หน่วยงานและที่อยู่ของผู้เขียนทุกคน โดยหากบทความเป็นภาษาไทยให้ระบุชื่อผู้เขียนเฉพาะภาษาไทยเท่านั้น

บทคัดย่อ บทคัดย่อต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ

คำสำคัญ (Keyword) คำสืบค้นที่เกี่ยวข้องกับบทความ ต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ

บทนำ กล่าวถึงความสำคัญของปัญหาและภูมิหลังของการวิจัย รวมไปถึงวัตถุประสงค์ของงานวิจัย

ตัวเนื้อหา อธิบายถึงอุปกรณ์ หรือวิธีการที่ใช้ในการวิจัย บรรยายผล และวิจารณ์ผล สามารถแตกออกเป็นหลายหัวข้อได้

สรุป บรรยายถึงบทสรุปของงานวิจัย

กิตติกรรมประกาศ ขอขอบคุณสนับสนุน หรือบุคคล (ถ้ามี)

เอกสารอ้างอิง ให้เขียนเอกสารอ้างอิงโดยใช้วิธีเรียงตามลำดับก่อนหลังที่พบในบทความ ในรูปแบบตัวเลขในวงเล็บเหลี่ยม สำหรับรูปแบบการพิมพ์รายการเอกสารอ้างอิง ใช้รูปแบบ IEEE ดังรายละเอียดและตัวอย่างในไฟล์แม่แบบ (template) ซึ่งดาวน์โหลดได้ที่ <http://eng.swu.ac.th/re.html>

2. วิธีการส่งบทความ

- 1) ส่งต้นฉบับบทความ ไฟล์ Microsoft Word และ pdf พร้อมแนบไฟล์สแกนแบบเสนอผลงานวิชาการเพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
- 2) ส่งไฟล์ต้นฉบับทางออนไลน์ที่
<https://www.tci-thaijo.org/index.php/sej/login>
- 3) ดูข้อมูลวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒเพิ่มเติม และดาวน์โหลดแบบฟอร์มประกอบการส่งบทความ ได้ที่ <http://eng.swu.ac.th/re.html>

3. ขั้นตอนการประเมินบทความ

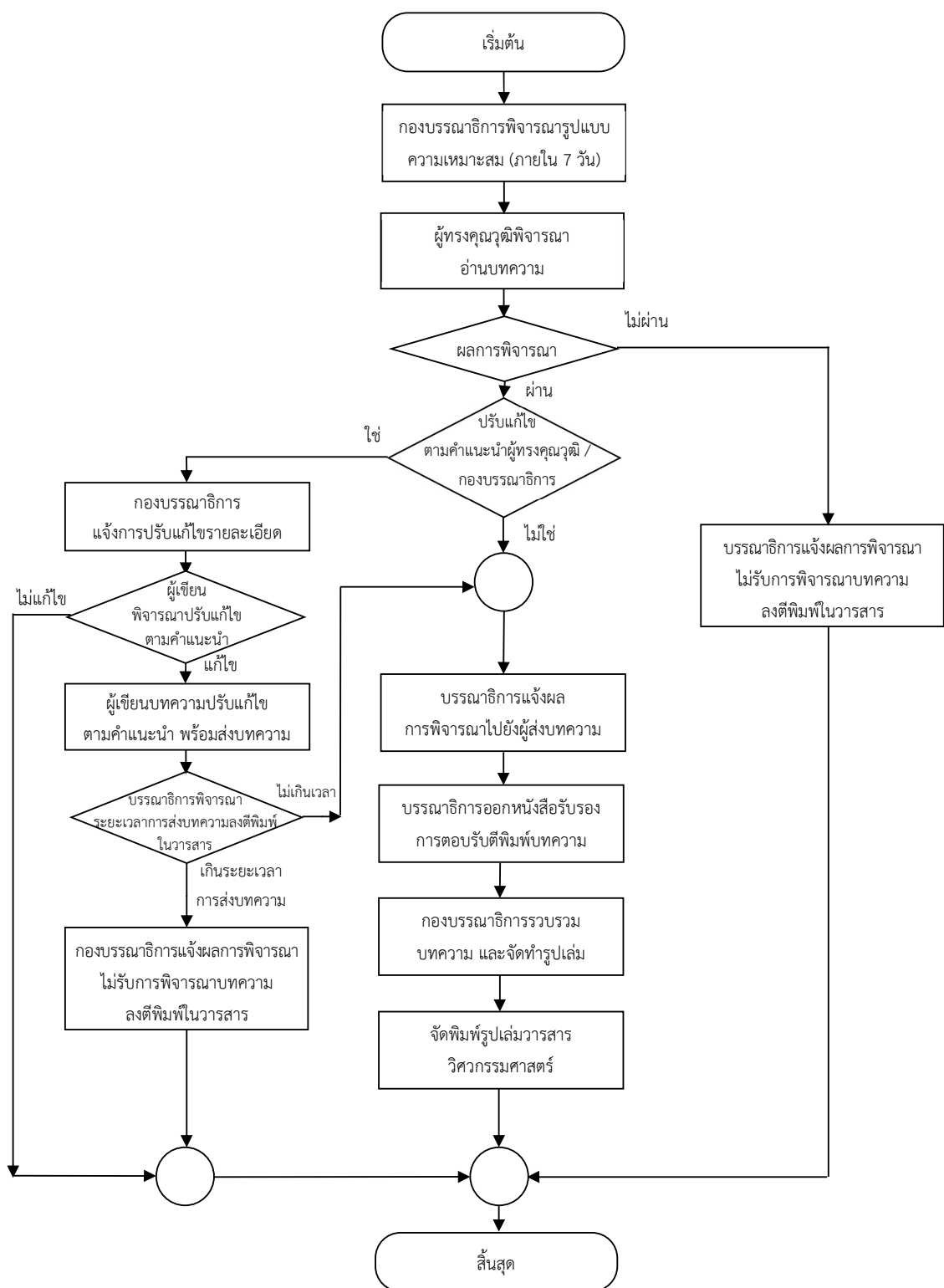
การประเมินบทความวารสารวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ มีขั้นตอนดังนี้

- 1) การทบทวนโดยผู้รู้เสมอกัน (peer review) โดยผู้ทรงคุณวุฒิอย่างน้อยสองคนในสาขาที่เกี่ยวข้องแบบอำพรางฝ่ายเดียว (double-blind)
- 2) การเขียนตอบข้อซักถามและการแก้ไขปรับปรุงต้นฉบับตามข้อคิดเห็น (comments) ของผู้ทรงคุณวุฒิโดยผู้เขียน และการพิจารณาอีกครั้งโดยผู้ทรงคุณวุฒิคนเดิม หากผู้ทรงคุณวุฒิได้แจ้งความประสงค์ขอพิจารณาอีกครั้งไว้
- 3) การประชุมกองบรรณาธิการเพื่อพิจารณาผลการทบทวนโดยผู้รู้เสมอกันจากผู้ทรงคุณวุฒิ และการแก้ไขปรับปรุงต้นฉบับ เพื่อตัดสินใจว่าจะตอบรับหรือไม่ในขั้นสุดท้าย
- 4) สำหรับบทความที่ได้รับการตอบรับ กองบรรณาธิการจะพิจารณาความถูกต้องของรูปแบบเพื่อแจ้งผู้เขียนแก้ไข
- 5) บรรณาธิการออกหนังสือรับรองการเผยแพร่ให้ผู้เขียน โดยมอบไว้กับผู้เขียนหลัก

4. การเก็บค่าธรรมเนียม

ไม่มีค่าธรรมเนียม

ขั้นตอนการพิจารณาผลงานเพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารคณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ





คณะวิศวกรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

Srinakharinwirot University Engineering Journal

Vol. 21 No.1 (January - June 2025)

ISSN : 2774 - 0269 (Online)

บทความวิจัย

- การเปรียบเทียบความแตกต่างของการต่อหลักดินที่มีผลต่อค่าความต้านทานดิน
Comparison of differential grounding electrode with earth resistance
ศุภิต อุทิศสุนทร, จิรวัฒน์ วิมุตติสุขวิริยา
- การจำลองสถานการณ์สำหรับการปรับปรุงสายการผลิตด้วยการปรับเรียบการไหล
Computer Simulation For Enhancing Gear Production Line With Flow Smoothing
กิริฎี คงเจริญ, ประกายกานต์ สุขสมัย, บุษบา พฤษชาพันธ์รัตน์
- การศึกษาเชิงตัวเลขการกระจายตัวของอากาศภายในอาคารนิทรรศการ
Numerical Study of Air Distribution Inside Exhibition Hall
ศุภสิน รุจิพานิชย์, กันต์ธรณ์ เขาทอง
- Forecasting Noncommunicable Diseases in Thailand: Evaluating the Predictive Power of Social Determinants of Health-Related Features
Peatiphat Bhoothookngoen, Nattapong Sanchan
- การจำลองและวิเคราะห์ผลของการใช้อากาศสำหรับการถ่ายโอนความร้อนจากแบตเตอรี่ลิเทียมไอออน NMC ในรถยนต์ไฟฟ้าด้วยวิธีการ CFD
Simulation and Analysis of Airflow for Heat Transfer from NMC Lithium-Ion Batteries in Electric Vehicles Using CFD Methods
รัฐพล โพธิ์ศรี, ธรรมรัตน์ แยกสูงเนิน
- การออกแบบใบพัดบังคับลมโดยใช้การวิเคราะห์ความร้อนและการจำลอง CFD ของมอเตอร์ DC แบบไร้แปรงถ่านสำหรับรถยนต์พลังงานแสงอาทิตย์ STC-4
Forced Air Design using Thermal Analysis and CFD Simulations of a Brushless DC Motor for the STC-4 Solar Car
วิฑูร หวนโคกสูง, ธรรมรัตน์ แยกสูงเนิน
- ระบบตรวจจับเรือในแม่น้ำเจ้าพระยาด้วยเทคนิค YOLOv7
Boat Detection System in the Chao Phraya River Using YOLOv7 Techniques
สรวิทย์ สายทวี, สมชาติ จิรวิภากร
- การห่อหุ้มด้วยวิธีไอโอโนโทรปิกเจลชันต่อความเสถียรของธาตุเหล็ก
Effect of Ionotropic Gelation Encapsulation on Iron Stability
พริณัฐ นันสมบัติ, แก้วตา เจตศรีสุภาพ

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

เลขที่ 63 หมู่ 7 ถนนรังสิต - นครนายก อำเภอองครักษ์ จังหวัดนครนายก 26120

โทร 0 2649 5000 ต่อ 27560

<http://eng.swu.ac.th>