วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลธัญบุรี Journal of Engineering, RMUTT
ปีที่ 20 ฉบับที่ 2 เดือน กรกฎาคม – ธันวาคม 2565 www.engineer.rmutt.ac.th/journal
Print : ISSN 2730-2148 Online : ISSN 2697-4339

การเลือกทำเลที่ตั้งโรงงานกำจัดของเสียอันตรายโดยวิธีการฝังกลบในพื้นที่จังหวัดขอนแก่น Secure Landfill Site Selection for Hazardous Waste Disposal in Khon Kaen Province โดย : เชษฐพงษ์ แสวงแก้ว และศิรวดี อรัญนารถ	1
การประยุกต์แขนกลคาร์ทีเซียนสำหรับร่างภาพ 2 มิติ ควบคุมด้วยพีแอลซี Application of Cartesian Robotic Arm for 2D Sketching Controlled by PLC โดย : ไพโรจน์ ทองประศรี และชลัมพล เวสารัชประเสริฐ	13
การประยุกต์ใช้ไคโตซานบีดเป็นวัสดุดูดซับทางชีวภาพสำหรับกำจัดโครเมียมเฮกซะวาเลนท์จากสารละลาย Application of Chitosan Beads as the Bio-Adsorbent for Hexavalent Chromium Removal from Aqueous Solutions โดย : รัตนาภร ยวงสวัสดิ์ จิระพัฒน์ เจริญวงศ์จงดี และเบญจรงค์ อภิรักษ์ทรัพย์	25
การศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนในช่วงฤดูร้อนของพื้นคอนกรีตและพื้นที่สีเขียวที่มีผลต่ออาคาร A Study of Heat Transfer of Concrete and Green Space Affected to the Building in Summer โดย : อริสมันต์ แสงธงทอง และอติชาต อึ๋งโฆษาชนะวานิช	37
ปัจจัยที่เหมาะสมต่อการสร้างลวดลายบนผิวไม้สักด้วยไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง The Suitable Factors for Lichtenberg Figures on Teak Wood Surface with DC High Voltage Source โดย : นัฐพงษ์ เนินชัด วรพล มะโนสร้อย อภิศักดิ์ พรหมฝาย และกันต์ อินทุวงศ์	49
ผลของชนิดข้าวที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารแอนสารแอนโทไซยานินและสมบัติทางกายภาพในผลิตภัณฑ์บ๊ะจ่าง Effect of Different Rice Varieties on Changes in Anthocyanin Content and Physical Properties of Zongzi Products โดย : สุนัน ปานสาคร และจตุรงค์ ลังกาพินธุ์	59
ระบบเฝ้าติดตามและแจ้งเตือนสถานะการทำงานของเครื่องอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อนด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง Monitoring and Notification System for Hot Press Machine Operation with Internet of Things Technology โดย : วิยศพล กวนคอนสาร และบัญชา วัฒนะ	71
การจัดทำแผนที่น้ำท่วมในอำเภอเชียงขวัญ จังหวัดร้อยเอ็ด โดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ 1D/2D Flood Inundation Mapping of Chiang Khwan District, Roi Et by Coupled 1D/2D Hydraulic Model โดย : เสาวนิต ปราบนคร ศุภกร ศิรพจนกุล และสุคม ลิปิเลิศ	83

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลธัญบุรี

คณะกรรมการจัดทำวารสาร
วิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลธัญบุรี

คณะกรรมการที่ปรึกษา

อธิการบดีมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองอธิการบดีฝ่ายวิชาการ
คณบดีคณะวิศวกรรมศาสตร์

กองบรรณาธิการ

ศ.ดร.ณรงค์ฤทธิ์ สมบัติสมภพ	ศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รศ.ดร.สุธี อักษรกิตติ์	คณะการบิน มหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย
รศ.ดร.เข็มชัย เหมะจันทร	คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.ศิริวรรณ ศรีสรฉัตร์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)
รศ.ดร.กัณวริช พลูปราชญ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)
รศ.ดร.ธำรงรัตน์ มุ่งเจริญ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
รศ.ณรงค์ บวบทอง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
ผศ.ดร.สมเจตน์ พัชรพันธ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน
ผศ.ดร.ปฐมทัศน์ จิระเดชะ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)
ผศ.ดร.อังคณา พันธ์หล่อ	วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต
ดร.ชัชวาลย์ สุรัสวดี	52/14 ถ.พหลโยธิน 45 แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900
ผศ.ดร.ศิวกร อ่างทอง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ.ดร.กฤษณ์ชนม์ ภูมิกิตติพิชญ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.จักรี ศรีนนท์ฉัตร	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.สมศักดิ์ แก่นทอง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.สุมนมาลย์ เนียมหลาง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.ธรรมศักดิ์ โรจน์วิรุฬห์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ชวลิต แสงสวัสดิ์	33 ซอยอุดมสุข แขวงบางนา เขตบางนา กรุงเทพฯ 10260

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

ดร.ปรกช สิริสุวัณณ์

เลขานุการ

นางสาวอมรรัตน์ ยิ้มอยู่

ผู้ดูแลระบบงานเทคโนโลยีสารสนเทศ

นายพัฒณ์รพี สุนันทพจน์

Journal of Engineering, RMUTT

Editorial Board Members

Consultant Board Members

President of Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Vice President of Academic Affairs

Dean, Faculty of Engineering

Editorial Board

Prof.Dr.Narongrit Sombatsompop	Thai-Journal Citation Index (TCI)
Assoc.Prof.Dr.Sutee Auksonkitt	School of Aviation Eastern Asia University
Assoc.Prof.Dr.Khemchai Hemachandra	Faculty of Science Chulalongkorn University
Assoc.Prof.Dr.Siriwan Srisorrachatr	Faculty of Engineering Srinakharinwirot University
Assoc.Prof.Dr.Ganwarich Pluphrach	Faculty of Engineering Srinakharinwirot University
Assoc.Prof.Dr.Thumrongrat Mungcharoen	Faculty of Engineering, Kasetsart University
Assoc.Prof.Narong Buabthong	Faculty of Engineering Thammasat University
Asst.Prof.Dr.Somjate Patcharaphun	Faculty of Engineering, Kasetsart University
Asst.Prof.Dr.Pathomthat Chiradeja	Faculty of Engineering Srinakharinwirot University
Asst.Prof.Dr.Ankana Punlor	College of Engineering Rangsit University
Dr.Chadchawarn Surussavadee	52/14 Phaholyothin 45 Rd., Ladyao, Chatuchak, Bangkok 10900
Asst.Prof.Dr.Sivakorn Angthong	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Assoc.Prof.Dr.Krischonme Bhumkittipich	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Jakkree Srinonchat	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Somsak Kanthong	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Sumonman Niamlang	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Thammasak Rojviroon	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Chavalit Sangswasd	33 Soi Udomsuk 28 BangNa District Bangkok 10260

Editor in Chief

Dr.Porakoch Sirisuwan

Secretary

Miss Amonrat Yimyoo

System administrator

Mr.Patrapee Sunantapot

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลธัญบุรี

บทบรรณาธิการ

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ราชมงคลธัญบุรี ฉบับนี้เป็นฉบับที่ตีพิมพ์เป็นปีที่ 20 ฉบับที่ 2 ระหว่างเดือนกรกฎาคม ถึง เดือนธันวาคม พ.ศ. 2565 โดยมีเนื้อหาสาระของบทความด้านวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีที่หลากหลายด้าน อาทิ เช่น ด้านวิศวกรรมโยธา วิศวกรรมไฟฟ้า วิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์ วิศวกรรมอุตสาหการ วิศวกรรมคอมพิวเตอร์ วิศวกรรมเคมี และวิศวกรรมเกษตร ซึ่งบางบทความเป็นการบูรณาองค์ความรู้ร่วมกันระหว่างหลากหลายสาขา

ในปีที่ 21 นี้ วารสารวิศวกรรมศาสตร์ราชมงคลธัญบุรีได้มีนโยบายในการปรับเปลี่ยนชื่อวารสารให้เป็นไปตามคำแนะนำของศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (TCI) ซึ่งจะเป็นชื่อใดนั้นขอให้ผู้อ่านทุกท่านติดตามในวารสารที่จะตีพิมพ์ในปีที่ 21 นี้

กองบรรณาธิการ

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิผู้พิจารณาบทความ

รศ.ดร.สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
รศ.ดร.นิพัทธ์ จันทรมินทร์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร
รศ.ดร.นรรัตน์ วัฒนมงคล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
ผศ.ดร.ชัชวิน เพชรเลิศ	คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา
รศ.ดร.ณัฐพงศ์ ดำรงวิริยะนุภาพ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยพะเยา
ผศ.ดร.อนุรักษ์ ศรีอริยวัฒน์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.ประจวบ กล่อมจิตร	คณะวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยศิลปากร
รศ.ดร.รัตนา ม่วงรัตน์	คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รศ.ดร.ศรีเวียง ฤทธิศักดิ์	คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผศ.ดร.ปรัชญา เปรมปราณีรัชต์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต
ผศ.สุรัตน์ ตรัยวนพงศ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.มนูศักดิ์ จานทอง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.พันธุ์พงษ์ คงพันธุ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.สุรินทร์ แหงมงาม	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ดร.ประชุม คำพุฒ	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.นิศากร สมสุข	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผศ.ดร.รินลดา สิริแสงสว่าง	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รศ.ดร.ศิริวรรณ ศรีสรฉัตร์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (องครักษ์)
ผศ.ดร.ดวงฤดี โฆษิตกิตติวงศ์ ก้องกิจกุล	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (มจธ.)
ผศ.ดร.ชัยวัฒน์ เอกวัฒน์พานิชย์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี (มจธ.)
รศ.ดร.ปิยะบุตร วานิชพงษ์พันธุ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี(มจธ.)

Peer Reviews

Assoc.Prof.Dr.Surasit Rawangwong	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Sriwichai
Assoc.Prof.Dr.Niphat Jantharamin	Faculty of Engineering Naresuan University
Assoc.Prof.Dr.Norrarat Wattanamongkhol	Faculty of Engineering Burapha University
Asst.Prof.Dr.Chatchawin Petchlert	Faculty of Science Burapha University
Assoc.Prof.Dr.Nattapong Damrongwiriyanupap	Faculty of Engineering Phayao University
Asst.Prof.Dr.Anurak Sriariyawat	Faculty of Engineering Chulalongkorn University
Assoc.Prof.Dr.Prachuab Klomjit	Faculty of Engineering and Industrial Technology, Silpakorn University
Assoc.Prof.Dr.Rattana Muangrat	Faculty of Agro-Industry Chiang Mai University
Assoc.Prof.Dr.Sriwiang Rittisak	Faculty of Agro-Industry King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Asst.Prof.Dr.Pradya Prempraneerach	Faculty of Engineering Thammasat University
Asst.Prof.Surat Triwanapong	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Manusak Janthong	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Phanphong Kongphan	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Surin Ngaemngam	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Dr.Prachoom Khamput	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Nisakorn Somsuk	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Asst.Prof.Dr.Rinlada Sirisangsawang	Faculty of Engineering Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Assoc.Prof.Dr.Siriwan Srisorrachatr	Faculty of Engineering Srinakharinwirot University
Asst.Prof.Dr.Duangrudee Kositgittiwong Kongkitkul	Faculty of Engineering King Mongkut's University of Technology Thonburi
Asst.Prof.Dr.Chaiwat Ekkawatpanit	Faculty of Engineering King Mongkut's University of Technology Thonburi
Assoc.Prof.Dr.Piyabutr Wanichpongpan	Faculty of Engineering King Mongkut's University of Technology Thonburi

การเลือกทำเลที่ตั้งโรงงานกำจัดของเสียอันตรายโดยวิธีการฝังกลบในพื้นที่จังหวัดขอนแก่น

เชษฐพงษ์ แสวงแก้ว[1] และศิรวดี อรัญนารถ[1*]

cheadthapong.sha@kkumail.com[1], sirawadee@kku.ac.th[1*]

Received : 21-Sep-2022
Revised : 18-Dec-2022
Accepted : 19-Dec-2022

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

บทคัดย่อ

การเลือกที่ตั้งโรงงานกำจัดของเสียอันตรายโดยวิธีการฝังกลบนั้น มีหลายปัจจัยที่ใช้ประกอบการพิจารณาหรือใช้ประกอบการตัดสินใจ งานวิจัยนี้มีเป้าหมายคือ ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจ จากการทบทวนวรรณกรรมและสืบค้นข้อมูลจากแหล่งต่างๆ แล้วนำมารวบรวมและคัดกรองปัจจัย รวมถึงให้ผู้เชี่ยวชาญหรือผู้ที่เกี่ยวข้อง ประกอบด้วยนักวิชาการ หน่วยงานราชการที่เกี่ยวข้องในการกำกับดูแล ผู้ประกอบการอุตสาหกรรมหรือนักธุรกิจ และประชาชนหรือผู้แทนชุมชน ทำการคัดเลือกปัจจัย จากนั้นประยุกต์ใช้วิธีการใช้จุดเซนทรอยด์จากการจัดลำดับ (Rank-order Centroid : ROC) ในการคำนวณน้ำหนักสัมพัทธ์ พบว่า ปัจจัยที่มีความสำคัญมากที่สุดต่อการตัดสินใจเลือกที่ตั้งโรงงานกำจัดของเสียอันตรายโดยวิธีการฝังกลบ คือ การยอมรับและความต้องการของชุมชนในพื้นที่ รองลงมาคือ การมีส่วนร่วมของประชาชน แหล่งน้ำธรรมชาติ พื้นที่ที่มีข้อร้องเรียน ความห่างไกลจากแหล่งชุมชน กฎระเบียบเกี่ยวกับผังเมือง และเส้นทางคมนาคม ตามลำดับ เป้าหมายที่สองของงานวิจัยนี้ คือการคัดเลือกพื้นที่เหมาะสมในการตั้งโรงงานดังกล่าวในพื้นที่จังหวัดขอนแก่น โดยงานวิจัยนี้ใช้วิธีกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytic Hierarchy Process : AHP) ในการหาคำตอบโดยผลลัพธ์ที่ได้ คือ พื้นที่ตำบลกุดน้ำใสมีความเหมาะสมมากที่สุด รองลงมาคือ พื้นที่ตำบลโคกสูง และพื้นที่ตำบลม่วงหวาน ตามลำดับ นอกจากนี้ยังใช้วิธีการจัดอันดับความพึงพอใจโดยใช้ความคล้ายคลึงกับผลเฉลยในอุดมคติ (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution : TOPSIS) เพื่อเปรียบเทียบคำตอบกับวิธี AHP ผลปรากฏว่าผลลัพธ์ที่ได้สอดคล้องกับวิธี AHP คือ พื้นที่ตำบลกุดน้ำใสยังมีความเหมาะสมมากที่สุด รองลงมาคือ พื้นที่ตำบลม่วงหวาน และพื้นที่ตำบลโคกสูง ตามลำดับ

คำสำคัญ: กระบวนการวิเคราะห์ตามลำดับชั้น ท็อปสิส การใช้จุดเซนทรอยด์จากการจัดลำดับ โรงงานฝังกลบของเสียอันตราย การเลือกตำแหน่งที่ตั้ง

Secure Landfill Site Selection for Hazardous Waste Disposal in Khon Kaen Province

Cheadthapong Shawengkaew[1] and Sirawadee Arunyanart [1*]

cheadthapong.sha@kkumail.com[1], sirawadee@kku.ac.th[1*]

Received	: 21-Sep-2022
Revised	: 18-Dec-2022
Accepted	: 19-Dec-2022

[1] Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Khon Kaen University

Abstract

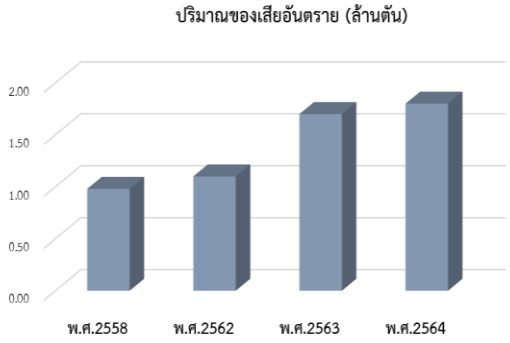
Selecting the location of a hazardous waste landfill consists of several factors to be considered in a decision. The purpose of this research is to determine factors affecting site selection for hazardous waste disposal in landfill. The important factors were selected by experts or people involved, consisting of academicians, government agencies involved in supervision, industrial entrepreneurs or businessmen, and people or community representatives. The Rank-order Centroid (ROC) method was then applied to calculate the relative weight of important factors. It was found that the most important factor for the selection of a location for hazardous waste landfill is the acceptance and needs of local communities, followed by public participation, natural water sources, areas with complaints, distance from community, rules of city plan, and transportation routes, respectively. The second purpose of this research is to select a suitable area to locate the disposal plant in Khon Kaen Province. Analytic Hierarchy Process (AHP) method was used to solve the problem. Kut Nam Sai subdistrict was found to be the most appropriate site, followed by Khok Sung subdistrict and Muang Wan subdistrict, respectively. Furthermore, Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) method was also used to find the result in order to compare with the AHP method. The result was consistent with the AHP, i.e., Kut Nam Sai subdistrict was the most appropriate. This was followed by Muang Wan subdistrict and Khok Sung subdistrict, respectively.

Keywords: AHP, TOPSIS, ROC, secure landfill factory, site selection

1. บทนำ

ประเทศที่มีการพัฒนาด้านอุตสาหกรรมเพื่อเป้าหมายในการเจริญเติบโตทางสถานะเศรษฐกิจย่อมก่อให้เกิดปัญหาในด้านต่างๆ ที่ส่งผลกระทบเกิดขึ้นด้วย ปัญหาสิ่งแวดล้อม เป็นหนึ่งในปัญหาที่ตามมาพร้อมกับการพัฒนาด้านอุตสาหกรรมเสมอ ซึ่งสาเหตุส่วนใหญ่มาจากการใช้สารเคมีหรือสารอันตรายในภาคอุตสาหกรรม หากไม่ได้รับการจัดการที่เหมาะสม [1] การใช้พลังงานและทรัพยากรในกระบวนการผลิตเป็นจำนวนมาก นอกจากผลิตภัณฑ์ที่ได้แล้วพบว่าในกระบวนการผลิตยังก่อให้เกิดกากของเสียหรือวัสดุไม่ใช้แล้วและยังอาจเกิดปัญหามลพิษขึ้นได้ [2]

ในประเทศไทยแนวโน้มการลักลอบทิ้งกากอุตสาหกรรมยังคงมีอยู่อย่างต่อเนื่อง ซึ่งเกี่ยวเนื่องกับการจัดการที่ไม่ถูกต้องตามหลักวิชาการและกฎหมาย จากข้อมูลของกรมโรงงานอุตสาหกรรม ในปี พ.ศ. 2558 ของเสียที่เกิดขึ้นจากการประกอบกิจการโรงงานที่เป็นของเสียอันตราย เกิดขึ้นจำนวน 0.98 ล้านตัน พ.ศ. 2562 จำนวน 1.1 ล้านตัน พ.ศ. 2563 จำนวน 1.7 ล้านตัน และพ.ศ. 2564 จำนวน 1.8 ล้านตัน [3] ซึ่งแสดงให้เห็นว่าปริมาณของเสียอันตรายมีอัตราที่เพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ตามรูปที่ 1



รูปที่ 1 ปริมาณของเสียอันตราย

การจัดการของเสียอันตรายโดยวิธีการฝังกลบนิรภัย (Secure Landfill) อาจกล่าวได้ว่าเป็นแหล่งเก็บกักของเสียอันตรายขั้นสุดท้ายที่มีความสำคัญยิ่งต่อระบบการจัดการของเสียอันตราย [4] อย่างไรก็ตามโรงงานกำจัดของเสียอันตรายในประเทศไทย โดยเฉพาะอย่างยิ่งในภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีจำนวนน้อย ในขณะที่ผู้ประกอบกิจการโรงงานที่เป็นผู้ก่อกำเนิดของเสีย มีความจำเป็นต้องนำกากอุตสาหกรรมไปกำจัดด้วยวิธีการฝังกลบ ซึ่งปัจจุบันต้องทำการขนส่งของเสียไปกำจัดกับผู้รับบำบัดหรือกำจัดกากอุตสาหกรรมที่ตั้งอยู่ในพื้นที่ภาคกลางหรือภาคตะวันออกส่งผลให้เกิดต้นทุนเกี่ยวกับการขนส่งเพิ่มขึ้น

จังหวัดขอนแก่น เป็นศูนย์กลางของภาคตะวันออกเฉียงเหนือและเป็นจุดพื้นที่เชิงยุทธศาสตร์ของระบบการคมนาคมขนส่งทั้งทางบกและอากาศ [5] จึงเป็นสถานที่ที่น่าสนใจในการตั้งโรงงานกำจัดของเสียอันตรายเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้ก่อกำเนิดของเสีย หรือเป็นทางเลือกในการลงทุนตั้งโรงงานฝังกลบของเสียอันตราย

ด้วยเหตุนี้ ผู้วิจัยจึงมีความสนใจศึกษาการหาพื้นที่เหมาะสมในการตั้งโรงงานกำจัดของเสียอันตรายโดยวิธีการฝังกลบในพื้นที่จังหวัดขอนแก่น เพื่อส่งเสริมให้มีการจัดการกากอุตสาหกรรมที่ถูกต้อง และส่งผลกับผู้ประกอบกิจการธุรกิจรับกำจัดของเสียในการวางแผนตั้งโรงงาน รวมถึงรองรับการขยายตัวภาคอุตสาหกรรมและสนับสนุนให้เกิดการจัดการอุตสาหกรรมที่ดี

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและคัดเลือกปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการตั้งโรงงานฝังกลบของเสียอันตราย และหาพื้นที่เหมาะสมในการตั้งโรงงานกำจัดของเสียอันตรายโดยวิธีการฝังกลบในพื้นที่จังหวัดขอนแก่น และในส่วนของทางเลือกนั้น ตามบทบัญญัติของกฎหมายว่าด้วยการผังเมือง มีการกำหนดให้แต่ละพื้นที่สามารถใช้ประโยชน์ที่ดินแตกต่างกัน ซึ่งจังหวัดขอนแก่นมีการบังคับใช้กฎกระทรวงให้ใช้บังคับผังเมืองรวมจังหวัดขอนแก่น พ.ศ. 2560 [6] ผู้วิจัยจึงได้กำหนดพื้นที่ 3 ทางเลือก ประกอบด้วย A1 คือ ตำบลม่วงหวาน อำเภอน้ำพอง A2 คือ ตำบลกุดน้ำใส อำเภอน้ำพอง และ A3 คือ ตำบลโคกสูง อำเภออุบลรัตน์ ที่จะนำมาพิจารณา เนื่องจากพื้นที่ดังกล่าวนั้นถูกกำหนดให้ใช้ประโยชน์เป็นที่ดินประเภทอุตสาหกรรมและคลังสินค้า ใช้ประโยชน์ที่ดินเพื่อประกอบการอุตสาหกรรมหรือเกี่ยวข้องกับอุตสาหกรรม

2. ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

เนื่องจากการพิจารณาหรือการตัดสินใจเลือกที่ตั้งโรงงานกำจัดของเสียอันตราย โดยวิธีการฝังกลบมีหลายปัจจัยที่ต้องพิจารณา ดังนั้น จึงจำเป็นต้องมีเครื่องมือที่ช่วยให้การตัดสินใจเหล่านั้นให้มีประสิทธิภาพมากที่สุด ในการวิจัยนี้ ใช้วิธีการ ROC (Rank-order Centroid) ในการ

กำหนดค่าน้ำหนักสัมพัทธ์ (Weighting) ของปัจจัย จากนั้นทำการตัดสินใจคัดเลือกพื้นที่ที่เหมาะสมที่สุด ภายใต้ทฤษฎีการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์ (Multiple criteria decision analysis) ด้วยวิธีกระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์ (Analytic Hierarchy Process) และ วิธี Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution (TOPSIS) เพื่อเปรียบเทียบผลการศึกษาระหว่าง 2 วิธี

2.1 โรงงานฝังกลบของเสียอันตราย

การฝังกลบอย่างปลอดภัย (Secure landfill) เป็นการฝังกลบของเสียอันตราย (Hazardous waste) ที่ผ่านกระบวนการทำลายฤทธิ์ หรือการปรับเสถียร (Stabilization) และทำก้อนแข็ง (Solidification) โครงสร้างของหลุมฝังกลบจะต้องมีการป้องกันการรั่วซึมของน้ำ และสารอันตรายอย่างรัดกุมมากที่ก้นหลุมและด้านข้างหลุมมีการบดอัดด้วยดินเหนียวต่อจากนั้นจึงปูด้วยแผ่นยางหรือแผ่นพลาสติก เมื่อฝังกลบกากของเสียจนเต็มหลุมแล้วต้องทำการปิดหลุมด้วยดินอัดแน่น ต่อจากนั้นปูแผ่นยางหรือแผ่นพลาสติกสังเคราะห์และปูทับด้วยดินอีกชั้นแล้วปลูกพืชคลุมดินไว้เพื่อลดการชะล้างการพังทลายของหน้าดินไป นอกจากนั้นด้านบนของหลุมฝังกลบจะต้องมีท่อระบายอากาศเพื่อระบายก๊าซที่เกิดขึ้นภายในออกสู่ภายนอกเพื่อป้องกันไม่ให้เกิดการอัดตัวของก๊าซจนดันหลุมฝังกลบให้มีรอยแตกได้ ด้านข้างของหลุมฝังกลบทั้ง 2 ด้านต้องมีบ่อติดตามตรวจสอบเป็นบ่อสังเกตการณ์การรั่วไหลออกสู่ภายนอกโดยต้องทำการเก็บตัวอย่างน้ำในบ่อทั้งสองด้านมาตรวจสอบปริมาณสารปนเปื้อนอยู่เสมอ [7]

2.2 การใช้จุดเซนทรอยด์จากการจัดลำดับ (Rank-order Centroid)

ในการตัดสินใจแบบหลายเกณฑ์สามารถหาค่าน้ำหนักของเกณฑ์ได้หลายวิธี วิธีการกำหนดน้ำหนักของเกณฑ์โดยอาศัยข้อมูลอันดับความสำคัญของเกณฑ์ (Rank-based weighting methods) เป็นวิธีการหนึ่งที่ได้รับความนิยมซึ่งเป็นการเปลี่ยนค่าจากข้อมูลอันดับ (ordinal data) ไปเป็นค่าน้ำหนัก มีบทความวิจัยหลายฉบับที่บ่งชี้ว่าวิธีการดังกล่าวมีข้อดีที่เหนือกว่าวิธีอื่นๆ ที่กำหนดให้ผู้ตัดสินใจเป็นผู้กำหนดค่าน้ำหนักลงไปโดยตรง โดยได้ให้เหตุผลคือผู้ตัดสินใจอาจจะมีความไม่แน่ใจที่จะกำหนดค่าน้ำหนักของเกณฑ์เป็นตัวเลขที่แน่นอนด้วยตนเอง ดังนั้น ผลการตัดสินใจอาจจะเกิดความไม่น่าเชื่อถือขึ้น และในขณะเดียวกันการพิจารณาเพียงแค่อันดับความสำคัญของเกณฑ์นั้นสามารถทำได้ง่ายกว่า เมื่อผู้ตัดสินใจเกิดความมั่นใจที่จะกำหนดเพียงอันดับของเกณฑ์ ค่าน้ำหนักที่คำนวณออกมานั้นจึงมีความน่าเชื่อถือมากกว่า และยังพบว่ามีหลากหลายวิธีการที่สามารถเปลี่ยนลำดับความสำคัญเป็นค่าน้ำหนักของเกณฑ์เช่น Rank sum (RS), Rank Reciprocal (RR), ROC เป็นต้น โดยมีงานวิจัยหลายงานที่ศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการต่างๆ เหล่านี้ ในสถานการณ์ที่แตกต่างกัน ซึ่งล้วนพบว่า ROC เป็นวิธีการที่ให้ผลแม่นยำเที่ยงตรง เชื่อถือได้ และตรงกับใจของผู้ตัดสินใจมากที่สุด [8]

วิธี ROC เป็นหนึ่งวิธีที่ง่ายต่อการนำมาประยุกต์ใช้ เนื่องจากผู้ตัดสินใจเพียงแค่ทำการเรียงลำดับความสำคัญของเกณฑ์ทั้งหมด จากนั้นนำลำดับที่ได้มาไปคำนวณเป็นค่าน้ำหนักสัมพัทธ์ของเกณฑ์ นอกจากนี้ในกรณีของการตัดสินใจแบบกลุ่มที่มีบุคคลที่ต้องกำหนดน้ำหนักรวมกันหลายคน การกำหนดน้ำหนักด้วยวิธีนี้ยังให้โอกาสในการได้รับผลที่เห็นพ้องต้องกันสูงกว่าวิธีอื่นๆ จึงถือเป็นการลดความขัดแย้งกันในกรณีของการตัดสินใจแบบกลุ่มได้เป็นอย่างดี [9]

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้จึงเลือกใช้วิธีการ ROC ในการคำนวณหาค่าน้ำหนักของเกณฑ์หรือปัจจัย (W_j) ซึ่งสามารถคำนวณได้โดยใช้สมการที่ 1

$$W_j(ROC) = \frac{1}{n}\sum_{j=n}^{n}\frac{1}{r_j} \qquad (1)$$

โดย n = จำนวนของเกณฑ์ที่พิจารณาทั้งหมด

r_j = อันดับของเกณฑ์ที่ j โดยที่ j คือเกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณา

r_j = 1 คืออันดับของเกณฑ์ที่สำคัญมากที่สุด

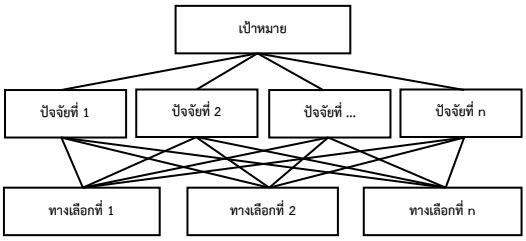
r_j = n คืออันดับของเกณฑ์ที่สำคัญน้อยที่สุด

2.3 กระบวนการลำดับชั้นเชิงวิเคราะห์

วิธีการ AHP เป็นอีกหนึ่งวิธีที่มีความนิยมถูกพัฒนาขึ้นมาโดย Thomas L. Saaty ในช่วงปี 1970 ซึ่ง

โดยทั่วไปพื้นฐานของ AHP การคือแบ่งโครงสร้างของสิ่งที่ต้องการหาออกเป็นชั้นๆ โดยชั้นแรกคือการกำหนดเป้าหมาย แล้วทำการกำหนดปัจจัยและทางเลือกที่มีตามลำดับ หลังจากนั้นทำการเปรียบเทียบปัจจัยทีละคู่และสุดท้ายทำการวิเคราะห์ทางเลือก วิธีการของ AHP มีขั้นตอน ดังนี้ [10]

1. การจัดโครงสร้างลำดับชั้นการตัดสินใจ เป็นการจำแนกโครงสร้างออกเป็นลำดับชั้น โดยลำดับชั้นแรกคือการกำหนดเป้าหมายที่ต้องการ ซึ่งจะมีแค่เป้าหมายเดียวเท่านั้น ลำดับชั้นต่อมาคือปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจ ลำดับชั้นสุดท้ายคือทางเลือกที่นำมาพิจารณาซึ่งสามารถดูตัวอย่างของโครงสร้างตามรูปที่ 2



รูปที่ 2 แผนภูมิโครงสร้างลำดับชั้นของ AHP

2. การเปรียบเทียบความสำคัญของทางเลือกทั้งหมดโดยพิจารณาทีละปัจจัย จากที่จำแนกโครงสร้างเสร็จแล้ว เป็นขั้นตอนการเปรียบเทียบทางเลือกที่อยู่ในโครงสร้างลำดับชั้นเดียวกันทีละคู่ (Pairwise Comparison Matrix) ซึ่งสามารถใช้ตารางเมทริกซ์ ตามตารางที่ 1

ตารางที่ 1 เมทริกซ์การเปรียบเทียบเชิงคู่

	c_1	c_2	...	c_n
c_1	a_{11}	a_{12}	...	a_{1n}
c_2	a_{21}	a_{22}	...	a_{2n}
...	...	...	...	...
...	...	...	...	...
c_n	a_{n1}	a_{n2}	...	a_{nn}

โดยที่ a_{ij} คือ อัตราส่วนที่ใช้แสดงถึงระดับความเข้มข้นของการพอใจมากกว่า หรือการให้ความสำคัญมากกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับความสำคัญของเกณฑ์ในแถวที่ $i(w_i)$ กับความสำคัญของเกณฑ์ในคอลัมน์ที่ $j(w_j)$ โดยที่ i, j = 1, 2, ..., n สเกลวัดอัตราส่วนที่เป็นที่นิยมได้แก่สเกล 1-9 ตามตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สเกล 1-9 ที่นิยมใช้ในการเปรียบเทียบทางเลือก

อัตราส่วนความพอใจมากกว่าและคำนิยาม	
1	มีความพอใจเท่ากัน
3	มีความพอใจมากกว่าเล็กน้อย
5	มีความพอใจมากกว่าอย่างมาก
7	มีความพอใจมากกว่าอย่างชัดเจน
9	มีความพอใจมากกว่าอย่างสมบูรณ์

และหากต้องการทราบจำนวนครั้งของการเปรียบเทียบสามารถคำนวณได้จากสูตร ดังนี้

$$N = \frac{n^2 - n}{2} \qquad (2)$$

โดยที่ N= จำนวนครั้งในการพิจารณาเปรียบเทียบ

n = จำนวนปัจจัยที่ถูกนำมาเปรียบเทียบทั้งหมด

3. คำนวณหาเวกเตอร์ของสมรรถนะของทางเลือกแต่ละทางภายใต้เกณฑ์แต่ละเกณฑ์ และทำการตรวจสอบความสมเหตุสมผลของผลลัพธ์ที่ได้ ด้วยการหาค่า Consistency Ratio (CR) จากสมการต่อไปนี้

$$CR = \frac{CI}{RCI} \qquad (3)$$

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - 1}{n - 1} \qquad (4)$$

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} \frac{AW_{\max}}{W_{\max}} \qquad (5)$$

โดย A คือ ตารางเมทริกซ์ที่ถูก Normalized แล้ว

W คือ Eigenvector ที่แสดงน้ำหนักความสำคัญ

RCI คือ ค่าดัชนีความสอดคล้องเชิงสุ่ม

CI คือ ค่าดัชนีวัดความสอดคล้อง

λ_{max} คือ ถ้าการให้ข้อมูลมีความสมเหตุสมผล λ_{max} จะมีค่าเท่ากับ n

หากค่า $CR \leq 0.10$ แสดงว่าการเปรียบเทียบความสำคัญของปัจจัยมีความสมเหตุสมผล และหากค่า $CR > 0.10$ แสดงว่าการเปรียบเทียบความสำคัญของปัจจัยมีความไม่สมเหตุสมผล ต้องมีการเปรียบเทียบปัจจัยใหม่จึงจะเป็นการให้คะแนนที่สามารถยอมรับได้

4. รวมค่าสมรรถนะของทางเลือกแต่ละทางจากปัจจัยทั้งหมดเข้าด้วยกันด้วยวิธีการรวมแบบถ่วงน้ำหนักอย่างง่าย (Simple Additive Weighting : SAW) หรือ ด้วยวิธีผลคูณแบบถ่วงน้ำหนัก (Weighting Product Method : WP) โดยใช้ค่าน้ำหนักสัมพัทธ์ของแต่ละปัจจัย หลังจากนั้นใช้ผลที่ได้ในการเรียงลำดับทางเลือก และเลือกทางเลือกที่มีสมรรถนะโดยรวมสูงที่สุด [9]

AHP เป็นแนวทางที่มีประสิทธิภาพ โดยสามารถใช้ในการแก้ไขปัญหาที่ซับซ้อนและทำให้สามารถตัดสินใจได้อย่างมีประสิทธิภาพ ถูกนำไปประยุกต์ใช้ในงานวิจัยหลายเรื่องในสาขาต่างๆ เช่น ด้านวิศวกรรม อุตสาหกรรม เศรษฐศาสตร์ และการจัดการสิ่งแวดล้อม [11]

2.4 กรณีมีผู้ตัดสินใจหลายคน

การตัดสินใจที่ส่งผลกระทบต่อผู้มีส่วนได้ส่วนเสียจำนวนมากจำเป็นต้องอาศัยการระดมความคิดเห็นจากหลายฝ่าย โดยใช้ผู้ร่วมตัดสินใจหลายคนร่วมกันพิจารณาเพื่อให้แน่ใจว่าได้ทางเลือกที่เหมาะสมที่สุด ทั้งนี้ การตัดสินใจที่ประกอบด้วยผู้ตัดสินใจหลายคนจะต้องนำความคิดเห็นของผู้ตัดสินใจทุกท่านมาวิเคราะห์ร่วมกันเพื่อให้ได้ข้อสรุปที่เป็นแนวทางสำหรับการตัดสินใจ การประยุกต์ใช้ AHP เมื่อมีผู้ตัดสินใจหลายคน สามารถทำได้ด้วยการประมาณค่าแบบจุด (Point Estimate) โดยวิธีหาค่าเฉลี่ยเวกเตอร์ T_s ทำได้โดยให้ผู้ตัดสินใจแต่ละท่านใช้ AHP จนได้เวกเตอร์ T_s ของตนเอง แล้วจึงนำค่าคะแนนทางเลือกของแต่ละท่านมาหาค่าเฉลี่ย โดยสมมุติให้ T_s^d แทนเวกเตอร์ T_s ของผู้ตัดสินใจที่ d ตามสมการที่ 6 [12]

$$T_s^d = \begin{bmatrix} t_1^d \\ t_2^d \\ \cdot \\ t_m^d \end{bmatrix} \qquad (6)$$

โดยที่ t_i^d = คะแนนของทางเลือก i โดยผู้ตัดสินใจที่ d

d = {1, 2,..., K}

K = จำนวนผู้ตัดสินใจทั้งหมด

หาเวกเตอร์เฉลี่ย $\overline{T}_s$ ของ T_s^d , d = {1,2 ,..., K}

โดยที่คะแนนเฉลี่ยของทางเลือก i ตามสมการที่ 7

$$(\bar{t}_i) = \frac{\sum_{d=1}^{k}(t_i^d)}{K}, i = \{1,2,...,m\} \qquad (7)$$

2.5 วิธีการจัดอันดับความพึงพอใจโดยใช้ความคล้ายคลึงกับผลเฉลยในอุดมคติ (Technique for Order Preference by Similarity to Ideal Solution)

วิธีการ TOPSIS เป็นอีกวิธีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายในการตัดสินใจเลือกทางเลือกที่ดีที่สุดโดยอาศัยแนวคิดที่ว่าทางเลือกที่สมควรได้รับการคัดเลือกนั้นควรจะมีค่าสมรรถนะภายใต้เกณฑ์แต่ละเกณฑ์ใกล้เคียงกับค่าดีที่สุดของกลุ่มมากที่สุด และควรจะมีค่าของเกณฑ์แต่ละเกณฑ์ห่างไกลจากค่าที่แย่ที่สุดของกลุ่มมากที่สุด แนวคิดดังกล่าวได้รับการพัฒนามาเป็นวิธีการคำนวณทางคณิตศาสตร์ เพื่อหาดัชนีผสมของทางเลือก a_i แต่ละทางเลือกซึ่งเรียกว่าค่าสัมประสิทธิ์ที่ใกล้แนวคิดในอุดมคติที่สุด (Closeness Coefficient : CC_i) โดยทางเลือกที่มีค่า CC สูงที่สุดนั้นสามารถกล่าวได้ว่าเป็นทางเลือกที่มีสมรรถนะโดยรวมใกล้เคียงกับค่าที่ดีที่สุด รวมทั้งห่างไกลจากค่าที่แย่ที่สุดในภาพรวม โดยวิเคราะห์ร่วมกับข้อมูลน้ำหนักความสำคัญของเกณฑ์แต่ละเกณฑ์ วิธีการ TOPSIS ทำการจัดลำดับทางเลือกโดยอาศัยข้อมูลการประเมินผลของทางเลือกแต่ละทางบนเกณฑ์แต่ละเกณฑ์ ซึ่งจำเป็นต้องเป็นข้อมูลเชิงปริมาณ [9] และยังพบว่ามีการนำเทคนิควิธีการ TOPSIS ไปประยุกต์ใช้ในการตัดสินใจในอุตสาหกรรมต่างๆ เป็นจำนวนมาก [13]

สำหรับการคำนวณค่าดัชนีผสมของทางเลือก a_i หรือค่า CC_i นั้น ข้อมูลผลการประเมินทางเลือกแต่ละทางในเมทริกซ์การตัดสินใจต้องได้รับการปรับค่าให้เป็นบรรทัดฐานเดียวกันมาก่อนโดยขั้นตอนในการหาค่า CC_i มีดังต่อไปนี้ [9]

1. หลังจากข้อมูลผลการประเมินทางเลือกทุกทางเลือกบนเกณฑ์แต่ละเกณฑ์ถูกปรับค่ามาแล้ว (r_{ij})

ซึ่งจะอยู่ในรูปแบบของเกณฑ์เชิงผลประโยชน์ทั้งหมด ตามตารางที่ 3

ตารางที่ 3 เมทริกซ์การตัดสินใจเมื่อพิจารณาทางเลือก a_i จำนวน m ทางเลือก บนเกณฑ์ C_j จำนวน n เกณฑ์

	c_1	c_2	...	c_n
a_1	r_{11}	r_{12}	...	r_{1n}
a_2	r_{21}	r_{22}	...	r_{2n}
...	...	...	...	...
...	...	...	...	...
a_n	r_{m1}	r_{m2}	...	r_{mn}

จากนั้นให้คูณข้อมูลเหล่านั้นกับค่าน้ำหนักสัมพัทธ์ของเกณฑ์แต่ละเกณฑ์ ตามสมการที่ 8 โดย V_{ij} แทนข้อมูลผลการประเมินของทางเลือก a_i บนเกณฑ์ c_j ที่ได้รับการถ่วงน้ำหนักแล้ว (w_j แทนค่าน้ำหนักสัมพัทธ์ของเกณฑ์ c_j)

$$V_{ij} = w_j r_{ij} \qquad (8)$$

2. หาค่าผลเฉลยในอุดมคติเชิงบวก (Positive Ideal Solution : PIS) และค่าผลเฉลยในอุดมคติเชิงลบ (Negative Ideal Solution : NIS) ของเกณฑ์การตัดสินใจทั้งหมด ตามสมการที่ 9 และ 10 แสดงเซตของค่า PIS และ NIS ของเกณฑ์ทั้งหมดโดยที่ PIS_j คือค่าที่ดีที่สุดของเกณฑ์ C_j เมื่อเปรียบเทียบทางเลือกทั้งหมดที่มีอยู่ หรือ PIS_j = ค่าที่มากที่สุดของ V_{ij} ทุกตัว (V_{1j}, V_{2j},..., V_{mj}) และ NIS_j คือค่าของเกณฑ์ C_j ที่แย่ที่สุดของกลุ่ม หรือ NIS_j = ค่าที่น้อยที่สุดของ V_{ij} ทุกตัว

$$PIS = \{PIS_1, PIS_2, ..., PIS_n\} \qquad (9)$$

$$NIS = \{NIS_1, NIS_2, ..., NIS_n\} \qquad (10)$$

3. คำนวณระยะห่างจากค่าผลเฉลยในอุดมคติเชิงบวก (S_{PISi}) และระยะห่างจากค่าผลเฉลยในอุดมคติเชิงลบ (S_{NISi}) ของทางเลือก a_i แต่ละทาง จากสมการที่ 11 และ 12 ตามลำดับ

$$S_{PIS_i} = \sqrt{\sum_{j=1}^{n}(V_{ij} - PIS_j)^2} \qquad (11)$$

$$S_{NIS_i} = \sqrt{\sum_{j=1}^{n}(V_{ij} - NIS_j)^2} \qquad (12)$$

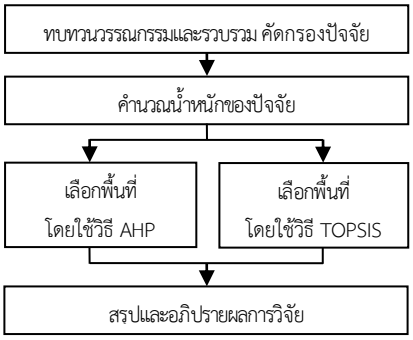
4. คำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ใกล้แนวคิดในอุดมคติที่สุด CC_i ของทางเลือก a_i แต่ละทางเลือกจากสมการที่ 13

$$CC_i = \frac{S_{NIS_i}}{S_{PIS_i} + S_{NIS_i}} \qquad (13)$$

5. จัดลำดับทางเลือกจากค่า CC_i ที่คำนวณได้ โดยเลือกทางเลือกที่มีค่า CC_i สูงที่สุด

3. วิธีการดำเนินงาน

ขั้นตอนในการดำเนินงานแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ขั้นตอนการดำเนินงาน

โดยรายละเอียดของแต่ละขั้นตอนมีดังต่อไปนี้

3.1 ทบทวนวรรณกรรมและรวบรวมปัจจัยที่เกี่ยวข้องจากหลายแหล่งข้อมูล โดยรวบรวมปัจจัยในการตั้งโรงงานฝังกลบของเสียอันตรายและปัจจัยในการตั้งโรงงานอุตสาหกรรมประเภทที่ใกล้เคียง จากนั้นทำการคัดกรองปัจจัยที่มีความหมายเหมือนกันหรือมีความหมายซ้ำซ้อนกัน หลังจากนั้นทำการสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญหรือบุคคลที่เกี่ยวข้อง จำนวน 22 ท่าน โดยแบ่งได้เป็น 4 กลุ่มเป้าหมายที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับการเลือกที่ตั้งโรงงานฝังกลบของเสียอันตรายประกอบด้วย กลุ่มนักวิชาการ เช่น สภาวิศวกร วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย จำนวน 5 ท่าน กลุ่มหน่วยงานราชการที่เกี่ยวข้องในการกำกับดูแลตรวจสอบโรงงาน เช่น กรมโรงงานอุตสาหกรรม สำนักงานอุตสาหกรรมจังหวัด กรมควบคุมมลพิษ สำนักงานทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมจังหวัด ส่วนกำกับดูแลโรงงานที่ดำเนินธุรกิจอยู่ในปัจจุบัน ซึ่งโรงงานตั้งอยู่ในพื้นที่ภาคกลาง จำนวน 6 ท่าน กลุ่มผู้ประกอบการอุตสาหกรรม

หรือนักธุรกิจ เช่น สภาอุตสาหกรรม หอการค้า จำนวน 5 ท่าน และกลุ่มประชาชนหรือผู้แทนชุมชน เช่น ผู้นำชุมชน ตัวแทนชุมชนในพื้นที่เป้าหมาย จำนวน 6 ท่าน เพื่อประเมินคะแนนของปัจจัยในแต่ละปัจจัยว่ามีความสำคัญมากน้อยเพียงใด โดยแบบประเมินการให้คะแนนความสำคัญของปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจตั้งโรงงานฝังกลบของเสียอันตราย มีการกำหนดค่าคะแนนแบ่งออกเป็น 5 ระดับ ตามมาตราส่วนประมาณค่า (Rating Scale) จากนั้นทำการคัดเลือกปัจจัยที่มีคะแนนเฉลี่ยที่มีผลต่อการตัดสินใจในระดับมากที่สุด ตามหลักการแบ่งช่วงพิสัย เพื่อให้ได้ปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อการเลือกพื้นที่ตั้งโรงงานฝังกลบของเสียอันตราย

3.2 หาค่าน้ำหนักของแต่ละปัจจัย โดยการสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญหรือบุคคลที่เกี่ยวข้อง 4 กลุ่มเป้าหมาย กลุ่มเป้าหมายละ 4 ท่าน ประกอบด้วย กลุ่มนักวิชาการ เช่น สภาวิศวกร วิศวกรรมสถานแห่งประเทศไทย กลุ่มหน่วยงานราชการที่เกี่ยวข้องในการกำกับดูแลตรวจสอบโรงงาน เช่น กรมโรงงานอุตสาหกรรม สำนักงานอุตสาหกรรมจังหวัด กรมควบคุมมลพิษ สำนักงานทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อมจังหวัด โดยเพิ่มผู้เชี่ยวชาญ 1 ท่านจากกรมโรงงานอุตสาหกรรม ซึ่งเป็นหน่วยงานพิจารณาอนุญาตการตั้งโรงงานและกำกับดูแลโรงงานกำจัดของเสียอันตรายโดยตรง กลุ่มผู้ประกอบการอุตสาหกรรมหรือนักธุรกิจ เช่น สภาอุตสาหกรรม หอการค้า และกลุ่มประชาชนหรือผู้แทนชุมชน เช่น ผู้นำชุมชน ตัวแทนชุมชน รวมทั้งหมด จำนวน 17 ท่าน โดยกำหนดให้ลำดับที่ 1 มีความสำคัญสูงสุด เพื่อจัดลำดับความสำคัญของแต่ละปัจจัยที่ได้รับการคัดเลือกมา หลังจากนั้นประยุกต์การประเมินค่าน้ำหนักของแต่ละปัจจัย ด้วยวิธี ROC

3.3 คัดเลือกพื้นที่เหมาะสมในการตั้งโรงงานกำจัดของเสียอันตรายโดยวิธีการฝังกลบในพื้นที่จังหวัดขอนแก่น โดยวิธี AHP และใช้ปัจจัยที่มีผลต่อการตัดสินใจซึ่งได้จากขั้นตอนที่ 3.2 ส่วนการตัดสินใจเปรียบเทียบทางเลือกทีละคู่ภายใต้ปัจจัยแต่ละปัจจัยนั้น ผู้วิจัยได้กำหนดให้มีผู้ตัดสินใจ ประกอบด้วย ผู้แทนโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ในพื้นที่ A1 และ A2 พื้นที่ละ 1 คน แต่เนื่องจากพื้นที่ A3 ไม่มีโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ ผู้วิจัยจึงได้เลือกผู้ตัดสินใจจากผู้แทนโรงงานอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ในพื้นที่ใกล้เคียง 1 คน และผู้แทนโรงงานที่เป็นประเภทอุตสาหกรรมที่มีความใกล้เคียงกับโรงงานฝังกลบของเสีย 1 คน รวมมีผู้ตัดสินใจ จำนวน 4 คน โดยกำหนดให้ใช้ระดับคะแนน 1–9 ในการเปรียบเทียบเชิงคู่ จากนั้นคำนวณหาเวกเตอร์ค่าสมรรถนะของทางเลือกแต่ละทางภายใต้ปัจจัยแต่ละปัจจัย แล้วรวมค่าสมรรถนะทางเลือกแต่ละทางจากปัจจัยทั้งหมดเข้าด้วยกัน โดยใช้วิธีการรวมแบบถ่วงน้ำหนักอย่างง่าย และใช้ค่าน้ำหนักสัมพัทธ์ของปัจจัยที่ได้จากขั้นตอนที่ 3.2 ในการถ่วงน้ำหนัก โดยมีการตรวจสอบความสมเหตุสมผลของผลลัพธ์ที่ได้จากผู้ตัดสินใจแต่ละคนในแต่ละปัจจัยตามสมการที่ 3, 4 และ 5 ตามลำดับ

3.4 คัดเลือกพื้นที่เหมาะสมในการตั้งโรงงานกำจัดของเสียอันตรายโดยวิธีการฝังกลบในพื้นที่จังหวัดขอนแก่น โดยใช้วิธี TOPSIS โดยใช้ค่าน้ำหนักของแต่ละปัจจัยที่ได้จากขั้นตอนที่ 3.2 ผู้วิจัยได้ดำเนินการศึกษาข้อมูลของแต่ละปัจจัยจากแหล่งข้อมูลต่างๆ ซึ่งเป็นข้อมูลเชิงปริมาณ โดยข้อมูลของแต่ละปัจจัยต้องถูกปรับค่าซึ่งจะอยู่ในรูปแบบของปัจจัยเชิงผลประโยชน์ทั้งหมด

4. ผลการวิจัย

4.1 การหาปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการตั้งโรงงานฝังกลบของเสียอันตราย

ผู้วิจัยได้รวบรวมจากการทบทวนวรรณกรรมงานวิจัย บทความ และทฤษฎีเกี่ยวข้อง มากกว่า 50 บทความ พบว่ามีปัจจัยที่เกี่ยวข้องมากถึง 71 ปัจจัย โดยโครงการที่มุ่งเน้นการเฝ้าระวังผลกระทบด้านสิ่งแวดล้อมและสุขภาพ ครอบคลุม 4 มิติประกอบด้วย ด้านสิ่งแวดล้อม ด้านกายภาพ ด้านสังคมและด้านเศรษฐกิจ [14] ทั้งนี้ การตั้งโรงงานอุตสาหกรรมบางประเภทหรือโครงการบางอย่างในบางครั้งอาจไม่ได้เกิดจากการตัดสินใจของภาคเอกชนหรือนักธุรกิจเพียงเท่านั้น แต่อาจเกิดจากนโยบายหรือความต้องการของภาครัฐ ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้ทำการแบ่งกลุ่มของปัจจัยออกเป็น 5 ด้าน ประกอบด้วย ด้านสิ่งแวดล้อม ด้านเทคนิคและกายภาพ ด้านสังคมและชุมชน ด้านเศรษฐศาสตร์ และด้านนโยบายภาครัฐและท้องถิ่น เพื่อให้มีความง่ายสำหรับการคัดกรอง และคัดเลือกปัจจัยที่มีความซ้ำซ้อน หรือมีความหมายเดียวกันเหลือเพียง 35 ปัจจัย และจากการสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญหรือบุคคลที่เกี่ยวข้องทั้ง

22 คน พบว่าปัจจัยที่ผู้เชี่ยวชาญหรือบุคคลที่เกี่ยวข้องให้ความสำคัญมากที่สุดหรือมีคะแนนเฉลี่ยที่มีผลต่อการตัดสินใจในระดับมากที่สุด ตามหลักการแบ่งช่วงพิสัย มีจำนวน 7 ปัจจัย ดังนี้ ความห่างไกลจากแหล่งชุมชน, การยอมรับและความต้องการของชุมชนในพื้นที่, พื้นที่ที่มีข้อร้องเรียน, การมีส่วนร่วมของประชาชน, กฎระเบียบเกี่ยวกับผังเมือง, เส้นทางคมนาคม และแหล่งน้ำธรรมชาติ เมื่อได้ปัจจัยแล้ว ผู้วิจัยได้ทำการหาค่าน้ำหนักความสำคัญของแต่ละปัจจัยด้วยวิธี ROC โดยให้ผู้เชี่ยวชาญหรือบุคคลที่เกี่ยวข้อง จำนวน 17 คน ให้คะแนนในแต่ละปัจจัยว่ามีความสำคัญมากน้อยเพียงใด โดยวิธีการจัดลำดับความสำคัญของ 7 ปัจจัย ในแบบประเมิน โดยให้ระบุลำดับความสำคัญของแต่ละปัจจัย โดยระบุลำดับ 1-7 (ลำดับ 1 มีความสำคัญสูงสุด) จากนั้นแปลงค่าน้ำหนักของผู้เชี่ยวชาญหรือบุคคลที่เกี่ยวข้องในแต่ละท่านโดยใช้สมการที่ 1 ต่อมาหาค่าเฉลี่ยของน้ำหนักในแต่ละปัจจัยและทำการจัดลำดับใหม่จากค่าเฉลี่ยของน้ำหนักในแต่ละปัจจัย สุดท้ายคำนวณหาค่าน้ำหนักของปัจจัย (w) โดยใช้สมการที่ 1 อีกครั้ง ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ค่าน้ำหนักของแต่ละปัจจัย

ลำดับ	ปัจจัย	ค่าน้ำหนัก
1	ความห่างไกลจากแหล่งชุมชน	0.073
2	การยอมรับและความต้องการฯ	0.370
3	พื้นที่ที่มีข้อร้องเรียน	0.109
4	การมีส่วนร่วมของประชาชน	0.228
5	กฎระเบียบเกี่ยวกับผังเมือง	0.044
6	เส้นทางคมนาคม	0.020
7	แหล่งน้ำธรรมชาติ	0.156

4.2 การเลือกพื้นที่ที่เหมาะสมในการตั้งโรงงานกำจัดของเสียอันตรายโดยวิธีการฝังกลบ

4.2.1 วิธี AHP

ผู้วิจัยได้พิจารณาคัดเลือกพื้นที่เหมาะสมในการตั้งโรงงานกำจัดของเสียอันตรายโดยวิธีการฝังกลบในพื้นที่จังหวัดขอนแก่น ตามขั้นตอนของวิธีการ AHP หลังจากได้ดำเนินการตามขั้นตอน ได้ผลลัพธ์ในการรวมค่าสมรรถนะของทางเลือก ทั้ง 3 แห่ง จากผู้ตัดสินใจจำนวน 4 คน ทั้งนี้ ได้มีการคำนวณความสมเหตุสมผลของผลลัพธ์ที่ได้ของผู้ตัดสินใจแต่ละคน ในแต่ละปัจจัยจะต้องเป็นไปตามเงื่อนไข $CR \leq 0.10$ ผลลัพธ์ที่ได้ตามที่แสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลรวมค่าสมรรถนะของทางเลือก ทั้ง 3 แห่ง

ปัจจัย (w)		A1	A2	A3	CR
1 (0.073)	ผู้ตัดสินใจคนที่ 1	0.085	0.304	0.610	0.059
2 (0.370)		0.607	0.119	0.272	0.064
3 (0.109)		0.260	0.106	0.633	0.033
4 (0.228)		0.095	0.692	0.212	0.034
5 (0.044)		0.200	0.600	0.200	0.000
6 (0.020)		0.692	0.212	0.095	0.034
7 (0.156)		0.096	0.566	0.337	0.046
ผลรวม		0.319	0.355	0.326	
1 (0.073)	ผู้ตัดสินใจคนที่ 2	0.255	0.073	0.671	0.062
2 (0.370)		0.075	0.242	0.682	0.011
3 (0.109)		0.073	0.255	0.671	0.062
4 (0.228)		0.095	0.692	0.212	0.034
5 (0.044)		0.637	0.266	0.095	0.009
6 (0.020)		0.679	0.242	0.078	0.067
7 (0.156)		0.069	0.285	0.645	0.043
ผลรวม		0.129	0.342	0.529	
1 (0.073)	ผู้ตัดสินใจคนที่ 3	0.710	0.070	0.219	0.055
2 (0.370)		0.078	0.679	0.242	0.067
3 (0.109)		0.073	0.671	0.255	0.062
4 (0.228)		0.070	0.713	0.215	0.016
5 (0.044)		0.242	0.682	0.075	0.011
6 (0.020)		0.073	0.671	0.255	0.062
7 (0.156)		0.078	0.679	0.242	0.067
ผลรวม		0.129	0.642	0.229	
1 (0.073)	ผู้ตัดสินใจคนที่ 4	0.707	0.091	0.201	0.083
2 (0.370)		0.630	0.090	0.279	0.072
3 (0.109)		0.778	0.068	0.152	0.035
4 (0.228)		0.089	0.662	0.247	0.055
5 (0.044)		0.739	0.177	0.083	0.097
6 (0.020)		0.722	0.201	0.075	0.011
7 (0.156)		0.722	0.067	0.210	0.074
ผลรวม		0.550	0.221	0.229	

ในครั้งนี้มีผู้ตัดสินใจหลายคนจึงได้นำค่าผลรวมสมรรถนะของทางเลือกแต่ละทางของผู้ตัดสินใจแต่ละท่านมาหาค่าเฉลี่ย ตามสมการที่ 6 และ 7 ตามลำดับ พบว่าทางเลือก A1 คือ ((0.319+0.129+0.129+0.550)/4) = 0.282, A2 คือ ((0.355+0.342+0.642+0.221)/4) = 0.390 และ A3 คือ ((0.326+0.529+0.229+0.229)/4) = 0.328 ตามตารางที่ 6

ตารางที่ 6 ค่าสมรรถนะเฉลี่ยของทางเลือก ทั้ง 3 แห่ง

ทางเลือก	A1	A2	A3
ค่าสมรรถนะเฉลี่ย	0.282	0.390	0.328
ลำดับความเหมาะสม	3	1	2

จากตารางที่ 6 ค่าสมรรถนะเฉลี่ยของทางเลือก A2 มีค่ามากที่สุด ดังนั้น จากวิธีการ AHP ทางเลือก A2 จึงเป็นพื้นที่เหมาะสมมากที่สุดในการตั้งโรงงานกำจัดของเสียอันตรายโดยวิธีการฝังกลบในพื้นที่จังหวัดขอนแก่น รองลงมาคือ ทางเลือก A3 และ A1 ตามลำดับ

4.2.2 วิธี TOPSIS

ในการคัดเลือกพื้นที่เหมาะสมในการตั้งโรงงานกำจัดของเสียอันตรายโดยวิธีการฝังกลบในพื้นที่จังหวัดขอนแก่น โดยใช้วิธี TOPSIS ผู้วิจัยได้ศึกษาข้อมูลและประเมินผลโดยแยกตามปัจจัยต่างๆ จากการสืบค้นข้อมูลเชิงปริมาณ พบว่า พื้นที่ A1 เนื้อที่ 85.20 ตารางกิโลเมตร ระยะรวมเส้นทางที่เป็นถนนลาดยาง ถนนคอนกรีต และถนนลูกรัง รวม 89.50 กิโลเมตร ประชากร 10,121 คน แหล่งน้ำธรรมชาติ 9 แห่ง [15] จำนวนโรงงาน 21 โรงงาน สถิติเกี่ยวกับการร้องเรียนด้านสิ่งแวดล้อม ในช่วง 1 ปีย้อนหลัง จำนวน 1 เรื่อง [16] พื้นที่ A2 เนื้อที่ 48.00 ตร.กม. ระยะรวมเส้นทางฯ รวม 82.42 กม. ประชากร 8,382 คน แหล่งน้ำธรรมชาติ 14 แห่ง [17] จำนวนโรงงาน 10 โรงงาน สถิติเกี่ยวกับการร้องเรียนฯ จำนวน 2 เรื่อง [16] และ พื้นที่ A3 เนื้อที่ 91.00 ตร.กม. ระยะรวมเส้นทางฯ รวม 76.00 กม. ประชากร 8,942 คน แหล่งน้ำธรรมชาติ 20 แห่ง [18] จำนวนโรงงาน 3 โรงงาน สถิติเกี่ยวกับการร้องเรียนฯ จำนวน 1 เรื่อง [16] ผู้วิจัยทำการกำหนดหน่วยในแต่ละปัจจัย จากข้อมูลเชิงปริมาณที่ได้จากการศึกษา โดยปัจจัย 1 คือ ความห่างไกลจากแหล่งชุมชนเป็นปัจจัยเชิงต้นทุน พิจารณาจากจำนวนประชากรต่อเนื้อที่ของพื้นที่ ปัจจัย 2 คือ การยอมรับและความต้องการของชุมชนในพื้นที่ เป็นปัจจัยเชิงผลประโยชน์ ผู้วิจัยได้สัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 4 คน เพื่อประเมินคะแนนโดยใช้มาตรประมาณค่า 5 ระดับ จากนั้นใช้ค่าเฉลี่ยทั้ง 4 คนเป็นข้อมูลเชิงปริมาณ ปัจจัย 3 คือ พื้นที่ที่มีข้อร้องเรียน เป็นปัจจัยเชิงต้นทุน พิจารณาจากสถิติเกี่ยวกับการร้องเรียนด้านสิ่งแวดล้อม 1 ปีย้อนหลังต่อจำนวนโรงงานของพื้นที่ ปัจจัย 4 คือ การมีส่วนร่วมของประชาชน เป็นปัจจัยเชิงผลประโยชน์ ใช้วิธีการเช่นเดียวกับปัจจัยที่ 2 ปัจจัย 5 คือ กฎระเบียบเกี่ยวกับผังเมือง เนื่องจากพื้นที่ทั้ง 3 แห่ง ถูกกำหนดให้ใช้ประโยชน์เป็นที่ดินประเภทอุตสาหกรรมและคลังสินค้า ตามกฎหมายเกี่ยวกับผังเมือง จึงได้กำหนดให้มีคะแนนเท่ากัน ปัจจัย 6 คือ เส้นทางคมนาคมเป็นปัจจัยเชิงผลประโยชน์ พิจารณาจากระยะรวมเส้นทางที่เป็นถนนลาดยาง ถนนคอนกรีตและถนนลูกรัง ต่อเนื้อที่ของพื้นที่ และ ปัจจัย 7 คือ แหล่งน้ำธรรมชาติ เป็นปัจจัยเชิงต้นทุน พิจารณาจากจำนวนแหล่งน้ำธรรมชาติต่อเนื้อที่ของพื้นที่เป้าหมาย

ตารางที่ 7 ข้อมูลของทำเลที่ตั้งโรงงาน จำนวน 3 แห่ง

ปัจจัย	A1	A2	A3
1	118.791	174.625	98.263
2	3.25	4.75	1.75
3	0.047	0.200	0.333
4	2.75	5.00	1.75
5	1	1	1
6	1.050	1.717	0.835
7	0.105	0.291	0.219

จากตารางที่ 7 ทำการปรับข้อมูลของแต่ละปัจจัยที่อยู่ในหน่วยที่แตกต่างกันให้มีมาตรฐานเดียวกัน เช่น ปัจจัย 1 คือ ความห่างไกลจากแหล่งชุมชน พิจารณาจากจำนวนประชากรต่อเนื้อที่ของพื้นที่ โดยคำนวณได้จาก (10,121/85.20) = 118.791 จากนั้นทำการปรับค่าให้เป็นบรรทัดฐานเดียวกัน

ตารางที่ 8 ผลคูณน้ำหนักของปัจจัยกับข้อมูลที่ผ่านการปรับค่าให้เป็นบรรทัดฐานแล้ว

ปัจจัย	W	A1	A2	A3
1	0.073	0.0253	0.0172	0.0306
2	0.370	0.1233	0.1803	0.0664
3	0.109	0.0789	0.0188	0.0113
4	0.228	0.0660	0.1200	0.0420
5	0.044	0.0147	0.0147	0.0147
6	0.020	0.0058	0.0095	0.0046
7	0.156	0.0847	0.0307	0.0407

จากตารางที่ 8 เป็นข้อมูลของทำเลที่ตั้งโรงงานจำนวน 3 แห่ง ที่ผ่านการปรับค่าให้เป็นบรรทัดฐานแล้วคูณกับค่าน้ำหนักที่ได้จากวิธี ROC ของแต่ละปัจจัย เช่น ปัจจัย 1 ความห่างไกลจากแหล่งชุมชน เป็นปัจจัยเชิงต้นทุน ผ่านการปรับค่าให้เป็นบรรทัดฐานแล้วได้ค่า 0.346 แล้วนำไปคูณกับค่าน้ำหนักที่ได้จากวิธี ROC โดยสามารถคำนวณได้จาก (0.346* 0.073) = 0.0253

จากนั้นหาค่าผลเฉลยในอุดมคติเชิงบวกและเชิงลบของปัจจัย ในแต่ละปัจจัย ได้ผลดังนี้

PIS = (0.0306, 0.1803, 0.0789, 0.1200, 0.0147, 0.0095, 0.0847)

NIS = (0.0172, 0.0664, 0.0113, 0.0420, 0.0147, 0.0046, 0.0307)

ต่อมาคำนวณค่าระยะห่างจากค่าผลเฉลยในอุดมคติเชิงบวกและเชิงลบของแต่ละทางเลือกจากสมการที่ 11 และ 12 ตามลำดับ และคำนวณหาค่าสัมประสิทธิ์ที่ใกล้แนวคิดในอุดมคติที่สุด (CC) ของทางเลือกแต่ละทางเลือกจากสมการที่ 13 ผลลัพธ์ที่ได้ตามตารางที่ 9

ตารางที่ 9 ระยะห่างจากค่าอุดมคติและค่าสัมประสิทธิ์ที่ใกล้แนวคิดในอุดมคติที่สุดของทางเลือก

ทางเลือก	A1	A2	A3
S_{PIS}	0.078	0.081	0.159
S_{NIS}	0.106	0.138	0.016
CC	0.575	0.628	0.094
ลำดับความเหมาะสม	2	1	3

จากตารางที่ 9 ค่าระยะห่างจากค่าอุดมคติและค่าสัมประสิทธิ์ที่ใกล้แนวคิดในอุดมคติที่สุดของทางเลือก A2 มีค่ามากที่สุด ดังนั้น จากวิธีการ TOPSIS ทางเลือก A2 จึงเป็นพื้นที่เหมาะสมมากที่สุดในการตั้งโรงงานกำจัดของเสียอันตรายโดยวิธีการฝังกลบในพื้นที่จังหวัดขอนแก่น รองลงมาคือ ทางเลือก A1 และ A3 ตามลำดับ

5. สรุปและอภิปรายผลการวิจัย

จากการทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการเลือกที่ตั้งโรงงานกำจัดของเสียอันตรายโดยวิธีการฝังกลบ พบว่ามีการกำหนดปัจจัยที่หลากหลาย ผู้วิจัยจึงได้คัดกรองปัจจัยที่สื่อความหมายในทางเดียวกัน หรือที่ซ้ำซ้อนกัน จากจำนวน 71 ปัจจัย เหลือเพียง 35 ปัจจัย รวมถึงให้ผู้เชี่ยวชาญหรือผู้ที่เกี่ยวข้อง ทำการประเมินความสำคัญของปัจจัยทั้ง 35 ปัจจัย แล้วพบว่า 7 ปัจจัยที่มีความสำคัญมากในการตั้งโรงงานฝังกลบของเสียอันตราย ได้แก่ การยอมรับและความต้องการของชุมชนในพื้นที่ การมีส่วนร่วมของประชาชน แหล่งน้ำธรรมชาติ พื้นที่ที่มีข้อร้องเรียนความห่างไกลจากแหล่งชุมชน กฎระเบียบเกี่ยวกับผังเมือง และเส้นทางคมนาคม ตามลำดับ โดยเห็นได้ว่า 2 ลำดับแรกที่มีความสำคัญมากที่สุด เป็นปัจจัยที่เกี่ยวกับด้านสังคมและชุมชนเป็นหลัก ซึ่งมีความแตกต่างจากปัจจัยในการพิจารณาตั้งโรงงานอุตสาหกรรมประเภทอื่น ที่ให้ความสำคัญกับปัจจัยด้านเศรษฐศาสตร์หรือความคุ้มค่าในการลงทุนเป็นหลัก

การเลือกพื้นที่เหมาะสมในการตั้งโรงงานกำจัดของเสียอันตรายโดยวิธีการฝังกลบในพื้นที่จังหวัดขอนแก่น ด้วยวิธี AHP เป็นการอาศัยความรู้สึกของผู้ตัดสินใจในการเปรียบเทียบเชิงคู่ของทางเลือกทั้งหมดบนปัจจัยทีละปัจจัย รวมถึงมีการตรวจสอบความสอดคล้องกันของข้อมูลที่ได้จากการเปรียบเทียบเชิงคู่ ในการศึกษาครั้งนี้ ผู้วิจัยได้กำหนดให้มีผู้ตัดสินใจ จำนวน 4 ท่าน โดยทางเลือกที่มีความเหมาะสมมากที่สุด คือทางเลือกที่มีค่าเฉลี่ยผลรวมค่าสมรรถนะของทางเลือกสูงที่สุด ผลการวิจัย พบว่า พื้นที่ตำบลกุดน้ำใสมีความเหมาะสมในการตั้งโรงงานกำจัดของเสียอันตรายโดยวิธีการฝังกลบมากที่สุด รองลงมาคือ พื้นที่ตำบลโคกสูง และพื้นที่ตำบลม่วงหวาน ตามลำดับ ส่วนการคัดเลือกพื้นที่เหมาะสมในการตั้งโรงงานกำจัดของเสียอันตรายโดยวิธีการฝังกลบในพื้นที่จังหวัดขอนแก่น ด้วยวิธี TOPSIS นั้น สามารถตัดสินใจได้จากพื้นที่ที่มีค่าสัมประสิทธิ์เข้าใกล้แนวคิดในอุดมคติมากที่สุด ถือได้ว่าเป็นพื้นที่ที่มีความเหมาะสมที่สุด เมื่อรวมคะแนนจากทุกปัจจัยแล้ว ผลการวิจัย พบว่า พื้นที่ตำบลกุดน้ำใสมีค่าสมรรถนะโดยรวมที่ห่างไกลจากค่าอุดมคติเชิงลบมากที่สุดและมีความใกล้เคียงกับค่าอุดมคติเชิงบวกมากที่สุด จึงถือว่ามีสมรรถนะโดยรวมดีที่สุด โดยกระบวนการคัดเลือกด้วยวิธี TOPSIS นี้ ซึ่งเป็นวิธีการตัดสินใจที่อาศัยความรู้สึกน้อยกว่าได้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับวิธี AHP

6. ข้อเสนอแนะในการวิจัย

6.1 ในการเลือกที่ตั้งโรงงานกำจัดของเสียอันตรายโดยวิธีการฝังกลบ ต้องพิจารณาให้ความสำคัญแต่ละปัจจัยด้วยความละเอียด รอบคอบและครอบคลุม เนื่องจากหากมีการลงทุนแล้วและไม่มีการจัดการหรือวางแผนที่ดี อาจก่อให้เกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมขั้นรุนแรง รวมถึงสิ้นเปลืองค่าใช้จ่ายในการจัดการย้อนหลังได้

6.2 หน่วยงานภาครัฐ หรือผู้ประกอบกิจการภาคเอกชน ในธุรกิจฝังกลบของเสียอันตราย สามารถเพิ่ม

หรือลดปัจจัยที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้ มาพิจารณาได้ตามความเหมาะสมในการวางแผนตั้งโรงงานฝังกลบของเสียอันตรายในพื้นที่อื่นได้

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Kitsiri K. Principle industrial waste management abroad with direction development in Thailand. Paper presented at: 1st TSRI Public forum articles; 2008 Aug 4; Bangkok, Thailand. (in Thai)

[2] Bangkokbiznews.org [Internet]. Economic New [cited 2021 Apr 26]. Available form: https://www.bangkokbiznews.com/business/.

[3] Department of Industrial Works.org [Internet]. Bangkok: Statistic waste [cited 2021 Nov 5]. Available form: https://www.diw.go.th/webdiw/static-waste/.

[4] Weerapon K. Secure Landfill Site Selection for Hazardous Waste Disposal in Southern of Thailand Using Geographic Information System [master's thesis]. Prince of Songkla: Prince of Songkla University; 2013. (in Thai)

[5] Apisak P, Kultida T. Factors for policy making on the development of a province towards an ICT city. Information Journal, :Khon Kaen University. 2016;23 (2):48-63. (in Thai)

[6] Real Estate Information Center.org [Internet]. News and Law real estate; 2021. Available form: https://www.reic.or.th/News/PropertyLawGroup/1/.

[7] Department of Industrial Works. Manual of Factory audit. Bangkok: Department of Industrial Works; 2009. (in Thai)

[8] Kawinpob S, Panitas S. Supplier selection using TOPSIS and ROC methods a case study of restaurant industry. KMUTT Research and Development Journal. 2017;40(3):385-403. (in Thai)

[9] Panitas S. Multiple criteria performance assessment and decision making. 1 ts. Khon Kaen: Khon Kaen University; 2021. (in Thai)

[10] Pattareeya K. Supplier selection for medical equipment using multicriteria decision making [master's thesis]. Khon Kaen: Khon Kaen University; 2018. (in Thai)

[11] Jirattinart T, Thavivongse S, Saowanee W. Analytic hierarchy process for stakeholder participation in integrated water resources management. Engineering Journal. 2017;21(7):87-103. (in Thai)

[12] Sathaporn O. Multiple criteria decision making for business and logistics management: Theory and Applications. 2nd ed. Bangkok: Thammasat University; 2019. (in Thai)

[13] Walailak A. Ranking the suitable countries for investment in textile industry. The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok. 2021;31(1):71-81. (in Thai)

[14] Akekaluk N, Porntip P. Community environment planning for environment quality management in eco-industrial development zone in laem chabang municipality, si racha district, chonburi. Journal of Public Administration and Politics. 2021;10(1):74-91. (in Thai)

[15] Muang Wan Subdistrict Municipality. Local development plan 2018-2022.

[16] Khon Kaen Provinciel Industry Office. Questionnaire number M-ENG-1/2565: Document receipt number 2629; 2022.

[17] Kut Nam Sai Subdistrict Municipality. Local development plan 2018-2021.

[18] Khok Sung Subdistrict Municipality. Local development plan 2018-2021.

การประยุกต์แขนกลคาร์ทีเซียนสำหรับร่างภาพ 2 มิติ ควบคุมด้วยพีแอลซี

ไพโรจน์ ทองประศรี[1*] และชลัมพล เวสารัชประเสริฐ[1]

pairote@eng.src.ku.ac.th[1*], chalumpol.we@ku.th[1]

Received : 26-Feb-2022
Revised : 17-Oct-2022
Accepted : 25-Oct-2022

[1] ภาควิชาวิศวกรรมไฟฟ้า คณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการประยุกต์แขนกลคาร์ทีเซียนสำหรับร่างภาพ 2 มิติ ขนาดกว้าง 297 mm ยาว 400 mm การเคลื่อนที่ของแขนกลแนวแกน x และ y เป็นเชิงเส้นขับเคลื่อนด้วยเอซีเซอร์โวมอเตอร์ เพื่อลดต้นทุนของแขนกลการเคลื่อนที่แนวแกน z ใช้โซลินอยด์ไฟฟ้าแทนเซอร์โวมอเตอร์ การเคลื่อนที่ทั้ง 3 แกน ของแขนกลถูกควบคุมด้วยพีแอลซีรุ่น CJ2M-CPU11 พิกัดหรือตำแหน่งสำหรับกำหนดให้แขนกลเคลื่อนที่ได้มาจากการแปลงรูปต้นแบบขาวดำโดยใช้โปรแกรม ALL TO G-Code Converter ข้อมูลของพิกัดที่ได้ไม่สามารถนำเข้าไปเก็บไว้ที่หน่วยความจำของพีแอลซีได้โดยตรง โปรแกรมปรับข้อมูลของพิกัดที่สามารถเก็บไว้ในหน่วยความจำของพีแอลซีได้ถูกพัฒนาบนโปรแกรม MATLAB โปรแกรมนี้สามารถย่อหรือขยายข้อมูลของพิกัดจากรูปต้นแบบได้ การควบคุมแบบป้อนกลับชนิด PI ใช้ควบคุมความเร็วของเซอร์โวมอเตอร์ รูปต้นแบบต้องมีขนาดไม่เกิน 100 Kbyte ผลการทดลองแขนกลคาร์ทีเซียนร่างภาพได้เร็วที่สุดตามรูปต้นแบบที่กำหนด การตั้งค่าความเร็วของเซอร์โวมอเตอร์แกน x และ y ต้องสัมพันธ์กับสัดส่วนของรูปต้นแบบ ค่าที่เหมาะสมของอัตราเร่งและหน่วง Kp และ Ti มีค่าอยู่ที่ 50 c/s^2 800 Hz และ 1,600 ms ตามลำดับ เนื่องจากการเคลื่อนที่แกน z ของแขนหุ่นยนต์ใช้โซลินอยด์ไฟฟ้าทำให้ภาพร่างแบบวงกลมที่ได้มีลักษณะบิดเบี้ยว อุปกรณ์วาดภาพหัวปากกาต้องแข็งแรงเพียงพอ เพราะแกน z ไม่สามารถควบคุมแรงกดได้

คำสำคัญ: แขนกลคาร์ทีเซียน ร่างภาพ พีแอลซี เซอร์โวมอเตอร์ โซลินอยด์ไฟฟ้า

Application of Cartesian Robotic Arm for 2D Sketching Controlled by PLC

Pairote Thongprasri[1*] and Chalumpol Wesaruchprasert[1]

pairote@eng.src.ku.ac.th[1*], chalumpol.we@ku.th[1]

Received	: 26-Feb-2022
Revised	: 17-Oct-2022
Accepted	: 25-Oct-2022

[1] Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering at Sriracha, Kasetsart University Sriracha Campus

Abstract

This paper presents the application of a cartesian robotic arm for 2D sketching, width 297 mm, length 400 mm. The movement of the x and y axis is linear, which is driven by servo motor. To reduce cost, the z-axis movement of the robotic arm uses an electric solenoid instead of a servo motor. The movement of all 3 axes of the robotic arm is controlled by PLC model CJ2M-CPU11. The defined coordinates or positions for moving the robotic arm are obtained by converting the black and white image prototype using the ALL TO G-Code Converter program. The coordinate data cannot be directly imported into the PLC's memory. A program to adjust the coordinates for storing in PLC's memory was developed on MATLAB program. This program can shrink or enlarge the coordinates from the prototype image. The PI type feedback control is used to control the speed of the servo motor. The prototype image used must not exceed 100 Kbyte in size. If the line is thick, the positions obtained by converting with ALL TO G-Code Converter program are only the border of the prototype image. The experimental results, the cartesian robotic arm can sketch the fastest according to the defined image prototype. The speed setting of the x and y axis servo motor must be related to the proportion of the prototype. Optimal values for acceleration and deceleration, Kp, and Ti are 50c/s^2, 800 Hz and 1600 ms, respectively. Since the z axis movement of the robotic arm uses an electric solenoid. The circular sketch according to the prototype looks distorted. Sketching equipment, the head of pen must be strong enough because the z-axis cannot control the pressure.

Keywords: cartesian robotic arm, sketching, PLC, servo motor and electric solenoid

1. บทนำ

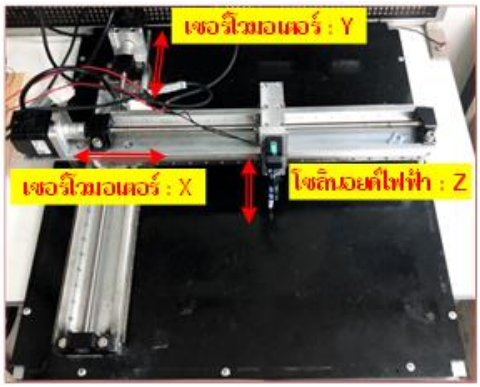
แขนกลเป็นเครื่องจักรกลที่ถูกโปรแกรมให้ทำงานแทนมนุษย์ โดยสามารถทำงานได้อย่างหลากหลายต่อเนื่อง งานที่ต้องการความละเอียดสูง หรืองานที่เสี่ยงอันตรายทั้งในด้านสารเคมีและด้านพื้นที่เสี่ยงภัย ไมโครคอนโทรลเลอร์ (microcontroller) และพีแอลซี (Programmable Logic Controller : PLC) เป็นตัวควบคุมที่นิยมนำมาใช้กับแขนกล ข้อเด่นของไมโครคอนโทรลเลอร์มีความยืดหยุ่นสำหรับการเขียนโปรแกรมที่ซับซ้อนมากกว่าพีแอลซี ในขณะที่ตัวควบคุมพีแอลซีมีเสถียรภาพในการทำงานที่สภาวะแวดล้อมที่หลากหลายได้ดีกว่าไมโครคอนโทรลเลอร์ แขนกลมีวิวัฒนาการและก้าวหน้าอย่างรวดเร็วได้เข้ามามีบทบาทมากมายในชีวิตของมนุษย์หลายด้าน เช่น ด้านการแพทย์ ด้านเกษตรกรรม ด้านการทหาร หรือแม้กระทั้งการประยุกต์แขนกลในงานด้านศิลปะ เป็นต้น ในการใช้แขนกลวาดภาพหรือร่างภาพจากภาพต้นแบบ การหาขอบภาพ พิกัดหรือตำแหน่ง ที่ใช้ควบคุมปลายแขนของแขนกลเป็นสิ่งสำคัญ หลักการหาขอบภาพคือการตรวจสอบว่าเส้นลากผ่านหรือใกล้เคียงกับจุดใด โดยวัดจากการเปลี่ยนแปลงของความเข้มในตำแหน่งที่ใกลเคียงกับจุดที่ใช้งาน สามารถแบ่งได้ 2 กลุ่ม คือกลุ่มวิธีการเกรเดียนต์และกลุ่มวิธีการลาปาเซียน วิธีการเกรเดียนต์จะหาขอบภาพโดยการหาจุดต่ำสุดและจุดสูงสุดในรูปของอนุพันธ์อันดับหนึ่ง สำหรับวิธีการลาปาเซียนการหาขอบเขตภาพจะใช้อนุพันธ์อันดับ 2 โดยวิเคราะห์จากจุดที่มีค่า y เป็นศูนย์หรือ zerocrossing ซึ่งวิธีนี้ใช้เวลาในการคำนวณมากกว่าวิธีการเกรเดียนต์ [1] การหาพิกัดหรือตำแหน่งโดยใช้ G-Code (Geometric Code) ซึ่งเป็นภาษาที่ประกอบ ด้วยรหัสคำสั่งที่ใช้ควบคุมการเคลื่อนที่ของเครื่องจักรให้เคลื่อนที่ไปตามตำแหน่งที่ต้องการ [2] แขนกลที่มีโครงสร้างที่ทำจากแผ่นอลูมิเนียมใช้สำหรับวาดภาพจากรูปต้นแบบ แขนกลสามารถเคลื่อนที่ในแนวแกน x และ y ขับเคลื่อนด้วยเซอร์โวมอเตอร์ และใช้ปากกาลูกลื่นในการวาดภาพบนกระดาษขนาด A4 การหาขอบภาพใช้วิธี canny จัดอยู่ในกลุ่มวิธีการเกรเดียนต์ผ่านโปรแกรม MATLAB เมื่อได้ตำแหน่งขอบรูปจะถูกแปลงเป็นพิกัดส่งไปยังไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino เพื่อควบคุมให้แขนกลทำงาน ผลการวาดภาพมีความคล้ายภาพต้นแบบ [3] แขนกลสำหรับวาดภาพเป็นหุ่นยนต์ SCARA มี 3 ข้อต่อ ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino ขับเคลื่อนด้วยเซอร์โวมอเตอร์ 3 ตัว ใช้วิธี canny ในการตรวจหาขอบรูปผ่านโปรแกรม MATLAB ก่อนเริ่มวาดภาพทุกครั้งต้องมีการปรับระยะจุดเริ่มต้นหรือจุดอ้างอิง [4] การวาดภาพเหมือนมนุษย์ของหุ่นยนต์ฮิวแมนนอยด์ของ Fujitsu มีระบบ AI ในการควบคุม ใช้แขนข้างขวาในการวาดภาพประกอบด้วยส่วนหัวไหล่ที่หมุนได้ 3 ทิศทาง ส่วนของข้อศอกที่หมุนได้ 1 ทิศทาง และส่วนของมือที่มีนิ้วทั้ง 5 ซึ่งควบคุมด้วยมอเตอร์เพียง 1 ตัว มีการติดตั้งกล้องเว็บแคมความละเอียด 640x480 พิกเซล ไว้ที่ส่วนหัวของหุ่นยนต์ ใช้วิธีการ canny ในการหาขอบของรูปภาพ ใช้ปากกามาร์กเกอร์และปากกาขนนกในการวาด ผลที่ได้ปากกาขนนกมีความสวยงามและความสมจริงมากกว่าปากกามาร์กเกอร์ [5] การวาดภาพด้วยหุ่นยนต์พอล (Paul) ประกอบด้วย 3 ข้อต่อ และมีข้อต่อพิเศษที่ใช้สำหรับจับปากกาลูกลื่น เคลื่อนที่โดยใช้เซอร์โวมอเตอร์ ติดตั้งกล้องสำหรับจับใบหน้าของมนุษย์ต้นแบบใช้ระบบ YARP (Yet Another Robot Platform) ควบคุมการเคลื่อนที่ของมอเตอร์ เนื่องจากใช้เซอร์โวมอเตอร์ราคาถูกทำให้ภาพที่ได้มีความละเอียดค่อนข้างต่ำและขาดความแม่นยำในการทำงาน [6] หุ่นยนต์ Kuka รุ่น KR6 ควบคุมการทำงานด้วยคอนโทรลเลอร์ KRC2 สั่งงานผ่านหน้าจอแสดงผล ติดตั้งกล้องเพื่อเป็นอุปกรณ์ในการรับภาพต้นแบบ ใช้วิธี canny ตรวจจับหาขอบของรูป ใช้ปากกาลูกลื่นในการวาด ผลของการวาดภาพพบว่ามีความใกล้เคียงกับรูปต้นแบบ แต่ในส่วนที่เป็นเส้นขอบบางๆ ของรูปต้นแบบ canny ไม่สามารถคำนวณพิกัดออกมาได้ และเมื่อหุ่นยนต์ทำงานอยู่ในที่โล่งการเปลี่ยนแปลงของแสงส่งผลต่อประสิทธิภาพของภาพวาด [7] การประยุกต์ใช้ XY-Plotter ควบคุมด้วยพีแอลซีผ่านหน้าจอสั่งงานโดยระบุตำแหน่งหรือพิกัด ขับเคลื่อนด้วยมอเตอร์แบบ สเต็ป [8] แขนกลแบบคาร์ทีเซียนควบคุมการทำงานด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ Aduino ขับเคลื่อนแกน x และ y ด้วยสเต็ปมอเตอร์ สำหรับแกน z ขับเคลื่อนด้วยเซอร์โวมอเตอร์ รูปต้นแบบวาดจากโปรแกรม Inkscape แล้วใช้ ALL TO G-Code Converter ในการแปลงไฟล์รูปภาพให้เป็นตำแหน่ง แขนกลสามารถวาดเส้นที่ต่อเนื่องได้ตามรูปที่กำหนดไว้ได้อย่างแม่นยำแต่ต้องเป็นรูปที่มีเส้นต่อเนื่อง [9] หุ่นยนต์วาดภาพเคลื่อนที่ mobile robot Draw (mDraw) สามารถวาด

ตัวอักษร A แบบ 2 มิติ ภาพที่ได้จะเป็นเส้นขีด ซอฟต์แวร์ mDraw ใช้เทคนิคการประมวลผลภาพพัฒนาบนโปรแกรม MATLAB ร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino เป็นตัวประมวลผล [10] การออกแบบและพัฒนาเครื่อง CNC สำหรับเขียนข้อความ โดยแปลงข้อความเป็น G-Code ทำให้ได้พิกัดสำหรับส่งให้ไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino ประมวลผล เพื่อควบคุมการเคลื่อนที่ของเครื่อง CNC [11] ไปยังตำแหน่งที่กำหนด

บทความนี้นำเสนอแขนกลคาร์ทีเซียนสำหรับร่างภาพ 2 มิติ ขนาดไม่เกิน A3 กว้าง 297 mm ยาว 400 mm ประมวลผลด้วยพีแอลซี ภาษาสำหรับควบคุมพีแอลซีประกอบด้วยภาษา LD (Ladder Diagram) และ ST (Structure Text) การเคลื่อนที่แนวแกน x และแกน y ใช้เซอร์โวมอเตอร์ร่วมกับบอลสกรูและรางสไลด์ เพื่อลดต้นทุนของแขนกลแกน z ใช้โซลินอยด์ไฟฟ้าสำหรับจับปากกาเคลื่อนที่ขึ้นลง รูปภาพต้นแบบถูกแปลงเป็นตำแหน่ง x y และ z ด้วยโปรแกรม ALL TO G-Code Converter

2. โครงสร้างแขนกลคาร์ทีเซียน

แขนกลคาร์ทีเซียนสำหรับร่างภาพควบคุมด้วยพีแอลซี สามารถเคลื่อนที่ได้ในแนวเส้นตรงทั้ง 3 แกน ดังรูปที่ 1 โดยแกน x และ y ถูกขับเคลื่อนด้วยเซอร์โวมอเตอร์ร่วมกับบอลสกรูและรางสไลด์ พิกัดของการเคลื่อนที่เป็นระยะ 297 mm และ 400 mm ตามลำดับ สำหรับอุปกรณ์ร่างภาพถูกยึดติดกับแกนของโซลินอยด์ไฟฟ้าเคลื่อนที่ตามแนวแกน z ได้เป็นระยะ 10 mm



รูปที่ 1 โครงสร้างแขนกลคาร์ทีเซียน

รางสไลด์มีลักษณะเป็นรางยาวมีสไลด์บล็อกเป็นตัวรับน้ำหนัก สามารถเลื่อนไปกลับได้ในแนวเชิงเส้น ภายในจะมีลูกปืนเป็นตัวขับเคลื่อนให้บล็อกสามารถเคลื่อนที่ไปตามรางเพื่อช่วยลดแรงเสียดทานในขณะเคลื่อนที่ บอลสกรูเป็นชิ้นส่วนของกลไกที่ใช้ในระบบขับเคลื่อน ซึ่งจะเปลี่ยนการเคลื่อนที่แบบหมุนของเซอร์โวมอเตอร์ให้เป็นการเคลื่อนที่แบบเชิงเส้น บอลสกรูจะถูกติดตั้งอยู่บนรางสไลด์ โดยแรงที่กระทำสำหรับขับเคลื่อนสามารถหาได้จาก

$$F_a = \mu mg \qquad (1)$$

โดย μ คือสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของบอลสกรู
m คือน้ำหนักที่กระทำกับตัวรางสไลด์ (kg)
g คือความเร่งของแรงโน้มถ่วง (9.81m/s^2)

น้ำหนักที่กระทำบนรางสไลด์ในงานวิจัยนี้มีค่าประมาณ 5 กิโลกรัม เมื่อกำหนดค่าสัมประสิทธิ์ความเสียดทานของบอลสกรู 0.9 จากสมการที่ (1) สามารถหาค่าแรงที่กระทำได้ 44.145 N โดยทั่วไปรางสไลด์ที่มีความยาว 500 mm ความเสียดทานของซีลมีค่าอยู่ในช่วง 2–5 N แรงกระทำทั้งหมดเมื่อรวมค่าความเสียดทานของซีลสูงสุด (5 N) จะได้ 49.145 N

แรงบิดและกำลังไฟฟ้าของเซอร์โวมอเตอร์สามารถหาได้จากสมการที่ (2) และ (3) ตามลำดับ

$$\tau = \frac{F_a \times P_h}{2\pi\eta} \qquad (2)$$

$$P = \tau \times \frac{2\pi n}{60} \qquad (3)$$

โดย P_h คือระยะห่างระหว่างเกลียว (m)
η คือประสิทธิภาพของบอลสกรู
n คือความเร็วรอบของเซอร์โวมอเตอร์ (rpm)

จากสมการที่ (2) ประสิทธิภาพของบอลสกรู 80% โดยมีระยะห่างระหว่างเกลียว 0.02 m ดังนั้นแรงบิดของเซอร์โวมอเตอร์ที่ได้มีค่า 0.196 Nm เมื่อกำหนดความเร็วรอบของเซอร์โวมอเตอร์ที่ใช้งาน 3,000 rpm กำลังไฟฟ้าของเซอร์โวมอเตอร์สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3) มีค่า 61.575 W โดยในงานวิจัยที่ใช้เป็นเอซีเซอร์โวมอเตอร์รุ่น R88M-WP10030H-S1 พิกัดกำลังไฟฟ้าสูงสุด 100 W ความเร็วรอบ 3,000 rpm พีแอลซีไม่สามารถสั่งการควบคุมไปที่เอซีเซอร์โวมอเตอร์โดยตรง ต้องสั่งงานผ่านชุด

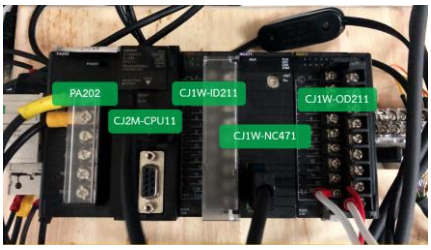
ขับเอซีเซอร์โวมอเตอร์ ในงานวิจัยที่ใช้คือรุ่น R88D-WN01H-ML2 พิกัดกำลังไฟฟ้า 100 W และแรงดัน 200~230VAC ดังแสดงในรูปที่ 2

รูปที่ 2 เอซีเซอร์โวมอเตอร์และชุดขับ

รูปที่ 3 โซลินอยด์ไฟฟ้า

ชุดขับเอซีมอเตอร์และเอซีเซอร์โวมอเตอร์มีราคาค่อนข้างสูง เพื่อลดต้นทุนสำหรับแขนกลงานวิจัยนี้การเคลื่อนที่แกน z ใช้โซลินอยด์ไฟฟ้ารุ่น ZYE1-0837Z มีความกว้าง 11 mm ยาว 20 mm สูง 12 mm พิกัดกำลังไฟฟ้า 9 W แรงดัน 24 VDC แรงที่ใช้ผลัก/ดึง 0.8 N ดังแสดงในรูปที่ 3 ทำหน้าที่เป็นตัวจับปากกาสำหรับการร่างภาพ

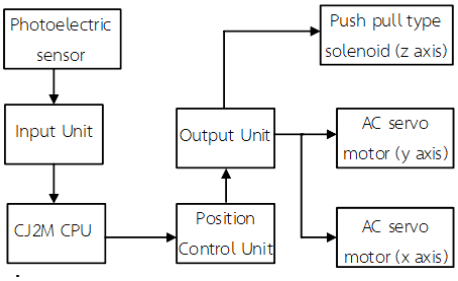
ชุดควบคุมพีแอลซีดังรูปที่ 4 ประกอบด้วยตัวควบคุมพีแอลซีเป็นแบบโมดูลาร์ รุ่น CJ2M-CPU11 หน่วยจ่ายไฟ รุ่น CJ1W-PA202 หน่วยอินพุตรุ่น CJ1W-ID211 หน่วยควบคุมตำแหน่ง รุ่น CJ1W-NC471 ใช้สำหรับเชื่อมต่อกับชุดขับเอซีเซอร์โวมอเตอร์ และหน่วยเอาต์พุตชนิดทรานซิสเตอร์ (sink type) รุ่น CJ1W-OD211



รูปที่ 4 ชุดควบคุมพีแอลซี

อุปกรณ์เซนเซอร์ทางแสง (photoelectric sensor) รุ่น EE-SX470 ดังรูปที่ 5 จำนวน 4 ตัว ใช้ตรวจจับระยะกั้นหน้าและหลังของแกน x และ y โดยต่อกับหน่วยอินพุตของพีแอลซี

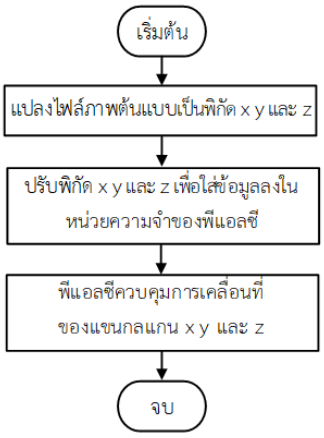
รูปที่ 5 photoelectric sensor รุ่น EE-SX470



รูปที่ 6 บล็อกไดอะแกรมการต่อพีแอลซีร่วมอุปกรณ์

การต่อพีแอลซีร่วมกับอุปกรณ์ต่างๆ ดังแสดงในรูปที่ 6 มีอุปกรณ์เซนเซอร์ทางแสงจำนวน 4 ตัว ใช้ตรวจจับระยะกั้นหน้าและหลังของแกน x และ y โดยต่อกับหน่วยอินพุตของพีแอลซี สำหรับหน่วยเอาต์พุตต่อกับเอซีเซอร์โวมอเตอร์และโซลินอยด์ไฟฟ้าสำหรับควบคุมแขนกลแกน x y และแกน z ตามลำดับ

การควบคุมแขนกลมีขั้นตอนการทำงานดังแสดงในรูปที่ 7 โดยพิกัดหรือตำแหน่งการเคลื่อนที่ของเอซีเซอร์โวมอเตอร์จะถูกพีแอลซีควบคุมผ่านหน่วยควบคุมตำแหน่ง ซึ่งตำแหน่งการเคลื่อนที่ของแขนกลเกิดจากการแปลงไฟล์ต้นแบบด้วยโปรแกรม All To G-Code Converter หลังจากนั้นต้องทำการปรับพิกัดของ x y และ z สำหรับเก็บไว้ในหน่วยความจำของพีแอลซี เพื่อใช้เป็นข้อมูลให้พีแอลซีควบคุมแขนกล



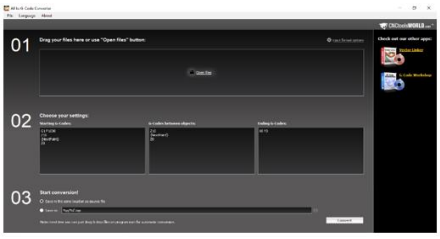
รูปที่ 7 แผนผังการควบคุมแขนกลโดยใช้พิกัด

3. ออกแบบระบบควบคุมด้วยพีแอลซี

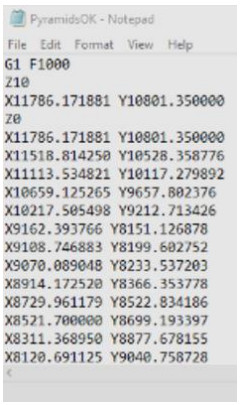
ข้อมูลที่สำคัญสำหรับการประยุกต์ใช้แขนกลคาร์ทีเซียนร่างภาพ 2 มิติ ตามรูปต้นแบบคือตำแหน่งหรือพิกัดของ x y และ z ซึ่งข้อมูลเหล่านี้จะถูกส่งไปเก็บยังหน่วยความจำของพีแอลซี รูปแบบการจัดเก็บข้อมูลในหน่วยความจำของพีแอลซีเป็นแบบ 5 คอลัมน์ แต่ละตำแหน่งสามารถเก็บข้อมูลได้ 2 เวิร์ด จำนวนพัลส์ที่ส่งให้เซอร์โวมอเตอร์หมุน 1 รอบจะใช้ 2,000 พัลส์ สำหรับบอลสกรูมีระยะห่างระหว่างเกลียว 2 mm ดังนั้นเมื่อส่งพัลส์ 2,000 พัลส์ แขนกลจะเคลื่อนที่ได้ 2 mm ขนาดสูงสุดที่แขนกลสามารถร่างภาพได้คือขนาดกระดาษ A3 กว้าง 297 mm ยาว 400 mm ดังนั้นข้อมูลที่เก็บลงในหน่วยความจำสำหรับตำแหน่งในแกน x ไม่เกิน 297,000 ตำแหน่ง และแกน y ไม่เกิน 400,000 ตำแหน่ง ข้อมูลนี้จะเป็นตัวกำหนดความจุของรูปต้นแบบต้องมีค่าไม่เกิน 100 Kbyte

งานวิจัยนี้รูปต้นแบบถูกแปลงเป็นพิกัดหรือตำแหน่ง x y และ z ด้วยโปรแกรม ALL TO G-Code Converter สำหรับรูปต้นแบบที่มีความหนาของเส้นการหาพิกัดหรือตำแหน่งจะได้เฉพาะขอบภาพต้นแบบ ขั้นตอนมีดังนี้

i) นำไฟล์รูป .jpg แปลงเป็นไฟล์ .dxf โดยรูปที่นำมาใช้ต้องเป็นภาพลายเส้นสีดำเท่านั้น หลังจากนั้นนำไฟล์ .dxf ที่ได้ไปแปลงเป็นพิกัดหรือตำแหน่ง ด้วยโปรแกรม All To G-Code Converter ดังแสดงในรูปที่ 8 ไฟล์ที่ถูกแปลงจะได้ไฟล์ตำแหน่งที่มีนามสกุล .tap



รูปที่ 8 แปลงไฟล์ .dxf เป็นไฟล์ .tap



รูปที่ 9 ตำแหน่ง x y และ z ที่อยู่ไฟล์นามสกุล .tap

ii) จัดเตรียมข้อมูลเพื่อเก็บลงในหน่วยความจำของพีแอลซี เนื่องจากข้อมูลตำแหน่งที่ได้จากการแปลงด้วยโปรแกรม All To G-Code Converter ในรูปที่ 9 ตำแหน่ง z จะแสดง 2 ค่าคือ z10 หมายถึงไม่มีลายเส้น (ปากกาถูกยก) และ z0 มีลายเส้น (ปากกาถูกเขียนบนกระดาษ) ส่วนตำแหน่งของ x และ y จะอยู่ในรูปจำนวนเต็มและมีทศนิยม 6 ตำแหน่ง เริ่มต้นทำการแยกข้อมูลของแกน x และ y ออกจากกันผลที่ได้ดังรูปที่ 10 (ก) จากนั้นทำการลบอักษร x y และทำการเพิ่มค่า 10 และ 0 ในแกน z ให้ครบ ผลที่ได้คอลัมน์ที่ 1 2 และ 3 คือตำแหน่งของแกน x y และ z ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 10 (ข)

เมื่อได้ข้อมูลตำแหน่งของแกน x y และ z ครบดังแสดงในรูปที่ 10 (ข) จากนั้นต้องจัดเรียงข้อมูลแกน x y และ z เป็น 5 คอลัมน์ โดยในรูปที่ 11 แสดงตัวอย่างการจัดเรียงข้อมูลตำแหน่งของแกน x เป็น 5 คอลัมน์ ส่วน y และ z แยกทำลักษณะเดียวกัน โดยขั้นตอนถัดไปก่อนเก็บข้อมูลในหน่วยความจำของพีแอลซีต้องทำให้แกน x และ y เป็นเลขจำนวนเต็มโดยตัดทศนิยมทิ้งก่อน

G1 F1000	G1 F1000
Z10	Z10
X11786.17	Y10801.350000
Z0	Z0
X11786.17	Y10801.350000
X11518.81	Y10528.358776
X11113.53	Y10117.279892
X10659.12	Y9657.802376
X10217.50	Y9212.713426
X9162.393	Y8151.126878
X9108.746	Y8199.602752
X9070.089	Y8233.537203
X8914.172	Y8366.353778
X8729.961	Y8522.834186
X8521.700	Y8699.193397
X8311.368	Y8877.678155
X8120.691	Y9040.758728
X7961.319	Y9178.107069
X7905.593	Y9228.488680
X7822.886	Y9306.669220
X7705.002	Y9193.584610
X7656.762	Y9147.496259
X7609.297	Y9102.526728

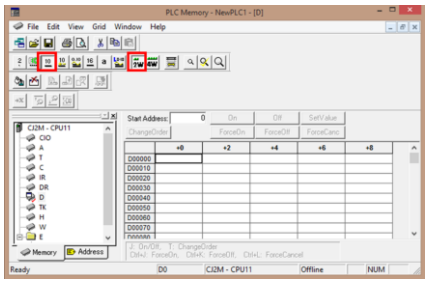
11786.17	10801.35	10
11518.81	10528.36	0
11113.53	10117.28	0
10659.13	9657.802	0
10217.51	9212.713	0
9162.394	8151.127	0
9108.747	8199.603	0
9070.089	8233.537	0
8914.173	8366.354	0
8729.961	8522.834	0
8521.7	8699.193	0
8311.369	8877.678	0
8120.691	9040.759	0
7961.319	9178.107	0
7905.593	9228.489	0
7822.886	9306.669	0
7705.002	9193.585	0
7656.762	9147.496	0
7609.297	9102.527	0
7568.274	9063.987	0
7544.736	9042.4	0
7515.234	9015.39	0
7407.388	8914.765	0

(ก) แยกข้อมูล x และ y (ข) ตำแหน่งของแกน x y และ z

รูปที่ 10 ข้อมูลตำแหน่งของแกน x y และ z

11786.17	11518.81	11113.53	10659.13	10217.51
9162.394	9108.747	9070.089	8914.173	8729.961
8521.7	8311.369	8120.691	7961.319	7905.593
7822.886	7705.002	7656.762	7609.297	7568.274
7544.736	7515.234	7407.388	7279.856	7136.682
6808.719	6538.513	6176.292	5372.1	4958.366
4576.624	4256.565	4126.487	4023.924	3878.278
3718.784	3568.289	3416.832	3254.418	3104.696
2996.876	2830.933	2666.937	2518.497	2477.519
2464.55	2406.666	2339.689	2263.965	2186.776
2115.201	2054.88	2029.769	1997.696	1952.978
1882.818	1746.1	1512.797	1435.955	1383.973
1326.815	1281.931	1239.782	1185.194	1082.503
970.6387	917.186	869.0945	801.6979	695.6895
477.5653	323.2094	173.2147	39.804797	25.400000
32.219671	79.494050	138.9698	209.55	303.6594
386.4126	464.961	546.1	866.7897	2603.5
4471.964	4490.457	4491.269	4455.324	4411.638
4358.004	4303.724	4257.996	4218.773	4216.4

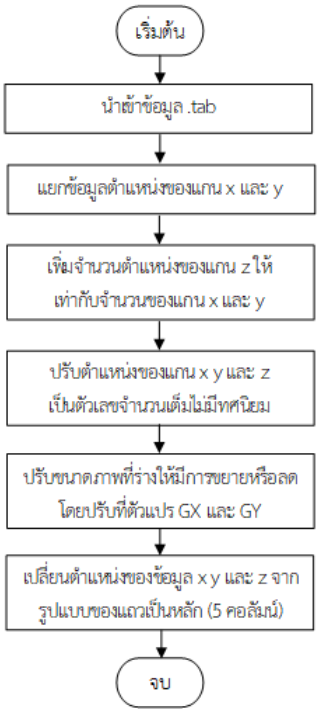
รูปที่ 11 จัดเรียงข้อมูลตำแหน่งของแกน x เป็น 5 คอลัมน์



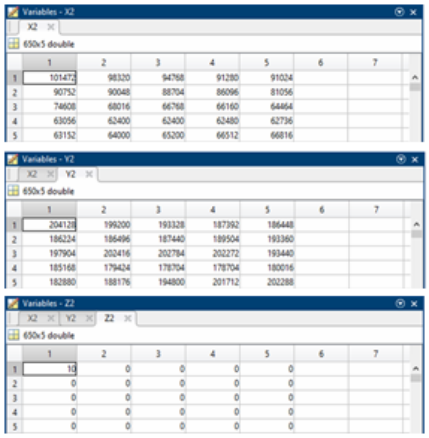
รูปที่ 12 พื้นที่หน่วยความจำของพีแอลซี

การใช้พื้นที่หน่วยความจำของพีแอลซีต้องทำการปรับข้อมูลที่จะเก็บเป็นเลขฐานสิบและขนาดของข้อมูลปรับเป็น 2 เวิร์ด ดังรูปที่ 12 โดยข้อมูลที่จะเก็บลงในพื้นที่หน่วยความจำของพีแอลซีต้องเป็นตัวเลขจำนวนเต็มเท่านั้น ส่วนทศนิยมจะถูกตัดทิ้ง โดยกำหนดพื้นที่หน่วยความจำของแกน x อยู่ที่ตำแหน่ง D1,000-D7,999 แกน y อยู่ที่ตำแหน่ง D8,000-D14,999 และแกน Z อยู่ที่ตำแหน่ง D15,000-D21,999

ขั้นตอนที่บรรยายได้ถูกนำมาพัฒนาบนโปรแกรม MATLAB โดยมีรายละเอียดตามแผนผังการทำงานดังแสดงในรูปที่ 13 ขั้นตอนการทำงานส่วนแรกคือต้องนำเข้าข้อมูล .tab โดยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมาสามารถขยายหรือลดภาพที่ร่างได้ ทั้งนี้จะไม่สามารถขยายได้เกินพิกัดของกระดาษ A3 ส่วน คำสั่งให้โซลินอยด์ไฟฟ้าทำงานหรือหยุดทำงาน (On/Off) กำหนดให้มีค่า 10 หรือ 0 ตามลำดับ เมื่อรันโปรแกรมตัวอักษร x y z และจุดทศนิยมได้ทุกตัดทิ้ง แยกตำแหน่งข้อมูลของแกน x และ y ออกจากกัน ทำการเพิ่มค่า 10 และ 0 ในแกน z ให้ครบตำแหน่ง ปรับข้อมูลตำแหน่งให้มีเฉพาะจำนวนเต็มตัดทศนิยมทิ้ง สามารถขยายหรือลดภาพที่ร่างได้โดยปรับค่า GX และ GY ได้ตามที่ต้องการ ซึ่งต้องใส่ค่าจำนวนเต็มให้เท่ากันทั้งในแกน x (GX) และ y (GY) ทั้งนี้จะไม่สามารถขยายได้เกินพิกัดของกระดาษ A3 ปรับเปลี่ยนข้อมูลตำแหน่งจากที่เก็บในรูปแบบแถวเป็นหลักจำนวน 5 คอลัมน์ รูปที่ 14 แสดงตัวอย่างผลของการรันโปรแกรมโดยตำแหน่งข้อมูลของแกน x y และ z เป็นจำนวนเต็มจัดเรียงเป็น 5 คอลัมน์ เรียงจากบนลงล่างตามลำดับ



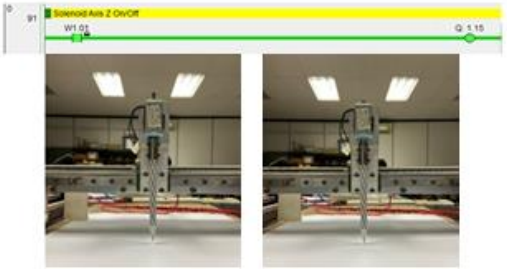
รูปที่ 13 แผนผังการทำงานที่พัฒนาบน MATLAB



รูปที่ 14ข้อมูลตำแหน่งแกน x y และ z เรียงจากบนลงล่าง

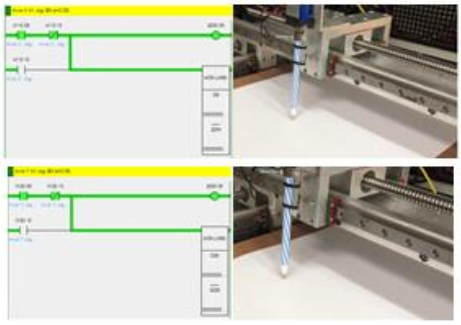
ภาษา LD และ ST ถูกใช้สำหรับเขียนโปรแกรมสั่งงานพีแอลซี โดยมีส่วนที่สำคัญดังนี้

i) ควบคุมการทำงานของโซลินอย์ไฟฟ้าซึ่งติดตั้งปากกาไว้ เมื่อโซลินอย์ทำงานปากกาจะถูกยกขึ้นดังรูปที่ 16 (ด้านซ้ายมือ) ทางตรงข้ามปลายปากกาจะถูกวางลงบนกระดาษดังแสดงในรูปที่ 15 (ด้านขวามือ)



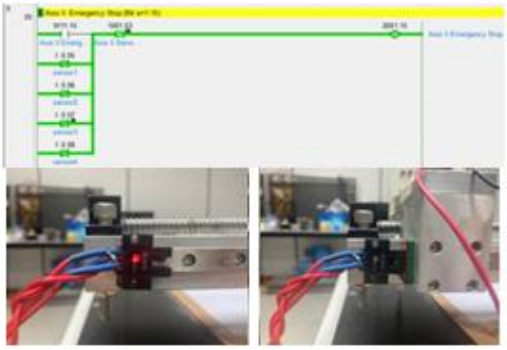
รูปที่ 15 ควบคุมการทำงานของโซลินอยด์ไฟฟ้า

ii) ควบคุมการเคลื่อนที่แขนกลแนวแกน x และ y ดังแสดงในรูปที่ 16 ด้านบนและล่างตามลำดับ

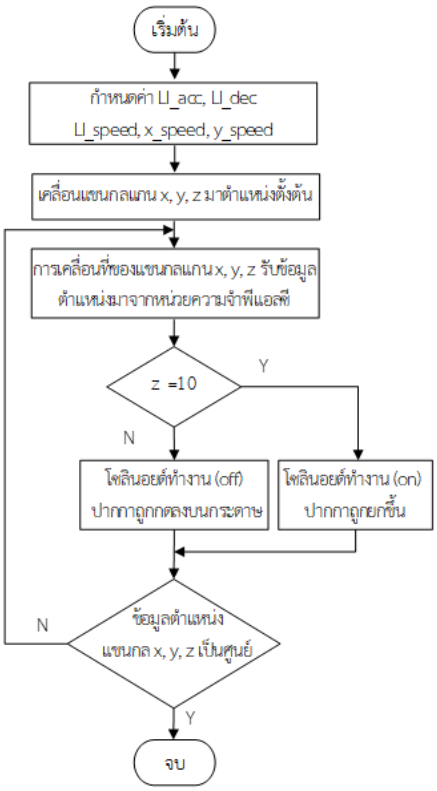


รูปที่ 16 ควบคุมการเคลื่อนที่แขนกลแนวแกน x และ y

iii) ควบคุมพิกัดการเคลื่อนที่โดยใช้เซนเซอร์ทางแสงตรวจระยะกั้นหน้าและหลังแกน x และ y ดังรูปที่ 17



รูปที่ 17 เซนเซอร์ตรวจระยะกั้นหน้าและหลังแกน x และ y



รูปที่ 18 แผนผังควบคุมการเคลื่อนที่เซอร์โวมอเตอร์

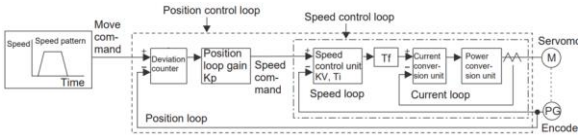
iv) การควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ใช้ภาษา ST โดยมีแผนผังการทำงานดังแสดงในรูปที่ 18 ซึ่งหน้าที่หลักคือรับข้อมูลตำแหน่งจากหน่วยความจำพีแอลซี เพื่อควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ โดยสามารถกำหนดคุณลักษณะที่สำคัญ ได้แก่

- LI_speed กำหนดความเร็วสูงสุด อยู่ในช่วง 0-65,535 c/s

- x_speed และ y_speed ตั้งค่าความเร็วของแกน x และ y อยู่ในช่วง 0-65,535 c/s

- LI_acc และ LI_dec ปรับอัตราเร่งและหน่วง โดยค่าที่ใช้ปรับจะถูกกำหนดให้ใช้ค่าเดียวกัน อยู่ในช่วง 0-65,535 command units/sec^2 (c/s^2)

ขั้นตอนถัดมาแขนกลจะเคลื่อนมาที่ตำแหน่งตั้งต้น สำหรับการเคลื่อนที่ของแขนกลแกน x y และ z ตำแหน่งจะถูกส่งมาจากหน่วยความจำของพีแอลซี เงื่อนไขของปากกาจะถูกกดลงบนกระดาษหรือถูกยกขึ้นอยู่ที่ค่า z โดยถ้าค่า z มีค่าเป็นศูนย์ปากกาจะถูกกดลงบนกระดาษ แต่ถ้า z มีค่าเป็น 10 ปากกาจะถูกยกขึ้นเนื่องจากโซลินอยด์ไฟฟ้าทำงาน การร่างภาพเสร็จสิ้นเมื่อตำแหน่งข้อมูลในหน่วยความจำพีแอลซีถูกส่งมาให้ประมวลผลจนหมด

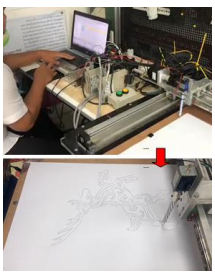


รูปที่ 19 กระบวนการควบคุมด้วย PI ของวงจรชุดขับ

รูปที่ 19 แสดงบล็อกไดอะแกรมการควบคุมตำแหน่งของเซอร์โวมอเตอร์ของชุดขับรุ่น R88D-WN01H-ML2 ชนิดการควบคุมเป็นแบบ PI ที่ใช้ค่า sampling rate เป็นความถี่ โดยสามารถปรับค่า Kp (position control loop gain) อยู่ในช่วง 10-20,000 Hz ส่วนค่า Ti (speed control loop) อยู่ในช่วง 15-51,200 ms เมื่อพีแอลซีส่งสัญญาณพัลส์เข้ามาถูกเปรียบเทียบกับเอ็นโค๊ดเดอร์ ผลของการเปรียบเทียบถูกส่งต่อที่ position control loop ซึ่งเป็นส่วนของการควบคุมตำแหน่ง เอาต์พุตที่ได้ถูกส่งยัง speed control loop เพื่อควบคุมความเร็วมอเตอร์

4. ผลการทดลอง

ชุดต้นแบบแขนกลคาร์ทีเซียนร่างภาพ 2 มิติ ควบคุมการทำงานด้วยพีแอลซี ดังแสดงในรูปที่ 20



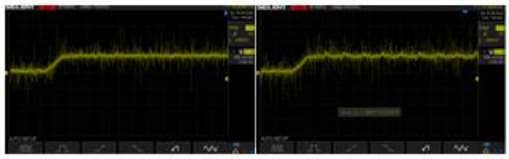
รูปที่ 20 ชุดต้นแบบแขนกลคาร์ทีเซียนร่างภาพ 2 มิติ

ขั้นตอนแรกทดลองการปรับจูนค่า Kp และ Ti เพื่อกำหนดค่าที่เหมาะสมสำหรับใช้งาน โดยใช้รูปต้นแบบในรูปที่ 21 เงื่อนไขการทดลอง i) ปรับเปลี่ยนค่า LI_speed x_speed และ y_speed ระหว่าง 30,000 - 60,000 c/s โดยปรับเพิ่มขึ้นระดับละ 10,000 c/s ii) คงค่า LI_speed x_speed และ y_speed ทำการปรับเปลี่ยนค่า Kp 4 ระดับ ได้แก่ 400 600 800 และ1,000 Hz โดยกำหนดให้ Ti คงที่ 1,600 ms หลังจากทดลองเสร็จ ปรับเปลี่ยน Ti เป็น 2,000 2,400 และ 2,800 ms ตามลำดับiii) ทำการทดลองซ้ำเดิมจนครบ

ก) ข)

รูปที่ 21 รูปต้นแบบและภาพที่ร่างด้วยด้วยแขนกล

ผลการทดลองแขนกลสามารถร่างภาพได้สมบูรณ์และใช้เวลาน้อย ค่าที่เหมาะสม Kp และ Ti มีค่าอยู่ที่ 800 Hz และ 1,600ms ตามลำดับ โดยผลการตอบสนองระบบควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ดังแสดงรูปที่ 22 (ก) ถ้าตั้งค่า Kp สูงกว่า 800 Hz หรือตั้งค่า Ti ต่ำกว่า 1,600 mS โครงสร้างแขนกลจะมีการสั่นสะเทือนขณะเคลื่อนที่ โดยผลการตอบสนองระบบควบคุมเซอร์โวมอเตอร์ที่ได้ดังรูปที่ 22 (ข) ซึ่งจะพบว่ารูปกราฟในสภาวะคงตัวมีระลอกคลื่นเกิดขึ้น สำหรับการปรับเปลี่ยนค่า LI_speed x_speed และ y_speed ถ้ากำหนดให้มีค่าสูงกว่า 60,000 c/s แขนกลจะเกิดการสั่นเขณะมีการเคลื่อนที่



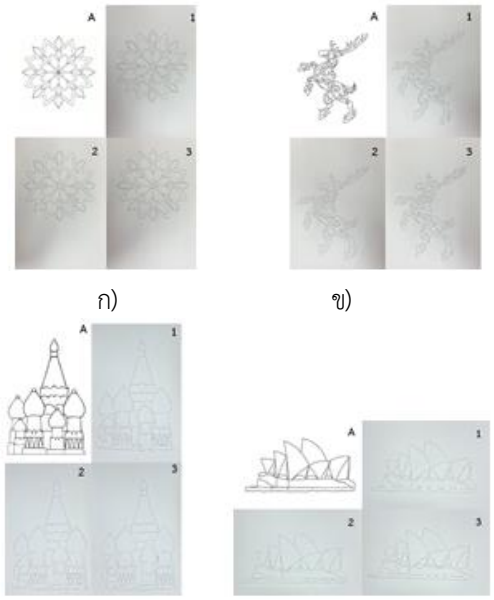
ก) Kp 800 Hz ข) Kp 1,000 Hz

รูปที่ 22 ผลตอบสนองระบบควบคุมเซอร์โวมอเตอร์

จากผลการทดลองทำให้สามารถกำหนดค่า Kp และ Ti ที่เหมาะสมได้ นอกจากนั้นพบว่าค่าของ LI_speed

x_speed และ y_speed ต้องกำหนดไม่เกิน 60,000 c/s สำหรับขั้นตอนถัดไปทำการทดลองเพื่อหาค่าที่เหมาะสมของ x_speed y_speed LI_acc และ LI_dec รูปลายเส้นสีดำจำนวน 4 แบบ (ก-ง) ที่มีลายเส้นไม่ซับซ้อน (อักษร A) ในรูปที่ 23 ถูกใช้เป็นต้นแบบ เงื่อนไขการทดลอง i) กำหนด LI_speed สูงสุดที่ 60,000 c/s ii) กำหนด Ki และ Ti มีค่าอยู่ที่ 800 Hz และ 1,600ms ตามลำดับ iii) ปรับเปลี่ยนค่า x_speed และ y_speed ระหว่าง 30,000 - 60,000 c/s โดยปรับเพิ่มขึ้นระดับละ 5,000 c/s

รูปที่ 23 ก) - ง) ที่มีหมายเลข 1-3 กำกับเป็นรูปส่วนหนึ่งของการทดลองใช้แขนกลร่างภาพ เมื่อปรับเปลี่ยนค่า x_speed และ y_speed ดังนี้ หมายเลข 1: x_speed และ y_speed มีค่า 60,000 c/s หมายเลข 2: x_speed และ y_speed เท่ากับ 40,000 และ 60,000 c/s ตามลำดับ และสำหรับหมายเลข 3: x_speed และ y_speed เท่ากับ 60,000 และ 30,000 c/s ตามลำดับ ซึ่งผลที่ได้ภาพที่ร่างจากแขนกลมีความสมบูรณ์แต่ใช้เวลาในการร่างภาพต่างกัน



ก) ข)

ค) ง)

รูปที่ 23 รูปต้นแบบและภาพที่ร่างด้วยแขนกลสำหรับหาค่าที่เหมาะสมของ x_speed และ y_speed

จากผลการทดลองเมื่อปรับเปลี่ยนค่า x_speed และ y_speed ระหว่าง 30,000 - 60,000 c/s โดยปรับเพิ่มขึ้นระดับละ 5,000 c/s พิจารณาที่แขนกลใช้เวลาในการร่างภาพน้อยที่สุดพบว่าค่าที่เหมาะสมของ x_speed และ y_speed ขึ้นอยู่กับสัดส่วนของรูปภาพต้นแบบ เมื่อรูปต้นแบบมีขนาดความกว้างมากกว่าความสูง ให้กำหนดค่า x_speed เท่ากับ $Li_speed_{(max)}$ โดยค่า y_speed หาได้ดังนี้

$$y_speed = \frac{H}{W} \times LI_speed_{(\max)} \qquad (4)$$

ถ้ารูปต้นแบบมีขนาดความสูงมากกว่าความกว้าง ให้กำหนดค่า y_speed เท่ากับ $Li_speed_{(max)}$ ซึ่งค่า x_speed หาได้จาก

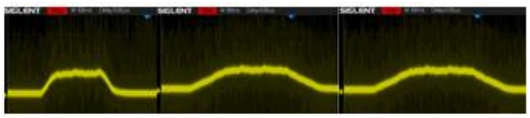
$$x_speed = \frac{W}{H} \times LI_speed_{(\max)} \qquad (5)$$

โดย H คือความสูงของรูปต้นแบบ (mm)

W คือความกว้างของรูปต้นแบบ (mm)

$LI_speed_{(\max)}$ กำหนดค่า 60,000 c/s

จากการทดลองเมื่อได้ค่าที่เหมาะสมของ x_speed และ y_speed ในลำดับถัดจะหาค่าที่เหมาะสมของ LI_acc และ LI_dec โดยทดลองปรับอัตราเร่งและหน่วง 3 ระดับ คือ 50 100 และ 200 c/s^2 โดยทำการวัดสัญญาณแรงดันของเซอร์โวมอเตอร์ผ่าน Analog Monitor Output ผลที่ได้ดังแสดงในรูปที่ 24 โดยผลความชันของกราฟมากส่งผลให้เซอร์โวมอเตอร์เคลื่อนที่ได้เร็วกว่าความชันของกราฟน้อย ค่า LI_acc และ LI_dec เหมาะสมอยู่ที่ 50 c/s^2 ถ้าปรับต่ำกว่านี้ส่งผลให้เซอร์โวมอเตอร์มีการสั่นขณะเคลื่อนที่ สำหรับการปรับอัตราเร่งและหน่วงที่สูงกว่า 100 c/s^2 ค่าความชันของกราฟจะไม่แตกต่างกันมากนัก



ก) 50 c/s^2 ข) 100 c/s^2 ค) 200 c/s^2

รูปที่ 24 ผลตอบสนองอัตราเร่งและหน่วง

ทดลองเปลี่ยนอุปกรณ์ที่ใช้ในการร่างภาพ โดยทำการทดลองเปลี่ยนอุปกรณ์ 4 ชนิด ได้แก่ ปากกาลูกลื่นขนาดหัว 0.5 mm ดินสอ 2B ปากกาตัดเส้น ปากกาเมจิก ดังแสดงในรูปที่ 25

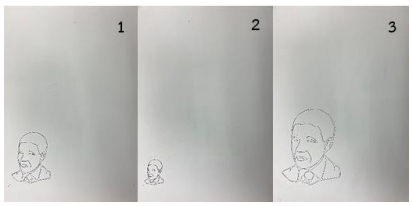
รูปที่ 25 อุปกรณ์ที่ใช้ในการร่างภาพ

ก) ลูกลื่น ข) ดินสอ ค) ตัดเส้น ง) เมจิก

รูปที่ 26 ภาพร่างเมื่อเปลี่ยนอุปกรณ์ที่ใช้วาด

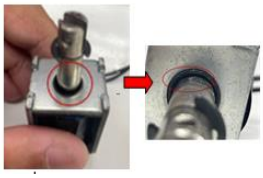
กำหนดค่าพารามิเตอร์ดังนี้ Ki มีค่า 800 Hz Ti มีค่า 1,600ms กำหนด LI_speed x_speed และ y_speed เท่ากับ 60,000 45,000 และ 60,000 c/s ตามลำดับ สำหรับ LI_acc และ LI_dec มีค่า 50 c/s^2 ทดลองร่างภาพต้นแบบในรูปที่ 21 ผลที่ได้ภาพที่ร่างด้วยปากกาลูกลื่น ดินสอ และปากกาเมจิก ภาพที่ร่างมีรายละเอียดที่ครบถ้วนสมบูรณ์ดังแสดงผลในรูปที่ 26 แต่ภาพที่ได้จากปากกาตัดเส้นจะมีเส้นที่ไม่ครบถ้วนตามภาพต้นแบบ สาเหตุเนื่องมาจากขณะที่โซลินอย์ไฟฟ้าไม่ทำงานปากกาจะถูกปล่อยลงมา ซึ่งจะไม่สามารถควบคุมแรงกดได้จึงทำให้หัวปากกาเกิดการบิดเบี้ยวส่งผลต่อภาพที่ได้ออกมาไม่สมบูรณ์ สรุปได้ว่าอุปกรณ์ที่ใช้ร่างภาพหัวปากกาต้องมีความแข็งแรงเพียงพอ เนื่องจากโซลินอยด์ไฟฟ้าไม่สามารถควบคุมแรงกดขณะไม่ทำงานได้

ทดลองปรับลดสัดส่วนของภาพที่ร่างจากแขนกลคาร์ทีเซียน โดยโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นมาสามารถขยายหรือลดภาพที่ร่างได้โดยปรับค่า GX และ GY ใส่ค่าจำนวนเต็มให้เท่ากัน รูปที่ 27 แสดงผลของการร่างภาพเมื่อปรับค่า GX และ GY มีค่าเป็น 4 1 และ 16 เรียงจากหมายเลข 1-3 ตามลำดับ



รูปที่ 27 ปรับขนาดของภาพร่างจากรูปต้นแบบ

เพื่อที่จะลดต้นทุนโดยการใช้โซลินอย์ไฟฟ้าแทนเซอร์โวมอเตอร์ทำงานในแนวแกน z เนื่องจากแกนของโซลินอยด์ไฟฟ้ามีการให้ตัวดังแสดงในรูปที่ 28 ปัญหาที่เกิดขึ้นคือการเขียนวงกลมหรือเส้นโค้งมากๆ จะมีลักษณะผิดเพี้ยนจากรูปต้นแบบ โดยถ้ามีการลากเป็นเส้นโค้งหรือวงกลมต่อเนื่องโดยไม่มีการยกปากกา เส้นที่จะมาบรรจบกับจุดแรกจะไม่ถึงกัน ผลที่กล่าวมานี้ดังแสดงในรูปที่ 29



รูปที่ 28 การให้ตัวของแกนโซลินอยด์ไฟฟ้า

ก) รูปต้นแบบ ข) ภาพที่ร่างจากแขนกล

รูปที่ 29 ภาพร่างที่เกิดจากแขนกลคาร์ทีเซียลโดยใช้รูปต้นแบบประกอบไปด้วยวงกลม

5. สรุป

การประยุกต์แขนกลคาร์ทีเซียนสำหรับร่างภาพ 2 มิติ จากรูปต้นแบบ โครงสร้างแบบคาร์ทีเซียนจะเคลื่อนที่แบบเชิงเส้นทำให้การออกแบบระบบควบคุมทำได้ง่าย การเคลื่อนที่แนวแกน x และ y ควบคุมการเคลื่อนด้วยเซอร์โวมอเตอร์ สำหรับเซอร์โวมอเตอร์ต้องใช้งานคู่กับชุดขับทำให้มีต้นทุนที่สูง เมื่อพิจารณาการเคลื่อนที่แนวแกน z พบว่าทำหน้าที่ยกปากกาหรือปล่อยปากกาเท่านั้น ดังนั้นงานวิจัยนี้เปลี่ยนเป็นใช้โซลินอยด์ไฟฟ้าแทนเซอร์โวมอเตอร์สำหรับการเคลื่อนที่ในแนวแกน z เนื่องจากมีค่าใช้จ่ายต่ำกว่ามาก การเคลื่อนที่ของแขนกลใช้พีแอลซีเป็นตัวควบคุมโดยคำสั่งหรือโปรแกรมสั่งงานพีแอลซีใช้ภาษา LD ร่วมกับภาษา ST พิกัดหรือตำแหน่งที่กำหนดให้แขนกลเคลื่อนที่ใช้โปรแกรม All To G-Code Converter แปลงเส้นขอบของรูปต้นแบบชนิดขาวดำให้เป็นพิกัด 3 มิติ ตำแหน่งหรือพิกัดที่ได้ไม่สามารถนำไปเก็บในหน่วยความจำพีแอลซีได้โดยตรง

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาโปรแกรมบน MATLAB สำหรับแปลงไฟล์ที่ได้จากโปรแกรม All To G-Code Converter ให้ได้ตำแหน่ง x y และ z แบบจำนวนเต็มชนิด 5 คอลัมน์ และสามารถขยายหรือย่อภาพร่างได้ การควบคุมแบบป้อนกลับของเซอร์โวมอเตอร์เป็นชนิด PI โดยได้ปรับค่า Kp และ Ti ที่เหมาะสมมีค่าอยู่ที่ 800 Hz และ 1,600ms ตามลำดับ สำหรับการตั้งค่าความเร็วของมอเตอร์แกน x และ y ต้องสอดคล้องกับสัดส่วนของรูปต้นแบบซึ่งจะทำให้เวลาที่ใช้ในการร่างภาพสั้น

ผลการทดลองให้แขนกลร่างภาพจากรูปต้นแบบแขนกลสามารถร่างภาพได้สมบูรณ์ โดยข้อจำกัดคือการเขียนวงกลมหรือเส้นโค้งมากๆ จะมีลักษณะผิดเพี้ยนจากรูปต้นแบบ โดยถ้ามีการลากเป็นเส้นโค้งหรือวงกลมต่อเนื่องโดยไม่มีการยกปากกา เส้นที่จะมาบรรจบกับจุดแรกจะไม่ถึงกัน เนื่องจากแกนของโซลินอยด์ไฟฟ้ามีการให้ตัว สำหรับอุปกรณ์ในการร่างภาพต้องใช้อุปกรณ์ที่มีหัวปากกาที่แข็งแรงพอสมควร เช่น ปากกาเมจิก เป็นต้น เพราะอุปกรณ์ร่างภาพได้ถูกติดตั้งไว้กับแกนโซลินอย์ไฟฟ้าจึงไม่สามารถปรับแรงกดลงบนกระดาษได้

6. กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ ศรีราชา มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตศรีราชา

7. เอกสารอ้างอิง

[1] Shrivakshan G.T. A Comparison of various Edge Detection Techniques used in Image Processing. Int. Journal of Com-puter Science. Sep 2012;9(5):269-76.

[2] Yakovlev S.G. Software development for 3d visualization of g-code when working with CNC machines. Journal of Physics: Conf. Series. 2020:1-6.

[3] Munna M.S, Tarafder B.K, Robbani Md.G, Mallick T.C. Design and implementa-tion of a drawbot using MATLAB and ardiuno mega. Int. Conf. on Electrical, Computer and Communication Engineering. 2017: 769-73.

[4] Baid P, Kumar M.V. A 3 – DOF robot arm for drawing application. Int. Journal of Engineering Research & Technology. 2016;4(26):1-4.

[5] Calinon S, Epiney J, Billard A. A humanoid robot drawing human portraits. Inter. Conf. on Humanoid Robots. 2005: 1-6.

[6] Tresset P, Leymarie F.F. Portrait drawing by paul the robot. Article in Computers & Graphics. Aug. 2013;1-33.

[7] Pichkalev M, Lavrenov R, Safin R, Hsia K.H. Face drawing by KUKA 6 axis robot manipulator. Developments in eSystems Engineering. 2019:709-714.

[8] Rata M, Rata G. Application with a XY-plotter controlled by PLC used in student laboratory works. Inter. Sym. on Advanced Topics in Electrical Engineering. 2015:1-4.

[9] Mishra S.K, Jha S, Sri R.G, Yashaswini N. Arduino based computer numerical control plotter. Inter. Res. Journal of Engineering and Technology. June 2021;8(6):2413-16.

[10] Saha J, Niphadkar T, Majumdar Arpan. Drawbot: A mobile robot for image scanning and scaled printing. Inter. Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research. 2016;5(2):124-28.

[11] Xu S., Anwer N., Lavernhe S. Conversion of G-code programs for milling into STEP-NC. Proc. of Joint Conference on Mechanical, Design Engineering. 2014:1-7.

การประยุกต์ใช้ไคโตซานบีดเป็นวัสดุดูดซับทางชีวภาพ สำหรับกำจัดโครเมียมเฮกซะวาเลนท์จากสารละลาย

รัตนาภร ยวงสวัสดิ์[1*], จิระพัฒน์ เจริญวงศ์จงดี[1] และเบญจรงค์ อภิรักษ์ทรัพย์[1]

ratanaporn.y@mail.rmutk.ac.th[1*], oilweihei123@hotmail.com[1], a.benjarong@hotmail.com[1]

Received	: 25-Mar-2022
Revised	: 23-Nov-2022
Accepted	: 2-Dec-2022

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนท์จากน้ำเสียสังเคราะห์ โดยใช้ไคโตซานเชื่อมขวางด้วยโซเดียมไตรพอลิฟอสเฟตและขึ้นรูปเป็นเม็ดบีดเป็นวัสดุดูดซับ ทดสอบความสามารถในการดูดซับโดยใช้การทดลองแบบกะ ศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อการดูดซับ ได้แก่ pH ของสารละลาย ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโครเมียม อุณหภูมิในการดูดซับ และปริมาณวัสดุดูดซับ จากผลการทดสอบพบว่าร้อยละการดูดซับโครเมียมเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วใน 20 นาทีแรก และการดูดซับเข้าสู่สมดุลภายในเวลา 90 นาที pH ของสารละลายโครเมียมมีผลต่อประสิทธิภาพการดูดซับอย่างชัดเจน โดยการดูดซับเกิดขึ้นได้ดีในภาวะที่เป็นกรด ภาวะที่เหมาะสมในการดูดซับ คือ pH เท่ากับ 2 ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโครเมียม เท่ากับ 2 mg/L ปริมาณบีดไคโตซานเท่ากับ 2 g ได้ร้อยละการดูดซับโครเมียมเท่ากับ 92 ซึ่งมีค่าสูงกว่าการใช้ไคโตซานแบบผงเป็นวัสดุดูดซับที่มีค่าร้อยละการดูดซับเท่ากับ 86 จากการศึกษาไอโซเทอมการดูดซับพบว่าการดูดซับสอดคล้องกับแบบจำลองของแลงเมียร์และจลนพลศาสตร์การดูดซับเป็นแบบอันดับสองเทียม แสดงให้เห็นว่าการดูดซับโครเมียมเฮกซะวาเลนท์บนบีดไคโตซานเป็นการดูดซับทางเคมีและเกิดขึ้นแบบชั้นเดียว จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าบีดไคโตซานเป็นวัสดุดูดซับที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดโครเมียมเฮกซะวาเลนท์และแยกออกจากสารละลายได้ง่าย

คำสำคัญ: โครเมียมเฮกซะวาเลนท์ บีดไคโตซาน การดูดซับ ไอโซเทอมการดูดซับ จลนพลศาสตร์การดูดซับ

Application of Chitosan Beads as the Bio-Adsorbent for Hexavalent Chromium Removal from Aqueous Solutions

Ratanaporn Yuangsawad[1*], Jirapat Jaremvongjongdee[1] and Benjarong Apiraksap[1]

ratanaporn.y@mail.rmutk.ac.th[1*], oilweihei123@hotmail.com[1], a.benjarong@hotmail.com[1]

Received	: 25-Mar-2022
Revised	: 23-Nov-2022
Accepted	: 2-Dec-2022

[1] Division of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep

Abstract

The adsorption of chromium hexavalent (Cr^{6+}) from synthetic wastewater using sodium tripolyphosphate - crosslinked chitosan beads was investigated. The adsorption of Cr^{6+} on chitosan beads was carried out in a batch experiment. The effect of parameters on the Cr^{6+} removal such as pH, initial Cr^{6+} concentration, adsorption temperature and adsorbent dosage were studied. The results showed that the removal of Cr^{6+} increased continuously in the first 20 min of adsorption and reached the equilibrium within 90 min. The Cr^{6+} removal was strongly affected by pH and the adsorption was favored in acidic solutions. The highest Cr^{6+} removal was obtained at the pH value of 2.0, initial Cr^{6+} concentration of 2 mg/L and chitosan beads dosage of 2 g. The adsorption efficiency of Cr^{6+} was 92 and 86% for chitosan beads and chitosan powder, respectively. Additionally, the adsorption isotherms and kinetics of Cr^{6+} adsorption on chitosan beads were studied. The adsorption isotherm and kinetics data were well fitted to Langmuir model and pseudo second-order model, indicating that the adsorption of Cr^{6+} on chitosan beads is a single layer chemisorption. This study showed that chitosan beads could be considered as an efficient bio-adsorbent for Cr^{6+} removal and easily separated from aqueous solutions.

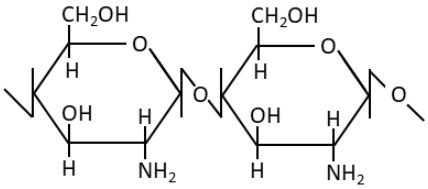
Keywords: hexavalent chromium, chitosan beads, adsorption, adsorption isotherm, adsorption kinetic

1. บทนำ

ปัญหามลภาวะทางน้ำที่เกิดจากการระบายน้ำเสียที่ไม่ผ่านมาตรฐานจากโรงงานอุตสาหกรรมหรือครัวเรือนลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติยังคงเกิดขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยน้ำเสียเหล่านี้นอกจากประกอบด้วยอนุภาคของแข็งและอุณหภูมิที่สูงกว่าปกติแล้ว ยังประกอบด้วยสารอินทรีย์ เช่น ไขมัน โปรตีน และสารอนินทรีย์ เช่น คลอไรด์ ฟอสฟอรัส ซัลเฟอร์ ส่งผลให้ค่า COD และ BOD สูงกว่ามาตรฐาน [1] จึงเกิดปัญหาแหล่งน้ำเน่าเสีย สิ่งมีชีวิตในน้ำไม่สามารถอาศัยอยู่ได้ตามมา นอกจากนี้ยังพบโลหะหนัก เช่น โครเมียม นิเกิล แคดเมียม ตะกั่วฯลฯ โลหะหนักเหล่านี้เป็นสารพิษที่สามารถสะสมในร่างกายและส่งผลต่อสุขภาพในระยะยาว โดยเฉพาะโครเมียมเฮกซะวาเลนท์ (Cr^{6+}) ที่ถูกใช้เป็นสารตั้งต้นในหลายอุตสาหกรรม เช่น การฟอกหนัง สิ่งทอ และการชุบโลหะ เป็นต้น [2] ถูกกำหนดไว้ว่าห้ามระบายออกจากโรงงานหากความเข้มข้นสูงกว่า 0.25 mg/L ตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ดังนั้นจึงจำเป็นต้องผ่านกระบวนการบำบัดเพื่อลดปริมาณให้อยู่ภายใต้กฎหมายกำหนด

วิธีการกำจัด Cr^{6+} ในน้ำเสีย ได้แก่ การตกตะกอนทางเคมี (Chemical precipitation) การตกตะกอนด้วยไฟฟ้า (Electrocoagulation) การออสโมซิสผันกลับ (Reverse osmosis) และ การดูดซับ (Adsorption) เป็นต้น [3-5] ในวิธีการต่างๆ ข้างต้น การดูดซับเป็นวิธีการที่ถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวาง เนื่องจากไม่ต้องกำจัดสารเคมีที่ใช้ วิธีการไม่ซับซ้อน ต้นทุนในการดำเนินการต่ำและวัสดุดูดซับมีให้เลือกใช้ได้หลากหลายขึ้นกับสารที่ต้องการดูดซับ โดยมีงานวิจัยที่ได้ศึกษาการนำวัสดุต้นทุนต่ำจากธรรมชาติหรือวัสดุเหลือทิ้ง ใช้เป็นวัสดุดูดซับ Cr^{6+} เช่น ขี้เลื่อย แร่ดินเหนียว เนื้อในเมล็ดและกะลาปาล์ม เป็นต้น [6-8] โดยการนำวัสดุเหลือทิ้งเหล่านี้มาใช้ต้องมีการปรับสภาพโดยการใช้สารเคมีหรือความร้อนทำให้ต้นทุนในการบำบัดสูงขึ้น

ไคโตซาน (Chitosan) คือ พอลิเมอร์ชีวภาพ (Biopolymer) เกิดจากการกำจัดหมู่อะซิติลของไคติน (Deacetylation) ที่พบในเปลือกหรือกระดองของสัตว์ เช่น กุ้ง ปู เป็นต้น [5] โครงสร้างโมเลกุลประกอบด้วยหน่วย Glucosamine มีหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) และหมู่อะมิโน ($-NH_2$) ในโครงสร้าง ดังแสดงในรูปที่ 1 โดยหมู่ฟังก์ชันเหล่านี้มีความสามารถในการจับกับไอออนของโลหะ [5,9-10]



รูปที่ 1 โครงสร้างโมเลกุลของไคโตซาน

ไคโตซานเป็นวัสดุชีวภาพทำให้สามารถย่อยสลายได้ง่าย จึงไม่ตกค้างในสิ่งแวดล้อมและไม่เป็นอันตรายต่อมนุษย์ แต่เนื่องจากไคโตซานสามารถพองตัวในน้ำและละลายในกรดบางชนิดจึงต้องมีการดัดแปรเพื่อปรับปรุงคุณสมบัติของไคโตซาน เช่น การเคลือบหรือการตรึงบนวัสดุอื่น [11-12]

เนื่องจากไคโตซานเสียสภาพได้ง่ายในน้ำและสารละลายที่มีความเป็นกรดดังที่ได้กล่าวข้างต้น ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงดัดแปรไคโตซานโดยการเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลและขึ้นรูปให้อยู่ในรูปเม็ดบีดซึ่งมีความคงทนเพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับ Cr^{6+} ศึกษาอิทธิพลของตัวแปรต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ ได้แก่ ความเข้มข้นเริ่มต้นของ Cr^{6+} pH ของสารละลาย อุณหภูมิในการดูดซับ และปริมาณวัสดุดูดซับ ศึกษาไอโซเทอมและจลนพลศาสตร์ของการดูดซับ เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาวัสดุดูดซับทางชีวภาพที่มีประสิทธิภาพในการดูดซับและเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมต่อไป

2. ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

2.1 การเตรียมวัสดุดูดซับ

สังเคราะห์วัสดุดูดซับบีดไคโตซานดังวิธีที่รายงานไว้ในงานวิจัยก่อนหน้า [13] โดยเตรียม ไคโตซานในกรดแอซิติกความเข้มข้น 2%v/v และหยดลงในสารละลาย Sodium tripolyphosphate ความเข้มข้น 10%w/v โดยใช้ Syringe pump ปั่นกวนตลอดเวลาเป็นเวลา 12 ชั่วโมง เพื่อขึ้นรูปเป็นเม็ดบีด ดังรูปที่ 2 จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นและซับให้แห้ง

รูปที่ 2 การขึ้นรูปบีดไคโตซาน

2.2 การดูดซับแบบกะ

เตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่ใช้ในการทดสอบจาก Potassium dichromate ($K_2Cr_2O_7$, Ajax Finechem 99-101%) ให้ได้ความเข้มข้นของโครเมียมตามที่กำหนด ชั่งวัสดุดูดซับในรูปบีดที่ได้จากข้อ 2.1 ใส่ใน บีกเกอร์ที่มีสารละลายโครเมียม 500 mL พร้อมกวนสารละลายตลอดเวลา เก็บตัวอย่างสารละลายตามเวลาครั้งละ 1 mL หาความเข้นข้นของ Cr^{6+} โดยวิธีการสร้างสีและวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วย UV-Vis spectro- photometer (Helios Zeta, Thermo Fisher Scientific) ที่ความยาวคลื่น 540 nm [13] จนกระทั่งความเข้มข้นของ Cr^{6+} คงที่ ทำการทดลองซ้ำโดยให้ความเข้มข้นเริ่มต้น ของ Cr^{6+} เป็น 2, 4, 6 และ 8 mg/L pH ของสารละลายเป็น 1, 2, 5, 7 และ 10 อุณหภูมิในการดูดซับเป็น 25, 30, 40 และ 50 °C ปริมาณบีดไคโตซานเป็น 0.5, 1 และ 2 g คำนวณหาร้อยละการดูดซับ (%Adsorption) และปริมาณ Cr^{6+} ที่ถูกดูดซับ ดังสมการที่ (1) - (2)

$$\%Adsorption = \frac{(C_0 - C_t)}{C_0} \times 100 \qquad (1)$$

$$q_t = \frac{(C_0 - C_t) \times V}{W} \qquad (2)$$

โดย C_0 และ C_t คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นและความเข้มข้นที่เวลาใดๆ (mg/L) ตามลำดับ q_t คือ ปริมาณ Cr^{6+} ที่ถูกดูดซับที่เวลาใดๆ (mg/g) V คือ ปริมาตรสารละลาย (L) และ W คือ น้ำหนักบีดไคโตซาน (g)

2.3 ไอโซเทอมการดูดซับ

ศึกษาไอโซเทอมการดูดซับที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโครเมียมเท่ากับ 2, 4, 6 และ 8 mg/L และปริมาณวัสดุดูดซับเท่ากับ 0.5, 1 และ 2 g โดยแบบจำลองการดูดซับที่ใช้อธิบายพฤติกรรมในการดูดซับ Cr^{6+} บนเม็ดบีดไคโตซานคือแบบจำลองของแลงเมียร์และฟรุนดิช [8] ดังสมการที่ (3) และ (4)

Langmuir isotherm: $$q_e = \frac{K_L q_m C_e}{1 + K_L C_e} \qquad (3)$$

Freundlich isotherm: $$q_e = K_F C_e^{1/n} \qquad (4)$$

โดย q_e และ q_m คือปริมาณการดูดซับที่สมดุลและปริมาณการดูดซับสูงสุด (mg/g) K_L และ K_F คือ ค่าคงที่แลงเมียร์และฟรุนดิช C_e คือ ความเข้มข้นที่สมดุล (mg/L) และ n คือ แฟคเตอร์ของสมการฟรุนดิช

2.4 จลนพลศาสตร์การดูดซับ

การศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับ Cr^{6+} บนบีดไคโตซาน ใช้แบบสมการอันดับหนึ่งเทียม (Pseudo-first order) และสมการอันดับสองเทียม (Pseudo-second order) [9] ดังสมการที่ (5) และ (6)

Pseudo-first order: $$\frac{dq_t}{dt} = k_1(q_e - q_t) \qquad (5)$$

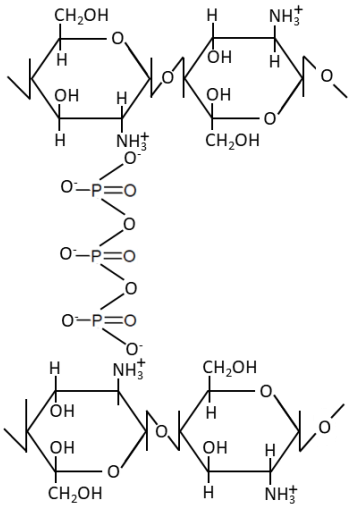
Pseudo-second order: $$\frac{dq_t}{dt} = k_2(q_e - q_t)^2 \qquad (6)$$

โดย k_1 คือ ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับหนึ่งเทียม (min^{-1}) k_2 คือ ค่าคงที่อัตราเร็วปฏิกิริยาอันดับสองเทียม (g/mg·min) และ t คือ เวลาในการดูดซับ (min)

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

วัสดุดูดซับที่สังเคราะห์ได้มีรูปร่างคล้ายบีดทรงกลม ขุ่น มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 2.5 mmดังแสดงในรูปที่ 3 เกิดจากการเชื่อมขวางของโมเลกุลไคโตซานโดยหมู่ฟอสเฟต (PO_4^{3-}) [13,14] ดังรูปที่ 4

รูปที่ 3 บีดไคโตซาน



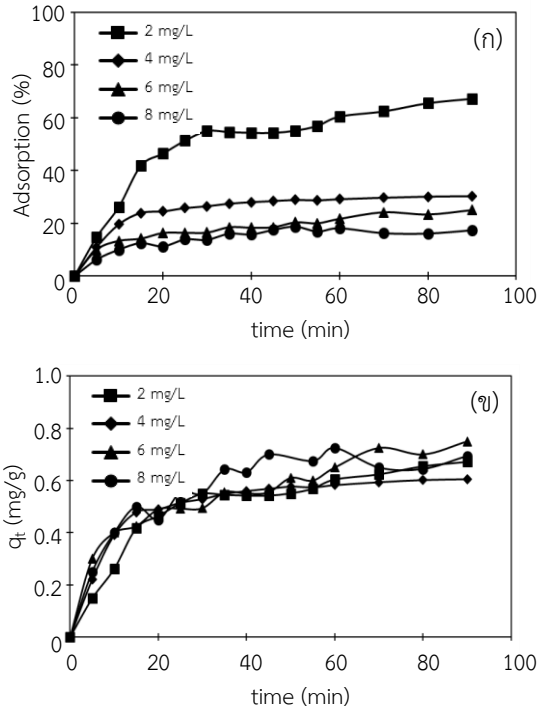
รูปที่ 4 การเชื่อมขวางระหว่างโมเลกุลของไคโตซาน

บีดไคโตซานถูกใช้เป็นวัสดุดูดซับในการทดสอบการดูดซับ Cr^{6+} โดยได้ผลการทดสอบดังนี้

3.1 ผลของตัวแปรต่อการดูดซับ Cr^{6+} บนบีดไคโตซาน

3.1.1 ความเข้มข้น Cr^{6+} เริ่มต้น

รูปที่ 5 แสดงร้อยละและปริมาณการดูดซับ Cr^{6+} เมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลาย Cr^{6+} มีค่าตั้งแต่ 2 – 8 mg/L พบว่าการดูดซับเพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนภายใน 20 นาทีแรกของการดูดซับ เมื่อเวลาผ่านไป 20 นาที การดูดซับจะเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย สำหรับความเข้มข้น 4 – 8 mg/L การดูดซับเข้าสู่สมดุลที่เวลาประมาณ 60 นาที และเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นมีค่าน้อย (2 mg/L) การดูดซับเข้าสู่สมดุลใช้เวลาประมาณ 90 นาที ซึ่งช้ากว่าที่ความเข้มข้นสูง เนื่องจากความแตกต่างระหว่างปริมาณ Cr^{6+} ที่อยู่ในสารละลายและที่พื้นผิวบีดไคโตซานต่ำส่งผลให้อัตราการเคลื่อนที่ของ Cr^{6+} ช้าลง นอกจากนี้จากผลการทดลองพบว่าร้อยละการดูดซับเพิ่มขึ้นเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของ Cr^{6+} ลดลง เนื่องจากเมื่อปริมาณบีดไคโตซานคงที่ ที่ความเข้มข้นต่ำๆ อัตราส่วนระหว่างตัวถูกดูดซับต่อตำแหน่งว่างมีค่าน้อย ทำให้ Cr^{6+} ดูดซับบนบีดไคโตซานได้ง่าย ประสิทธิภาพในการดูดซับจึงมากกว่าที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของ Cr^{6+} มีค่าสูง [15]

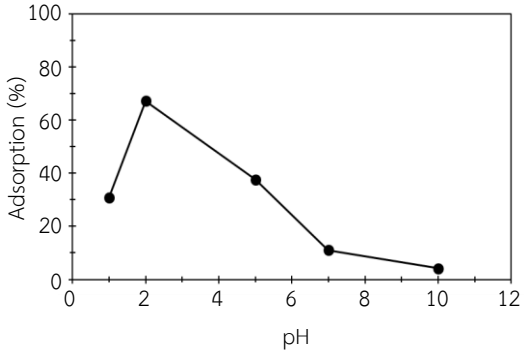


รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่าง (ก) ร้อยละการดูดซับ Cr^{6+} (ข) ปริมาณการดูดซับ Cr^{6+} กับเวลาที่ความเข้มข้นเริ่มต้น (C_0) ต่างๆ ($W = 1$ g, $T = 25$ °C)

3.1.2 pH ของสารละลาย

ศึกษาผลของ pH ของสารละลายต่อร้อยละการดูดซับ Cr^{6+} ของบีดไคโตซานโดยการปรับ pH ของสารละลายด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกในช่วงกรดและสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ในช่วงเบส ผลการทดลองในรูปที่ 6 แสดงให้เห็นว่า pH ของสารละลายส่งผลต่อร้อยละการดูดซับ Cr^{6+} บนบีดไคโตซานอย่างเห็นได้ชัด โดยการดูดซับเกิดขึ้นได้ดีในช่วงที่ pH ของสารละลายต่ำกว่า 3 และมีค่าการดูดซับสูงสุดเท่ากับ 67% ที่ pH = 2 และเมื่อ pH

เพิ่มขึ้นการดูดซับของ Cr^{6+} บนบีดไคโตซานจะลดลง โดยค่าการดูดซับลดลงเหลือ 4.15% เมื่อ pH เท่ากับ 10 เนื่องจากในภาวะที่เป็นกรด Cr^{6+} จะอยู่ในรูปของ $HCrO_4^-$ และ $Cr_2O_7^{2-}$ จึงสามารถดูดซับได้ดีเนื่องจากแรงดึงดูดทางไฟฟ้าระหว่างประจุลบ และประจุบวกบนพื้นผิวบีดไคโตซาน (-OH_2^+, -NH_3^+) [5,11-12] และในภาวะที่สารละลายเป็นเบสจะมีแนวโน้มในการเกิดขึ้นของ CrO_4^{2-} ซึ่งดูดซับได้น้อยบนไคโตซาน ความสามารถในการดูดซับจึงลดต่ำลงเมื่อ pH เพิ่มขึ้น [3,10] ดังนั้นจึงเลือกภาวะที่สารละลายมี pH เท่ากับ 2 ในการศึกษาขั้นต่อไป



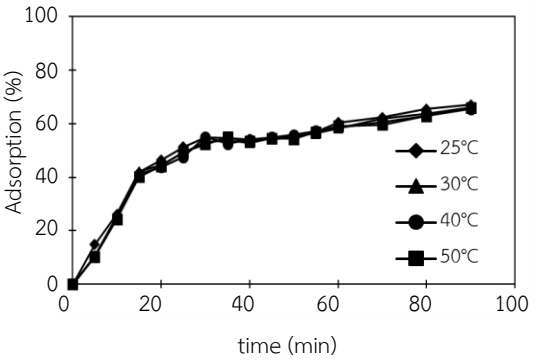
รูปที่ 6 การดูดซับ Cr^{6+} ที่ pH ต่างๆ
(C_0 = 2 mg/L, W = 1 g, T = 25 °C)

3.1.3 อุณหภูมิในการดูดซับ

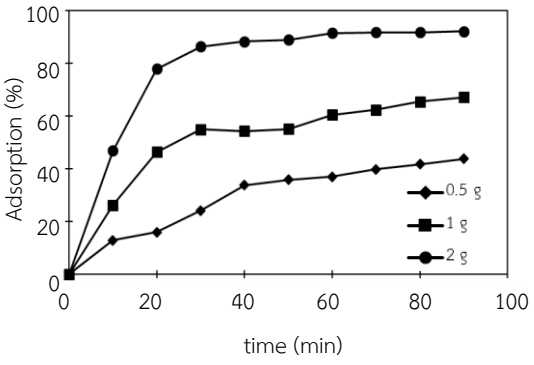
น้ำเสียที่ออกจากโรงงานอุตสาหกรรมและชุมชนโดยทั่วไปจะมีอุณหภูมิสูงกว่าน้ำปกติ [1] ซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการดูดซับของวัสดุดูดซับ ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงได้ทดสอบประสิทธิภาพในการดูดซับ Cr^{6+}ในช่วงอุณหภูมิ 25 - 50 °C พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 67% เป็น 69% เมื่ออุณภูมิเพิ่มขึ้นจาก 25 °C เป็น 50 °C ดังรูปที่ 7 โดยอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อพลังงานจลน์ทำให้โมเลกุลสามารถเคลื่อนที่ได้ดีขึ้น อย่างไรก็ตามในช่วงอุณหภูมิที่ทำการทดลองนี้การเปลี่ยนแปลงประสิทธิภาพในการดูดซับไม่มีนัยสำคัญเมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ยังพบว่าบีดไคโตซานยังคงรักษาสภาพและความสามารถในการดูดซับแม้อุณหภูมิจะสูงขึ้นก็ตาม

3.1.4 ปริมาณวัสดุดูดซับ

การศึกษาผลของปริมาณบีดไคโตซานต่อประสิทธิภาพในการดูดซับ Cr^{6+} ที่ความเข้มข้นเริ่มต้นของ Cr^{6+} เท่ากับ 2 mg/L อุณหภูมิ 25°C และ pH เท่ากับ 2 พบว่าประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มขึ้นจาก 67% เป็น 92% เมื่อเพิ่มปริมาณบีดไคโตซานจาก 1 g เป็น 2 g ดังแสดงในรูปที่ 8 ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อปริมาณบีดไคโตซานเพิ่มขึ้นทำให้ตำแหน่งที่มีการแลกเปลี่ยนประจุระหว่างบีดไคโตซานกับ Cr^{6+} เพิ่มขึ้น จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพในการดูดซับเพิ่มสูงขึ้น [11]



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับ Cr^{6+} กับเวลา ที่อุณหภูมิต่างๆ
(C_0 = 2 mg/L, W = 1 g, pH = 2)



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับ Cr^{6+} กับเวลา ที่ปริมาณบีดไคโตซานต่างๆ
(C_0 = 2 mg/L, T = 25 °C, pH = 2)

3.2 ไอโซเทอมการดูดซับ

แบบจำลองการดูดซับของแลงเมียร์และ ฟรุนดิช เป็นแบบจำลองที่นิยมใช้ในการอธิบายพฤติกรรมการดูดซับที่สภาวะสมดุลที่อุณหภูมิคงที่ โดยสามารถเขียนสมการที่ (3) – (4) ในรูปของสมการเส้นตรง ดังสมการ (7) – (8) [8]

Langmuir isotherm:

$$\frac{C_e}{q_e} = \frac{1}{q_m K_L} + \frac{C_e}{q_m} \quad (7)$$

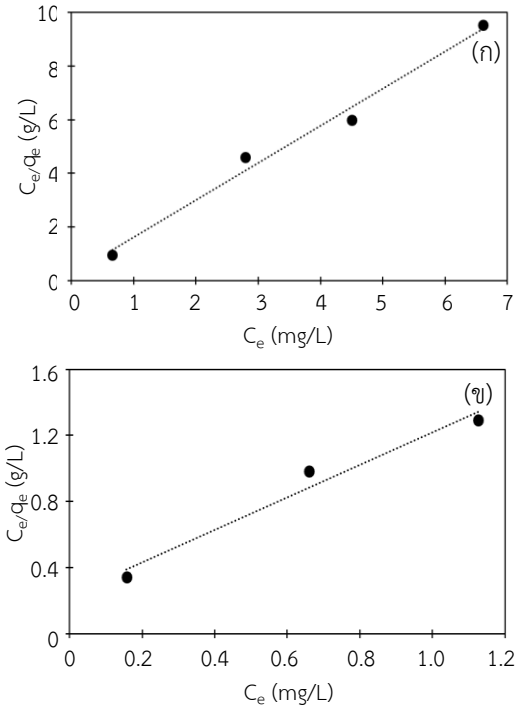
Freundlich isotherm:

$$log q_e = log K_F + \frac{1}{n} log C_e \quad (8)$$

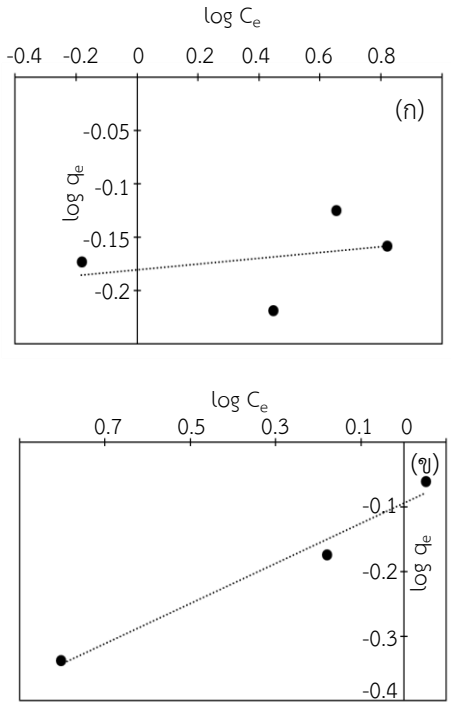
เขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง C_e กับ C_e/q_e ตามสมการที่ (7) และความสัมพันธ์ระหว่าง $log\ C_e$ กับ $log\ q_e$ ตามสมการที่ (8) โดยใช้ข้อมูลจากการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของ Cr^{6+} และปริมาณบีดไคโตซานได้ดังรูปที่ 9 และ 10 โดยพารามิเตอร์จากแบบจำลองทั้งสองแสดงดังตารางที่ 1 พิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่ได้ พบว่าในส่วนของการศึกษาผลของความเข้มข้นเริ่มต้นของ Cr^{6+} สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์จากแบบจำลองของแลงเมียร์สูงกว่าของฟรุนดิช ในขณะที่ผลของปริมาณบีดไคโตซานให้ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่ใกล้เคียงกัน แสดงว่าการดูดซับของ Cr^{6+} บนบีดไคโตซานเป็นการดูดซับแบบชั้นเดียว ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ใช้ไคโตซานเป็นวัสดุดูดซับโลหะหนัก [5,16]

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ของไอโซเทอมจากแบบจำลองแลงเมียร์และฟรุนดิช

Langmuir isotherm parameters			
	q_m (mg/g)	K_L (L/mg)	R^2
C_0 (mg/L)	0.72	6.03	0.9859
W (g)	1.01	4.22	0.9687
Freundlich isotherm parameters			
	n	K_f ((mg/g)(L/mg)$^{1/n}$)	R^2
C_0 (mg/L)	36.90	0.66	0.0937
W (g)	3.22	0.8056	0.9763



รูปที่ 9 ไอโซเทอมการดูดซับของแลงเมียร์
(ก) ความเข้มข้นเริ่มต้น (*W = 1 g, T=25 °C, pH = 2*)
(ข) ปริมาณบีดไคโตซาน (*C_0 = 2 mg/L, T = 25 °C, pH = 2*)



รูปที่ 10 ไอโซเทอมการดูดซับของฟรุนดิช
(ก) ความเข้มข้นเริ่มต้น (*W = 1 g, T=25 °C, pH = 2*)
(ข) ปริมาณบีดไคโตซาน (*C_0 = 2 mg/L, T = 25 °C, pH = 2*)

3.3 จลนพลศาสตร์การดูดซับ

อินทิเกรตสมการอันดับหนึ่งเทียมและอันดับสองเทียมจากสมการที่ (5) – (6) จะได้สมการเส้นตรง ดังสมการ (9) – (10)

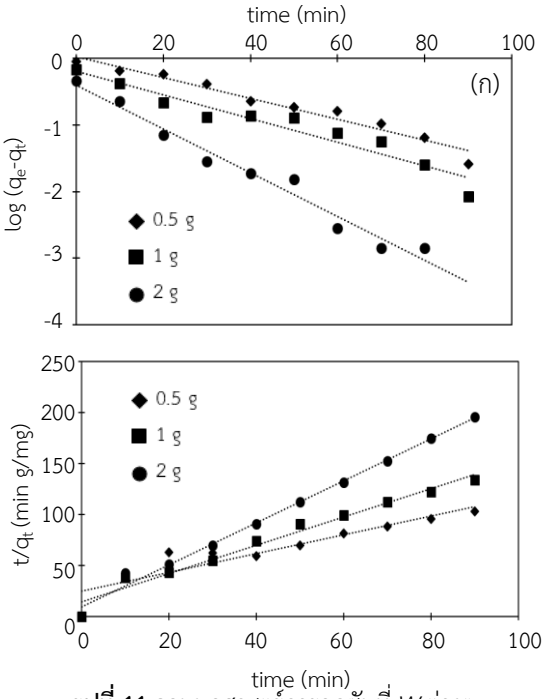
Pseudo first-order:

$$\log(q_e - q_t) = log\, q_e - \frac{k_1 t}{2.303} \qquad (9)$$

Pseudo second-order:

$$\frac{t}{q_t} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \qquad (10)$$

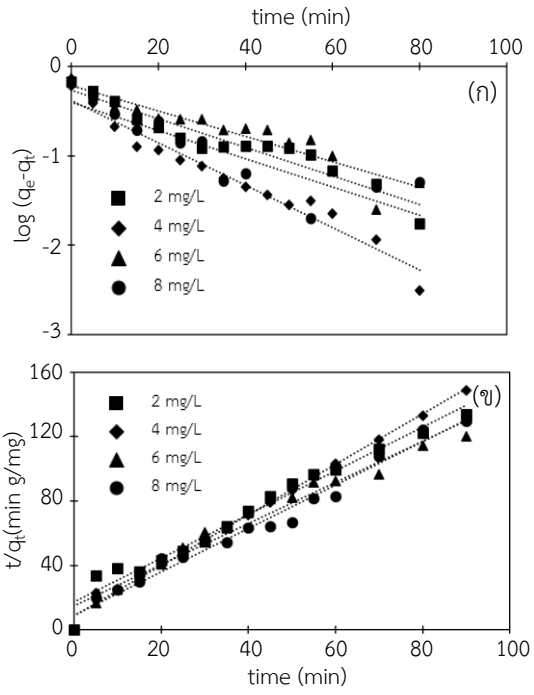
เมื่อเขียนกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่าง $log\,(q_e\text{-}q_t)$ กับ t และ t/q_t กับ t ดังรูปที่ 11 และ 12 สามารถหาปริมาณการดูดซับที่สมดุล (q_e) และ ค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งและอันดับสองเทียมได้ (k_1, k_2) ได้ ดังแสดงในตารางที่ 2 โดยข้อมูลที่ได้จากแบบจำลองจลนพลศาสตร์พบว่าปริมาณการดูดซับที่สมดุลมีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณตัวดูดซับเพิ่มขึ้นและเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยเมื่อความเข้มข้นเริ่มต้นของสารละลายโครเมียมมีค่าต่างๆ ซึ่งสอดคล้องกับค่าที่ได้จากผลการทดลอง เมื่อเปรียบเทียบค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Pseudo second-order มีค่าใกล้เคียง 1 มากกว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของ Pseudo first-order และ ปริมาณการดูดซับที่สมดุลที่คำนวณได้จาก Pseudo second-order มีค่าใกล้เคียงกับปริมาณการดูดซับที่ได้จากการทดลองมากกว่า Pseudo first-order สำหรับการทดสอบทั้งกรณีที่ความเข้มข้นของ Cr^{6+} และปริมาณบีดไคโตซานมีค่าต่างๆ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้า [9,16] ข้อมูลในตารางที่ 2 แสดงให้เห็นว่า เมื่อความเข้มข้นของ Cr^{6+} มากกว่า 4 mg/L ค่าคงที่อัตราเร็วมีค่าลดลง เนื่องจากพื้นที่ผิวในการดูดซับมีจำกัด เมื่อพื้นที่ผิวถูกปกคลุมไปด้วย Cr^{6+} ที่ถูกดูดซับทำให้เมื่อความเข้มข้นของสารละลาย Cr^{6+} เพิ่มขึ้น การดูดซับของ Cr^{6+} จึงเกิดได้ช้าลง ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าการดูดซับ Cr^{6+} บนบีดไคโตซานเป็นการดูดซับทางเคมีเกิดขึ้นระหว่างไอออนของโครเมียมกับหมู่อะมิโนและหมู่ไฮดรอกซิลของไคโตซาน



รูปที่ 11 จลนพลศาสตร์การดูดซับที่ W ต่างๆ

(ก) Pseudo first-order (ข) Pseudo-second order

(C_0 = 2 mg/L, T = 25 °C, pH = 2)



รูปที่ 12 จลนพลศาสตร์การดูดซับที่ C_0 ต่างๆ

(ก) Pseudo first-order (ข) Pseudo-second order

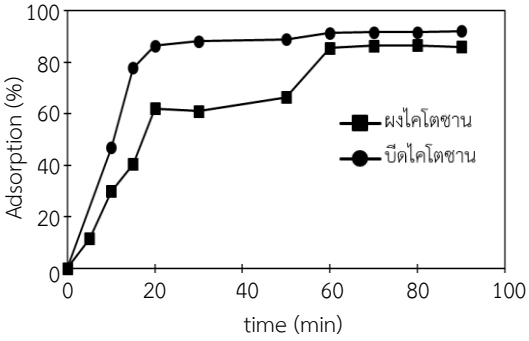
(W = 1 g, T = 25 °C, pH = 2)

ตารางที่ 2 ค่าคงที่จลนพลศาสตร์การดูดซับ

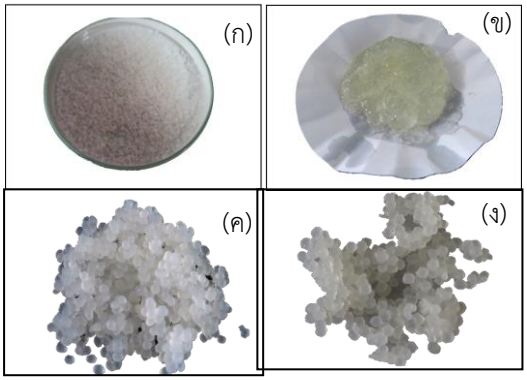
W (g)	q_e (mg/g) การทดลอง	Pseudo first-order			Pseudo second-order		
		k_1	q_e	R^2	k_2	q_e	R^2
0.5	0.90	0.036	0.964	0.9604	0.034	1.090	0.8582
1	0.67	0.041	0.960	0.9256	0.134	0.720	0.9746
2	0.46	0.076	0.927	0.9720	0.446	0.490	0.9926
C_0 (mg/L)	q_e (mg/g) การทดลอง	Pseudo first-order			Pseudo second-order		
		k_1	q_e	R^2	k_2	q_e	R^2
2	0.67	0.036	0.540	0.9150	0.108	0.740	0.9712
4	0.61	0.055	0.420	0.9585	0.282	0.640	0.9954
6	0.75	0.033	0.610	0.8629	0.109	0.780	0.9632
8	0.70	0.036	0.390	0.7540	0.197	0.740	0.9770

3.4 ประสิทธิภาพการดูดซับ Cr^{6+} ของวัสดุดูดซับในรูปแบบต่างๆ

เปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับ Cr^{6+} ของไคโตซานที่อยู่ในรูปผงและบีด ที่อุณหภูมิเท่ากับ 25 °C ความเข้มข้นเริ่มต้นของ Cr^{6+} เท่ากับ 2 mg/L ปริมาณวัสดุดูดซับเท่ากับ 2 g และ pH เท่ากับ 2 พบว่าไคโตซานแบบผงมีประสิทธิภาพในการดูดซับ Cr^{6+} ต่ำกว่าบีดไคโตซานเล็กน้อย ดังแสดงในรูปที่ 13 โดยมีประสิทธิภาพการดูดซับร้อยละ 86 ในขณะที่บีดไคโตซานมีประสิทธิภาพการดูดซับร้อยละ 92 ทำให้ได้ความเข้มข้นของสารละลาย Cr^{6+} เท่ากับ 0.16 mg/L ซึ่งอยู่ในระดับที่ต่ำกว่าค่าตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรม ประสิทธิภาพที่ลดลงของไคโตซานแบบผงนี้อาจมีผลมาจากการเสียสภาพของไคโตซานระหว่างการดูดซับเนื่องจากไคโตซานแบบผง (รูปที่ 14 (ก)) มีการพองตัวในน้ำและเปลี่ยนสภาพคล้ายเจล ดังแสดงในรูปที่ 14 (ข) ในขณะที่บีดไคโตซานยังคงรูปและสามารถแยกออกจากสารละลายภายหลังการดูดซับได้ง่าย ดังรูปที่ 14 (ค) - (ง)



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างร้อยละการดูดซับ Cr^{6+} กับเวลา เมื่อใช้วัสดุดูดซับในรูปแบบผงและบีด
(*W = 2 g, C_0 = 2 mg/L, T = 25 °C, pH = 2*)



รูปที่ 14 วัสดุดูดซับ (ก) ไคโตซานผงก่อนการดูดซับ (ข) ไคโตซานผงหลังการดูดซับ (ค) บีดไคโตซานก่อนการดูดซับ (ง) บีดไคโตซานหลังการดูดซับ
(*W = 2 g, C_0 = 2 mg/L, T = 25 °C, pH = 2*)

4. สรุปผลการวิจัย

ไคโตซานที่เตรียมขึ้นโดยการใช้โซเดียมไตรพอลิฟอสเฟตเป็นสารเชื่อมขวางและขึ้นรูปเป็นเม็ดบีดมีความสามารถในการกำจัดโครเมียมในสารละลาย โดยการดูดซับเกิดขึ้นได้ดีในสารละลายที่เป็นกรด ภาวะที่เหมาะสมสำหรับการทดลองนี้ คือ pH เท่ากับ 2 ความเข้มข้นเริ่มต้นเท่ากับ 2 mg/L และ ปริมาณบีดไคโตซานเท่ากับ 2 g ได้ร้อยละการดูดซับเท่ากับ 92 ซึ่งสามารถลดปริมาณโครเมียมให้อยู่ในมาตรฐานตามประกาศกระทรวงอุตสาหกรรมและการใช้บีดไคโตซานยังทนต่อสภาวะที่สารละลายมีอุณหภูมิสูงได้ดีและสามารถแยกออกจากสารละลายภายหลังการดูดซับได้ง่าย การดูดซับโครเมียมบนบีดไคโตซานเป็นการดูดซับทางเคมีและดูดซับแบบชั้นเดียวสอดคล้องกับแบบจำลองของแลงเมียร์และจลนพลศาสตร์การดูดซับอันดับสองเทียม จากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าบีดไคโตซานเป็นวัสดุดูดซับทางธรรมชาติที่สามารถพัฒนาเพื่อให้มีประสิทธิภาพในการกำจัดโลหะหนักเพิ่มขึ้น ลดปัญหาสิ่งแวดล้อมและนำไปสู่การพัฒนาที่ยั่งยืนต่อไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ ในการสนับสนุนเครื่องมือในการทำวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Munter R. Industrial wastewater characteristics. Academia. [Internet]. 2003 [cited 2022 Sep 1];185-194. Available from: https://shorturl.asia/lRHd1

[2] Akpor OB, Ohiobor GO, Olaolu TD. Heavy metal pollutants in wastewater effluent: Sources, effects and remediation. Advances in bioscience and bioengineering. 2014;2(4):37-43.

[3] Peng H, Guo J. Removal of chromium from wastewater by membrane filtration, chemical precipitation, ion exchange, adsorption electro coagulation, electrochemical reduction, elec - trodialysis, electrodeionization, photocatalysis and nanotechnology: A review. Environmental chemistry letters. 2020;18:2055-68.

[4] Mnif A, Bejaoui I, Mouelhi M, Hamrouni B. Hexavalent chromium removal from model water and car shock absorber factory effluent by nanofiltration and reverse osmosis membrane. International journal of analytical chemistry. 2017;1-10.

[5] Jung C, Heo J, Han J, Her N, Lee SJ, Oh, J Ryu J. Hexavalent chromium removal by various adsorbents: powdered activated carbon, chitosan, and single/multi-walled carbon nanotubes. Separation and purification technology. 2013;106:63-71.

[6] Meez E, Rahdar A, Kyzas GZ. Sawdust for the removal of heavy metals from water: A review. Molecules. 2021;26(4318):1-21.

[7] Ajouyed O, Hurel C, Marmier N. Evaluation of the adsorption of hexavalent chromium on kaolinite and illite. Journal of environmental protection. 2011;2:1347-52.

[8] Mehr MR, Fekri MH, Omidali F, Eftekhari N, Akbari-adergani B. Removal of Chromium (VI) from wastewater by palm kernel shell-based on a green method. Journal of chemical health risks. 2019;9(1):75-86.

[9] Piyamongkala K, Sripakdee W. Kinetic and thermodynamic of chromium (VI) adsorption from electroplating wastewater by crosslinked chitosan resin. Research and development journal. 2009;20(3):87-98. (in Thai)

[10] Hua C, Zhang R, Bai F, Lu P, Liang X. Removal of chromium (VI) from aqueous solutions using quaternized chitosan microspheres. Chinese journal of chemical engineering. 2017;25:153-8.

[11] Siraj S, Islam MDM, Das PC, Masum SMD, Jahan IA, Shajahan MD. Removal of chromium from tannery effluent using chitosan-chacoal composite. Journal of Bangladesh chemical society, 2012; 25(1):53-61.

[12] Nomanbhay SM, Palanisamy K. Removal of heavy metal from industrial wastewater using chitosan coated oil palm, shell charcoal. Electronic Journal of Biotechnology. 2005;8(1):43-53.

[13] Yuangsawad R, Piyo S, Kasetniyom N. Chromium (VI) removal using crosslinked chitosan in fixed bed column. Journal of science and technology RMUTSB. 2021;5(1):11-22. (in Thai)

[14] Bhumkar DR, Pokharkar VB. Studies on effect of pH on cross-linking of chitosan with sodium tripolyphosphate: A technical note. AAPS PharmSciTech. 2006;7(2):E1-6.

[15] Gorzin F, Abadi BR. Adsorption of Cr(VI) from aqueous solution by adsorbent prepared from paper mill sludge: Kinetics and thermodynamics studies. Adsorption science & technology. 2018;36 (1-2):149-169.

[16] Aydin YA, Aksoy ND. Adsorption of chromium on chitosan: Optimization, kinetics and thermodynamics. Chemical engineering journal. 2009;151:188-94.

การศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนในช่วงฤดูร้อนของพื้นคอนกรีต และพื้นที่สีเขียวที่มีผลต่ออาคาร

อริสมันต์ แสงธงทอง[1*] และอติชาต อึ้งโฆษาชนะวานิช[1]

arissaman@rtaf.mi.th[1*], atichart_a@rtaf.mi.th[1]

Received	: 25-Mar-2022
Revised	: 14-Dec-2022
Accepted	: 16-Dec-2022

[1] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา กองวิศวกรรมไฟฟ้าและโยธา กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช เขตสายไหม กรุงเทพมหานคร 10220

บทคัดย่อ

บทความวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนในช่วงฤดูร้อนของพื้นคอนกรีตและพื้นที่สีเขียวที่มีผลต่ออาคาร โดยเก็บข้อมูลอุณหภูมิในแต่ละชั้นความหนาของพื้นผิวทั้ง 2 แบบ ที่ระดับความลึก -15.00 ซม., -7.50 ซม.และ 0.00 ซม.ตามลำดับ และอุณหภูมิแวดล้อม ซึ่งเก็บข้อมูลอุณหภูมิเมื่อครบ 1 นาที เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ต่อเนื่องกันเป็นเวลา 7 วัน ภายใต้เงื่อนไขสภาพพื้นที่แบบชานเมือง ไม่มีอาคารสูง อาคารมีขนาดไล่เลี่ยกัน พื้นผิวรอบอาคาร ร้อยละ 30 จากพื้นที่ทั้งหมดร้อยละ 100 โดยสภาพอากาศเป็นวันที่มีแดดออกจัด เพื่อต้องการนำข้อมูลอุณหภูมิที่เกิดขึ้นในระดับความลึกที่แตกต่างกันของพื้นผิวเดียวกันและที่พื้นผิวแตกต่างกันในระดับความลึกเดียวกันของช่วงเวลากลางวันและกลางคืน มาอธิบายการถ่ายเทความร้อนตามเงื่อนไขที่กำหนด โดยใช้สมการการแพร่วิเคราะห์อุณหภูมิที่เกิดขึ้นกับอาคาร จากการศึกษา พบว่า การถ่ายเทความร้อนในแนวดิ่งของพื้นที่ต่างชนิดกันส่งผลให้อุณหภูมิถ่ายเทไม่สมบูรณ์ เนื่องจากมีการสกัดกั้นการถ่ายเทความร้อนเข้าสู่พื้นชั้นถัดไปด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนในแนวราบที่เป็นพื้นชนิดเดียวกันทำได้ดีกว่าการส่งต่อเข้าสู่พื้นอาคาร ฉะนั้นพื้นอาคารที่ถูกรายล้อมด้วยพื้นที่สีเขียวจึงมีความร้อนสะสมน้อยกว่าพื้นอาคารที่ถูกรายล้อมด้วยพื้นคอนกรีตเป็นเหตุให้ในช่วงฤดูร้อนพื้นคอนกรีตบริเวณโดยรอบอาคารสะสมความร้อนให้กับพื้นอาคารสูงกว่าพื้นที่สีเขียว ทั้งในช่วงเวลากลางวันและเวลากลางคืน

คำสำคัญ: การถ่ายเทความร้อน สมการการแพร่ ความร้อนผิว ความสัมพันธ์ของอุณหภูมิ

A Study of Heat Transfer of Concrete and Green Space Affected to the Building in Summer

Arissaman Sangthongtong[1*] and Atichart Aungkosachanawanich[1]

arissaman@rtaf.mi.th[1*], atichart_a@rtaf.mi.th[1]

Received	: 25-Mar-2022
Revised	: 14-Dec-2022
Accepted	: 16-Dec-2022

[1] Civil Engineering Department Division of Education Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy, Sai Mai, Bangkok 10220, THAILAND

Abstract

The objective of this study is to study Heat Transfer of concrete and greenfield that affected to the building in summer by record the temperature in each thickness of the two surfaces at depth levels of -15.00 cm, -7.50 cm and 0.00 cm respectively, for ambient temperature is recorded every 1 minute, 24 hours a day, for 7 days under the suburbs area conditions, where without any tall buildings, there are only about the same size of buildings of the 30% surface around the building from the total area 100% on a sunny day. The data of temperatures at different depths of the same surface and the same depth at the different surface during the day and night for explain the heat transfer by using the diffusion equation to analyze the temperature occurring in the building. This research results that vertical heat transfer in different areas was affected incomplete transfer temperature due to there is blocking of heat transfer to the next layer. For this reason, the horizon heat transfer to the same areas is better than transfer to the building. So, the building floor that are surrounded by greenfield has less heat accumulation than the building floor that are surrounded by concrete. Therefore, in the summer, the concrete floors surrounding the buildings show accumulate heat level higher than the green space, both of during the day and night.

Keywords: Heat transfer, Diffusion equation, Surface temperature, Relation temperature

1. บทนำ (Introduction)

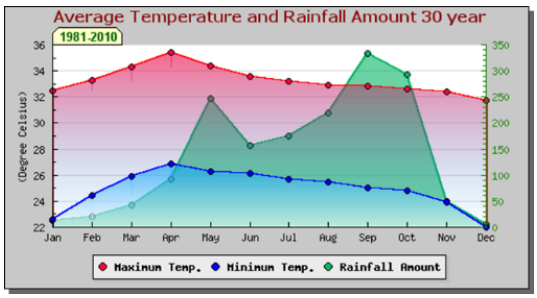
สถานการณ์ ณ ปัจจุบันกรุงเทพมหานครประสบปัญหาความร้อนในเขตเมืองสูง ซึ่งมีชื่อเรียกว่าปรากฏการณ์เกาะความร้อน [1] อันเนื่องมาจากอาคารบ้านเรือนถูกปรับเปลี่ยนวัสดุก่อสร้างจากไม้เป็นคอนกรีต พื้นที่สีเขียวถูกปรับเปลี่ยนเป็นถนนคอนกรีต ถนนลาดยาง พื้นที่ชุ่มน้ำถูกปรับสภาพเป็นแผ่นดินสำหรับการก่อสร้าง อาทิ เช่น หมู่บ้านจัดสรร และอาคารบ้านเรือนเก่าถูกรื้อถอนปรับเปลี่ยนเป็นคอนโดมิเนียมที่มีความสูงมาก ด้วยเหตุนี้ทำให้ช่วงเวลากลางวันคอนกรีตสะสมความร้อนไว้ในเนื้อวัสดุสูงและปลดปล่อยความร้อนออกมาในเวลากลางคืน อีกทั้งตัวอาคารที่มีความสูงมากเกิดการบดบังทิศทางลม ทำให้ลมไม่สามารถนำพาความร้อนจากพื้นดินขึ้นสู่บรรยากาศได้ และการที่เมืองมีประชากรโยกย้ายถิ่นฐานเข้ามาอาศัยอยู่อย่างหนาแน่น ส่งผลให้มีการใช้อุปกรณ์อำนวยความสะดวกที่ทำให้เกิดความร้อนกับสภาพแวดล้อม อาทิ เช่น เครื่องปรับอากาศ จึงเป็นอีกสาเหตุหนึ่งที่ทำให้กรุงเทพมหานคร ณ ปัจจุบันเป็นเมืองที่มีอากาศร้อนมากทั้งช่วงเวลากลางวันและกลางคืน ด้วยความตระหนักถึงปรากฏการณ์เกาะความร้อนทั้งสถาปนิกและวิศวกร [2] จึงออกแบบพื้นที่ใช้สอย รูปทรงอาคาร และเลือกใช้วัสดุที่สามารถลดความร้อนลงได้ โดยอ้างอิงหลักการความสบายเชิงความร้อน (Thermal comfort) [3] มาวิเคราะห์เพื่อให้ผู้อยู่อาศัยมีความพึงพอใจต่อสภาวะอากาศแวดล้อมในอาคาร

งานวิจัยนี้จึงเป็นการเก็บข้อมูลอุณหภูมิที่เกิดขึ้นของพื้นคอนกรีตและพื้นที่สีเขียว ที่มีพื้นที่โดยรอบอาคารร้อยละ 30 จากพื้นที่ทั้งหมดร้อยละ 100 ตัวอาคารอยู่กึ่งกลางของพื้นที่ศึกษา ตั้งจุดทดสอบ 4 จุด รอบอาคารทั้ง 4 ทิศทาง สภาพพื้นที่ทดสอบตั้งอยู่ที่ชานเมือง มีความหนาแน่นน้อย [4] เนื่องจากต้องการศึกษาความสัมพันธ์ของอุณหภูมิที่เกิดขึ้นทั้ง 2 สภาพพื้นผิวมาประกอบการตัดสินใจในการออกแบบภูมิสถาปัตย์ของอาคารที่มีผลต่อความสบายเชิงความร้อนในการอยู่อาศัยทั้งเวลากลางวันและเวลากลางคืนในช่วงฤดูร้อน [5] ของประชาชนต่อไป

2. วิธีดำเนินการวิจัย (Method)

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

กรุงเทพมหานครตั้งอยู่ระหว่างเส้นรุ้งที่ 5 และ 21 องศาเหนือ เส้นแวงที่ 97 และ 106 องศาตะวันออก มีลักษณะทางอุตุนิยมวิทยาท้องถิ่น หรือบรรยากาศจุลภาค คือ เป็นเขตภูมิอากาศแบบร้อนชื้น พื้นที่มีลักษณะเป็นพื้นที่ราบดินตะกอนน้ำพารูปพัด กรุงเทพมหานครตั้งอยู่ทางทิศเหนือของทะเลอ่าวไทย สภาพอากาศจึงมีความชื้นสูงเนื่องจากได้รับอิทธิพลของกระแสลมตะวันตกเฉียงใต้ และได้รับความชื้นมาจากทะเลอ่าวไทยโดยตรง โดยสถานีตรวจวัดอุตุนิยมวิทยากรุงเทพมหานครหมายเลข 48455 ตั้งอยู่ที่เส้นรุ้ง 13 และ 43 องศาเหนือ เส้นแวงที่ 100 และ 33 องศาตะวันออก รายงานอุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุด และอุณหภูมิเฉลี่ยต่ำสุดของแต่ละเดือน ในรอบ 30 ปี พบว่าช่วงอุณหภูมิสูงสุดเกิดขึ้นในเดือนเมษายนของทุกปี ดังแสดงตามรูปที่ 1



รูปที่ 1 อุณหภูมิเฉลี่ยสูงสุด อุณหภูมิเฉลี่ยต่ำสุดและปริมาณฝนของแต่ละเดือน ในรอบ 30 ปี [6]

การถ่ายเทความร้อน คือ การส่งผ่านพลังงานความร้อนซึ่งเกิดขึ้นเนื่องจากความแตกต่างของอุณหภูมิ กล่าวคือ เมื่อใดก็ตามที่มีความแตกต่างของอุณภูมิเกิดขึ้นในตัวกลางหรือระหว่างตัวกลางการถ่ายเทความร้อนจะเกิดขึ้น ฉะนั้นพื้นฐานของการถ่ายเทความร้อน คือ “ความแตกต่างของอุณหภูมิ” (Temperature Different) ถ้าตัวกลางสองตัวมีอุณหภูมิเท่ากันจะไม่เกิดการถ่ายเทความร้อน ด้วยเหตุนี้ความแตกต่างของอุณหภูมิจึงเป็นแรงขับเคลื่อน (Driving Force) เพื่อให้เกิดการถ่ายเทอัตราการถ่ายเทความร้อนขึ้นอยู่กับความลาดชันของอุณหภูมิ (Temperature Gradient) ซึ่งหมายถึง ความแตกต่างของ

อุณหภูมิต่อหน่วยความยาว หรืออัตราการลดลงของอุณหภูมิ สมการพื้นฐานสำหรับกระบวนการถ่ายโอน

$$\text{Rate of Transfer Process} = \frac{\text{Driving force}}{\text{Resistance}} \quad (1)$$

ปรากฏการณ์เกาะความร้อน [7] คือ ปรากฏการณ์ที่พื้นที่บริเวณสังคมเมืองมีอุณหภูมิสูงกว่าบริเวณโดยรอบ โดยมีสาเหตุมาจากการเปลี่ยนแปลงพื้นผิวของแผ่นดินที่มาจากการพัฒนาเมือง จากเดิมเป็นพื้นที่สีเขียวถูกปรับเปลี่ยนโดยการปกคลุมด้วยคอนกรีตที่มีความทึบสูงทำให้เกิดการดูดซับพลังงานความร้อนจากดวงอาทิตย์ในตอนกลางวันและปลดปล่อยความร้อนออกมาในเวลากลางคืนหรือการใช้วัสดุหรืออุปกรณ์ที่ทำให้เกิดความร้อน เช่น ความร้อนจากเครื่องปรับอากาศ ทำให้เกิดการสะสมพลังงานความร้อนและปลดปล่อยออกมาทำให้เกิดเกาะความร้อนในบริเวณโดยรอบ รวมถึงการที่มีประชากรอาศัยอยู่กันอย่างหนาแน่นในเขตเมืองซึ่งเป็นสาเหตุสำคัญที่ทำให้มีการเพิ่มอุณหภูมิแวดล้อมด้วยเช่นเดียวกัน

ความสบายเชิงความร้อน (Thermal comfort) [8-12] ถูกกำหนดขึ้นจากสมาคมวิศวกรรมการปรับอากาศแห่งอเมริกา (American Society of Heating, Refrigerating and Air conditioning Engineers, ASHRAE) ตามมาตรฐาน ASHRAE 55-92 ซึ่งหมายถึง สภาวะของจิตใจที่แสดงถึงความพึงพอใจต่อสภาวะอากาศแวดล้อม โดยความรู้สึกสภาพอากาศที่เป็นกลาง คือ สภาพแวดล้อมที่ไม่ร้อนหรือไม่หนาวเกินไป ความรู้สึกสบาย และการยอมรับสภาพอากาศเข้าด้วยกันทั้งหมด อย่างไรก็ตามสภาวะอากาศหนึ่งไม่สามารถทำให้คนทุกคนรู้สึกชอบใจได้ ฉะนั้นจึงจำเป็นต้องมีการศึกษาสำรวจหาสภาวะอากาศที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้คนส่วนใหญ่รู้สึกสบายเชิงความร้อน ทั้งนี้ความสบายเชิงความร้อนจะขึ้นกับตัวแปร 6 ตัวแปร ได้แก่ อุณหภูมิอากาศ (Air temperature) ความชื้นสัมพัทธ์ (Relative humidity) ความเร็วลม (Air speed) อุณหภูมิการแผ่รังสี (Radiant temperature)ระดับกิจกรรม (Activity level) ที่ส่งผลต่ออัตราการเผาผลาญพลังงาน และระดับฉนวนของเสื้อผ้า (Clothing insulation) จากตัวแปรทั้ง 6 ตัวแปร งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่ตัวแปรเรื่องอุณหภูมิอากาศ เนื่องจากสามารถตรวจวัดค่าได้แม่นยำ และนำไปประมวลผลในระเบียบวิจัยทางคณิตศาสตร์ได้อย่างมีนัยสำคัญ

การถ่ายเทความร้อน [13] ประกอบด้วย 3 รูปแบบ คือ การนำความร้อน (Conduction) การพาความร้อน (Convection) และการแผ่รังสีความร้อน (Radiation) ซึ่งการนำความร้อนจะเป็นการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นผ่านตัวกลาง ในขณะที่การพาความร้อนจะเป็นการถ่ายเทความร้อนที่เกิดขึ้นระหว่างพื้นผิวและของไหลที่เคลื่อนที่ เมื่อมีอุณหภูมิแตกต่างกันส่วนการแผ่รังสีความร้อนเป็นการที่ทุกพื้นผิวมีอุณหภูมิหนึ่งปล่อยพลังงานในรูปของคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าออกมา ฉะนั้นในสถาวะที่ปราศจากตัวกลางใด ๆ จะมีการถ่ายเทความร้อนสุทธิที่เกิดขึ้นเนื่องจากการแผ่รังสีระหว่างพื้นผิวสองพื้นผิวที่มีอุณหภูมิแตกต่างกันได้โดยกลไกการถ่ายเทความร้อนเกิดขึ้นได้ 2 สภาวะ คือ สภาวะสม่ำสมอ (Steady state) และสภาวะไม่สม่ำเสมอ (Unsteady State หรือ Transient State)

สภาวะสม่ำสมอ (Steady state) หมายถึง อุณหภูมิที่จุด ๆ หนึ่งในวัตถุไม่เปลี่ยนแปลงกับเวลา เขียนในรูปสมการได้ว่า

$$\partial T/\partial t = 0 \quad (2)$$

สภาวะไม่สม่ำเสมอ (Unsteady State หรือ Transient State) หมายถึง อุณหภูมิที่จุด ๆ หนึ่งในวัตถุยังเปลี่ยนแปลงอยู่ เมื่อเวลาเปลี่ยนไป เขียนในรูปสมการได้ว่า

$$\partial T/\partial t \neq 0 \quad (3)$$

จากงานวิจัยของ วรากรณ์ พูลจันทร์ และคณะ (2564) ได้ดำเนินการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนผ่านผนังอาคารโดยใช้สมการการแพร่ความร้อนผ่านตัวกลาง โดยใช้กฎของฟิกส์ (Fick's law) เขียนในรูปสมการได้ว่า

$$\frac{\partial T}{\partial t} = \frac{k}{cp}\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \quad (4)$$

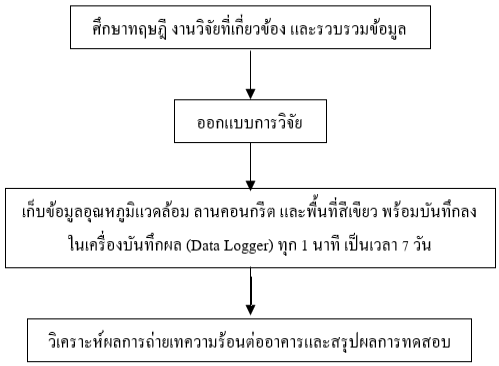
จากสมการข้างต้นงานวิจัยนี้จึงวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนโดยการแพร่กระจายความร้อนในรูปแบบ 1 มิติ โดยจำลองการแพร่ในทิศทางแนวดิ่งซึ่งผิวบน

ของพื้นผิวจะสัมผัสแสงแดดโดยตรงและแพร่กระจายลงสู่ชั้นต่าง ๆ และดำเนินการวิเคราะห์การแพร่กระจายขึ้นสู่พื้นอาคารคอนกรีต โดยใช้สมการเชิงอนุพันธ์ย่อยเพื่อแสดงค่าของอุณหภูมิ T ในช่วงเวลา t โดยกำหนดค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k), ค่าความร้อนจำเพาะ (c) และค่าความหนาแน่น (ρ) ของแต่ละพื้นผิว (พื้นคอนกรีตและพื้นที่สีเขียว) โดยกำหนดความหนาของพื้นผิว 3 ระดับ คือ -15.00 ซม., -7.50 ซม.และ 0.00 ซม.โดยใส่ค่าที่ได้จากการเก็บข้อมูลจริง และความหนาของการแพร่ขึ้นด้านบนที่ 15.00 ซม. โดยคิดจากการก่อสร้างพื้นอาคารปกติซึ่งความหนารวมของแบบจำลองอยู่ที่ 30.00 ซม.ในทางเดียวกันได้เก็บข้อมูลอุณหภูมิทั้ง 4 ด้านของอาคารเพื่อศึกษาผลต่างของจุดที่สัมผัสแสงแดดและไม่ได้สัมผัสแสงแดดเพื่อนำมาอธิบายความแตกต่างของการแพร่กระจายความร้อนในแนวราบ ทั้งนี้งานวิจัยฉบับนี้ไม่ได้คำนึงถึงความเร็วลม และองค์ประกอบอื่น ๆ โดยวิเคราะห์จากอุณหภูมิที่เกิดขึ้นจริงเท่านั้น

การคายระเหย (evapotranspiration) [14] คือการที่ปริมาณน้ำจากพื้นที่เพาะปลูกขึ้นสู่บรรยากาศในรูปไอน้ำโดยเป็นกระบวนการดูดความร้อนเพื่อเปลี่ยนสภาวะแวดล้อมจากอากาศร้อนเป็นอากาศเย็น ซึ่งผลของการคายระเหยน้ำทำให้อากาศมีความชื้นเพิ่มขึ้น

2.2 กระบวนการวิจัย

การศึกษาพฤติกรรมการถ่ายเทความร้อนในช่วงฤดูร้อนของพื้นคอนกรีตและพื้นที่สีเขียวที่มีผลต่อพื้นอาคาร ประกอบด้วย 4 ขั้นตอน คือ 1) ศึกษาทฤษฎี งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และรวบรวมข้อมูล 2) ออกแบบการวิจัย 3) เก็บข้อมูลอุณหภูมิแวดล้อม พื้นคอนกรีต และพื้นที่สีเขียว พร้อมบันทึกลงในเครื่องบันทึกผล (Data Logger) ทุก ๆ 1 นาที เป็นเวลา 7 วัน 4) วิเคราะห์ผลการถ่ายเทความร้อนต่ออาคารและสรุปผลการทดสอบ โดยมีกรอบงานวิจัย ดังแสดงในรูปที่ 2



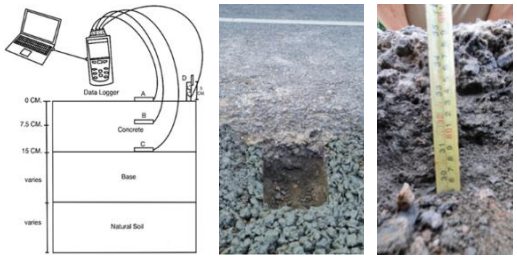
รูปที่ 2 กรอบงานวิจัย

2.3 สถานที่ทดสอบ

จัดเตรียมพื้นที่ทดสอบขนาดความกว้าง ความยาว ความลึก 15x15x15 ซม.สำหรับการทดสอบบนพื้นคอนกรีต โดยเลือกใช้พื้นที่อาคารภาควิชาวิศวกรรมโยธา ในส่วนการทดสอบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนพื้นที่สีเขียว เลือกใช้พื้นที่อาคารพละ โดยตำแหน่งที่จัดเก็บข้อมูลใช้พื้นที่ทั้ง 4 ด้านของอาคาร ซึ่งในช่วงเวลากลางวันต้องมีแสงแดดส่องถึงตลอดเวลา หากมีการบดบัง หรือร่มเงาของอาคารข้างเคียงและต้นไม้ใหญ่ จะไม่เลือกใช้ข้อมูลชุดนั้นในห้วงเวลาที่มีการบดบัง

2.4 ทดสอบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนพื้นคอนกรีตและทดสอบอุณหภูมิแวดล้อม [15-16]

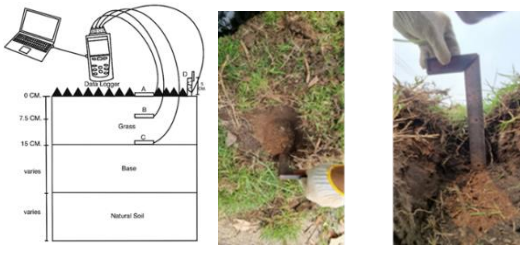
ทำการบดอัดดินด้านล่างของพื้นคอนกรีต พร้อมทาน้ำยาประสานคอนกรีตเก่าและคอนกรีตใหม่ที่บริเวณรอบหลุม (ผนัง) ของพื้นที่ทดสอบพื้นคอนกรีต และดำเนินการติดตั้งสาย Thermocouple Type K (C) บนชั้นวัสดุบดอัดที่ระดับ -15.00 ซม.จากพื้นดิน เมื่อติดตั้งสายแล้วเสร็จทำการเทคอนกรีตให้ได้ความลึก-7.50 ซม. พร้อมดำเนินการติดตั้งสาย Thermocouple Type K (B) บริเวณกึ่งกลางของคอนกรีตและเทคอนกรีตจนถึงระดับพื้นดินที่ 0.00 ซม.รอคอนกรีตแข็งตัวดำเนินการติดตั้งสาย Thermocouple Type K (A) และทำการปักท่อ PVC เพื่อติดตั้งสาย Thermocouple Type K (D) ที่ระดับ +5.00 ซม.จากพื้นดิน ดำเนินการบันทึกอุณหภูมิลงในเครื่องบันทึกผล (Data Logger) ทุกช่วงเวลา 1 นาที ทำซ้ำ 4 หลุมรอบอาคารทดสอบแสดงขั้นตอนการดำเนินงานในรูปที่ 3



(1) (2) (3)

(4) (5) (6)

รูปที่ 3 (1) รูปแบบการติดตั้ง Thermocouple Type K
(2) เตรียมพื้นที่ทดสอบของพื้นคอนกรีต
(3) วัดระยะความกว้าง ความยาว ความลึก
(4) ติดตั้ง Thermocouple Type K (C)
(5) ติดตั้ง Thermocouple Type K (B)
(6) ติดตั้ง Thermocouple Type K (A) และ (D) พร้อมดำเนินการเก็บข้อมูลอุณหภูมิทุก 1 นาที



(1) (2) (3)

(4) (5) (6)

รูปที่ 4 (1) รูปแบบการติดตั้ง Thermocouple Type K
(2) เตรียมพื้นที่ทดสอบของพื้นคอนกรีต
(3) วัดระยะความกว้าง ความยาว ความลึก
(4) ติดตั้ง Thermocouple Type K (C) และ (B)
(5) ติดตั้ง Thermocouple Type K (A) และ (D)
(6) ดำเนินการเก็บข้อมูลอุณหภูมิทุก 1 นาที

2.5 ทดสอบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนพื้นที่สีเขียว และทดสอบอุณหภูมิแวดล้อม

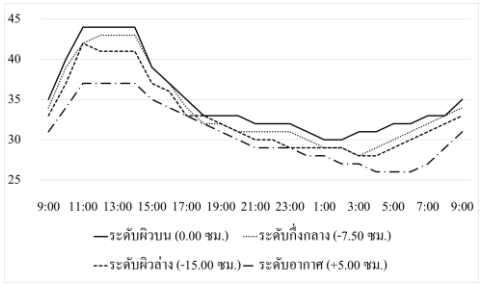
ทำการบดอัดดินที่หลุมด้านล่างของพื้นที่สีเขียว และบริเวณรอบหลุม (ผนัง) ของพื้นที่ทดสอบพื้นที่สีเขียว พร้อมดำเนินการติดตั้งสาย Thermocouple Type K (C) บนชั้นวัสดุบดอัด ที่ระดับ -15.00 ซม.จากพื้นดินเมื่อติดตั้งสายแล้วเสร็จทำการถมดิน พร้อมบดอัดให้ได้ความลึก -7.50 ซม. ดำเนินการติดตั้งสาย Thermocouple Type K (B) บริเวณกึ่งกลางของชั้นดินและถมดินพร้อมบดอัดจนถึงระดับพื้นดินที่ 0.00 ซม.ดำเนินการติดตั้งสาย Thermocouple Type K (A) และปูหญ้าเพื่อคืนสภาพพื้นที่เดิม ทำการตอกหมุดเหล็กติดตั้งสายThermocouple Type K (D) ที่ระดับ +5.00 ซม. จากพื้นดิน ดำเนินการบันทึกอุณหภูมิลงในเครื่องบันทึกผล (Data Logger) ทุกช่วงเวลา 1 นาที ทำซ้ำ 4 หลุมรอบอาคารทดสอบแสดงขั้นตอนการดำเนินงานในรูปที่ 4

3. ผลการศึกษาและอภิปรายผล (Result)

3.1 ผลการทดสอบอุณหภูมิของพื้นคอนกรีต พื้นที่สีเขียว และอุณหภูมิแวดล้อม ที่เกิดขึ้นในช่วงเวลา 24 ชั่วโมง

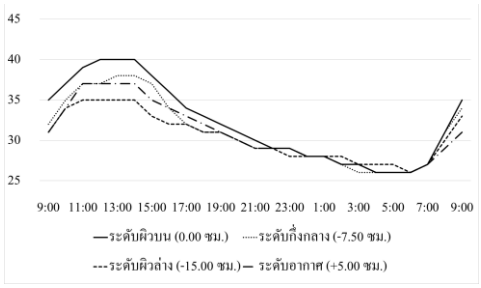
จากการดำเนินการทดสอบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนพื้นคอนกรีต และอุณหภูมิแวดล้อม ทุก ๆ 1 นาที ในช่วงเวลา 24 ชั่วโมง พบว่า ทั้ง 4 ด้านของอาคารให้ผลไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือที่ระดับผิวบน 0.00 ซม. มีอุณหภูมิสูงที่สุด รองลงมาเป็นที่ระดับกึ่งกลาง -7.50 ซม. และอุณหภูมิต่ำสุดที่ระดับผิวล่าง -15.00 ซม. อันเนื่องมาจากคอนกรีตเป็นวัสดุที่มีความทึบสูงมีอัตราการสะสมความร้อนในตัววัสดุสูง และถ่ายเทความร้อนออกสู่บรรยากาศได้ต่ำ อีกทั้งในเวลากลางวันผิวบนของคอนกรีตสัมผัสความร้อนตลอดเวลาทำให้เกิดการสะสมความร้อนในเนื้อคอนกรีตสูงและแพร่กระจายความร้อนเข้าสู่คอนกรีตชั้นกึ่งกลางและชั้นล่างตามลำดับ โดยที่ชั้นล่างมีการถ่ายเทความร้อนให้กับชั้นดินที่ติดกันจึงทำให้ที่ผิวล่างของคอนกรีตมีอุณหภูมิต่ำสุดในส่วนเวลากลางคืนความร้อน

ที่สะสมในเนื้อคอนกรีตมีการถ่ายเทความร้อนได้ไม่ดีเท่าที่ควร ทำให้อุณหภูมิของคอนกรีตที่ระดับชั้นต่าง ๆ มีค่าใกล้เคียงกันและสูงกว่าอุณหภูมิแวดล้อม เมื่อนำพื้นคอนกรีตมาใช้เป็นพื้นที่โดยรอบอาคารการถ่ายเทอุณหภูมิเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์อันเนื่องมาจากวัสดุที่ใช้เป็นคอนกรีตเหมือนกันส่งผลให้อุณหภูมิจากพื้นคอนกรีตสามารถแพร่กระจายเข้าตัวอาคารได้ดี ดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาและอุณหภูมิของพื้นคอนกรีต และอุณหภูมิแวดล้อม

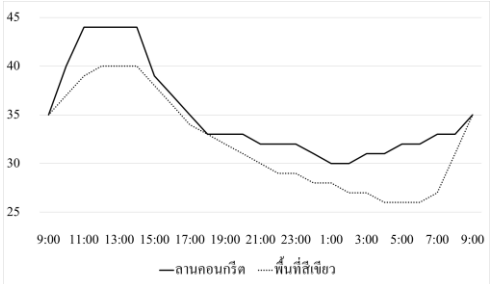
ในส่วนการดำเนินการทดสอบอุณหภูมิที่เกิดขึ้นบนพื้นที่สีเขียว และทดสอบอุณหภูมิแวดล้อมทุก ๆ 1 นาที ในช่วงเวลา 24 ชั่วโมง พบว่า ทั้ง 4 ด้านของอาคารให้ผลไปในทิศทางเดียวกัน กล่าวคือที่ระดับผิวบน 0.00 ซม. มีอุณหภูมิสูงที่สุด รองลงมาเป็นที่ระดับกึ่งกลาง -7.50 ซม. และอุณหภูมิต่ำสุดที่ระดับผิวล่าง -15.00 ซม.เนื่องจากพื้นที่สีเขียวมีอัตราการสะสมความร้อนต่ำ ชั้นดินมีมวลช่องว่างและรูพรุนสูง ทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนเข้าและออกสู่บรรยากาศได้ดี ประกอบกับมีการระเหยคายน้ำของพืช จึงทำให้อุณหภูมิที่เกิดขึ้นของพื้นที่สีเขียวต่ำกว่าคอนกรีต อีกทั้งในเวลากลางวันผิวบนของพื้นที่สีเขียวสัมผัสความร้อนตลอดเวลาทำให้เกิดการสะสมความร้อนในชั้นดินสูงและถ่ายเทความร้อนเข้าสู่ชั้นดินในชั้นกึ่งกลางและชั้นล่างตามลำดับ ส่วนเวลากลางคืนความร้อนที่สะสมในชั้นดินสามารถถ่ายเทขึ้นสู่บรรยากาศได้ง่ายโดยอาศัยช่องว่างรูพรุนของเม็ดดินในการนำพาความร้อนออก ทำให้อุณหภูมิของพื้นที่สีเขียวที่ระดับชั้นต่าง ๆ มีค่าใกล้เคียงกับอุณหภูมิแวดล้อม เมื่อนำพื้นที่สีเขียวมาใช้เป็นพื้นที่โดยรอบอาคาร การส่งต่ออุณหภูมิจะยากกว่าพื้นคอนกรีตอันเนื่องมาจากความแตกต่างของวัสดุ 2 ชนิด ส่งผลให้อุณหภูมิที่ถูกถ่ายเทถูกบล็อกเป็นเหตุให้การถ่ายเทอุณหภูมิออกในพื้นที่ข้างเคียงโดยรอบอาคารทำได้ง่ายกว่าการส่งต่อเข้าสู่พื้นอาคาร ฉะนั้นพื้นอาคารที่ถูกรายล้อมด้วยพื้นที่สีเขียวจึงมีความร้อนสะสมน้อยกว่าพื้นอาคารที่ถูกรายล้อมด้วยพื้นคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 6



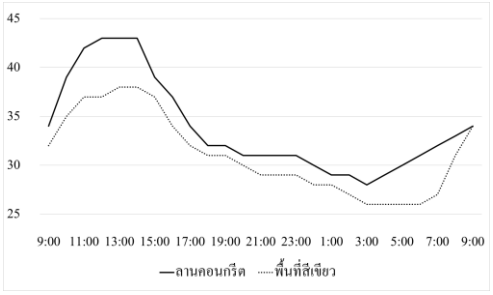
รูปที่ 6 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาและอุณหภูมิของพื้นที่สีเขียว และอุณหภูมิแวดล้อม

3.2 ผลการทดสอบอุณหภูมิที่ระดับผิวบน (0.00 ซม.) ระดับกึ่งกลาง (-7.50 ซม.) และระดับผิวล่าง (-15.00 ซม.) ของพื้นคอนกรีต เปรียบเทียบกับพื้นที่สีเขียว ที่ช่วงเวลา 24 ชั่วโมง

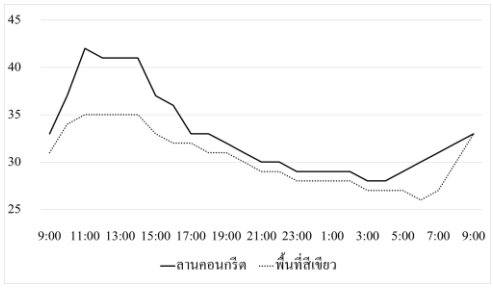
จากการดำเนินการทดสอบอุณหภูมิที่ระดับผิวบน (0.0 ซม.) ระดับกึ่งกลาง (-7.50 ซม.) และระดับผิวล่าง (-15.00 ซม.) ของพื้นคอนกรีตเปรียบเทียบกับพื้นที่สีเขียว ที่ช่วงเวลา 24 ชั่วโมง พบว่า ทั้ง 3 ระดับ มีทิศทางสอดคล้องกัน กล่าวคือ อุณหภูมิของพื้นคอนกรีตมีค่าสูงกว่าอุณหภูมิของพื้นที่สีเขียว เนื่องมาจากตัววัสดุคอนกรีตมีความทึบสูง มีอัตราการสะสมความร้อนสูงและอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำ ในส่วนของพื้นที่สีเขียวมีอัตราการสะสมความร้อนต่ำ ชั้นดินมีมวลช่องว่างและรูพรุนสูง ส่งผลให้เกิดอัตราการถ่ายเทความร้อนเข้าและออกสู่บรรยากาศได้ง่าย ประกอบกับมีปัจจัยเรื่องการระเหยคายน้ำของพืชเข้ามาเกี่ยวข้องจึงทำให้อุณหภูมิที่เกิดขึ้นของพื้นที่สีเขียวต่ำกว่าคอนกรีตอย่างเห็นได้ชัด ดังแสดงในรูปที่ 7-9



รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาและอุณหภูมิที่ระดับผิวบน (0.00 ซม.)



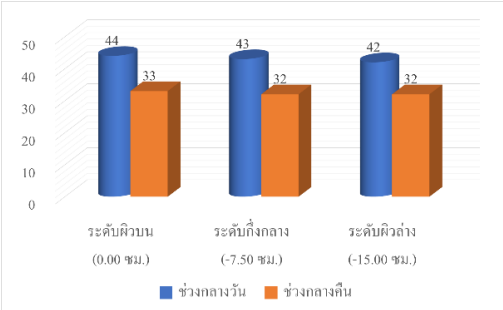
รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาและอุณหภูมิที่ระดับกึ่งกลาง (-7.50 ซม.)



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างช่วงเวลาและอุณหภูมิที่ระดับผิวล่าง (-15.00 ซม.)

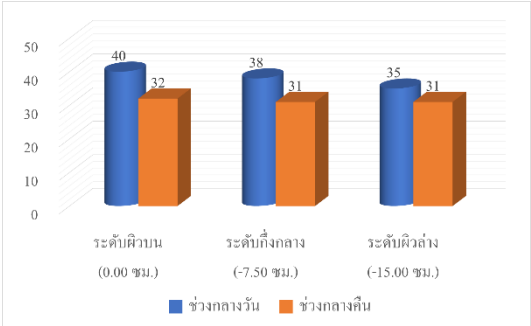
3.3 ผลการทดสอบอุณหภูมิสูงสุดของพื้นคอนกรีต และพื้นที่สีเขียว ในช่วงเวลากลางวัน และเวลากลางคืน

จากการวิเคราะห์อุณหภูมิสูงสุดของพื้นคอนกรีตในช่วงเวลากลางวัน และเวลากลางคืน พบว่า อุณหภูมิสูงสุดของทั้ง 3 ระดับ มีค่าใกล้เคียงกันซึ่งเป็นการบ่งชี้ถึงความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของคอนกรีตผ่านอนุภาคที่เชื่อมต่อกันและความทึบของวัสดุทำให้คอนกรีตทุกระดับความลึกมีอุณหภูมิใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 10



รูปที่ 10 อุณหภูมิสูงสุดของพื้นคอนกรีต ในช่วงเวลากลางวันและเวลากลางคืน

จากการวิเคราะห์อุณหภูมิสูงสุดของพื้นที่สีเขียวในช่วงเวลากลางวัน พบว่า อุณหภูมิที่ระดับผิวบน 0.00 ซม.มีค่าสูงสุด รองลงมาเป็นที่ระดับกึ่งกลาง -7.50 ซม.และอุณหภูมิต่ำสุดที่ระดับผิวล่าง -15.00 ซม. ซึ่งเป็นการบ่งชี้ถึงความสามารถในการถ่ายเทความร้อนของชั้นดินผ่านอนุภาคเม็ดดินที่มีมวลช่องว่าง และรูพรุนสูง รวมถึงปัจจัยการระเหยคายน้ำของพืชทำให้เกิดการถ่ายเทความร้อนเข้าและออกสู่บรรยากาศได้ดีส่งผลให้อุณหภูมิสูงสุดในช่วงเวลากลางวันแตกต่างกัน ในส่วนเวลากลางคืนอุณหภูมิสูงสุดของทั้ง 3 ระดับ มีค่าใกล้เคียงกันอันเนื่องมาจากการถ่ายเทความร้อนเข้าและออกสู่บรรยากาศทำได้ดีทำให้อุณหภูมิสูงสุดของทั้ง 3 ระดับมีค่าใกล้เคียงกัน ดังแสดงในรูปที่ 11



รูปที่ 11 อุณหภูมิสูงสุดของพื้นที่สีเขียว ในช่วงเวลากลางวันและเวลากลางคืน

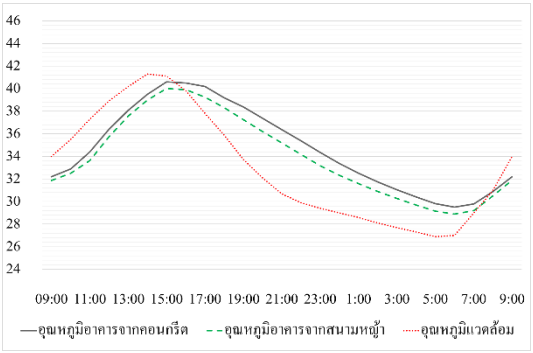
3.4 ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิพื้นอาคารในแนวดิ่งที่เกิดขึ้นจากคอนกรีตและพื้นที่สีเขียวเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแวดล้อม

เมื่อนำค่าอุณหภูมิที่เกิดขึ้นมาประมวลผลโดยใช้สมการการแพร่ใน 1 มิติ ตามแนวดิ่ง ได้ผลการวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 อุณหภูมิพื้นอาคารที่เกิดขึ้นจากการวิเคราะห์ผลด้วยระเบียบทางคณิตศาสตร์

ช่วงเวลา	อุณหภูมิพื้นอาคารที่เกิดขึ้นจากคอนกรีต	อุณหภูมิพื้นอาคารที่เกิดขึ้นจากพื้นที่สีเขียว	อุณหภูมิแวดล้อม	เปอร์เซ็นต์แสดงอุณหภูมิของคอนกรีตเทียบกับอุณหภูมิของพื้นที่สีเขียว
09:00	32.2	31.9	34.0	1.02
10:00	32.9	32.5	37.9	1.23
11:00	34.4	33.6	42.3	2.25
12:00	36.4	35.7	43.6	1.86
13:00	38.1	37.6	43.8	1.38
14:00	39.5	39.0	43.7	1.34
15:00	40.6	40.0	40.1	1.49
16:00	40.5	39.9	37.5	1.46
17:00	40.2	39.2	35.6	2.44
18:00	39.2	38.3	33.8	2.26
19:00	38.4	37.2	32.8	3.03
20:00	37.4	36.2	31.8	3.26
21:00	36.4	35.2	30.7	3.37
22:00	35.4	34.2	29.9	3.53
23:00	34.3	33.2	29.4	3.50
0:00	33.4	32.3	29.0	3.27
1:00	32.5	31.6	28.6	2.97
2:00	31.7	30.9	28.1	2.69
3:00	31.0	30.3	27.7	2.56
4:00	30.4	29.7	27.3	2.40
5:00	29.8	29.1	26.9	2.27
6:00	29.5	28.9	26.6	2.08
7:00	29.8	29.2	27.1	2.05
8:00	30.9	30.5	32.0	1.31
9:00	32.2	31.9	34.0	0.94

จากตารางที่ 1 พบว่า ในขั้นตอนการวิเคราะห์การถ่ายเทความร้อนจากพื้นผิวทั้ง 2 รูปแบบ เข้าสู่พื้นอาคารคอนกรีตที่ความหนา 15 ซม.อุณหภูมิพื้นอาคารที่เกิดขึ้นจากพื้นคอนกรีตมีค่ามากกว่าอุณหภูมิพื้นอาคารที่เกิดขึ้นจากพื้นที่สีเขียวทุกช่วงเวลา โดยจากการประมวลผลตามเงื่อนไขที่กำหนด พบว่า พื้นอาคารใช้วัสดุเป็นคอนกรีตซึ่งเป็นวัสดุชนิดเดียวกันกับพื้นคอนกรีต ส่งผลให้การถ่ายเทอุณหภูมิเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์ อุณหภูมิจากพื้นคอนกรีตสามารถแพร่กระจายเข้าสู่ตัวอาคารได้ดี เป็นเหตุให้พื้นอาคารเกิดความร้อนสะสมเช่นเดียวกับพื้นคอนกรีต ในทางกลับกันอุณหภูมิพื้นอาคารที่เกิดขึ้นจากพื้นที่สีเขียวถ่ายเทอุณหภูมิได้น้อยกว่า เนื่องจากความแตกต่างของวัสดุ โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การนำความร้อน (k), ค่าความร้อนจำเพาะ (c) และค่าความหนาแน่น (ρ) ที่แตกต่างกัน ส่งผลให้อุณหภูมิที่ถูกถ่ายเทถูกบล็อกเป็นเหตุให้การถ่ายเทอุณหภูมิออกในพื้นที่ข้างเคียงโดยรอบอาคาร (ที่พื้นที่สีเขียว ซึ่งเป็นวัสดุชนิดเดียวกัน) ทำได้ง่ายกว่าการส่งต่อเข้าสู่พื้นอาคาร ฉะนั้นพื้นอาคารที่ถูกรายล้อมด้วยพื้นที่สีเขียวจึงมีความร้อนสะสมน้อยกว่าพื้นอาคารที่ถูกรายล้อมด้วยพื้นคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 12



รูปที่ 12 อุณหภูมิพื้นอาคารที่เกิดขึ้นจากพื้นคอนกรีตและพื้นที่สีเขียวเปรียบเทียบกับอุณหภูมิแวดล้อม

3.5 ผลการวิเคราะห์อุณหภูมิในแนวราบที่เกิดขึ้นจากคอนกรีตและพื้นที่สีเขียวทั้ง 4 ด้านของอาคาร

จากการวิเคราะห์ผลอุณหภูมิในแนวราบ พบว่า พื้นที่คอนกรีตที่ระดับผิวบน 0.00 ซม.ด้านที่สัมผัสแสงแดดมีอุณหภูมิสูงกว่าด้านที่ไม่โดนแสงแดด 4 องศาเซลเซียส ในสภาวะอุณหภูมิแวดล้อม 38 องศาเซลเซียส ส่วนระดับกึ่งกลาง -7.50 ซม.และที่ระดับผิวล่าง -15.00 ซม.มีความแตกต่างของอุณหภูมิทั้งสองด้านที่ 1 องศาเซลเซียส ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการแพร่กระจายและการสะสมความร้อนในเนื้อวัสดุทึบสูง

ในส่วนพื้นที่สีเขียว ที่ระดับผิวบน 0.00 ซม. ด้านที่สัมผัสแสงแดดมีอุณหภูมิสูงกว่าด้านที่ไม่โดนแสงแดด

1 องศาเซลเซียส ในสภาวะอุณหภูมิแวดล้อม 38 องศาเซลเซียส ส่วนระดับกึ่งกลาง -7.50 ซม.และที่ระดับผิวล่าง -15.00 ซม.ไม่มีความแตกต่างของอุณหภูมิทั้งสองด้าน ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการถ่ายเทความร้อนเข้าและออกจากมวลช่องว่าง รูพรุน และการระเหยคายน้ำของพืช ส่งผลให้อัตราการสะสมความร้อนต่ำและแพร่กระจายความร้อนได้ไม่ดี

4. สรุป (Conclusion)

จากการวิเคราะห์ผล พื้นที่สีเขียวถ่ายเทความร้อนได้ดีมีอัตราการสะสมความร้อนต่ำ โดยนำความร้อนเข้าและออกผ่านช่องว่าง รูพรุน ของเนื้อวัสดุ อีกทั้งยังมีปัจจัยการระเหยคายน้ำของพืชร่วมด้วย ส่งผลให้ทั้งแนวดิ่งและแนวราบพื้นอาคารที่มีพื้นที่สีเขียวล้อมรอบมีอุณหภูมิต่ำกว่าพื้นคอนกรีต อันเนื่องมาจากพื้นคอนกรีตมีความทึบสูง ทุกอนุภาคเรียงชิดติดกัน ทำให้เกิดการแพร่กระจายความลาดชันของอุณหภูมิได้ดี แต่การนำความร้อนออกทำได้เฉพาะที่ผิวบน และผิวล่างเท่านั้น จึงเป็นเหตุให้เกิดการสะสมความร้อนสูงเกิดเป็นปรากฏการณ์เกาะความร้อนในเขตเมืองส่งผลให้มีค่าความสบายเชิงความร้อนต่ำนำไปสู่การใช้เครื่องปรับอากาศ ซึ่งทำให้เขตเมืองมีอากาศร้อนมากทั้งช่วงเวลากลางวันและกลางคืน

ด้วยเหตุนี้สภาพพื้นผิวโดยรอบอาคารที่เหมาะสม คือ พื้นที่สีเขียว เนื่องจากมีการถ่ายเทความร้อนได้ดี อีกทั้งยังมีผลต่อความสบายเชิงความร้อนของผู้อยู่อาศัยในการเป็นอยู่ทั้งเวลากลางวันและเวลากลางคืนในช่วงฤดูร้อน

5. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements)

งานวิจัยฉบับนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดีจากคำแนะนำของนาวาอากาศโท รองศาสตราจารย์ ดร.เทียนสิริ เหลืองวิไล ในด้านระเบียบวิธีวิจัยทางคณิตศาสตร์ และภาควิชาวิศวกรรมโยธากองวิศวกรรมไฟฟ้าและโยธา กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช ในการสนับสนุนเงินทุนและสถานที่ รวมถึงเครื่องมือทดสอบอุณหภูมิ ทางคณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

6. เอกสารอ้างอิง (References)

[1] Khamchiangta D, Dhakal S. Physical and non-physical factors driving urban heat island: case of Bangkok metropolitan administration. Thailand. Journal of Environmental Management. 2019, 248:1-13. (in Thai)

[2] Puljan V, Luangwilai T, Welamas W, Meechowna S, Leelayuth S, Moodleah S. Investigating the behavior of heat transfer through building walls with different covering materials by using Method of Lines (MOL). NKRAFA Journal of Science and Technology. 2021;17(1):1-10. (in Thai)

[3] Nuntasiri P, Rasisuttha S. Thermal comfort of low income people: case study of Baan Mankong Non Nong Wat 2. Academic Journal: Faculty of Architecture, Khon Kaen University. 2558;14(2):127-41. (in Thai)

[4] Intaraksa A. Role of latent heat flux and sensible heat flux in urban zoning, design and planning [dissertation]. [Bangkok (TH)]: Kasetsart University; 2014.

[5] Lamananchai T. Weather warning. Thai Meteorological Department; 2022.

[6] Weather report on 2021. Available from: https://www.tmd.go.th/province_weather_stat.php?StationNumber=48455

[7] Teanmanee T. Urban heat island and urban physical environment [master's thesis]. [Bangkok (TH)]: Silpakorn University; 2022.

[8] Rasitanon T. The thermal comfort and adaptability to living for Muslim on the coast area Songkhla province [master's thesis]. [Songkla (TH)]: Prince of Songkla University; 2010.

[9] Takkanon P. Thermal comfort: basic and models for hot and humid climates. Journal of the Faculty of Architecture Silpakorn University. 2005;21:133-46. (in Thai)

[10] rivanit M, Auttarat S. The summer thermal environment and human comfort of shaded outdoor and semi-outdoor spaces to living in the urban area of Chiang Mai city. Journal of Architectural/Planning research and studies (JARS). 2015;12(2):53-72. (in Thai)
[11] Norkaew S, Sangkaew Y, Yarak P, Wisetmuenwai O, Ketsakorn A. Assessment of indoor air quality in the lecture room of undergraduate students in a university in Pathumthani province. Journal of Safety and Health. 2022;15(1):173-86. (in Thai)
[12] Khetkrathok N, Suluksna K. Guidelines for the management of thermal comfort conditions in air-conditioned areas for energy saving case study library building Suranaree university of technology. Ladkrabang Engineering Journal. 2019;36(1):17-24. (in Thai)
[13] Wattanavichin P. The experimental study of thermal behavior with Phase Change Material Thermal Shield (PCMTS) inside lightweight wall during the daytime [thesis]. [Bangkok (TH)]: Thammasat University; 2015.
[14] Wongkhunkaew P, Konyai S. Effect of climate variability on sugarcane production of northeastern Thailand. 22nd National Graduate Research Conference. 2021:7-14. (in Thai)
[15] Ruengsillapanun K, Udtaranakron T, Pulngern T, Tangchirapat W, Jaturapitakkul C. Mechanical properties, shrinkage, and heat evolution of alkali activated fly ash concrete. Construction and Building Materials. 2021;299:1-14.
[16] Liqun H, Yangyang L, Xiaolong Z, Shaowen D, Zhuangzhuang, Hao L.H. Temperature characteristics of porous portland cement concrete during the hot summer session. Hindawi Advances in Materials Science and Engineering. 2017:1-10.

ปัจจัยที่เหมาะสมต่อการสร้างลวดลายบนผิวไม้สักด้วยไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

นัฐพงษ์ เนินชัด[1] วรพล มะโนสร้อย[2*] อภิศักดิ์ พรหมฝาย[3] และกันต์ อินทุวงศ์[4]

nernchad.nattapong@gmail.com[1], worapon.man@uru.ac.th[2*], Apisak.phr@uru.ac.th[3] inchgun@hotmail.com[4]

Received : 25-Mar-2022
Revised : 25-Oct-2022
Accepted : 1-Nov-2022

[1]สาขาวิชาเทคโนโลยีไฟฟ้า คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์

[2]สาขาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์อัจฉริยะ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์

[3]สาขาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์

[4]สาขาเทคโนโลยีอุตสาหการ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์

บทคัดย่อ

ปัจจุบันการพัฒนาผลิตภัณฑ์และเฟอร์นิเจอร์ไม้สักมีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศไทยและมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ซึ่งส่งผลให้เกิดเศษไม้เหลือใช้เป็นจำนวนมาก งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องสร้างลายไม้ด้วยไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงด้วยหม้อแปลงฟลายแบค และวิเคราะห์ปัจจัยที่เหมาะสมกับการสร้างลวดลายไม้ ได้แก่ ระดับความชื้นของไม้สัก และอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำกับโซเดียมคาร์บอเนต พบว่าปริมาณความชื้นระดับมาก และอัตราส่วนผสมน้ำต่อโซเดียมคาร์บอเนตที่ 200 มิลลิลิตร ต่อ 5 กรัม มีระดับความชัดเจนและความสวยงาม อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนั้นได้ประเมินประสิทธิภาพของนวัตกรรมและเทคโนโลยีสร้างลวดลายบนผิวไม้สักโดยใช้เครื่องสร้างลายไม้ด้วยไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงด้วยแบบสอบถามที่ผ่านการประเมิน IOC พบว่า การสังเกตการณ์ยอมรับนวัตกรรม และความต้องการคุณลักษณะนวัตกรรมและเทคโนโลยี มีค่าเฉลี่ยเป็น 4.71 และ 4.60 ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในระดับมากที่สุด ส่วนประสิทธิภาพของนวัตกรรมและเทคโนโลยี เนื้อหาสาระในคู่มือการใช้นวัตกรรมและเทคโนโลยี และความพึงพอใจของกลุ่มเป้าหมายที่มีต่อนวัตกรรมและเทคโนโลยี มีค่าเฉลี่ยเป็น 4.46 4.50 4.45 และ 4.50 ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในระดับมาก

คำสำคัญ: ไม้สัก ลวดลายบนผิวไม้สัก หม้อแปลงฟลายแบค

The Suitable Factors for Lichtenberg Figures on Teak Wood Surface with DC High Voltage Source

Nattapong Nernchad[1], Worapon Manosroi[2*], Apisak Phromfaiy[3] and Gunt Intuwong[4]

nernchad.nattapong@gmail.com [1], worapon.man@uru.ac.th[2*], Apisak.phr@uru.ac.th[3] inchgun@hotmail.com[4]

Received	: 25-Mar-2022
Revised	: 25-Oct-2022
Accepted	: 1-Nov-2022

[1]Electrical Technology, Faculty of Industrial Technology, Uttaradit Rajabhat University

[2]Smart Electronic Engineering, Faculty of Industrial Technology, Uttaradit Rajabhat University

[3]Computer Engineering, Faculty of Industrial Technology, Uttaradit Rajabhat University

[4]Industrial Technology Engineering, Faculty of Industrial Technology, Uttaradit Rajabhat University

Abstract

Nowadays, the teak furniture and products have increasing impact of the Thai economy system, therefore the waste of production process become increasing too. The objective of this research is developing the Lichtenberg wood burning machine with flyback transformer and analysis the appropriate factor for making Lichtenberg figures e.g., teak humidity, and the proportion between water and Sodium Carbonate. The result shows that the proportion of 200 ml of water and 5 G of NaHCO3 has significant most beautiful and best contrast to the Lichtenberg figures. Moreover, this research evaluated the innovation and technology by questionnaire is a pass IOC method. The results show that the innovation acceptance and the innovation and technology requirement have the average value of 4.71 and 4.60 respectively, which means a very high range. The efficiency of innovation and technology, innovation and technology manual and satisfaction with innovation and technology have the average value of 4.46, 4.50, 4.45 and 4.50 respectively which means a high range.

Keywords: Teak, Lichtenberg figures, flyback transformer

1. บทนำ

ไม้สักเป็นไม้ที่มีมูลค่าทางเศรษฐกิจ ในอดีตเป็นไม้ที่เป็นสินค้าส่งออก ทำรายได้หลักให้ประเทศ การใช้ประโยชน์จากไม้สักอย่างมีความรู้ จะทำให้เกิดความคุ้มค่าในการอนุรักษ์ความหลากหลายทางชีวภาพในการนำไม้สักมาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ จะต้องมีความเข้าใจในกระบวนการออกแบบ การนำมาใช้ประโยชน์ การผลิต การกำจัดของเสีย ตลอดจนการใช้งานผลิตภัณฑ์จนหมดอายุของผลิตภัณฑ์อย่างครบวงจร [1] อย่างไรก็ตาม ในยุคอุตสาหกรรมขยายตัว มีการใช้ทรัพยากรธรรมชาติจากไม้เป็นจำนวนมากในการนำมาแปรรูปเพื่อใช้ผลิตเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ มากมาย ความตระหนักในเรื่องสิ่งแวดล้อม ทำให้เกิดความสนใจในการแก้ไขปัญหาโดยวิธีลดการใช้ (Reduce) กลับมาใช้ซ้ำ (Reuse) และการแปรสภาพเพื่อนำมาใช้ใหม่ (Recycle) โดยเฉพาะภาคเหนือ ซึ่งมีพื้นที่ป่าชุมชนที่ได้รับการอนุมัติตั้งแต่ปีงบประมาณ พ.ศ. 2543 - 2561 จำนวน 4,155,311 ไร่ ซึ่งคิดเป็น 63 % ของประเทศ โรงงานแปรรูปไม้และโรงค้าผลิตภัณฑ์จำนวน 1,703 โรง [2] การพัฒนาคุณภาพผลิตภัณฑ์ไม้สักเพื่อส่งเสริมอุตสาหกรรมไม้สัก เป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มที่นำไปสู่การแข่งขันและการพึ่งพาตนเองโดยมีการวิจัยเชิงนวัตกรรมพัฒนาการแปรรูปเศษไม้สักเป็นสินค้ามีมูลค่าในรูปแบบที่เพิ่มทางเลือกให้แก่การแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์

การสร้างลวดลายให้กับเฟอร์นิเจอร์ขนาดเล็ก ของที่ระลึกหรือเศษไม้เหลือใช้เป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์ สามารถทำได้หลายวิธี เช่น การแกะสลักจากเครื่องกัด CNC การใช้เลเซอร์สร้างลวดลายต่าง ๆ การสร้างลวดลายด้วยวิธีดังกล่าวจะใช้สำหรับโรงงานขนาดใหญ่ เนื่องจากมีราคาสูง และต้องการผู้เชี่ยวชาญควบคุมการทำงาน สำหรับชุมชนหรือผู้ประกอบการรายย่อยมักจะทำชิ้นงานออกมาในลักษณะของงานฝีมือเป็นหลัก ดังนั้นการสร้างลายไม้ด้วยกระแสไฟฟ้าจึงเหมาะสมกับการสร้างผลิตภัณฑ์ที่ต้องการความเป็นเอกลักษณ์ที่ไม่ซ้ำกัน เนื่องจากลวดลายที่สร้างขึ้นมาจะขึ้นอยู่กับลักษณะของไม้แต่ละชิ้นที่นำมาใช้เป็นผลิตภัณฑ์ดังรูปที่ 1

จากการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ได้มีการศึกษาเกี่ยวกับองค์ความรู้ด้านการใช้ประโยชน์จากไม้สัก เช่น จตุรงค์ [3] ได้ออกแบบและพัฒนาผลิตภัณฑ์วัสดุการก่อสร้าง จากไม้สักขนาดเล็ก เพื่อการพาณิชย์ โดยการปรับปรุงสมบัติของเนื้อไม้และผิวไม้ โดยการใช้สารละลายมาเลอิกแอนไฮไดรด์ (maleic anhydride) 10% และสารละลาย ADK 10% ตามลำดับ ทาผิวไม้แล้วนำไปอบที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20 นาที พบว่าผลิตภัณฑ์ไม้สักมีสมบัติดีขึ้น ต้านการซึมน้ำได้ดี และสีไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก สามารถนำมาพัฒนาเป็นวัสดุไม้แปรรูปได้ทั้งแบบท่อน และแบบไม้ประสาน อฏฐม [1] ได้ศึกษาเกี่ยวกับองค์ความรู้ด้านการใช้ประโยชน์จากไม้สักในบริบทการออกแบบผลิตภัณฑ์ชุมชน พบว่า การนำไม้สักมาใช้ให้เกิดประโยชน์มากที่สุด ควรเพิ่มเอกลักษณ์ของท้องถิ่น รวมถึงควรบูรณาการกันระหว่างชุมชน ในการใช้ผลิตภัณฑ์ประเภทอื่น มาใช้ร่วมกันเพื่อให้ผลิตภัณฑ์เกิดมูลค่าเพิ่มและเกิดความยั่งยืน ธนกร และรัฐไท [4] ได้ศึกษาออกแบบผลิตภัณฑ์จากเศษไม้เหลือใช้ในอุตสาหกรรมแปรรูปไม้เพื่อส่งเสริมงานตกแต่งทางสถาปัตยกรรมพบว่า ม่านไม้ที่พับปรับได้ โคมไฟไม้ที่ติดผนังที่พับปรับได้และโคมไฟไม้ตั้งพื้นพับปรับได้ กลุ่มผู้เชี่ยวชาญด้านการออกแบบให้ความพึงพอใจในระดับมาก และกลุ่มผู้บริโภคงานออกแบบตกแต่งมีความพึงพอใจในระดับปานกลาง สำหรับงานวิจัยด้านการประยุกต์ใช้ไฟฟ้าแรงดันสูงพบว่า มีการสร้างแหล่งจ่ายไฟฟ้าแรงดันสูงจากหม้อแปลงฟลายแบคสำเร็จรูปหลายงานวิจัย ซึ่งจะมุ่งเน้นด้านการพัฒนาวงจรขับหม้อแปลง เช่น อาทิตย์ และ พิสิษฐ์ [5] ได้สร้างวงจรขับหม้อแปลงโดยการสร้างสัญญาณ PWM ด้วยไอซี NE555 และ TL494 ยุทธนา และเฉลิมพล [6] ได้นำเสนอการสร้างไฟฟ้าแรงดันสูงความถี่สูงโดยใช้หม้อแปลงฟลายแบคสำเร็จรูปเป็นแหล่งจ่ายด้านอินพุตให้หม้อแปลงเทสลา เพื่อเป็นชุดสาธิตการเบรกดาวน์ผ่านอากาศของอิเล็กโทรด ทรงกลม–ทรงกลม ระนาบ–ระนาบ ทรงกลม–ระนาบ และปลายแหลม–ระนาบ พบว่าเกิดการเบรกดาวน์ที่อิเล็กโทรดด้านเอาต์พุตทุกกรณีสำหรับกรณีเกิดการเบรกดาวน์ที่อิเล็กโทรดทรงกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร

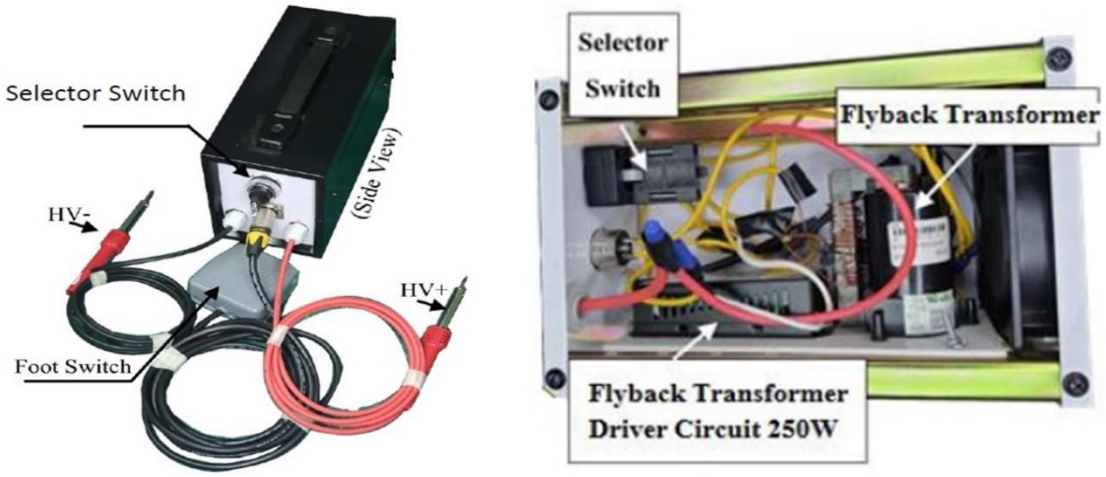
รูปที่ 1 เฟอร์นิเจอร์ไม้สักขนาดเล็กที่ใช้ในการสร้างลวดลายบนผิว

จากที่กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดประยุกต์ใช้หม้อแปลงฟลายแบคผลิตไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงเพื่อสร้างลวดลายบนผิวไม้สัก ซึ่งเป็นการเพิ่มมูลค่าเพิ่มให้กับผลิตภัณฑ์และเศษไม้เหลือใช้ในชุมชน ในส่วนของรายละเอียดการพัฒนาเครื่องสร้างลายไม้ด้วยไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง การทดสอบปริมาณสารละลายซึ่งส่งผลต่อการเกิดลายไม้ การออกแบบการทดลองแสดงในหัวข้อที่ 2 ผลการทดลอง การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความชื้นบนผิวไม้สักกับปริมาณสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตที่เหมาะสมกับการเกิดลวดลายไม้ พร้อมกับได้ทำการประเมินประสิทธิภาพของนวัตกรรมและเทคโนโลยีแสดงในหัวข้อที่ 3 และสรุปในหัวข้อที่ 4

2. วิธีดำเนินงานวิจัย

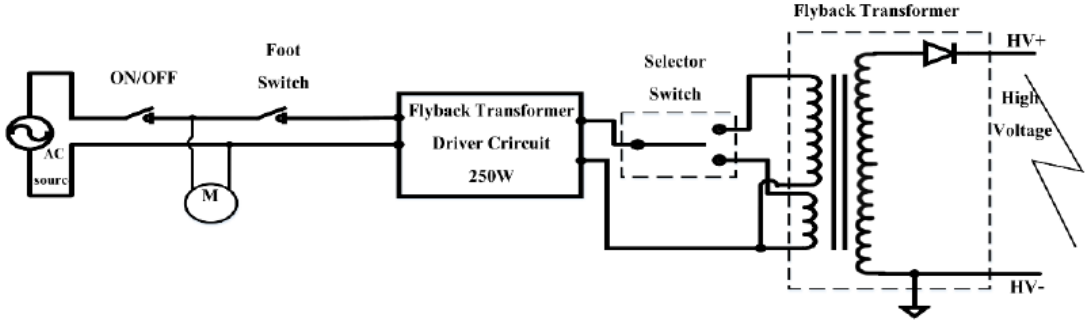
2.1 เครื่องสร้างลายไม้ด้วยไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

การสร้างลายไม้ด้วยไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงโดยได้ใช้หม้อแปลงฟลายแบคจะใช้สำหรับการสร้างลายไม้ในระยะใกล้ซึ่งเหมาะสมกับการสร้างลายไม้บนผลิตภัณฑ์ที่มีขนาดเล็ก ซึ่งประกอบด้วย 1) สวิตช์เลือกระดับแรงดันไฟฟ้า (Selector switch) ใช้สำหรับเลือกระดับแรงดันไฟฟ้า โดยแบ่งเป็นแรงดันสูงระดับที่ 1 และแรงดันสูงระดับที่ 2 2) หัวโพรบขั้วลบ (HV-)



(ก) (ข)

รูปที่ 2 เครื่องสร้างลายไม้ด้วยไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง (ก) ด้านนอกเครื่อง (ข) ด้านในเครื่อง



รูปที่ 3 วงจรเครื่องสร้างลายไม้ไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

3) หัวโพรบขั้วบวก (HV+) 4) สวิตช์เท้าเหยียบ (Foot Switch) ใช้สำหรับสั่งเครื่องให้ทำงานเมื่อต้องการเริ่มสร้างลายไม้ 5) ชุดขับหม้อแปลงขนาด 250W 6) หม้อแปลงฟลายแบค ดังรูปที่ 2 ในส่วนของวงจรการเชื่อมต่อสามารถแสดงดังรูปที่2

2.2 การทดสอบปริมาณสารละลายซึ่งส่งผลต่อการเกิดลายไม้

การทดสอบความสัมพันธ์ระหว่างพลังงานไฟฟ้ากับปริมาณสารละลายที่ใช้บนผิวไม้ซึ่งส่งผลต่อการเกิดลายไม้ มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

2.2.1 การเตรียมชิ้นงาน

งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้ไม้สักสำหรับการทดสอบ เนื่องจากในภาคเหนือโดยเฉพาะจังหวัดแพร่มีผลิตภัณฑ์และเฟอร์นิเจอร์จากไม้สักเป็นจำนวนมาก ดังนั้นจึงมีเศษไม้เหลือใช้จากกระบวนการผลิตเป็นจำนวนมาก โดยการทดสอบนั้น คณะผู้วิจัยได้เลือกใช้ไม้ที่มีขนาดกว้าง 10 เซนติเมตร ตัดความยาวขนาด 20 เซนติเมตร นำมาทดลองสร้างลายไม้ด้วยเครื่องสร้างลายไม้ด้วยไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

2.2.2 การเตรียมสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต

โซเดียมไบคาร์บอเนต มีสูตรทางเคมี $NaHCO_3$ มีลักษณะเป็นของแข็งสีขาว มีโครงสร้างเป็นผลึก แต่ปรากฏในรูปผงละเอียด ดังรูปที่ 4 มีคุณสมบัติเป็นเบส มีชื่อทางการค้าที่เรียกกันทั่วไปหลายชื่อด้วยกัน เช่น เบ็คกิ้งโซดา (baking soda) เบรดโซดา (bread soda) คุ๊กกิ้งโซดา (cooking soda) และ ไบคาร์บอเนตโซดา (bicarbonate of soda) ปริมาณส่วนผสมของโซเดียมไบคาร์บอเนต (NaHCO3) กับน้ำเปล่าแบ่งออกเป็น 3 ระดับ ได้แก่ น้อย กลาง มาก โดยมีอัตราส่วนผสมของโซเดียมไบคาร์บอเนต 2 กรัม 5 กรัม 10 กรัม ต่อน้ำ 200 มิลลิลิตร ตามลำดับ

รูปที่ 4 โซเดียมไบคาร์บอเนต

2.2.3 การทาสารละลายบนชิ้นงาน

หลังจากผสมสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตในอัตราส่วนตามขั้นตอนข้างต้น คณะผู้วิจัยได้ทาสารละลายบนชิ้นงาน และได้กำหนดระยะเวลาการทาสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตที่ผิวชิ้นงานและพักชิ้นงานไว้ 2 ช่วงเวลา คือ 2 นาที และ 5 นาที ซึ่งส่งผลให้เกิดระดับความชื้นมาก และความชื้นน้อย ตามลำดับ เนื่องจากการพักชิ้นงานไว้เป็นเวลานานจะทำให้ระดับความชื้นลดลง โดยได้ใช้เครื่องมือวัดความชื้นของชิ้นงานก่อนและหลังทาสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนต ดังรูปที่ 5

(ก) (ข)

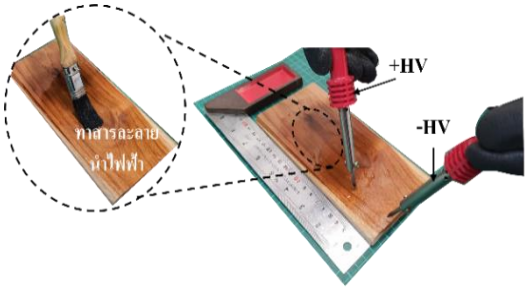
รูปที่ 5 การวัดค่าความชื้นของชิ้นงาน (ก) ก่อนทาสารละลาย (ข) หลังทาสารละลาย

2.3 การออกแบบการทดลอง

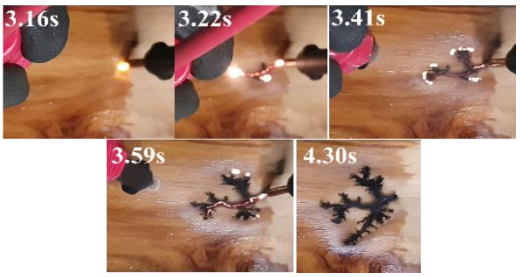
งานวิจัยนี้ได้ออกแบบการทดลองและจัดเก็บข้อมูล แยกเป็น 2 ส่วนได้แก่

2.3.1 ปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับการสร้างลายไม้ด้วยไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

ปัจจัยที่นำมาพิจารณาประกอบด้วย ระดับความชื้นของไม้สักแบ่งเป็น 2 ระดับคือมีความชื้นมาก และความชื้นน้อย และปัจจัยที่สองคืออัตราส่วนผสมของน้ำต่อโซเดียมคาร์บอเนต แบ่งเป็น 3 ระดับ คือ 2 กรัม 5 กรัม 10 กรัม ต่อน้ำ 200 ml ตามลำดับ โดยได้กำหนดระยะห่างระหว่างหัวโพรบขั้วลบ (HV-) และหัวโพรบขั้วบวก (HV+) ในขั้นตอนการสร้างลวดลายบนผิวไม้สัก 5 เซ็นติเมตร ดังรูปที่ 6 และ รูปที่ 7



รูปที่ 6 ระยะห่างระหว่างหัวโพรบขั้วลบ (HV-) และหัวโพรบขั้วบวก (HV+)



รูปที่ 7 การสร้างลวดลายบนผิวไม้สักด้วยเครื่องสร้างลายไม้ด้วยไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

จากรูปที่ 6 แสดงถึงการสร้างลวดลายบนผิวไม้สักด้วยเครื่องสร้างลายไม้ด้วยไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง สังเกตุได้ว่าลวดลายเกิดขึ้นจากการเผาไหม้บนผิวไม้สักระหว่างหัวโพรบขั้วลบกับหัวโพรบขั้วบวก อย่างไรก็ตามลวดลายที่เกิดขึ้นจะมีลวดลายที่แตกต่างกันซึ่งขึ้นอยู่กับไม้แต่ละแผ่น ดังรูปที่ 8

รูปที่ 8 ลวดลายที่เกิดขึ้นบนไม้แต่ละแผ่น

สำหรับการพิจารณาปัจจัยที่ส่งผล คณะผู้วิจัยได้นำชิ้นงานให้ผู้ประกอบการและบุคคลทั่วไปประเมินชิ้นงานด้วยวิธีการ Rating Scale คะแนน 1-5 โดยแบ่งเป็น ความชัดเจน และความสวยงาม ของลวดลายที่เกิดขึ้นบนชิ้นงานในแต่ละกรรมวิธี (Treatment)

กรรมวิธีที่ใช้ในงานวิจัยนี้มีทั้งสิ้น 6 กรรมวิธีนั่นคือ กรรมวิธีที่ 1 มีระดับความชื้นบนผิวไม้มากและปริมาณโซเดียมคาร์บอเน็ต 2 กรัม กรรมวิธีที่ 2 มีระดับความชื้นบนผิวไม้มากและปริมาณโซเดียมคาร์บอเน็ต 5 กรัม กรรมวิธีที่ 3 มีระดับความชื้นบนผิวไม้น้อยและปริมาณโซเดียมคาร์บอเน็ต 5 กรัม กรรมวิธีที่ 4 มีระดับความชื้นบนผิวไม้น้อยและปริมาณโซเดียมคาร์บอเน็ต 5 กรัม กรรมวิธีที่ 5 มีระดับความชื้นบนผิวไม้น้อยและปริมาณโซเดียมคาร์บอเน็ต 10 กรัม

2.3.2 การประเมินประสิทธิภาพของนวัตกรรมและเทคโนโลยี

งานวิจัยนี้ได้เลือกใช้แบบสอบถาม (Questionnaire) เป็นเครื่องมือในการเก็บรวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับประสิทธิภาพของนวัตกรรมและเทคโนโลยี ดังนี้

ชุดที่ 1 การสังเกตการณ์ยอมรับนวัตกรรม

ชุดที่ 2 ความต้องการคุณลักษณะนวัตกรรมและเทคโนโลยี

ชุดที่ 3 คุณลักษณะที่เหมาะสมกับการใช้งานนวัตกรรม

ชุดที่ 4 ประสิทธิภาพของนวัตกรรมและเทคโนโลยี

ชุดที่ 5 เนื้อหาสาระในคู่มือการใช้นวัตกรรมและเทคโนโลยี

ชุดที่ 6 ความพึงพอใจของกลุ่มเป้าหมายที่มีต่อนวัตกรรมและเทคโนโลยี

สำหรับเกณฑ์การให้คะแนนแบบสอบถามมาตราส่วนประมาณค่า 5 ตัวเลือกทั้งหมดใช้หลักการ ให้คะแนนตั้งแต่ 1-5 เรียงตามลำดับ ดังนี้

5 หมายถึง อยู่ในระดับมากที่สุด
4 หมายถึง อยู่ในระดับมาก
3 หมายถึง อยู่ในระดับปานกลาง
2 หมายถึง อยู่ในระดับน้อย
1 หมายถึง อยู่ในระดับน้อยที่สุด

การแปลความหมายของค่าคะแนนเฉลี่ยของผู้ตอบแบบสอบถาม มีความพึงพอใจและมีความรู้ความเข้าใจกำหนดช่วงคะแนนเฉลี่ย กำหนดช่วงคะแนนเฉลี่ยโดยใช้เกณฑ์ดังนี้

ค่าคะแนนเฉลี่ย 4.51 – 5.00 มากที่สุด
ค่าคะแนนเฉลี่ย 3.51 – 4.50 หมายถึง มาก
ค่าคะแนนเฉลี่ย 2.51 – 3.50 ปานกลาง
ค่าคะแนนเฉลี่ย 1.51 – 2.50 หมายถึง น้อย
ค่าคะแนนเฉลี่ย 1.00 – 1.50 หมายถึง น้อยที่สุด

แบบสอบถามข้างต้นนี้ได้ขอคำปรึกษาจากผู้เชี่ยวชาญจำนวน 5 ท่าน เพื่อตรวจสอบหาข้อบกพร่องและปรับปรุงแก้ไขให้เหมาะสมยิ่งขึ้น สำหรับการพิจารณาความเที่ยงตรงเชิงเนื้อหา (Content Validity) โดยให้คะแนนตามวิธีการของ โรวิเนลลี และแฮมเบิลตัน (Rainelli & Hambleton) ซึ่งมีวิธีการให้คะแนนดังนี้ [7] , [8]

+1 หมายถึง เมื่อแน่ใจว่าข้อคำถามนั้นวัดตรงจุดประสงค์

0 หมายถึง เมื่อไม่แน่ใจว่าข้อคำถามนั้นตรงจุดประสงค์

-1 หมายถึง เมื่อแน่ใจว่าข้อคำถามนั้นวัดไม่ตรงจุดประสงค์

จากนั้นนำผลการพิจารณามาคำนวณหาค่า IOC ถ้าค่า IOC ที่ทำการคำนวณได้มีค่ามากกว่าหรือเท่ากับ 0.50 แสดงว่าแบบสอบถามข้อนั้นสามารถวัดจุดประสงค์ข้อนั้น แต่ถ้าคำนวณแล้วมีค่าน้อยกว่า 0.50 แสดงว่าแบบสอบถามข้อนั้นไม่ได้วัดจุดประสงค์ข้อนั้นต้องนำไปทำการปรับปรุงแก้ไขใหม่จนได้ค่า IOC มากกว่าหรือเท่ากับ 0.50 โดยแบบสอบถามที่สร้างขึ้นนี้มีค่า 0.60 ถึง 1.00 แสดงว่าข้อคำถามที่ใช้มีความสอดคล้องกับจุดประสงค์ทุกข้อ

ในงานวิจัยนี้ได้ทำการปรับปรุง แก้ไขแบบสอบถามที่ผู้เชี่ยวชาญเสนอแนะ จากนั้นนำไปทดลองใช้ (Try Out) กับกลุ่มชุมชนและกลุ่มผู้ประกอบการที่ไม่ใช่กลุ่มตัวอย่างจำนวน 30 คน เพื่อหาค่าความเชื่อมั่น (Reliability) ของแบบสอบถาม โดยใช้วิธีการหาสัมประสิทธิ์แอลฟา (Alpha-Coefficient) ตามวิธีของครอนบาค (Cranach) โดยหาค่าความเชื่อมั่นเท่ากับ 0.85

3. ผลการทดลอง

งานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างระดับความชื้นบนผิวไม้สักกับปริมาณสารละลายโซเดียมไบคาร์บอเนตที่เหมาะสมกับการเกิดลวดลายไม้ พร้อมกับได้ทำการประเมินประสิทธิภาพของนวัตกรรมและเทคโนโลยีดังนี้

3.1 ผลการทดสอบการสร้างลายบนผิวไม้สักด้วยไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง

ผลการทดสอบการสร้างลวดลายบนผิวไม้สักโดยใช้เครื่องสร้างลายไม้ด้วยไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง ซึ่งวิเคราะห์ร่วมกับระดับคือมีความชื้นและอัตราส่วนผสมของน้ำต่อโซเดียมคาร์บอเนต สามารถแบ่งเป็นกรรมวิธีในการสร้างลวดลายจำนวน 6 กรรมวิธี แต่ละกรรมวิธีจะทำการทดสอบกับแผ่นไม้สักที่ได้เตรียมไว้จำนวน 5 ครั้ง รวมการทดลองทั้งหมด 30 ครั้ง ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการสร้างลวดลายบนผิวไม้สักแต่ละกรรมวิธี

กรรมวิธี	ความชัดเจน	ความสวยงาม
1	2.77 ^{ab}	2.61 ^{ab}
2	2.90 ^{a}	2.78 ^{a}
3	2.70 ^{ab}	2.58 ^{b}
4	2.43 ^{b}	2.37 ^{b}
5	2.56 ^{ab}	2.67 ^{ab}
6	2.38 ^{b}	2.52 ^{b}
f-test	*	*
cv	18.47	15.17

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยที่แสดงในตารางที่มีตัวอักษรต่างกัน (a , b) ในคอลัมน์เดียวกัน มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมัน 95 เปอร์เซ็นต์ จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี Duncan's New Multiple's Range Test (DMRT)

* = แตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

จากตารางที่ 1 ผลการสร้างลวดลายบนผิวไม้สักโดยใช้กรรมวิธีในการสร้างลาย 6 กรรมวิธี ในด้านความชัดเจนของลวดลายพบว่าจะมีคะแนนความชอบอยู่สูงสุดอยู่ที่กรรมวิธีที่ 2 คือมีปริมาณความชื้นมากและใช้ส่วนผสมที่ปริมาณโซเดียมคาร์บอเนตต่อน้ำเป็น 5 g : 200 ml อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และพบว่าไม้ที่มีความชื้นมากจะมีระดับความชัดเจนที่ดีกว่าความชื้นน้อย ในส่วนของความสวยงามพบเช่นเดียวกันว่าในกรรมวิธีที่ 2 จะให้ความสวยงามสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ดังนั้นจึงควรใช้กรรมวิธีที่ 2 ในการสร้างลวดลายบนเนื้อไม้จะทำให้ได้ความชัดเจนและความสวยงามที่ดี

3.2 ผลการประเมินประสิทธิภาพของนวัตกรรมและเทคโนโลยี

การเก็บข้อมูลจากแบบสอบถามเกี่ยวกับการประเมินประสิทธิภาพของนวัตกรรมและเทคโนโลยีสร้างลวดลายบนผิวไม้สักโดยใช้เครื่องสร้างลายไม้ด้วยไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูง โดยเกณฑ์การให้คะแนนแบบสอบถามมาตราส่วนประมาณค่า 5 ตัวเลือกทั้งหมดใช้หลักการ ให้คะแนนตั้งแต่ 1-5 พบว่า การสังเกตการณ์ยอมรับนวัตกรรม และ ความต้องการคุณลักษณะนวัตกรรมและเทคโนโลยี มีค่าเฉลี่ยเป็น 4.71 และ 4.60 ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในระดับมากที่สุด ส่วนคุณลักษณะที่เหมาะสมกับการใช้งานนวัตกรรม ประสิทธิภาพของนวัตกรรมและเทคโนโลยี เนื้อหาสาระในคู่มือการใช้นวัตกรรมและเทคโนโลยี และความพึงพอใจของกลุ่มเป้าหมายที่มีต่อนวัตกรรมและเทคโนโลยี มีค่าเฉลี่ยเป็น 4.46 4.50 4.45 และ 4.50 ตามลำดับ ซึ่งอยู่ในระดับมาก แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการประเมินประสิทธิภาพของนวัตกรรมและเทคโนโลยี

ชุดแบบสอบถาม	ค่าเฉลี่ย	ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ระดับการยอมรับ
ชุดที่ 1 การสังเกตการณ์ยอมรับนวัตกรรม	4.71	0.48	มากที่สุด
ชุดที่ 2 ความต้องการคุณลักษณะนวัตกรรมและเทคโนโลยี	4.60	0.63	มากที่สุด
ชุดที่ 3 คุณลักษณะที่เหมาะสมกับการใช้งานนวัตกรรม	4.46	0.59	มาก
ชุดที่ 4 ประสิทธิภาพของนวัตกรรมและเทคโนโลยี	4.50	0.60	มาก
ชุดที่ 5 เนื้อหาสาระในคู่มือการใช้นวัตกรรมและเทคโนโลยี	4.45	0.51	มาก
ชุดที่ 6 ความพึงพอใจของกลุ่มเป้าหมายที่มีต่อนวัตกรรมและเทคโนโลยี	4.50	0.60	มาก

4. สรุป

การพัฒนาคุณภาพผลิตภัณฑ์ไม้สักเพื่อส่งเสริมอุตสาหกรรมไม้สัก เป็นการสร้างมูลค่าเพิ่มที่นำไปสู่การแข่งขันและการพึ่งพาตนเองโดยมีการวิจัยเชิงนวัตกรรมพัฒนาการแปรรูปเศษไม้สักเป็นสินค้ามีมูลค่าในรูปแบบที่เพิ่มทางเลือกให้แก่การแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ งานวิจัยนี้ได้วิเคราะห์ระดับความชื้นของไม้สัก และอัตราส่วนผสมระหว่างน้ำกับโซเดียมคาร์บอเนต โดยแบ่งออกเป็น 6 กรรมวิธี พบว่า กรรมวิธีที่ 2 คือ ปริมาณความชื้นระดับมากและส่วนผสมน้ำต่อโซเดียมคาร์บอเนตที่ 200 ml : 5 g มีระดับความชัดเจนและความสวยงาม มากกว่ากรรมวิธีอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ นอกจากนั้นได้ประเมินประสิทธิภาพของนวัตกรรมและเทคโนโลยีสร้างลวดลายบนผิวไม้สักโดยใช้เครื่องสร้างลายไม้ด้วยไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงด้วยแบบสอบถามทั้งหมด 6 ชุดแบบสอบถาม พบว่า มีการสังเกตการณ์ยอมรับนวัตกรรม และ ความต้องการคุณลักษณะนวัตกรรมและเทคโนโลยี อยู่ในระดับมากที่สุด ส่วนประสิทธิภาพของนวัตกรรมและเทคโนโลยี เนื้อหาสาระในคู่มือการใช้นวัตกรรมและเทคโนโลยี และความพึงพอใจของกลุ่มเป้าหมายที่มีต่อนวัตกรรมและเทคโนโลยีอยู่ในระดับมาก ในส่วนของข้อดีของเครื่องสร้างลายไม้ด้วยไฟฟ้ากระแสตรงแรงดันสูงสามารถสร้างลวดลาย

กับเศษไม้ชิ้นเล็กเพราะระยะหัวโพรบขั้วบวกกับหัวโพรบขั้วลบใกล้กันได้ สำหรับข้อเสนอแนะเพื่อต่อยอดงานวิจัยสามารถเพิ่มระดับแรงดันไฟฟ้าของเครื่องสร้างลายไม้และหาสารละลายใหม่ที่เหมาะสมที่จะทำให้เกิดลวดลายบนผิดไม้ที่แตกต่างออกไป

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ กองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) และ สถาบันวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์ ที่สนับสนุนทุนวิจัย และให้คำปรึกษาอย่างจริงจังและต่อเนื่องมาโดยตลอด

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Saributr A, Saributr U, Phetsinchorn A. knowledge of the utilization of teak in the context of community product design. JOURNAL OF INDUSTRIAL EDUCATION. 2021;20(3):68-79. (in Thai)

[2] Royal Forest Department. Statistical data of the Royal Forest Department in 2018. Bangkok: Information and Communication Technology Center; 2002

[3] Louhapensang C. Development industrial material from teak wood aged between 7-14 year for commercial and sustainable use. Journal of industrial education. 2018;17(2):109-16. (in Thai)

[4] Nirunnoot T, Porncharoen R. Case study and design waste residues from the wood processing industry to the enhancement of architecture. Art and Architecture Journal Naresuan University. 2016;7(1):1-14. (in Thai)

[5] Yawootti A, Wimonthanasit P. High voltage power supply from commercial flyback transformer. Journal of Engineering, RMUTT. 2018;16(2):107-18. (in Thai)

[6] Kanthaphayao Y, Rueangepattanawiwat C. Application of a commercial flyback transformer for a high frequency high voltage source. RMUTP Research Journal. 2021;15(2):40-8. (in Thai)

[7] Hambleton R. K. Validating the test scores. In R. A. Berk. (Ed), in A guide to criterion-referenced test construction. Baltimore and London: Hopkins University Press; 1984.

[8] Tuntavanitch P and Jindasri P. The real meaning of IOC. Journal of Educational Measurement, Mahasarakham University. 2018;24(2):3-12. (in Thai)

ผลของชนิดข้าวที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารแอนโทไซยานินและสมบัติทางกายภาพในผลิตภัณฑ์บ๊ะจ่าง

สุนัน ปานสาคร[1*] และจตุรงค์ ลังกาพินธุ์[1]

sunan.p@en.rmutt.ac.th[1*], jaturong.l@en.rmutt.ac.th[1]

Received	: 18-Feb-2022
Revised	: 29-Oct-2022
Accepted	: 1-Nov-2022

[1]ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

บทคัดย่อ

งานวิจัยศึกษาผลของชนิดข้าวที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารแอนโทไซยานินและสมบัติทางกายภาพในผลิตภัณฑ์บ๊ะจ่าง ข้าวที่ใช้คือ ข้าวเหนียวขาว ข้าวเหนียวดำ และข้าวไรซ์เบอรี่ แบ่งเป็นตัวอย่างที่ 1 ข้าวเหนียวขาว 100 เปอร์เซ็นต์ ตัวอย่างที่ 2 ข้าวเหนียวขาวผสมข้าวเหนียวดำอย่างละ 50 เปอร์เซ็นต์ ตัวอย่างที่ 3 ข้าวเหนียวขาวผสมข้าวไรซ์เบอร์รี่อย่างละ 50 เปอร์เซ็นต์ และตัวอย่างที่ 4 ข้าวเหนียวดำผสมข้าวไรซ์เบอร์รี่อย่างละ 50 เปอร์เซ็นต์ พบว่าการใช้ข้าวเหนียวขาว 100 เปอร์เซ็นต์ ให้วอเตอร์แอคติวิตี้ ต่ำสุด 0.854 ในขณะที่ใช้ข้าวเหนียวสูตรผสมวอเตอร์แอคติวิตี้ มีค่าระหว่าง 0.888-0.929 สอดคล้องกับความชื้นที่มีค่าใกล้เคียงกันทั้ง 4 ตัวอย่าง (51.30- 57.25 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก) ค่าความแข็งของการใช้ข้าวเหนียวขาว 100 เปอร์เซ็นต์ ให้ค่าความแข็งสูงสุด 32.14 นิวตัน ในขณะที่ตัวอย่างข้าวเหนียวดำผสมข้าวไรซ์เบอร์รี่ ให้ค่าต่ำสุด 8.97 นิวตัน เมื่อนำไปทดสอบความพึงพอใจของผู้บริโภคทั้ง 4 ตัวอย่าง พบว่าข้าวเหนียวดำผสมข้าวไรซ์เบอร์รี่ มีคะแนนความชอบที่ระดับชอบปานกลางถึงชอบมาก (6.60-7.57) ซึ่งสูงสุดในด้านลักษณะปรากฏ กลิ่น สี รสชาติ และความชอบโดยรวม การทดสอบค่าสีพบว่าการใช้ข้าวเหนียวขาว 100 เปอร์เซ็นต์ ให้ค่า L* สูงสุดและมีแนวโน้มลดลงเมื่อผสมกับข้าวชนิดอื่นและให้ผลเช่นเดียวกับค่าความเป็นสีเหลือง (b*) ในขณะที่ค่าความเป็นสีแดง (a*) เพิ่มขึ้นเมื่อนำข้าวเหนียวดำผสมข้าวไรซ์เบอร์รี่ และการทดสอบสารแอนโทไซยานินในข้าวเหนียวขาว 100 เปอร์เซ็นต์ ให้ค่าปริมาณสารแอนโทไซยานินต่ำสุดเท่ากับ 0.063 กรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง เมื่อนำข้าวไรซ์เบอรี่ และข้าวเหนียวดำ มาผสมพบว่าปริมาณสารแอนโทไซยานินเพิ่มขึ้นและให้ค่าระหว่าง 0.193-0.220 กรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง

คำสำคัญ: ข้าวเหนียวขาว ข้าวเหนียวดำ ข้าวไรซ์เบอรี่ บ๊ะจ่าง

Effect of Different Rice Varieties on Changes in Anthocyanin Content and Physical Properties of Zongzi Products

Sunan Parnsakhorn[1*] and Jaturong Langkapin[1]

sunan.p@en.rmutt.ac.th[1*], jaturong.l@en.rmutt.ac.th[1]

Received	: 18-Feb-2022
Revised	: 29-Oct-2022
Accepted	: 1-Nov-2022

[1] Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Abstract

This research was to study the effect of different rice varieties on changes in anthocyanin content and physical properties of Zongzi products. White glutinous rice, black sticky rice and riceberry rice were used in this study, divided into the first sample 100% white glutinous rice, the second sample: white glutinous rice mixed with black sticky rice 50% each, the third sample white glutinous rice mixed with riceberry rice 50% each and the fourth example black glutinous rice mixed with riceberry rice 50% each. It was found that the use of 100% white glutinous rice had the lowest water activity content of 0.854, while the water activity content of glutinous rice mixed with the formula showed water activity content between 0.888-0.929. Also, related to the moisture content with similar values in all 4 samples (51.30-57.25%wb). The condition of 100% white glutinous rice showed, the highest hardness of 32.14 N, while the black sticky rice mixed with riceberry rice gave the lowest value at 8.97 N. For sensory test in all 4 samples, it was found that black glutinous rice mixed with riceberry rice presented score at the level of like moderately to like very much (6.60-7.57), in terms of appearance, odor, color, taste and overall preference. The color test showed that 100% white glutinous rice gave the highest L* value and tended to decrease when mixed with other types of rice and the same results were presented as the yellowness value (b*), while the redness value (a*) increased when mixed with black sticky rice and riceberry rice. For anthocyanin determination, 100% white glutinous rice contained the lowest anthocyanin content of 0.063 g/g dry weight. While riceberry rice and black sticky rice were found that their anthocyanin contents increased and the value was between 0.193-0.220 g/g dry weights.

Keywords: White glutinous rice, Black sticky rice, Rice berry, Zongzi

1. บทนำ

บ๊ะจ่าง (Chinese Zongzi หรือ Chinese oily sticky rice) เป็นอาหารคาวชนิดหนึ่งที่มาจากประเทศจีน บ้างเรียก ขนมจ้าง มีทั้งแบบใส่ไส้และไม่ใส่ไส้ แบบไม่ใส่ไส้เรียกว่า กี่จ่าง หรือขนมจ้างจืด ใช้จิ้มกินกับน้ำตาล แบบใส่ไส้ ทำด้วยข้าวเหนียวนำมาผัดกับน้ำมัน ภายในบรรจุมีหลากหลายแบบ เช่น ไส้พะโล้ ไส้หมูเค็ม มีการใส่กุนเชียง ไข่เค็ม เห็ดหอม กุ้งแห้ง เป็นต้น [1] ผู้บริโภคส่วนใหญ่คือกลุ่มคนไทยเชื้อสายจีน กลุ่มผู้ใหญ่วัยทำงาน การบริโภคบะจ่างนิยมบริโภคในเทศกาลไหว้บ๊ะจ่าง ซึ่งเป็นประเพณีสืบทอดกันมาอย่างยาวนานของชาวจีน ตรงกับวันที่ 5 เดือน 5 หรือเรียกว่าเทศกาลเดือนห้า [2] หรือเทศกาลเจ และนิยมสำหรับงานพิธีหรืองานเลี้ยงต่างๆ อย่างไรก็ตามในช่วงนอกเทศกาล บ๊ะจ่างก็มีวางจำหน่ายสำหรับผู้บริโภคที่สนใจหารับประทาน ทั้งนี้ส่วนใหญ่บ๊ะจ่างที่วางจำหน่ายโดยทั่วไปเป็นการสืบทอดสูตรมาจากบรรพบุรุษแบบรุ่นสู่รุ่นอย่างยาวนาน ดังนั้นสูตรของบ๊ะจ่างแต่ละร้านจึงเป็นสูตรต้นตำรับที่ไม่เหมือนใคร แต่ยังคงไว้ซึ่งรสชาติอร่อย ความสดใหม่ คุณภาพที่ดีใช้วัตถุดิบที่ดี และความสะอาด ปัจจุบันคนไทยหันมาใส่ใจเรื่องการบริโภคมากขึ้น โดยพบว่าผู้บริโภคกว่าร้อยละ 55 เห็นว่าการบริโภคโปรตีนจากเนื้อสัตว์ให้คุณค่าน้อยกว่าการบริโภคโปรตีนจากพืช และลดการบริโภคเนื้อสัตว์ รวมถึงพบว่าร้อยละ 76 เลือกรับประทานโปรตีนจากพืช เช่น ผักใบเขียวและถั่ว [3] ดังนั้นปัจจุบันจึงมีการคิดค้นสูตรผลิตภัณฑ์บ๊ะจ่างให้หลากหลายขึ้น เพื่อเข้าถึงผู้บริโภคในยุคนี้ มีทั้งบ๊ะจ่างสูตรเพื่อคนรักสุขภาพ เช่น บ๊ะจ่างมังสวิรัติรวมถึงการพัฒนาผลิตภัณฑ์บ๊ะจ่างกึ่งสำเร็จรูปเพื่อตอบสนองการใช้ชีวิตของคนเมือง [4]

บ๊ะจ่างเป็นอาหารที่เข้าถึงผู้บริโภคได้ง่าย เนื่องจากรับประทานง่าย สะดวกในการรับประทาน มีรสชาติหลากหลาย ทำให้ถูกปากทั้งคนไทย และของชาวต่างชาติที่สนใจ ประกอบกับในผลิตภัณฑ์บ๊ะจ่างมีส่วนประกอบที่หลากหลายดังที่กล่าวมาข้นต้น จึงเป็นอาหารเพื่อสุขภาพ ทั้งนี้เพื่อตอบโจทย์สำหรับคนรักสุขภาพมากขึ้นจะพบว่าวัตถุดิบหลักชนิดหนึ่งในผลิตภัณฑ์บ๊ะจ่างคือข้าว ปรกติจะใช้เป็นข้าวเหนียวขาว สายพันธุ์ที่นิยมนำมาใช้ ได้แก่ ข้าวเหนียวเขี้ยวงู ซึ่งเป็นข้าวที่ผ่านการขัดสีจนเมล็ดมีสีขาวเรียวยาว ดังนั้นคุณค่าทางโภชนาการจึงลดลงแต่ในแง่ดีคือ เมื่อนึ่งสุกแล้วมีสีขาว นุ่มเหนียวติดกันแต่ไม่เละมีความเลื่อมมันค่อนข้างมากและมีกลิ่นหอม [5] ด้วยความที่ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมมีการเพาะปลูกและพัฒนาสายพันธุ์ข้าวชนิดต่างๆ ที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง ได้แก่ ข้าวเหนียวดำ และข้าวไรซ์เบอรี่ ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการใช้ข้าวทั้งสองชนิดมาผลิตผลิตภัณฑ์บ๊ะจ่างสำหรับเป็นทางเลือกของกลุ่มผู้บริโภคที่รักสุขภาพหรือผู้บริโภคทั่วไป

ข้าวเหนียวดำ (Black sticky rice) เป็นข้าวพันธุ์พื้นบ้านของทางภาคเหนือ และภาคอีสานของไทย ที่มีลักษณะโดดเด่นของสีม่วงทั้งลำต้นและเมล็ด นิยมนำมารับประทานในรูปแบบขนมหวาน ในข้าวเหนียวดำมีสาร "แกมมาโอไรซานอล" (gamma oryzanol) ซึ่งสามารถลดความเสี่ยงของการเป็นโรคหัวใจได้ ลดไขมันอุดตันในหลอดเลือด ที่สำคัญข้าวเหนียวดำยังอุดมไปด้วย วิตามิน บี1 บี2 และบี6วิตามิน เอ อี ช่วยบำรุงสมองและสายตา ช่วยลดระดับโคเลสเตอรอล ลดไขมันอุดตันในเลือด ปรับความดันเลือดให้เป็นปรกติ ต้านอนุมูลอิสระ เป็นต้น [6,7,8,9] ข้าวไรซ์เบอร์รี่ (Riceberry) เป็นการผสมข้ามสายพันธุ์ ระหว่างสายพันธุ์พ่อคือข้าวเจ้าหอมนิลร่วมกับสายพันธุ์แม่คือข้าวขาวดอกมะลิ 105 ทำให้ได้ลักษณะที่ดีและคุณประโยชน์เด่นๆ ออกมามากมาย เช่น ข้าวไรซ์เบอร์รี่อุดมไปด้วยคุณค่าทางอาหารสูง ได้แก่ โอเมก้า 3 ธาตุเหล็ก เบต้าแคโรทีน แกมมาโอไรซานอล วิตามินบี 1 วิตามินอี ลูทีน แทนนิน สังกะสี โพลีฟีนอล และเส้นใย ช่วยลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคมะเร็ง โรคความดันโลหิตสูง โรคหัวใจ โรคหลอดเลือด อุดมไปด้วยโฟเลทในปริมาณสูง และช่วยบำรุงร่างกาย โดยมีคุณสมบัติต่อต้านอนุมูลอิสระได้ดี นอกจากนั้นยังมีสารอาหารอื่นๆ ที่มีประโยชน์ต่อร่างกายมากมายหลายชนิด [10,11,12] ที่สำคัญทั้งข้าวข้าวเหนียวดำและข้าวไรซ์เบอรี่ มีสารแอนโทไซยานิน ซึ่งเป็นรงค์วัตถุหรือสารให้สีตามธรรมชาติ พบใน pericarp ของรำข้าว ซึ่งสารแอนโทไซยานินจัดอยู่ในกลุ่มของฟลาโวนอยด์ (Flavonoid) มีคุณสมบัติในการละลายในน้ำได้ และมีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่ให้สีม่วง แดงเข้ม ทั้งนี้ค่าความเป็นกรดด่างสามารถเปลี่ยนแปลงสีของแอนโทไซยานินกล่าวคือ เมื่ออยู่ในสภาวะความเป็นด่างก็จะมีน้ำเงินถึงน้ำเงินเข้ม เมื่ออยู่สภาวะความเป็นกรดจะมีสีแดงเข้ม และหากอยู่ในสภาวะ

ความเป็นกลางจะมีสีม่วง เป็นต้น [13] มีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่สูงมากกว่าวิตามินซี และวิตามินอี ถึง 2 เท่า มีประโยชน์มากมายต่อสุขภาพร่างกาย โดยเฉพาะช่วยป้องกันหลอดเลือดหัวใจอุดตันและโรคที่เกี่ยวกับหัวใจ ช่วยลดคอเลสเตอรอลในหลอดเลือด [14,15,16] จากคุณประโยชน์ของข้าวไรซ์เบอร์รี่และข้าวเหนียวดำที่ได้กล่าวมานั้นจึงนิยมนำไปใช้ทำเป็นผลิตภัณฑ์อาหารโภชนบำบัดในทางการแพทย์ รวมถึงนำไปแปรรูปเพื่อใช้ในอุตสาหกรรมอาหารมากมาย เช่น ขนมปัง ซาลาเปา ข้าวเหนียวดำสุก เป็นต้น [8,13,17] ดังนั้นผู้วิจัยจึงเล็งเห็นคุณค่าของข้าวทั้ง 2 ชนิดในการพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อการบริโภคต่อสุขภาพมากขึ้น เป็นการเพิ่มมูลค่าวัตถุดิบทางการเกษตรในชุมชนและเสริมสร้างรายได้ให้แก่เกษตรกร คณะผู้วิจัยจึงได้ศึกษาชนิดของพันธุ์ข้าวที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารแอนโทไซยานินและสมบัติทางกายภาพในผลิตภัณฑ์บ๊ะจ่าง เพื่อเป็นประโยชน์ในการนำไปผลิตเพื่อจำหน่ายสำหรับกลุ่มผู้บริโภคที่สนใจต่อไป

2. อุปกรณ์และวิธีการ

ขั้นตอนการเตรียมผลิตภัณฑ์บ๊ะจ่าง

การเตรียมตัวอย่างข้าว: จัดซื้อข้าวเหนียวขาว ข้าวเหนียวดำ และข้าวไรซ์เบอรี่คุณภาพดี เมล็ดสมบูรณ์ สะอาด จากร้านค้าที่ได้มาตรฐาน ควบคุมความชื้นเริ่มต้นของข้าวที่ประมาณ 12-14 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก นำมาบรรจุในถุงพลาสติกสุญญากาศถุงละ 1,000 กรัม เก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส จนกว่าจะนำไปใช้ในการทดสอบ โดยที่ข้าวเหนียวขาวและข้าวเหนียวดำเตรียมโดย ล้างให้สะอาดแช่ในน้ำอัตราส่วนข้าว 1 ส่วนต่อน้ำ 2 ส่วนที่อุณหภูมิห้อง (25±2 องศาเซลเซียส) 12 ชั่วโมง แล้วนำไปนึ่งที่อุณหภูมิประมาณ 95-98 องศาเซลเซียส เวลา 30 นาที ในขณะที่ข้าวไรซ์เบอร์รี่เตรียมโดย ชั่งตัวอย่างข้าวและน้ำสะอาดในอัตราส่วน 1:2 ใส่ลงในหม้อหุงข้าวไฟฟ้ายี่ห้อ SHARP รุ่น KSH-D22 และทำการเปิดสวิตช์เพื่อหุงสุกจนได้ตัวอย่างข้าวหุงสุก จากนั้นทำการทดสอบชนิดของพันธุ์ข้าวที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและเคมีในการผลิตบ๊ะจ่าง โดยตัวอย่างที่ 1 ตัวควบคุมใช้ข้าวเหนียวขาว 100 เปอร์เซ็นต์ (WS (100%)) หรือ 100 กรัม ตัวอย่างที่ 2 ข้าวเหนียวขาวผสมข้าวเหนียวดำอย่างละ 50 กรัม (WS(50%) : BS(50%)) ตัวอย่างที่ 3 ข้าวเหนียวขาวผสมข้าวไรซ์เบอร์รี่อย่างละ 50 กรัม (WS(50%) : RB(50%)) และตัวอย่างที่ 4 ข้าวเหนียวดำผสมข้าวไรซ์เบอร์รี่อย่างละ 50 กรัม (BS(50%) : RB(50%)) โดยส่วนผสมของข้าวทั้ง 4 ตัวอย่างมีน้ำหนักรวม 100 กรัม

การเตรียมผสม : ส่วนผสมในการทำบ๊ะจ่าง ประกอบด้วย หมูสันนอกหั่นชิ้นนำไปหมักซอสพริกไทย กระเทียม หมักไว้ค้างคืนให้หมูนุ่มและเครื่องปรุงเข้าเนื้อ แปะก๊วยต้มสุก เห็ดหอมหั่นตามขวาง น้ำมันพืช กุนเชียงทอดให้สุก ไข่แดงเค็ม กุ้งแห้ง พริกไทย น้ำมันหอย ซีอิ๊วขาว ซีอิ๊วดำ และน้ำตาลทรายรวมน้ำหนักทั้งสิ้นประมาณ 50 กรัม

การเตรียมบ๊ะจ่าง : นำตัวอย่างข้าวที่เตรียมไว้ข้างต้นในแต่ละตัวอย่างน้ำหนัก 100 กรัม ผัดกับส่วนผสมต่างๆ น้ำหนัก 50 กรัม จากนั้นทำการห่อส่วนผสมต่างๆ ด้วยใบไผ่ที่ผ่านการแช่น้ำจนนิ่มเพื่อให้สะดวกในการห่อและมัดด้วยเชือกให้แน่นป้องกันการหลุด นำไปนึ่งในลังถึงด้วยไอน้ำอุณหภูมิ 95-98 องสาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นทดสอบสมบัติทางกายภาพและเคมีพร้อมทั้งทำการทดสอบซ้ำจำนวน 3 ซ้ำ

ขั้นตอนการวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมี

ปริมาณความชื้นและค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ (a_w) : ทดสอบปริมาณความชื้นโดยชั่งน้ำหนักตัวอย่างจำนวน 10 กรัม อบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน (Binder FD115, Germany) อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง อ้างอิงวิธีการทดสอบจากมาตรฐาน AOAC [18] และหาค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ (a_w) ด้วยเครื่องวัดค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ (Aqualab 3TE, USA) นำตัวอย่างข้าวประมาณ 5 กรัม ใส่ลงในตลับพลาสติก นำใส่เครื่อง เมื่อค่าคงที่ทำการบันทึกค่าที่อ่านได้ วิเคราะห์ตัวอย่าง 3 ซ้ำ

ค่าสี (Color value) : วัดค่าสีด้วยเครื่องวัดสี (JC801, Japan) รายงานผลในรูปของ L*, a* และb* ซึ่งค่าทั้ง 3 ค่า เป็นการแสดงการวัดค่าสีโดยที่ค่า L* คือ ค่าความสว่าง (lightness) หมายความว่ามีความมืดเมื่อเข้าใกล้ 0 และมีค่าความสว่างมากเมื่อเข้าใกล้ 100 ในส่วนค่า a* คือ ค่าความเป็นสีแดง (Redness) เมื่อมีค่าเป็นบวกและมีค่าความเป็นสีเขียว (Greenness) เมื่อมีค่าเป็นลบ และค่า b* คือ ค่าความเป็นสีเหลือง (Yellowness) เมื่อมีค่าเป็นบวก

และค่าความเป็นสีน้ำเงิน (Blueness) เมื่อมีค่าเป็นลบ ซึ่งก่อนทำการทดสอบวัดค่าสี เครื่องมือวัดค่าสีจะถูกปรับเทียบความเที่ยงตรงของค่าสีด้วย Standard Calibration Plate ค่า L*, a* และ b* เท่ากับ 98.11, -0.11 และ-0.08 ตามลำดับ

ค่าความแข็ง : นำตัวอย่างข้าวไปทดสอบค่าความแข็งด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (LLOYD, LRX plus, USA) ตามวิธีการกดแบบ Back extrusion ค่าที่อ่านได้เป็นค่าที่แสดงความแข็งของตัวอย่างข้าวแต่ละตัวอย่างในหน่วยของนิวตัน [19]

การทดสอบความพึงพอใจของผู้บริโภค : ทำการทดสอบความพึงพอใจของผู้บริโภคจำนวน 30 คน โดยวิธี Hedonic Scaling 9 point ซึ่งมี 9 คะแนน ได้แก่ 1 หมายถึง ไม่ชอบมากอย่างยิ่ง 2 หมายถึงไม่ชอบมาก 3 หมายถึงไม่ชอบปานกลาง 4 หมายถึงไม่ชอบเล็กน้อย 5 หมายถึงเฉยๆ 6 หมายถึงชอบเล็กน้อย 7 หมายถึงชอบปานกลาง 8 หมายถึงชอบมาก 9 หมายถึงชอบมากอย่างยิ่ง ในด้านลักษณะปรากฏ กลิ่น สี เนื้อสัมผัส รสชาติ และความชอบโดยรวม

การทดสอบปริมาณสารแอนโทไซยานินทั้งหมด : วิเคราะห์ปริมาณสารแอนโทไซยานินทั้งหมด (Total Anthocyanin Content) [20,21] โดยเตรียมตัวอย่างจำนวน 1 กรัม ใส่ลงในสารละลายเอทาโนลิกไฮโดรคลอริก (เอทธานอล 95 เปอร์เซ็นต์ 85 มิลลิลิตร ต่อกรดไฮโดรคลอริก 1.5 นอร์มัล 15 มิลลิลิตร) ปริมาตร 25 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน ปิดฝาด้วยแผ่นอลูมินัมฟอยล์แล้วนำไปเก็บที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส นาน 24 ชั่วโมง จากนั้นนำออกมากรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 4 ยี่ห้อ whatman ปรับปริมาตรด้วยสารละลายเอทาโนลิกไฮโดรคลอริกให้มีปริมาตร 25 มิลลิลิตร แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องวัดการดูดกลืน(AquaMate 8000, USA) ที่ความยาวคลื่น 535 นาโนเมตร โดยใช้สารละลายเอทาโนลิกไฮโดรคลอริกเป็นตัวปรับศูนย์ (blank) คำนวณหาปริมาณแอนโทไซยานินทั้งหมดจากสมการที่ (1) และ (2) ดังนี้

$$\text{Total absorbance} = (OD_{535} \times V \times 100)/W \quad (1)$$

$$\text{Total anthocyanin content (mg/g)} = \text{Total absorbance} / 98.2 \quad (2)$$

โดยที่ V คือ ปริมาตรสารละลายที่นำมาหาปริมาณสารแอนโทไซยานิน (ml), W คือ น้ำหนักตัวอย่างที่นำมาหาปริมาณสารแอนโทไซยานิน (g), OD_{535} คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่อ่านได้จากเครื่องวัดการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 535 nm, 98.2 คือ ค่าคงที่การดูดกลืนแสงของอนุพันธ์แอนโทไซยานินที่ความยาวคลื่น 535 นาโนเมตร

การวิเคราะห์ทางสถิติ : ใช้โปรแกรม SPSS version 23 ที่ระดับความแตกต่างทางสถิติ 95% (One–way analysis of variance (ANOVA)) และทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตามวิธีของ Duncan New's Multiple Range Test (DMRT)

3. ผลการศึกษาและวิจารณ์

จากการศึกษาชนิดของพันธุ์ข้าว ได้แก่ ข้าวเหนียวขาว ข้าวเหนียวดำ และข้าวไรซ์เบอรี่ ที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพและเคมีด้านปริมาณสารแอนโทไซยานิน ค่าสี วอเตอร์แอคติวิตี้ ความชื้น ความแข็ง และความพึงพอใจของผู้บริโภคในผลิตภัณฑ์บิ๊ะจ่างแสดงผลการทดสอบดังตารางที่ 1 ตารางที่ 2 รูปที่ 1 รูปที่ 2 และ รูปที่ 3

3.1 การเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพด้านวอเตอร์แอคติวิตี้ ความชื้น และความแข็งของผลิตภัณฑ์บิ๊ะจ่างสูตรใช้ชนิดของข้าวที่แตกต่างกัน

จากการใช้ข้าวต่างชนิดมาผลิตผลิตภัณฑ์บิ๊ะจ่าง พบว่าส่งผลต่อความแตกต่างทางสมบัติทางกายภาพและเคมี แสดงดังตารางที่ 1 โดยการใช้ข้าวเหนียวขาว (WS (100%)) ให้ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ 0.854 ในขณะที่ใช้ข้าวเหนียวสูตรผสมค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ มีค่าระหว่าง 0.888-0.929 ทั้งนี้ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ เป็นปัจจัยที่ชี้ระดับปริมาณน้ำต่ำสุดในอาหารที่เชื้อจุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ในการเจริญเติบโตและใช้ในการเกิดปฏิกิริยาเคมีต่าง ๆ ค่าที่ได้จากการทดสอบพบว่า ในทุกตัวอย่างมีค่าสูงกว่า 0.6 ซึ่งอยู่ในกลุ่มชนิดของอาหารสดดังนั้นจึงเป็นผลิตภัณฑ์ที่เสื่อมเสียง่าย [22] ซึ่งสอดคล้องกับค่าความชื้นโดยผลิตภัณฑ์บิ๊ะจ่างสูตรข้าวเหนียวขาว 100% ให้ค่าความชื้น 51.30 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) กับค่าความชื้นสูตรผสมที่ให้ค่า 53.42, 54.47 และ 57.25เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก สำหรับผลิตภัณฑ์

บะจ่างสูตรข้าวเหนียวขาวผสมข้าวเหนียวดำ (WS(50%) : BS(50%)) ข้าวเหนียวขาวผสมข้าวไรซ์เบอร์รี่ (WS(50%) : RB(50%)) และข้าวเหนียวดำผสมข้าวไรซ์เบอร์รี่ (BS(50%) : RB(50%)) ตามลำดับ

การวัดค่าเนื้อสัมผัสหรือค่าความแข็งของบ๊ะจางตามวิธีการกดแบบ Back extrusion แสดงค่าดังตารางที่ 1 พบว่าการใช้ข้าวเหนียวขาว 100 เปอร์เซ็นต์ (WS (100%)) ในการทำบ๊ะจ่างให้ค่าความแข็งสูงสุดเท่ากับ 32.14 นิวตัน และแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) กับอีก 3 ตัวอย่าง ในขณะที่ตัวอย่างที่ 2 ข้าวเหนียวขาวผสมข้าวเหนียวดำ (WS(50%) : BS(50%)) และตัวอย่างที่ 3 ข้าวเหนียวขาวผสมข้าวไรซ์เบอร์รี่ (WS(50%) : RB(50%)) ให้ค่าความแข็งเท่ากับ 20.67 นิวตัน และ 19.52 นิวตัน ตามลำดับ ซึ่งพบว่าไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) แต่เมื่อนำตัวอย่างที่ 4 คือ ข้าวเหนียวดำผสมข้าวไรซ์เบอร์รี่ (BS(50%) : RB(50%)) มาทดสอบค่าความแข็งให้ค่าต่ำสุด 8.97 นิวตัน แสดงถึงความนุ่มของข้าวและสอดคล้องกับค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ และค่าความชื้นที่ให้ค่าสูงสุดในตัวอย่างดังกล่าวนี้ ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากคุณสมบัติของพันธุ์ข้าวโดยเฉพาะค่าอะไมโลส เป็นดัชนีที่บ่งชี้คุณภาพข้าว และสามารถนำมาจำแนกข้าวตามปริมาณอะไมโลส ได้แก่ ข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสสูง (ร้อยละ 25 - 33) เมื่อหุงสุกเนื้อจะค่อนข้างแข็งตามปริมาณอะไมโลสที่มากขึ้น ข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสปานกลาง (ร้อยละ 20 - 25) และข้าวที่มีปริมาณอะไมโลสต่ำ (ร้อยละ 9 - 20) เช่น ข้าวไรซ์เบอรี่ เมื่อหุงสุกเนื้อจะนุ่มและเหนียว และข้าวที่ไม่มีอะไมโลส (ร้อยละ 0 - 9) เช่น ข้าวเหนียว เมื่อหุงสุกจะมีค่าความเหนียวมาก และค่าความแข็งน้อย [23,24] และสอดคล้องกับขนิษฐา และ สุพัตรา [25] รายงานว่าข้าวเหนียวขาวและข้าวเหนียวดำเมื่อหุงสุกจะได้เนื้อสัมผัสที่นุ่มและเหนียว รวมถึงยังพบว่าข้าวเหนียวขาวมีปริมาณโปรตีนสูงทั้งนี้เมื่อปริมาณโปรตีนเพิ่มมากขึ้นจะมีค่าความแข็งและความเหนียวเพิ่มตามไปด้วย [26] ดังนั้นการใช้ข้าวเหนียวขาวมาผลิตบ๊ะจ่างเพียงชนิดเดียวจึงส่งผลให้มีแนวโน้มของค่าความแข็งที่สูงกว่าการใช้ข้าวไรซ์เบอรี่ และข้าวเหนียวดำมาผสมร่วมกัน

ตารางที่ 1 ผลการเปลี่ยนแปลงสมบัติด้านวอเตอร์แอคติวิตี้ ความชื้น และความแข็งของผลิตภัณฑ์บ๊ะจ่างสูตรใช้ชนิดของข้าวที่แตกต่างกัน

ตัวอย่าง	วอเตอร์แอคติวิตี้ (a_w)	ความชื้น (เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก)	ความแข็ง (นิวตัน)
WS (100%)	0.854±0.046^{b}	51.30±2.45^{c}	32.14±1.08^{a}
WS(50%) : BS(50%)	0.888±0.008^{ab}	53.42±1.87^{b}	20.67±1.58^{b}
WS(50%) : RB(50%)	0.906±0.002^{ab}	54.47±2.05^{b}	19.52±1.08^{b}
BS(50%) : RB(50%)	0.929±0.035^{a}	57.25±2.11^{a}	8.97±1.07^{c}

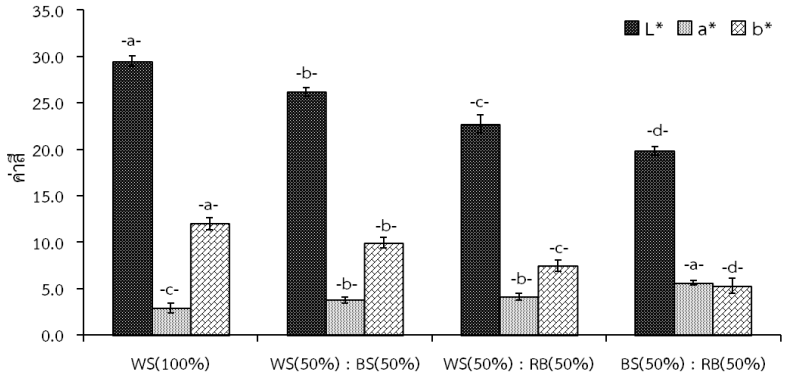
* ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ (ค่าเฉลี่ย±SD.)

^{ab} อักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

3.2 การเปลี่ยนแปลงสมบัติด้านสีของผลิตภัณฑ์บ๊ะจ่างสูตรใช้ชนิดของข้าวที่แตกต่างกัน

สีเป็นปัจจัยหนึ่งที่ใช้บ่งบอกคุณภาพของผลิตภัณฑ์ในการยอมรับหรือไม่ยอมรับของผู้บริโภค จากการทดลองวัดค่าสีของผลิตภัณฑ์บ๊ะจางสูตรใช้ชนิดของข้าวที่แตกต่างกันจำนวน 4 ตัวอย่างแสดงดังรูปที่ 1 พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) ของค่าความสว่าง (L*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b*) โดยค่าความสว่างของตัวอย่างที่ 1 ใช้ข้าวเหนียวขาว (WS (100%)) ตัวอย่างที่ 2 ข้าวเหนียวขาวผสมข้าวเหนียวดำ (WS(50%) : BS(50%)) ตัวอย่างที่ 3 ข้าวเหนียวขาวผสมข้าวไรซ์เบอร์รี่ (WS(50%) : RB(50%)) และตัวอย่างที่ 4 ข้าวเหนียวดำผสมข้าวไรซ์เบอร์รี่ (BS(50%) : RB(50%)) ให้ค่า L* เท่ากับ 29.50, 26.17, 22.73 และ 19.83 ตามลำดับ และให้ค่า b* เท่ากับ 12.00,

9.93, 7.43 และ 5.30 ตามลำดับเช่นกัน ซึ่งจะเห็นว่าการใช้ข้าวเหนียวขาว 100% จะให้ค่า L* และ b* สูงที่สุด ทั้งนี้ด้วยลักษณะทางกายภาพของข้าวเหนียวขาวที่มีสีขาวทั้งก่อนนึ่งและหลังนึ่ง และเมื่อนำข้าวเหนียวดำและข้าวไรซ์เบอรี่มาผสมจึงส่งผลทำให้ค่า L* และ b* ลดลงหรือสีของผลิตภัณฑ์มีลักษณะเข้มขึ้นตามชนิดของพันธุ์ข้าว คือ สีแดงเข้ม หรือม่วง [13,17,27] ในส่วนค่าความเป็นสีแดง (a*) พบว่า ตัวอย่างที่ 1 ใช้ข้าวเหนียวขาว (WS (100%)) ให้ค่า a* ต่ำสุดเท่ากับ 2.90 และแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($P \leq 0.05$) กับตัวอย่างอื่นในขณะที่ตัวอย่างที่ 2 ข้าวเหนียวขาวผสมข้าวเหนียวดำ (WS(50%) : BS(50%)) และตัวอย่างที่ 3 ข้าวเหนียวขาวผสมข้าวไรซ์เบอร์รี่ (WS(50%) : RB(50%)) ให้ค่า a* ใกล้เคียงกันเท่ากับ 3.77 และ 4.10 ตามลำดับ เมื่อนำข้าวเหนียวดำผสมข้าวไรซ์เบอร์รี่ (BS(50%) : RB(50%)) ให้ค่า a* สูงสุดเท่ากับ 5.63 ซึ่งค่าสีของตัวอย่างที่แสดงนี้สอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของข้าวแต่ละพันธุ์ โดยเฉพาะข้าวเหนียวดำและข้าวไรซ์เบอรี่พบว่ามีปริมาณแอนโทไซยานิน (รูปที่ 2) ที่มีลักษณะเมล็ดข้าวสีม่วงเข้ม ดังนั้นจึงทำให้ค่าความสว่าง (L*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b*) ลดลง ค่าความเป็นสีแดง (a*) เพิ่มขึ้น และเมื่อมีการให้ความร้อนด้วยการนึ่งเกิดปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลชนิดที่ไม่เกี่ยวข้องกับเอนไซม์ซึ่งเกิดขึ้นระหว่างน้ำตาลรีดิวส์กับกรดอะมิโนหรือสารประกอบไนโตรเจนโดยมีความร้อนจากการนึ่งเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาผลที่ได้คือสารประกอบที่ให้สีน้ำตาล [28] ส่งผลให้บิ๊ะจางที่ผลิตจากข้าวเหนียวดำและข้าวไรซ์เบอรี่จากเดิมที่มีสีม่วงเข้มอยู่แล้วมีลักษณะค่อนข้างไปน้ำเงินเข้มจนมีสีคล้ำเพิ่มขึ้น



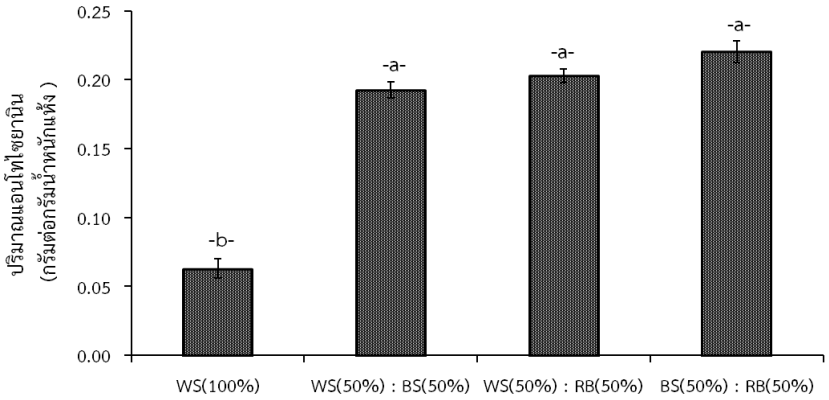
รูปที่ 1 ผลการเปลี่ยนแปลงสมบัติทางกายภาพด้านสีของผลิตภัณฑ์บิ๊ะจ่างสูตรใช้ชนิดของข้าวที่แตกต่างกัน

[ab] อักษรที่แตกต่างกันในแต่ละสภาวะการทดสอบแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

3.3 การเปลี่ยนแปลงปริมาณสารแอนโทไซยานินของผลิตภัณฑ์บิ๊ะจ่างสูตรใช้ชนิดของข้าวที่แตกต่างกัน

ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารแอนโทไซยานินในผลิตภัณฑ์บิ๊ะจ่างโดยใช้ข้าวที่ต่างชนิดกันแสดงดังรูปที่ 2 พบว่าตัวอย่างที่ 1 ใช้ข้าวเหนียวขาว 100% (WS (100%)) ให้ค่าปริมาณแอนโทไซยานินต่ำสุดเท่ากับ 0.063 กรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง และแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) กับตัวอย่างอื่นๆ ในขณะที่เมื่อนำข้าวไรซ์เบอรี่ข้าวเหนียวดำ มาผสมเพื่อผลิตผลิตภัณฑ์บิ๊ะจ่างพบว่ามีปริมาณสารแอนโทไซยานินเพิ่มขึ้นสำหรับตัวอย่างที่ 2 ข้าวเหนียวขาวผสมข้าวเหนียวดำ (WS(50%) : BS(50%)) ตัวอย่างที่ 3 ข้าวเหนียวขาวผสมข้าวไรซ์เบอร์รี่ (WS(50%) : RB(50%)) และตัวอย่างที่ 4 ข้าวเหนียวดำผสมข้าวไรซ์เบอร์รี่ (BS(50%) : RB(50%)) ให้ค่าปริมาณสารแอนโทไซยานินเท่ากับ 0.193, 0.203 และ 0.220 กรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้งตามลำดับ และทั้ง 3 ตัวอย่างไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P>0.05$) ทั้งนี้เนื่องด้วยปริมาณอัตราส่วนของข้าวที่ใช้ในปริมาณที่เท่ากันซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่มีการตรวจพบปริมาณสารแอนโทไซยานินในข้าวเหนียวดำและข้าวไรซ์เบอรี่ [6,8,9,11,12] ทั้งนี้พบว่า สารแอนโทไซยานินเป็นสารประกอบไกลโคไซด์หรือเอซิลไกลโคไซด์ที่จัดอยู่ในกลุ่มของสารประกอบฟีนอลิก ทั้งนี้มีงานวิจัย

ที่แสดงว่าสารแอนโทไซยานินเป็นสารที่มีประโยชน์ต่อร่างกายมีสมบัติต้านสารอนุมูลอิสระ มีสรรพคุณทางยา ช่วยกระตุ้นการไหลเวียนของเลือด ป้องกันการเกิดโรคต่างๆ เช่น โรคหลอดเลือด โรคเบาหวาน โรคมะเร็ง ลดความเสี่ยงในการเป็นโรคหัวใจและหลอดเลือดหัวใจแข็งตัวได้ [13,27,29,30] ดังนั้นการบริโภคบ๊ะจ่างที่ผลิตจากข้าวชนิดที่กล่าวมานี้ย่อมเป็นประโยชน์กับผู้บริโภค

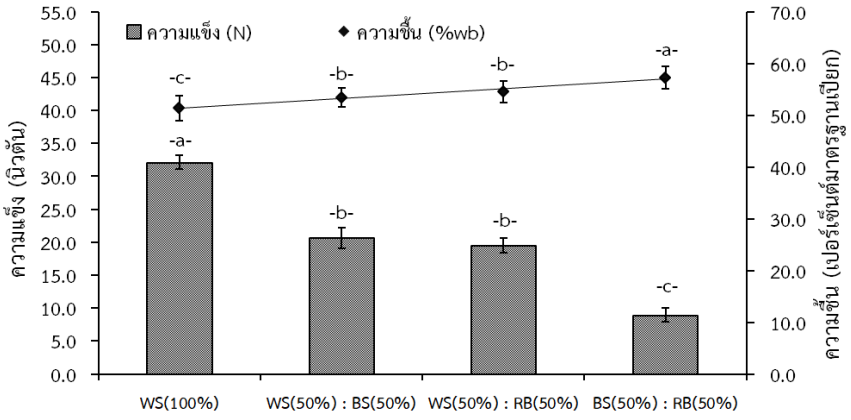


รูปที่ 2 ผลการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารแอนโทไซยานินของผลิตภัณฑ์บ๊ะจ่างสูตรใช้ชนิดของข้าวที่แตกต่างกัน

[ab] อักษรที่แตกต่างกันในแต่ละสภาวะการทดสอบแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

3.4 เปรียบเทียบสมบัติด้านความแข็งและความชื้นของผลิตภัณฑ์บ๊ะจ่างสูตรใช้ชนิดของข้าวที่แตกต่างกัน

การเปรียบเทียบสมบัติด้านความแข็งและความชื้นของผลิตภัณฑ์บ๊ะจ่างสูตรใช้ชนิดของข้าวที่แตกต่างกันแสดงดังรูปที่ 3 ซึ่งพบว่าค่าความแข็งที่ลดลงในแต่ละตัวอย่างจะสอดคล้องกับค่าความชื้นที่เพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องด้วยความชื้นหรือปริมาณน้ำในผลิตภัณฑ์ถ้ามีในปริมาณที่สูงขึ้นจะทำให้โครงสร้างของผลิตภัณฑ์มีความอ่อนนุ่ม และจะส่งผลไปยังความพึงพอใจของผู้บริโภคด้วยเช่นกัน รวมถึงผลิตภัณฑ์บ๊ะจ่างมีการใช้ชนิดของข้าวที่แตกต่างดังนั้นความแข็งจึงมีผลมาจากปัจจัยหนึ่งที่สำคัญคือ ปริมาณอะไมโลสที่แตกต่างกันไปตามชนิดของพันธุ์ข้าวดังที่ได้กล่าวรายละเอียดไปแล้วในเบื้องต้น



รูปที่ 3 เปรียบเทียบสมบัติด้านความแข็งและความชื้นของผลิตภัณฑ์บ๊ะจ่างสูตรใช้ชนิดของข้าวที่แตกต่างกัน

[ab] อักษรที่แตกต่างกันในแต่ละสภาวะการทดสอบแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

3.5 ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์บ๊ะจ่างสูตรใช้ชนิดของข้าวที่แตกต่างกัน

จากผลการประเมินความพึงพอใจของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์บ๊ะจ่างสูตรใช้ชนิดของข้าวที่แตกต่างกันทั้ง 4 ตัวอย่าง ในตารางที่ 2 พบว่าค่าคะแนนความพึงพอใจในทุกตัวอย่างและทุกปัจจัยในการทดสอบอยู่ที่คะแนนเฉลี่ย 6-8 โดยที่ตัวอย่างที่ใช้ข้าวเหนียวดำผสมข้าวไรซ์เบอร์รี่ (BS(50%) : RB(50%)) มีคะแนนความชอบที่ระดับชอบปานกลางถึงชอบมาก ซึ่งสูงสุดเมื่อเทียบกับอีก 3 ตัวอย่าง ในด้านลักษณะปรากฏ กลิ่น สี รสชาติ และ ความชอบโดยรวม มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 7.57±1.07, 7.26±1.64, 7.07±1.31, 7.40±1.35 และ 7.43±1.04 ตามลำดับ ในขณะที่คะแนนความพึงพอใจด้านเนื้อสัมผัสสูงสุด ได้แก่ บ๊ะจ่างใช้ข้าวเหนียวขาวผสมข้าวเหนียวดำ (WS(50%) : BS(50%)) ทั้งนี้การใช้ข้าวเหนียวดำผสมข้าวไรซ์เบอร์รี่ในการผลิตบ๊ะจ่าง พบว่าผู้บริโภคให้คะแนนความพึงพอใจในทุกคุณลักษณะไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P>0.05) กับตัวอย่างการใช้ข้าวเหนียวขาว 100% (WS (100%)) ซึ่งเป็นสูตรดั้งเดิมสำหรับตัวอย่างบ๊ะจ่างผลิตจากข้าวเหนียวขาวผสมข้าวไรซ์เบอร์รี่ (WS(50%) : RB(50%)) ผู้บริโภคให้คะแนนความชอบที่ระดับชอบเล็กน้อยในเกือบทุกด้าน ส่วนในด้าน สี และเนื้อสัมผัส พบว่าในทุกตัวอย่างไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P>0.05) ซึ่งจากการสังเกตความพึงพอใจด้านความชอบโดยรวมพบว่าระดับคะแนนสูงสุดคือการใช้ข้าวเหนียวดำผสมข้าวไรซ์เบอร์รี่ในการผลิตบ๊ะจ่าง ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากด้วยเนื้อสัมผัสที่นุ่ม พิจารณาได้จากค่าความแข็งที่มีค่าต่ำสุดสอดคล้องกับค่าความชื้นที่สูงสุดเมื่อเทียบกับตัวอย่างอื่น และมีสีที่ค่อนข้างเข้มซึ่งแตกต่างจากผลิตภัณฑ์ในรูปแบบปรกติ

ตารางที่ 2 ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้บริโภคที่มีต่อผลิตภัณฑ์บ๊ะจ่างสูตรใช้ชนิดของข้าวที่แตกต่างกัน

ปัจจัยการทดสอบ	ตัวอย่าง			
	WS (100%)	WS (50%) : BS (50%)	WS (50%) : RB (50%)	BS (50%) : RB (50%)
ลักษณะปรากฏ	6.90±1.03^{b}	6.76±0.86^{bc}	6.33±1.21^{c}	7.57±1.07^{a}
กลิ่น	6.80±1.63^{ab}	6.40±1.56^{b}	6.07±1.31^{b}	7.26±1.64^{a}
สี	6.93±1.28^{a}	6.97±1.07^{a}	6.56±0.97^{a}	7.07±1.31^{a}
เนื้อสัมผัส	6.86±1.25^{a}	6.93±1.17^{a}	6.73±1.66^{a}	6.60±1.81^{a}
รสชาติ	6.80±1.35^{ab}	6.93±1.41^{ab}	6.60±1.45^{c}	7.40±1.35^{a}
ความชอบโดยรวม	7.27±1.14^{ab}	6.63±1.25^{ab}	6.43±1.50^{c}	7.43±1.04^{a}

* ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ (ค่าเฉลี่ย±SD.)

^{ab} อักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P≤0.05)

4. สรุปผลการวิจัย

ผลของชนิดข้าวที่มีต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาณสารแอนโทไซยานินและสมบัติทางกายภาพในผลิตภัณฑ์บ๊ะจ่าง พบว่าสามารถนำข้าวเหนียวดำและข้าวไรซ์เบอร์รี่มาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์บ๊ะจ่างที่ส่งผลต่อคุณสมบัติที่ดีทั้งทางกายภาพและคุณสมบัติด้านปริมาณสารแอนโทไซยานิน โดยที่การใช้ข้าวเหนียวดำผสมข้าวไรซ์เบอร์รี่ (BS(50%) : RB(50%)) ให้ค่าวอเตอร์แอคติวิตี้ ความชื้น และความแข็งเท่ากับ 0.929, 57.25 เปอร์เซ็นต์มาตรฐานเปียก และ 8.97 นิวตัน ซึ่งพบว่าเนื้อสัมผัสนุ่มดังนั้นจึงส่งผลต่อความพึงพอใจของผู้บริโภคสูงสุดในด้าน ลักษณะปรากฏ กลิ่น สี รสชาติ และความชอบโดยรวม ทั้งนี้ยังให้ค่าปริมาณสารแอนโทไซยานินสูงสุดเท่ากับ 0.220 กรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง ในขณะที่การใช้ข้าวเหนียวขาว 100 เปอร์เซ็นต์ ให้ค่าปริมาณสารแอนโทไซยานินต่ำสุดเท่ากับ 0.063 กรัมต่อกรัมน้ำหนักแห้ง นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณสารแอนโทไซยานินยังสอดคล้องกับการทดสอบค่าสีของตัวอย่างทั้ง 4 โดยการใช้ข้าวเหนียวขาว 100เปอร์เซ็นต์ ให้ค่า L* สูงสุดและมี

แนวโน้มลดลงเมื่อผสมกับข้าวชนิดอื่นและให้ผลเช่นเดียวกับค่าความเป็นสีเหลือง (b*) ในขณะที่ค่าความเป็นสีแดง (a*) เพิ่มขึ้นเมื่อนำข้าวเหนียวดำผสมข้าวไรซ์เบอร์รี่ (BS(50%) : RB(50%))

5. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่สนับสนุนสถานที่ในการทำวิจัย และขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่อุดหนุนทุนวิจัย

6. เอกสารอ้างอิง

[1] Panarangsan T. Project to set up the Ba-Jang (Traditional Chinese Steam Rice) wholesale business of Thailand. (GrandMa Ba-Jang 4.0). M. Com. Arts (Entertainment Management and Production), Graduate School, Bangkok University. 2017. (in Thai)

[2] Bangkok Business. Wai Bac Chang' Festival 2021 opens the legend of worshiping the dragon god. 2021 [cited 2021 December 22]. Available from: https://www.bangkokbiznews. com/lifestyle/886794

[3] BLT Bangkok. Health trends are strong. Modern urban people set goals for a good and happy life. 2021 [cited 2021 December 22] Available from: https://www.bltbangkok.com/bangkok-update/4405/.

[4] Sirisoontaralak P, Paisarnchareon K. Jacutprakart B. Development of quick prepared chinese zongzi (Chinese Oily Sticky Rice). Agricultural Science Journal. 2012;43(2) (Suppl.):309-12. (in Thai)

[5] Markkool P. Kiaw-ngu glutinous rice: From a genebank to farmers' fields. Ministry of Agriculture and Cooperatives, Rice Department. 2021. [cited 2021 December 22]. Available from: https://tarr.arda.or.th/preview/item/pvm05Ux-0BScN-GZWpZVq.

[6] Rojanasaroj A, Saengkitikomol W, Tankhamnao T. Antioxidants in black rice, black sticky rice and red rice : protective effect on cytotoxicity and genotoxicity by free radicals and gene expression on lipid accumulation in culture cells. Master of Science in Clinical Biochemistry and Molecular Medicine. Chulalongkorn University. 2008. (in Thai)

[7] Sirithanyalak B. Assessment of anti-inflammatory activity of gamma-oryzanol extract from kam thai rice bran. Research report. Faculty of Pharmacy Chiang Mai University. 2010. (in Thai)

[8] Sukkasem K, Siriwong N.N. Effects of soaking black glutinous rice on nutritional value and texture properties of cooked black glutinous rice. Kasetsart University. Bangkok. 2013. (in Thai)

[9] Kaweewong K, Tansawai A. Production of healthy beverage from black glutinous rice. Research report, Rajamangala University of Technology Lanna. 2013. (in Thai)

[10] Leardkamolkarn V, Thongthep W, Suttiarporn P, Kongkachuichai R, Wongpornchai S, Wanavijitr A. Chemopreventive properties of the bran extracted from a newly-developed Thai rice: The Riceberry. Food Chemistry. 2011;125(3),978–85.

[11] Settapramote N, Laokuldilok T, Boonyawan D, Utama-ang N. Physiochemical, antioxidant activities and anthocyanin of riceberry rice from different locations in Thailand. Food and Applied Bioscience Journal. 2018; 6(Suppl.): 84–94.

[12] Poosri S, Thilavech T, Pasukamonset P, Suparpprom C, Adisakwattana S. Studies on riceberry rice (Oryza sativa L.) extract on the key steps related to carbohydrate and lipid digestion and absorption: A new source of natural bioactive substances. NFS Journal. 2019;17:17-23.

[13] Sapantupong S. Development of bread with riceberry rice bran. RMUTP Research Journal, Vol. 13, No. 2, July-December 2019. (in Thai)

[14] Lee J, Durst R, Wrolstad R. Determination of total monomeric anthocyanin pigment content of fruit juices, beverages, natural colorants, and wines by the pH differential method: collaborative study. J AOAC Int. 2005; 88(50):1269-78.

[15] Diaconeasa Z, Leopold L, Rugin D, Ayvaz H, Socaciu C. Antiproliferative and antioxidant properties of anthocyanin rich extracts from blueberry and blackcurrant juice. International Journal of Molecular Sciences, 2015. 16, 2352–2365.

[16] Yixiao S, Ning Z, Jinlong T, Guang X, Ling L, Xiyun S, Bin L. Advanced approaches for improving bioavailability and controlled release of anthocyanins. Journal of Controlled Release. 2022; 341:285-99.

[17] Khumkhom S. Effect of riceberry flour on physicochemical properties and antioxidant activities of steamed bun. Thai Science and Technology Journal (TSTJ). 2020;28(11):2026-38.

[18] AOAC. Official Method of Analysis. Association of Official Analytical Chemists. 15th ed. Arlington, Virginia, USA; 1990.

[19] Reyes V.G, Jindal V.K. A small sample back extrusion test for measuring texture of cooked rice. Journal of Food Quality. 1989;13(2):109-18.

[20] Suwan N. Effect of coating materials on controlling of browning and weight loss in lychee fruit. Thesis (Master of Science (Biology Department)) Chiang Mai University. 2005. (in Thai)

[21] Ranganna S. Plant pigment. p. 72-93. In S. Ragana (ed.). Manual of analysis of fruit and vegetable produce. Tata McGraw-Hill Publishing Co., Ltd, New Delhi. 1977.

[22] Langsatthong W. Food processing technology. Department of Agro-Industry Technology Faculty of Applied Sciences King Mongkut's Institute of Technology North Bangkok. 6th ed. Tex and Journal Publication Company Limited, Bangkok. 2014. (in Thai)

[23] Suwannaporn P, Pitiphunpong S, Champangern S. Classification of rice amylose content by discriminant analysis of physicochemical properties. Starch Stärke. 2007;59:171-7.

[24] Chepprasop C, Salem H, Anomunee R. Chemical composition and amylose content in local rice variety from Phatthalung rice research center. Sci. Tech. RMUTT J. 2017;7(2):84-97.

[25] Butsita K, Charoenphakdi S. Characteristics of texture and protein content of paddy rice in Phitsanulok Province. The 12th Naresuan Agricultural Fair Conference. Research and Innovation and the Development of the Country Between 21-22 July 2016. 230-6. (in Thai)

[26] Kuanpanya J, Petchawong W, Damrongwattanakul N. Utilization of soy protein and modified starch in fat-reducing Sai Oua products. 46th Academic Conference of Kasetsart University : Agro-Industry Field Between 29 January – 1 February 2008 Kasetsart University. Bangkok. 2012. (in Thai)

[27] Hiemori M, Koh E, Mitchell A. Influence of cooking on anthocyanins in black rice (Oryzasativa L. japonica var. SBR). Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2009;57(5):1908-14.

[28] Pichaiyongwongdee S, Rutkajorn N, Pandolsuk S. Teaching documentation culinary science. Printer, M&M Laser Print Limited Partnership, Bangkok. 2011. (in Thai)

[29] Bellido G, Beta T. Anthocyanin Composition and Oxygen Radical Scavenging Capacity (ORAC) of Milled and Pearled Purple, Black, and Common Barley. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 2009;57(3):1022-8.

[30] Sompong R, Siebenhandl-Ehn S, Linsberger-Martin G, Berghofer E. Physicochemical and antioxidative properties of red and black rice varieties from Thailand, China and Sri Lanka. Food Chemistry. 2011;124(1):132-40.

ระบบเฝ้าติดตามและแจ้งเตือนสถานะการทำงานของเครื่องอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อนด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

วิยศพล กวนคอนสาร[1] และบัญชา วัฒนะ[1,2,*]

63010381010@msu.ac.th[1], buncha.w@msu.ac.th[1,2,*]

Received : 25-Mar-2022
Revised : 6-Dec-2022
Accepted : 16-Dec-2022

[1] สาขาวิชาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

[2] หน่วยวิจัยพลังงานรังสีอาทิตย์และแหล่งพลังงานสำรอง คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้นำเสนอระบบเฝ้าติดตามและแจ้งเตือนเพื่อป้องกันความเสียหายอันเนื่องมาจากการทำงานที่ผิดปกติของเครื่องอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อนด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง โดยการเฝ้าติดตามและแจ้งเตือนค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับฮีตเตอร์ของเครื่องอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อนในสภาวะการทำงานที่ปกติและผิดปกติตามเวลาจริง ระบบประกอบด้วยเซนเซอร์วัดค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้า ซึ่งงานวิจัยนี้จะใช้เซนเซอร์ Pzem-004T สำหรับตรวจวัดค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับฮีตเตอร์ ตัวประมวลผล Node MCU ESP8266 ใช้สำหรับประมวลผลค่าข้อมูลที่ตรวจวัดได้จากเซนเซอร์ และส่งข้อมูลขึ้นไปบันทึกและจัดเก็บบนคลาวด์ของเน็ตพายแพลตฟอร์ม โดยข้อมูลดังกล่าวจะถูกนำมาแสดงผลบนเน็ตพายฟรีบอร์ดและแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชันไลน์ตามสถานะการทำงานที่มีการเปลี่ยนแปลง จากการทดสอบระบบที่พัฒนาขึ้นเพื่อตรวจสอบความถูกต้องแม่นยำและการตอบสนองในการตรวจวัด แสดงผล และแจ้งเตือน พบว่าระบบสามารถตรวจวัดและแสดงผลค่าข้อมูลได้ถูกต้อง สามารถบ่งชี้และแจ้งเตือนสภาวะการทำงานที่ผิดปกติได้อย่างแม่นยำทุก ๆ เงื่อนไขในการเฝ้าติดตามและแจ้งเตือนสถานะการทำงานที่ผิดปกติของเครื่องอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อนได้อย่างสมบูรณ์ รวมถึงสามารถนำค่าข้อมูลที่บันทึกและจัดเก็บมาวิเคราะห์เพื่อวางแผนการบำรุงรักษาให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

คำสำคัญ: ระบบเฝ้าติดตามและแจ้งเตือน อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง เน็ตพายแพลตฟอร์ม แอปพลิเคชันไลน์

Monitoring and Notification System for Hot Press Machine Operation with Internet of Things Technology

Wiyossapon Kuankhonsan[1] and Buncha Wattana[1,2*]

63010381010@msu.ac.th[1], buncha.w@msu.ac.th[1,2*]

Received	: 25-Mar-2022
Revised	: 6-Dec-2022
Accepted	: 16-Dec-2022

[1] Department of Electrical and Computer Engineering, Faculty of Engineering, Mahasarakham University

[2] Solar Energy and Energy Resources Research Unit, Faculty of Engineering, Mahasarakham University

Abstract

This research paper presents a system for monitoring and notifying to prevent damages caused by an abnormal operation of the hot press machine with Internet of Things technology. The current and voltage values supplied to the heater of the hot press machine are monitored by sensors in normal and abnormal operating conditions in real time. The system consists of current and voltage sensors, the Pzem- 004T sensor is used to measure the current and voltage of the heater. Node MCU ESP8266 processor is used for processing the measured data values from the sensors and transmit data to the NETPIE platform's cloud storage and recording. Such information will be displayed on the NETPIE freeboard and notified via the LINE application according to the working status changes. From the experimental results shown that our proposed system can measure and display the data values correctly. It can accurately identify and abnormal operating conditions of the hot press machine perfectly. In addition the recorded and collected data values can be analyzed for more efficient maintenance planning.

Keyword: Monitoring and notification system, Internet of Thing, NETPIE Platform, Application LINE

1. บทนำ

ปัจจุบันในภาคอุตสาหกรรมการผลิตส่วนใหญ่ได้มีการประยุกต์ใช้เครื่องจักรทั้งแบบกึ่งอัตโนมัติและแบบอัตโนมัติในการขับเคลื่อนกระบวนการผลิตเพื่อทำให้มีกำลังการผลิตที่เพิ่มขึ้น คุณภาพของผลิตภัณฑ์ที่ดีขึ้น และผลตอบแทนที่มากขึ้น [1] โดยการได้มาซึ่งผลลัพธ์ดังกล่าวมีจุดเริ่มต้นมาจากการที่เครื่องจักรสามารถทำงานได้เต็มประสิทธิภาพตามมาตรฐานการผลิต ดังนั้นการรักษาเสถียรภาพการทำงานของเครื่องจักรจึงเป็นปัจจัยสำคัญต่อกระบวนการผลิตซึ่งทำได้โดยการบำรุงรักษา (Maintenance) โดยเทคนิคที่จะช่วยให้การบำรุงรักษาเป็นไปตามเป้าหมายที่วางไว้ คือ เทคนิคการบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์ (Predictive Maintenance) เทคนิคดังกล่าวเป็นกลยุทธ์ในการบำรุงรักษาที่มีการนำข้อมูลมาวิเคราะห์เพื่อประเมินและคาดการณ์เกี่ยวกับเหตุการณ์การพังชำรุดของเครื่องจักร (Breakdown) ที่จะเกิดขึ้นในอนาคต เพื่อให้สามารถกำหนดและวางแผนการบำรุงรักษาได้อย่างมีประสิทธิภาพ [2] เทคโนโลยีที่เข้ามามีบทบาทในการได้มาซึ่งข้อมูลที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์และประเมินเพื่อวางแผนการบำรุงรักษาเชิงพยากรณ์ ได้แก่ เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things) ซึ่งเป็นเทคโนโลยีที่มีการประยุกต์ใช้เครื่องจักร การวิเคราะห์และประมวลผล รวมทั้งระบบต่าง ๆ เข้ามาทำงานร่วมกัน ให้สามารถสื่อสารกันแบบเครือข่าย แลกเปลี่ยนข้อมูล แสดงผลข้อมูล บันทึกและจัดเก็บข้อมูลได้ตามเวลาจริง [3] โดยข้อมูลที่ถูกบันทึกและจัดเก็บไว้สามารถนำมาวิเคราะห์เพื่อคาดการณ์เกี่ยวกับเหตุการณ์การพังชำรุดของเครื่องจักร และสามารถวางแผนการบำรุงรักษาเครื่องจักรได้อย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น

ในอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ของบริษัทกรณีศึกษา เครื่องอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อนเป็นเครื่องจักรที่ใช้สำหรับอัดขึ้นรูปชิ้นงานในกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน โดยการทำงานของเครื่องจักรดังกล่าวใช้หลักการให้ความร้อนจากฮีตเตอร์และแรงกดอัดจากระบบไฮดรอลิคเพื่อทำให้ชิ้นงานมีรูปร่างลักษณะและคุณภาพตามมาตรฐานการผลิตที่กำหนด จากการทำงานของเครื่องอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อนที่มีการให้ความร้อนและแรงกดอัดอยู่ตลอดเวลา พบว่าระบบการให้ความร้อนด้วยฮีตเตอร์มีการชำรุดเสียหายเกิดขึ้น ซึ่งมีสาเหตุมาจากการจ่ายกระแสและแรงดันไฟฟ้าให้กับฮีตเตอร์ในสภาวะที่ไม่สมดุล รวมถึงยังไม่มีระบบสำหรับเฝ้าติดตามและป้องกันสภาวะดังกล่าวจนทำให้เกิดการพังชำรุดเสียหายในที่สุด และส่งผลกระทบทำให้เกิดการสูญเสียทั้งในด้านกำลังการผลิต (Capacity Loss) และในด้านคุณภาพ (Quality Loss) ของผลิตภัณฑ์ ที่ผ่านมาจึงมีงานวิจัยจำนวนมากที่มีการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอินเตอร์เน็ตของสรรพสิ่งสำหรับเฝ้าติดตามและแจ้งเตือนสภาวะการทำงานของเครื่องจักรในโรงงานอุตสาหกรรม เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับเครื่องจักรต่าง ๆ ในกระบวนการผลิต เช่น งานวิจัยที่พัฒนาเกี่ยวกับระบบเฝ้าติดตามและป้องการทำงานที่ผิดปกติของมอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำชนิด 3 เฟส ด้วยอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับมอเตอร์ [4-5] และยังมีงานวิจัยที่พัฒนาเกี่ยวกับระบบเฝ้าสังเกตอุณหภูมิน้ำในระบบทำความร้อนแบบไฟฟ้าของเครื่องคาเลนเดอร์ด้วยอินเตอร์เน็ตในทุกสิ่ง สำหรับเฝ้าสังเกตอุณหภูมิน้ำในระบบทำความร้อนแบบไฟฟ้าของเครื่องคาเลนเดอร์ในอุตสาหกรรมการผลิตยางล้อ [6] จากงานวิจัยข้างต้นเป็นการพัฒนาระบบอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งสำหรับแจ้งเตือนเพื่อป้องกันสภาวะการทำงานที่ผิดปกติของเครื่องจักรประเภทมอเตอร์และเครื่องทำความร้อนแบบไฟฟ้าของเครื่องคาเลนเดอร์ แต่ยังไม่มีการนำมาพัฒนาใช้งานร่วมกับเครื่องอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อนของบริษัทกรณีศึกษา ด้วยเหตุนี้คณะผู้วิจัยจึงได้ดำเนินงานพัฒนาและออกแบบระบบขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบเฝ้าติดตามและแจ้งเตือนสถานะการจ่ายกระแสและแรงดันไฟฟ้าให้กับฮีตเตอร์ของเครื่องอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อนด้วยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง สำหรับเฝ้าติดตามและแจ้งเตือนสภาวะการทำงานที่ปกติและผิดปกติ เพื่อป้องกันการพังชำรุดเสียหายของฮีตเตอร์ที่อยู่ภายเครื่องอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อนและสามารถแสดงสถานะการทำงานปกติและแจ้งเตือนการทำงานที่ผิดปกติของเครื่องจักรได้ตามเวลาจริง และสามารถนำข้อมูลพฤติกรรมการทำงานของเครื่องจักรที่บันทึกและจัดเก็บไว้มาวิเคราะห์และประเมินเพื่อวางแผนการบำรุงรักษาเครื่องจักรให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น และค่าใช้จ่ายที่ใช้ในการออกแบบระบบและอุปกรณ์ต่างๆ มีราคาถูก สามารถหาซื้อได้ตามเว็บไซต์ สะดวกและง่ายต่อการบำรุงรักษา

2. หลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

การพัฒนาระบบเฝ้าติดตามและแจ้งเตือนสถานะการทำงานของเครื่องอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อนด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง มีหลักการและทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยดังนี้

2.1 กระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อน

กระบวนการอัดขึ้นรูปร้อนเป็นกระบวนการอัดขึ้นรูปชิ้นงานด้วยหลักการให้ความร้อนและแรงกดอัดแก่ชิ้นงาน เพื่อให้ได้ชิ้นงานที่มีรูปร่างลักษณะและคุณภาพตามมาตรฐานการผลิตที่กำหนด ซึ่งมี 5 ขั้นตอนการทำงาน ดังรูปที่ 1

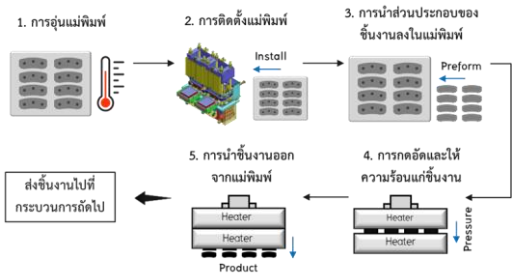
ขั้นตอนที่ 1 การอุ่นแม่พิมพ์ เป็นขั้นตอนการนำแม่พิมพ์ที่ใช้สำหรับอัดขึ้นรูปร้อนชิ้นงานไปให้ความร้อนในตู้อบ (Baking) เพื่อให้แม่พิมพ์มีอุณหภูมิที่พร้อมสำหรับกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน

ขั้นตอนที่ 2 การติดตั้งแม่พิมพ์ เป็นขั้นตอนการนำแม่พิมพ์ที่ผ่านขั้นตอนการอุ่นแม่พิมพ์มาติดตั้งที่เครื่องอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อน เพื่อเริ่มกระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน

ขั้นตอนที่ 3 การนำส่วนประกอบของชิ้นงานลงในแม่พิมพ์ เป็นขั้นตอนการนำทุกส่วนประกอบของชิ้นงานลงในแม่พิมพ์ เพื่อทำการอัดขึ้นรูปร้อนชิ้นงาน

ขั้นตอนที่ 4 การกดอัดและการให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน เป็นขั้นตอนการกดอัดและให้ความร้อนแก่ชิ้นงาน เพื่อให้มีรูปร่างลักษณะและคุณภาพตามมาตรฐานการผลิตที่กำหนด

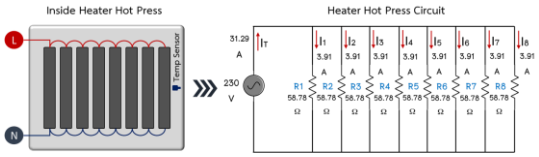
ขั้นตอนที่ 5 การนำชิ้นงานออกจากแม่พิมพ์ เป็นขั้นตอนการปลดชิ้นงานที่ผ่านขั้นตอนการกดอัดและให้ความร้อนออกจากแม่พิมพ์ และส่งชิ้นงานต่อไปที่กระบวนการถัดไป



รูปที่ 1 กระบวนการอัดขึ้นรูปร้อน

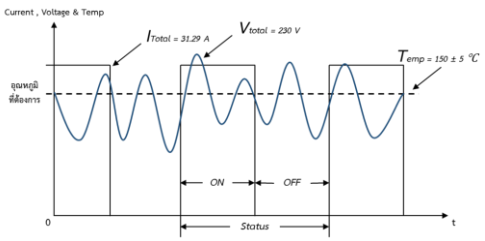
2.2 ระบบการทำความร้อนด้วยไฟฟ้าของเครื่องอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อน

ระบบการทำความร้อนด้วยไฟฟ้าของเครื่องอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อนมีการใช้ฮีตเตอร์ (Heater) ในการให้ความร้อนแก่แม่พิมพ์ โดยใช้ฮีตเตอร์ประเภทฮีตเตอร์แท่งจำนวน 8 แท่ง และฮีตเตอร์ 1 แท่ง มีขนาด 900 วัตต์ (W) การต่อวงจรของฮีตเตอร์ภายในแม่พิมพ์เป็นการต่อวงจรแบบขนาน ในสภาวะการทำงานปกติมีค่าแรงดันตกคร่อม 230 โวลต์ (V_T = 230 V) ค่ากระแสรวม 31.29 แอมป์ (I_T = 31.29 A) ดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 ระบบการทำความร้อนด้วยไฟฟ้าของเครื่องอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อน

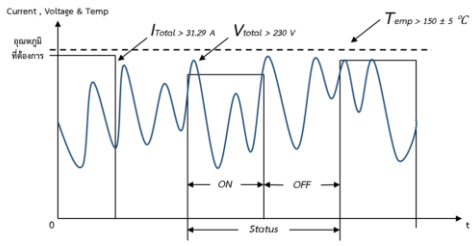
กระบวนการควบคุมการทำงานของเครื่องอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อนมีลักษณะการควบคุมแบบป้อนกลับ (ON-OFF Feedback Control) อุณหภูมิของแม่พิมพ์ถูกตรวจวัดสำหรับเป็นค่าที่ใช้ในการควบคุมการจ่ายกระแสและแรงดันไฟฟ้าให้กับฮีตเตอร์ สมมุติอุณหภูมิที่ต้องการถูกกำหนดไว้ที่ค่าๆ หนึ่งที่เป็นมาตรฐานการผลิต ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่าหรือสูงกว่าค่าที่กำหนด ระบบควบคุมการจ่ายกระแสและแรงดันไฟฟ้าให้กับฮีตเตอร์จะทำงานและหยุดทำงานตามลำดับ ดังรูปที่ 3



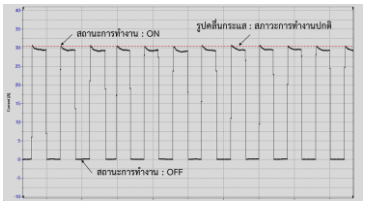
รูปที่ 3 รูปคลื่นการจ่ายกระแสและแรงดันไฟฟ้าในสภาวะโหลดสมดุล

ในบางกรณีมีการกำหนดค่าอุณหภูมิที่ต้องการไว้สูง ทำให้ระบบควบคุมสั่งการให้จ่ายกระแสและแรงดันไฟฟ้า

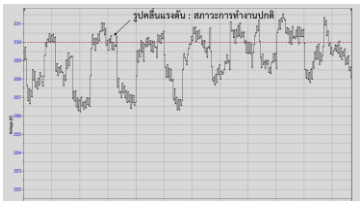
ให้กับฮีตเตอร์ในรูปแบบเกินพิกัดโหลด เป็นผลทำให้ฮีตเตอร์ขาดในที่สุด ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 รูปคลื่นการจ่ายกระแสและแรงดันไฟฟ้าในสภาวะ



รูปที่ 5 การจ่ายกระแสไฟฟ้าให้กับฮีตเตอร์ในสภาวะปกติ



รูปที่ 6 การจ่ายแรงดันไฟฟ้าให้กับฮีตเตอร์ในสภาวะปกติ

จากรูปที่ 5 - 6 เป็นการศึกษาพฤติกรรมการจ่ายกระแสและแรงดันไฟฟ้าให้กับฮีตเตอร์ของเครื่องอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อน โดยจากการศึกษาพบว่าค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ยที่จ่ายให้กับฮีตเตอร์มีค่าเท่ากับ I_T = 31.17 A และ V_T = 229.28 V ค่าข้อมูลดังกล่าวถูกนำไปใช้สำหรับการกำหนดเงื่อนไขการทำงานของระบบในการแจ้งเตือนสภาวะการทำงานที่ผิดปกติของฮีตเตอร์

2.3 บริการ NETPIE Platform

NETPIE เป็นแพลตฟอร์มที่ให้บริการสำหรับ IoT (Internet of Things) ในการบันทึกและจัดเก็บข้อมูลในระบบฐานข้อมูลแบบคลาวด์ (Cloud) และนำข้อมูลมาแสดงผลผ่านเน็ตพายฟรีบอร์ด (NETPIE Freeboard) โดยเน็ตพายแพลตฟอร์มเป็น Middleware ที่มีหัวใจหลักเป็น Distributed MQTT Brokers ที่เป็นเสมือนจุดนัดพบให้สิ่งต่างๆ (Things) นั้นสามารถติดต่อสื่อสาร แลกเปลี่ยนข้อมูล และทำงานร่วมกันผ่านวิธีการส่งข้อความแบบ Publish/Subscribe

อีกทั้ง NETPIE ยังมีโครงสร้างสถาปัตยกรรมที่เป็นคลาวด์อย่างแท้จริงในทุกองค์ประกอบ ทำให้สามารถขยายตัวได้อย่างอัตโนมัติ (Auto Scale) สามารถซ่อมแซมและดูแลตัวเองได้โดยอัตโนมัติเมื่อมีส่วนหนึ่งส่วนใดในระบบมีปัญหา (Self-Healing, Self-Recovery) รวมไปถึงการรักษาความปลอดภัยของข้อมูลอย่างมีประสิทธิภาพ [3] ซึ่งการเชื่อมต่อสิ่งต่าง ๆ เข้ากับเน็ตพายแสดงดังรูปที่ 7

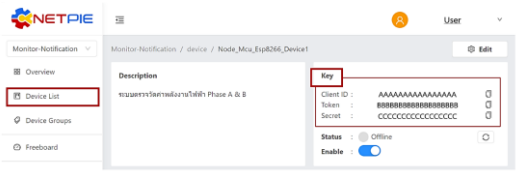
รูปที่ 7 การเชื่อมต่อสิ่งต่าง ๆ เข้ากับ NETPIE

- การใช้บริการ NETPIE Platform

ในงานวิจัยนี้เลือกใช้งานบริการ NETPIE Platform เนื่องจากเป็นระบบที่ช่วยให้อุปกรณ์สามารถสื่อสารและแลกเปลี่ยนข้อมูลกันได้ มีการรักษาความปลอดภัยของข้อมูลโดยวิธีการจำกัดการเข้าถึงในระดับ Fine Grain และมีความยืดหยุ่นสูงต่อการขยายระบบ ในการเริ่มต้นใช้งานทำได้โดยการสมัครสมาชิกเพื่อขอใช้บริการที่เว็บไซต์ https://netpie.io/ [7] ดังรูปที่ 8

รูปที่ 8 การใช้งานบริการ NETPIE Platform

เมื่อทำการสมัครสมาชิกแล้วจากนั้นทำการสร้าง Project ที่เมนู Create Project แล้วกดเข้าไปใน Project เพื่อสร้าง Device List สำหรับนำ Key ของ Device ไปใช้ในการเขียนโปรแกรมเพื่อให้ Node MCU ESP8266 สามารถสื่อสารและส่งค่าข้อมูลกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่ตรวจวัดได้จากเซนเซอร์ Pzem-004T มาบันทึกและจัดเก็บที่ NETPIE Platform ดังรูปที่ 9



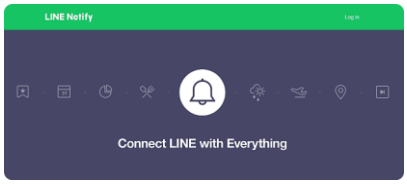
รูปที่ 9 Key สำหรับการเชื่อมต่อ NETPIE Platform

รูปที่ 11 การ Generate Token

2.4 บริการ Application LINE

Application LINE เป็นแอปพลิเคชันที่มีการผสมผสานบริการ Messaging และ Voice Over IP รวมเข้าด้วยกัน ทำให้เกิดเป็นแอปพลิเคชันที่สามารถส่งข้อความสื่อมัลติมีเดียต่างๆ เช่น ข้อความที่เป็นตัวอักษร รูปภาพ และวีดีทัศน์ รวมถึงการติดต่อสื่อสารด้วยการโทรแบบเสียงและแบบภาพวีดีโอเคลื่อนไหวได้ [8] ซึ่งในปัจจุบันมีการใช้งานแอปพลิเคชันไลน์ตามลักษณะของงานที่หลากหลายมากยิ่งขึ้น

แอปพลิเคชันไลน์ได้มีการให้บริการเกี่ยวกับ LINE Notify ซึ่งเป็นบริการที่ใช้ในการส่งข้อความหรือแจ้งเตือนในรูปแบบอัตโนมัติ โดยสามารถส่งข้อความหรือการแจ้งเตือนดังกล่าวไปยังกลุ่ม (Group) หรือบัญชีส่วนตัวผ่าน API ของไลน์ได้โดยตรง [9] ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 บริการ LINE Notify

- การใช้บริการ LINE Notify

การเริ่มต้นใช้งานบริการ LINE Notify ทำได้โดยการสมัครใช้งานแอปพลิเคชันไลน์แบบบัญชีส่วนตัวหรือแบบกลุ่มการทำงาน จากนั้นสมัครใช้งานบริการ LINE Notify ที่เว็บไซต์ https://notify-bot.line.me/my/ แล้วทำการ Login เข้าสู่ระบบด้วยอีเมล์และรหัสผ่านเพื่อขอ Token ด้วยการกด “Generate Token” ดังรูปที่ 11

3. อุปกรณ์และวิธีดำเนินการวิจัย

การออกแบบและพัฒนาระบบเฝ้าติดตามและแจ้งเตือนสถานะการทำงานของเครื่องอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อนด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง มีรายละเอียดของอุปกรณ์และวิธีการดำเนินการวิจัยดังนี้

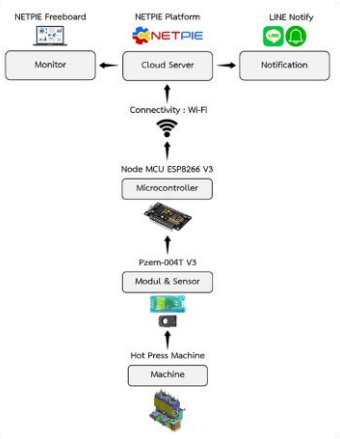
3.1 โครงสร้างและส่วนประกอบของระบบ

ส่วนประกอบของระบบประกอบด้วย 3 ส่วน ดังรูปที่ 12 ได้แก่ ระบบฮาร์ดแวร์และซอฟต์แวร์ ระบบคลาวด์แพลตฟอร์ม และระบบการแจ้งเตือน ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

ส่วนที่ 1 : ชุด Sensor & Microcontroller เป็นส่วนที่ใช้สำหรับตรวจวัดค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับฮีตเตอร์ โดยใช้เซนเซอร์ Pzem-004T ในการตรวจวัดค่าข้อมูลที่ตรวจวัดได้จะถูกประมวลผลด้วย Node MCU ESP8266 และส่งข้อมูลไปบันทึกและจัดเก็บไว้บนคลาวด์เน็ตพายแพลตฟอร์ม ผ่านระบบการเชื่อมโยงการสื่อสารแบบไวไฟ (Wi-Fi)

ส่วนที่ 2 : บริการ NETPIE Platform เป็นส่วนที่ใช้สำหรับบันทึกและจัดเก็บค่าข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัด ซึ่งข้อมูลจะถูกบันทึกและจัดเก็บไว้บนระบบคลาวด์และสามารถนำค่าข้อมูลดังกล่าวมาแสดงผลในรูปแบบของจอแสดงผลบน NETPIE Freeboard ตามเวลาจริง อีกทั้งยังสามารถดึงค่าข้อมูลที่ถูกบันทึกและจัดเก็บไว้มาวิเคราะห์ย้อนหลังได้

ส่วนที่ 3 : บริการ LINE Notify เป็นส่วนที่ใช้สำหรับแจ้งเตือนในรูปแบบอัตโนมัติเมื่อเกิดสภาวะการทำงานที่ผิดปกติในการจ่ายกระแสและแรงดันไฟฟ้าให้กับฮีตเตอร์

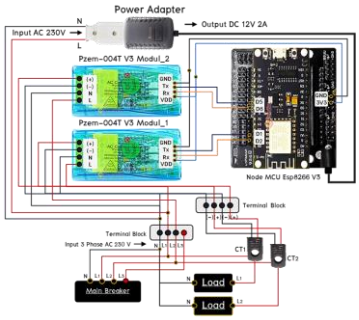


รูปที่ 12 โครงสร้างและส่วนประกอบของระบบ

3.2 การติดตั้งชุด Sensor & Microcontroller

ชุด Sensor & Microcontroller ดังรูปที่ 13 มีส่วนประกอบของระบบและรูปแบบการเชื่อมต่อวงจรไฟฟ้า (Electrical Circuit) และวงจรอิเล็กทรอนิกส์ (Electronic Circuit) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

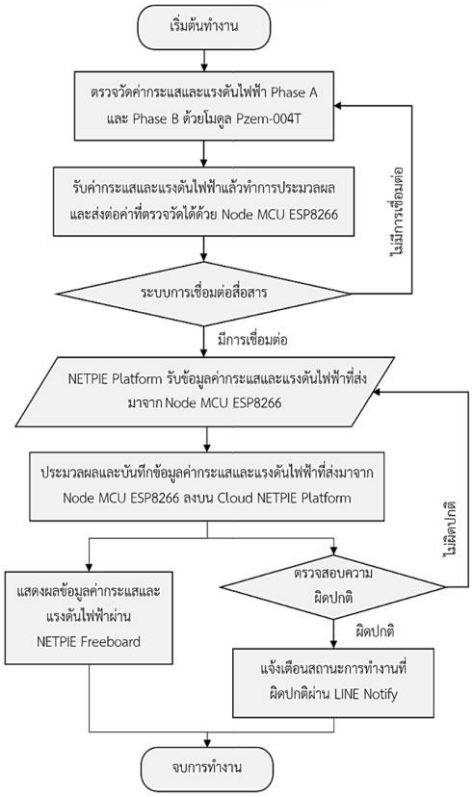
- Pzem-004T & CT Sensor จำนวน 2 ชุด ใช้สำหรับตรวจวัดค่ากระแสพิกัด 0-100 A และแรงดันไฟฟ้าที่พิกัด 0-260 V ที่จ่ายให้กับฮีตเตอร์ Phase A และ Phase B
- Node MCU ESP8266 ใช้สำหรับเขียนคำสั่งควบคุมการทำงานของ Pzem-004T ด้วยโปรแกรม Arduino IDE ภาษาที่ใช้เขียน คือ ภาษาซี โดยโหนดเอ็มซียูจะรับค่าและประมวลข้อมูลแล้วส่งขึ้นไปบันทึกและจัดเก็บบน NETPIE Platform ด้วยระบบการเชื่อมโยงการสื่อสารแบบไวไฟ (Wi-Fi)
- Node MCU Base ใช้สำหรับต่อขยายขา Node MCU ESP8266 ให้สามารถเชื่อมต่อวงจรได้สะดวกยิ่งขึ้น
- AC-DC Power Adapter ใช้สำหรับแปลงไฟฟ้า 100-240VAC เป็น 12VDC 2A เพื่อใช้เป็นไฟเลี้ยง Node MCU Base และ Node MCU ESP8266



รูปที่ 13 การติดตั้งชุด Sensor & Microcontroller

3.3 รูปแบบและขั้นตอนการทำงานของระบบ

การพัฒนาระบบเฝ้าติดตามและแจ้งเตือนสถานะการทำงานของเครื่องอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อนด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง ใช้โปรแกรม Arduino IDE และภาษาซีในการเขียนคำสั่งควบคุมการทำงานของระบบ โดยการทำงานของระบบจะเริ่มต้นจากการตรวจวัดค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับฮีตเตอร์ Phase A และ Phase B ด้วย Pzem-004T แล้วส่งค่าที่ตรวจวัดได้ไปประมวลผลที่ Node MCU ESP8266 จากนั้นส่งข้อมูลขึ้นไปบันทึกและจัดเก็บบน NETPIE Platform ด้วยระบบการเชื่อมโยงการสื่อสารแบบไวไฟ (Wi-Fi) ข้อมูลดังกล่าวจะถูกนำมาแสดงผลในรูปแบบจอแสดงผลผ่าน NETPIE Freeboard และแจ้งเตือนผ่าน LINE Notify เมื่อมีความผิดปกติเกิดขึ้นในการจ่ายกระแสและแรงดันไฟฟ้าให้กับฮีตเตอร์ดังรูปที่ 14



รูปที่ 14 รูปแบบและขั้นตอนการทำงานของระบบ

4. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ระบบที่พัฒนาขึ้นถูกนำไปติดตั้งและทดสอบการตรวจวัดค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับฮีตเตอร์ของเครื่องอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อน แล้วแสดงผลค่าที่ได้จากการตรวจวัดผ่านหน้าจอแสดงผล (NETPIE Freeboard) และแจ้งเตือนผ่านไลน์ (LINE Notify) เมื่อมีความผิดปกติเกิดขึ้น โดยการทดสอบออกเป็น 2 เงื่อนไข ดังนี้

4.1 การทดสอบการตรวจวัดและแสดงผลบน NETPIE Freeboard

การทดสอบการตรวจวัดและแสดงผลบน NETPIE Freeboard มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบความถูกต้องและความแม่นยำในการแสดงผลข้อมูลค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับฮีตเตอร์ที่ได้จากการตรวจวัดผ่านหน้าจอแสดงผล เปรียบเทียบกับค่าที่ตรวจวัดได้จากเครื่องมือวัด Fluke Energy Analyze เมื่อระยะการส่งสัญญาณอินเทอร์เน็ตมีการเปลี่ยนแปลง

จากการทดสอบ พบว่าระบบสามารถตรวจวัดและแสดงผลข้อมูลค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับฮีตเตอร์ได้ถูกต้องใกล้เคียงกับค่าที่ตรวจวัดได้จากเครื่องมือวัด Fluke Energy Analyze ซึ่งผลการทดสอบระบบแสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบความถูกต้องและความแม่นยำในการตรวจวัดและแสดงผลข้อมูล

ระยะทดสอบ (m) ระยะส่งสัญญาณอินเทอร์เน็ต	ค่าความคาดเคลื่อน (%Error)			
	Phase A		Phase B	
	Volt	Amp	Volt	Amp
0	0.09%	0.44%	0.09%	0.44%
2	0.04%	0.44%	0.04%	0.87%
4	0.04%	0.87%	0.04%	0.87%
6	0.04%	0.87%	0.09%	0.87%
8	0.13%	0.44%	0.09%	0.44%
10	0.13%	0.44%	0.09%	0.44%
12	0.13%	0.87%	0.09%	0.44%
14	0.09%	0.87%	0.09%	0.87%
16	0.09%	0.44%	0.04%	0.44%
18	0.18%	0.44%	0.18%	1.30%
20	ระบบไม่ตอบสนอง			
22	ระบบไม่ตอบสนอง			

จากตารางที่ 1 จะเห็นว่าการตรวจวัดและแสดงผลค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเท่ากับ 0.18% และมีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุดเท่ากับ 0.04% การตรวจวัดและแสดงผลค่ากระแสไฟฟ้ามีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเท่ากับ 1.30% และมีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุดเท่ากับ 0.04% โดยระยะที่ระบบสามารถใช้งานได้สูงสุดเท่ากับ 18 เมตร และระยะที่ระบบไม่สามารถทำงานและตอบสนองได้ คือ 19 เมตรเป็นต้นไป

จากการทดลองใช้งานระบบ พบว่าระบบสามารถแสดงผลค่าข้อมูลสำหรับเฝ้าติดตามสถานะการจ่ายกระแสและแรงดันไฟฟ้าให้กับฮีตเตอร์ของเครื่องอัดขึ้นรูปพิมพ์ผ่าน NETPIE Freeboard ได้ตามเวลาจริง โดยค่าข้อมูลที่ถูกนำมาแสดงผล ได้แก่ ค่าแรงดันไฟฟ้า Phase A & B ค่ากระแสไฟฟ้า Phase A & B ค่ากำลังไฟฟ้า Phase A & B และค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ Phase A & B ดังรูปที่ 15 และสามารถแสดงข้อมูลย้อนหลังผ่าน NETPIE Feed ดังรูปที่ 16 - 19

4.2 การทดสอบการตรวจวัดและแจ้งเตือนผ่าน LINE Notify

การทดสอบการตรวจวัดและแจ้งเตือนผ่าน LINE Notify มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบความถูกต้องแม่นยำในการตรวจวัดและการตอบสนองในการแจ้งเตือนสถานะการทำงานที่ผิดปกติของการจ่ายกระแสและแรงดันไฟฟ้าให้กับฮีตเตอร์ผ่านแอปพลิเคชันไลน์ เปรียบเทียบกับค่าที่ตรวจวัดได้จากเครื่องมือวัด Fluke Energy Analyze เมื่อระยะการส่งสัญญาณอินเทอร์เน็ตมีการเปลี่ยนแปลง

จากการทดสอบ พบว่าระบบสามารถตรวจวัดและตอบสนองได้อย่างรวดเร็วในการแจ้งเตือนสภาวะการทำงานที่ผิดปกติของการจ่ายกระแสและแรงดันไฟฟ้าให้กับฮีตเตอร์ รวมถึงค่าที่ตรวจวัดและแจ้งเตือนมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ตรวจวัดได้จากเครื่องมือวัด Fluke Energy Analyze ซึ่งผลการทดสอบระบบแสดงดังตารางที่ 2

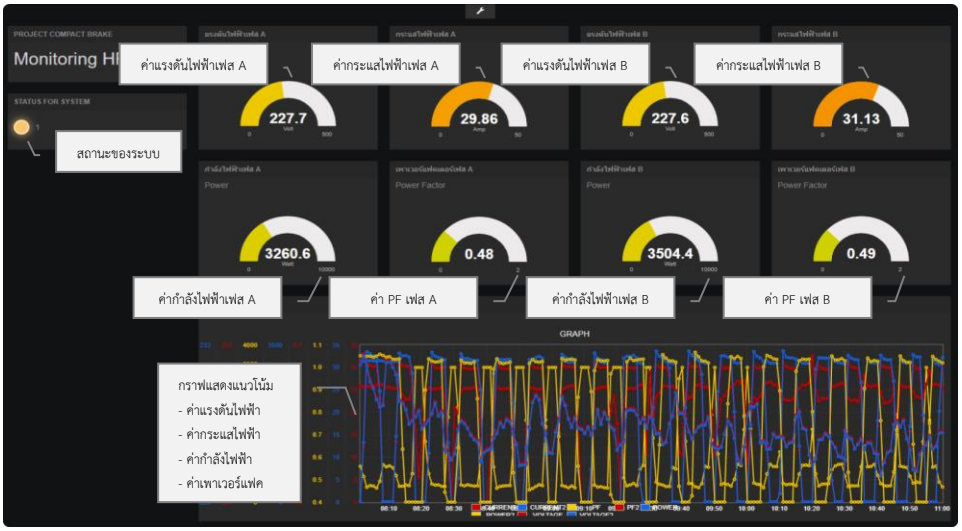
ตารางที่ 2 ผลการทดสอบความถูกต้องแม่นยำและการตอบสนองในการแจ้งเตือน

ระยะทดสอบ (m) ระยะส่งสัญญาณอินเทอร์เน็ต	ค่าความคาดเคลื่อน (%Error)		ค่า Delay	
	Volt	Amp	min	%Delay
0	0.09%	0.87%	0 min	0%
1	0.04%	1.30%	0 min	0%
2	0.04%	0.87%	0 min	0%
3	0.04%	1.30%	0 min	0%
4	0.04%	0.44%	0 min	0%
5	0.09%	0.87%	0 min	0%
6	0.09%	0.44%	0 min	0%
7	0.18%	1.30%	0 min	0%
8	0.13%	0.87%	0 min	0%
9	0.04%	0.44%	0 min	0%
10	0.04%	1.30%	0 min	0%
11	0.04%	0.44%	0 min	0%
12	0.26%	2.17%	1 min	1.67%
13	ระบบไม่ตอบสนอง			
14	ระบบไม่ตอบสนอง			

จากตารางที่ 2 จะเห็นว่าการตรวจวัดและแจ้งเตือนค่าแรงดันไฟฟ้ามีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเท่ากับ 0.26% และมีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุดเท่ากับ 0.04% การตรวจวัดและแจ้งเตือนค่ากระแสไฟมีค่าความคลาดเคลื่อนสูงสุดเท่ากับ 2.17% และมีค่าความคลาดเคลื่อนต่ำสุดเท่ากับ 0.44% ระยะที่ระบบสามารถใช้งานและตอบสนองได้เร็วที่สุด คือ 0 – 11 เมตร มีค่า Delay ในการแจ้งเตือนเท่ากับ 0 นาที และระยะที่ระบบสามารถใช้งานและตอบสนองได้ช้าที่สุด คือ 12 เมตร มีค่า Delay ในการแจ้งเตือนเท่ากับ 1 นาที โดยระยะที่ระบบสามารถใช้งานได้สูงสุดเท่ากับ 12 เมตร และระยะที่ระบบไม่สามารถทำงานและตอบสนองได้ คือ 13 เมตรเป็นต้นไป

จากการทดลองใช้งานระบบ พบว่าระบบสามารถแจ้งเตือนสภาวะการทำงานที่ผิดปกติในการจ่ายกระแสและแรงดันไฟฟ้าให้กับฮีตเตอร์ของเครื่องอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อนผ่าน LINE Notify ได้ตามเวลาจริง และจากการศึกษาพฤติกรรมการจ่ายกระแสและแรงดันไฟฟ้าจึงกำหนดให้มีการแจ้งเตือน 4 สภาวะเพื่อแจ้งเตือนสภาวะการทำงานที่ผิดปกติ ได้แก่ กระแสสูงเกิน (Over Current) กระแสต่ำเกิน (Under Current) แรงดันสูงเกิน (Over Voltage) และแรงดันต่ำเกิน (Under Voltage) ซึ่งเงื่อนไขในการแจ้งเตือนกำหนดดังนี้

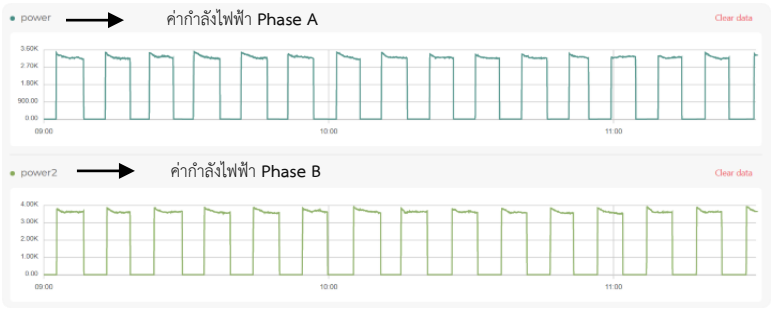
- สภาวะกระแสสูงเกิน : เมื่อค่ากระแสไฟฟ้ารวม (Ir) ที่จ่ายให้กับฮีตเตอร์สูงกว่า 33.00 แอมป์ กำหนดให้มีการแจ้งเตือนผ่าน LINE Notify ดังรูปที่ 21
- สภาวะกระแสต่ำเกิน : ค่ากระแสไฟฟ้ารวม (Ir) ที่จ่ายให้กับฮีตเตอร์ต่ำกว่า 28.00 แอมป์ กำหนดให้มีการแจ้งเตือนผ่าน LINE Notify ดังรูปที่ 21
- สภาวะแรงดันสูงเกิน : ค่าแรงดันไฟฟ้ารวม (VT) ที่จ่ายให้กับฮีตเตอร์สูงกว่า 235.00 โวลต์ กำหนดให้มีการแจ้งเตือนผ่าน LINE Notify ดังรูปที่ 22
- สภาวะแรงดันต่ำเกิน : ค่าแรงดันไฟฟ้ารวม (VT) ที่จ่ายให้กับฮีตเตอร์ต่ำกว่า 220.00 โวลต์ กำหนดให้มีการแจ้งเตือนผ่าน LINE Notify ดังรูปที่ 22



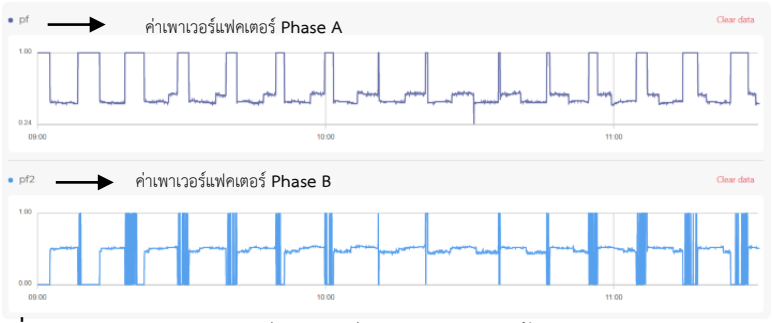
รูปที่ 15 การแสดงผลข้อมูลแบบ Real Time ผ่าน NETPIE Freeboard

รูปที่ 16 การแสดงผลค่าแรงดันไฟฟ้า (Voltage) ย้อนหลังผ่าน NETPIE Feed

รูปที่ 17 การแสดงผลค่ากระแสไฟฟ้า (Current) ย้อนหลังผ่าน NETPIE Feed



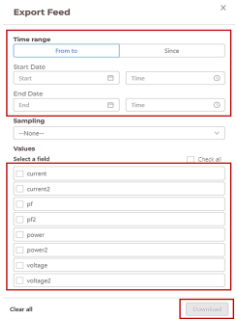
รูปที่ 18 การแสดงผลค่ากำลังไฟฟ้า (Power) ย้อนหลังผ่าน NETPIE Feed



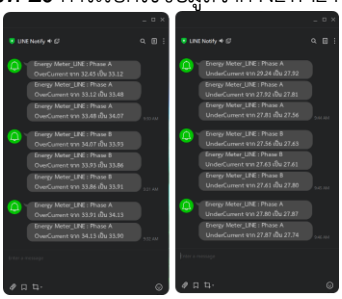
รูปที่ 19 การแสดงผลค่าเพาเวอร์แฟคเตอร์ (Power Factor) ย้อนหลังผ่าน NETPIE Feed

จากรูปที่ 15 - 19 เป็นรูปแบบการแสดงผลข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัด โดยข้อมูลดังกล่าวจะถูกบันทึกและจัดเก็บไว้บน NETPIE Platform ทำให้ผู้ใช้งานระบบสามารถเฝ้าติดตามและดูข้อมูลสถานะการทำงานของเครื่องอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อน ณ เวลาปัจจุบันผ่าน NETPIE Freeboard และดูข้อมูลย้อนหลังผ่าน NETPIE Feed ได้ตามเวลาจริง โดยข้อมูลต่างๆ เหล่านี้จะมีประโยชน์อย่างมากในการวิเคราะห์พฤติกรรมและความผิดปกติต่างๆ ที่เกิดขึ้นกับการจ่ายกระแสและแรงดันฟ้าให้กับฮีตเตอร์ของเครื่องอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อน อีกทั้งยังสามารถนำข้อมูลไปใช้วิเคราะห์และประเมินเพื่อวางแผนการซ่อมบำรุงระบบการทำความร้อนด้วยไฟฟ้าของเครื่องอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อนได้เป็นอย่างดี

การเรียกใช้ข้อมูลย้อนหลังจาก NETPIE Feed สามารถทำได้โดยกดปุ่ม “Export” เลือกช่วงข้อมูล “From to” หรือ “Since” จากนั้นเลือกประเภทข้อมูลที่ต้องการแล้วกดปุ่ม “Download” เพื่อดาวน์โหลดข้อมูลดังรูปที่ 20 ซึ่งข้อมูลที่ได้มาจะอยู่ในรูปแบบของไฟล์ Excell



รูปที่ 20 การเรียกใช้ข้อมูลจาก NETPIE Feed



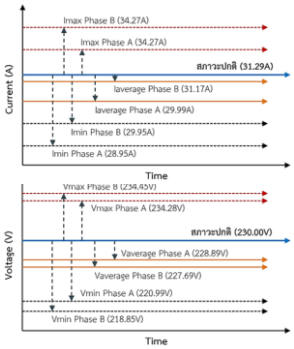
รูปที่ 21 การแจ้งเตือนสภาวะกระแสสูงและกระแสต่ำเกิน (Phase A & Phase B)

รูปที่ 22 การแจ้งเตือนสภาวะแรงดันสูงและแรงดันต่ำเกิน (Phase A & Phase B)

จากรูปที่ 21 - 22 เป็นรูปแบบการแจ้งเตือนเมื่อเกิดความผิดปกติในการจ่ายกระแสและแรงดันไฟฟ้าให้กับฮีตเตอร์ของเครื่องอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อน พบว่าเมื่อมีความผิดปกติเกิดขึ้นจะมีการบ่งชี้สถานะการทำงานที่ผิดปกติและส่งข้อความแจ้งเตือนผ่าน LINE Notify ไปยังผู้ใช้งานระบบและผู้ที่เกี่ยวข้องให้ทราบถึงสถานะหรือพฤติกรรมการทำงาน ณ ขณะนั้นของเครื่องจักรดังกล่าว เพื่อให้สามารถดำเนินการวางแผนซ่อมบำรุงและทำการซ่อมบำรุงอย่างมีประสิทธิภาพและไม่กระทบกับกระบวนการผลิตที่กำลังดำเนินอยู่

4.3 วิเคราะห์ผลการติดตั้งใช้งานระบบ

จากการทดสอบระบบทั้ง 2 เงื่อนไข จะเห็นว่าระบบสามารถทำงานได้อย่างสมบูรณ์ทุกๆ เงื่อนไข จากนั้นได้มีการนำระบบไปติดตั้งใช้งานเพื่อเฝ้าติดตามและแจ้งเตือนสถานะการจ่ายกระแสและแรงดันไฟฟ้าให้กับฮีตเตอร์ของเครื่องอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อนเครื่องที่ 11 (Hot Press 11) จากการติดตั้งใช้งานระบบพบว่าผู้ใช้งานสามารถเฝ้าติดตามสถานะการจ่ายกระแสและแรงดันไฟฟ้าได้ตามเวลาจริงผ่าน NETPIE Freeboard และเมื่อมีความผิดปกติในการจ่ายกระแสและแรงดันไฟฟ้าเกิดขึ้นจะมีการแจ้งเตือนผ่าน LINE Notify ไปยังผู้ใช้งานให้ทราบในทันที และข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดที่บันทึกและจัดเก็บไว้บน NETPIE Platform จะถูกนำมาวิเคราะห์และประเมินเกี่ยวกับพฤติกรรมการจ่ายกระแสและแรงดันไฟฟ้าเพื่อวางแผนการบำรุงรักษาและดำเนินการซ่อมบำรุงในขั้นตอนต่อไป



รูปที่ 23 การวิเคราะห์ค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้า

จากรูปที่ 23 เป็นการวิเคราะห์เกี่ยวกับสถานะและพฤติกรรมการจ่ายกระแสและแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับฮีตเตอร์ของเครื่องพิมพ์ร้อนเครื่องที่ 11 ซึ่งได้จาก NETPIE Feed จะเห็นว่าค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าเฉลี่ย ($I_{Average}$ & $V_{Average}$) มีค่าต่ำกว่าค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าในสภาวะปกติ จึงสามารถประเมินได้เบื้องต้นว่าฮีตเตอร์ของเครื่องอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อนเครื่องที่ 11 มีแนวโน้มที่พังจะพังชำรุดเสียหายได้ เพื่อให้ข้อมูลมีความน่าเชื่อถือและมีความแม่นยำมากยิ่งขึ้นอาจจะต้องนำข้อมูลดังกล่าวไปวิเคราะห์ด้วยโมเดลวิเคราะห์การถดถอย (Regression model) และนำผลการวิเคราะห์ไปใช้ในการวางแผนบำรุงรักษาให้มีประสิทธิภาพ เพื่อป้องกันการพังชำรุดของเครื่องจักรและลดความสูญเสียในกระบวนการผลิต

5. สรุปผล

การออกแบบและพัฒนาระบบเฝ้าติดตามและแจ้งเตือนสถานะการทำงานของเครื่องอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อนด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง ได้มีการประยุกต์ใช้

เทคโนโลยี IoT (Internet of Things) เข้ามาใช้งานร่วมกับเครื่องจักรในกระบวนการผลิต โดยระบบที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วย 3 ส่วน คือ 1) ส่วนของเซนเซอร์และไมโครคอนโทรลเลอร์ 2) ส่วนของบริการคลาวด์เน็ตพายแพลตฟอร์ม 3) ส่วนของบริการการแจ้งเตือนผ่านไลน์ จากการทดสอบพบว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถตรวจวัดแสดงผล และแจ้งเตือนข้อมูลได้อย่างถูกต้อง สามารถใช้งานสำหรับการเฝ้าติดตามสถานะการจ่ายกระแสและแรงดันไฟฟ้าให้กับฮีตเตอร์ของเครื่องอัดขึ้นรูปพิมพ์ร้อนผ่าน NETPIE Freeboard และแจ้งเตือนผ่าน LINE Notify เมื่อค่ากระแสและแรงดันไฟฟ้าที่จ่ายให้กับฮีตเตอร์มีความผิดปกติเกิดขึ้นได้ตามเวลาจริง อีกทั้งยังสามารถนำค่าข้อมูลที่บันทึกและจัดเก็บบนคลาวด์ NETPIE Platform มาวิเคราะห์ย้อนหลังและประเมินเพื่อวางแผนการบำรุงรักษาเครื่องจักร (Predictive Maintenance) ให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นได้

จากระบบที่พัฒนาขึ้นยังมีข้อจำกัด คือ ไม่สามารถใช้งานระบบเพื่อป้องสภาวะการทำงานที่ผิดปกติในการจ่ายกระแสและแรงดันไฟฟ้าได้โดยตรง เนื่องจากไม่ได้มีการเชื่อมต่อระบบเข้ากับระบบควบคุมการจ่ายกระแสและแรงดันไฟฟ้าของฮีตเตอร์ เป็นผลทำให้ไม่สามารถควบคุมและสั่งการตัดกระแสและแรงดันไฟฟ้าได้อย่างอัตโนมัติเมื่อมีความผิดปกติเกิดขึ้น รวมถึงระยะการใช้งานของระบบที่จำกัด ซึ่งเกิดจากความคลอบคลุมและระยะการรับสัญญาณอินเทอร์เน็ตของระบบ เป็นผลทำให้ระบบไม่สามารถทำงานและตอบสนองได้ อย่างไรก็ตามสามารถนำระบบหรือวิธีการที่นำเสนอไปพัฒนาต่อยอดให้มีการเชื่อมต่อระบบกับระบบควบคุมภายในเครื่องจักรและเพิ่มจุดกระจายสัญญาณอินเทอร์เน็ตให้ครอบคลุม เพื่อให้ระบบทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพและสามารถเฝ้าติดตาม แจ้งเตือน และควบคุมสั่งการด้วยการใช้เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งได้อย่างอัตโนมัติและตามเวลาจริง เพื่อป้องกันความเสียหายที่จะเกิดขึ้นกับเครื่องจักรได้โดยตรงและรวดเร็ว

7. กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.) และบริษัทกรณีศึกษา ที่ให้ทุนสนับสนุนงานวิจัยในครั้งนี้

8. เอกสารอ้างอิง

[1] CHAIJAROENTECH. Machine, type of machine, maintenance method and knowledge of automation (Automation System). [Internet]. 2020 [cited 2022Mar 1]. Available from: https:// www.chi.co.th/article /article-2229/ (in Thai)

[2] Suwat S. Smart Maintenance. [Internet]. 2019 [cited 2022 Mar 1]. Available from: https://www.nectec. Or .th/news/news-pr-news/smart-maintenance-definition .html (in Thai)

[3] NECTEC. NETPIE: Internet of Things [Internet]. 2019 [cited 2022 Mar 1]. Available from: https:// www. nectec.or.th/innovation/innovation-software/netpie .html (in Thai)

[4] Kittiphumi R. Fault detection and protection development while motor working with platform of netpie. SAU Journal of Science & Technology. 2563; 6(1):1-20 (in Thai)

[5] Siriwich T, Prasit S. Development of fault protection and monitoring of three-Phase motor with internet of thing. Kasem Bundit Engineering Journal. 2562;9(2):105-26 (in Thai)

[6] Nattawut D. Monitoring water temperature in electric heater system of calender by internet of things. The 33rd Conference on Mechanical Engineering Network; 2019 Jul 2-5; Udon Thani District. Faculty of Engineering Mahasarakham University; 2019.

[7] NETPIE 2020. NETPIE Platform User Manual : Welcome to the NETPIE Platform 2020. [Internet]. Update 2022 [cited 2022 Feb 1]. Available from: https://docs.netpie.io/ (in Thai)

[8] LINE. LINE service : LINE messenger of the world. [Internet]. Update 2022 [cited 2022 Feb 1]. Available from:https://linecorp.com/en/business/service(in Thai)

[9] LINE Notify. Connect LINE with Everything. [Internet]. Update 2022 [cited 2022 Feb 1]. Available from : https://notify-bot.line.me/th/ (in Thai)

การจัดทำแผนที่น้ำท่วมในอำเภอเชียงขวัญ จังหวัดร้อยเอ็ด โดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ 1D/2D

เสาวนิต ปราบนคร[1] ศุภกร ศิรพจนกุล[1*] และสุคม ลิปิเลิศ[1]

saowanit_p@rmutt.ac.th[1], suphakorn_s@rmutt.ac.th[1*], sukhom_l@rmutt.ac.th[1]

Received : 30-Sep-2022
Revised : 19-Dec-2022
Accepted : 21-Dec-2022

[1] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

บทคัดย่อ

อำเภอเชียงขวัญ จังหวัดร้อยเอ็ด เป็นพื้นที่น้ำท่วมซ้ำซาก โดยในรอบ 12 ปีที่ผ่านมา (พ.ศ. 2553-2564) เกิดอุทกภัยในอำเภอเชียงขวัญ 9 ครั้ง ก่อให้เกิดความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สิน การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อประเมินพื้นที่น้ำท่วมในอำเภอเชียงขวัญ ที่รอบปีการเกิด 2, 5, 10, 25, 50 และ 100 ปี โดยทำการประเมินปริมาณและระดับน้ำหลากที่รอบปีการเกิดต่างๆ โดยวิธีกัมเบล และนำเข้าสู่แบบจำลอง HEC-RAS 1D/2D ซึ่งมีผลการปรับเทียบและสอบทานดีมาก คือ ค่า R^2 > 90% และ RMSE < 1 เมตร ผลการศึกษาพบว่าที่รอบปีการเกิด 2, 5, 10, 25, 50 และ 100 ปี มีพื้นที่น้ำท่วม 22,792; 36,554; 39,053; 41,476; 43,965 และ 45,349 ไร่ ตามลำดับ ที่รอบปีการเกิด 2 และ 5 ปี มีระดับน้ำท่วมส่วนใหญ่ 0-2 ม. และที่รอบปีการเกิดที่เหลือ มีระดับน้ำท่วมส่วนใหญ่ 0-4 ม. โดยน้ำจะเริ่มท่วมที่ตำบลเชียงขวัญเนื่องจากอยู่ใกล้กับจุดบรรจบกับลำปาว แต่เมื่อปริมาณน้ำมากขึ้น พื้นที่ที่ได้รับผลกระทบมากที่สุด คือ ตำบลพลับพลา พระธาตุ และเชียงขวัญ ตามลำดับ เนื่องจากสภาพคอขวดทางด้านท้ายน้ำทำให้ประสิทธิภาพการระบายน้ำลดลง ปริมาณน้ำจากด้านท้ายน้ำจึงสะสมล้นขึ้นมาทางต้นน้ำ ข้อมูลนี้มีความสำคัญต่อการวางแผนและการพัฒนามาตรการต่าง ๆ ทั้งการป้องกัน บรรเทา ช่วยเหลือ หรือชดเชยความเสียหายจากอุทกภัย นอกจากนี้ควรเผยแพร่ให้กับประชาชน ให้มีความเข้าใจ สามารถปรับตัวรับมือกับอุทกภัยที่จะเกิดขึ้นในอนาคตได้

คำสำคัญ: การวิเคราะห์ความถี่ แบบจำลองชลศาสตร์ HEC-RAS แผนที่น้ำท่วม แม่น้ำชี

Flood Inundation Mapping of Chiang Khwan District, Roi Et by Coupled 1D/2D Hydraulic Model

Saowanit Prabnakorn[1], Suphakorn Sirapojanakul[1*] and Sukhom Lipiloet[1]

saowanit_p@rmutt.ac.th[1], suphakorn_s@rmutt.ac.th[1*], sukhom_l@rmutt.ac.th[1]

Received	: 30-Sep-2022
Revised	: 19-Dec-2022
Accepted	: 21-Dec-2022

[1] Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Abstract

Chiang Khwan district in Roi Et has been experienced recurring floods. Over the past 12 years (2010-2021), 9 flood events occurred at Chiang Khwan, resulting in the loss of lives and properties. This research aims to identify flood areas at Chiang Khwan district at 2-, 5-, 10-, 25-, 50- and 100-year return periods. The design floods and water level elevations are estimated by the Gumbel distribution. Those are inputs into a 1D/2D hydraulic model of the Chi River developed for flood inundation mapping. At satisfactory calibration and validation results, the $R^2 > 90\%$ and RMSE < 1 m, the model demonstrates that, at the above return periods, approximately 22,792; 36,554; 39,053; 41,476; 43,965 และ 45,349 rai are inundated, respectively. For the 2- and 5-year return periods, the flood depths vary mostly between 0-2 m, and that for other return periods vary mostly between 0-4 m. The flooding begins at Chiang Khwan sub-district, located shortly downstream of the Lam Pao, which receives water from Lam Pao Dam. However, after a while, due to narrower river cross-sections downstream, which significantly reduce the river's drainage capacity, a huge volume of water accumulates, overflows its banks, and starts flooding downstream. As a result, Phlapphla, Phra That, and Chiang Khwan sub-districts are most affected, respectively. This information and flood inundation maps are useful for developing flood-control measures, flood resilient design, and emergency action plan to protect and reduce adverse impacts from future floods.

Keywords: frequency analysis, hydrodynamic model, HEC-RAS, flood map, Chi River

1. บทนำ

อุทกภัยหรือเหตุการณ์น้ำท่วมเป็นภัยธรรมชาติที่คุกคามประเทศไทยมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับภัยธรรมชาติอื่น ๆ โดยระหว่างปี 2527-2565 มีรายงานการเกิดน้ำท่วมในประเทศไทยทั้งหมด 83 ครั้ง ครอบคลุมทั่วทุกภาคของประเทศ และเป็นเหตุการณ์น้ำท่วมในจังหวัดต่างๆ ในภาคตะวันออกเฉียงเหนือถึง 23 ครั้งตลอดช่วงระยะเวลา 39 ปีที่ผ่านมา [1] หรืออาจกล่าวได้ว่าเกิดเหตุการณ์น้ำท่วมในภูมิภาคนี้เกือบทุกปี อุทกภัยจึงเป็นภัยธรรมชาติหนึ่งที่สำคัญที่สร้างความเสียหายต่อชีวิตและทรัพย์สินของประชากรในภูมิภาคนี้

เมื่อพิจารณาย่อยลงไปในระดับจังหวัด พบว่าจังหวัดร้อยเอ็ด เป็นพื้นที่หนึ่งที่ประสบปัญหาน้ำท่วมอยู่เสมอ โดยข้อมูลจากคลังข้อมูลน้ำแห่งชาติ สถาบันสารสนเทศทรัพยากรน้ำ (องค์การมหาชน) [2] ประกอบกับการรายงานจากสำนักข่าวต่างๆ ในประเทศ พบว่ามีรายงานเหตุการณ์น้ำท่วมในพื้นที่จังหวัดร้อยเอ็ด ในปี พ.ศ. 2547, 2550, 2551, 2552, 2553, 2556, 2557, 2559, 2560, 2561, 2562, 2563 และ 2564 จังหวัดร้อยเอ็ดจึงเป็นพื้นที่น้ำท่วมซ้ำซากพื้นที่หนึ่งที่ได้รับผลกระทบจากอุทกภัยอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะในช่วง 6 ปีที่ผ่านมาที่ได้รับผลกระทบและความเสียหายจากเหตุการณ์น้ำท่วมทุกปี โดยเฉพาะอย่างยิ่งอำเภอเชียงขวัญ ซึ่งมีตำแหน่งที่ตั้งใกล้กับจุดบรรจบของแม่น้ำชีกับลำปาวที่รับน้ำจากเขื่อนจุฬาภรณ์ เขื่อนอุบลรัตน์และเขื่อนลำปาว และยังเป็นอำเภอที่รับน้ำที่ระบายจากอำเภอเมืองร้อยเอ็ด และน้ำบางส่วนจากอำเภอจังหาร เป็นผลให้ความเสี่ยงในการเกิดอุทกภัยในพื้นที่อำเภอเชียงขวัญอยู่ในระดับสูง

แผนที่ภัยน้ำท่วมหรือเรียกสั้นๆ ว่าแผนที่น้ำท่วม (flood hazard map) มีความสำคัญและจำเป็นอย่างมากในการวางแผนการจัดการ ป้องกันและบรรเทาอุทกภัย รวมถึงการช่วยเหลือผู้ประสบภัย เนื่องจากแผนที่น้ำท่วมจะแสดงพื้นที่น้ำท่วมที่รอบปีการเกิดซ้ำต่างๆ ครอบคลุมตัวแปรที่สำคัญ 2 ตัวแปร คือขอบเขตพื้นที่น้ำท่วมและระดับน้ำท่วม ซึ่งมีความสำคัญในการระบุระดับความรุนแรงจากเหตุการณ์น้ำท่วมนั้นๆ [3, 4] นอกจากนี้แผนที่น้ำท่วมที่ดีตามมาตรฐานของสภายุโรป (European Parliament) จะต้องจัดทำครอบคลุมพื้นที่ทั้งหมดที่มีโอกาสเกิดน้ำท่วมที่รอบการเกิดซ้ำ (recurrence periods) ต่างๆ (low, medium, and high probabilities) [5]

ดังนั้นในหลายประเทศทั่วโลกได้ให้ความสำคัญในการจัดทำแผนที่น้ำท่วม เช่น สภายุโรปได้ออกประกาศเกี่ยวกับอุทกภัยฉบับใหม่ (Flood Directive (2007/60/EC)) เมื่อวันที่ 23 ตุลาคม พ.ศ. 2550 ระบุให้ประเทศสมาชิกจัดทำแผนที่ภัยน้ำท่วมและแผนที่ความเสี่ยงน้ำท่วมในระดับ river basin district หรือ unit of management ให้สำเร็จภายในปี พ.ศ.2556 [5] ดังนั้นเกือบทุกประเทศในยุโรป เช่น เบลเยี่ยม ฝรั่งเศส เนเธอร์แลนด์ สวิสเซอร์แลนด์ โรมาเนีย สโลวาเกีย ไอร์แลนด์ กรีซ นอร์เวย์ ฯลฯ รวมถึงประเทศอื่นๆ เช่น ตุรเคีย โคลัมเบีย ญี่ปุ่น ไต้หวัน สหรัฐ อเมริกา ฯลฯ จึงมีการจัดทำแผนที่น้ำท่วมเพื่อใช้ประโยชน์ในการวางแผนการจัดการน้ำท่วมอย่างมีประสิทธิภาพ [4, 6-10]

ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์ในการจัดทำแผนที่น้ำท่วมตามมาตรฐานสากล ที่รอบปีการเกิด 2, 5, 10, 25, 50 และ 100 ปี ในพื้นที่อำเภอเชียงขวัญ หนึ่งในพื้นที่น้ำท่วมซ้ำซากที่สำคัญแห่งหนึ่งของจังหวัดร้อยเอ็ด โดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ 1D/2D ซึ่งอาจถือได้ว่าเป็นแผนที่น้ำท่วมที่ครบถ้วนตามมาตรฐานสากลฉบับแรกของอำเภอเชียงขวัญ จังหวัดร้อยเอ็ด

2. พื้นที่ศึกษา

อำเภอเชียงขวัญ (รูปที่ 1) ตั้งอยู่ทางทิศเหนือของจังหวัดร้อยเอ็ด ในบริเวณตอนกลางของภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย มีพื้นที่ประมาณ 127.2 ตารางกิโลเมตร (79,500 ไร่) ระหว่างละติจูดที่ 16° 9' 54" N และลองติจูดที่ 103° 45' 6" E ห่างจากตัวเมืองร้อยเอ็ดประมาณ 13 กิโลเมตร มีอาณาเขตทางทิศเหนือติดต่อกับอำเภอร่องคำ จังหวัดกาฬสินธุ์ และอำเภอโพธิ์ชัย จังหวัดร้อยเอ็ด ทิศใต้ติดต่อกับอำเภอธวัชบุรี จังหวัดร้อยเอ็ด ทิศตะวันออกติดต่อกับอำเภอเสลภูมิ จังหวัดร้อยเอ็ด และทิศตะวันตกติดต่อกับอำเภอเมืองและอำเภอจังหาร จังหวัดร้อยเอ็ด แบ่งเขตการปกครองออกเป็น 6 ตำบล ได้แก่ ตำบลเชียงขวัญ พลับพลา พระธาตุ พระเจ้า หมูม้น และบ้านเขือง [11]

อำเภอเชียงขวัญมีลักษณะภูมิประเทศโดยทั่วไปเป็นที่ดอนทางตอนกลางและตอนล่างของพื้นที่ ขณะที่ทาง

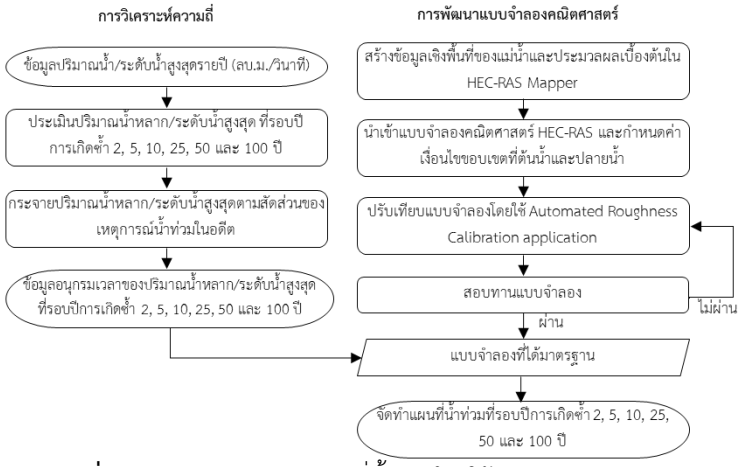
ตอนบนเป็นที่ราบลุ่มริมฝั่งแม่น้ำชีซึ่งเป็นแม่น้ำสายหลัก มีน้ำไหลตลอดปี โดยน้ำจะท่วมขังพื้นที่ริมฝั่งแม่น้ำในฤดูฝน ซึ่งส่วนมากเป็นที่นาและพื้นที่ทางการเกษตร ระดับความสูงของพื้นที่อยู่ระหว่าง +126.0 ถึง +145.4 ม. รทก.

รูปที่ 1 ลักษณะภูมิประเทศและการแบ่งขอบเขตการปกครองในอำเภอเชียงขวัญ จังหวัดร้อยเอ็ด

สถานีวัดน้ำท่าที่เกี่ยวข้อง ผลลัพธ์ที่ได้จากขั้นตอนนี้จะนำไปใส่ในแบบจำลองที่จัดทำขึ้นโดยใช้ข้อมูลลักษณะทางภูมิศาสตร์ของพื้นที่ หรือแบบจำลองระดับสูงเชิงเลข (Digital Elevation Models: DEM) ขอบเขตการปกครองในระดับอำเภอและตำบล เส้นลำน้ำ ตำแหน่งและลักษณะหน้าตัดขวางลำน้ำ โดยมีรายละเอียดของแต่ละขั้นตอน ดังนี้

3.1 การวิเคราะห์ปริมาณน้ำหลาก/ระดับน้ำสูงสุดที่รอบปีการเกิดต่างๆ

การวิเคราะห์ปริมาณน้ำหลาก/ระดับน้ำสูงสุดในการศึกษาครั้งนี้ใช้ทฤษฎีการแจกแจงความถี่โดยวิธีกัมเบล (Gumbel Distribution) คำนวณด้วยวิธีโมเมนต์ (Moment Estimate)



รูปที่ 2 วิธีการวิจัยการจัดทำแผนที่น้ำท่วมโดยใช้แบบจำลอง HEC-RAS

3. วิธีการวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์เป็นเครื่องมือหลักในการจัดทำแผนที่น้ำท่วมที่คาบการเกิดซ้ำต่างๆ โดยเลือกใช้ Open-source software คือโปรแกรม HEC-RAS 5.0.7 พัฒนาโดย Hydrologic Engineering Center (CEIWR-HEC) ประเทศสหรัฐอเมริกา ในการพัฒนาแบบจำลอง 1D/2D ของพื้นที่อำเภอเชียงขวัญ โดยมีขั้นตอนดังรูปที่ 2 ประกอบด้วย 2 องค์ประกอบหลัก การวิเคราะห์ปริมาณน้ำหลากและระดับน้ำสูงสุดที่รอบปีการเกิดต่างๆ (Frequency Analysis) และการพัฒนาแบบจำลอง (Hydraulic modelling) โดยการวิเคราะห์ปริมาณน้ำหลากและระดับน้ำสูงสุดที่รอบปีการเกิดต่างๆ จะใช้ข้อมูลปริมาณน้ำท่าและระดับน้ำ (รายวัน) สูงสุดในแต่ละปีที่ซึ่งเป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในประเทศไทย มีสูตรดังแสดงในสมการที่ (1) [12] นำมาใช้ประเมินปริมาณน้ำหลาก/ระดับน้ำสูงสุดที่รอบปีการเกิดซ้ำ 2 ปี 5 ปี 10 ปี 25 ปี 50 ปี และ 100 ปี ที่สถานีวัดน้ำท่า E.66A, E.87, E.95 และ E.18

$$Q_{Tr} = \overline{Q} - 0.45S_Q - 0.7797S_Q ln[-ln(1-\frac{1}{T_r})] \quad (1)$$

เมื่อ Q_{Tr} คือปริมาณน้ำหลาก/ระดับน้ำที่รอบปีการเกิดซ้ำต่างๆ (m^3/s), (m) $\overline{Q}$ คือปริมาณน้ำหลาก/ระดับน้ำสูงสุดเฉลี่ย (m^3/s), (m) S_Q คือค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานของข้อมูลปริมาณน้ำหลาก/ระดับน้ำสูงสุด (m^3/s), (m) และ T_r คือรอบปีการเกิดซ้ำที่พิจารณา (ปี) ค่าปริมาณน้ำหลาก/ระดับน้ำที่รอบปีการเกิดซ้ำต่างๆ ที่ได้จากกระบวนการนี้จะถูกนำไปใส่ในแบบจำลองชลศาสตร์ที่ผ่านการปรับเทียบและสอบทานเรียบร้อยแล้ว เพื่อจัดทำแผนที่น้ำท่วมต่อไป

3.2 แบบจำลองทางชลศาสตร์: HEC-RAS

แบบจำลอง HEC-RAS [13] อยู่ภายใต้หลักการอนุรักษ์มวลสาร (Conservation of mass) และหลักการอนุรักษ์โมเมนตัม (Conservation of momentum) จากหลักการดังกล่าวจะได้สมการพื้นฐานที่สำคัญ 2 สมการ คือ สมการความต่อเนื่อง (Continuity equation) (2) และสมการโมเมนตัม (Momentum equation) (3):

$$\frac{\partial A_T}{\partial t} + \frac{\partial Q}{\partial x} - q_1 = 0 \qquad (2)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial QV}{\partial x} + gA\left(\frac{\partial z}{\partial x} + S_f\right) = 0 \qquad (3)$$

เมื่อ Q คืออัตราการไหล (m^3/s), A_T คือพื้นที่หน้าตัดการไหลทั้งหมด (m^2), t คือเวลา (s), x คือระยะการไหลตามแนวทางน้ำ (m), q_1 คือปริมาณการไหลเข้าด้านข้าง (Lateral inflow) ต่อหนึ่งหน่วยความยาวของทางน้ำ (m^2/s), V คือความเร็วการไหลเฉลี่ย (m/s), g คือความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วง (m/s^2), A คือพื้นที่หน้าตัดของลำน้ำ (m^2), z คือระดับผิวน้ำ (m) และ S_f คือความลาดชันของแรงเสียดทาน (Friction slope)

สำหรับการไหลแบบ 2 มิติ (2D) แบบจำลองจะจำลองการไหลของน้ำใน 2 ทิศทาง คือการไหลในลำน้ำและการไหลออกด้านข้าง ซึ่งแตกต่างกับการไหลแบบ 1D ที่จะพิจารณาทิศทางการไหลในลำน้ำเพียงทิศทางเดียว ดังนั้นสมการความต่อเนื่องของการไหลแบบ 2D จึงมีรูปสมการดังสมการที่ (4)

$$\frac{\partial H}{\partial t} + \frac{\partial (hu)}{\partial x} + \frac{\partial (hv)}{\partial y} + q = 0 \qquad (4)$$

เมื่อ H คือระดับของผิวน้ำ (Water surface elevation) (m) ซึ่งเท่ากับผลรวมของระดับของท้องน้ำ z(x,y) กับความลึกของน้ำ h(x,y,t), t คือเวลา (s), u และ v คือความเร็วการไหลในแนวแกน x และ y (m/s) ตามลำดับ

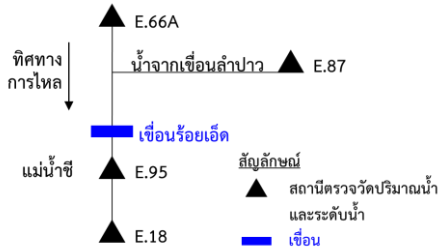
ขณะที่ภายใต้หลักการอนุรักษ์โมเมนตัม สมการ Shallow Water Equation (5, 6) จะถูกนำมาใช้ในการไหลแบบ 2D เนื่องจากสัดส่วนของระยะในแนวราบ (Horizontal length scale) ของการไหลของของไหลมีค่ามากกว่าระยะในแนวดิ่ง (vertical length scale) มาก

$$\frac{\partial u}{\partial t} + u\frac{\partial u}{\partial x} + v\frac{\partial u}{\partial y} = -g\frac{\partial H}{\partial x} + V_t\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 u}{\partial y^2}\right) - c_f u + fv \qquad (5)$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + u\frac{\partial v}{\partial x} + v\frac{\partial v}{\partial y} = -g\frac{\partial H}{\partial y} + V_t\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v}{\partial y^2}\right) - c_f v + fu \qquad (6)$$

เมื่อ v_t คือ Horizontal eddy viscosity coefficient, c_f คือ Bottom friction coefficient, R คือรัศมีชลศาสตร์ (Hydraulic radius) (m) และ f คือ Coriolis parameter

การจัดทำแบบจำลองเพื่อจำลองพฤติกรรมการไหลของน้ำในอำเภอเชียงขวัญ เริ่มต้นจากการจัดทำแบบจำลอง 1D ของแม่น้ำชี (ชีกลาง) ซึ่งเป็นลำน้ำสายหลักที่ไหลผ่านทางตอนบนของพื้นที่ ตั้งแต่สถานี E.66A ผ่านสถานี E.95 ซึ่งตั้งอยู่หลังเขื่อนร้อยเอ็ด สิ้นสุดที่สถานี E.18 และมีการนำเข้าปริมาณน้ำจากลำปาว (E.87) ในรูปแบบของแม่น้ำสาขา ซึ่งเป็นลำน้ำที่รับน้ำจากเขื่อนลำปาว ลำห้วยหนองแสง ห้วยมูล ลำพันชาด ห้วยสังกะ และห้วยสังเคียบเพื่อระบายลงสู่แม่น้ำชี (รูปที่ 3) แต่ไม่มีการนำเข้าปริมาณน้ำที่ระบายจากตัวเมืองร้อยเอ็ดที่ไหลผ่าน ปตร. ปากบุ่ง ในอำเภอเชียงขวัญ ลงสู่แม่น้ำชี เนื่องจากไม่มีข้อมูลปริมาณน้ำและระดับน้ำที่ตำแหน่งดังกล่าว จากนั้นทำการนำเข้าข้อมูลปริมาณน้ำท่าที่สถานี E.66A เป็นค่าเงื่อนไขขอบเขตที่ต้นน้ำ (Upstream boundary condition) ขณะที่ข้อมูลระดับน้ำที่สถานี E.18 ใช้ในการตั้งค่าเงื่อนไขขอบเขตที่ปลายน้ำ (Downstream boundary condition) และข้อมูลปริมาณน้ำท่าที่สถานี E.87 ในรูปแบบของการไหลเข้าด้านข้าง



รูปที่ 3 ผังระบบแม่น้ำในพื้นที่อำเภอเชียงขวัญ

เมื่อพัฒนาแบบจำลองเสร็จแล้ว ก่อนนำมาใช้วิเคราะห์พฤติกรรมการไหลของน้ำในลำน้ำ จำเป็นต้องตรวจสอบความถูกต้องโดยการปรับเทียบและสอบทานแบบจำลอง ซึ่งจะทำการปรับเทียบแบบจำลองการไหลของน้ำในช่องทางการไหลหลักในแม่น้ำชีเท่านั้น โดยใช้เครื่องมือ 'Automated Roughness Calibration' เริ่มต้นจากการแบ่งแม่น้ำออกเป็นช่วง (segment) ระหว่างสถานีที่จะทำ

การปรับเทียบ ในที่นี้คือช่วงระหว่างสถานี E.66A – E.95 และช่วงระหว่างสถานี E.95 – E.18 หลังจากนั้นทำการกำหนดค่า Flow Roughness Factors = 1 ที่อัตราการไหลต่างๆ (จากน้อยไปมาก) ในแต่ละช่วง และเมื่อกำหนด Optimization method = Global กระบวนการปรับเทียบจะทำการปรับเทียบค่า Manning's n values ในทุกช่วงพร้อมกัน โดยจะทำการปรับค่า Flow Roughness Factors ที่อัตราการไหลต่างๆ ในแต่ละช่วง จนกระทั่งได้ค่าที่เหมาะสมคือค่าที่ทำให้ระดับน้ำจากแบบจำลองใกล้เคียงกับระดับน้ำจริงที่สถานีที่อยู่ทางต้นน้ำ (ของช่วงที่ทำการปรับเทียบ) มากที่สุด ซึ่งในที่นี้คือสถานี E.66A และ E.95 ผลลัพธ์จากการปรับเทียบวิธีนี้ คือค่าสัมประสิทธิ์ความหยาบผิวของแมนนิ่งที่อัตราการไหลต่างๆ ที่กำหนดในแต่ละช่วง ดังนั้นในคู่มือการใช้โปรแกรม HEC-RAS River Analysis System [14] จึงแนะนำให้ใช้ค่าระดับน้ำในการปรับเทียบแบบจำลองเนื่องจากเป็นข้อมูลอุทกวิทยาที่มีความถูกต้องแม่นยำที่สุดและได้รับการยอมรับว่าดีที่สุดค่าหนึ่ง

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ความหยาบผิวของแมนนิ่งของพื้นที่ริมตลิ่งทั้งสองด้านไม่สามารถทำการปรับเทียบได้ เนื่องจากการใช้ที่ดินของพื้นที่มีความแตกต่างกันตลอดแนวแม่น้ำส่งผลให้ค่าสัมประสิทธิ์ความหยาบผิวมีค่าแตกต่างกันตลอดความยาวแม่น้ำเช่นกัน การเปรียบเทียบแบบจำลอง 2D จึงใช้วิธีการเปรียบเทียบแผนที่น้ำท่วม ปี พ.ศ. 2553 จากภาพถ่ายดาวเทียมของสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ: GISTDA และแผนที่น้ำท่วมจากแบบจำลอง

ทั้งนี้ ประสิทธิภาพของแบบจำลองจะถูกประเมินโดยใช้ตัวชี้วัด 2 ตัว คือสัมประสิทธิ์การกำหนด (Coefficient of Determination: R^2) และรากของค่าคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error: RMSE) ซึ่งมีสูตรดังสมการที่ (7) และ (8) ตามลำดับ

$$R^2 = \frac{\left[\sum_i \left(Q_{m,i} - \bar{Q}_m\right)\left(Q_{s,i} - \bar{Q}_s\right)\right]^2}{\sum_i \left(Q_{m,i} - \bar{Q}_m\right)^2 \sum_i \left(Q_{s,i} - \bar{Q}_s\right)^2} \qquad (7)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_i \left(Q_{m,i} - Q_{s,i}\right)^2}{n}} \qquad (8)$$

เมื่อ Q_m คือค่าตัวแปรที่สนใจ เช่น อัตราการไหล, ระดับน้ำ เป็นต้น จากการเก็บข้อมูลจริง, Q_s คือตัวแปรที่ได้จากแบบจำลอง, $\bar{Q}_m$ คือค่าเฉลี่ยของตัวแปรจากการเก็บข้อมูล, $\bar{Q}_s$ คือค่าเฉลี่ยของตัวแปรจากแบบจำลอง, i คือข้อมูลอนุกรมเวลา (Time series data) เมื่อ $i = 1, 2, 3, \ldots, n$

เมื่อได้แบบจำลอง 1D ที่มีผลการปรับเทียบและสอบทานเป็นที่น่าพอใจแล้ว จึงทำการกำหนดพื้นที่ที่จะใช้ในการจำลองพฤติกรรมการไหลในกรณีน้ำหลากล้นตลิ่ง (2D) โดยจะทำการพิจารณาขอบเขตทั้งหมดจากข้อมูลน้ำท่วมในอดีต หลังจากนั้นทำการกำหนดขนาดกริดของแบบจำลอง ซึ่งในการศึกษาครั้งนี้กำหนดขนาดกริดเท่ากับ 500 x 500 เมตร แม้ว่าขนาดกริดจะค่อนข้างใหญ่เมื่อเทียบกับความละเอียดของ DEM (5 x 5 เมตร) แต่ด้วยระบบการประมวลผลของแบบจำลอง HEC-RAS ที่ใน 1 กริด จะมีตารางเก็บค่าต่างๆ ที่สำคัญทางชลศาสตร์ (Detailed Hydraulic Table Properties) ที่ประมวลผลจาก DEM จึงทำให้ในแต่ละส่วนของ 1 กริดขนาดใหญ่นั้นมีคุณลักษณะที่แตกต่างกัน ดังนั้นผลลัพธ์ใน 1 กริดของ HEC-RAS จึงอาจแตกต่างกันได้ กล่าวคือบางส่วนอาจจะถูกน้ำท่วม ขณะที่บางส่วนอาจจะไม่ถูกน้ำท่วมเนื่องจากมีระดับที่สูงกว่า คุณสมบัตินี้ถือเป็นจุดเด่นของแบบจำลอง HEC-RAS ที่แตกต่างจากโมเดลอื่นๆ ที่ใน 1 กริดจะมีค่าระดับเพียงค่าเดียวเท่านั้น [15] เมื่อกำหนดขนาดกริดเรียบร้อยแล้วจะทำการเชื่อมต่อพื้นที่กริดเข้ากับลำน้ำสายหลัก โดยการใช้โครงสร้างด้านข้าง (Lateral Structure) แล้วจึงจำลองสถานการณ์น้ำท่วมที่รอบการเกิด 2, 5, 10, 25, 50 และ 100 ปี

4. ผลการศึกษา

4.1 ผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำหลาก/ระดับน้ำสูงสุดที่รอบปีการเกิดต่างๆ

ตารางที่ 1 แสดงผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำหลากสูงสุดที่สถานีน้ำท่า E.66A, E.87, E.95 และ E.18 ที่ใช้ในการจัดทำแผนที่น้ำท่วมของอำเภอเชียงขวัญ จะเห็นได้ว่าปริมาณน้ำหลากเพิ่มมากขึ้นตามรอบปีการเกิดซ้ำที่ยาวนานขึ้น โดยมีอัตราการเพิ่มที่สูงในรอบปีการเกิดซ้ำที่สั้น เช่น จาก 2 ปี, 5 ปี, 10 ปี และ 25 ปี ขณะที่รอบปีการเกิดซ้ำที่ยาวนานขึ้น เช่น 50 ปี และ 100 ปี อัตราการเพิ่มขึ้นจะน้อยลง และปริมาณน้ำจากเขื่อนลำปาวที่ระบายลงสู่แม่น้ำชีมีค่าประมาณ 1 ใน 3 ของปริมาณน้ำท่าทั้งหมดในแม่น้ำชีขณะที่ไหลผ่านอำเภอเชียงขวัญ อนึ่งค่าปริมาณน้ำหลากที่สถานี E.95 มีค่าน้อยกว่าปริมาณน้ำหลากที่สถานี E.66A

แม้ว่าจะตั้งอยู่ทางด้านท้ายน้ำของสถานี E.66A เนื่องจากสถานี E.95 ตั้งอยู่หลังเขื่อนร้อยเอ็ด อัตราการไหลที่ผ่านสถานีนี้จึงถูกควบคุมโดยการทำงานของเขื่อน

ตารางที่ 1 ปริมาณน้ำหลากสูงสุดที่รอบปีการเกิดต่างๆ

สถานี	ปริมาณน้ำนองสูงสุดที่รอบปีการเกิด (ลบ.ม./วินาที)					
	2 ปี	5 ปี	10 ปี	25 ปี	50 ปี	100 ปี
E.66A	676	976	1,174	1,425	1,611	1,796
E.87	213	320	390	479	545	611
E.95	731	974	1,134	1,338	1,488	1,638
E.18	780	1,278	1,608	2,025	2,335	2,642

ตารางที่ 2 แสดงผลการวิเคราะห์ระดับน้ำหลากสูงสุดที่สถานีน้ำท่า E.66A, E.87, E.95 และ E.18 ที่รอบปีการเกิดต่างๆ จะเห็นได้ว่าระดับน้ำหลากเพิ่มสูงขึ้นตามรอบปีการเกิดซ้ำที่ยาวนานขึ้น และมีอัตราการเปลี่ยนแปลงระดับน้ำหลากในทิศทางเดียวกันทั้ง 4 สถานี คือ อัตราการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำหลากมากที่สุดเมื่อรอบปีการเกิดซ้ำเพิ่มจาก 2 ปี เป็น 5 ปี รองลงมา คือ จาก 10 ปี เป็น 25 ปี และจาก 5 ปี เป็น 10 ปี ตามลำดับ ขณะที่อัตราการเพิ่มขึ้นของระดับน้ำหลากในสองช่วงสุดท้ายมีค่าใกล้เคียงกันและน้อยที่สุดเมื่อเทียบกับช่วงอื่นๆ

ตารางที่ 2 ระดับน้ำหลากสูงสุดที่รอบปีการเกิดต่างๆ

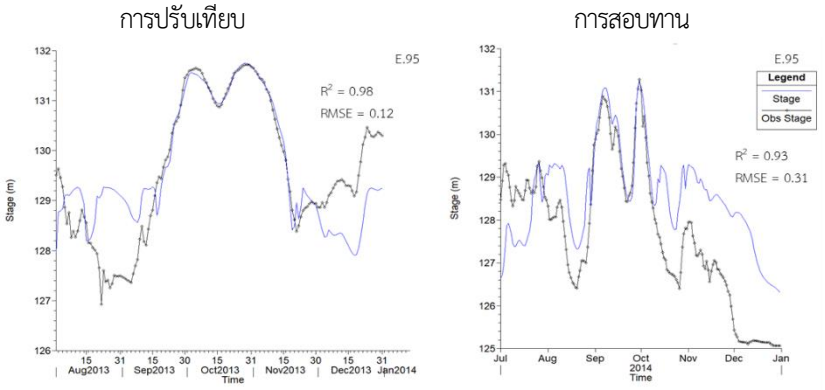
สถานี	ระดับน้ำนองสูงสุดที่รอบปีการเกิด (ม. รทก.)					
	2 ปี	5 ปี	10 ปี	25 ปี	50 ปี	100 ปี
E.66A	137.4	139.2	140.4	141.9	143.0	144.1
E.87	135.5	137.2	138.3	139.7	140.7	141.8
E.95	131.1	132.5	133.5	134.7	135.6	136.5
E.18	130.3	131.8	132.7	133.9	134.7	135.6

4.2 ผลการปรับเทียบและสอบทานแบบจำลอง

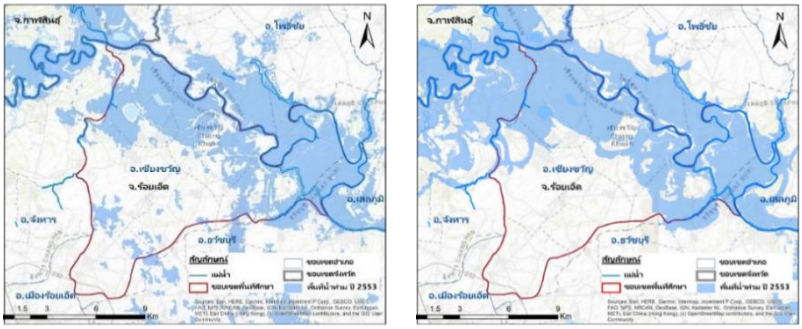
ในการศึกษาครั้งนี้ ทำการปรับเทียบแบบจำลองในช่วงน้ำหลาก ระหว่างวันที่ 1 ส.ค. – 31 ธ.ค. 2556 และสอบทานระหว่างวันที่ 1 ก.ค. – 31 ธ.ค. 2557 โดยทำการปรับเทียบระดับน้ำที่สถานี E.66A สำหรับการไหลของน้ำระหว่างช่วงสถานี E.66A – E.95 และที่สถานี E.95 สำหรับการไหลของน้ำระหว่างช่วงสถานี E.95 – E.18 อย่างไรก็ดี เนื่องจากสถานี E.95 ตั้งอยู่หลังเขื่อนร้อยเอ็ด ดังนั้นปริมาณการไหลของน้ำและระดับน้ำที่สถานีนี้จึงถูกควบคุมโดยการเปิด-ปิดของบานประตูเขื่อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งในช่วงฤดูแล้งที่มีน้ำน้อย เขื่อนจะทำหน้าที่กักเก็บน้ำไว้เพื่อการชลประทาน เป็นผลให้แบบจำลองไม่สามารถจำลองพฤติกรรมการไหลของน้ำได้อย่างแม่นยำเนื่องจากมีการทำงานของเขื่อนที่มาควบคุมการไหลของน้ำตามธรรมชาติ แต่ในฤดูน้ำหลาก เมื่อระดับน้ำสูงขึ้นถึงระดับหนึ่ง ประตูเขื่อนจะเปิดเพื่อระบายน้ำออกให้เร็วที่สุด เพื่อป้องกันการเกิดน้ำท่วม ดังนั้นการไหลของน้ำในช่วงนี้จึงเป็นการไหลอิสระที่ไม่ถูกควบคุมโดยเขื่อน แบบจำลองจะสามารถจำลองพฤติกรรมการไหลของน้ำได้ ดังนั้นผลการปรับเทียบและสอบทานแบบจำลองที่สถานี E.95 จะพิจารณาเฉพาะช่วงที่มีปริมาณน้ำมาก (high flow) เท่านั้น คือช่วงวันที่ 19 กันยายน – 19 พฤศจิกายน 2556 สำหรับการปรับเทียบ และ 28 สิงหาคม – 9 ตุลาคม 2557 สำหรับการสอบทาน

ผลการปรับเทียบและสอบทานแบบจำลองแสดงดังรูปที่ 4 โดยระดับน้ำที่ได้จากแบบจำลองและระดับน้ำจริงมีค่าใกล้เคียงกันทั้งในเชิงรูปแบบและปริมาณ กล่าวคือ ที่สถานี E.95 มีค่า R^2 = 0.98 และ RMSE = 0.12 ในการปรับเทียบ และมีค่า R^2 = 0.93 และ RMSE = 0.31 ในการสอบทาน ซึ่งถือว่าผลลัพธ์อยู่ในเกณฑ์ที่ดีมาก

สำหรับค่าสัมประสิทธิ์ความหยาบผิวของแมนนิ่งของการไหลในลำน้ำชีในช่วงที่ไหลผ่านอำเภอเชียงขวัญ มีค่าอยู่ในระหว่าง 0.029 – 0.0351 ในช่วงระหว่างสถานี E.66A – E.95 และ 0.02 - 0.079 ในช่วงระหว่างสถานี E.95 – E.18 ซึ่งใกล้เคียงกับผลการศึกษาของ Kuntiyawichai [16] ความแตกต่างกันของค่าสัมประสิทธิ์ความหยาบผิวของแมนนิ่งเป็นผลมาจากลักษณะของแม่น้ำ (River Geometry) เช่น ความคดเคี้ยว พื้นที่หน้าตัด ความลึกการไหล เป็นต้น ที่แตกต่างกันตลอดช่วงการไหล รวมทั้งสิ่งกีดขวางลำน้ำต่างๆ ที่มีผลต่อการไหลของน้ำ นอกจากนี้จากการพิจารณาโดยละเอียดพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความหยาบผิวของแมนนิ่งในช่วงระหว่างสถานี E.95 – E18 ที่มีค่ามาก คือ 0.079 เกิดขึ้นเฉพาะในช่วงที่อัตราการไหลน้อย คือ < 200 m^3/s ซึ่งเป็นไปได้ว่าที่ท้องน้ำอาจมีวัชพืช กิ่งไม้ หรือสิ่งกีดขวางลำน้ำอื่นๆ ในปริมาณมาก [17]



รูปที่ 4 ตัวอย่างผลการปรับเทียบและสอบทานระดับน้ำที่สถานีวัดน้ำท่า E.95



รูปที่ 5 แผนที่น้ำท่วม ปี 2553 ในเขตอำเภอเชียงขวัญ จังหวัดร้อยเอ็ด จาก GISTDA (ซ้าย) และจากแบบจำลอง (ขวา)

ในส่วนของผลการปรับเทียบแบบจำลอง 2D พบว่าสภาพพื้นที่น้ำท่วมที่เกิดจากการไหลของน้ำในลำน้ำชีมีความใกล้เคียงกัน (รูปที่ 5) โดยพื้นที่น้ำท่วมที่ได้จากแบบจำลองครอบคลุมพื้นที่มากกว่าพื้นที่น้ำท่วมจากภาพถ่ายดาวเทียมเล็กน้อยโดยเฉพาะบริเวณจุดบรรจบระหว่างลำปาวและแม่น้ำชี (พื้นที่อำเภอจังหาร จังหวัดร้อยเอ็ด) สำหรับพื้นที่น้ำท่วมในบริเวณที่ไกลจากลำน้ำสายหลัก ซึ่งไม่มีแสดงในแผนที่น้ำท่วมจากแบบจำลองนั้น คาดว่าคือพื้นที่ลุ่มน้ำทวมขัง จึงถือได้ว่าแบบจำลองมีความถูกต้องและน่าเชื่อถือ สามารถนำไปใช้ในการวิเคราะห์จำลองเหตุการณ์น้ำท่วมที่คาบการเกิดซ้ำต่างๆ ได้

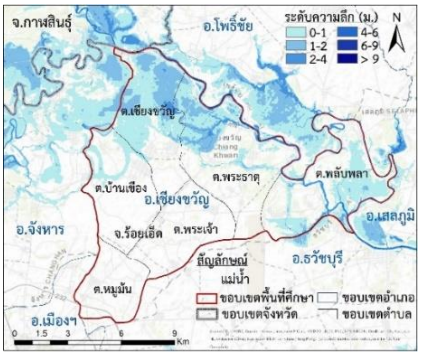
4.3 แผนที่น้ำท่วม

4.3.1 รอบปีการเกิด 2 ปี

ที่รอบปีการเกิด 2 ปี มีขนาดพื้นที่น้ำท่วมรวมประมาณ 22,792 ไร่ มีรายละเอียดพื้นที่น้ำท่วมจำแนกตามระดับความลึกของน้ำในตำบลต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 3 และรูปที่ 6 ตำบลเชียงขวัญเป็นพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบมากที่สุด รองลงมาคือตำบลพระธาตุและพลับพลาตามลำดับ มีระดับน้ำท่วมส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 0-1 และ 1-2 เมตร (สำหรับพื้นที่น้ำท่วมระดับอื่นๆ คือพื้นที่ร่องน้ำ แหล่งน้ำตามธรรมชาติ) สำหรับตำบลบ้านเชืองได้รับผลกระทบเพียงเล็กน้อย ขณะที่ตำบลพระเจ้าและหมูม้นไม่มีพื้นที่น้ำท่วม

ตารางที่ 3 พื้นที่น้ำท่วม (ไร่) ที่รอบปีการเกิด 2 ปี

ตำบล	ระดับน้ำ (ม.)						รวม
	0-1	1-2	2-4	4-6	6-9	> 9	
เชียงขวัญ	5,311	3,276	217	0	0	0	8,804
พลับพลา	5,025	488	438	40	0	0	5,990
พระธาตุ	3,712	2,232	306	1	0	0	6,251
พระเจ้า	0	0	0	0	0	0	0
หมูม้น	0	0	0	0	0	0	0
บ้านเชือง	1,629	117	0.8	0	0	0	1,747
รวม	15,677	6,113	962	41	0	0	22,792



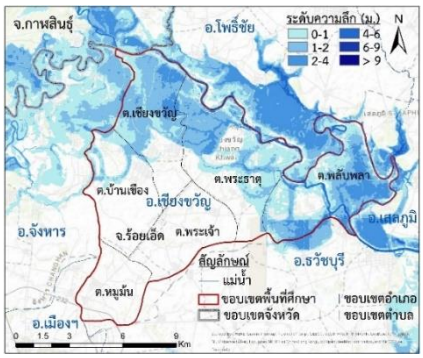
รูปที่ 6 แผนที่น้ำท่วมที่รอบการเกิด 2 ปี

4.3.2 รอบปีการเกิด 5 ปี

ที่รอบปีการเกิด 5 ปี มีขนาดพื้นที่น้ำท่วมรวมประมาณ 36,554 ไร่ มีรายละเอียดพื้นที่น้ำท่วมแบ่งตามระดับความลึกของน้ำในตำบลต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 4 และรูปที่ 7 ตำบลพลับพลามีพื้นที่ได้รับผลกระทบมากที่สุด รองลงมาคือตำบลพระธาตุและเชียงขวัญ ตามลำดับ มีระดับน้ำท่วมส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 0-1, 1-2 และ 2-4 เมตร (สำหรับพื้นที่น้ำท่วมระดับอื่นๆ คือพื้นที่ร่องน้ำ แหล่งน้ำตามธรรมชาติ) สำหรับตำบลบ้านเขืองได้รับผลกระทบเพียงเล็กน้อย ขณะที่ตำบลพระเจ้าและหมู่ม้นไม่มีพื้นที่น้ำท่วม

ตารางที่ 4 พื้นที่น้ำท่วม (ไร่) ที่รอบปีการเกิด 5 ปี

ตำบล	ระดับน้ำ (ม.)						รวม
	0-1	1-2	2-4	4-6	6-9	> 9	
เชียงขวัญ	2,418	5,949	1,309	0	0	0	9,676
พลับพลา	4,334	5,042	3,290	397	31	0	13,094
พระธาตุ	5,155	5,100	1,231	21	0	0	11,507
พระเจ้า	0	0	0	0	0	0	0
หมู่ม้น	0	0	0	0	0	0	0
บ้านเขือง	1,326	949	2	0	0	0	2,277
รวม	13,233	17,040	5,832	418	31	0	36,554



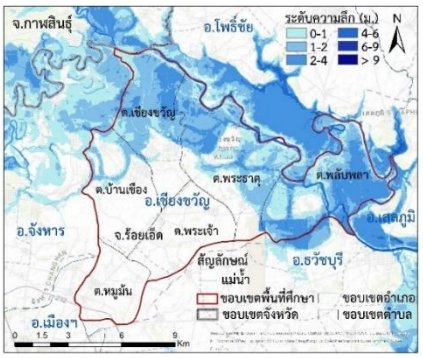
รูปที่ 7 แผนที่น้ำท่วมที่รอบการเกิด 5 ปี

4.3.3 รอบปีการเกิด 10 ปี

ที่รอบปีการเกิด 10 ปี มีขนาดพื้นที่น้ำท่วมรวมประมาณ 39,053 ไร่ มีรายละเอียดพื้นที่น้ำท่วมแบ่งตามระดับความลึกของน้ำในตำบลต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 5 และรูปที่ 8 ตำบลพลับพลามีพื้นที่ได้รับผลกระทบมากที่สุด รองลงมาคือตำบลพระธาตุและเชียงขวัญตามลำดับ มีระดับน้ำท่วมส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 0-1, 1-2 และ 2-4 เมตร (สำหรับพื้นที่น้ำท่วมระดับอื่นๆ คือพื้นที่ร่องน้ำ แหล่งน้ำตามธรรมชาติ) สำหรับตำบลบ้านเขืองได้รับผลกระทบเพียงเล็กน้อย ขณะที่ตำบลพระเจ้าและหมู่ม้นไม่มีพื้นที่น้ำท่วม

ตารางที่ 5 พื้นที่น้ำท่วม (ไร่) ที่รอบปีการเกิด 10 ปี

ตำบล	ระดับน้ำ (ม.)						รวม
	0-1	1-2	2-4	4-6	6-9	> 9	
เชียงขวัญ	1,742	5,835	2,270	0	0	0	9,847
พลับพลา	3,138	4,551	5,878	471	49	0	14,087
พระธาตุ	3,926	6,303	2,352	30	0	0	12,611
พระเจ้า	0	0	0	0	0	0	0
หมู่ม้น	0	0	0	0	0	0	0
บ้านเขือง	1,156	1,341	11	0	0	0	2,508
รวม	9,962	18,030	10,511	501	49	0	39,053



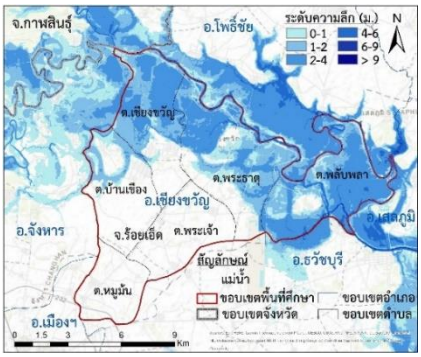
รูปที่ 8 แผนที่น้ำท่วมที่รอบการเกิด 10 ปี

4.3.4 รอบปีการเกิด 25 ปี

ที่รอบปีการเกิด 25 ปี มีขนาดพื้นที่น้ำท่วมรวมประมาณ 41,476 ไร่ มีรายละเอียดพื้นที่น้ำท่วมแบ่งตามระดับความลึกของน้ำในตำบลต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 6 และรูปที่ 9 ตำบลพลับพลามีพื้นที่ได้รับผลกระทบมากที่สุด รองลงมาคือตำบลพระธาตุและเชียงขวัญตามลำดับ โดยมีระดับน้ำท่วมเพิ่มสูงขึ้น ทำให้พื้นที่น้ำท่วมส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 1-2 และ 2-4 เมตร ตำบลบ้านเขืองได้รับผลกระทบจากระดับน้ำท่วมที่เพิ่มสูงขึ้นเช่นกัน โดยมีระดับน้ำท่วมอยู่ในช่วง 0-1 และ 1-2 เมตร ขณะที่ตำบลพระเจ้าและหมู่ม้นยังคงไม่มีพื้นที่น้ำท่วม

ตารางที่ 6 พื้นที่น้ำท่วม (ไร่) ที่รอบปีการเกิด 25 ปี

ตำบล	ระดับน้ำ (ม.)						รวม
	0-1	1-2	2-4	4-6	6-9	> 9	
เชียงขวัญ	836	3,879	5,352	1	0	0	10,068
พลับพลา	1,319	4,088	8,358	631	116	2	14,514
พระธาตุ	2,754	5,548	5,475	125	0	0	13,902
พระเจ้า	0	0	0	0	0	0	0
หมู่ม้น	0	0	0	0	0	0	0
บ้านเขือง	1,148	1,613	231	0	0	0	2,992
รวม	6,057	15,128	19,416	757	116	2	41,476



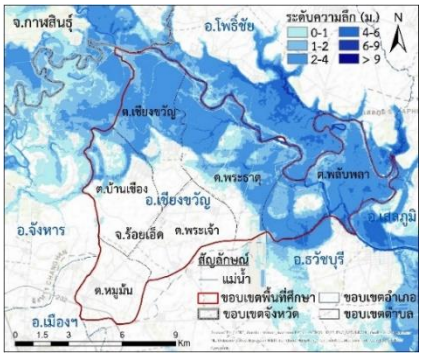
รูปที่ 9 แผนที่น้ำท่วมที่รอบการเกิด 25 ปี

4.3.5 รอบปีการเกิด 50 ปี

ที่รอบปีการเกิด 50 ปี มีขนาดพื้นที่น้ำท่วมรวมประมาณ 43,965 ไร่ มีรายละเอียดพื้นที่น้ำท่วมแบ่งตามระดับความลึกของน้ำในตำบลต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 7 และรูปที่ 10 ตำบลพระธาตุมีพื้นที่ได้รับผลกระทบมากที่สุด รองลงมาคือตำบลพลับพลาและเชียงขวัญตามลำดับ พื้นที่น้ำท่วมส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 1-2 และ 2-4 เมตร ตำบลบ้านเขืองมีระดับน้ำท่วมอยู่ในช่วง 0-1 และ 1-2 เมตร และเริ่มมีบางพื้นที่ที่ระดับน้ำเพิ่มเป็น 2-4 เมตร ขณะที่ตำบลพระเจ้าและหมูม้นยังคงไม่มีพื้นที่น้ำท่วม

ตารางที่ 7 พื้นที่น้ำท่วม (ไร่) ที่รอบปีการเกิด 50 ปี

ตำบล	ระดับน้ำ (ม.)						รวม
	0-1	1-2	2-4	4-6	6-9	> 9	
เชียงขวัญ	619	2,324	7,357	5	0	0	10,305
พลับพลา	622	3,145	9,716	911	286	14	14,694
พระธาตุ	2,820	4,044	8,134	292	1	0	15,291
พระเจ้า	4	0	0	0	0	0	4
หมูม้น	0	0	0	0	0	0	0
บ้านเขือง	1,402	1,332	937	0	0	0	3,671
รวม	5,467	10,845	26,144	1,208	287	14	43,965



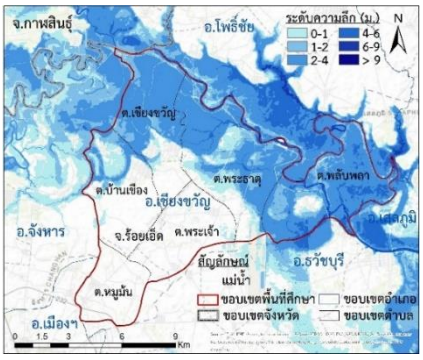
รูปที่ 10 แผนที่น้ำท่วมที่รอบการเกิด 50 ปี

4.3.6 รอบปีการเกิด 100 ปี

ที่รอบปีการเกิด 100 ปี มีขนาดพื้นที่น้ำท่วมรวมประมาณ 45,349 ไร่ มีรายละเอียดพื้นที่น้ำท่วมแบ่งตามระดับความลึกของน้ำในตำบลต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 8 และรูปที่ 11 ตำบลพระธาตุมีพื้นที่ได้รับผลกระทบมากที่สุด รองลงมาคือตำบลพลับพลาและเชียงขวัญ ตามลำดับ โดยมีระดับน้ำท่วมส่วนใหญ่อยู่ในช่วง 2-4 เมตร รองลงมาคือ 1-2 เมตร ตำบลบ้านเขืองมีระดับน้ำท่วมอยู่ในช่วง 0-1, 1-2 และ 2-4 เมตร และตำบลพระเจ้าเริ่มมีพื้นที่น้ำท่วม โดยมีระดับน้ำอยู่ที่ 0-1 เมตร ขณะที่ตำบลหมูม้นไม่มีพื้นที่น้ำท่วม

ตารางที่ 8 พื้นที่น้ำท่วม (ไร่) ที่รอบปีการเกิด 100 ปี

ตำบล	ระดับน้ำ (ม.)						รวม
	0-1	1-2	2-4	4-6	6-9	> 9	
เชียงขวัญ	565	1,748	8,079	10	0	0	10,402
พลับพลา	491	2,354	9,809	1,746	392	15	14,807
พระธาตุ	2,756	3,098	9,483	399	7	0	15,743
พระเจ้า	265	4	0	0	0	0	269
หมูม้น	0	0	0	0	0	0	0
บ้านเขือง	1,665	1,157	1,306	0	0	0	4,128
รวม	5,742	8,361	28,677	2,155	399	15	45,349



รูปที่ 11 แผนที่น้ำท่วมที่รอบการเกิด 100 ปี

จากแผนที่น้ำท่วมที่คาบการเกิดต่างๆ จะเห็นได้ว่า ตำบลเชียงขวัญ ตำบลพระธาตุ และตำบลพลับพลา เป็นตำบลที่จะได้รับผลกระทบมากที่สุดเมื่อเกิดอุทกภัยในอำเภอเชียงขวัญ โดยเมื่อระดับน้ำเริ่มมากกว่าความจุของลำน้ำและล้นออกมาท่วมพื้นที่สองฝั่งแม่น้ำ ตำบลเชียงขวัญจะเป็นตำบลที่จะเกิดน้ำท่วมก่อนและมีขอบเขตพื้นที่ที่ได้รับผลกระทบมากที่สุดเนื่องจากอยู่ต้นน้ำและใกล้กับจุดบรรจบกับลำปาวที่รับน้ำจากเขื่อนจุฬาภรณ์ เขื่อนอุบลรัตน์และเขื่อนลำปาว แต่เมื่อปริมาณน้ำเริ่มมากขึ้น เช่น ที่รอบปีการเกิด 5, 10 และ 25 ปี พื้นที่ที่ได้รับผลกระทบมากที่สุด คือ

ตำบลพลับพลา รองลงมาคือตำบลพระธาตุ และตำบลเชียงขวัญ ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากสภาพคอขวดทางด้านท้ายน้ำที่ทำให้ประสิทธิภาพในการระบายน้ำลดลง ดังนั้นปริมาณน้ำจึงสะสมล้นจากด้านท้ายน้ำขึ้นมาทางต้นน้ำ เป็นผลให้พื้นที่ตำบลพลับพลาได้รับผลกระทบนี้ก่อน ซึ่งจะสังเกตได้ว่าเมื่อปริมาณน้ำเพิ่มขึ้นจากรอบปีการเกิด 2 ปี เป็น 5 ปี พื้นที่น้ำท่วมเพิ่มขึ้นในอำเภอพลับพลามากที่สุด รองลงมาคือตำบลพระธาตุซึ่งจะได้รับผลกระทบดังกล่าวต่อจากตำบลพลับพลา ซึ่งจะเห็นได้จากการเพิ่มขึ้นของพื้นที่น้ำท่วมในตำบลพลับพลาจะค่อยๆ ลดลง แต่พื้นที่น้ำท่วมในตำบลพระธาตุและตำบลเชียงขวัญจะเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ

5. สรุปและข้อเสนอแนะ

การศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจัดทำแผนที่น้ำท่วมของอำเภอเชียงขวัญ จังหวัดร้อยเอ็ด ที่รอบปีการเกิด 2, 5, 10, 25, 50 และ 100 ปี โดยใช้แบบจำลองคณิตศาสตร์ซึ่งเป็นวิธีการที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายและความเชื่อถืออย่างมาก ผลการศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่าอำเภอเชียงขวัญเป็นพื้นที่ที่มีความเสี่ยงสูงต่อการเกิดอุทกภัย เนื่องจากตำแหน่งที่ตั้งที่นอกจากจะตั้งอยู่ท้ายน้ำของแม่น้ำชีหลังจากรับน้ำจากเขื่อนจุฬาภรณ์และเขื่อนอุบลรัตน์ ยังอยู่ใกล้กับจุดบรรจบระหว่างลำปาวกับแม่น้ำชีซึ่งรับน้ำจากเขื่อนลำปาว นอกจากนี้ยังมีน้ำหลากจากตัวเมืองร้อยเอ็ดที่จะระบายมาลงสู่แม่น้ำชี ที่ปตร. ปากบุ่ง ในตำบลพระธาตุ เมื่อประกอบกับปริมาณน้ำฝนในพื้นที่จากอิทธิพลของลมมรสุมและพายุฝน ล้วนส่งผลต่อการเกิดอุทกภัยในอำเภอเชียงขวัญ ขณะที่ประสิทธิภาพการระบายน้ำของแม่น้ำชีกลับลดลงเนื่องจากสภาพคอขวดทางด้านท้ายน้ำส่งผลให้การเกิดอุทกภัยในพื้นที่อำเภอเชียงขวัญทวีความรุนแรงมากขึ้นและกินระยะเวลานาน โดยพื้นที่ที่จะได้รับผลกระทบมากที่สุด คือ พื้นที่ริมแม่น้ำชีในตำบลเชียงขวัญ ตำบลพระธาตุ และตำบลพลับพลา ซึ่งแต่ละตำบลจะได้รับผลกระทบในช่วงเวลาและมีระดับความรุนแรงที่แตกต่างกันขึ้นอยู่กับปริมาณน้ำที่ไหลหลาก ณ ช่วงเวลานั้นๆ

การศึกษาครั้งนี้มีคุณูปการที่สำคัญต่อสังคมและทางวิชาการ 2 ประการ คือ 1) ได้แผนที่น้ำท่วมที่สมบูรณ์ของอำเภอเชียงขวัญ จังหวัดร้อยเอ็ด มีรายละเอียดครบถ้วนทั้งขอบเขตและระดับน้ำท่วมที่คาบการเกิดซ้ำต่างๆ ซึ่งมีความจำเป็นอย่างยิ่งในการวางแผน จัดการ และแก้ปัญหาน้ำท่วมในพื้นที่โดยหน่วยงานในระดับท้องถิ่นหรือระดับประเทศ นอกจากนี้ยังมีประโยชน์ในการเข้าช่วยเหลือและบรรเทาความเดือดร้อนของผู้ประสบภัยเมื่อเกิดเหตุการณ์น้ำท่วม รวมทั้งการวางผังเมือง การวางแผนการใช้ที่ดินให้เหมาะสมกับความเสี่ยงของแต่ละพื้นที่ ทั้งนี้แผนที่น้ำท่วมควรมีการปรับปรุงให้ทันสมัยสอดคล้องกับข้อมูลที่เปลี่ยนแปลงไปอย่างสม่ำเสมอเนื่องจากสภาพภูมิอากาศและการใช้พื้นที่ที่เปลี่ยนแปลงไปย่อมส่งผลต่อปริมาณน้ำและการระบายน้ำซึ่งล้วนคือปัจจัยสำคัญที่กำหนดขอบเขตและระดับความรุนแรงของเหตุการณ์น้ำท่วม

2) ได้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ของอำเภอเชียงขวัญ ซึ่งสามารถนำไปพัฒนาต่อเนื่องเพื่อหามาตรการต่างๆ เช่น คันกั้นน้ำหรือพนังกันน้ำ ทางเบี่ยงน้ำหลาก (bypass canal) แก้มลิงหรืออ่างเก็บน้ำ ฝาย เขื่อน เป็นต้น ที่เหมาะสมที่จะนำมาใช้ในการบรรเทาปัญหาน้ำท่วมในพื้นที่หรือการพัฒนาแบบจำลองเชื่อมต่อกับข้อมูลน้ำฝนน้ำท่าแบบ Real-time เพื่อพยากรณ์พื้นที่เสี่ยงภัยน้ำท่วมล่วงหน้าเพื่อสามารถวางแผนป้องกันหรืออพยพช่วยเหลือประชาชนในพื้นที่ได้อย่างถูกต้องและทันท่วงทีเพื่อลดผลกระทบและความสูญเสียอันเนื่องมาจากเหตุการณ์น้ำท่วม นอกจากนี้ค่าสัมประสิทธิ์ความหยาบผิวของแมนนิ่งที่ได้จากแบบจำลองนี้สามารถใช้เป็นแนวทางในการปรับเทียบแบบจำลองของแม่น้ำอื่นๆ ที่มีลักษณะทางกายภาพใกล้เคียงกันโดยเฉพาะอย่างยิ่งในพื้นที่ที่มีข้อมูลน้ำท่าไม่สมบูรณ์หรือไม่มีข้อมูลน้ำท่า กล่าวคือ ในกรณีที่มีข้อมูลน้ำท่าและระดับน้ำสมบูรณ์ สามารถใช้ค่าสัมประสิทธิ์ความหยาบผิวของแมนนิ่งจากการศึกษาครั้งนี้เป็นค่าตั้งต้นในการพัฒนาแบบจำลองก่อนที่จะทำการปรับเทียบและสอบทานต่อไป

6. กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณข้อมูลจากกรมชลประทาน กรมพัฒนาที่ดินที่เอื้อเฟื้อสนับสนุนข้อมูลในการศึกษาครั้งนี้ และขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่สละเวลาอ่านงานวิจัยฉบับนี้ และให้คำวิจารณ์และคำชี้แนะเพื่อปรับปรุงงานวิจัยนี้ให้มีคุณภาพที่ดียิ่งขึ้น

7. เอกสารอ้างอิง

[1] EM- DAT, CRED/ UCLouvain, Brussels, Belgium [Internet]. 2022 [cited May 24, 2022]. Available from: www.emdat.be.

[2] Flood event records [Internet]. National Hydroinformatics Data Center. 2022. Available from: http://www.thaiwater.net/report#flood (in Thai)

[3] Koivumäki L, Alho P, Lotsari E, Käyhkö J, Saari A, Hyyppä H. Uncertainties in flood risk mapping: a case study on estimating building damages for a river flood in Finland. Journal of flood risk management. 2010;3(2):166-83.

[4] Van Alphen J, Passchier R. Atlas of Flood Maps, examples from 19 European countries, USA and Japan, Ministry of Transport. Public Works and Water Management, The Hague, Netherlands, prepared for EXCIMAP, available at: http://ec europa eu/environment/water/flood risk/flood atlas/index htm. 2007.

[5] European Parliament. Directive 2007/60/EC of the European Parliament and of the Council of 23 October 2007 on the assessment and management of flood risks 2007.

[6] de Moel H, van Alphen J, Aerts JCJH. Flood maps in Europe-methods, availability and use. Nat Hazards Earth Syst Sci. 2009;9(2):289-301.

[7] Bubeck P, Kreibich H, Penning Rowsell EC, Botzen W, De Moel H, Klijn F. Explaining differences in flood management approaches in Europe and in the USA–a comparative analysis. Journal of Flood Risk Management. 2017;10(4):436-45.

[8] Demir V, Kisi O. Flood hazard mapping by using geographic information system and hydraulic model: Mert River, Samsun, Turkey. Advances in Meteorology. 2016;2016:9.

[9] Doong D-J, Lo W, Vojinovic Z, Lee W-L, Lee S-P. Development of a new generation of flood inundation maps A case study of the coastal city of Tainan, Taiwan. Water. 2016;8(11):521.

[10] Mosquera-Machado S, Ahmad S. Flood hazard assessment of atrato river in colombia. Water resources management. 2007;21(3):591-609.

[11] Wikipedia the free encyclopedia. Amphoe Chiang Khwan (in Thai): Wikipedia the free encyclopedia; 2022 [updated 10 February 2022; cited 2022 13 June]. Available from:https://th.Wikipedia.org/wiki/AmphoeChiangKhwan.

[12] Panban P, Ngamlarp D, Masari A, Thepprasit C. Comparison of annual maximum series and partial maximum series for flood frequency analysis. Journal of Science and Technology Kasetsart University. 2019;8(2):32-41. (in Thai)

[13] Brunner GW. HEC- RAS River Analysis System Hydraulic Reference Manual Version 5.0. Davis, CA, USA: US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center (HEC); 2016 February, 2016. 547 p.

[14] Brunner GW. HEC-RAS River Analysis System, User's Manual Version 5.0. Davis, CA, USA: US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center (HEC); 2016 February 2016. 962 p.

[15] Brunner GW. HEC-RAS River Analysis System, 2D Modeling User's Manual Version 5.0. Davis, CA, USA: US Army Corps of Engineers, Institute for Water Resources, Hydrologic Engineering Center (HEC); 2016 February 2016. 171 p.

[16] Kuntiyawichai K. Interactions between Land Use and Flood Management in the Chi River Basin. Delft, the Netherlands: UNESCO- IHE Institute of Water Education and Wageningen University; 2012.

[17] Chow VT. Open-channel hydraulics. Open-channel hydraulics. NY.: McGraw-Hill; 1959.

รูปแบบบทความสำหรับ
วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลธัญบุรี

ปรกช สิริสุวัณณ์[1*], สุมนมาลย์ เนียมหลาง[2] และกุลยา สาริชีวิน[3]

porakoch.s@en.rmutt.ac.th[1*], sumonman.n@en.rmutt.ac.th[2], kullaya.s@en.rmutt.ac.th[3]

[1*] ภาควิชาวิศวกรรมอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

[2] ภาควิชาวิศวกรรมวัสดุและโลหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

[3] ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

บทคัดย่อ

บทความนี้กล่าวเกี่ยวกับรูปแบบและวิธีการส่งบทความเพื่อเสนอต่อกองบรรณาธิการวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลธัญบุรี ผู้ส่งบทความต้องยึดรูปแบบตามบทความนี้อย่างเคร่งครัด บทความใดที่มีรูปแบบไม่ถูกต้องจะถูกส่งคืนเพื่อทำการแก้ไขก่อนนำส่งผู้ทรงคุณวุฒิประเมินบทความ หากไม่ทำการแก้ไขให้ถูกต้องกองบรรณาธิการจะทำการตัดสิทธิ์การส่งบทความนี้ ทั้งนี้บทคัดย่อต้องมีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ แต่ละภาษาควรมีเพียงย่อหน้าเดียว และมีความยาวไม่เกิน 300 คำ

คำสำคัญ: วิธีการส่งบทความ รูปแบบบทความ ขนาดตัวอักษร รูปแบบตัวอักษร การเว้นบรรทัด

Manuscript Preparation Guidelines for the Papers Submitted to Journal of Engineering, RMUTT

Porakoch Sirisuwan[1*], Sumonman Niamlang[2] and Kullaya Saricheewin[3]

porakoch.s@en.rmutt.ac.th[1*], sumonman.n@en.rmutt.ac.th[2], kullaya.s@en.rmutt.ac.th[3]

[1*] Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

[2] Department of Materials and Metallurgical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

[3] Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Abstract

This article describes a submission procedure and a format of the manuscript for the Journal of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi (JERMUTT). Authors are required to strictly follow the guideline provided hear, otherwise, the manuscript will be returned for proper correction before to be reviewed by two referees who are specialists in that fields. If no completed on this step your manuscript will be rejected and cannot be considered again. So that an abstract should have had only one paragraph. Both Thai and English abstracts are required the length of all should not exceed 300 words.

Keywords: submission procedure, manuscript format, font size, font style and blank line

1. ข้อกำหนดทั่วไป

บทความต้องประกอบด้วยส่วนต่าง ๆ ตามลำดับต่อไปนี้ คือ

1. ชื่อเรื่อง/บทความ (Title)
2. ชื่อผู้เขียน/อีเมล์ (Author, E-mail)
3. ที่อยู่ผู้เขียน (Affiliation)
4. บทคัดย่อ (Abstract)
5. คำสำคัญ (Keywords)
6. บทนำ (Introduction)
7. เนื้อหา (Text)
8. สรุป (Conclusion)
9. กิตติกรรมประกาศ (ถ้ามี) (Acknowledgements)
10. เอกสารอ้างอิง (References)

2. คำแนะนำในการเขียนและพิมพ์

คำแนะนำทั่วไป

2.1. ชื่อเรื่อง/บทความ (Title) มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ควรสั้นและกระชับแต่ครอบคลุมสาระทั้งเรื่อง สื่อความหมายชัดเจนไม่ควรใช้คำย่อ และวางกึ่งกลางหน้ากระดาษ

2.2. ชื่อผู้เขียนหลัก (Corresponding Author) และผู้เขียนร่วม (Co-Author) มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ใส่หมายเลขลำดับ (ตัวยก) เรียงตามลำดับความสำคัญ โดยใส่เครื่องหมายดอกจัน (*) ผู้เขียนหลักถัดจากหมายเลขลำดับ (ตัวยก)

2.2.1 E-mail ผู้เขียนเรียงตามลำดับชื่อผู้เขียนและ ใส่เครื่องหมาย (*) ถัดจากหมายเลขลำดับ (ตัวยก) ของผู้เขียนหลัก

2.3. ที่อยู่ผู้เขียน (Affiliation) มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ไม่ต้องระบุตำแหน่งวิชาการ หรือสถานะของนักศึกษาใดๆ ทั้งสิ้น

2.4. บทย่อคัด (Abstract) เป็นการสรุปประเด็นเนื้อหาที่เป็นแก่นสำคัญเน้นประเด็นสำคัญของงาน ที่ต้องการนำเสนอจริงๆ ควรเขียนให้สั้น และกระชับ

2.5. คำสำคัญ (Keywords) ให้ระบุไม่เกิน 3-5 คำ

2.6. บทนำ (Introduction) ส่วนนำจะเป็นส่วนที่ผู้เขียนจูงใจให้ผู้อ่านเกิดความสนใจในเรื่องนั้นๆ วัตถุประสงค์ของงานวิจัย และข้อมูลทางวิชาการ

2.7. เนื้อหา (Text) บทความที่เสนอจะต้องพิมพ์เป็นภาษาไทย หรือภาษาอังกฤษ ตามรูปแบบที่กำหนด ซึ่งพร้อมที่จะนำไปถ่ายเพลท เพื่อพิมพ์ออฟเซ็ตได้ทันที

การพิมพ์ให้พิมพ์ลงบนกระดาษ A4 โดยพิมพ์เป็น 2 คอลัมน์ตามรูปแบบบทความนี้ ขนาดของคอลัมน์เป็นไปตามที่กำหนด จะต้องพิมพ์ด้วยเครื่องพิมพ์เลเซอร์ที่มีความละเอียดไม่น้อยกว่า 300 dpi.

ให้พิมพ์โดยไม่เว้นบรรทัด เมื่อจะขึ้นหัวข้อใหม่ให้เว้นบรรทัด 1 บรรทัด และจะต้องพิมพ์ให้เต็มคอลัมน์ก่อนที่จะขึ้นคอลัมน์ใหม่ หรือขึ้นหน้าใหม่ ห้ามเว้นที่เหลือไว้ว่างเปล่า

การลำดับหัวข้อในส่วนของเนื้อเรื่องนี้ ให้ใส่เลขกำกับโดยให้บทนำเป็นหัวข้อหมายเลข 1 และหากมีการแบ่งหัวข้อย่อย ก็ใช้เลขระบบทศนิยมกับหัวข้อย่อย เช่น 1.1 เป็นต้น

ตารางที่ 1 การตั้งค่าหน้ากระดาษ

ระยะขอบ	เซนติเมตร
บน (Top)	3
ล่าง (Botton)	2
ซ้าย (Left)	3
ขวา (Right)	3
ระยะห่างคอลัมน์	1

ตารางที่ 2 ขนาดตัวอักษรและการเว้นระยะพิมพ์บทความภาษาไทยและภาษาอังกฤษด้วยตัวอักษรรูปแบบ **"TH SarabunPSK"**

รายการ	ขนาด	ตำแหน่ง	ลักษณะ
ชื่อเรื่อง	18	กึ่งกลาง	**ตัวหนา**
ชื่อผู้เขียน อีเมล์	14	กึ่งกลาง	ปกติ
ที่อยู่ผู้เขียน	12	ชิดซ้าย	ปกติ
บทย่อคัด	14	ชิดซ้าย	ปกติ
ชื่อหัวข้อ,หัวข้อย่อย	14	ชิดซ้าย	**ตัวหนา**
เนื้อความ	14	กระจายแบบไทย	ปกติ
สมการต่างๆ	14	กึ่งกลาง	*ตัวเอียง*
คำบรรยายประกอบรูปและตาราง	14	กึ่งกลาง	ปกติ

ให้จัดเนื้อเรื่องในแต่ละบรรทัดเรียงชิดซ้ายและขวาอย่างสวยงาม เยื้องบรรทัดแรกของย่อหน้า ใช้ 1 แท็บ หรือ 0.5 นิ้ว

2.7.1 การจัดทำรูปภาพ

รูปภาพจะต้องมีความกว้างไม่เกิน 70 มม. เพื่อให้ลงในหนึ่งคอลัมน์ได้ หรือกรณีจำเป็นจริงๆ เพื่อรักษารายละเอียดในภาพ อาจยอมมีให้ความกว้างได้เต็มหน้ากระดาษ(กว้าง 150 มม.)

ตัวอักษรทั้งหมดในภาพจะต้องมีขนาดใหญ่สามารถอ่านได้สะดวก

รูปภาพทุกรูปจะต้องมีหมายเลข และคำบรรยายใต้ภาพ

คำบรรยายใต้ภาพห้ามใช้คำว่า “แสดง” เช่น ห้ามเขียนว่า “รูปที่ 1 แสดงความสัมพันธ์ระหว่าง..” ที่ถูกต้องควรเป็น “รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่าง..”

ตัวอย่าง

รูป

รูปที่ 1 ความสัมพันธ์ระหว่าง....

รูปลายเส้นจะต้องเป็นเส้นหมึกดำ ส่วนรูปถ่ายควรจะเป็นรูปขาวดำที่มีความคมชัด รูปสีอนุโลมให้ใช้ได้ รูปภาพควรจะมีรายละเอียดเท่าที่จำเป็นเท่านั้น เช่น ภาพถ่ายรูปคลื่นจากออสซิลโลสโคปที่ปรากฏให้เป็นเฉพาะจอภาพ เป็นต้น และเพื่อความสวยงามให้เว้นบรรทัดเหนือรูปภาพ 1 บรรทัดและเว้นใต้คำบรรยาย 1 บรรทัด

2.7.2 การเขียนสมการ

สมการทุกสมการจะต้องมีหมายเลขกำกับอยู่ภายในวงเล็บและเรียงลำดับที่ถูกต้อง *ควรใช้ตัวพยัญชนะเอียง*แสดงถึงพารามิเตอร์หรือตัวแปรในสมการ ตำแหน่งของหมายเลขสมการจะต้องอยู่ชิดขอบด้านขวาของคอลัมน์ เว้นหนึ่งบรรทัดก่อนเขียนสมการ และเว้นหนึ่งบรรทัดหลังเขียนสมการ จัดให้สมการอยู่ตรงกลางคอลัมน์ ดังตัวอย่างนี้

$$a + b = c \qquad (1)$$

เริ่มเขียนคำอธิบายตั้งแต่บรรทัดนี้

2.7.3 การจัดการทำตาราง

ตัวอักษรในตารางจะต้องไม่เล็กกว่าตัวอักษรในเนื้อเรื่อง ควรตีเส้นกรอบตารางด้วยหมึกดำให้ชัดเจน

ตารางทุกตารางจะต้องมีหมายเลข และคำบรรยายกำกับเหนือตาราง หมายเลขกำกับและคำบรรยายนี้รวมกันแล้วควรมีความยาวไม่เกิน 2 บรรทัด คำบรรยายเหนือตารางห้ามใช้คำว่า “แสดง” เช่นเดียวกับกรณีรูปภาพ

เพื่อความสวยงามให้เว้นบรรทัดเหนือตาราง 1 บรรทัด และเว้นบรรทัดใต้คำบรรยายรูปภาพ 1 บรรทัด

2.7.4 ความยาวของบทความ

เมื่อรวมทุกส่วนแล้ว บทความไม่ควรจะมีความยาวน้อยกว่า 8 หน้า และยาวไม่เกิน 12 หน้า กระดาษ A4

2.7.5 กรณีบทความภาษาอังกฤษ

ผู้พิมพ์บทความเป็นภาษาอังกฤษ กรุณาดูคำแนะนำ วิธีการพิมพ์บทความภาษาอังกฤษที่แนบมาด้วย

2.7.6 การส่งบทความ

ผู้เขียนสามารถส่งต้นฉบับ ทางเว็บไซต์ออนไลน์ของวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลธัญบุรี https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/jermutt

โดยต้องทำการลงทะเบียนเพื่อสมัครสมาชิกวารสารและนำส่งวารสารต้นฉบับในรูปแบบไฟล์

- Word
- PDF

กรุณาจัดส่ง แบบฟอร์มยืนยันการส่งบทความทางวิชาการ เพื่อลงตีพิมพ์ใน วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลธัญบุรี มายัง อีเมล์enjournal@en.rmutt.ac.th หรือจัดส่งไปรษณีย์มายังกองบรรณาธิการ วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลธัญบุรี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี 39 หมู่ 1 ถ.รังสิต-นครนายก ต.คลองหลวง อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110” จึงจะถือว่า การส่งวารสารนั้นเสร็จสมบูรณ์

หากขั้นตอนการนำส่งวารสารทั้ง 2 ขั้นตอน คือ การส่งวารสารทางเว็บไซต์ออนไลน์ และการนำส่งแบบฟอร์มยืนยันการส่งบทความมายังอีเมล์ enjournal@en.rmutt.ac.th ไม่ครบถ้วนทั้ง 2 ขั้นตอน บทความนั้นจะถูกส่งคืน และไม่สามารถผ่านการพิจารณาได้

3. สรุป (Conclusion)

ผู้เขียนบทความกรุณาตรวจสอบบทความอย่างรอบคอบโดยใช้เวลาอย่างเพียงพอก่อนส่งให้คณะกรรมการพิจารณา จะทำให้บทความของท่านมีคุณภาพสูง ผ่านการพิจารณาง่ายขึ้น และหากไม่มีการแก้ไขบทความกลับภายในระยะเวลา 3 เดือน หลังจากได้รับบทความกลับคืน บทความนั้นจะถูกยกเลิกการพิจารณาโดยอัตโนมัติ และไม่รับพิจารณาบทความใดๆ ของผู้เขียนนั้น เป็นระยะเวลา 1 ปี นับตั้งแต่วันครบกำหนดการส่งบทความกลับคืน

4. กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements)

ขอขอบคุณข้อมูลจาก TCI และผู้เขียนบทความทุกท่านที่ให้ความร่วมมือรักษาระเบียบการเขียนบทความอย่างเคร่งครัด

5. เอกสารอ้างอิง (References)

การอ้างอิงเอกสารใช้ระบบ (Vancouver Style) เรียงตามลำดับ 1,2,3 ตามการใช้งาน โดยใส่ตัวเลขของเอกสารอ้างอิงไว้ในวงเล็บ เช่น [1] เป็นต้น แล้วรวบรวมไปเขียนอ้างอิง ตามรูปแบบวารสารกำหนด

ในการเขียนเอกสารอ้างอิงผู้เขียนต้องเขียนเป็นภาษาอังกฤษ ในกรณีแหล่งข้อมูลที่ใช้อ้างอิงมาจากแหล่งอ้างอิงภาษาไทย เช่น ตำราไทย วารสารไทย เป็นต้น ให้แปลเป็นภาษาอังกฤษ แล้ววงเล็บด้านท้ายชื่อภาษาต้น เช่น (in Thai) ทั้งนี้ผู้เขียนบทความควรใช้แหล่งอ้างอิงที่ได้รับการยอมรับกันตามเกณฑ์สากล

ตัวอย่าง (Example)

[1] Kalsirisilp R, Nadpakdee A, Langkapin J. Performance evaluation of sugarcane grab loader. Journal of Engineering, RMUTT. 2018;16(1):1-12. (in Thai)

<u>ตัวอย่างการเขียนเอกสารอ้างอิง</u>
<u>(เครื่องหมาย\หมายถึง เว้นวรรค 1 ระยะ)</u>

รูปแบบบทความวารสาร
(Articles in Journals)

[2] Author.\Article Title.\Journal Title.\ Year of Publication;Volume(Issue Number):Pagintion.

ตัวอย่าง(Example)

[3] Nanthasamroeng N. Application of center of risk gravity in the location analysis for a sitting of emergency medical service vehicles. Journal of Engineering RMUTT. 2011;9(2):21-9. (in Thai)

[4] Halpern SD, Ubel PA, Caplan AL. Solid-organ transplantation in HIV-infected patients. N Engl J Med. 2002;347(4):284-7.

รูปแบบหนังสือและเอกสารเฉพาะเรื่อง
(Books and Other Monographs)

[5] Author.\Title.\Edition.\ Place of Publication: \Publisher;\Year of Publication.

[6] Author.\Title\[dissertation or master's thesis].\ Place of Publication:\ University; \Year of Publication.

ตัวอย่าง(Example)

[7] Murray PR, RoawnrhL KS, Kobayashi GS, Pfaller MA. Medical microbiology. 4th ed. St.Louis: Mosby; 2002.

[8] Borkowski MM. Infant sleep and feeding: a telephone survey of Hispanic Americans [dissertation]. Mount Pleasant (MI): Central Michigan University; 2002.

รูปแบบสื่ออิเล็กทรอนิกส์
(Electronic Material)

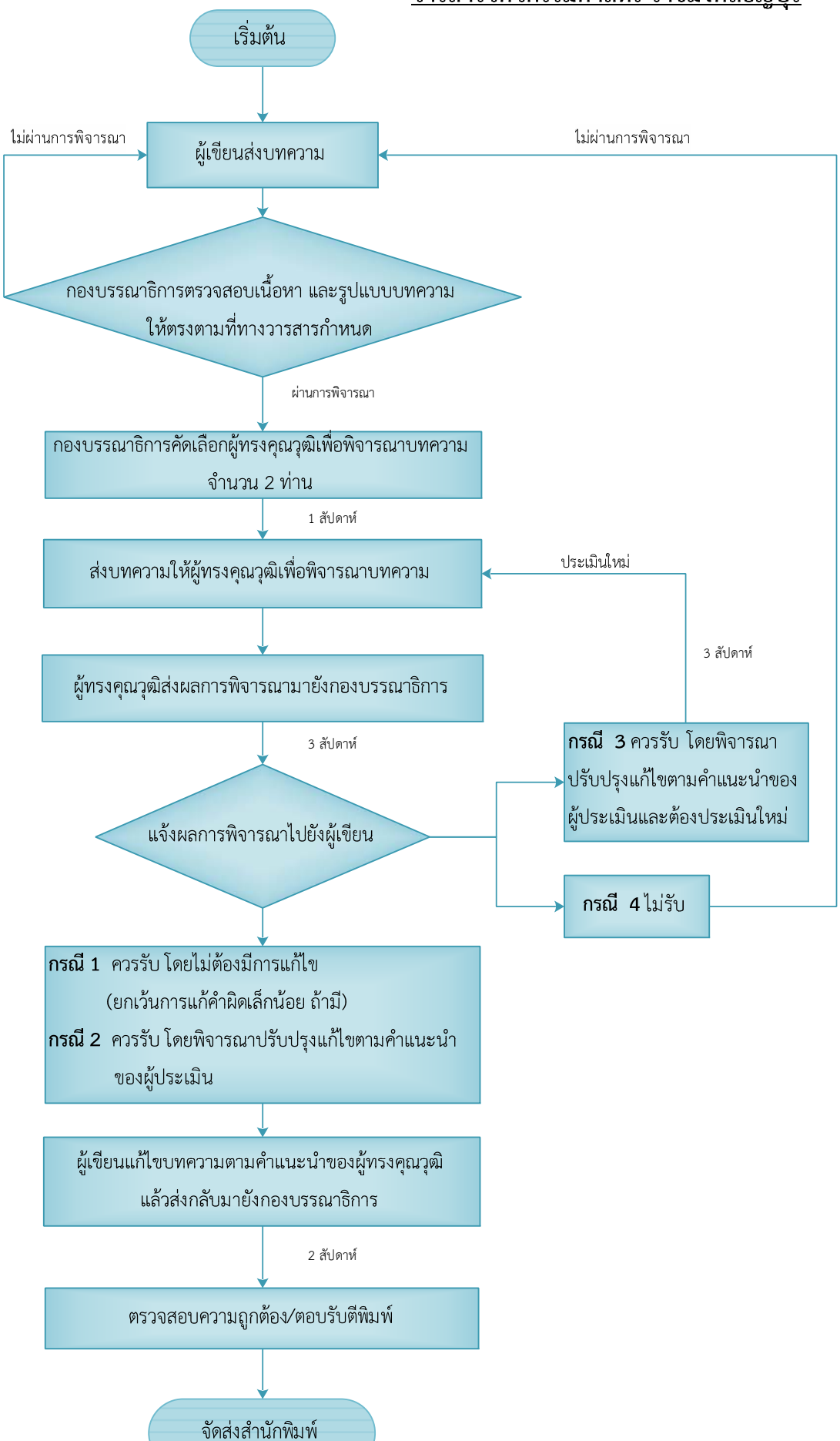
[9] Author.\ Article Title.\ Journal Title.\[Internet].\ Year of Publication\[cited YY\MM\DD];Volume(Issue Number):page numbers.\ Availability From:\URL

ตัวอย่าง(Example)

[10] Siriprasert R. Model development for health screening system in prachinburi province. Journal of Health Science [Internet]. 2010 [cited 2011 Fed 25];19(3):409-21. Available from:http://pubnet.moph.go.th/pubnet2/e_doc.php?id=2593 (in Thai)

[11] Abood S. Quality improvement initiative in nursing homes: the ANA acts in an advisory role. Am J Nurs [Internet]. 2002 Jun [cited 2002 Aug 12];102(6): [about 1 p.]. Available from : http://www.nursingworld.org/AJN/2002/june/Wawatch.htmArticle

สามารถดาวน์โหลดรูปแบบบทความ Template ในรูปแบบ Word และคู่มือการอ้างอิงระบบ (Vancouver Style) ได้ที่ https://drive.google.com/drive/folders/1jPxtFBwmeIUTtRwHH3HEFlFuVZXsIOPV



ในกรณีที่ 2 และ3 หลังจากบทความผ่านการพิจารณาจากผู้ทรงคุณวุฒิฯแล้ว ผู้เขียนควรพิจารณาการแก้ไขและส่งบทความกลับมาในระยะเวลาที่กำหนดหากล่าช้าเกิน 90 วัน (นับจากวันแจ้งแก้ไข) กองบรรณาธิการขอแจ้งไม่รับพิจารณาบทความโดยอัตโนมัติ และผู้เขียนไม่สามารถส่งบทความเข้าสู่ระบบได้เป็น ระยะเวลา 1 ปี (เนื่องจากมีผลต่อค่าใช่จ่ายในการประเมินบทความ และขาดความต่อเนื่องในการพิจารณาบทความจากผู้ทรงคุณวุฒิฯ)

หมายเหตุ : รวมระยะเวลาโดยประมาณ 90 วัน หากไม่มีการแก้ไขใดๆเพิ่มเติม

สมาชิกเลขที่
.....

ใบสมัครสมาชิกวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลธัญบุรี

วันที่สมัคร .....

ข้าพเจ้า นาย/นาง/นางสาว ..... สกุล ..... อาชีพ .....
ที่อยู่ (สำหรับจัดส่งวารสาร) เลขที่ ..... ถนน ..... แขวง/ตำบล .....
เขต/อำเภอ ..... จังหวัด ..... รหัสไปรษณีย์ .....
โทรศัพท์ ..... โทรสาร ..... e-mail .....

มีความประสงค์สมัครเป็นสมาชิก **อัตราค่าสมาชิก**

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลธัญบุรี ..... ปี	1 ปี 2 ฉบับ 120 บาท	(สำหรับบุคคลทั่วไป)
	80 บาท	(สำหรับนักศึกษา)
ต่ออายุสมาชิก ..... ปี	1 ปี 2 ฉบับ 120 บาท	(สำหรับบุคคลทั่วไป)
	80 บาท	(สำหรับนักศึกษา)

พร้อมกันนี้ได้ส่งค่าสมาชิก จำนวน ..... บาท
จำนวนเงินตัวอักษร
ชำระเงินโดยวิธี
ธนาณัติ สั่งจ่าย
ตั๋วแลกเงินไปรษณีย์ สั่งจ่าย
โอนเงินเข้าบัญชีธนาคาร ..... ชื่อบัญชี ..... เลขที่บัญชี .....

หมายเหตุ 1. กรุณาส่งสำเนาใบเข้าบัญชี (pay-in-slip) หรือโทรสารมายังสำนักงานคณะวิศวกรรมศาสตร์ พร้อมเขียนชื่อ – นามสกุล และหมายเลขสมาชิก (ถ้ามี)
2. นักศึกษาที่สมัครทางไปรษณีย์ กรุณาส่งสำเนาบัตรประจำตัวนักศึกษาแนบมาด้วย

ลงชื่อ ..... ผู้สมัคร
(.....)

วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลธัญบุรี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
39 หมู่ 1 ถนนรังสิต-นครนายก ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110
โทรศัพท์ 0-2549-3493 โทรสาร 0-2549-3493 www.engineer.rmutt.ac.th/journal e-mail: enjournal@en.rmutt.ac.th

แบบฟอร์มการส่งบทความทางวิชาการ

เพื่อลงตีพิมพ์ในวารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชมงคลธัญบุรี

ข้าพเจ้า ☐ นาย ☐ นาง ☐ นางสาว ☐ อื่นๆ (โปรดระบุ).....

ชื่อ-สกุล.....

(ภาษาอังกฤษ).....

ตำแหน่งทางวิชาการ (โปรดระบุ) ☐ ศาสตราจารย์ ☐ รองศาสตราจารย์ ☐ ผู้ช่วยศาสตราจารย์

☐ อาจารย์ ☐ อื่นๆ(โปรดระบุ).....

ที่อยู่ (ที่ติดต่อได้).....

.....

โทรศัพท์ที่ทำงาน..... โทรศัพท์มือถือ.....

โทรสาร..... อีเมล์.....

มีความประสงค์ขอส่งบทความ เรื่อง:

ชื่อบทความ (ภาษาไทย).....

.....

ชื่อบทความ (ภาษาอังกฤษ).....

.....

การตรวจสอบ ☐ ทำการลงทะเบียน และ ส่งวารสารต้นฉบับใน

เว็บไซต์www.engineer.rmutt.ac.th/journal/ หรือ http://journal.engineer.rmutt.ac.th/enjournal/เรียบร้อยแล้ว

วันที่ ส่งวารสารต้นฉบับ เข้าระบบออนไลน์ .....

ข้าพเจ้าขอรับรองว่า บทความนี้เป็นผลงานของข้าพเจ้าและผู้ร่วมงานตามชื่อที่ระบุไว้ในบทความจริง และบทความนี้ไม่เคยลงตีพิมพ์ในวารสารใดมาก่อน และข้าพเจ้าจะไม่นำส่งบทความนี้ไปพิจารณาลงตีพิมพ์ในวารสารอื่นภายใน 60 วัน นับจากวันที่ข้าพเจ้าส่งบทความ

ลงนาม.....

(.....)

วันที่....เดือน .....พ.ศ.....

TECHNICAL ARTICLE FORM

FOR PUBLISHING ON JOURNAL OF ENGINEERING, RMUTT

Title ☐ Mr. ☐ Ms. ☐ Others (Please specify).....

Name-Surnames .....

Academic Positions (Please specify) ☐ Professor ☐ Associate Professor ☐ Assistant Professor ☐ Lecturer ☐ Others (Please specify).....

Address (for Contact).....

.....

.....

Office Phone Number..... Mobile Phone Number.....

Fax Number..... E-mail.....

Name of Article:.....

.....

.....

Submission Checklist ☐ Already register and submit the manuscripts on www.engineer.rmutt.ac.th/journal/ or http://journal.engineer.rmutt.ac.th/enjournal/

The days of Online Submission.....

I promise this article belongs to me and co-authors as the name indicated in the article. In addition, this article has not been previously published on another journal. Furthermore, I will not submit this article on another journal within 60 days from the day of my submission on the JOURNAL OF ENGINEERING, RMUTT.

Sign .....

(.....)

...../...../.....