TCI Journal Classification tier 1 Approved during 2022-2024

Journal of Applied Research on Science and Technology

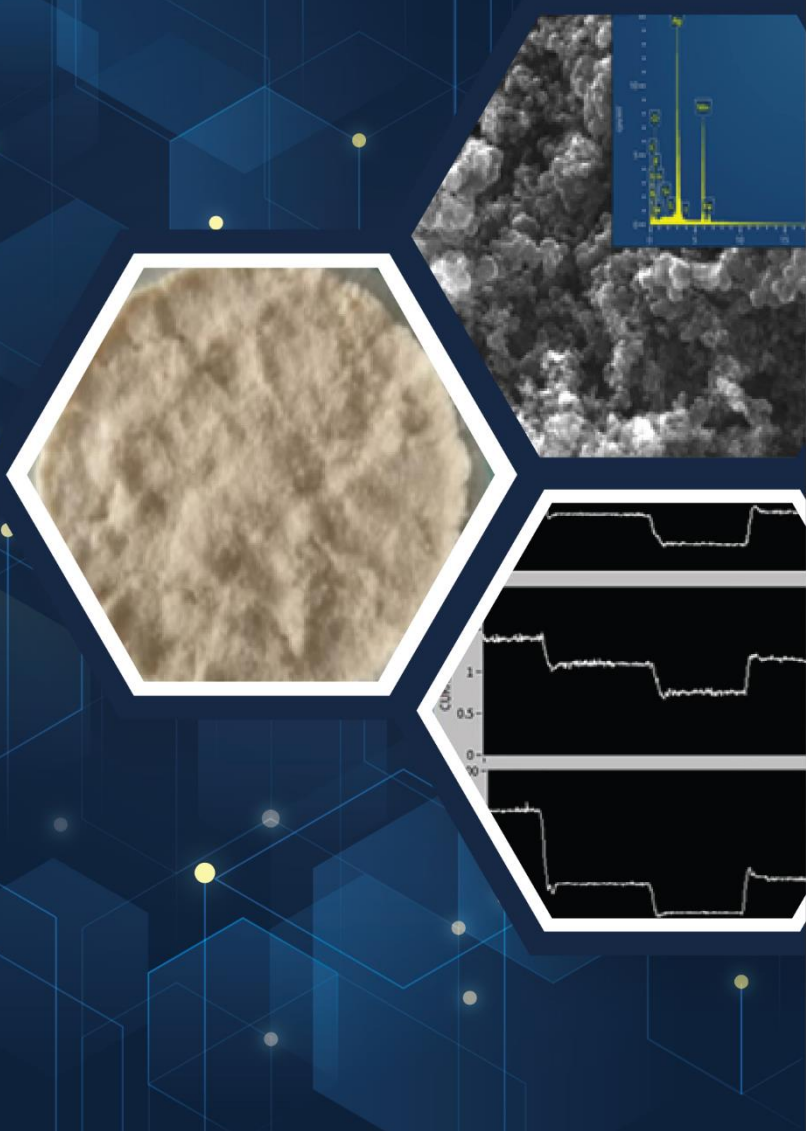
Institute of Research and Development
Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Volume 21 Issue 2 July-December 2022

ISSN Online: 2773-9473
Print: 2773-9376

ปีที่ 21 ฉบับที่ 2 (กรกฎาคม-ธันวาคม 2565)

JARST



TCI Journal Classification tier 1 Approved during 2022-2024

Journal of Applied Research on Science and Technology

Institute of Research and Development
Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Volume 21 Issue 2 July-December 2022

ISSN Online: 2773-9473
Print: 2773-9376

ปีที่ 21 ฉบับที่ 2 (กรกฎาคม-ธันวาคม 2565)

JARST

Journal of Applied Research on Science and Technology (JARST)
ปีที่ 21 ฉบับที่ 2 (กรกฎาคม – ธันวาคม 2565)

วัตถุประสงค์

Journal of Applied Research on Science and Technology (JARST) เป็นวารสารที่เผยแพร่องค์ความรู้และประสบการณ์ทางด้านวิชาการและวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยมีจุดหมายและวัตถุประสงค์ของวารสารดังนี้

1. เพื่อเผยแพร่แนวความคิด งานวิจัย การพัฒนาและประเด็นสำคัญในด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
2. เพื่อกระตุ้นให้เกิดการอภิปรายทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีทุกสาขาวิชา ซึ่งเป็นทั้งงานวิจัยพื้นฐานและงานวิจัยประยุกต์

ทั้งนี้วารสาร JARST อยู่ในฐานข้อมูลดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (Thai Journal Citation Index Centre, TCI Centre) โดยผ่านการรับรองคุณภาพจาก TCI จัดให้อยู่ในกลุ่มที่ 1 (ระยะเวลาการรับรองคุณภาพวารสารตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม พ.ศ. 2565 ถึงวันที่ 31 ธันวาคม พ.ศ. 2567) และจะมุ่งเน้นพัฒนาคุณภาพเพื่อเข้าสู่ฐานข้อมูลสากลต่อไป

ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์สมหมาย	ผิวสอาด	อธิการบดี
รองศาสตราจารย์กฤษณ์ชนม์	ภูมิกิตติพิชญ์	รองอธิการบดี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์พงศ์พิชญ์	ต่วนภูษา	รองอธิการบดี
Prof. Sean	Danaher	Northumbria University (UK)
Prof. Hee Young	Lee	Yeungnam University (Korea)
Prof. Seiichi	Kawahara	Nagaoka University of Technology (Japan)

บรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์วารุณี	อริยวิริยะนันท์	ผู้อำนวยการสถาบันวิจัยและพัฒนา

กองบรรณาธิการภายนอก

ศาสตราจารย์ผดุงศักดิ์	รัตนเดโช	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ศาสตราจารย์ตรีทศ	เหล่าศิริหงส์ทอง	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ศาสตราจารย์พิเชษฐ	ลิ้มสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์คมสัน	มาลีสี	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ศาสตราจารย์สนอง	เอกสิทธิ์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์เภสัชกรหญิงพรอนงค์	อร่ามวิทย์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ชูกิจ	ลิมปิจำนงค์	สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
ศาสตราจารย์วสกร	บัลลังก์โพธิ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เนื้อหาบทความในวารสารนี้เป็นความคิดเห็นของผู้เขียนโดยผ่านความเห็นชอบจากผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ (peer review) คณะผู้จัดทำไม่จำเป็นต้องเห็นชอบและมิใช่ความรับผิดชอบของสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

กองบรรณาธิการภายใน

รองศาสตราจารย์บุญยัง	ปลั่งกลาง	คณะวิศวกรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์จตุรงค์	ลังกาพินธุ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์สรพงษ์	ภวสุปรีย์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์จักรี	ศรีนนท์ฉัตร	คณะวิศวกรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์อมร	ไชยสัตย์	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์นริศร์	บาลทิพย์	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

จัดทำโดย

สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
เลขที่ 39 หมู่ที่ 1 ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110
โทรศัพท์ 0 2549 4492 โทรสาร 0 2549 4680
Website: http://www.ird.rmutt.ac.th

คณะผู้จัดทำ

นางสาวสรัญญา	สุวินัย	สถาบันวิจัยและพัฒนา
นางสาวฉัตรวดี	สายใยทอง	สถาบันวิจัยและพัฒนา
นางสาวมนต์ทิชา	รัตนพันธ์	สถาบันวิจัยและพัฒนา
นางสาวณัฐวรรณ	ธรรมวัชรากร	สถาบันวิจัยและพัฒนา
นางสาวกชกร	ดาราพาณิชย์	สถาบันวิจัยและพัฒนา

เนื้อหาบทความในวารสารนี้เป็นความคิดเห็นของผู้เขียนโดยผ่านความเห็นชอบจากผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ (peer review) คณะผู้จัดทำไม่จำเป็นต้องเห็นชอบและมิใช่ความรับผิดชอบของสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

คำนำ

Journal of Applied Research on Science and Technology (JARST) เป็นวารสารที่ส่งเสริมงานด้านวิจัยและดำเนินงานวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ซึ่งอยู่ในฐานข้อมูลของศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (Thai Journal Citation Index, TCI Centre) รับตีพิมพ์บทความวิจัย บทความวิชาการ เปิดรับบทความทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ โดยครอบคลุมในสาขาวิชาต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อเผยแพร่และถ่ายทอดผลงานวิจัยและวิชาการ รวมถึงแนวคิดในการพัฒนางานวิจัย เพื่อกระตุ้นให้เกิดเป็นแนวทางการอภิปรายทุกสาขาทั้งงานวิจัยพื้นฐาน และวิจัยประยุกต์จากภายในและภายนอกมหาวิทยาลัย

สำหรับวารสารวิจัยปีที่ 21 ฉบับที่ 2 (กรกฎาคม – ธันวาคม 2565) ได้รวบรวมผลงานทางวิชาการจากผลการวิจัยทั้งสิ้น จำนวน 12 บทความ ประกอบด้วยบทความจากผลงานวิจัยจากหลากหลายสาขา ซึ่งได้ผ่านการกลั่นกรองจากผู้ทรงคุณวุฒิ (peer review) ทั้งภายนอกและภายในมหาวิทยาลัย กองบรรณาธิการหวังเป็นอย่างยิ่งว่าทุกบทความจะเป็นประโยชน์และสามารถช่วยพัฒนางานวิจัยแก่ผู้ที่สนใจให้ก้าวหน้าต่อไปได้

กองบรรณาธิการ

เนื้อหาบทความในวารสารนี้เป็นความคิดเห็นของผู้เขียนโดยผ่านความเห็นชอบจากผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ (peer review) คณะผู้จัดทำไม่จำเป็นต้องเห็นชอบและมิใช่ความรับผิดชอบของสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

สารบัญ

เอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ชนิดใหม่จากแบคทีเรียอะซิติกตรึงไนโตรเจน *Nguyenibacter vanlangensis* AR-R3 1

A Novel Exopolysaccharides from Nitrogen Fixing Acetic Acid Bacterium, *Nguyenibacter vanlangensis* AR-R3

สาฐิณี เจือจันทร์, วัลลภา หล่อเหลี่ยม, ศิรพรรณ สุคนธสิงห์, สมพร มูลมั่งมี และ ดวงทิพย์ มูลมั่งมี*

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ผลของปริมาณน้ำตาลต่อสมบัติทางกายภาพและประสาทสัมผัสการยอมรับของผู้บริโภคของผลิตภัณฑ์ขนมผิง 14

Effect of Sugar Content on Physical and Sensory Properties of Tapioca-based Cookies

พจนีย์ บุญนา, อภิญญา มานะโรจน์, วรลักษณ์ ปัญญาธิติพงศ์ และ ศุภัคษร มาแสวง*

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

การเตรียมฟิล์มพลาสติกชีวภาพผสมที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอลล์และเซลลูโลสที่สกัดจากก้านใบบัวหลวง 26

Preparation of Eco-friendly Blended Bioplastic Film between Blend of Polyvinyl Alcohol and Cellulose Extracted from Nelumbo nucifera Gaertn Stalk

พชรวรรณ รัตนทรงธรรม*

มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์

การใช้ประโยชน์จากเปลือกหอยนางรมแทนที่มวลรวมหยาบในงานคอนกรีต 39

Utilization of Oyster Shell as Coarse Aggregate in Concrete

ประชุม คำพุฒ และ ทวิช กล้าแท้*

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

การพัฒนาระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์เพื่อนำไปสู่การขับเคลื่อนการเกษตรด้วยข้อมูล 50

Development of Geographic Information Systems to Lead to Data-Driven Agriculture

นิติศักดิ์ เจริญรูป*, วรีวรรณ เจริญรูป, สิทธิชัย จีนะวงษ์ และ สุจิตรา จีนะวงษ์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

การศึกษาหาบริเวณที่มาของ $PM_{2.5}$ จากการวิเคราะห์ข้อมูลระยะสั้นด้วยเทคนิค Bivariate Polar Plot ณ อำเภอบ้านไผ่ จังหวัดขอนแก่น ประเทศไทย 66

A Study on Determining the Potential Source Area of $PM_{2.5}$ Using Bivariate Polar Plot Technique on Short-Term Monitoring Data in Bhan Phi District, Khonkhen Province, Thailand

ศิรพงศ์ สุขทวี* รัชตวรรณ เกตุวัง อดุลย์เดช ปัดภัย และ นิรัน เปี่ยมใย

กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม

สารบัญ (ต่อ)

ระบบติดตามอุณหภูมิและความชื้นในการฟักไข่ไก่พื้นเมืองในตู้ฟักไฟฟ้าด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง 79

Temperature and Humidity Monitoring System on Hatching Native Chickens Egg in Electric Incubator using Internet of Things Technology

กฤษฎา ภาณุมนต์วาที, นิกร ปรีชา และ สิทธิชัย ชูสำโรง*

มหาวิทยาลัยนเรศวร

แบบจำลองการจำแนกอากาศยานขับไล่โจมตีบนพื้นฐานข้อมูลของเป้าหมายไม่ทราบฝ่ายโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม 89

A Model of Fighter Aircraft Classification Based on Information of Unknown Target Using Artificial Neural Networks

ปธิกร อันชื่น และ นันทิพัฒน์ พิศุทธางกูร*

โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช

การศึกษาตัวแปรเสถียรภาพการวิ่งของรถซ่อมบำรุงทางสำหรับรถไฟชานเมืองด้วยชุดทดลอง 104

A Study of Running Stability Parameters of Infrastructure Maintenance Vehicle for Commuter Rail with Scale Model

เทอดเกียรติ ลิมปิทีปราการ, วินัย จันทร์เพ็ง และ จงใจ ชัยจันดี*

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี

การจำลองการผลิตไฟฟ้าจากกังหันน้ำโดยใช้โปรแกรมแลปวิว 117

Simulation of the Generating Electricity from Water Turbines Using the LabVIEW

พงษ์ศิลป แก้วรัตนศรีโพธิ์*

มหาวิทยาลัยรังสิต

ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาขั้วแคโทดระหว่าง Ag/C กับ AgMnxOy/C สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแอลคาไลน์น้ำตาลกลูโคสแบบไม่มีเยื่อเลือกผ่าน 126

Efficiency of Cathode Catalyst Between Ag/C and AgMnxOy/C for Glucose Membraneless Alkaline Fuel Cell

จักรพงศ์ ไชยบุรี*, กันทรากร สุวรรณรักษา และ สิตานันท์ บุญยอด

มหาวิทยาลัยทักษิณ

Effect of Paclobutrazol Concentrations and Foliar Application Times on Flowering of 'Mahachanok' Mango 137

Yaowarat Wongsrisakulkaew*, Unaroj Boonprakob and Lop Phavaphutanon

Kasetsart University

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

เอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ชนิดใหม่จากแบคทีเรียอะซิติกตรึงไนโตรเจน *Nguyenibacter vanlangensis* AR-R3

A Novel Exopolysaccharides from Nitrogen Fixing Acetic Acid Bacterium, *Nguyenibacter vanlangensis* AR-R3

สาฐิณี เจือจันทร์[1] วัลลภา หล่อเหลี่ยม[2] ศิรพรรณ สุคนธสิงห์[3] สมพร มูลมั่งมี[4] และ ดวงทิพย์ มูลมั่งมี[1*]

Satinee Juechan[1], Wanlapa Lorliam[2], Sirapan Sukontasing[3], Somporn Moonmangmee[4] and Duangtip Moonmangmee[1*]

[1]ภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี กรุงเทพมหานคร 10140

[2]ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ กรุงเทพมหานคร 10110

[3]ภาควิชาเทคนิคการสัตวแพทย์ คณะเทคนิคการสัตวแพทย์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร 10900

[4] ศูนย์ความหลากหลายทางชีวภาพ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย ปทุมธานี 12120

[1]Department of Microbiology, Faculty of Science, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Bangkok 10140, THAILAND

[2]Department of Biology, Faculty of Science, Srinakharinwirot University, Bangkok 10110, THAILAND

[3]Department of Veterinary Technology, Faculty of Veterinary Technology, Kasetsart University, Bangkok 10900, THAILAND

[4]Biodiversity Research Center, Thailand Institute of Scientific and Technological Research, Pathumthani 12120, THAILAND

[*]Corresponding author e-mail: duangtip.moo@kmutt.ac.th

ARTICLE INFO

Article history:
Received: June 20, 2022
Revised: August 16, 2022
Accepted: August 22, 2022
Available online: September 8, 2022
DOI: 10.14456/jarst.2022.13

ABSTRACT

An acetic acid bacterium, *Nguyenibacter vanlangensis* AR-R3 was isolated from rice rhizosphere and exhibited nitrogen fixation as well as plant growth promotion properties. In addition, the bacterium can produce exopolysaccharides (EPS) to promote nitrogenase activity in the bacterial cells. These research objectives were aimed to purify and characterize EPS generated from an acetic acid bacterium, *N. vanlangensis* AR-R3. The pure culture was inoculated in Glucose-Yeast Extract-Peptone (GYP) medium broth

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

Keywords: acetic acid bacteria, exopolysaccharides (EPS), Column Chromatography, Nguyenibacter vanlangensis AR-R3

(2% Glucose, 0.5% Yeast Extract, and 1% Peptone). The obtained culture supernatant was concentrated using a rotary evaporator, and then crude exopolysaccharides were precipitated with absolute ethanol. Crude polysaccharides were further purified via DEAE- Sephacel Column Chromatography and Sephacryl™ S-400 Column Chromatography, respectively. According to the results of the study, exopolysaccharides purified from *N. vanlangensis* AR-R3 exhibited 4 average molecular weight sizes (Mw) of 2.180×10^8, 5.638×10^6, 5.523×10^5 and 1.990×10^5 Da, respectively. Sugar composition analysis of all 4 polysaccharides revealed the same composition of two types of monosaccharides, glucose and mannose. Regarding to purified exopolysaccharides from *N. vanlangensis* AR-R3 had molecular weights and monosaccharide compositions difference from other acetic acid bacteria reported so far. Thus, exopolysaccharide purified in this research would be a novel polysaccharide.

บทคัดย่อ

Nguyenibacter vanlangensis AR-R3 เป็นแบคทีเรียอะซิติกที่แยกมาจากรากของต้นข้าว มีคุณสมบัติในการตรึงไนโตรเจนและช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของข้าว แบคทีเรียชนิดนี้สามารถผลิตพอลิแซ็กคาไรด์ออกมานอกเซลล์เรียกว่า Exopolysaccharides (EPS) ซึ่งมีความเกี่ยวข้องกับการส่งเสริมกิจกรรมเอนไซม์ไนโตรจีเนสในเซลล์แบคทีเรีย ในการศึกษาครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อแยกบริสุทธิ์ และศึกษาคุณลักษณะเบื้องต้นของเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์จากแบคทีเรียอะซิติก *N. vanlangensis* AR-R3 จากการนำแบคทีเรียบริสุทธิ์มาเลี้ยงลงในอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว Glucose-Yeast Extract-Peptone: GYP (2% Glucose, 0.5% Yeast Extract และ 1% Peptone) โดยนำส่วนของอาหารเลี้ยงเชื้อ (Culture Supernatant) มาทำให้เข้มข้นด้วยเครื่อง Rotary Evaporator และตกตะกอนเอ็กโซพอลิ-แซ็กคาไรด์ด้วยเอทานอลไร้น้ำ (Absolute Ethanol) จากนั้นทำการแยกบริสุทธิ์พอลิแซ็กคาไรด์โดยผ่าน DEAE-Sephacel Column Chromatography และ Sephacryl™ S-400 Column Chromatography ตามลำดับ จากการทดลองพบว่า เอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ที่ *N. vanlangensis* AR-R3 ผลิตได้มีทั้งหมด 4 ขนาด คือ มีน้ำหนักโมเลกุล (Mw) เฉลี่ยเท่ากับ 2.180×10^8, 5.638×10^6, 5.523×10^5 และ 1.990×10^5 ดาลตัน การวิเคราะห์องค์ประกอบน้ำตาลของเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ทั้ง 4 ชนิด พบว่าประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว (Monosaccharide) 2 ชนิดเหมือนกัน ได้แก่ น้ำตาลกลูโคส และ แมนโนส เอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์บริสุทธิ์ของ *N. vanlangensis* AR-R3 มีน้ำหนักโมเลกุลและองค์ประกอบน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวแตกต่างไปจากรายงานของแบคทีเรียอะซิติกชนิดอื่น ดังนั้นเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ที่แยกบริสุทธิ์จากงานวิจัยนี้จึงเป็นเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ชนิดใหม่

คำสำคัญ: แบคทีเรียอะซิติก เอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ คอลัมน์-โครมาโตกราฟี *Nguyenibacter vanlangensis* AR-R3

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

บทนำ

แบคทีเรียอะซิติกจัดเป็นสกุลแบคทีเรียในวงศ์ Acetobacteraceae ชั้น Alphaproteobacteria มีลักษณะรูปร่างเป็นท่อน หรือกลมรี (Ellipsoidal or Rod Shape) ติดสีแกรมลบ (Gram-negative) เป็นแอโรบิกแบคทีเรีย (Aerobic Bacteria) เนื่องจากต้องใช้ออกซิเจนสำหรับการเจริญเติบโต [1] มีแฟลกเจลล่าเป็นแบบ Peritrichous หรือ Polar ขึ้นอยู่กับสกุลของแบคทีเรียอะซิติก สามารถพบแบคทีเรียอะซิติกในพืช โดยเฉพาะในดอกไม้ ผลไม้ รวมถึงรากพืช ในอดีตวงศ์ Acetobacteraceae ประกอบด้วย 2 สกุล คือ *Acetobacter* และ *Gluconobacter* ต่อมามีการรายงานค้นพบเพิ่มเติมรวมทั้งหมด 14 สกุล ได้แก่ *Acetobacter, Ameyamaea, Asaia, Gluconobacter, Gluconacetobacter, Acidomonas, Kozakia, Komagataeibacter, Swaminathania, Saccharibacter, Neoasaia, Granulibacter, Nguyenibacter* และ *Tanticharoenia* [2] โดยสกุลที่มีความสามารถในการตรึงไนโตรเจน ได้แก่ *Acetobacter*, *Gluconacetobacter*, *Swaminathania* [3] *Komagataeibacter*, *Asaia* และ *Nguyenibacter* [4] แบคทีเรียที่มีคุณสมบัติตรึงไนโตรเจนส่วนใหญ่มีความสามารถสังเคราะห์เอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ซึ่งเป็นส่วนสำคัญสำหรับสร้างเป็นฟิล์ม (Biofilm) ห่อหุ้มเซลล์และยังเป็นตัวช่วยให้แบคทีเรียสามารถเข้าสู่ในพืชได้ [5] การสร้างสารเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ของแบคทีเรียอะซิติกมักพบได้ทั้ง Homopolysaccharides หรือ Heteropolysaccharides ซึ่งในแบคทีเรียอะซิติกบางสกุลสร้างพอลิแซ็กคาไรด์บริเวณผิวเซลล์ (Cell Surface) เรียกว่า Capsular Polysaccharides (CPS) โดยจัดเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่ยึดติดกับเซลล์ (Cell-Attached Polysaccharides) และแบคทีเรียอะซิติกบางสกุลพบการสร้างพอลิแซ็กคาไรด์ปลดปล่อยออกสู่ภายนอกเซลล์ และสะสมอยู่ในอาหารเลี้ยงเชื้อซึ่งจัดเป็นเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ (Exopolysaccharides, EPS) จากการศึกษาการผลิตพอลิแซ็กคาไรด์ของแบคทีเรียอะซิติกทนร้อนสกุล *Acetobacter tropicalis* SKU 1100 พบว่าสามารถผลิตพอลิแซ็กคาไรด์ชนิด Cell-Attached Polysaccharides แบบ Heteropolysaccharides ประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว 3 ชนิด ได้แก่ กลูโคส กาแลคโตส และแรมโนส [6] แบคทีเรียอะซิติกสกุล *Asaia* สามารถผลิตพอลิแซ็กคาไรด์ได้ ได้แก่ *A. bogorensis* และมีคุณสมบัติในการตรึงไนโตรเจนด้วย [7] โดย *A. bogorensis* NRIC 0311^{T} สามารถผลิตพอลิแซ็กคาไรด์ในอาหารเลี้ยงเชื้อ Potato-Glycerol-Calcium Carbonate ที่ใช้กลีเซอรอลเป็นแหล่งคาร์บอน พบว่าสามารถผลิตพอลิแซ็กคาไรด์ ประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว 3 ชนิด คือ กลูโคส แมนโนส และแรมโนส [8] และเมื่อทำการเปลี่ยนแหล่งคาร์บอนเป็นน้ำตาลซูโครส พบว่าพอลิแซ็กคาไรด์ที่ผลิตได้มีองค์ประกอบเปลี่ยนไปจากเดิม โดยสามารถผลิตฟรุกแทน (Fructan) ประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเพียง 1 ชนิดคือน้ำตาลฟรุกโตส [9] นอกจากนี้ยังพบการรายงานว่าแบคทีเรียอะซิติก *A. siamensis* MTCC 4042^{T} สามารถตรึงไนโตรเจนได้เช่นกัน [7] พอลิแซ็กคาไรด์ของแบคทีเรียอะซิติกตรึงไนโตรเจนที่ผลิตขึ้นมานอกเซลล์ใช้สำหรับช่วยให้แบคทีเรียตรึงไนโตรเจนได้ดี โดยมีหน้าที่ป้องกันการแพร่ของออกซิเจนเข้าสู่ภายในเซลล์ไม่ให้กระทบต่อกิจกรรมของเอนไซม์ไนโตรจีเนสที่มีความว่องไวต่อออกซิเจน [10]

แบคทีเรียสกุล *Nguyenibacter* จัดเป็นแบคทีเรียอะซิติกที่มีความสามารถในการตรึงไนโตรเจนได้ ถูกค้นพบครั้งแรกที่ประเทศเวียดนามโดยทำการคัดแยกเชื้อมาจากดินบริเวณรอบรากข้าว (Rhizosphere) ในอาหารเลี้ยงเชื้อ Nitrogen-Free LGI medium ซึ่งไม่มีแหล่งไนโตรเจน สามาถผลิตพอลิแซ็กคาไรด์ลีแวน (Levan) ได้ในอาหารเลี้ยงเชื้อ Nitrogen-Free LGI medium ที่มีซูโครสเป็นแหล่งคาร์บอน [11] นอกจากนี้ยังจัดเป็นแบคทีเรียที่มีความสามารถในการกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืช (Plant Growth Promoting Bacteria) [12] นอกจากนี้พอลิแซ็กคาไรด์ของแบคทีเรียอะซิติกตรึงไนโตรเจน สามารถช่วยให้แบคทีเรียเข้าสู่รากพืชได้ โดย

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

มีรายงานพบว่า *Gluconacetobacter diazotrophicus* Pal5 ผลิตเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ออกมาสะสมในอาหารเลี้ยงเชื้อ ประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว 3 ชนิด คือ กลูโคส กาแลคโตส และแมนโนส และมีคุณสมบัติต้านสารอนุมูลอิสระได้ด้วย นอกจากนี้เอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ที่ผลิตได้นั้นยังช่วยปกป้องเซลล์แบคทีเรียจากปฏิกิริยาออกซิเดชันในหลอดทดลอง และในระหว่างการเข้าสู่รากของต้นข้าวของแบคทีเรีย *G. diazotrophicus* Pal5 ข้าวจะสร้างสารอนุมูลอิสระ (Free Radical) ออกมาซึ่งเป็นอันตรายต่อเซลล์แบคทีเรียอะซิติก [13] แต่เอ็กโซ-พอลิแซ็กคาไรด์ที่ผลิตได้นั้นมีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ จึงสามารถทำลายอนุมูลอิสระที่พืชสร้างได้ จากรายงานการผลิตพอลิแซ็กคาไรด์ในแบคทีเรียอะซิติก *A. xylinum* สามารถผลิตพอลิแซ็กคาไรด์ชนิดเซลลูโลสเมื่อใช้กลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอน [14] เซลลูโลสที่ผลิตจากแบคทีเรียอะซิติกมีความบริสุทธิ์สูง ทนต่อแรงดึงสูง รูปร่างมีความคงตัว ความหนาแน่นของผลึกสูง และมีปริมาณน้ำสูง ทำให้มีศักยภาพนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น ใช้เป็นสารเพิ่มความหนืดและใช้เป็นสารให้ความคงตัวในอาหาร [15] และใช้เป็นวัสดุในการตกแต่งแผล [16]

อย่างไรก็ตามยังไม่พบการศึกษาพอลิแซ็กคาไรด์ของ *N. vanlangensis* เมื่อใช้น้ำตาลกลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอนมาก่อน ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อแยกบริสุทธิ์ และศึกษาคุณลักษณะเบื้องต้นของเอ็กโซ-พอลิแซ็กคาไรด์จากแบคทีเรียอะซิติกตรึงไนโตรเจน *N. vanlangensis* AR-R3 ทั้งนี้พอลิแซ็กคาไรด์บริสุทธิ์สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในอุตสาหกรรมอาหาร ยาการแพทย์ หรือการเกษตรต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

1. เชื้อแบคทีเรีย

แบคทีเรียอะซิติก *N. vanlangensis* AR-R3 เป็นแบคทีเรียที่ได้มาจากการแยกเชื้อจากรากของต้นข้าว มีความสามารถในการตรึงไนโตรเจน และมีประสิทธิภาพในการละลายธาตุฟอสฟอรัสและสังกะสี [17] และผลการระบุสายพันธุ์ด้วยวิธีการวิเคราะห์ลำดับนิวคลิโอไทด์ของยีน 16S rRNA พบว่าเป็นแบคทีเรีย *N. vanlangensis*

2. กล้าเชื้อ และอาหารเลี้ยงเชื้อ

แบคทีเรียอะซิติก *N. vanlangensis* AR-R3 ที่เก็บรักษาอยู่ในตู้แช่เยือกแข็ง (Deep Freezer) อุณหภูมิ -80 องศาเซลเซียส ในสารละลายกลีเซอรอลความเข้มข้น 50% ปริมาตร 100 ไมโครลิตร นำมาปลูกเชื้อลงในหลอดอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว Glucose-Yeast Extract-Peptone (GYP) (2% Glucose, 1% Peptone, 0.5% Yest Extract) ปริมาตร 1 มิลลิลิตร นำไปเลี้ยงบนเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นใช้ลูปขีด (Cross Streak) เชื้อลงบนจานเพาะเชื้อที่มีอาหารแข็ง GYP บ่มจานเพาะเลี้ยงเชื้อที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตรวจสอบความบริสุทธิ์ของเชื้อจากโคโลนีเดี่ยว และใช้เชื้อบริสุทธิ์เป็นกล้าเชื้อสำหรับการทดลองในขั้นตอนต่อไป

3. การผลิตเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์

เชื้อบริสุทธิ์จากการทดลองในข้อ 2. จำนวน 1 ลูป นำมาปลูกเชื้อลงในอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว GYP ปริมาตร 5 มิลลิลิตร นำไปบ่มแบบให้อากาศเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นปรับความขุ่นของเชื้อด้วยเครื่อง McFarland ให้มีความขุ่นของเชื้อ 1 McFarland Standard ซึ่งจะมีปริมาณแบคทีเรีย 3×10^8 CFUต่อมิลลิลิตร แล้วนำเชื้อที่ได้ปริมาตร 1 มิลลิลิตร มาเพาะเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว GYP ปริมาตร 5 มิลลิลิตร นำไปเลี้ยงเชื้อบนเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นถ่ายเชื้อลงในอาหารเหลว GYP ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ที่บรรจุในขวดรูปชมพู่ขนาด 500 มิลลิลิตร เลี้ยงเชื้อต่อไปเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นปลูกถ่ายเชื้ออีกครั้งลงในอาหารเหลว GYP ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ในขวดรูปชมพู่ขนาด 5,000 มิลลิลิตร โดยในทุก

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

ขั้นตอนของการเลี้ยงเชื้อทำการเลี้ยงเชื้อแบบเขย่าบนเครื่องเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดเวลาทำการเก็บเกี่ยวส่วนใสของอาหารเลี้ยงเชื้อ (Culture Supernatant) โดยใช้เครื่องปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 9,000 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที ทำการตรวจวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน [18] และคาร์โบไฮเดรตโดยรวม [19] ของตัวอย่างส่วนใสของอาหารเลี้ยงเชื้อ และเก็บตัวอย่างไว้ใช้ในการทดลองขั้นตอนต่อไป

4. การทำบริสุทธิ์เอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์

การทำบริสุทธิ์เอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์จาก *N. vanlangensis* AR-R3 โดยดัดแปลงวิธีการของ Moonmangmee และคณะ [8] ตามลำดับขั้นตอนดังต่อไปนี้

4.1 การทำให้เอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์เข้มข้น

การทำให้เอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์เข้มข้นขึ้น โดยนำส่วนใสของอาหารเลี้ยงเชื้อ จากการทดลองข้อ 3. มาทำให้เข้มข้นโดยใช้เครื่อง Rotary Evaporation ภายใต้สภาวะความดันต่ำ 46 มิลลิบาร์ ความเร็ว 50 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส จนกระทั่งปริมาตรของตัวอย่างลดลง 10 เท่า (เข้มข้น 10x)

4.2 การตกตะกอนเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ด้วยเอทานอล

ตัวอย่างส่วนใสของอาหารเลี้ยงเชื้อเข้มข้นจากการทดลองข้อที่ 4.1 นำมาตกตะกอนเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ด้วยสารละลายเอทานอลไร้น้ำ (Absolute Ethanol) ในอัตราของอาหารเลี้ยงเชื้อ 1 ส่วน ต่อ สารละลายเอทานอลไร้น้ำ 3 ส่วน (โดยปริมาตร) ผสมให้เข้ากัน นำส่วนผสมตัวอย่างไปเก็บไว้ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นทำการเก็บเกี่ยวตะกอนของเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 10,000 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที เทสารละลายส่วนใสทิ้ง แล้วตากตะกอนให้แห้ง ทำการเก็บรวบรวมตะกอนเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์เข้าด้วยกัน โดยการละลายตะกอนด้วยน้ำกลั่นในปริมาณน้อย ๆ และตรวจวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน [18] และคาร์โบไฮเดรตโดยรวม [19] ของตัวอย่างสารละลายเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์เข้มข้น (Crude EPS)

4.3 การแยกเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ด้วยคอลัมน์โครมาโตกราฟี (Column Chromatography)

4.3.1 Ion-Exchange Chromatography

การแยกเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ด้วยโครมาโตกราฟีแบบแลกเปลี่ยนประจุชนิด DEAE-Sephacel โดยนำเจล DEAE-Sephacel ที่เก็บรักษาสภาพเจลไว้ในสารละลายโซเดียม ไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล เทสารละลายส่วนใสทิ้ง จากนั้นล้างเจลด้วยการเติมน้ำกลั่นลงไปในปริมาณมาก ๆ คนให้ เจลกระจายตัวแล้วปล่อยทิ้งไว้ให้เจลตกตะกอน เทสารละลายส่วนใสทิ้ง ทำการล้างเจลซ้ำตามวิธีการข้างต้นจนเจลมีสภาพเป็นกลาง (pH 7) จากนั้นปรับสภาพเจลด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล โดยตั้งทิ้งไว้ 30 นาที ล้างเจลด้วยน้ำกลั่นปริมาณมาก ๆ เช่นเดียวกับการล้างด่างข้างต้นจนเจลมีสภาพเป็นกลาง (pH 7) จากนั้นทำการบรรจุเจลลงในคอลัมน์แก้ว (ø1.6x20 cm) ปริมาตร 30 มิลลิลิตร โดยใช้อัตราการไหล (Flow Rate) 1 มิลลิลิตรต่อนาที จากนั้นทำการปรับสภาพ (Equilibrate) เจลในคอลัมน์ด้วยสารละลาย Tris-HCl (pH 8.5) ความเข้มข้น 25 มิลลิโมลาร์ จนกระทั่งเจลมีค่า pH เท่ากับ 8.5 จากนั้นนำตัวอย่างสารละลายเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์เข้มข้น (Crude EPS) จากการทดลองข้อที่ 4.2 มาโหลดผ่านคอลัมน์นี้ด้วยอัตราการไหลดังกล่าวข้างต้น ทำการเก็บตัวอย่างจากคอลัมน์ หลอดละ 5 มิลลิลิตร เมื่อสิ้นสุดการโหลดตัวอย่าง จากนั้นทำการล้างคอลัมน์ด้วยบัฟเฟอร์เดิมในปริมาตร 2 เท่าของปริมาตรคอลัมน์ แล้วจึงทำการชะล้างตัวอย่างออกจากคอลัมน์ด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ในปริมาตร 3 เท่าของปริมาตรคอลัมน์ จากนั้นนำตัวอย่างในแต่ละหลอดมาตรวจวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่น

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

240, 260 และ 280 นาโนเมตร และตรวจวิเคราะห์ปริมาณคาร์โบไฮเดรตโดยรวมด้วยวิธี Phenol Sulfuric Acid [19] แล้วตรวจวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่น 490 นาโนเมตร ตามลำดับ ทำการรวบรวมหลอดตัวอย่างที่มีเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์เข้าด้วยกันของแต่ละพีค จากนั้นทำการตกตะกอนเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ของแต่ละพีค ตามวิธีการในข้อ 4.1 เพื่อทำการแยกบริสุทธิ์ในขั้นตอนต่อไป

4.3.2 Sephacryl™ Column Chromatography เจลชนิด Sephacryl™ S-400 Resolution (Amersham Biosciences) ที่เก็บรักษาสภาพเจลไว้ในสารละลายเอทานอลความเข้มข้น 20% นำมาเทสารละลายส่วนใสทิ้ง จากนั้นล้างเจลด้วยน้ำกลั่น คนให้เจลกระจายตัวแล้วปล่อยทิ้งไว้ให้เจลตกตะกอน เทสารละลายส่วนใสทิ้ง ทำการล้าง เจลตามวิธีการข้างต้น 2-3 ครั้ง จากนั้นทำการบรรจุเจลลงคอลัมน์ XK (i.d. 16 mm: XK 16/100) โดยปฏิบัติตามคำแนะนำของ Sephacryl™ GE Healthcare Bio-Sciences AB และทำการปรับสภาพเจลในคอลัมน์ทั้ง 2 ชนิดด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล โดยใช้อัตราการไหล 22 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

4.3.3 การโหลดตัวอย่างเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์เข้มข้นลงในคอลัมน์

สารละลายเข้มข้นของ EPS PI ของพีค (Peak) ที่ 1 จากการทดลองข้อที่ 4.3.1 ปริมาตร 1 มิลลิลิตร นำมาโหลดผ่านคอลัมน์ Sephacryl™ S-400 Column Chromatography (4.3.2) ด้วยอัตราการไหล 22 มิลลิลิตรต่อชั่วโมง จากนั้นทำการชะด้วยสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 0.1 นอร์มัล โดยเก็บตัวอย่างหลอดละ 2.2 มิลลิลิตร ติดตามโพรไฟล์ของคอลัมน์ด้วยการวัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่น 240, 260 และ 280 นาโนเมตร และตรวจวิเคราะห์ปริมาณคาร์โบไฮเดรตโดยรวมในทุกหลอดด้วยวิธี Phenol Sulfuric Acid [19] แล้ววัดค่าการดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่น 490 นาโนเมตร หลังจากนั้นทำการเก็บรวบรวมหลอดตัวอย่างที่มีเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์เข้าด้วยกัน และตกตะกอนด้วยสารละลายเอทานอลไร้น้ำ ตามวิธีการข้อ 4.2 และละลายตะกอนเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์กลับด้วยน้ำกลั่นในปริมาตรน้อย ๆ ทำการตรวจวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน [18] และคาร์โบไฮเดรตโดยรวม [19] ของเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์บริสุทธิ์ และเก็บตัวอย่างไว้ใช้ในการทดลองขั้นตอนต่อไป

5. การตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวด้วยวิธี Thin-Layer Chromatography (TLC)

การตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวด้วยวิธี TLC ทำโดยนำสารละลายตัวอย่างเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์บริสุทธิ์ที่ได้จากการทดลองข้อที่ 4.3.3 มาทำการไฮโดรไลซ์ในสภาวะที่เหมาะสมด้วยสารละลายกรดไตรฟลูออโรอะซิติก (TFA) ความเข้มข้นสุดท้ายเท่ากับ 2 นอร์มัล (โดยปริมาตร) ในหลอดแก้วฝาเกลียว นำไปบ่มในเครื่องให้ความร้อน (Heat Block) ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นระเหยกรด (Co-Evaporator) ออก 3-4 ครั้งด้วยเครื่องระเหยสุญญากาศ (Speed Vacuum Concentrator) จนเป็นกลางแล้วตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวด้วยวิธี TLC (Silica Gel 60, Merck Co., Germany) ใช้สารละลายอิ่มตัวของ n-propanol: น้ำ (85:15 โดยปริมาตร) เป็นเฟสเคลื่อนที่ ทำการตรวจวิเคราะห์ด้วยการสเปรย์สารละลายกรดซัลฟูริกเข้มข้น 5% ในเอทานอล นำแผ่น TLC ไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที

6. การตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวด้วยวิธี High Performance Liquid Chromatography (HPLC)

การยืนยันผลการตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวของตัวอย่าง EPS บริสุทธิ์ทำโดยวิธี HPLC ด้วยเครื่อง Water Alliance e2695 Separations Module (Water Corporation 2013, USA) โดยใช้น้ำกลั่นเป็นตัวชะ (Mobile Phase) อัตราการไหล 0.6 มิลลิลิตร

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

ต่อนาที และตรวจจับสัญญาณด้วย Refractive Index Detector (RI) โดยเปรียบเทียบกับน้ำตาลกลูโคส และแมนโนสมาตรฐาน โดยใช้สภาวะของเครื่องในการตรวจวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สภาวะในการตรวจวิเคราะห์น้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวโดยวิธี HPLC

Parameter	Optimized condition
Chromatograph:	HPLC Waters e2695
Column:	Shodex SUGAR SP0810, Column Size (mm): I.D. x Length, 8.0 x 300
Eluent:	H_2O
Flow rate:	0.6 mL/min
Detector:	Refractive Index (RI)
Detector temp.:	40°C
Column temp.:	80°C
Injection volume:	10 μl

7. การตรวจวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุล

การวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลของเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ที่แยกบริสุทธิ์จากการทดลองข้อที่ 4.3.3 นำสารละลายมากรองด้วยกระดาษกรองขนาด 0.22 ไมครอน วิเคราะห์หาน้ำหนักโมเลกุลโดยวิธี Gel Permeation Chromatography ด้วยเครื่อง Water Alliance e2695 Separations Module (Water Corporation 2013, USA) โดยใช้น้ำกลั่นเป็นตัวชะ (Mobile Phase) อัตราการไหล 0.6 มิลลิลิตรต่อนาที และตรวจจับสัญญาณด้วย Refractive Index Detector (RI) โดยเปรียบเทียบน้ำหนักโมเลกุลกับ Shodex® STANDARD (Pullulan) Type P-82 น้ำหนักโมเลกุล (Mw) ดังนี้ 7.360 x 10^5 (P-800), 3.480 x 10^5 (P-400), 2.000 x 10^4 (P-200), 10.7x10^4 (P-100), 4.71x10^4 (P-50), 2.11x10^4, (P-20), 0.96x10^4 (P-10) และ 0.61x10^4 (P-5) ดาลตัน (Da) (Showa Denko K.K., Japan) โดยใช้สภาวะของเครื่องในการตรวจวิเคราะห์ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 สภาวะในการตรวจวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลโดยวิธี HPLC

Parameter	Optimized condition
Chromatograph:	HPLC Waters e2695
Column:	Ultrahydrogel™ 2000, Column Size (mm): I.D. x Length, 7.8 x 300
Eluent:	H_2O
Flow rate:	0.6 mL/min
Detector:	Refractive Index (RI)
Detector temp.:	40°C
Column temp.:	80°C
Injection volume:	10 μl

8. การตรวจวิเคราะห์ปริมาณโปรตีน

การตรวจวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนทั้งหมดโดยวิธี Lowry's method [18] ใช้ Bovine serum albumin (BSA) เป็นโปรตีนมาตรฐาน

9. การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาล

การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดโดยวิธี Phenol Sulfuric Acid [19] ใช้กลูโคสเป็นน้ำตาลมาตรฐาน

10. การหาค่าจำเพาะของเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ (Specific value)

การหาค่าจำเพาะของเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์เป็นค่าที่บ่งบอกความบริสุทธิ์ของพอลิแซ็กคาไรด์ หาค่าได้โดยการนำค่าปริมาณน้ำตาลทั้งหมดหารด้วยปริมาณโปรตีนทั้งหมด ดังสมการ

$$\text{Specific value } (\mu\text{mol/mg}) = \frac{\text{Total Sugar } (\mu\text{mol})}{\text{Total Protein (mg)}} \quad (1)$$

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

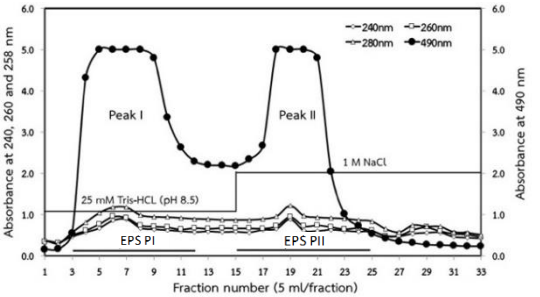
ผลการศึกษาและอภิปรายผล

1. ผลการผลิตเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์

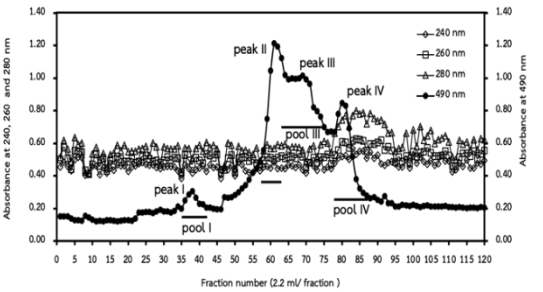
แบคทีเรียอะซิติกตรึงไนโตรเจน *N. vanlangensis* AR-R3 นำมาทดสอบคัดเลือกอาหารที่เหมาะสมสำหรับใช้ผลิตเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ด้วยอาหาร 3 ชนิด คือ Nitrogen Free Medium ที่มีน้ำตาลซูโครสเป็นแหล่งคาร์บอน, Glucose-Yeast Extract- Peptone, Glycerol-Yeast Extract-Peptone หลังจากการตกตะกอนเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ด้วยเอทานอลไร้น้ำ พบตะกอนของเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์เมื่อเลี้ยงในอาหาร Glucose-Yeast Extract-Peptone มากที่สุด ดังนั้นจึงคัดเลือกอาหาร Glucose-Yeast Extract-Peptone (GYP) สำหรับเลี้ยงเชื้อเพื่อการผลิตพอลิแซ็กคาไรด์ต่อไป และจากการทดลองเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียอะซิติก *N. vanlangensis* AR-R3 ในอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว GYP ปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร ในสภาวะของการเลี้ยงเชื้อแบบเขย่าที่ความเร็ว 200 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิเพาะเลี้ยงเชื้อที่ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 วัน ได้ผลผลิตเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์โดยรวมเท่ากับ 8.769 ไมโครโมลต่อมิลลิลิตร ซึ่งสอดคล้องกับการรายงานในแบคทีเรียตรึงไนโตรเจน *A. siamensis* MTCC 4042^{T} ที่สามารถผลิตเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ในอาหารเลี้ยงเชื้อเช่นเดียวกัน [10]

2. ผลการแยกบริสุทธิ์เอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ด้วยวิธี Ion-Exchange Chromatography

จากการนำเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์เข้มข้น (Crude EPS) มาทำให้บริสุทธิ์ด้วยคอลัมน์โครมาโตกราฟีชนิด DEAE-Sephacel จากการทดลองพบพีคของพอลิแซ็กคาไรด์จำนวน 2 พีค คือ EPS PI (Peak I) ซึ่งเป็นพีคหลัก พบอยู่ในช่วงหลอดที่ 3 ถึง 12 ซึ่งเป็นพีคของพอลิแซ็กคาไรด์ที่ไม่ยึดเกาะกับเจล และ EPS PII (Peak II) เป็นพีครองโดยจะพบพีคที่ 2 อยู่ในช่วงหลอด ที่ 15 ถึง 25 (รูปที่ 1) ซึ่งเป็นตัวอย่างหลังการชะล้างด้วยสารละลายบัฟเฟอร์โซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 1 โมลาร์ แสดงว่าเป็นพีคของพอลิแซ็กคาไรด์ที่ยึดเกาะกับเจล จากนั้นทำการเก็บรวมหลอดตัวอย่างของพีค EPS PI และพีค EPS PII ได้ปริมาณผลผลิตโดยรวมของเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์เท่ากับ 3,415 และ 510 ไมโครโมล คิดเป็นการได้กลับคืน (Recovery) 71.1% และ 10.6% ตามลำดับ (ตารางที่ 1)



รูปที่ 1 โพรไฟล์การแยกบริสุทธิ์ Crude EPS ด้วย DEAE-Sephacel Column Chromatography



รูปที่ 2 โพรไฟล์การแยกบริสุทธิ์ EPS PI ด้วย Sephacryl^{TM} S-400 Column Chromatography

3. ผลการทำบริสุทธิ์เอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์โดยวิธี Gel Filtration Chromatography

จากการนำตัวอย่าง EPS PI ซึ่งเป็นผลผลิตหลังจากการทำให้บริสุทธิ์ด้วยคอลัมน์ชนิด DEAE-Sephacel มาทำการแยกบริสุทธิ์อีกครั้งด้วยการผ่านคอลัมน์ชนิด Sephacryl^{TM} S-400 ผลการทดลองพบโพรไฟล์ของพอลิแซ็กคาไรด์จำนวน 4 พีค ด้วยกันคือ Peak I รวบรวมจากหลอดตัวอย่างที่ 35 ถึง 40 (Pool I), Peak II รวบรวมจากหลอดตัวอย่างที่ 55 ถึง 64 (Pool II), Peak III รวบรวมจากหลอดตัวอย่างที่ 64 ถึง 75 (Pool III) และ Peak IV รวบรวมจากหลอดตัวอย่างที่ 77 ถึง 86 (Pool IV) ตามลำดับ (รูปที่ 2) ทำการรวมหลอดตัวอย่างในแต่ละพีคได้ปริมาณผลผลิตของพอลิแซ็กคาไรด์ที่บริสุทธิ์

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

กลับมาโดยรวมเท่ากับ 80 (1.67% Recovery), 1,128 (25.6% Recovery), 1,587 (33.0% Recovery), และ 28.6 (0.59% Recovery) ไมโครโมล ตามลำดับ (ตารางที่ 3) จะเห็นได้ว่าเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ที่ผ่านคอลัมน์ชนิด Sephacryl™ S-400 ใน Pool I, Pool II และ Pool III มีค่าจำเพาะที่มากกว่า Crude EPS ที่ยังไม่ได้ผ่านคอลัมน์ถึง 30 เท่า แสดงว่าเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ที่ผ่านทั้งสองคอลัมน์แล้วมีความบริสุทธิ์มากขึ้น เนื่องจากขั้นตอนการผ่านในแต่ละคอลัมน์สามารถกำจัดโปรตีนที่ปนเปื้อนออกจากตัวอย่างทำให้เอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ที่ได้มีความบริสุทธิ์มากขึ้น

ตารางที่ 3 การแยกบริสุทธิ์เอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์จากแบคทีเรียอะซิติก *Nguyenibacter vanlangensis* AR-R3

Step of purification	Total Protein (mg)	Total Sugar (μmol)	Specific value (μmol/mg)	Recovery (%)
Crude EPS	1,237	4,801	3.880	100
DEAE-Sephacel				
EPS PI (Peak I)	832	3,415	4.105	71.1*
EPS PII (Peak II)	373	510	1.37	10.6
Sephacryl™ S-400				
Pool I (peak I)	ND**	80.0	∞	1.67
Pool II (peak II)	9.62	1,228	128	25.6
Pool III (peak III)	10.8	1,587	146	33.0
Pool IV (peak IV)	2.98	28.6	1.73	0.59

*EPS PI ที่ผ่าน DEAE-Sephacel แล้วทำให้บริสุทธิ์ต่อด้วยคอลัมน์ Sephacryl™ S-400

**ND: Not detected

ตารางที่ 4 น้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ยของเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ด้วยวิธี Gel Permeation Chromatography (GPC)

ลำดับที่	Sample name	Retention time (min)	Mw (เฉลี่ย) (Da)
1	EPS Pool I (Peak I)	6.367	2.180×10^8
2	EPS Pool II (Peak II)	11.607	5.638×10^6
3	Std. P-800	14.544	7.360×10^5
4	EPS Pool III (Peak III)	14.938	5.523×10^5
5	Std. P-400	15.563	3.480×10^5
6	EPS Pool IV (Peak IV)	16.402	1.990×10^5
7	Std. P-200	16.415	2.000×10^4

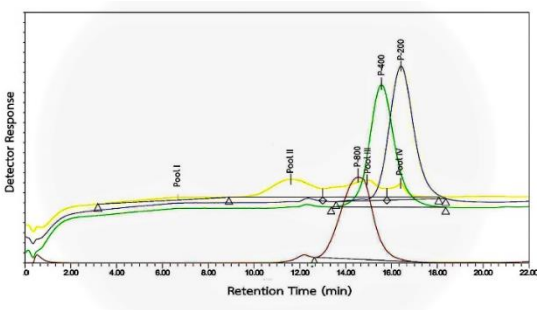
4. ผลการตรวจวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุล

เมื่อนำเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์บริสุทธิ์จากคอลัมน์ชนิด Sephacryl™ S-400 ทั้ง 4 พีค คือ Pool I, Pool II, Pool III และ Pool IV มาตรวจวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลด้วยวิธี Gel Permeation Chromatography โดยใช้ Shodex® STANDARD (Pullulan) Type P-82 จำนวน 3 ขนาด ได้แก่ P-800, P-400 และ P-200 เป็นน้ำหนักโมเลกุลมาตรฐาน พบว่าแต่ละพีคมีน้ำหนักโมเลกุลเฉลี่ย 2.180×10^8, 5.638×10^6, 5.523×10^5 และ 1.990×10^5 ดาลตัน ตามลำดับ (รูปที่ 3, ตารางที่ 4) จากผลการทดลอง Pool I และ Pool II มีค่า Retention time เท่ากับ 6.367 และ 11.607 นาที เมื่อนำมาวิเคราะห์

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

น้ำหนักโมเลกุลเทียบกับสารมาตรฐาน Pullulan พบว่าใน Pool I และ Pool II มีค่า Retention time น้อยกว่า P-800 แสดงว่าเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ใน Pool I และ Pool II มีขนาดใหญ่กว่า P-800 ทำให้ค่าที่วิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลได้นั้นเป็นค่าที่ประมาณ ดังนั้นจึงต้องมีการเลือกใช้สารมาตรฐานที่มีน้ำหนักโมเลกุลที่มากกว่า P-800 นำมาวิเคราะห์จึงจะได้ค่าที่แม่นยำมากขึ้น

5. ผลการตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวด้วยวิธี TLC



รูปที่ 3 โครมาโทแกรมของการวิเคราะห์น้ำหนักโมเลกุลของเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์บริสุทธิ์จาก *Nguyenibacter vanlangensis* AR-R3 ด้วยวิธี Gel Permeation Chromatography

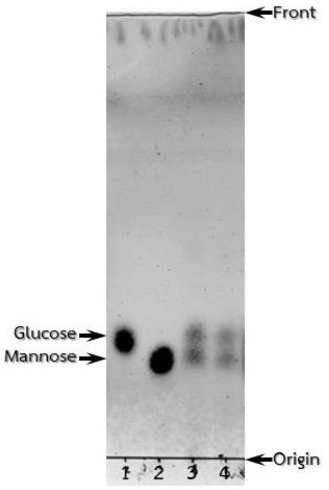
5. ผลการตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวด้วยวิธี TLC

จากการตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวของเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์บริสุทธิ์ของแบคทีเรียอะซิติก *N. vanlangensis* AR-R3 ที่ผ่านคอลัมน์ชนิด Sephacryl™ S-400 จำนวน 4 พีค คือ Pool I, Pool II, Pool III และ Pool IV โดยวิธี TLC พบว่าเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ทั้ง 4 พีค เป็นเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ชนิดเฮเทอโรพอลิแซ็กคาไรด์ (Heteropolysaccharide) ประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเหมือนกันจำนวน 2 ชนิด คือ กลูโคส และแมนโนส (รูปที่ 4) และทำการยืนยันผลการทดลองข้างต้นด้วยวิธี High-performance anion-exchange chromatography (HPLC) พบว่าองค์ประกอบน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวของเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์บริสุทธิ์ของทั้ง 4 พีค ให้ผลการทดลองสอดคล้องกับผลการตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวด้วยวิธี TLC ซึ่งผลการศึกษาวิจัยนี้มีผลการทดลองแตกต่างไปจากการรายงานองค์ประกอบของฮอโมพอลิแซ็กคาไรด์ชนิดลีแวนของ *N. vanlangensis* TN01LGI^{T} และ VTH-AC01 ที่ใช้น้ำตาลซูโครสเป็นแหล่งคาร์บอน โดยประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเพียงชนิดเดี่ยว คือ ซูโครส [11] สำหรับแบคทีเรีย *A. bogorensis* NRIC 0311^{T} ที่ใช้กลีเซอรอลเป็นแหล่งคาร์บอนซึ่งประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว 3 ชนิด คือ กลูโคส แมนโนส และแรมโนส และมีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 100 กิโลดาลตัน [8] เมื่อเลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย *A. bogorensis* ด้วยน้ำตาลซูโครสเป็นแหล่งคาร์บอนพบว่าสามารถผลิตฮอโมพอลิแซ็กคไรด์ (Homopolysaccharide) ชนิดฟรุกแทน (Fructan) ที่มีองค์ประกอบของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเพียงชนิดเดียวคือ ฟรุกโตส [9] *Acetobacter* มีความสามารถในการผลิตพอลิแซ็กคาไรด์ที่ประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว 4 ชนิด กลูโคส กาแลคโตส แมนโนส และกรดกลูโคโรนิก ในอัตราส่วนโมลาร์โดยประมาณ 6:2:1:1 [20] *Acetobacter* sp. SKU 1100 สามารถผลิตพอลิแซ็กคา-ไรด์ประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว 3 ชนิด ได้แก่ กลูโคส กาแลคโตส และแรมโนส และมีน้ำหนักโมเลกุลเท่ากับ 120 กิโลดาลตัน [6] เอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์จาก *Kozakia baliensis* มีองค์ประกอบน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว 2 ชนิด คือ กลูโคส และกาแลคโตส มีน้ำหนักโมเลกุลมากกว่า 700 กิโลดาลตัน [21] ในแบคทีเรียอะซิติกสกุล *Gluconacetobacter xylinus* ATCC 53524 ที่ใช้กลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอนสามารถผลิตพอลิแซ็กคาไรด์ชนิดเซลลูโลส ซึ่งจัดเป็นฮอโมพอลิแซ็กคาไรด์ที่ประกอบด้วยน้ำตาลกลูโคสเพียงน้ำตาชนิดเดียว [22] นอกจากนี้ยังพบการรายงานการใช้เมทานอลเป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับเลี้ยงเชื้อแบคทีเรีย *G. diazotrophicus* Pal5 ซึ่งมีความสามารถในการตรึงไนโตรเจน และอาศัยอยู่ในรากพืช (Endophyte) ผลิตเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ที่มีบทบาทสำคัญในการให้แบคทีเรียนี้เข้าสู่รากพืช [13] โดยเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ดังกล่าวประกอบด้วยน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว 3 ชนิด คือ

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

กลูโคส กาแลคโตส และแมนโนส [23] จากผลการศึกษาวิจัยจะเห็นได้ว่าการเปลี่ยนชนิดของน้ำตาลที่ใช้เป็นแหล่งคาร์บอนในอาหารเลี้ยงเชื้อที่ใช้ผลิตเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์จะมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบของพอลิแซ็กคาไรด์ [8, 9, 11, 23]

ดังนั้นในการศึกษาการผลิตเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ของ *N. vanlangensis* AR-R3 ในงานวิจัยนี้ด้วยอาหารเลี้ยงที่มีแหล่งคาร์บอนเป็นน้ำตาลกลูโคส พบว่าแบคทีเรียผลิตเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ชนิดใหม่ เนื่องจากมีองค์ประกอบของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยว และขนาดของโมเลกุลของเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์แตกต่างจากแบคทีเรียอะซิติกสกุลอื่นดังกล่าวข้างต้นโดยเฉพาะกับ *N. vanlangensis* TN01LGI^{T} และ VTH-AC01 ซึ่งเป็นแบคทีเรียสกุลเดียวกัน [6, 8, 9, 11, 20, 21, 22, 23]



รูปที่ 4 การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวของเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ของแบคทีเรียอะซิติก *Nguyenibacter vanlangensis* AR-R3 ด้วยวิธี TLC เปรียบเทียบกับสารละลายน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวมาตรฐาน
เลนที่ 1: สารละลายน้ำตาลกลูโคสมาตรฐาน
เลนที่ 2: สารละลายน้ำตาลแมนโนสมาตรฐาน
เลนที่ 3: Pool II
เลนที่ 4: Pool III

สรุปผล

แบคทีเรียอะซิติกตรึงไนโตรเจน *N. vanlangensis* AR-R3 ผลิตเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ได้มากที่สุดในอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว GYP ที่มีน้ำตาลกลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอน จากการแยกบริสุทธิ์เอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ด้วยคอลัมน์โครมาโตกราฟี พบเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ 4 ขนาด ที่มีองค์ประกอบน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวเหมือนกันคือกลูโคสและแมนโนส และพบว่าเป็นเอ็กโซพอลิแซ็กคาไรด์ชนิดใหม่แตกต่างจากแบคทีเรียสกุลเดียวกันเมื่อใช้แหล่งคาร์บอนในอาหารเลี้ยงเชื้อต่างกัน พอลิแซ็กคาไรด์บริสุทธิ์จากแบคทีเรียอะซิติกสามารถนำมาศึกษาคุณสมบัติในด้านต่าง ๆ และนำไปประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์อาหาร เครื่องสำอาง หรือวัสดุทางการแพทย์

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณภาควิชาจุลชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี และศูนย์ความหลากหลายทางชีวภาพ สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแหล่งประเทศไทย ที่ให้ความอนุเคราะห์ในการใช้อุปกรณ์การทดลอง และเครื่องมือทางวิทยาศาสตร์ และอำนวยความสะดวกห้องปฏิบัติการวิจัยที่ใช้ในการศึกษาและการทดลองจนทำให้งานวิจัยนี้เสร็จสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

1. Sievers M, Ludwig W, Teuber M. Phylogenetic positioning of *Acetobacter*, *Gluconobacter*, *Rhodopila* and *Acidiphilum* species as a branch of acidophilic bacteria in the **α**- subclass of Proteobacteria based on 16S ribosomal DNA sequences. System Appl Microbiol. 1994;17: 189–96.
2. Trceck J, Barja F. Updates on quick identification of acetic acid bacteria with a focus on the

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

1 6 S–2 3 S rRNA gene internal transcribed spacer and the analysis of cell proteins by MALDI-TOF mass spectrometry. INT J Food Microbiol. 2015;96:137–44.

3. Pedraza RO. Recent advances in nitrogen-fixing acetic acid bacteria. INT J Food Microbiol. 2008;125:25-35.

4. Samaddar N, Paul A, Chakravorty S, Chakraborty W, Mukherjee J, Chowdhuri D, et al. Nitrogen fixation in *Asaia* sp. (family Acetobacteraceae). Curr Microbiol. 2011;63:226–31.

5. Janczarek M, Rachwal K, Ciesla J, Ginalska G, Bieganowski A. Production of exopolysaccharide by *Rhizobium leguminosarum* bv. *trifolii* and its role in bacterial attachment and surface properties. Plant Soil. 2015;388:211–27.

6. Deeraksa A, Moonmangmee S, Toyama H, Yamada M, Adachi O, Matsushita K. Characterization and spontaneous mutation of a novel gene, *pol*E, involved in pellicle formation in *Acetobacter tropicalis* SKU1100. Microbiol. 2005;151:4111–20.

7. Samaddar N, Paul A, Chakravorty S, Chakraborty W, Mukherjee J, Chowdhuri D, et al. Nitrogen fixation in *Asaia* sp. (family Acetobacteraceae). Curr Microbiol. 2011;63: 226-31.

8. Moonmangmee S, Kawabata K, Toyama H, Adachi O, Matsushita K. A novel extracellular polysaccharide from acetic acid bacterium, *Asaia bogorensis* NRIC 0311^{T}. Biosci Bioeng. 2002;93:192-200.

9. Kato N, Mizuno M, Nakai Y, Nozaki K, Suga H, Kanda T, et al. Structure analysis of the water-soluble carbohydrate from *Asaia bogorensis* by NMR spectroscopy. J Appl Glycosci. 2007;54:231-33.

10. Janczarek M, Rachwal K, Ciesla J, Ginalska G, Bieganowski A. Production of exopolysaccharide by *Rhizobium leguminosarum* bv. *trifolii* and Its role in bacterial attachment and surface properties. Plant Soil. 2015;388:211-27.

11. Vu HTL, Yukphan P, Chaipitakchonlatarn W, Malimas T, Muramatsu Y, Bui UTT, et al. *Nguyenibacter vanlangensis* gen. nov., sp. nov., an unusual acetic acid bacterium in the α-Proteobacteria. J Gen Appl Microbiol. 2013;59:153-66.

12. Vu HTL, Bui UTT, Yukphan P, Malimas S, Kieu NP, Muramatsu Y, et al. The traits of the plant growth promoting acetic acid bacterium, *Nguyenibacter vanlangensis.* Vietnam J Sci Technol. 2019;57:439-48.

13. Meneses C, Gonçalves T, Alquéres S, Rouws L, Serrato R, Vidal M, et al. *Gluconacetobacter diazotrophicus* exopolysaccharide protects bacterial cells against oxidative stress in vitro and during rice plant colonization. Plant Soil. 2017;416:133-47.

14. Chawla PR, Bajaj IB, Survase, SA, Singhal RS. Microbial cellulose: fermentative production and applications. Food Technol Biotechnol. 2009;47:107–24.

15. Okiyama A, Motoki M, Yamanaka S. Bacterial cellulose II. Processing of the gelatinous

cellulose for food materials. Food Hydrocolloids. 1992;6:479-87.

16. Czaja W, Krystynowicz A, Bielecki S, Brown RM. Microbial cellulose the natural power to heal wounds. Biomaterials. 2006;27:145-51.

17. Ubonrat J, Moonmangmee S, Khunajakr N, Moonmangmee D. Isolation and screening of plant growth promoting bacteria (PGPB) from rice (*Oryza sativa*) and rhizosphere soil. Sci Tech RMUTT J. 2018;8:190-204.

18. Dully JR, Grieve PA. A simple technique for eliminating interference by detergents in the lowry's method of protein determination. Anal Biochem. 1975;64:136-41.

19. Dubois M, Gilles KA, Hamilton JK, Reber PA, Smith F. Colorimetric method for determination of sugar and related substances. Anal Chem. 1956;28:350-56.

20. Minakami H, Entani E, Tayama K, Fujiyama S, Masai H. Isolation and characterization of a new polysaccharide-producing *Acetobacter* sp. Agric Biol Chem. 1984;48:2405-14.

21. Moonmangmee S, Moonmangmee D, Adachi O, Toyama H. Novel exopolysaccharide from *Kozakia baliensis*. The 2nd International Conference on Acetic Acid Bacteria, November 11-14, Nagoya University, Nagoya, Japan. 2008. p. 100.

22. Mikkelsen D, Flanagan BM, Dykes GA, Gidley MJ. Influence of different carbon sources on bacterial cellulose production by *Gluconacetobacter xylinus* strain ATCC 53524. J Appl Microbiol 2009;107:576–83.

23. Serrato RV, Meneses CHSG, Vidal MS, Santana-Filho AP, Iacomini M, Sassaki GL, et al. Structural studies of an exopolysaccharide produced by *Gluconacetobacter diazotrophicus* Pal5. Carbohydr Polymer. 2013;98:1153–59.

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

JARST Journal of Applied Research on Science and Technology
Rajamangala University of Technology Thanyaburi

ผลของปริมาณน้ำตาลต่อสมบัติทางกายภาพและประสาทสัมผัสการยอมรับของผู้บริโภคของผลิตภัณฑ์ขนมผิง

Effect of Sugar Content on Physical and Sensory Properties of Tapioca-based Cookies

พจนีย์ บุญนา[1] อภิญญา มานะโรจน์[1] วรลักษณ์ ปัญญาธิติพงศ์[2] และ ศุภัคษร มาแสวง[2*]

Pojanee Boonna[1], Apinya Manarote[1], Woraluk Panyathitipong[2] and Supuksorn Masavang[2*]

[1]สาขาวิชาอาหารและโภชนาการ คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร เขตดุสิต กรุงเทพมหานคร 10300

[2]สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร เขตดุสิต กรุงเทพมหานคร 10300

[1]Department of Food and Nutrition, Faculty of home Economics Technology, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Dusit, Bangkok 10300, THAILAND

[2]Department of Food Technology, Faculty of home Economics Technology, Rajamangala University of Technology Phra Nakhon, Dusit, Bangkok 10300, THAILAND

[*]Corresponding author e-mail: supuksorn.m@rmutp.ac.th

ARTICLE INFO

Article history:
Received: June 14, 2022
Revised: August 22, 2022
Accepted: August 26, 2022
Available online: September 8, 2022
DOI: 10.14456/jarst.2022.14

Keywords: khanom ping, sucrose, tapioca flour, baked products

ABSTRACT

High sugar intake is associated with negative effects on health of consumers. Tapioca-based cookie (Khanom Ping) is a popular baking product containing high sugar. The sugar, especially sucrose, plays important roles in baked products. However, reformulation may allow an efficient reduction in sugar, whereas it might have an affect product quality and the acceptance of consumers toward products. Therefore, this research aimed to study the effect of sugar content (10%, 15%, 20%, and 30%) on various properties of these cookies. The images of cookies showed an increase in sucrose content resulting in a smoother outer surface, a decrease in the height with a higher spread of cookies and a more porous internal structure. In addition, an increased sugar content resulted in a decrease in the specific

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

volume of the baking pastry while the moisture content decreased. The gelatinization temperature increased with an increase in the sugar level in the formulation. Peak and final viscosities decrease with an increasing sucrose content. Moreover, Cookies containing 10% sucrose resulted in the highest hardness. Sensory data on a 9 point-hedonic scale indicated that the panelists liked cookies that contained 20% sucrose over other samples. The cookie containing 20% sucrose showed the highest score for all sensorial attributes ($p<0.05$). Therefore, the difference in sugar content ultimately affects the quality of the baked products as well as consumer acceptance, which is an important factor for the recipe design of the low-sugar Khanom Ping.

บทคัดย่อ

การบริโภคน้ำตาลมากเกินไปมักส่งผลด้านลบต่อสุขภาพของผู้บริโภค ผลิตภัณฑ์ขนมผิงเป็นขนมอบที่ได้รับความนิยมซึ่งมีน้ำตาลในสูตรการผลิตสูงร้อยละ 25-30 ซึ่งน้ำตาลมีบทบาทสำคัญหลายประการในผลิตภัณฑ์อบ แต่การปรับเปลี่ยนสูตรอาจช่วยให้สามารถลดน้ำตาลในผลิตภัณฑ์ได้ซึ่งอาจส่งผลต่อคุณภาพและการยอมรับผลิตภัณฑ์ของผู้บริโภคได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของปริมาณน้ำตาล (ร้อยละ 10, 15, 20 และ 30) ที่มีต่อสมบัติทางกายภาพและการยอมรับของผู้บริโภค จากการตรวจสอบรูปสัณฐานพบว่าขนมผิงที่มีปริมาณน้ำตาลสูง จะมีผิวด้านนอกที่เรียบ ความสูงของก้อนขนมผิงลดลง ลักษณะการแผ่ด้านออกด้านข้างมาก มีโครงสร้างรูพรุนด้านในเพิ่มขึ้น และมีสีที่เข้มขึ้นหลังอบ นอกจากนี้เมื่อเติมน้ำตาลในสูตรการผลิตในปริมาณที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ความชื้นของขนมผิงลดลงในขณะที่ปริมาตรจำเพาะเพิ่มขึ้นส่วนปริมาณความชื้นลดลง เมื่อวิเคราะห์สมบัติด้านความหนืดด้วย Rapid Visco Analyzer (RVA) พบว่าอุณหภูมิเริ่มเกิดเจลาติไนเซชันเพิ่มขึ้นแต่ค่าความหนืดสูงสุดและความหนืดสุดท้ายลดลงอย่างมีนัยสำคัญเมื่อขนมผิงมีปริมาณน้ำตาลสูงขึ้น ขนมผิงที่เติมน้ำตาลร้อยละ 10 มีค่าความแข็งมากที่สุด ($p<0.05$) ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสแสดงให้เห็นผู้ทดสอบชิมให้คะแนนความชอบขนมผิงสูตรที่เติมน้ำตาลร้อยละ 20 สูงที่สุด ดังนั้นการเปลี่ยนแปลงปริมาณน้ำตาลในสูตรการผลิตส่งผลต่อคุณภาพของขนมผิงและผลการยอมรับของผู้ทดสอบชิมซึ่งถือเป็นปัจจัยที่สำคัญสำหรับการออกแบบสูตรการผลิตขนมผิงหวานน้อยสำหรับผู้บริโภคต่อไป

คำสำคัญ: ขนมผิง น้ำตาล แป้งมันสำปะหลัง ผลิตภัณฑ์ขนมอบ

บทนำ

ขนมผิงเป็นผลิตภัณฑ์สินค้า OTOP ของหลายพื้นที่ เช่น ตำบลกง อำเภอกงไกรลาศ จังหวัดสุโขทัย ขนมผิงถือเป็นคุกกี้ชนิดหนึ่งที่ผลิตจากแป้งมันสำปะหลัง ผสมกับน้ำตาล ไข่แดง และน้ำกะทิ เป็นขนมที่มีลักษณะเป็นก้อนกลมขนาดเล็ก สีเหลืองนวล มีรสชาติหวาน กรอบ และหอมกลิ่นกะทิ [1] โดยปกติขนมผิงตามท้องตลาดมีคุณภาพที่หลากหลาย มีรูปทรงไม่คงที่ และสีของผลิตภัณฑ์ไม่สม่ำเสมอ และเป็นสาเหตุของโรคอ้วนเนื่องจากมีแป้งมันสำปะหลังและน้ำตาลเป็นองค์ประกอบหลัก แป้ง

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

มันสำปะหลังมักถูกใช้เป็นวัตถุดิบหลักในผลิตภัณฑ์ความชื้นต่ำ เช่น มันฝรั่งทอด ขนมขบเคี้ยวและขนมปังกรอบ เป็นต้น โดยเฉพาะในประเทศแถบเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ [2] น้ำตาลทรายหรือน้ำตาลซูโครสในผลิตภัณฑ์ขนมอบมีส่วนช่วยสำคัญในการให้ความหวาน การรักษาความชื้นในผลิตภัณฑ์ การเก็บกักอากาศ การทำให้ฟองอากาศคงตัว และจำกัดการพองตัวของแป้งระหว่างการอบผลิตภัณฑ์ [3, 4] อีกทั้งน้ำตาลมีความสามารถในการจับน้ำสูงช่วยชะลอการเกิดเจลาติไนซ์ของแป้งส่งผลให้ขนมอบมีโครงสร้างที่มีรูพรุนมากขึ้น พองตัวได้ดี และมีปริมาตรเพิ่มขึ้น [5] นอกจากนี้น้ำตาลยังมีบทบาทสำคัญในการทำให้เกิดสีและกลิ่นของผลิตภัณฑ์อาหารด้วย เนื่องจากเป็นสารตั้งต้นของปฏิกิริยาสีน้ำตาลแบบไม่ใช้เอนไซม์ เช่น ปฏิกิริยาเมลลาร์ดและคาราเมลไลเซชัน รวมถึงน้ำตาลช่วยลดวอเตอร์แอคติวิตี้ (Water Activity, a_w) ในผลิตภัณฑ์ขนมอบทำให้ยับยั้งกิจกรรมของจุลินทรีย์และยืดอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์ได้ [6] มีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องมากมายที่แสดงให้เห็นว่าผลิตภัณฑ์อาหารที่ลดน้ำตาลลงเป็นที่ยอมรับได้น้อยกว่าเติมน้ำตาลเต็มสูตร เช่น ขนมอบจากแป้งข้าวโพดด้วยเครื่องเอกซ์ทรูชัน [7] คุกกี้ [8] และไอศกรีมเสริมอกไก่ [9] เป็นต้น อีกทั้งคุณสมบัติทางโครงสร้างและทางประสาทสัมผัสของระบบขนมอบแสดงให้เห็นว่าได้รับอิทธิพลจากการลดระดับน้ำตาลซูโครส ซึ่งการใช้สารให้ความหวานชนิดอื่นทดแทนน้ำตาลในสูตรการผลิตจึงไม่สามารถทดแทนน้ำตาลทั้งหมดได้ ทำให้การพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมอบที่มีการลดปริมาณน้ำตาลเพื่อลดแคลอรี่ ในขณะที่ยังต้องรักษาคุณภาพทางประสาทสัมผัสและการยอมรับของผลิตภัณฑ์ของผู้บริโภคเป็นสิ่งที่ต้องคำนึง ดังนั้นเพื่อให้เข้าใจผลของปริมาณน้ำตาลในผลิตภัณฑ์ขนมผิงที่มีต่อคุณภาพทางด้านกายภาพและการยอมรับด้านประสาทสัมผัสของขนมผิงซึ่งมีการรายงานผลการวิจัยค่อนข้างน้อย ในงานวิจัยนี้จึงได้สนใจที่จะศึกษาสมบัติด้านกายภาพ ได้แก่ ปริมาตรจำเพาะ ความชื้น ลักษณะทางสัณฐาน และความหนืด รวมถึงการยอมรับผลิตภัณฑ์ของผู้บริโภค ของผลิตภัณฑ์ขนมผิงซึ่งเป็นผลจากปริมาณน้ำตาลในผลิตภัณฑ์ขนมผิงซึ่งเป็นตัวอย่างขนมอบในการวิจัยนี้ เนื่องจากมีน้ำตาลและแป้งมันสำปะหลังเป็นวัตถุดิบหลัก เพื่อใช้เป็นแนวทางในการออกแบบผลิตภัณฑ์ขนมอบพลังงานต่ำต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

การเตรียมตัวอย่างขนมผิง

ขนมผิงประกอบด้วยส่วนผสม ได้แก่ แป้งมันสำปะหลัง น้ำตาลทราย กะทิยูเอชที และไข่แดง โดยมีสูตรการผลิตตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองดังนี้

ตารางที่ 1 การผลิตขนมผิงสูตรต่าง ๆ ที่มีปริมาณน้ำตาลแตกต่างกัน

ขนมผิงเติมน้ำตาล (ร้อยละ)	แป้งมันสำปะหลัง (g)	กะทิยูเอชที (g)	ไข่แดง (g)	น้ำตาลทราย (g)
10	650	200	50	100
15	600	200	50	150
20	550	200	50	200
30	450	200	50	300

นำกะทิยูเอชที (UHT) มาเคี่ยวจนแตกมันประมาณ 2 นาที เติมน้ำตาลลงไปเคี่ยวต่ออีก 2 นาที ยกลงจากเตา พักไว้ให้พออุ่น (45-50 องศาเซลเซียส) เติมไข่แดงลงไป คนให้เข้ากันและพักไว้ ทำการร่อนแป้งมันสำปะหลังด้วยตะแกรงร่อนแป้งแบ่งแป้งครึ่งหนึ่งเติมลงในของเหลวที่พักไว้ ตะล่อมให้เข้ากันจากนั้นเติมแป้งส่วนที่เหลือลงไปแล้วตะล่อมให้เข้ากันอีกครั้ง นำไปตีด้วยเครื่องตีผสม (Kitchen Aid) โดยใช้หัวผสมรูปใบไม้ที่ความเร็วปานกลาง 3 นาที นำไปใส่ภาชนะปิดสนิท พักไว้ 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้องแล้วนวดให้เข้ากันอีกครั้ง ปั้นให้เป็นลูกทรงกลม ลูกละ 10 กรัม จัดเรียงบนถาดที่ปูด้วยกระดาษไข และอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12-15 นาที เมื่อครบเวลานำขนมออกมาพักให้เย็น เก็บในกล่องพลาสติกที่ปิดสนิทสำหรับการวิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัส และ บรรจุใน

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

ถุงพลาสติกแบบสุญญากาศและเก็บภาชนะปิดสนิทสำหรับการวิเคราะห์อื่น ๆ

การเปรียบคุณภาพของขนมผิงด้านกายภาพที่เป็นผลจากการเติมน้ำตาลในสูตรแตกต่างกัน

ในการทดลองผลิตขนมผิง ได้เลือกใช้สูตรที่มีการเติมน้ำตาลในสูตรการผลิตขนมผิงที่ 4 ระดับ คือ ร้อยละ 10 15 20 และ 30 ของน้ำหนักส่วนผสมทั้งหมด ทำการผลิตขนมผิง จากนั้นนำตัวอย่างขนมผิงทุกสูตรตรวจสอบสมบัติทางกายภาพของขนมผิงตามวิธีข้อ 1 ถึง 5 และทดสอบทางประสาทสัมผัสต่อไป

1. การหาปริมาตรจำเพาะของขนมผิง

วัดปริมาตรจำเพาะของขนมผิงด้วยการแทนที่เมล็ดงาขาว โดยทำการชั่งน้ำหนักขนมผิงที่จะตรวจสอบปริมาตร นำขนมผิง 2 ชิ้นใส่ลงในภาชนะที่ทราบปริมาตรและเติมงาขาวจนเต็มภาชนะ จากนั้นทำการวัดปริมาตรเมล็ดงาที่เติมลงไปทั้งหมดด้วยกระบอกตวงและคำนวณหาปริมาตรของขนมผิง และปริมาตรจำเพาะของขนมผิง ดังสมการที่ (1) และ (2) ตามลำดับ

$$\text{ปริมาตรของขนมผิง } (V_P)\ (\text{cm}^3) = V_c - V_s \qquad (1)$$

โดยที่

V_c = ปริมาตรของภาชนะ (cm^3)

V_s = ปริมาตรของของขนมผิงตัวอย่าง (cm^3)

$$\text{ปริมาตรจำเพาะของขนมผิง } (\text{cm}^3/\text{g}) = \frac{V_P}{W} \qquad (2)$$

โดยที่

V_P = ปริมาตรของขนมผิง (cm^3)

W = น้ำหนักของขนมผิงตัวอย่าง (g)

2. การวัดค่าความชื้นของขนมผิง

การวัดปริมาณความชื้นด้วยวิธีการอบในตู้อบลมร้อน [10] โดยทำการบดขนมผิงให้เป็นผงด้วยโกร่งกระเบื้อง ชั่งน้ำหนักของตัวอย่างขนมผิง (W_S) ให้ได้น้ำหนักแน่นอน (3 กรัม) ในกระป๋องอะลูมิเนียมที่ทราบน้ำหนักแน่นนอน (W_1) จากนั้นนำไปอบในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5-6 ชั่วโมง เมื่อครบเวลานำออกจากตู้อบแล้วพักให้เย็นที่อุณหภูมิห้องในโถดูดความชื้นแล้วชั่งน้ำหนักภาชนะพร้อมตัวอย่างหลังอบ (W_2) อบซ้ำจนได้ผลต่างของน้ำหนักที่ชั่งคงที่แล้วทำการคำนวณดังสมการที่ (3)

$$\text{ความชื้น (\%)} = \frac{[W_2-(W_S+W_1)]}{W_S} \times 100 \qquad (3)$$

โดยที่

W_S = น้ำหนักของตัวอย่างขนมผิง (g)

W_1 = น้ำหนักของกระป๋องอะลูมิเนียม (g)

W_2 = น้ำหนักของกระป๋องอะลูมิเนียมพร้อมตัวอย่างหลังอบ (g)

3. ลักษณะทางสัณฐาน

ทำการตรวจสอบลักษณะปรากฏทางสัณฐานของขนมผิงด้วยด้วยกล้องถ่ายรูป ยี่ห้อ Canon รุ่น Ixus285 HS 20.2MP กำลังขยาย 12 เท่า และถ่ายภาพโครงสร้างภายในของขนมผิงด้วยกล้องสเตอริโอ (Stereo-microscope) กำลังขยาย 41 เท่า (ยี่ห้อ Olympus, รุ่น Zoom Stereo Microscope SZ61)

4. การตรวจสอบสมบัติทางเนื้อสัมผัสของขนมผิง

ทำการวัดค่า Hardness ของขนมผิงที่ถูกตัดให้มีขนาด 15x15x15 mm^3 ด้วยเครื่องวิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture analyzer, TA-XT2i, Stable Micro Systems) พร้อมหัววัดรูปทรงกระบอกขนาด 50 มิลลิเมตร (P/50) เลือกรูปแบบการวัดเป็นแบบ compression กำหนดสภาวะในการทำงานของเครื่อง Texture Analyzer ได้แก่ Pre-Test Speed 1.0 mm/s, Test Speed 1.0 mm/s, Post-Test Speed 10.0 mm/s, Distance 20 mm/s [11]

5. ศึกษาสมบัติด้านความหนืดของขนมผิง

การศึกษาสมบัติด้านความหนืดของขนมผิงที่เติมน้ำตาล 4 ระดับ ที่ร้อยละ 10, 15, 20 และ 30 ของน้ำหนักส่วนผสมทั้งหมด เปรียบเทียบกับความหนืดของแป้งมันสำปะหลังวัตถุดิบ ด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyzer (RVA) โดยทำการวัดอุณหภูมิที่แป้งเริ่มเกิดเจลาติไนซ์ (Pasting temperature), ค่าความหนืดสูงสุด (Peak viscosity), และค่าความหนืดสุดท้าย (Final

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

viscosity) โดยบดขนมผิงให้เป็นผงละเอียดร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช จำนวน 3.00±0.01 กรัม ใส่ในกระป๋องจำเพาะสำหรับเครื่อง RVA (canister) เติมน้ำกลั่น 25 กรัม แล้วใช้ใบกวนกวนตัวอย่างเพื่อให้ผงตัวอย่างจับตัวเป็นก้อน จากนั้นติดตั้งใบกวนพร้อมกระป๋องเข้ากับเครื่อง RVA ทำการทดสอบค่าความหนืดตัวอย่างละ 3 ซ้ำ ภายใต้ความเร็วรอบ 960 rpm เป็นเวลา 10 นาที และลดระดับความเร็วลงให้คงที่ที่ 160 rpm จนกระทั่งสิ้นสุดการวัดค่าความหนืด โดยตั้งโปรแกรมควบคุมอุณหภูมิเริ่มที่ 25 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิเป็น 95 องศาเซลเซียส กวนต่ออีก 5 นาที ด้วยอัตรา 7 องศาเซลเซียสต่อนาที แล้วลดอุณหภูมิลงเป็น 25 องศาเซลเซียส ด้วยอัตรา 7 องศาเซลเซียสต่อนาที และคงอุณหภูมิการทดสอบที่ 25 องศาเซลเซียส นาน 10 นาที รวมระยะเวลา 39.10 นาที

การทดสอบทางประสาทสัมผัสขนมผิงที่มีการเติมน้ำตาลในสูตรแตกต่างกัน

นำผลิตภัณฑ์ขนมผิงที่เตรียมได้ไปทำการทดสอบทางประสาทสัมผัสด้วยการประเมินความชอบโดยใช้ 9 point-hedonic scoring (1 = ไม่ชอบมากที่สุด, 5 = เฉย ๆ, 9 = ชอบมากที่สุด) ใช้ผู้ชิมที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 50 คน ในการทดสอบทางประสาทสัมผัส โดยมีคุณลักษณะที่ใช้ในการทดสอบดังนี้ ลักษณะปรากฏ (Appearance), สี (Color), ลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture), การละลายในปาก (Disintegration in Mouth), กลิ่นขณะรับประทาน (Flavor), รสชาติ (Taste) และความชอบโดยรวม (Overall Liking)

การวิเคราะห์ทางสถิติ

การวิเคราะห์ผลทางด้านกายภาพของขนมผิงโดยใช้แผนการทดลองและวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติแบบ Completely Randomized Design (CRD) ทำการทดสอบ 3 ซ้ำ (Replications) การวิเคราะห์ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสใช้ แผนการทดลองแบบ Randomized Completely Block Design (RCBD) โดยกำหนดให้ผู้ชิมเป็น block ใช้โปรแกรมวิเคราะห์ทางสถิติ SPSS version 27.0 ทำการวิเคราะห์ Analysis of Variance (ANOVA) และ เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยในแต่ละสิ่งทดลอง (treatment) ด้วยวิธี Duncan's new multiple ranges test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

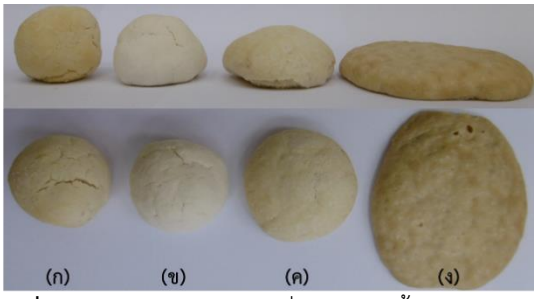
ผลการศึกษาและอภิปรายผล

ปริมาตรจำเพาะของขนมผิง

ผลการศึกษาปริมาตรจำเพาะของขนมผิงที่มีการเติมน้ำตาลทรายขาวในสูตรการผลิตที่ร้อยละ 10, 15, 20 และ 30 จากการวิเคราะห์ปริมาตรจำเพาะพบว่าการเติมน้ำตาลที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาตรจำเพาะลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) (ตารางที่ 1) แสดงถึงน้ำตาลส่งผลต่อการพองตัวหรือการขึ้นฟูของขนมผิง โดยขนมผิงที่เติมน้ำตาลร้อยละ 10, 15 และ 20 พบว่าสามารถปั้นเป็นเม็ดทรงกลมสวยได้ ส่วนการเติมน้ำตาลร้อยละ 30 ในสูตรการผลิตทำให้ขนมผิงที่มีลักษณะแบนลง อีกทั้งมีลักษณะหนืด ติดมือ ซึ่งส่งผลให้ขนมผิงที่ได้มีการรูปร่างที่แตกต่างกัน ดังแสดงในรูปที่ 1 Hoseney [12] ได้รายงานว่าการเติมน้ำตาลมีผลทำให้โดของคุกกี้มีความค่าความแข็งลดลงซึ่งมีความสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของลักษณะที่เหลวของโดเมื่อมีน้ำตาลในสูตรเพิ่มขึ้น เนื่องจากน้ำตาลละลายในน้ำทำให้ปริมาตรของของเหลวในโดเพิ่มขึ้นได้ หลังอบพบว่าขนมผิงที่เติมน้ำตาลร้อยละ 10 และ 15 มีรูปร่างค่อนข้างกลมและมีความสูงของชิ้นขนมมากกว่าขนมผิงที่เติมน้ำตาลร้อยละ 20 และ 30 ซึ่งจะมีฐานที่แบนและแผ่กระจายออกด้านข้างมากขึ้น แสดงให้เห็นว่าการมีปริมาณน้ำตาลในสูตรการผลิตเพิ่มขึ้นทำให้มีการละลายของน้ำตาลเพิ่มขึ้นระหว่างการอบ [13] ส่งผลให้มีปริมาตรของสารละลายมากขึ้นจึงเกิดการแผ่ออกด้านข้าง (Spreading) ของขนมผิงเพิ่มขึ้น ด้วย Pareyt และคณะ [14] ยังได้กล่าวเพิ่มเติมว่าปริมาณน้ำตาลมีผลต่อเวลาที่ใช้ในการเซตตัวของคุกกี้ โดยเวลาในการเซตตัวมีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อมีปริมาณน้ำตาลสูงขึ้น ซึ่งอาจยังมีผลึกน้ำตาลที่ยังไม่ละลายระหว่างที่ขนมเซต

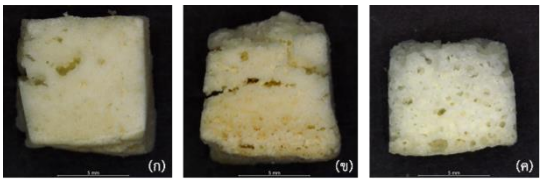
ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

ตัวช้า ทำให้ชิ้นขนมยุบตัวทำให้การขยายตัวทางแนวตั้งของขนมลดลงได้เมื่อมีน้ำตาลในโดมากขึ้น หรืออาจเกิดจากการทำปฏิกิริยาระหว่างน้ำตาลกับแป้งทำให้แป้งดูดซับน้ำและพองตัวได้น้อยลง มีอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนเซชันเพิ่มขึ้น จึงต้องใช้อุณหภูมิในการอบขนมที่สูงขึ้นในสูตรที่มีน้ำตาลปริมาณมาก [15] นอกจากนี้ยังสังเกตเห็นรอยแยกบริเวณผิวของขนมผิงที่ลดลงเมื่อปริมาณน้ำตาลในสูตรการผลิตเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเกี่ยวข้องกับการเกิดผลึกน้ำตาลบริเวณผิวของขนมผิงระหว่างการอบหรือมีการยุบตัวของขนมที่เกิดขึ้นหลังการอบ [16]



รูปที่ 1 ลักษณะของขนมผิงที่มีการเติมน้ำตาลในสูตรการผลิตร้อยละ ก) 10 ข) 15 ค) 20 และ ง) 30

นอกจากนี้จากผลการเปรียบเทียบลักษณะปรากฏทางสัณฐานของขนมผิงที่มีการเติมน้ำตาลในสูตรการผลิตร้อยละ 10, 15, 20 และ 30 ด้วยกล้อง stereo-microscope กำลังขยาย 41 เท่า เมื่อสังเกตด้วยสายตาจากรูปที่ 2 จะเห็นว่าเนื้อด้านในของขนมผิงมีโครงสร้างที่มีรูพรุนคล้ายฟองน้ำ และขนาดของรูพรุนมีขนาดที่ใหญ่ขึ้นเมื่อขนมผิงมีปริมาณน้ำตาลในสูตรการผลิตมากขึ้น Pareyt และคณะ[14] ได้อธิบายลักษณะที่เกิดขึ้นนี้ว่าการลดน้ำตาลในการผลิตคุกกี้มีผลทำให้ขนาดของรูพรุนเล็กลงและมีความสม่ำเสมอของการกระจายตัวของเซลล์อากาศมากขึ้น เป็นเพราะน้ำระเหยอย่างต่อเนื่องในขณะอบทำให้ความหนืดของโดลดลงจึงขยายตัวได้ดีระหว่างการอบซึ่งจะเป็นตัวกำหนดการแผ่ออกด้านข้าง การกระจายตัวของฟองอากาศและผนังของรูพรุนอีกด้วย โดยหากมีน้ำตาลน้อยคุกกี้จะมีรูพรุนที่ขนาดเล็กจำนวนมากกระจายตัวสม่ำเสมอแต่การแผ่ออกด้านข้างลดลงซึ่งสอดคล้องกับผลการวิจัยนี้ อีกทั้งสีของเปลือกด้านนอกขนมผิงจะมีสีน้ำตาลที่เข้มขึ้นเมื่อขนมผิงมีน้ำตาลในสูตรการผลิตเพิ่มขึ้นที่ร้อยละ 15, 20 และ 30 อีกด้วย ซึ่งเป็นผลจากปฏิกิริยาสีน้ำตาลแบบไม่ใช้เอนไซม์) Maillard reaction) และคาราเมลไลเซชัน (Caramelization) [17]



รูปที่ 2 ภาพถ่ายขนมผิงด้วยกล้อง stereo-microscope กำลังขยาย 41 เท่า เพื่อศึกษาโครงสร้างรูพรุนของขนมผิงที่มีการเติมน้ำตาลในสูตรการผลิตร้อยละ ก) 10 ข) 15 และ ค) 20

ส่วนขนมที่เติมน้ำตาลร้อยละ 10 จะมีสีที่เข้มกว่าตัวอย่างขนมผิงที่มีน้ำตาลร้อยละ 30 และ 20 อาจเป็นเพราะมีการการระเหยของน้ำได้ง่ายกว่าตัวอย่างอื่น เนื่องจากในแป้งโดที่มีปริมาณของน้ำตาลน้อยและมีแป้งมันสำปะหลังมากจะทำให้อุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งไม่สูงเมื่อเทียบกับขนมผิงสูตรที่มีน้ำตาลมากและมีแป้งน้อยกว่า ส่งผลให้แป้งในขนมผิงที่เติมน้ำตาลร้อยละ 10 สุกเร็ว [14] อีกทั้งเมื่อความร้อนในการอบที่สูงมากทำให้ค่าความชื้นที่ผิวของขนมผิงต่ำกว่าขนมผิงสูตรที่เติมน้ำสูงสีน้ำตาลที่เกิดขึ้นอาจเป็นผลของปฏิกิริยาคาราเมลไลเซชันร่วมกับปฏิกิริยาเมลลาร์ดซึ่งปรากฏเป็นการไหม้และผลิตภัณฑ์มีค่าความสว่างลดลง [18] เป็นผลให้มีสีเปลือกด้านนอกเข้มกว่าตัวอย่างขนมผิงที่มีปริมาณน้ำตาลสูงกว่า

ความชื้นของขนมผิง

ผลการศึกษาปริมาณความชื้นของขนมผิงที่มีการเติมน้ำตาลทรายในสูตรการผลิตที่ร้อยละ 10, 15, 20 และ 30 พบว่าการเติมน้ำตาลที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณความชื้นในตัวอย่างขนมผิงเพิ่มอย่างมีสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) (ตารางที่ 1) ซึ่งเป็นผลจากยังคงมีผลึก

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

ของน้ำตาลที่ไม่ละลายบางส่วนในระบบและน้ำทำให้อุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันเพิ่มขึ้น ส่งผลให้โดมีความหนืดลดลง และแป้งพองตัวน้อยทำให้ขนมขึ้นฟูได้ลดลงขณะอบ [14] นอกจากนี้ผลความชื้นในตารางที่ 1 พบว่าขนมผิงมีความชื้นลดลงเมื่อมีการเติมน้ำตาลในสูตรการผลิตเพิ่มขึ้น แสดงถึงน้ำตาลส่งผลต่อการดูดความชื้นของขนมผิง โดยขนมผิงที่มีปริมาณน้ำตาลน้อยจะมีความชื้นที่สูงกว่าขนมผิงมีเติมน้ำตาลในสูตรการผลิตในระดับที่สูงกว่า ซึ่งอาจเป็นผลจากน้ำตาลสร้างพันธะที่แข็งแรงกับสารโพลีเมอร์ที่อยู่ขนมผิง เช่น โปรตีน แป้ง เป็นต้น และน้ำตาลหลังการอบและเย็นตัวลงจะอยู่ในรูปของผลึกทำให้ความสามารถในการดูดซับน้ำลดลง [19] ส่งผลให้ขนมผิงที่มีปริมาณน้ำตาลสูงมีปริมาณความชื้นต่ำ

ตารางที่ 1 ปริมาตรจำเพาะและความชื้นของขนมผิงที่เติมน้ำตาลในสูตรการผลิตที่แตกต่างกัน

ขนมผิงเติมน้ำตาลร้อยละ	ปริมาตรจำเพาะ (cm^3/g)	ความชื้น (% db)
10	1.30 ± 0.09^a	5.64 ± 0.05^a
15	1.12 ± 0.06^b	5.02 ± 0.12^a
20	0.87 ± 0.25^c	4.12 ± 0.08^b
30	0.65 ± 0.41^d	3.35 ± 0.14^c

a,b,c,d = ตัวเลขที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความหนืด

ผลพฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความหนืดของแป้งที่เตรียมจากการบดขนมผิงที่เติมน้ำตาลในสูตรการผลิตที่แตกต่างกันให้เป็นผงละเอียด และตรวจสอบด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyser (RVA) แสดงผลดังรูปที่ 3 และ ตารางที่ 2 พบว่าอุณหภูมิการเกิดเจลาติไซชันของแป้งมันสำปะหลังวัตถุดิบและขนมผิงที่เติมน้ำตาลร้อยละ 10 ไม่แตกต่างกัน ($p>0.05$) ซึ่งพบว่าอุณหภูมิการเกิดเจลาติไซชันของขนมผิงสูงขึ้นเมื่อมีการเติมน้ำตาลมากขึ้นที่ร้อยละ 20 และ 30 ตามลำดับ แสดงให้เห็นการแข่งขันของแป้งและน้ำตาลในผลิตภัณฑ์ในการจับกับน้ำที่ทำให้ลดการเคลื่อนที่ของน้ำในส่วนผสมและส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างในผลิตภัณฑ์ขนมอบ นอกจากนี้ปฏิสัมพันธ์ระหว่างโมเลกุลของน้ำตาลเอง ทำให้แป้งมีอุณหภูมิการเกิดเจลาติไนเซชันเพิ่มขึ้นซึ่งผลกระทบนี้ที่มีต่อการเกิดเจลาติไนเซชันของแป้งจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของน้ำตาลที่สูงขึ้น [20] เมื่อพิจารณาค่าความหนืดสูงสุด (Peak Viscosity) และค่าความหนืดสุดท้าย (Final Viscosity) จะเห็นว่าค่าความหนืดทั้งสองลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณน้ำตาลในสูตรขนมผิงและทุกตัวอย่างมีค่าความหนืดต่ำกว่าแป้งมันสำปะหลัง ความหนืดสูงสุดแสดงถึงความจุดสมดุลระหว่างความสามารถในการอุ้มน้ำของเม็ดแป้งและการแตกของแกรนูลแป้ง การพองตัวของเม็ดแป้งมักตามมาด้วยการละลายของอะมิโลสออกมาจากเม็ดแป้ง (Amylose Leaching) การเพิ่มขึ้นของความหนืด ในขณะที่แกรนูลของแป้งอาจแตกเสียหายระหว่างการให้ความร้อน การเติมน้ำตาลในระบบที่มีแป้งมันสำปะหลังและน้ำตาล น้ำตาลจะจับกับโมเลกุลสายโพลีเมอร์แป้งในส่วนอสัณฐาน (Amorphous Region) ทำให้ส่วนนี้มีความคงตัวเพิ่มขึ้น [21] ซึ่งทำให้การพองตัวของเม็ดแป้งลดลงส่งผลให้ค่าความหนืดสูงสุดลดลงเช่นกัน ส่วนค่าความหนืดสุดท้ายเป็นผลจากการรวมตัวกันใหม่ของอะไมโลสทำให้เกิดโครงสร้างเจลเมื่อแป้งสุกเย็นตัวลง [22] น้ำตาลส่วนใหญ่แล้วจะทำให้เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า Anti-plasticizing ส่งผลให้การละลายของอะมิโลสออกมาจากเม็ดแป้งลดลงและทำให้อัตราการคืนตัวของแป้งลดลง การเติมน้ำตาลทำให้ชะลอการเกิดเจลาติไนเซชัน ยับยั้งการดูดน้ำของแป้ง รวมถึงลดจำนวนของอะไมโลสที่ละลายออกมาจากเม็ดแป้งขนาดพองตัวเมื่อได้รับความร้อนและยับยั้งการรวมตัวของโมเลกุลแป้งเมื่อเย็นตัวลง [21] เกิดปรากฏการณ์ที่เรียกว่า Anti-plasticizing ของน้ำตาล [23] จึงส่งผลให้สมบัติด้านความหนืดของขนมผิงมีค่าต่ำกว่าแป้งมันสำปะหลัง นอกจากนี้การลดสัดส่วนของแป้งมันสำปะหลังในสูตรการผลิตขนมผิงลงเมื่อมีการเติมน้ำตาลทรายที่เพิ่มขึ้นทำให้ค่าความหนืดสูงสุดและค่าความหนืดสุดท้ายลดลงอีกด้วย

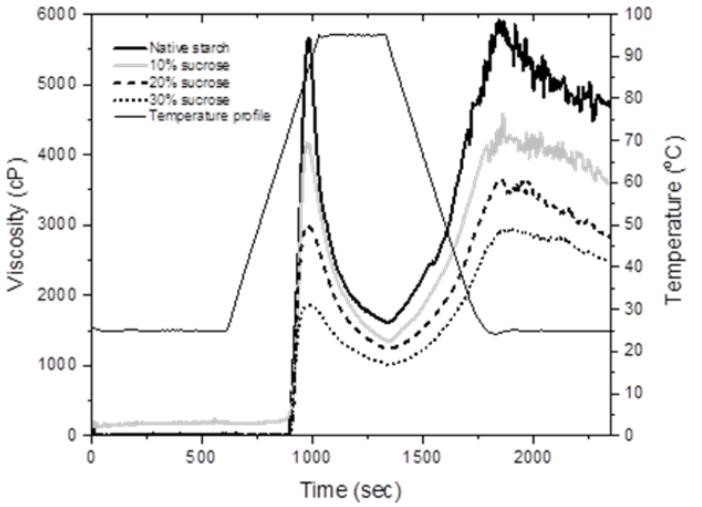
ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

ตารางที่ 2 สมบัติด้านความหนืดของขนมผิงที่มีการเติมน้ำตาลในสูตรการผลิตร้อยละ 10, 20 และ 30 เปรียบเทียบกับแป้งมันสำปะหลัง

ขนมผิงเติมน้ำตาลร้อยละ	Pasting temperature (°C)	Peak viscosity (RVU)	Final Viscosity (RVU)
แป้งมันสำปะหลัง	71.87±0.03[a]	5540±39[a]	4777±5[a]
10	71.85±0.05[a]	4250±77[b]	3585±21[b]
20	71.40±0.05[b]	2988±17[c]	2842±7[c]
30	71.36±0.06[b]	1849±17[d]	2424±66[d]

a,b,c,d = ตัวเลขที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

นอกจากนี้ [22] ได้รายงานการว่าการที่ผลิตภัณฑ์ขนมขบเคี้ยวที่ผลิตจากเครื่องเอ็กทรูซเดอร์มีค่าความหนืดสูง (Peak Viscosity) แสดงให้เห็นว่าในระบบของอาหารที่ผ่านความร้อนยังมีแกรนูลแป้งที่เกิดเจลาติไนซ์ไม่สมบูรณ์หรือแป้งที่ถูกทำลายบางส่วน (Partial Damage) เหลืออยู่ จากผลการทดลองพบว่าขนมผิงทุกสูตรยังมีเม็ดแป้งที่ถูกทำลายบางส่วน เนื่องจากการอบให้ความร้อน ซึ่งจะสังเกตในกราฟความหนืดในรูปที่ ของตัวอย่างแป้ง 3 ที่เตรียมจากขนมผิงสูตรต่าง ๆ พบว่าแป้งจากขนมผิงทุกสูตรมีค่าความหนืดสูงสุด (Peak Viscosity) ต่ำกว่าค่าความหนืดสูงสุดของแป้งมันสำปะหลังที่ใช้เป็นวัตถุดิบ โดยขนมผิงที่เติมน้ำตาลในสูตรการผลิตร้อยละ 10 จะมีเม็ดแป้งที่ถูกทำลายบางส่วนแทรกอยู่ในโครงสร้างรวมกับแกรนูลแป้งที่เกิดเจลาติไนซ์อย่างสมบูรณ์แล้วมากกว่าขนมผิงที่มีการเติมน้ำตาลในสูตรการผลิตร้อยละ และ 20 ตามลำดับ 30แสดงให้เห็นว่าน้ำตาลเมื่อละลายเป็นของเหลวแล้วอาจมีส่วนช่วยในการนำความร้อนไปสู่เม็ดแป้งทำให้เม็ดแป้งเสียสภาพธรรมชาติได้มากขึ้น อีกทั้งในสูตรการผลิตที่มีการเติมน้ำตาลมากทำให้สัดส่วนของแป้งมันสำปะหลังในสูตรการผลิตลดลงไปด้วย ส่งผลให้แป้งอาจถูกทำลายหรือเกิด partial damage ได้มากกว่าขนมผิงสูตรที่มีการเติมน้ำตาลน้อยกว่า



รูปที่ 3 พฤติกรรมการเปลี่ยนแปลงความหนืดของขนมผิงที่เติมน้ำตาลในสูตรการผลิตที่แตกต่างกันด้วยเครื่อง Rapid Visco Analyser (RVA) ของขนมผิงที่มีการเติมน้ำตาลในสูตรการผลิตร้อยละ 10, 20 และ 30 เปรียบเทียบกับแป้งมันสำปะหลังที่ใช้เป็นวัตถุดิบ

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

การประเมินคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของขนมผิง

ผลการศึกษาการประเมินคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของขนมผิงโดยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส)Texture Analyzer) ได้แสดงในตารางที่ พบว่าค่าความแข็ง 3)Hardness) (N) ของขนมผิง ที่มีการเติมน้ำตาลในสูตรการผลิต %10ของส่วนผสมทั้งหมด มีค่าความแข็งมากกว่าสูตรที่เติมน้ำตาลมากกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

ตารางที่ 3 ปริมาตรจำเพาะและความชื้นของขนมผิงที่เติมน้ำตาลในสูตรการผลิตที่แตกต่างกัน

ขนมผิงเติมน้ำตาลร้อยละ	ค่าความแข็ง (N)
10	126.58±11.73[a]
15	114.55±11.77[b]
20	92.51±14.75[c]
30	76.87±14.04[d]

a,b,c,d = ตัวเลขที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

น้ำตาลทำให้ผลิตภัณฑ์ขนมอบมีความเปราะเนื่องจากน้ำตาลควบคุมการดูดน้ำและมีการกระจายตัวในเฟสของโมเลกุลโปรตีนและแป้งซึ่งช่วยป้องกันการจับตัวกันของเฟสต่อเนื่องทำให้ผลิตภัณฑ์มีความกรอบ และน้ำตาลมีอิทธิพลต่อความแข็งของขนมอบ อาจเป็นเพราะการยึดเกาะที่แข็งแรงขึ้นระหว่างอนุภาคหลังการเกิดผลึกน้ำตาลอีกครั้งเมื่อผลิตภัณฑ์เย็นลง [24] โดยรายงานการวิจัยที่ให้ผลเช่นกัน เช่น ในผลิตภัณฑ์คุกกี้ที่รายงานโดย Pyreyt และคณะ [14] ที่ชี้ในเห็นว่าคุกกี้ที่มีปริมาณน้ำตาลซูโครสสูงจะมีความชื้นคงที่ที่ร้อยละ 2.8 และมีค่าทนต่อการแตก (break strength) ลดลงและ Panghal และคณะได้เสนอว่าระดับไขมันและน้ำตาลที่เพิ่มขึ้นในสูตรการผลิตคุกกี้ส่งผลให้คุกกี้มีเนื้อสัมผัสที่นุ่มขึ้นและเพิ่มการกระจายของแป้งโดขณะอบอีกด้วย [24] เป็นต้น

การทดสอบทางประสาทสัมผัส

ขนมผิงที่มีการเติมน้ำตาลในสูตรการผลิตร้อยละ 10, 15, 30 และ 20 ได้ถูกนำไปทำการทดสอบความชอบทางประสาทสัมผัสของผู้ทดสอบชิมโดยใช้ 9 point-hedonic scoring โดยมีคุณลักษณะที่ใช้ในการทดสอบดังนี้ ลักษณะปรากฏ (Appearance) สี (Color) ลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture) การละลายในปาก (Disintegration in Mouth) กลิ่นขณะรับประทาน (Flavor) รสชาติ (Taste) และความชอบโดยรวม (Overall Liking) (ตารางที่ 4)

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสเมื่อทดสอบด้วยวิธี 9 point-hedonic scoring ของขนมผิงที่มีการเติมน้ำตาลในสูตรการผลิตแตกต่างกัน

ปริมาณน้ำตาล (ร้อยละ)	Appearance	Color	Texture	Disintegration in mouth	Flavor	Taste	Overall liking
10	5.41±1.69[b]	6.54±1.32[a]	5.35±1.42[b]	6.19±1.81[ab]	6.30±1.56	5.85±1.56[b]	5.39±1.52[c]
15	6.64±1.54[a]	6.59±1.28[a]	5.40±1.24[b]	6.08±1.28[ab]	6.46±1.35	6.49±1.26[a]	6.03±1.26[b]
20	6.78±1.43[a]	5.56±1.58[b]	6.59±1.29[a]	6.27±1.45[a]	6.14±1.38	6.54±1.35[a]	6.43±1.37[a]
30	4.97±1.46[c]	5.52±1.25[b]	5.21±1.58[c]	5.62±1.42[b]	6.22±1.25	5.77±1.25[b]	5.32±1.14[c]

a,b,c = ตัวเลขที่มีตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กกำกับเหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันหมายถึงไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

โดยได้ใช้ผู้ทดสอบชิมที่ไม่ผ่านการฝึกฝนจำนวน 50 คน พบว่า ลักษณะปรากฏ (Appearance), สี (Color), ลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture), การละลายในปาก (Disintegration in Mouth), รสชาติ (Taste) และ

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

ความชอบโดยรวม (Overall Liking) มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$) ส่วนกลิ่นขณะรับประทาน (Flavor) ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) โดยผู้ชิมชอบขนมผิงที่มีปริมาณน้ำตาล 20% มากที่สุด โดยมีคะแนนความด้านลักษณะปรากฏ เนื้อสัมผัส การละลายในปาก รสชาติและความชอบโดยรวมสูงที่สุด อาจเป็นเพราะขนมผิงที่เติมน้ำตาลร้อยละ 20 มีค่าความแข็งน้อยกว่าขนมผิงที่เติมน้ำตาลร้อยละ 10, 15 แต่มากกว่าขนมผิงที่มีน้ำตาลร้อยละ 30 ทำให้รับประทานง่าย อีกทั้งยังคงมีรูปทรงครึ่งวงกลมและน้ำตาลที่ไม่เข้มจนเกินไปและไม่ซีดขาว ซึ่งลักษณะที่กล่าวมานี้ถือเป็นลักษณะที่เป็นที่ยอมรับของผู้ทดสอบชิมชอบขนมผิงสูตรนี้มากที่สุด

สรุปผล

น้ำตาลเป็นวัตถุดิบที่มีอิทธิพลต่อในการผลิตขนมผิงและคุณภาพของขนมผิง ซึ่งการเติมน้ำตาลในสูตรการผลิตในปริมาณมากส่งผลให้ขนมผิงมีค่าอุณหภูมิในการเกิดเจลาติไนซ์ การเกิดโครงสร้างรูพรุน และความเข้มของสีเพิ่มขึ้น ในขณะที่การเติมน้ำตาลในการผลิตขนมผิงในระดับที่สูงขึ้นส่งผลให้ค่าปริมาตรจำเพาะปริมาณความชื้น ความหนืดสูงสุด ความหนืดสุดท้าย และความแข็งของผลิตภัณฑ์ลดลง นอกจากนี้น้ำตาลยังส่งผลต่อคะแนนความชอบของผู้ทดสอบชิม ซึ่งพบว่าขนมผิงที่เติมน้ำตาลร้อยละ ในสูตรการผลิตได้รับ 20 คะแนนความชอบสูงที่สูงในด้านลักษณะปรากฏ สี ลักษณะเนื้อสัมผัส การละลายในปาก รสชาติ)Taste) และความชอบโดยรวม เพื่อให้เกิดความเข้าใจผลของปริมาณน้ำตาลในขนมผิงมากขึ้นการศึกษาในขั้นต่อไปควรคำนึงถึงคุณภาพด้านเคมีและอายุการเก็บรักษาขนมผิงที่เป็นผลจากปริมาณน้ำตาลในสูตรผลิตต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร และสาขาวิชาอาหารและโภชนการ คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่อนุเคราะห์สถานที่และอุปกรณ์ในการทำวิจัย และงานวิจัยได้การสนับสนุนจากงบประมาณผ่านกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม ประเภท Basic Research Fund (Blue Sky) ปี 2564

เอกสารอ้างอิง

1. Peanthong J, Tanteang O, Keawsritong J, Thanawatchai A. [Product development of Khanom Ping supplement Gotu Kola leaf]. The 2nd Kamphaeng Phet Rajabhat University Student National Conference; 2016 Dec 28; Faculty of Science and Technology, Kamphaeng Phet Rajabhat University, Thailand. p. 808-15. Thai.
2. Sanyapradit J, Sane A, Sappakul P. Moisture Sorption Isotherm and Texture of Glassy Tapioca-Flour-Based. The 12th ASEAN Food Conference; 2011 Jun 16-18; BITEC Bangna, Bangkok, Thailand, p. 254-9.
3. Nip W-K. Sweetener. In: Hui YH, editor. Bakery Products: Science and Technology. 1st Edition. Blackwell Publishing Professional Lowa, USA; 2006. p. 137-60.
4. Gao J, Brennan MA, Mason SL, Brennan CS. Effects of sugar substitution with '*Stevianna*" on the sensory characteristics of muffins. J Food Quality. 2007;2:1-11.
5. Mariotti M, Lucisano M. Sugar and Sweeteners. In Weibiao Z, Hui YH, editor. Bakery Products Science and Technology. 2nd Edition. Blackwell Publishing Professional, Lowa, USA. 2014. p. 199–220.

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

6. Luo X, Arcot J, Gill T, Louie JCY, Rangan A. A review of food reformulation of baked products to reduce added sugar intake**.** Trends Food Sci Technol. 2019;86:412-25.

7. Barrett A, Kaletung G, Rosenburg S, Breslauer K. Effect of sucrose on the structure, mechanical strength and thermal properties of corn extrudates. Carbohyd Polym. 1995;26(4):261-9.

8. Kweon M, Slade L, Levine H. Potential sugar reduction in cookies formulated with sucrose alternatives. Cereal Chem. 2016;93(6):576-83.

9. Othong J, Klinmalai L, Chareonchai A. [The using of inulin replaced with sugar in milk ice cream supplemented with chicken breast]. J Appl Res Sci Tech. 2020;19(1):39-50. Thai.

10. AOAC International. Official methods of analysis of AOAC International. 1 7 th ed. 2000.

11. Hunter EK, Bello FD, Arendt EK. Rheological properties and bread making performance of commercial wholegrain oat flours. J Cereal Sci. 2010;52: 65-71.

12. Hoseney RC. Chapter 6 Glass transition and its Role in Cereals. In: Delcour JA, Hoseney RC, editor. Principles of Cereal Science and Technology. 3rd Edition. AACC International, Academic Press Ltd-Elsevier Science Ltd. 2010. p. 97-106.

13. Chevallier S, Colonna P, Lourdin D. Contribution of major ingredients during baking of biscuits dough systems. J Cereal Sci. 2000;31(3):241-52.

14. Pareyt B, Talhaoui F, Kerckhofs G, Brijs K, Goesaert H, Wevers M. The role of sugar and fat in sugar-snap cookies: Structural and textural properties. J Food Eng. 2009;90:400-8.

15. Sahin AW, Zannini E, Coffey A, Arendt EK. Sugar reduction in bakery products: Current strategies and sourdough technology as a potential novel approach. Food Res Int. 2019;126,108583: 1-17.

16. Slade L, Levine H, Wang M. The glassy state phenomenon in applications for the food-industry-Application of the food polymer science approach to structure-function-relationships of sucrose in cookie and cracker systems. J Sci Food Agr. 1993;63(2): 133-76.

17. Clemens RA, Jones JM, Kern M, Lee S-Y, Mayhew EJ, Slavin JL, et al. Functionality of sugars in foods and health. Comprehensive Reviews. 2016;15(3):433-70.

18. Purlis E. Browning development in bakery products – A review. J Food Eng. (2010);99(3): 239-49.

19. Pareyt B, Delcour JA. The role of wheat flour constituents, sugar, and fat in low moisture cereal based products: A review on sugar-snap cookies. Cri Rev Food Sci Nutr. 2008; 48(9):824-39.

20. Mezreb K, Goullieux A, Ralainirina R, Queneudec M. Effect of sucrose on the textural properties of corn and wheat extrudates. Carbohyd Polym. 2006;19:1-8.

21. Pongsawatmanit R, Thanasukarna P, Ikeda S. Effect of sucrose on RVA viscosity parameters, water activity and freezable water fraction of cassava starch suspensions. Sci Asia. 2002;28(2):129-34.

22. Ortiz JAR, Carvalho CWP, Ascheri DPR, Ascheri JLR, Andrade CT. Effect of sugar and water contents on non-expanded cassava flour extrudates. Food Sci Tech. 2010;30(1): 205-12.

23. Kohyama K, Nishshinari K. Effect of soluble sugars on gelatinization and retrogradation of sweet potato starch. J Agric Food Chem. 1991;39:1406-10.

24. Panghal A, Chhikara N, Khatkar B S. Effect of processing parameters and principal ingredients on quality of sugar snap cookies: a response surface approach. J Food Sci Technol. 2018;55: 3127–34.

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

JARST Journal of Applied Research on Science and Technology
Rajamangala University of Technology Thanyaburi

การเตรียมฟิล์มพลาสติกชีวภาพผสมที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอลล์และเซลลูโลสที่สกัดจากก้านใบบัวหลวง

Preparation of Eco-friendly Blended Bioplastic Film between Blend of Polyvinyl Alcohol and Cellulose Extracted from *Nelumbo nucifera* Gaertn Stalk

พชรวรรณ รัตนทรงธรรม*

Pacharawan Ratanasongtham*

หลักสูตรเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 13180

Department of Chemistry, Faculty of Science and Technology, Valaya Alongkorn Rajabhat University Under the Royal Patronage, Khlong Luang, Pathum Thani 13180, THAILAND

*Corresponding author e-mail: pacharawan@vru.ac.th

ARTICLE INFO

Article history:
Received: June 21, 2022
Revised: August 29, 2022
Accepted: September 8, 2022
Available online: September 23, 2022
DOI: 10.14456/jarst.2022.15

Keywords: bioplastic, *Nelumbo nucifera* Gaertn stalk, cellulose, polyvinyl alcohol

ABSTRACT

This research aims to prepare the eco-friendly blended biofilm between polyvinyl alcohol (PVA) and cellulose (CL) isolated from the *Nelumbo nucifera* Gaertn stalk using sodium hydroxide. Then, the stalk fiber was bleached treatment with hydrogen peroxide. The highest cellulose content was archived at 21.47±1.53 % w/w of dry lotus stalk. The blended biofilms at different weight ratios i.e., 90:10 (PVA-CL10) 80:20 (PVA-CL20) 70:30 (PVA-CL30) 60:40 (PVA-CL40) and 50:50 (PVA-CL50) were prepared by solution-casting method. The result of structural analysis by the FT-IR technique indicated that the CL extraction process mentioned above efficiently eliminated hemicellulose and lignin components from lotus fiber. The result of a film morphology study using a Scanning Electron Microscope (SEM) indicated that the surface characteristic of films became rougher when the amount of CL increased. The water absorption and water vapor

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

permeability testing showed that the water absorption of PVA-CL films at all ratios decreased compared to the PVA control film. The percent water absorption of PVA-CL films increased with the enhancement of CL content, while the water vapor transmission (WVTR) rate decreased. The highest percent water absorption (97.49 ± 0.29) and WVTR (358 g/hr. m^2) were achieved from PVA-CL50 and PVA-CL10 films, respectively. In addition, the result of the biodegradability analysis indicated that PVA-CL films with a high content of CL possess good biodegradability corresponding to the water absorption property of the film.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเตรียมฟิล์มชีวภาพที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (PVA) และเซลลูโลส (CL) ที่สกัดจากก้านใบบัวหลวงโดยใช้สารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ จากนั้นฟอกขาวเส้นใยด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ปริมาณของเซลลูโลสที่สกัดได้สูงสุดเท่ากับร้อยละ 21.47±1.53 ต่อน้ำหนักแห้งของก้านใบบัวหลวง เตรียมฟิล์มชีวภาพผสมที่อัตราส่วนต่าง ๆ โดยน้ำหนัก คือ 90:10 (PVA-CL10) 80:20 (PVA-CL20) 70:30 (PVA-CL30) 60:40 (PVA-CL40) และ 50:50 (PVA-CL50) ด้วยวิธีการหล่อขึ้นรูปด้วยสารละลาย จากการวิเคราะห์โครงสร้างและหมู่ฟังก์ชันของฟิล์มด้วยเทคนิค FT-IR พบว่าการสกัดเซลลูโลสด้วยกระบวนการข้างต้นสามารถกำจัดเฮมิ-เซลลูโลสและลิกนินออกจากเส้นใยก้านใบบัวหลวงได้ดี ผลการศึกษาสันฐานวิทยาของฟิล์มด้วยเครื่องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงให้เห็นว่าลักษณะพื้นผิวของฟิล์มจะมีความขรุขระมากขึ้นเมื่อปริมาณของ CL เพิ่มขึ้น ผลการศึกษาความสามารถในการดูดซับน้ำและความสามารถในการแพร่ผ่านไอน้ำของฟิล์มแสดงให้เห็นว่า ฟิล์ม PVA-CL ในทุกอัตราส่วน จะมีค่าการดูดซับน้ำลดลงเมื่อเทียบกับฟิล์ม PVA และเมื่อเพิ่มปริมาณ CL จะส่งผลให้ค่าร้อยละการดูดซับน้ำของฟิล์มมีค่าสูงขึ้น แต่ความสามารถในการแพร่ผ่านไอน้ำของฟิล์มจะลดลง โดยฟิล์มที่มีค่าร้อยละการดูดซับน้ำและความสามารถในการแพร่ผ่านไอน้ำสูงที่สุด คือฟิล์ม PVA-CL50 (97.49±0.29) และ PVA-CL10 (358 g/hr. m^2) ตามลำดับ โดยฟิล์มที่มีปริมาณ CL มากจะสามารถย่อยสลายในธรรมชาติได้ดี

คำสำคัญ: พลาสติกชีวภาพ ก้านใบบัวหลวง เซลลูโลส พอลิไวนิลแอลกอฮอล์

บทนำ

ผลิตภัณฑ์พลาสติก เป็นสารประกอบพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่ได้มาจากการสังเคราะห์สารเคมีในอุตสาหกรรมปิโตรเลียม ถึงแม้ว่าวัสดุดังกล่าวจะมีจุดเด่นและมีสมบัติที่มนุษย์พึงพอใจก็ตาม แต่วัสดุสังเคราะห์ประเภทนี้เมื่อผ่านการใช้งานแล้วจะกลายเป็นขยะที่ไม่สามารถย่อยสลายได้ หรืออาจจะย่อยสลายได้แต่ต้องใช้เวลายาวนาน นอกจากนี้ยังทำให้เกิดการเพิ่มขึ้นของขยะซึ่งเป็นสาเหตุในการก่อมลพิษต่อสิ่งมีชีวิตและสิ่งแวดล้อมได้ ด้วยเหตุนี้จึงมีการพัฒนาสมบัติของพลาสติกให้เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมมากขึ้น และยังมีการปรับปรุงสมบัติต่าง ๆ ของแผ่นฟิล์มพลาสติกให้มีความเหมาะสมสำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในแต่ละด้านต่อไป [1] พลาสติกชีวภาพ (Bioplastic) จึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่สามารถลดปริมาณขยะจากพลาสติกได้ เนื่องด้วยเป็นพลาสติกที่เตรียมขึ้นจากวัสดุธรรมชาติ

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

โดยส่วนใหญ่จะได้มาจากส่วนประกอบของพืช หรือสัตว์ เช่น แป้ง เส้นใยจากพืช โปรตีนจากสัตว์ เป็นต้น พลาสติกชีวภาพจึงเป็นวัสดุทางเลือกที่กำลังได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในปัจจุบัน ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานในหลากหลายด้าน เช่น วัสดุทางการแพทย์ วัสดุทางการเกษตร อุตสาหกรรมยา หรืออุตสาหกรรมอาหาร เป็นต้น โดยการเตรียมพลาสติกชีวภาพจะคำนึงถึงความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ และคุณสมบัติที่เหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้ด้านต่าง ๆ เช่น สมบัติเชิงกล สมบัติการดูดซับน้ำ และสมบัติเชิงโครงสร้าง เป็นต้น [2] เซลลูโลส เป็นสารชีวโมเลกุลประเภทคาร์โบไฮเดรต ที่มีโครงสร้างเป็นเส้นตรง จัดเป็นเส้นใยอาหารชนิดไม่ละลายน้ำ และไม่สามารถย่อยได้ด้วยเอนไซม์ในระบบทางเดินอาหารของมนุษย์ เซลลูโลสจัดเป็นพอลิเมอร์ธรรมชาติที่ประกอบด้วยหน่วยย่อยคือ กลูโคส ชนิด β-D-glucose ที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ1, 4-β ไกลโคซิดิก เกิดเป็นสายโซ่ของเซลลูโลสที่มีหมู่ -OH จำนวนมากและมีความแข็งแรง แต่ละสายโซ่จะเรียงขนานกันโดยเกิดแรงยึดเหนี่ยวระหว่างสายโซ่ ทำให้เกิดโมเลกุลที่มีลักษณะเป็นเส้นใย [3] เซลลูโลส เป็นเส้นใยธรรมชาติที่ได้มาจากพืชพบได้มากในบริเวณผนังเซลล์ของพืช เนื่องด้วยเซลลูโลสมีคุณสมบัติเป็นเส้นใยชนิดไม่ละลายในน้ำและมีความเป็นผลึกสูง ปัจจุบันจึงนิยมนำเซลลูโลสมาใช้ในอุตสาหกรรมทดแทนการใช้พลาสติกสังเคราะห์ เช่น เป็นส่วนประกอบของบรรจุภัณฑ์อาหาร บรรจุภัณฑ์ทางการเกษตร หรือวัสดุทางการแพทย์ เป็นต้น [4] พืชที่มีปริมาณเซลลูโลสสูงโดยส่วนใหญ่จะเป็นพืชที่อยู่ในกลุ่มเส้นใย อาทิเช่น อ้อย ผักตบชวา ฟางข้าว กาบกล้วย หรือใบสับปะรด เป็นต้น [5, 6]

จังหวัดปทุมธานี มีดอกไม้ประจำจังหวัด คือ บัวหลวง ชื่อทางวิทยาศาสตร์คือ *Nelumbo nucifera* ชื่อวงศ์: NYMPHACACEAE ชื่อสามัญทั่วไปคือ Sacred lotus คุณประโยชน์หลักของบัวหลวง ได้แก่ ส่วนดอกนิยมนำมาใช้บูชาพระหรือใช้ในพิธีการทางศาสนา บัวหลวงมีสรรพคุณทางยา เกสรบัวหลวงเป็นองค์ประกอบในเกสรทั้งห้า ใช้เป็นยาบำรุงหัวใจ บำรุงกำลัง แก้อาการหน้ามืด วิงเวียนศีรษะ [7] บริเวณลำต้นและก้านใบเป็นส่วนที่มีปริมาณเส้นใยสูง [8] จึงสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุในการทำกระดาษ และเส้นใยสิ่งทอ เป็นต้น พอลิไวนิล-แอลกอฮอล์ (PVA) เป็นพอลิเมอร์สังเคราะห์ชนิดชอบน้ำ (Hydrophilic Polymer) ที่ละลายน้ำได้ง่าย เป็นพอลิเมอร์ที่ถูกนำมาประยุกต์ใช้งานในทางอุตสาหกรรมอย่างแพร่หลาย เช่น อุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์อาหาร อุตสาหกรรมกระดาษและสิ่งทอ เนื่องจากมีคุณสมบัติโดดเด่น คือ สมบัติด้านการยึดติดทางชีวภาพ ง่ายต่อการขึ้นรูป และมีคุณสมบัติเชิงกลที่ดี นอกเหนือจากนี้ PVA ยังถูกนำมาประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์และเภสัชกรรม เนื่องจากความไม่เป็นพิษ และไม่เป็นสารก่อมะเร็งอีกด้วย [9] จากงานวิจัยที่ผ่านพบว่ามีการเตรียมฟิล์มชีวภาพผสมระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และเซลลูโลสที่สกัดจากแหล่งต่าง ๆ เช่น เยื่อกระดาษ [10] สำลี [11] และเศษฟางจากพืช [12] เป็นต้น เพื่อศึกษาและปรับปรุงคุณสมบัติแผ่นฟิล์มให้เหมาะสมกับการนำไปประยุกต์ใช้งานในด้านต่าง ๆ

จากประโยชน์ของเซลลูโลสและพอลิไวนิล-แอลกอฮอล์ดังที่ได้กล่าวมา ผู้วิจัยจึงมุ่งเน้นที่จะศึกษาวิธีการสกัดแยกเซลลูโลสจากก้านใบบัวหลวงให้อยู่ในรูปของพอลิเมอร์ธรรมชาติที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้หลากหลายมากขึ้น โดยศึกษากระบวนการสกัดเซลลูโลสจากก้านใบบัวหลวง ซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรจำนวนมากในจังหวัดปทุมธานี เพื่อนำไปใช้เป็นวัสดุตั้งต้นในการเตรียมฟิล์มชีวภาพผสมที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม ศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเตรียมฟิล์มผสมระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และเซลลูโลสที่สกัดจากก้านใบบัวหลวง ซึ่งยังไม่มีงานวิจัยที่ศึกษาการเตรียมฟิล์มผสมระหว่าง PVA และเซลลูโลสที่สกัดจากก้านใบบัวหลวงมาก่อน จากนั้นศึกษาคุณสมบัติของฟิล์มที่เตรียมได้ ได้แก่ คุณสมบัติเชิงโครงสร้าง สัณฐานวิทยาของฟิล์ม ความสามารถในการดูดซับน้ำ ความสามารถในการแพร่ผ่านไอน้ำ และความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพของฟิล์ม เพื่อเป็นแนวทางในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุทดแทน

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

พลาสติกสังเคราะห์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมต่อไป อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มมูลค่าให้แก่ของเหลือทิ้งทางการเกษตรอีกด้วย

วิธีดำเนินการวิจัย

การเตรียมตัวอย่างก้านใบบัวหลวง

เก็บตัวอย่างก้านใบบัวหลวงปทุมธานีพันธุ์สีชมพู จากบริเวณสระน้ำภายในมหาวิทยาลัยราชภัฏ-วไลยอลงกรณ์ มาล้างด้วยน้ำสะอาดและหั่นเป็นชิ้นเล็ก ๆ ขนาดประมาณ 3 เซนติเมตร นำไปตากให้แห้งเป็นเวลา 24-48 ชั่วโมง จากนั้นนำมาอบไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำไปปั่นให้ละเอียดและเก็บผงตัวอย่างในโถดูดความชื้นก่อนนำไปใช้ในการสกัดเซลลูโลสต่อไป

การสกัดเซลลูโลสจากก้านใบบัวหลวง [13]

ชั่งผงก้านใบบัวหลวงน้ำหนัก 50.00 กรัม ต้มด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (NaOH) ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ ในอัตราส่วนผงก้านใบบัวหลวงต่อโซเดียม ไฮดรอกไซด์ 1 กรัม ต่อ 20 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จะได้สารแขวนลอยสีดำ จากนั้นตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้องแล้วนำมากรองแยกเยื่อออกด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ ล้างด้วยน้ำกลั่นจนกระทั่งน้ำที่ล้างมีสภาวะเป็นกลาง ทดสอบความเป็นกลางของน้ำล้างด้วย pH meter นำเยื่อที่กรองแล้วไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ปั่นเส้นใยที่ได้ด้วยเครื่องปั่นก่อนนำมาฟอกขาวด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ (H_2O_2) ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยมวลต่อปริมาตร อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ตั้งทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นกรองเยื่อที่ได้อีกครั้งด้วยเครื่องกรองสุญญากาศ ล้างด้วยน้ำกลั่นและทดสอบความเป็นกลางของน้ำล้างด้วย pH meter นำเส้นใยที่ได้มาอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ปั่นเส้นใยที่ได้ให้ละเอียดอีกครั้ง ก่อนนำไปคัดแยกขนาดอนุภาคของผงเซลลูโลสที่สกัดได้ให้มีขนาด 150 ไมโครเมตร ด้วยเครื่องแยกขนาดสาร คำนวณร้อยละผลผลิตของเส้นใยเซลลูโลสที่ได้จากสมการที่ (1)

$$\% \text{ Yield} = \frac{W_c}{W_0} \times 100 \qquad (1)$$

เมื่อ W_0 คือ น้ำหนักของก้านใบบัวหลวงก่อนการสกัด (กรัม)

W_C คือ น้ำหนักของเซลลูโลสที่สกัดได้ (กรัม)

การเตรียมฟิล์มชีวภาพผสมระหว่างพอลิไวนิลแอลกอฮอลล์และเซลลูโลสจากก้านใบบัวหลวง

1. การเตรียมสารละลายเซลลูโลสจากก้านใบบัวหลวง

เตรียมสารละลายเซลลูโลสความเข้มข้นร้อยละ 0.50 โดยมวลต่อปริมาตร ชั่งผงเซลลูโลสจากก้านใบบัวหลวงน้ำหนัก 0.50 กรัม ละลายในสารละลายผสมโซเดียมไฮดรอกไซด์และยูเรียปริมาตร 100 มิลลิลิตร (ชั่งโซเดียมไฮดรอกไซด์น้ำหนัก 6.00 กรัมผสมกับยูเรีย 4.00 กรัม ละลายในน้ำกลั่นและปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร) คนให้เข้ากันด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ตั้งสารละลายทิ้งไว้ให้เย็นที่อุณหภูมิห้อง จากนั้นปรับ pH ของสารละลายให้เป็นกลางด้วยกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 6 โมลาร์ คนสารละลายอย่างต่อเนื่อง ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จนกระทั่งสารละลายเป็นเนื้อเดียวกัน

2. การเตรียมสารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์

เตรียมสารละลาย PVA ความเข้มข้นร้อยละ 2 โดยมวลต่อปริมาตร โดยชั่งพอลิไวนิลแอลกอฮอลล์มา 2.00 กรัม ละลายในน้ำกลั่น ปริมาตร 100 มิลลิลิตร คนสารละลายอย่างต่อเนื่องด้วยเครื่องกวนแม่เหล็กไฟฟ้าที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จนกระทั่งได้สารละลายใส

3. การเตรียมฟิล์มชีวภาพผสมระหว่าง PVA และเซลลูโลสจากก้านใบบัวหลวง (PVA-CL)

ผสมสารละลาย PVA และCLที่เตรียมไว้ใน

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

อัตราส่วนต่าง ๆ โดยน้ำหนัก คือ 90:10 (PVA-CL10) 80:20 (PVA-CL20) 70:30 (PVA-CL30) 60:40 (PVA-CL40) และ 50:50 (PVA-CL50) ดังแสดงในตารางที่ 1 ปรับปริมาตรรวมสารละลายเป็น 40 มิลลิลิตร ด้วยน้ำกลั่น (น้ำหนักเนื้อสารรวมเท่ากับ 0.20 กรัม) เพื่อควบคุมความหนาของฟิล์ม คนสารละลายให้เป็นเนื้อเดียวกันที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที แล้วเทลงในแม่พิมพ์ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร และนำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสในตู้อบลมร้อนสุญญากาศ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ลอกเก็บฟิล์มที่เตรียมได้ในโถดูดความชื้นก่อนนำไปทดสอบคุณสมบัติของฟิล์มต่อไป

ตารางที่ 1 พอลิไวนิลแอลกอฮอลล์และเซลลูโลสที่ใช้ในการขึ้นรูปฟิล์มพลาสติกชีวภาพผสม (PVA-CL) ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

สูตรพอลิเมอร์ผสม	2% w/v PVA		0.5% w/v CL		น้ำกลั่น
	น้ำหนักสาร (g)	ปริมาตร (mL)	น้ำหนักสาร (g)	ปริมาตร (mL)	ปริมาตร (mL)
PVA	0.20	10.00	-	-	30.00
CL	-	-	0.20	40.00	-
PVA-CL10	0.18	9.00	0.02	4.00	27.00
PVA-C 20	0.16	8.00	0.04	8.00	24.00
PVA-C 30	0.14	7.00	0.06	12.00	21.00
PVA-CL40	0.12	6.00	0.08	16.00	18.00
PVA-CL50	0.10	5.00	0.10	20.00	15.00

การทดสอบคุณสมบัติฟิล์ม PVA-CL

1. การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชัน

การศึกษาหมู่ฟังก์ชันของสารที่เป็นองค์ประกอบในฟิล์มชีวภาพผสม PVA-CL ด้วยเครื่อง Fourier Transform Infrared Spectroscope (FTIR) ในรูปแบบ Attenuated Total Reflectance (ATR) โดยช่วงสเปกตรัมที่บันทึกอยู่ในช่วงเลขคลื่น 4000– 400 cm^{-1}

2. การศึกษาสัณฐานวิทยา

ศึกษาลักษณะพื้นผิวทางสัณฐานวิทยาของฟิล์มชีวภาพผสม PVA-CL ที่เตรียมได้ในแต่ละอัตราส่วน โดยใช้เครื่องอิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชั่น (Field Emission Scanning Electron Microscope, FESEM) รุ่น JEOL/JSM-7610F ที่กำลังขยาย 5000 เท่า กำลังไฟฟ้า 1 kV ตัดฟิล์มตัวอย่างขนาดประมาณ 1 x 1 cm และนำไปทำการฉาบผิวด้วยทองคำด้วยเครื่อง sputter-coater ก่อนนำไปทำการศึกษาลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม

3. การทดสอบความสามารถในการดูดซับน้ำ [14]

การทดสอบความสามารถในการดูดซับน้ำของฟิล์ม ทำได้โดยวิธีการวิเคราะห์โดยน้ำหนักโดยตัดฟิล์มตัวอย่าง ขนาด 4x4 เซนติเมตร ตัวอย่างละ 3 ชิ้น นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง เก็บในโถดูดความชื้นก่อนนำไปทดสอบ ชั่งน้ำหนักของฟิล์มก่อนการดูดซับน้ำ (W_0) จากนั้นแช่ฟิล์มตัวอย่างในกล่องพลาสติกที่มีน้ำกลั่นปริมาตร 10 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 5 นาที เมื่อครบกำหนดเวลา วางฟิล์มที่ดูดซับน้ำแล้วบนกระดาษกรองเบอร์ 1 ที่ชั่งน้ำหนักเรียบร้อยแล้ว จากนั้นนำไปอบที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที นำฟิล์มและกระดาษกรองไปชั่งน้ำหนัก จากนั้นคำนวณน้ำหนักฟิล์มที่หักลบกับน้ำหนักกระดาษกรองแล้วบันทึกเป็นค่า W_1 คำนวณค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำของฟิล์มได้จากสมการที่ (2)

$$\% \text{ Water absorption} = \frac{W_0 - W_1}{W_0} \times 100 \qquad (2)$$

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

เมื่อ W_0 คือ น้ำหนักฟิล์มทดสอบก่อนการดูดซับน้ำ (กรัม)

W_1 คือ น้ำหนักฟิล์มทดสอบหลังการดูดซับน้ำ (กรัม)

4. ศึกษาความสามารถในการแพร่ผ่านไอน้ำ [15]

ศึกษาความสามารถในการแพร่ผ่านไอน้ำของฟิล์มจากอัตราการแพร่ผ่านไอน้ำของฟิล์ม (Water Vapor Transmission rate; WVTR) โดยอาศัยหลักการวิเคราะห์โดยน้ำหนัก (Gravimetric Method) ทำการตัดฟิล์มตัวอย่าง PVA-CL ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 cm ตัวอย่างละ 3 ชิ้น แล้วนำไปใช้เป็นฟิล์มสำหรับปิดปากกล่องพลาสติกที่มีเม็ดซิลิกาเจลบรรจุอยู่ 1.00 กรัม ปิดขอบซึ่งเป็นรอยต่อระหว่างฟิล์มกับภาชนะให้สนิทด้วยพาราฟิล์ม ชั่งน้ำหนักกล่องที่ปิดสนิทด้วยเครื่องชั่ง 4 ตำแหน่ง บันทึกที่แน่นอนเป็นน้ำหนักเริ่มต้น นำไปวางในโถดูดความชื้นที่บรรจุโซเดียมคลอไรด์อิ่มตัว จากนั้นนำกล่องพลาสติกออกมาชั่งน้ำหนักที่แน่นอนทุกวัน เป็นเวลา 7 วัน คำนวนค่าอัตราการแพร่ผ่านไอน้ำของฟิล์มจากสมการที่ (3)

$$WVTR = \frac{G}{t\,A} \qquad (3)$$

เมื่อ WVTR คือ อัตราการแพร่ผ่านไอน้ำ (กรัมต่อชั่วโมงตารางเมตร; g/hr.m^{-2})

G คือ น้ำหนักที่เปลี่ยนแปลงของกล่องพลาสติก(กรัม)

t คือ เวลา (ชั่วโมง)

A คือ พื้นที่ของการแพร่ผ่านหรือพื้นที่ของปากกล่องพลาสติก (ตารางเมตร)

5. การศึกษาความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพของฟิล์ม [16]

ศึกษาความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพ โดยกระบวนการฝังดินของฟิล์ม PVA-CL ที่อัตราส่วนต่าง ๆ โดยตัดฟิล์มขนาด 4x4 เซนติเมตร ตัวอย่างละ 3 ชิ้น นำไปอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที นำฟิล์มตัวอย่างใส่ในถุงตาข่าย บันทึกน้ำหนักเริ่มต้นของแผ่นฟิล์มและถุงตาข่าย (A_0) จากนั้นชั่งดินน้ำหนัก 500 กรัม ใส่ในถุงเพาะชำ นำฟิล์มตัวอย่างที่อยู่ในถุงตาข่ายฝังลงในดินที่ระดับความลึกจากผิวดินประมาณ 10 เซนติเมตร กลบด้วยดินและตั้งทิ้งไว้ในสภาวะแวดล้อมภายนอกอาคาร ไม่มีการให้น้ำ จนครบระยะเวลาที่กำหนด คือ 1, 3, 5, 7 และ 14 วัน เมื่อครบกำหนดเวลา นำฟิล์มตัวอย่างและถุงตาข่ายที่กำจัดเศษวัสดุอื่น ๆ ที่ปนมากับฟิล์มตัวอย่างออก นำไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำฟิล์มไปชั่งและบันทึกน้ำหนักหลังการฝังดินของฟิล์มตัวอย่าง (A_1) คำนวณการย่อยสลายทางชีวภาพของฟิล์มโดยใช้สมการดังนี้

$$\%\ \text{Biodegradability} = \frac{A_0 - A_1}{A_0} \times 100 \qquad (4)$$

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

การสกัดเซลลูโลสจากก้านใบบัวหลวง

การสกัดเซลลูโลสจากก้านใบของดอกบัวหลวงด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.5 โมลาร์ และ ฟอกขาวเส้นใยด้วยไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 10 โดยมวลต่อปริมาตร เมื่อคำนวณหาค่าร้อยละผลผลิตของเซลลูโลสที่ได้ มีค่าเท่ากับ 21.47±1.53 ต่อน้ำหนักแห้งของก้านใบบัวหลวง เซลลูโลสที่สกัดได้มีลักษณะเป็นผงสีเหลืองอ่อนละเอียด ขนาดอนุภาคเท่ากับ 150 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 1

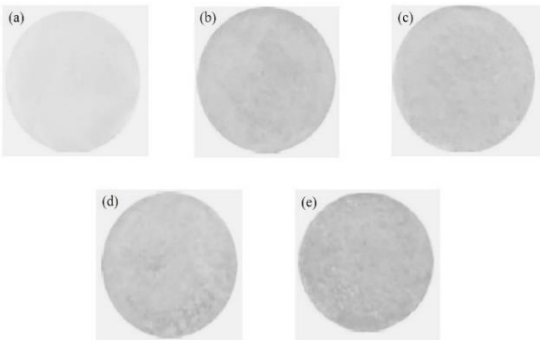
รูปที่ 1 รูปแสดงลักษณะของ (a) ก้านใบบัวหลวงปทุมธานี พันธุ์สีชมพู (b) ผงเซลลูโลสที่สกัดจากก้านใบบัวหลวง

การเตรียมฟิล์มชีวภาพผสม PVA-CL

การเตรียมฟิล์มชีวภาพ PVA-CL ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ทำได้โดยใช้วิธีการหล่อขึ้นรูปด้วยสารละลาย ผล

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

การศึกษาลักษณะทางกายภาพของฟิล์มชีวภาพ PVA-CL ที่อัตราส่วนต่าง ๆ แสดงดัง รูปที่ 2



รูปที่ 2 ลักษณะทางกายภาพของฟิล์ม PVA-CL ที่อัตราส่วนต่าง ๆ (a) PVA-CL10 (b) PVA-CL20 (c) PVA-CL30 (d) PVA-CL40 และ (e) PVA-CL50

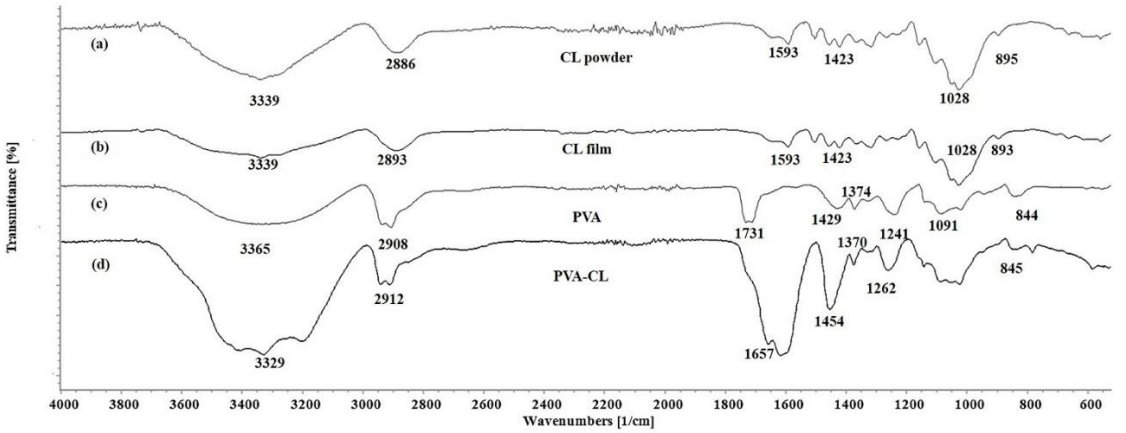
จากภาพแสดงให้เห็นว่าฟิล์มชีวภาพผสม PVA-CL สามารถขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ในทุกอัตราส่วน สามารถลอกฟิล์มออกจากแม่พิมพ์ได้โดยไม่เกิดการแตกหัก โดยพื้นผิวของฟิล์มจะมีความขรุขระและความเปราะแตกมากขึ้นเมื่อปริมาณเซลลูโลสในฟิล์มเพิ่มขึ้น

การศึกษาคุณสมบัติฟิล์มชีวภาพ PVA-CL

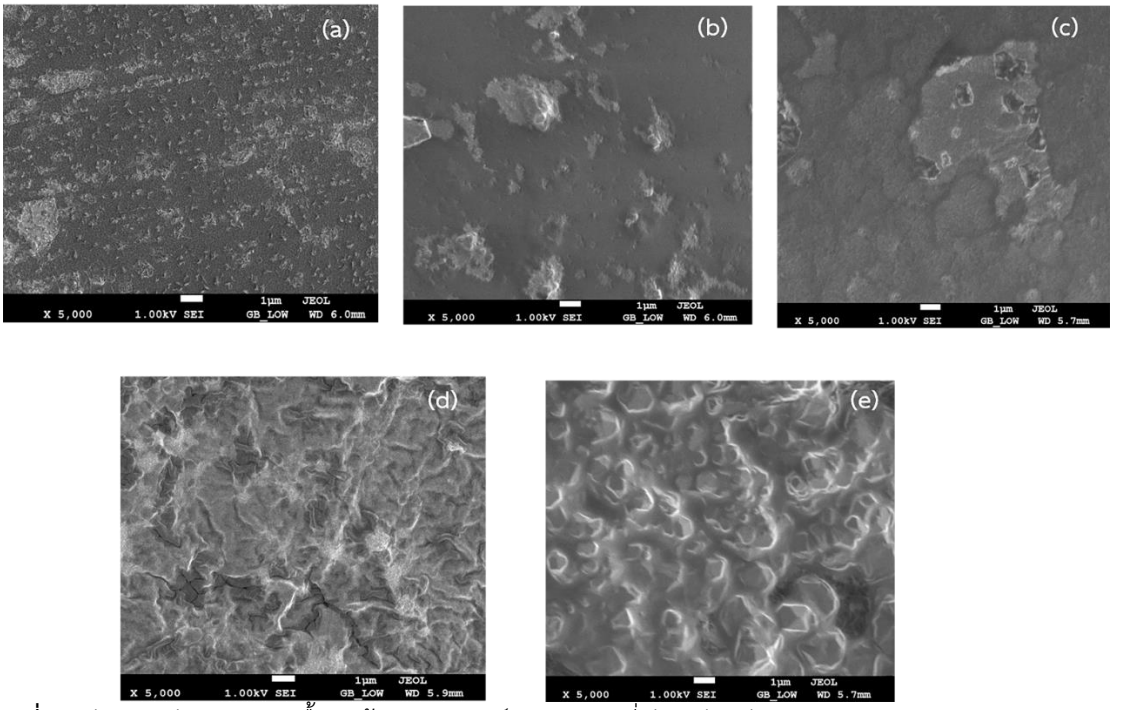
1. การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันหลักของฟิล์ม

วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันที่สำคัญของเซลลูโลสที่สกัดจากก้านใบบัวหลวง ฟิล์ม CL ฟิล์ม PVA และฟิล์ม PVA-CL ด้วยเทคนิค FTIR ในช่วงเลขคลื่น 4000-600 cm^{-1} ผล FT-IR สเปคตรัม แสดงดังรูปที่ 3 โดย FTIR สเปคตรัมของผงเซลลูโลสจากก้านใบบัวหลวงและฟิล์ม CL (รูปที่ 3a, b) ปรากฏพีคสำคัญที่ตำแหน่งเลขคลื่นต่าง ๆ ได้แก่ 3339 cm^{-1} (-OH stretching), 2886 และ 2893 cm^{-1} (C-H stretching), 1423 cm^{-1} (C-H bending) 1028 cm^{-1} (C-O-C stretching) และที่ตำแหน่ง 895 และ 893 cm^{-1} (β-glycosidic linkage) [17] ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันสำคัญของเซลลูโลสทางการค้า [18] นอกจากนี้สเปคตรัมของเซลลูโลสที่สกัดจากก้านใบบัวหลวง ยังไม่พบพีคที่ตำแหน่ง ~ 1700 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคที่แสดงถึงการสั่นแบบยืดของหมู่คาร์บอนิล (-C=O) ในเฮมิเซลลูโลสหรือลิกนิน และที่เลขคลื่น ~1200 cm^{-1} ที่แสดงถึงกลุ่ม COO ในเฮมิเซลลูโลส แสดงว่าการการฟอกเส้นใยด้วยกระบวนการข้างต้นสามารถกำจัดเฮมิเซลลูโลสและลิกนินออกจากเส้นใยก้านใบบัวหลวงได้ดี (19) ฟิล์ม PVA (รูปที่ 3c) ปรากฏพีคสำคัญที่ตำแหน่ง 3365 cm^{-1} (-OH stretching), 2908 cm^{-1} (C-H stretching), 1731 cm^{-1} (C=O stretching), 1429, 1374 และ 1241 cm^{-1} (C-H_2 bending), 1091 cm^{-1} (C-OH stretching) และ 844 cm^{-1} (C-C stretching) (20) จากผลการศึกษา FTIR สเปคตรัมของฟิล์มผสม PVA-CL (รูปที่ 3d) พบพีคที่แสดงถึงการสั่นแบบยืดของหมู่ไฮดรอกซิล (-OH stretching) ที่ตำแหน่ง 3329 cm^{-1} และพีคมีความกว้างมากขึ้นเนื่องจากมีพันธะไฮโดรเจนที่เพิ่มขึ้นจากหมู่ไฮดรอกซิลของ PVA และเซลลูโลส ซึ่งการเกิดพันธะไฮโดรเจนดังกล่าวทำให้การสั่นแบบยืดของพันธะ C-H ในแผ่นฟิล์ม PVA-CL ลดลง เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์ม CL และ PVA พิจารณาได้จากความสูงของพีคที่ตำแหน่ง ~2900 ลดลงและเกิดการเลื่อนไปยังเลขคลื่นที่สูงขึ้น (2912 cm^{-1}) แสดงถึงการเกิดแรงกระทำระหว่าง PVA และ C-H_2 ในเซลลูโลส [21, 22] นอกจากนี้ยังปรากฏพีคที่ตำแหน่ง 1657 cm^{-1} ที่แสดงถึงการสั่นแบบยืดของพันธะ H-O-H ของหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างรวมทั้งแผ่นฟิล์ม PVA-CL ยังปรากฏพีคที่แสดงถึงลักษณะสำคัญของโมเลกุล PVA ได้แก่ พีคที่ตำแหน่ง 1454, 1370 และ 1262 cm^{-1} (C-H_2 bending) และ 1088 cm^{-1} (C-OH stretching) จากผล FTIR สเปคตรัมของฟิล์ม PVA-CL แสดงให้เห็นว่าโมเลกุลของ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์และเซลลูโลสเกิดการรวมตัวและสร้างพันธะระหว่างสายโซ่ทำให้เกิดการขึ้นรูปเป็นฟิล์มพอลิเมอร์ผสมได้ [12]

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)



รูปที่ 3 FT-IR สเปคตรัมของ (a) ผงเซลลูโลสจากก้านใบบัวหลวง (b) ฟิล์ม CL (c) ฟิล์ม PVA และ (d) ฟิล์ม PVA-CL



รูปที่ 4 ลักษณะสัณฐานวิทยาพื้นผิวด้านบนของฟิล์ม PVA-CL ที่อัตราส่วนต่าง ๆ (a) PVA-CL10, (b) PVA-CL20, (c) PVA-CL30, (d) PVA-CL40 และ (e) PVA-CL50

2. สัณฐานวิทยาของฟิล์ม

การศึกษาสัณฐานวิทยาบริเวณพื้นผิวของฟิล์มชีวภาพผสม PVA-CL ที่อัตราส่วนต่าง ๆ ด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดชนิดฟิลด์อิมิสชั่นที่กำลังขยาย 5000 เท่า แสดงดังรูปที่ 4 จากภาพ SEM แสดงให้เห็นว่าลักษณะพื้นผิวของฟิล์ม PVA-CL จะมีความขรุขระเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของเซลลูโลสเพิ่มขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะทางกายภาพของฟิล์ม PVA-CL ที่อัตราส่วนต่าง ๆ (รูปที่ 2) โดยฟิล์ม PVA-CL10 จะมีพื้นผิวเรียบเนียน เนื่องจากสารละลาย PVA และ CL ยังสามารถละลายเข้ากันได้ดี แต่เมื่อปริมาณของ CL ในฟิล์มผสมเพิ่มขึ้น ฟิล์มจะเริ่มมีพื้นผิวที่ขรุขระมากขึ้น เนื่องจากการเพิ่มปริมาณเซลลูโลสทำให้ความสามารถในการละลายและการกระจายตัวของเซลลูโลสในสารละลายต่ำลง และในกระบวนการขึ้นรูปฟิล์มด้วยวิธีการหล่อขึ้นรูปด้วยสารละลายจะมีการกำจัดน้ำออกจากฟิล์ม ฟิล์มจึงมีส่วนที่

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

มีความเป็นผลึกมากขึ้น ความขรุขระบริเวณพื้นผิวของฟิล์ม อาจเป็นผลเนื่องมาจากการแยกเฟสบางส่วนระหว่างเฟสของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และเซลลูโลสในฟิล์ม [23]

3. ความสามารถในการดูดซับน้ำของฟิล์ม

ผลการวิเคราะห์ความสามารถในการดูดซับน้ำ (% Water Absorption) ของฟิล์มทดสอบ PVA-CL ที่อัตราส่วนต่าง ๆ โดยวิธีการวิเคราะห์โดยน้ำหนัก แสดงดังตารางที่ 2

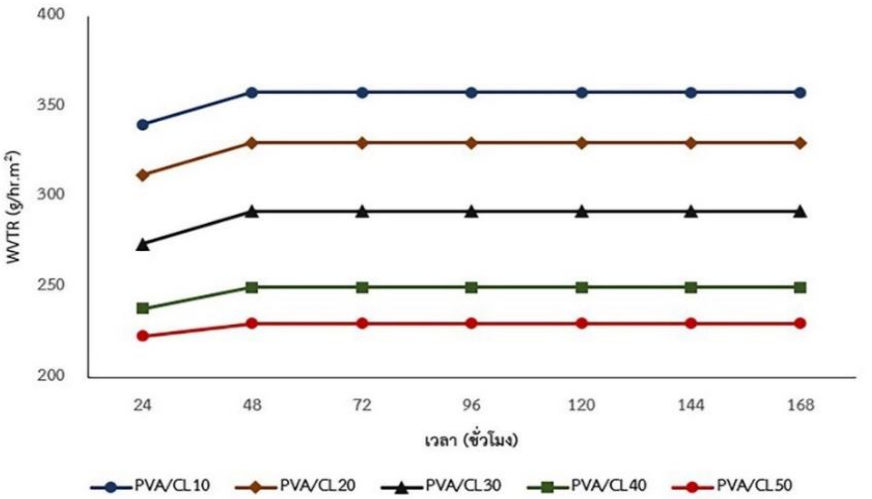
ตารางที่ 2 ร้อยละการดูดซับน้ำของฟิล์ม PVA-CL ที่อัตราส่วนต่าง ๆ

ฟิล์ม	% Water adsorption
PVA	151.29 ± 0.78
CL	90.18 ± 0.67
PVA-CL10	92.16 ± 0.37
PVA-CL20	93.15 ± 0.20
PVA-CL30	94.31 ± 0.21
PVA-CL40	96.61 ± 0.30
PVA-CL50	97.49 ± 0.29

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าฟิล์ม PVA จะมีค่าการดูดซับน้ำสูงที่สุด (151.29 ± 0.78%) เนื่องจากโมเลกุลของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิลจำนวนมาก ซึ่งมีคุณสมบัติชอบน้ำ และฟิล์ม CL จะมีค่าการดูดซับน้ำต่ำที่สุด เนื่องจากโมเลกุลของ CL มีความเป็นผลึกสูง ทำให้โมเลกุลของน้ำแทรกตัวเข้าไปในฟิล์มได้ยาก เมื่อพิจารณาความสามารถในการดูดซับน้ำของฟิล์มชีวภาพผสม PVA-CL ที่อัตราส่วนต่าง ๆ พบว่าเมื่อปริมาณ CL เพิ่มขึ้น ความสามารถในการดูดซับน้ำของฟิล์มจะเพิ่มขึ้นเล็กน้อย เนื่องจากฟิล์มผสมที่มีปริมาณ CL มาก ความสามารถในการกระจายตัวของเซลลูโลสในสารละลายจะต่ำลง เมื่อขึ้นรูปเป็นฟิล์มจะมีลักษณะพื้นผิวที่ขรุขระมากขึ้น (รูปที่ 2) และเมื่อนำฟิล์มแช่น้ำไว้เป็นเวลานานจะทำให้เซลลูโลสที่ไม่ละลายในฟิล์มบางส่วนเกิดการดูดซับน้ำบริเวณหมู่ไฮดรอกซิลที่เหลืออยู่และเกิดการพองตัวแต่ยังมีความคงรูป หรือมีลักษณะคล้ายไฮโดรเจล ส่งผลให้ค่าความสามารถในการดูดซับน้ำของฟิล์ม PVA-CL มีค่าสูงขึ้น (11) โดยฟิล์ม PVA-CL50 จะมีค่า ร้อยละการดูดซับน้ำสูงสุด (97.49 ± 0.29)

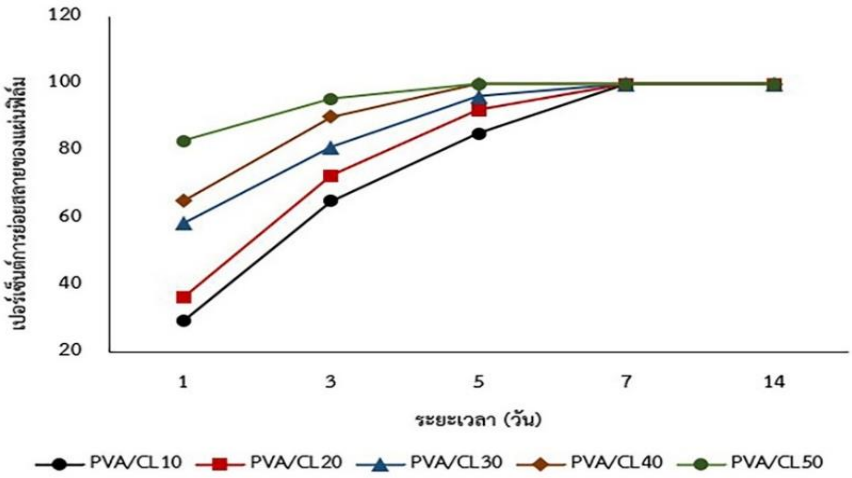
4. ความสามารถในการแพร่ผ่านไอน้ำของฟิล์ม

ผลการวิเคราะห์อัตราการแพร่ผ่านไอน้ำ (Water Vapor Transmission Rate; WVTR) ของฟิล์มทดสอบ PVA-CLที่อัตราส่วนต่าง ๆ ด้วยวิธีการวิเคราะห์โดยน้ำหนัก (Gravimetric method) เป็นเวลา 168 ชั่วโมง (7 วัน) แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 อัตราการแพร่ผ่านไอน้ำ (WVTR) ของฟิล์ม PVA-CL ที่อัตราส่วนต่าง ๆ เมื่อเวลาผ่านไป 7 วัน

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)



รูปที่ 6 เปอร์เซ็นต์การย่อยสลายของฟิล์ม PVA-CL ที่อัตราส่วนต่าง ๆ เมื่อเวลาผ่านไป 14 วัน

ผลการวิเคราะห์อัตราการแพร่ผ่านไอน้ำของฟิล์ม PVA-CL ที่อัตราส่วนต่าง ๆ พบว่า อัตราการแพร่ผ่านไอน้ำของฟิล์มพลาสติกชีวภาพ PVA-CL มีแนวโน้มสูงขึ้นเมื่อเวลาผ่านไป และเมื่อเวลาผ่านไป 48 ชั่วโมง (2 วัน) อัตราการแพร่ผ่าน ไอน้ำของฟิล์มจะเริ่มคงที่ในทุกอัตราส่วน และที่เวลา 72 ชั่วโมง ฟิล์ม PVA/CL10 จะมีอัตราการแพร่ผ่านไอน้ำสูงสุด เท่ากับ 358 g/hr.m^2 และฟิล์ม PVA-CL50 จะมีอัตราการแพร่ผ่านไอน้ำต่ำสุด เท่ากับ 230 g/hr.m^2 ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าปริมาณของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์และเซลลูโลสในฟิล์มมีผลต่อค่าอัตราการแพร่ผ่านไอน้ำของฟิล์มพลาสติกชีวภาพ กล่าวคือ เมื่อปริมาณเซลลูโลสเพิ่มขึ้น การแพร่ผ่านไอน้ำของฟิล์มจะมีค่าลดต่ำลง เนื่องจากเซลลูโลสเป็นโมเลกุลที่มีการจัดเรียงโครงสร้างที่เป็นระเบียบ ทำให้เซลลูโลสมีความเป็นผลึกสูง (Crystallinity) รวมทั้งปริมาณของหมู่ไฮดรอกซิลในสายโซ่ของพอลิไวนิลแอลกอฮอล์จะมีปริมาณลดลง ทำให้ฟิล์มพลาสติกชีวภาพมีสมบัติในการกีดกันการแพร่ผ่านไอน้ำมากขึ้นส่งผลให้ค่าอัตราการแพร่ผ่านไอน้ำของฟิล์มต่ำลง [15]

5. ความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพของฟิล์ม

ผลการวิเคราะห์ความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพของฟิล์มทดสอบ PVA-CLที่อัตราส่วนต่าง ๆ ด้วยวิธีการวิเคราะห์โดยน้ำหนักเป็นเวลา 14 วัน ค่าร้อยละการย่อยสลายของฟิล์ม แสดงดังรูปที่ 6 จากการศึกษาความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพของฟิล์ม PVA-CL ที่อัตราส่วนต่าง ๆ พบว่าเมื่อเวลาผ่านไป 1 วัน ฟิล์ม PVA-CL50 จะมีการย่อยสลายได้ทางชีวภาพสูงที่สุด (82.97%) และฟิล์ม PVA-CL10 จะมีการย่อยสลายได้ทางชีวภาพต่ำที่สุด (29.31%) โดยฟิล์ม PVA/CL40 และ PVA/CL50 สามารถย่อยสลายได้หมดภายในเวลา 5 วัน ในขณะที่ฟิล์ม PVA-CL10 PVA-CL20 และ PVA-CL30 สามารถย่อยสลายได้หมดภายในเวลา 7 วัน จากผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าฟิล์มผสม PVA-CL จัดเป็นฟิล์มที่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติโดยความชื้นและแบคทีเรียในดิน และปริมาณเซลลูโลสในฟิล์มที่เพิ่มขึ้น จะส่งผลให้ฟิล์มมีความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพที่ดีขึ้นด้วย เนื่องด้วยฟิล์มที่มีปริมาณเซลลูโลสมากจะมีความสามารถในการดูดซับน้ำสูง (ดังตารางที่ 2) ทำให้ฟิล์มสามารถดูดความชื้นในดินได้ดี นอกจากนี้เซลลูโลสยังมีคุณสมบัติในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพด้วยจุลินทรีย์ จึงส่งผลให้ฟิล์มมีอัตราการย่อยสลายทางชีวภาพที่ดี [24]

สรุปผล

การสกัดเซลลูโลสจากก้านใบบัวหลวงด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์และฟอกขาวด้วย

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

สารละลายโตรเจนเปอร์ออกไซด์เป็นกระบวนการที่มีประสิทธิภาพในการกำจัดเฮมิเซลลูโลสและลิกนินออกจากเส้นใยได้ดี ค่าร้อยละผลผลิตของเซลลูโลสที่ได้ มีค่าเท่ากับ 21.47 ± 1.53 ฟิล์มชีวภาพผสม PVA-CL ที่อัตราส่วนต่าง ๆ สามารถขึ้นรูปเป็นฟิล์มได้ด้วยวิธีการหล่อขึ้นรูปด้วยสารละลาย โดยเกิดการสร้างพันธะระหว่างสายโซ่ PVA และ CL ยืนยันได้จากผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค FT-IR เมื่อเพิ่มปริมาณ CL ในฟิล์มจะทำให้พื้นผิวของฟิล์มมีความขรุขระมากขึ้น ร้อยละการดูดซับน้ำของฟิล์มมีค่าสูงขึ้น แต่ความสามารถในการแพร่ผ่านไอน้ำของฟิล์มจะลดลง โดยฟิล์มที่มีค่าร้อยละการดูดซับน้ำและความสามารถในการแพร่ผ่านไอน้ำสูงที่สุด คือฟิล์ม PVA-CL50 (97.49 ± 0.29) และ PVA-CL10 (358 g/hr. m^2) ตามลำดับ ผลการศึกษาความสามารถในการย่อยสลายได้ทางชีวภาพในดินของฟิล์มแสดงให้เห็นว่า ฟิล์มที่มีปริมาณ CL สูงจะย่อยสลายได้ดี ซึ่งมีความสัมพันธ์กับความสามารถในการดูดซับน้ำของฟิล์ม กล่าวได้ว่าแผ่นฟิล์มพลาสติกชีวภาพผสมระหว่างพอลิ-ไวนิลแอลกอฮอล์และเซลลูโลสที่สกัดจากก้านใบบัวหลวงถือเป็นวัสดุทางเลือกที่มีความเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม สามารถลดปริมาณการใช้พอลิเมอร์สังเคราะห์ได้ นอกจากนี้หากมีการศึกษาและพัฒนาสมบัติต่าง ๆ เช่น สมบัติเชิงกลของฟิล์มให้มีความเหมาะสม ก็สามารถนำฟิล์มพลาสติกผสม PVA-CL ไปประยุกต์ใช้งานในด้านบรรจุภัณฑ์อาหาร หรือวัสดุทางการเกษตรในลำดับต่อไปได้ ถือเป็นการเพิ่มมูลค่าให้แก่ของเหลือใช้ทางการเกษตร และลดปัญหาขยะในสิ่งแวดล้อมได้อีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ศูนย์วิทยาศาสตร์ และคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏ-วไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ ที่ให้การสนับสนุนอุปกรณ์ สารเคมี และ เครื่องมือต่าง ๆ ในการทำวิจัยครั้งนี้ทำงานวิจัยชิ้นนี้ให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

1. Zhao G, Lyu X, Lee J, Cui X, Chen WN. Biodegradable and transparent cellulose film prepared eco-friendly from durian rind for packaging application. Food Packag Shelf Life. 2019;21:1-6.
2. Ratanasongtham P, Nikhammo A, Phlachit N. The Study of Water Absorbability and Water Permeability of Bioplastic Blend Film Between Cassava Starch Glycerol and Cellulose Extracted from Monthong Durian Bark. The 8th Academic Science and Technology Conference; 26 March 2021; Valaya Alongkorn Rajabhat University, Pathumthani; 2021. p. 529-36. Thai.
3. Kabir SMF, Sikdar PP, Haque B, Bhuiyan MAR, Ali A, Islam MN. Cellulose-based hydrogel materials: chemistry, properties and their prospective applications. Prog Biomater. 2018; 7(3):153–74.
4. Klemm D, Heublein B, Fink HP, Bohn A. Cellulose: Fascinating biopolymer and sustainable raw material. Angew Chemie - Int Ed. 2005;44(22):3358-93.
5. Sun D, Onyianta AJ, O'Rourke D, Perrin G, Popescu CM, Saw LH. A process for deriving high quality cellulose nanofibrils from water hyacinth invasive species. Cellulose. 2020; 27(7):3727-40.
6. Tongsawang A, Suwannawatanamatee K. [The improvement of paper properties from banana pulp with carboxymethyl cellulose]. J Appl Res Sci Tech. 2022;21(1):11-21. Thai.

7. Singchai B, Trakulpukdee N, Thonglim S. Essential oil from *nelumbo nucifera* stamen. J Sci Tech. 2017;25(1):27-34.

8. Chen Y, Wu Q, Huang B, Huang M, Ai X. Isolation and characteristics of cellulose and nanocellulose from lotus leaf stalk agro-wastes. Bioresources. 2015;10(1):684–96.

9. Tanwar R, Gupta V, Kumar P, Kumar A, Singh S, Gaikwad KK. Development and characterization of PVA-starch incorporated with coconut shell extract and sepiolite clay as an antioxidant film for active food packaging applications. Int J Biol Macromol. 2021;185: 451–61.

10. Liu D, Sun X, Tian H, Maiti S, Ma Z. Effects of cellulose nanofibrils on the structure and properties on PVA nanocomposites. Cellulose. 2013;20(6):2981–9.

11. Abdulkhani A, Hojati Marvast E, Ashori A, Hamzeh Y, Karimi AN. Preparation of cellulose/polyvinyl alcohol biocomposite films using 1-n-butyl-3-methyl imidazoliumchloride. Int J Biol Macromol. 2013;62:379-86.

12. Xu S, Jiang M, Lu Q, Gao S, Feng J, Wang X, et al. Properties of polyvinyl alcohol films composited with hemicellulose and nanocellulose extracted from artemisia selengensis straw. Front Bioeng Biotechnol. 2020;8:1–11.

13. Rachtanapun P, Luangkamin S, Tanprasert K, Suriyatem R. Carboxymethyl cellulose film from durian rind. LWT - Food Sci Technol. 2012;48(1):52-8.

14. Chungsiriporn J, Pongyeela P, Chairerk N. [Production of molded pulp packaging from rice straw and bagasse coating by chitosan]. Burapha Sci J. 2022;27:20-30. Thai.

15. Karkhanis SS, Stark NM, Sabo RC, Matuana LM. Water vapor and oxygen barrier properties of extrusion-blown poly (lactic acid)/cellulose nanocrystals nanocomposite films. Compos Part A Appl Sci Manuf. 2018;114:204-11.

16. Kunthadong P, Peekoh M, Sindanjark O. [Bio-composite films based on cassava starch reinforced with durian rind cellulose fibers]. RMUTP Res J. 2019;13(1):39-50. Thai.

17. Reddy KO, Maheswari CU, Dhlamini MS, Mothudi BM, Zhang J, Zhang J, et al. Preparation and characterization of regenerated cellulose films using borassus fruit fibers and an ionic liquid. Carbohydr Polym. 2017; 160:203-11.

18. Abderrahim B, Abderrahman E, Mohamed A, Fatima T, Abdesselam T, Krim O. Kinetic thermal degradation of cellulose, polybutylene succinate and a green composite: comparative study. World J Environ Eng. 2015;3(4):95–110.

19. Uma Maheswari C, Obi Reddy K, Muzenda E, Guduri BR, Varada Rajulu A. Extraction and characterization of cellulose microfibrils from agricultural residue - Cocos nucifera L. Biomass and Bioenergy. 2012;46:555-63.

20. Kharazmi A, Faraji N, Hussin RM, Saion E, Yunus WMM, Behzad K. Structural, optical, opto-thermal and thermal properties of

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

ZnS-PVA nanofluids synthesized through a radiolytic approach. Beilstein J Nanotechnol. 2015;6(1):529-36.

21. Fatima T, Jolly R, Rafiq M, Shadab GGHA, Shakir M. Exploring the bone regeneration potential of bio-fabricated nano-titania reinforced polyvinyl alcohol/ nano-cellulose based composite film. Results Mater. 2021; 12:1-12.

22. Cazón P, Vázquez M, Velazquez G. Composite films of regenerate cellulose with chitosan and polyvinyl alcohol: Evaluation of water adsorption, mechanical and optical properties. Inter J of Biol Macromol. 2018;117:235-46.

23. Laxmeshwar SS, Madhu Kumar DJ, Viveka S, Nagaraja GK. Preparation and properties of biodegradable film composites using modified cellulose fibre-reinforced with PVA. ISRN Polym Sci. 2012;12:1–8.

24. Gulati K, Lal S, Arora S. Synthesis and characterization of PVA/Starch/CMC composite films reinforced with walnut (Juglans regia L.) shell flour. SN Appl Sci. 2019;1(11):1-12.

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

การใช้ประโยชน์จากเปลือกหอยนางรมแทนที่มวลรวมหยาบในงานคอนกรีต

Utilization of Oyster Shell as Coarse Aggregate in Concrete

ประชุม คำพุฒ[1] และ ทวิช กล้าแท้[2*]

Prachoom Khamput[1] and Tawich Klathae[2*]

[1]ภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12120

[2]หลักสูตรวิชาวิศวกรรมโยธา วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย จ.นครศรีธรรมราช 80210

[1]Department of Civil Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathumthani 12120, THAILAND

[2]Department of Civil Engineering, College of Industrial Technology and Management, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Nakhon Si Thammarat 80210, THAILAND

[*]Corresponding author e-mail: Tawich.k@rmutsv.ac.th

ARTICLE INFO

Article history:

Received: July 12, 2022

Revised: September 1, 2022

Accepted: September 8, 2022

Available online: September 26, 2022

DOI: 10.14456/jarst.2022.16

Keywords: compressive strength, oyster shell waste, stone dust, water absorption

ABSTRACT

This research aims to study the feasibility of using stone dust (SD) to substitute fine aggregate at 100 wt% and oyster shell waste (OSW) partial coarse aggregates replacement at 25, 50, 75, and 100 wt% to produce concrete. The ratio of cement : fine aggregate : coarse aggregates was 1:2:4 wt%. The properties of concretes such as compressive strength at 7, 14, 21, and 28 days, water absorption capacity, and unit weight of concrete at 28 days were investigated. The result showed that the compressive strength of concrete decreased with an increasing rate of OSW replacement while water absorption of concrete increased led to unit weight of concrete decreased. When the values were compared with the Thai Industrial Standards Institute TISI.213-2560 STANDARD FOR READY–MIXED CONCRETE, which met the minimum specification of concrete (than 18 MPa) at 28 days. The results indicated that OSW25 and OSW50 concrete were met the minimum specification. In terms of the production cost, SD to

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

substitute fine aggregate at 100 wt% and OSW partial coarse aggregates replacement at 25, 50 wt% reductions in the material cost by 23–31% when compared with CT concrete.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการนำหินฝุ่นเพื่อทดแทนมวลรวมละเอียดร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก และเปลือกหอยนางรมเป็นวัสดุแทนที่มวลรวมหยาบร้อยละ 25, 50, 75 และ 100 โดยน้ำหนัก ในการผลิตคอนกรีต กำหนดส่วนผสม ปูนซีเมนต์:มวลรวมละเอียด:มวลรวมหยาบ เท่ากับ 1:2:4 โดยน้ำหนัก ทำการทดสอบหาความต้านทานแรงอัดที่อายุ 7, 14, 21 และ 28 วัน การดูดซึมน้ำ และความหนาแน่นของคอนกรีต ที่อายุ 28 วัน ผลการทดสอบพบว่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตมีค่าลดลงเมื่ออัตราส่วนของเปลือกหอยนางรมในคอนกรีตเพิ่มขึ้น ในขณะที่การดูดซึมน้ำของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ความหนาแน่นของคอนกรีตมีค่าลดลง เมื่อนำค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตเปรียบเทียบกับ มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม คอนกรีตผสมเสร็จ (มอก. 213-2560) ซึ่งกำหนดให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตต้องสามารถรับกำลังอัดเฉลี่ยได้ไม่น้อยกว่า 18.0 เมกะปาสคาล ที่อายุทดสอบ 28 วัน พบว่าคอนกรีตที่มีค่าความต้านทานแรงอัดผ่านเกณฑ์มาตรฐาน คือ อัตราส่วนผสมเปลือกหอยนางรมที่ร้อยละ 25 และ 50 โดยน้ำหนัก สำหรับการประเมินต้นทุนการผลิตคอนกรีต พบว่าคอนกรีตที่ใช้หินฝุ่นเพื่อทดแทนมวลรวมละเอียดร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก และเปลือกหอยนางรมเป็นวัสดุแทนที่มวลรวมหยาบร้อยละ 25 และ 50 โดยน้ำหนัก มีต้นทุนวัสดุลดลงร้อยละ 23–31 เมื่อเทียบกับคอนกรีต CT

คำสำคัญ: กำลังอัด เปลือกหอยนางรม หินฝุ่น การดูดซึมน้ำ

บทนำ

การเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำตามชายฝั่งทะเลของประเทศไทยขยายตัวอย่างมากในภาคใต้ และภาคตะวันออก ทำให้มีอุตสาหกรรมการแปรรูปอาหารทะเลและชุมชนรอบข้างขยายเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ประเทศไทยมีจำนวนฟาร์มเลี้ยงหอยนางรม 836 ฟาร์ม (เฉพาะที่มีผลผลิต) หรือร้อยละ 19.09 ของจำนวนฟาร์มเลี้ยงหอยทะเลทั้งหมด เพิ่มขึ้นจากปี ค.ศ. 2019 จำนวน 50 ฟาร์ม หรือเพิ่มขึ้นร้อยละ 6.36 ส่งผลให้มีผลผลิตหอยนางรมในปี ค.ศ. 2020 มากกว่า 15,746.97 ตัน หรือร้อยละ 13.23 ของผลผลิตหอยทะเลทั้งหมด [1] ซึ่งหลังจากกระบวนการแปรรูปหอยนางรมทุก 1 กิโลกรัม จะคงเหลือขยะจากเปลือกหอยประมาณ 370-700 กรัม หรือจะมีขยะในรูปแบบของเปลือกหอยนางรมประมาณ 5,800-11,000 ตันต่อปี [2] ซึ่งขยะเหล่านี้ไม่สามารถย่อยสลายได้เองตามธรรมชาติ การฝังกลบขยะเปลือกหอยอาจสร้างมลพิษในบริเวณที่ฝังกลบ นอกจากจะส่งกลิ่นเน่าเหม็นที่มาจากเศษซากของเนื้อที่ติดมากับเปลือกหอย ซึ่งสร้างความเดือดร้อนให้กับชุมชนใกล้เคียง ยังส่งผลให้ดินสูญเสียความพรุน รวมถึงลดการดูดซึมของน้ำ และอาจส่งผลให้เกิดปัญหาทางด้านสภาวะแวดล้อมในเวลาต่อมา

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีเปลือกหอยนางรม [7]

Chemical Composition (%)	OSW
Silicon dioxide (SiO_2)	4.31
Aluminum oxide (Al_2O_3)	1.17
Ferric oxide (Fe_2O_3)	0.40
Calcium oxide (CaO)	48.85
Magnesium oxide (MgO)	0.99
Potassium oxide (K_2O)	0.14
Sodium oxide (Na_2O)	0.87
Sulfur trioxide (SO_3)	0.62
Loss on ignition (LOI)	40.37

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

ที่ผ่านมามีการศึกษาวิจัยเพื่อนำเปลือกหอยชนิดต่าง ๆ มาใช้ประโยชน์เพื่อลดปริมาณขยะจากโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารทะเล ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าเปลือกหอยนางรม มีแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เป็นองค์ประกอบหลัก โดยมีปริมาณของ CaO แต่อยู่ในรูปของแคลเซียมคาร์บอเนตเนื่องจาก ไม่ได้ผ่านกระบวนการเผา ในขณะที่มีซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และเฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) ปริมาณต่ำมากดังแสดงในตารางที่ 1 และมีการสูญเสียน้ำหนักหลังจากการเผา (Loss on ignition, LOI) อยู่ระหว่างร้อยละ 23.2-51.0 [3-7] โดยในปี ค.ศ. 2003 Yoon และคณะ [8] ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติเชิงกลของเปลือกหอยนางรมบดโดยการทดแทนมวลรวมในมอร์ตาร์ ในอัตราส่วนผสมต่าง ๆ โดยเปรียบเทียบกับมอร์ตาร์ควบคุมที่ผสมกับทราย ผลการทดสอบพบว่าเปลือกหอยนางรมมีองค์ประกอบหลัก คือแคลเซียมคาร์บอเนตที่อยู่ในรูปผลึกของแคลไซด์ และมีน้ำหนักเบากว่าทราย โดยความถ่วงจำเพาะมีค่าอยู่ระหว่าง 2.38 - 2.41 ต่อมา Barnaby [9] ได้ทำการศึกษาเปลือกหอยแมลงภู่ที่เหลือใช้จากโรงงานอุตสาหกรรมหอยกระป๋องเป็นส่วนผสมในการผลิตมอร์ตาร์ โดยการใช้เปลือกหอยแมลงภู่บดมาทดแทนในส่วนของหินฝุ่นที่ได้มาจากเหมืองหิน โดยใช้ทดแทนในอัตราส่วนร้อยละ 0, 4, 8 และ 12 โดยส่วนของอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อทราย คือ 1:7.8 จากผลการทดสอบพบว่ามอร์ตาร์ที่ผสมเปลือกหอยแมลงภู่บดร้อยละ 12 ที่อายุการบ่ม 90 วัน มีกำลังอัดและกำลังดึงสูงที่สุด ขณะที่ในปี ค.ศ. 2004 Yoon, Park และ Lee [10] ได้ทำการศึกษาคุณสมบัติทางกลของคอนกรีตแทนที่ทรายด้วยเปลือกหอยนางรมบด ผลการทดสอบพบว่าไม่มีปฏิกิริยาระหว่างเปลือกหอยนางรมบดกับซีเมนต์เพสต์เกิดขึ้น ความสามารถในการทำงานของคอนกรีตลดลงเมื่อค่าความละเอียดลดลง และอัตราการแทนที่ทรายด้วยเปลือกหอยนางรมบดเพิ่มขึ้น หลังจากนั้นในปี ค.ศ. 2005 Yang, Yi และ Leem [11] ได้ศึกษาความเป็นไปได้ในการนำเปลือกหอยนางรมมาใช้เป็นวัสดุในการก่อสร้าง ผลการศึกษาพบว่า เปลือกหอยนางรมบดมีส่วนประกอบแคลเซียมคาร์บอเนตเป็นองค์ประกอบหลัก รวมทั้งยังมีสารอินทรีย์เล็กน้อย การทดสอบกำลังรับแรงอัดของตัวอย่างมอร์ตาร์ พบว่าในส่วนผสมของปูนซีเมนต์ต่อทรายเท่ากับ 1:5 และ 1:10 เมื่ออัตราส่วนการใช้เปลือกหอยนางรมบดแทนที่ทรายที่มากกว่าร้อยละ 20 และ 40 ตามลำดับ ส่งผลให้กำลังรับแรงอัดของมอร์ตาร์ลดลงอย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ในปี ค.ศ. 2007 Ballester และคณะ [12] ทำการศึกษาเปลือกหอยแมลงภู่จากอุตสาหกรรมหอยแมลงภู่นิวซีแลนด์ เพื่อทดแทนมวลรวมหยาบในคอนกรีต ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่า กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ใช้เปลือกหอยแมลงภู่บดทดแทนหินนั้น ไม่มีประสิทธิภาพทางด้านโครงสร้างและไม่ผ่านมาตรฐาน NZS 3108-1983 ของประเทศนิวซีแลนด์ อย่างไรก็ตามการทดสอบด้านประสิทธิภาพของการนำความร้อน พบว่าคอนกรีตผสมเปลือกหอยแมลงภู่บดสามารถนำไปใช้เป็นฉนวนกันความร้อนได้ เนื่องจากอัตราการถ่ายเทความร้อนต่ำกว่าคอนกรีตตามมาตรฐาน NZS 3108-1983

จากผลการวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นว่าเปลือกหอยนางรมสามารถนำมาใช้เป็นวัสดุทดแทนมวลรวมละเอียด และมวลรวมหยาบได้ แต่งานวิจัยก่อนหน้ามีการนำเปลือกหอยนางรมแทนที่ในอัตราไม่เกินร้อยละ 40 ดังนั้นงานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้เปลือกหอยนางรมในการแทนที่มวลรวมหยาบในการผลิตคอนกรีต ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม คอนกรีตผสมเสร็จ (มอก. 213-2560) ในอัตราร้อยละ 25, 50, 75 และ 100 โดยน้ำหนัก เพื่อศึกษาผลกระทบต่อค่ากำลังอัด การดูดซึมน้ำ และความหนาแน่นของคอนกรีต รวมถึงวิเคราะห์ต้นทุนในการผลิตคอนกรีต เปรียบเทียบกับคอนกรีต CT ซึ่งไม่ใช้เปลือกหอยนางรมในส่วนผสมของคอนกรีต เพื่อลดปริมาณขยะจากโรงงานอุตสาหกรรมแปรรูปอาหารทะเล อีกทั้งยังเป็นการส่งเสริมให้มีการใช้ทรัพยากรที่มีได้อย่างเหมาะสม

Journal of Applied Research on Science and Technology (JARST), Vol 21, Issue 2, 2022
ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

1.1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 (OPC) (รูปที่ 1) [13]

รูปที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภท 1

1.2 หินฝุ่น (Stone Dust) ผึ่งแดดให้แห้งแล้วร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 4 นำไปอบที่อุณหภูมิ 100 ± 5 องศาเซลเซียส ใช้เวลา 24 ชั่วโมง มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.71 มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 3.68 และมีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 0.47 (รูปที่ 2)

รูปที่ 2 หินฝุ่น

1.3 หินธรรมชาติ (Crushed Limestone) โดยมีขนาดใหญ่สุด 10 มม. แสดงในรูปที่ 3 มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.73 มีค่าโมดูลัสความละเอียดเท่ากับ 6.39 และมีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 0.67

1.4 เปลือกหอยนางรม (OSW) (รูปที่ 4) จากพื้นที่ อ.อ่างศิลา จ.ชลบุรี นำเปลือกหอยนางรมมาทำความสะอาด และทำให้แห้งโดยการตากแดด อย่างน้อย 24 ชั่วโมง คัดขนาดของเปลือกหอยให้มีขนาดโตสุดไม่เกิน 38.10 มม. มีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 2.59 และมีค่าการดูดซึมน้ำร้อยละ 6.21 ดังรูปที่ 5-6

รูปที่ 3 หินธรรมชาติ

รูปที่ 4 เปลือกหอยนางรม

รูปที่ 5 เปลือกหอยนางรม จาก อ.อ่างศิลา จ.ชลบุรี

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

รูปที่ 6 ล้างทำความสะอาดเปลือกหอยนางรม

2. วิธีการดำเนินงานวิจัย

2.1 งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการนำหินฝุ่นเพื่อทดแทนมวลรวมละเอียดร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก และเปลือกหอยนางรมเป็นวัสดุทดแทนมวลรวมหยาบ โดยกำหนดส่วนผสม ปูนซีเมนต์:มวลรวมละเอียด:มวลรวมหยาบ จำนวน 5 อัตราส่วนผสม และกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อปูนซีเมนต์ ดังตารางที่ 2 โดยหล่อคอนกรีตทรงกระบอก (Cylinder) ขนาด 15x30 ซม. ทำการทดสอบหาความต้านทานแรงอัดที่อายุ 7, 14, 21 และ 28 วัน การดูดซึมน้ำ และความหนาแน่นที่อายุ 28 วัน

ตารางที่ 2 Mixture proportions (OPC: Stone Dust: Coarse Agg., 1:2:4)

Concrete	kg/m^3					W/C	Slump
Symbols	OPC	Stone Dust	Crushed Limestone	OSW	Water		(cm.)
CT	305	635	1,275.00	-	305	1.0	9.5
OSW25	305	635	956.25	318.75	305	1.0	9.5
OSW50	305	635	637.50	637.50	305	1.0	9.0
OSW75	305	635	318.75	956.25	305	1.0	8.0
OSW100	305	635	-	1,275.00	305	1.0	7.0

Remark: OPC: Ordinary Portland Cement Type I, OSW: Oyster Shell Waste

2.2 เตรียมส่วนผสมตามอัตราส่วนที่กำหนด นำส่วนผสมในอัตราส่วนต่าง ๆ ได้แก่ เปลือกหอยนางรม หินฝุ่น หินปูนย่อย ซึ่งอยู่ในสภาวะอิ่มตัวผิวแห้ง (SSD) และปูนซีเมนต์ โดยขั้นตอนการผสมคอนกรีตทั้งหมดใช้วิธี Two–stage mixing approach ซึ่งประยุกต์จากงานวิจัยของ Tam และคณะ [14] โดยแบ่งออกเป็นสองขั้นตอน ขั้นตอนแรกนำเปลือกหอยนางรม หินฝุ่น หินปูนย่อยทั้งหมดผสมให้เข้ากันใช้เวลา 60 วินาที ในเครื่องผสม ต่อมาใส่ปูนซีเมนต์ครึ่งหนึ่งผสมให้เข้ากันเป็นเวลา 30 วินาที จากนั้นเติมน้ำครึ่งหนึ่งของปริมาณน้ำที่ต้องการทั้งหมดผสมให้เข้ากันโดยใช้เวลา 60 วินาที ขั้นตอนที่สองเติมปูนซีเมนต์ที่เหลือและใส่น้ำทั้งหมดในเครื่องผสม แล้วทำการผสมให้เข้ากันโดยใช้เวลาในการผสม 120 วินาที ดังรูปที่ 7

รูปที่ 7 ผสมวัสดุตามอัตราส่วนที่กำหนด

2.3 นำส่วนผสมที่ทำการผสมจนเข้ากันดีแล้วตักใส่ในแบบหล่อคอนกรีตรูปทรงกระบอกขนาด 15x30 ซม. ที่เตรียมไว้ ระหว่างเทคอนกรีตต้องทำการกระทุ้งคอนกรีตร่วมด้วย โดยแบ่งเทเป็น 3 ชั้น และกระทุ้งคอนกรีตชั้นละ 25-30 ครั้ง และปาดผิวหน้าให้เรียบเสมอ ดังรูปที่ 8-10

Journal of Applied Research on Science and Technology (JARST), Vol 21, Issue 2, 2022
ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

รูปที่ 8 ทดสอบหาค่ายุบตัวของคอนกรีต

รูปที่ 9 การหล่อคอนกรีตตัวอย่างรูปทรงกระบอก

รูปที่ 10 ปาดผิวหน้าของคอนกรีต

รูปที่ 11 บ่มคอนกรีตในน้ำตามอายุวันที่กำหนด

2.4 ถอดแบบหล่อคอนกรีตหลังจากเทคอนกรีตไปแล้ว อย่างน้อย 24 ชั่วโมง จากนั้น นำไปบ่มในน้ำจนครบอายุ 7, 14, 21 และ 28 วัน ดังรูปที่ 11

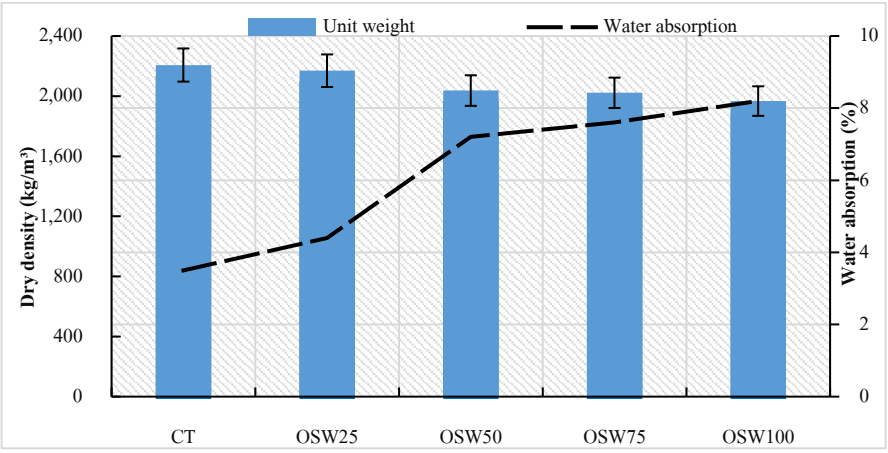
ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งเฉลี่ยและการดูดซึมน้ำของคอนกรีต

รูปที่ 12 แสดงผลการทดสอบความหนาแน่นแห้งเฉลี่ยและการดูดซึมน้ำของคอนกรีต ซึ่งทำการแทนที่มวลรวมละเอียดด้วยหินฝุ่นร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก และทดแทนมวลรวมหยาบด้วยเปลือกหอยนางรมบด (OSW) ที่ร้อยละ 0, 25, 50, 75 และ 100 ที่อายุการบ่ม 28 วัน ผลการทดสอบพบว่าคอนกรีต CT มีค่าการดูดซึมน้ำเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 3.5 และความหนาแน่นแห้งเฉลี่ย 2,207 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร ในขณะที่คอนกรีต OSW25, OSW50, OSW75, และ OSW100 มีค่าการดูดซึมน้ำเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 4.4, 7.1, 7.6 และ 8.2 หรือเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 126, 206, 217 และ 234 ของคอนกรีตที่ใช้หินธรรมชาติเป็นวัสดุมวลรวมหยาบเพียงอย่างเดียว ตามลำดับ ผลการทดสอบความหนาแน่นแห้งเฉลี่ยของคอนกรีต OSW25, OSW50, OSW75, และ OSW100 มีค่าเท่ากับ 2,169, 2,037, 2,022 และ 1,967 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร หรือลดลงคิดเป็นร้อยละ 98, 92, 92 และ 89 ของคอนกรีตที่ใช้หินธรรมชาติเป็นวัสดุมวลรวมหยาบเพียงอย่างเดียว ตามลำดับ จากผลการทดสอบความหนาแน่นแห้ง และการดูดซึมน้ำของคอนกรีต แสดงให้เห็นว่าการดูดซึมน้ำของคอนกรีตมีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราการแทนที่ของเปลือกหอยนางรม ในขณะที่ความหนาแน่นแห้งเฉลี่ยจะมีค่าลดลงเมื่อทำการเพิ่มอัตราการแทนที่ของเปลือกหอยนางรม [15-18] เนื่องจากตัวอย่างคอนกรีตที่มีการผสมเปลือกหอยนางรมในปริมาณเพิ่มมากขึ้น จะทำให้เกิดช่องว่างของอากาศภายในตัวอย่างคอนกรีต อีกทั้งเปลือกหอยนางรมมีลักษณะทางกายภาพที่ไม่แน่นอน พื้นผิวมีความขรุขระ เหลี่ยมคม ทำให้มวลรวมของส่วนผสมเรียงตัวกันได้ไม่ดี มีช่องว่างค่อนข้างมาก และส่งผลให้ปูนซีเมนต์ทำหน้าที่ในการเคลือบมวลรวมที่เป็นเปลือกหอยนางรมได้อย่างไม่ทั่วถึง

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

อัตราการดูดซึมน้ำจึงมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น ในขณะที่ผลการทดสอบความหนาแน่นของคอนกรีตตัวอย่าง ที่อายุการบ่ม 28 วัน พบว่าเมื่อใช้เปลือกหอยนางรมเป็นวัสดุผสมแทนในอัตราส่วนของมวลรวมหยาบ ส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของคอนกรีตมีแนวโน้มลดลง เนื่องจากเปลือกหอยนางรมมีปริมาณความหนาแน่นน้อยกว่าหิน [19-20] รวมทั้งขนาดคละและลักษณะของเปลือกหอยนางรมมีผลกระทบต่อการผสมตัวอย่างคอนกรีต การเรียงตัวของมวลรวมไม่สม่ำเสมอทำให้ประสิทธิภาพการยึดเกาะและการแทรกตัวของปูนซีเมนต์ไม่สามารถเข้าถึงได้ [21-22]



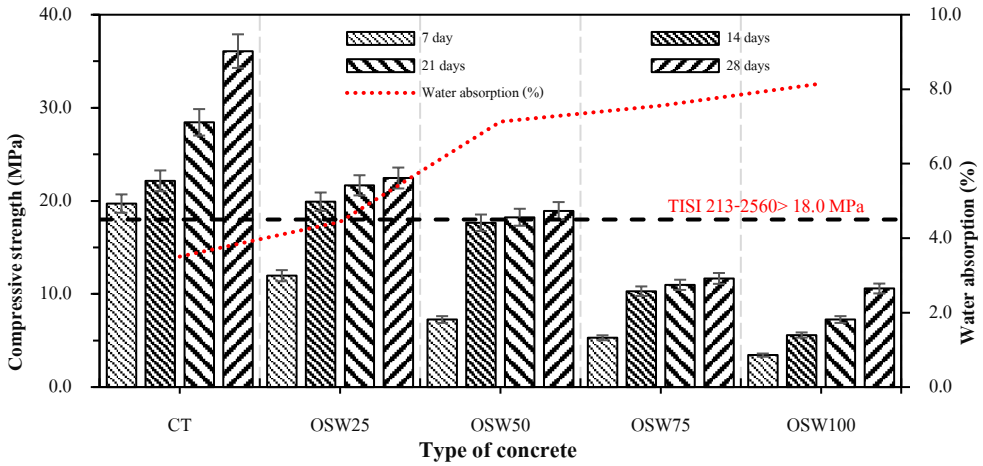
รูปที่ 12 ความสัมพันธ์ระหว่างความหนาแน่นแห้งเฉลี่ยและร้อยละการดูดซึมน้ำของคอนกรีต กับร้อยละการแทนที่เปลือกหอยนางรมบดที่อายุ 28 วัน

ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดและการดูดซึมน้ำของคอนกรีต

รูปที่ 13 แสดงค่ากำลังอัดของคอนกรีตซึ่งทำการทดแทนมวลรวมละเอียดด้วยหินฝุ่นร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก และแทนที่มวลรวมหยาบด้วยเปลือกหอยนางรม (OSW) ที่ร้อยละ 0, 25, 50, 75 และ 100 ที่อายุการบ่ม 7, 14, 21 และ 28 วัน ผลการทดสอบพบว่าคอนกรีตที่มีอัตราส่วนการแทนที่ร้อยละ 0 (CT) โดยน้ำหนัก มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 19.7, 22.2, 28.4 และ 36.1 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ในขณะที่คอนกรีต OSW25, OSW50, OSW75, และ OSW100 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 12.0, 7.3, 5.3 และ 3.4 เมกะปาสคาล คิดเป็นร้อยละ 61, 37, 27 และ 17 ของคอนกรีต CT ที่อายุการบ่ม 7 วัน ตามลำดับ ต่อมาที่อายุการบ่ม 14 วัน คอนกรีต OSW25, OSW50, OSW75, และ OSW100 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 19.9, 17.7, 10.3 และ 5.6 เมกะปาสคาล คิดเป็นร้อยละ 90, 80, 46 และ 25 ของคอนกรีต CT ที่อายุการบ่ม 14 วัน ตามลำดับ ในขณะที่อายุการบ่ม 21 วัน คอนกรีต OSW25, OSW50, OSW75, และ OSW100 สามารถพัฒนากำลังอัดเท่ากับ 21.7, 18.2, 11.0 และ 7.3 เมกะปาสคาล คิดเป็นร้อยละ 76, 64, 39 และ 26 ของคอนกรีต CT เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดที่อายุการบ่ม 28 วันและการดูดซึมน้ำของคอนกรีต พบว่าคอนกรีต OSW25, OSW50, OSW75, และ OSW100 มีค่ากำลังอัดเท่ากับ 22.5, 18.9, 11.7 และ 10.6 เมกะปาสคาล คิดเป็นร้อยละ 62, 52, 32 และ 29 ของคอนกรีต CT ตามลำดับ ในขณะที่การดูดซึมน้ำมีค่าเฉลี่ยเท่ากับร้อยละ 4.4, 7.1, 7.6 และ 8.2 หรือเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 126, 206, 217 และ 234 ของคอนกรีตที่ใช้หินธรรมชาติเป็นวัสดุมวลรวมหยาบเพียงอย่างเดียว ตามลำดับ จากผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าคอนกรีตมีค่ากำลังอัดลดลง เมื่อทำการเพิ่มขึ้นของการแทนที่ OSW การเพิ่มขึ้นของการแทนที่ OSW ส่งผลให้ค่าการดูดซึมน้ำมีค่าเพิ่มขึ้น [23-25]

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

เนื่องจากคอนกรีตที่ผสมเปลือกหอยนางรมในปริมาณที่เพิ่มมากขึ้น ส่งผลทำให้ความหนาแน่นมีค่าต่ำ [19-20] เนื่องจากความสามารถในการยึดเหนี่ยวระหว่างโมเลกุลของปูนซีเมนต์ลดลง เมื่อทำการเพิ่มอัตราส่วนผสมของเปลือกหอยนางรม [21-22] จึงทำให้ลักษณะการก่อตัวของตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมเปลือกหอยนางรมในปริมาณที่เพิ่มขึ้น จะมีลักษณะเป็นโพรง และเกิดช่องว่างภายในทำให้ตัวอย่างทดสอบไม่สามารถรับกำลังความต้านทานแรงอัดได้ [15-18, 26] เมื่อนำค่ากำลังรับแรงอัดของคอนกรีตที่ได้ไปเปรียบเทียบกับ มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม คอนกรีตผสมเสร็จ (มอก. 213-2560) [27] ซึ่งกำหนดให้กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตต้องสามารถรับกำลังอัดเฉลี่ยได้ไม่น้อยกว่า 18.0 เมกะปาสคาล ที่อายุทดสอบ 28 วัน พบว่าคอนกรีตที่มีค่าความต้านทานแรงอัดผ่านเกณฑ์มาตรฐาน คือ อัตราส่วนผสมเปลือกหอยนางรมที่ร้อยละ 25 และ 50 เนื่องจากมีค่าความต้านทานแรงอัดที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานอ้างอิงตั้งแต่อายุการบ่มที่ 21 และ 28 วัน ตามลำดับ



รูปที่ 13 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดและการดูดซึมน้ำของคอนกรีต กับร้อยละการแทนที่เปลือกหอยนางรม

การวิเคราะห์ราคาต้นทุนในการผลิต

จากการศึกษาความเป็นไปได้ในการหินฝุ่นมาทดแทนมวลรวมละเอียดร้อยละ 100 โดยน้ำหนัก และนำเปลือกหอยนางรมมาทดแทนมวลรวมหยาบ ที่ร้อยละ 25, 50, 75 และ 100 โดยน้ำหนัก เมื่อนำมาวิเคราะห์หาราคาต้นทุนในการผลิตคอนกรีต ดังแสดงในตารางที่ 3 พบว่าการหินฝุ่นซึ่งมีราคาประมาณ 0.15 บาทต่อกิโลกรัม และเปลือกหอยนางรม (OSW) ซึ่งมีราคาประมาณ 0.05 บาทต่อกิโลกรัม เนื่องจากเปลือกหอยนางรมซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งจึงไม่มีค่าใช้จ่าย แต่อาจจะมีในส่วนของค่าขนย้ายรวมถึงค่าแรงในการทำความสะอาด [7] ในขณะที่ทรายแม่น้ำ และหินธรรมชาติ ซึ่งมีราคาประมาณ 0.60 และ 0.48 บาทต่อกิโลกรัม ตามลำดับ

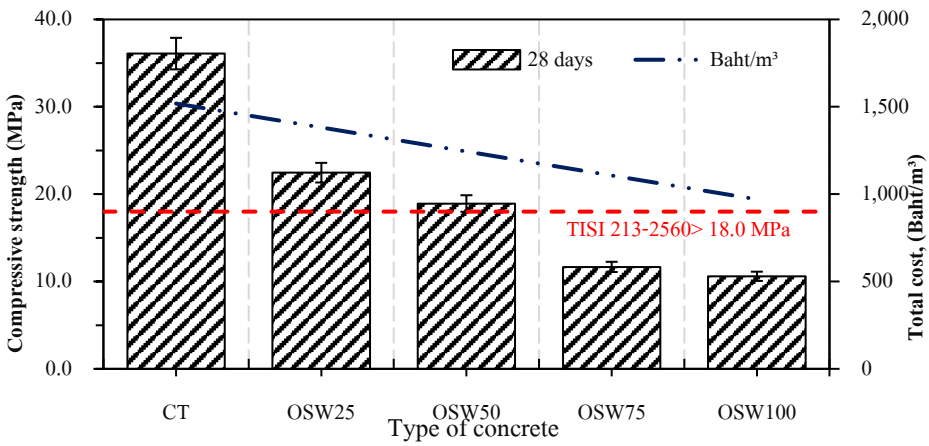
ตารางที่ 3 แสดงราคาคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร พบว่าคอนกรีตที่ใช้ทรายแม่น้ำ และหินปูนย่อยมีราคาโดยประมาณที่ 1,804.30 บาทต่อลูกบาศก์เมตร (TISI 231-2560) [27] ในขณะที่คอนกรีตที่ใช้หินฝุ่นทดแทนมวลรวมละเอียดในคอนกรีต (CT) มีราคาโดยประมาณที่ 1,518.55 บาทต่อลูกบาศก์เมตร หรือคิดเป็นร้อยละ 84 ของคอนกรีตที่ใช้ทรายแม่น้ำ และหินปูนย่อยเป็นวัสดุมวลรวมในการผลิตคอนกรีต เมื่อนำคอนกรีตที่ใช้หินฝุ่นมาทดแทนมวลรวมละเอียดร้อยละ 100 และเปลือกหอยนางรมทดแทนมวลรวมหยาบ ที่ร้อยละ 25, 50, 75 และ 100 โดยน้ำหนัก พบว่าคอนกรีต OSW25, OSW50, OSW75, และ OSW100 มีราคาโดยประมาณที่ 1,381.49, 1,244.43, 1,107.36 และ 970.30 บาทต่อลูกบาศก์เมตร หรือคิดเป็นร้อยละ

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

77, 69, 61 และ 54 ของคอนกรีตที่ใช้ทรายแม่น้ำ และหินปูนย่อยเป็นวัสดุมวลรวมในการผลิตคอนกรีต ซึ่งเมื่อพิจารณาตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม คอนกรีตผสมเสร็จ (มอก. 213-2560) [27] คอนกรีต OSW25, OSW50 สามารถลดค่าใช้จ่ายได้มากถึงร้อยละ 23-31 ในขณะที่กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตคิดเป็นร้อยละ 62 และ 52 ตามลำดับ ของคอนกรีตที่ใช้ทรายแม่น้ำ และหินปูนย่อยเป็นวัสดุมวลรวมในการผลิตคอนกรีต ดังแสดงในรูปที่ 14

ตารางที่ 3 ราคาวัสดุของคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร (ม^3)

Concrete Symbols	Mixture proportions/m^3, [kg. *(Baht/kg)*]						Baht/m^3
	OPC	River sand	Stone Dust	Crushed Limestone	OSW	Water	
TISI 231-2560	305 *(2.63)*	635 *(0.60)*	-	1,275.00 *(0.48)*	-	305 *(0.03)*	1,804.30
CT	305 *(2.63)*	-	635 *(0.15)*	1,275.00 *(0.48)*	-	305 *(0.03)*	1,518.55
OSW25	305 *(2.63)*	-	635 *(0.15)*	956.25 *(0.48)*	318.75 *(0.05)*	305 *(0.03)*	1,381.49
OSW50	305 *(2.63)*	-	635 *(0.15)*	637.50 *(0.48)*	637.50 *(0.05)*	305 *(0.03)*	1,244.43
OSW75	305 *(2.63)*	-	635 *(0.15)*	318.75 *(0.48)*	956.25 *(0.05)*	305 *(0.03)*	1,107.36
OSW100	305 *(2.63)*	-	635 *(0.15)*	-	1,275.00 *(0.05)*	305 *(0.03)*	970.30



รูปที่ 14 ความสัมพันธ์ระหว่างค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ 28 วัน และราคาวัสดุของการผลิตคอนกรีต 1 ลูกบาศก์เมตร กับร้อยละ การแทนที่เปลือกหอยนางรม

สรุปผล

1. คอนกรีตที่ใช้หินฝุ่นเพื่อทดแทนมวลรวมละเอียด และเปลือกหอยนางรมเป็นวัสดุแทนที่มวลรวมหยาบ มีค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มอัตราการแทนที่ของเปลือกหอยนางรม ในขณะที่ค่ากำลังอัดและ ความหนาแน่นแห้งเฉลี่ยมีค่าลดลงเมื่อทำการเพิ่มอัตราการแทนที่ของเปลือกหอยนางรม

2. อัตราส่วนคอนกรีตที่ใช้เปลือกหอยนางรมเป็นวัสดุมวลรวมหยาบ ที่ร้อยละ 25 และ 50 มีค่าความต้านทานแรงอัดผ่านเกณฑ์มาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม คอนกรีตผสมเสร็จ (มอก. 213-2560) ที่อายุการบ่ม 21 และ 28 วัน ตามลำดับ

3. คอนกรีต OSW25, OSW50 สามารถลดค่าใช้จ่ายได้มากถึงร้อยละ 23 และ 31 ในขณะที่กำลังรับแรงอัดของคอนกรีตคิดเป็นร้อยละ 62 และ 52 ตามลำดับ ของคอนกรีตที่ใช้ทรายแม่น้ำ และหินปูนย่อย

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

เป็นวัสดุมวลรวมในการผลิตคอนกรีต

เมื่อพิจารณาผลข้างต้นแล้วสามารถสรุปได้ว่า หินฝุ่น และเปลือกหอยนางรม สามารถนำมาเป็นวัสดุทางเลือกในการทดแทนมวลรวมละเอียด และมวลรวมหยาบได้ ในอัตราส่วนที่เหมาะสม นอกจากจะเป็นการลดการใช้ทรายแม่น้ำ และหินปูนย่อยแล้ว หากมีการส่งเสริมและให้ความรู้แก่ชุมชนที่มีวัสดุประเภทเปลือกหอยอยู่มาก อาจเป็นการสร้างรายได้ และอาชีพ รวมถึงการนำขยะที่เหลือทิ้ง มาใช้ให้เกิดประโยชน์และสามารถใช้งานได้จริงได้อีกด้วย

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมือ รวมถึงเอื้อเฟื้อสถานที่ และนักศึกษาทุกคนที่มีส่วนร่วมในการทำวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

1. Fishery Statistics Analysis and Research Group. Statistics of Marine Shellfish Culture Survey 2020. Information and Communication Technology Center, Department of Fisheries, Ministry of Agriculture and Cooperatives [Internet]. [cited 2022 APR 15]. Availability from: https://www4.fisheries.go.th/local/pic_ctivities/202112281421011_pic.pdf. Thai.
2. Yao Z, Xia M, Li H, Chen T, Ye Y, Zheng H. Bivalve shell: not an abundant useless waste but a functional and versatile biomaterial. Crit Rev Environ Sci Technol. 2014;44(22): 2502-30.
3. Li G, Xu X, Chen E, Fan J, Xiong G. Properties of cement-based bricks with oyster-shells ash. J Clean Prod. 2015;(91):279-87.
4. Olivia M, Mifshella AA, Darmayanti L. Mechanical properties of seashell concrete. Proced Eng .2015;(125):760-4.
5. Djobo YJN, Elimbi A, Manga JD, Ndjock IDL. Partial replacement of volcanic ash by bauxite and calcined oyster shell in the synthesis of volcanicash-based geopolymers. Constr Build Mater. 2016;(113):673-81.
6. Ez-Zaki H, Diouri A, Kamali-Bernard S, Sassi O. Composite cement mortars based on marine sediments and oyster shell powder. Mater Constr. 2016;66(321):e080.
7. Klathae T, Horpet P. Compressive strength and autogenous shrinkage properties of cement paste containing ground oyster shell. Thai Journal of Science and Technology. 2019;27 (4):752-63. Thai.
8. Yoon GL, Kim BT, Kim BO, Han SH. Chemical–mechanical characteristics of crushed oyster-shell .Waste Manage. 2003;23:825–34.
9. Barnaby C. An Investigation into the reuse of organic waste produced by the New Zealand Mussel Industry [Doctoral dissertation]. Auckland: Auckland University of Technology; 2004.
10. Yoon H, Park S, Lee K, Park J. Oyster shell as substitute for aggregate in mortar. Waste Manag Res. 2004;22(3):158-70.
11. Yang EI, Yi ST, Leem YM. Effect of oyster shell substituted for fine aggregate on concrete characteristics: Part I. Fundamental properties Cem Concr Res. 2005;35(11):2175-82.

12. Ballester P, Mármol I, Morales J, Sánchez L . Use of limestone obtained from waste of the mussel cannery industry for the production of mortars. Cem Concr Res. 2007;37(4):559-64.

13. ASTM C150. American Society for Testing and Materials. Standard Specification for Portland Cement. Annual Book of ASTM Standard 4(1). PA, USA. 2015.

14. Tam VY, Gao XF, Tam CM. Comparing performance of modified two-stage mixing approach for producing recycled aggregate concrete. Mag. Concr. Res. 2006;58(7):477-84.

15. Khankhaje E, Rafieizonooz M, Salim MR, Mirza J, Salmiati, Hussin MW. Comparing the effects of oil palm kernel shell and cockle shell on properties of pervious concrete pavement. Int J Pavement Res Technol. 2017; 10(5):383–92.

16. Khankhaje E, Salim MR, Mirza J, Salmiati S, Hussin MW, Khan R, et al. Properties of quiet pervious concrete containing oil palm kernel shell and cockle shell. Appl Acoust. 2017; 122:113–20.

17. Martínez -García C, González -Fonteboa B, Martínez-Abella F, Carro-López D. Performance of mussel shell as aggregate in plain concrete. Constr Build Mater .2017;139:570–83.

18. Nguyen DH, Boutouil M, Sebaibi N, Leleyter L, Baraud F. Valorization of seashell by-products in pervious concrete pavers. Constr Build Mater. 2013;49:151–60.

19. Agbede OI, Manasseh J. Suitability of periwinkle shell as partial replacement of river gravel in concrete, Leonardo Electron. J Pract Technol. 2009;15:59–66.

20. Falade F. An investigation of periwinkle shells as coarse aggregate in concrete. Build Environ. 1995;30(4):573–7.

21. Neville AM, Brooks JJ. Concrete Technology. 2nd ed. Essex, UK: Pearson Education; 2010.

22. Shetty MS, Concrete Technology: Theory and Practice, 6th ed. New Delhi, India: S. Chand; 2012.

23. Adewuyi AP, Adegoke T. Exploratory study of periwinkle shells as coarse aggregates in concrete works. ARPN J En Appl Sci. 2008;3 (6):1–5.

24. Ekop IE, Adenuga OA, Umoh AA. Strength characteristics of granite-pachimalania aurita shell concrete. Nigerian J Agric Food Environ. 2013;9(2):9–14.

25. Ettu LO, Ibearugbulem OM, Ezeh JC, Anya UC. A reinvestigation of the prospects of using periwinkle shell as partial replacement for granite in concrete. Int J Eng Sci Invent. 2013; 2(3):54–9.

26. Siripattarapravat C. Influence of ground seashells on properties of plastering mortar [Master of Architecture and Planning]. Thammasat University; 2009. Thai.

27. TISI. 213-2560. Thai Industrial Standards Institute (TISI). STANDARD FOR READY–MIXED CONCRETE. Ministry of Industry, Bangkok. Thailand. 2017. Thai.

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

JARST Journal of Applied Research on Science and Technology
Rajamangala University of Technology Thanyaburi

การพัฒนาระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์เพื่อนำไปสู่การขับเคลื่อนการเกษตรด้วยข้อมูล

Development of Geographic Information Systems to Lead to Data-Driven Agriculture

นิติศักดิ์ เจริญรูป[1*] วรีวรรณ เจริญรูป[2] สิทธิชัย จีนะวงษ์[3] และ สุจิตรา จีนะวงษ์[3]

Nitisak Charoenroop[1*], Wareewan Charoenroop[2] Sithichai Jeenawong[3] and Suchitra Jeenawong[3]

[1]สาขาวิชาระบบสารสนเทศทางธุรกิจ คณะบริหารธุรกิจและศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา จ. เชียงราย 57120

[2]สาขาวิชาการบัญชี คณะบริหารธุรกิจและศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา จ. เชียงราย 57120

[3]สาขาวิชาวิศวกรรมอิเล็กทรอนิกส์และระบบควบคุมอัตโนมัติ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา จ. เชียงราย 57120

[1]Department of Business Information System, Faculty of Business Administration and Liberal Arts, Rajamangala University of Technology Lanna, Chiangrai 57210, THAILAND

[2]Department of Accounting, Faculty of Business Administration and Liberal Arts, Rajamangala University of Technology Lanna, Chiangrai 57210, THAILAND

[3]Department of Electronics Engineering and Automatic Control Systems, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Lanna, Chiangrai 57210, THAILAND

[*]Corresponding author e-mail: nitisak@rmutl.ac.th

ARTICLE INFO

Article history:
Received: June 12, 2022
Revised: September 5, 2022
Accepted: September 14, 2022
Available online: October 12, 2022
DOI: 10.14456/jarst.2022.17

Keywords: data analytics, remote sensing, NDVI, NDWI, tasseled cap transformation

ABSTRACT

This research aims to apply geographic information systems work together with remote sensing for the preparation of Conservation Plant Database under the Royal Initiative of Her Royal Highness Princess Maha Chakri Sirindhorn and Rajamangala University of Technology Lanna to collect data of Yam planting area in Chiang Rai to be able to be used in the conservation of plant species. This research was conducted to design the database structure by QGIS together with raster image processing with R programming and presenting by Microsoft Power BI. The developed database consists of Yam, botanical characteristics, planting location, planting period, yield period, Yam grower, plant

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

utilization (food or medical), type of soil in the planting area, climate, and a numerical height model of the planting area. As well as, remote sensing data which are Normalized Difference Vegetation Index, Green Normalized Difference Vegetation Index, Normalized Difference Water Index, and Tasseled Cap Transformation. Consisting of Brightness index, Greenness index, and Wetness index, etc. Besides, the researcher analyzed additional data from the developed database to explain the spatial change of Yam cultivation in Chiang Rai Province. According to Aerial photographs during January – April for the past 5 years (2017-2021). The results of the analysis revealed that the trend line of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), Green Normalized Difference Vegetation Index (GNDVI), and Greenness indicate that plant cover in the survey area tends to decrease. Furthermore, Normalized Difference Water Index (NDWI) and Wetness index have a downward trend as well. From the results of such an analysis, may affect the abundance and extinction of Yam. Thus, the development of the above database can be used to make decisions about plant conservation in the future.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ร่วมกับการสำรวจระยะไกล ในการจัดทำฐานข้อมูลพันธุ์พืชอนุรักษ์ โครงการ อพ.สธ.-มทร.ล้านนา เพื่อจัดเก็บข้อมูลพื้นที่ปลูกมันพื้นบ้าน จังหวัดเชียงราย ให้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการอนุรักษ์พันธุ์พืช การวิจัยครั้งนี้ดำเนินการออกแบบโครงสร้างฐานข้อมูล โดยใช้โปรแกรม QGIS ร่วมกับการประมวลผลภาพราสเตอร์ ด้วยภาษา R และนำเสนอด้วย Microsoft Power BI ซึ่งฐานข้อมูลที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยข้อมูลมันพื้นบ้าน ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ ตำแหน่งที่ปลูก ช่วงเวลาการปลูก ช่วงเวลาการให้ผลผลิต เกษตรกรผู้ปลูก การใช้ประโยชน์ (อาหารหรือการแพทย์) ชนิดของดินในบริเวณที่ปลูก สภาพอากาศ และแบบจำลองความสูงเชิงเลขของพื้นที่ปลูก รวมถึงข้อมูลเกี่ยวกับการสำรวจระยะไกล ได้แก่ ดัชนีความแตกต่างพืชพรรณดัชนีความแตกต่างพืชพรรณสีเขียว ดัชนีความแตกต่างความชื้น และการแปลงค่าแทสเซิลแคป ที่ประกอบไปด้วยค่าความสว่าง ค่าความเขียวและค่าความชื้น เป็นต้น นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลเพิ่มเติมจากการพัฒนาฐานข้อมูล เพื่ออธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงเชิงพื้นที่ปลูกมันพื้นบ้าน จังหวัดเชียงราย จากภาพถ่ายทางอากาศ ในช่วงเดือน มกราคม – เมษายน ย้อนหลัง 5 ปี (2560-2564) ผลการวิเคราะห์พบว่า ค่าแนวโน้มดัชนีความแตกต่างพืชพรรณ ดัชนีความแตกต่างพืชพรรณสีเขียวและค่าความเขียว ที่บ่งบอกถึงการปกคลุมของพืชในบริเวณพื้นที่สำรวจมีแนวโน้มลดลง และค่าดัชนีความแตกต่างความชื้นและค่าความชื้นมีแนวโน้มลดลง จากผลการวิเคราะห์ดังกล่าวอาจส่งผลต่อความสมบูรณ์ของพืชและการสูญสิ้นของพันธุ์พืช ดังนั้น การพัฒนาฐานข้อมูลข้างต้นจะสามารถนำไปใช้ในการตัดสินใจหาแนวทางในการอนุรักษ์พันธุ์พืชได้ในอนาคต

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

คำสำคัญ: การวิเคราะห์ข้อมูล การสำรวจระยะไกล ดัชนีความแตกต่างพืชพรรณ ดัชนีความแตกต่างความชื้น การแปลงค่าแทสเซิลแคป

บทนำ

มันพื้นบ้าน (Yam) หรือมันป่า ที่พบในจังหวัดเชียงราย คือ มันเสา มันเลือด มันจาวมะพร้าว มันอ้อน มันสาคู เป็นต้น ขึ้นกระจายตามธรรมชาติ ซึ่งมันพื้นบ้านเป็นพืชอาหารที่สำคัญทดแทนข้าว มีคุณค่าโภชนาการมีประโยชน์ทางการแพทย์มีแคลเซียม โพเทสเซียม แมกนีเซียม วิตามิน กรดโฟลิก [1] รวมถึงมีฮอร์โมนเอสโตรเจนช่วยปรับสมดุลของร่างกาย และช่วยล้างสารพิษในร่างกาย [1-3] เกษตรกรนิยมขุดหัวมันตามธรรมชาติ ไปบริโภคหรือขาย แต่ไม่นิยมปลูกทดแทนหัวที่ขุดจากธรรมชาติ ทำให้หัวมันพื้นบ้านบางพันธุ์เริ่มหายากบางพันธุ์เริ่มสูญหายไป เนื่องจากมีเพียงการใช้ประโยชน์แต่ขาดการอนุรักษ์ หรือส่งเสริมให้มีการขยายพันธุ์หรือปลูกทดแทน [1] ทำให้หลายหน่วยงานได้ให้ความสำคัญกับการสำรวจและศึกษาลักษณะประจำพันธุ์ การปลูกขยายพันธุ์มันพื้นบ้านเพื่อการใช้ประโยชน์ การอนุรักษ์และการปลูกเชิงพาณิชย์เพิ่มมากขึ้น

มันพื้นบ้านเป็นพืชที่ปลูกง่าย สามารถเจริญเติบโตได้ในดินแทบทุกชนิด [1] ดินที่เหมาะสมในการปลูกควรเป็นดินร่วนปนทรายเพราะมีอินทรียวัตถุค่อนข้างสูง [3] พื้นที่เหมาะสมในการปลูกต้องมีปริมาณน้ำที่เหมาะสม แต่ไม่มีน้ำท่วมขัง และมีแสงแดดส่องทั่วถึง โดยจะมีการขุดมันขึ้นมาขายในช่วงเดือนธันวาคม-เดือนเมษายน ปัจจุบันมีการประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ช่วยหาพื้นที่ที่มีความเหมาะสมในการปลูกเพิ่มมากขึ้น เช่น กรมพัฒนาที่ดินได้ศึกษาและเผยแพร่ ข้อมูลพื้นที่ที่มีศักยภาพในการปลูกพืชเชิงพาณิชย์ เช่น ข้าว ลำไย และลิ้นจี่ เป็นต้น คณะผู้วิจัยจึงมีแนวความคิดในการนำข้อมูลจากการสำรวจเกษตรกรผู้ปลูกมันพื้นบ้านของสถาบันวิจัยเทคโนโลยีเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา กับข้อมูลที่เกี่ยวข้อง เช่น ชนิดของดิน การใช้ประโยชน์ที่ดิน รวมถึงสภาพภูมิอากาศร่วมกับข้อมูลทางภูมิศาสตร์จัดเก็บให้อยู่ในระบบฐานข้อมูล เพื่อทำการศึกษาวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพื้นที่ที่อาจทำให้เห็นถึงพื้นที่ปลูกมันพื้นบ้านที่เหมาะสม หรือเห็นถึงการเปลี่ยนแปลงเชิงพื้นที่ที่มีความสัมพันธ์กับเวลาได้

ปัจจุบันมีการใช้ระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ร่วมกับการสำรวจระยะไกลในการสำรวจและวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพื้นที่ด้านการเกษตรเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากสามารถสำรวจพื้นที่ในบริเวณหรือปริมาณที่มากกว่า รวมถึงรวดเร็วและประหยัดค่าใช้จ่ายมากกว่าการลงพื้นที่จริง [4] จากการศึกษางานวิจัยเกี่ยวกับการสำรวจระยะไกล พบว่ามีงานวิจัยที่เกี่ยวข้องน่าสนใจใน 2 ประเด็น คือ

ประเด็นที่ 1 การใช้ภาพถ่ายดาวเทียม Landsat เพื่อตรวจสอบความสมบูรณ์ของพืชและประเมินการผลิตพืชผล เช่น Pianchan และคณะ [5] ประยุกต์ใช้ดัชนีพืชพรรณ 2 กลุ่ม ประกอบด้วย กลุ่มที่ตามองเห็น เช่น ดัชนีความแตกต่างพืชพรรณ (NDVI) ดัชนีความแตกต่างพืชพรรณสีเขียว (GNDVI) กับกลุ่มปริมาณน้ำบนเรือนยอด เช่น ดัชนีความแตกต่างความชื้น (NDWI) เพื่อหาความสัมพันธ์และประมาณผลผลิต ผลการวิจัยพบว่า ดัชนีพืชพรรณกลุ่มตามองเห็นสามารถประมาณผลผลิตได้ดีกว่าดัชนีพืชพรรณกลุ่มน้ำบนเรือนยอด นอกจากนั้น Pattanasak และคณะ [6] ได้ทำการศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ดัชนีความแตกต่างพืชพรรณกับการแปลงค่าแทสเซิลแคป (Tasseled cap transformation) ในเขตเมืองเชียงใหม่ พบว่า ดัชนีความแตกต่างพืชพรรณสามารถนำมาใช้เป็นสิ่งบ่งชี้ที่แสดงให้เห็นถึงลักษณะการใช้ประโยชน์ที่ดิน รวมถึงปริมาณพืชที่ปกคลุมดินได้ โดย Samarawickrama และคณะ [7] ได้ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่าง ดัชนีความแตกต่างพืชพรรณกับการแปลงค่าแทสเซิลแคป พบว่าค่าดัชนีความแตกต่างพืชพรรณกับค่าความเขียว (Greenness) ของการแปลงค่าแทสเซิลแคปมีความสัมพันธ์กันในระดับมาก และ Suratvanit และคณะ [4] กล่าวว่า ดัชนีความแตกต่างพืชพรรณที่คำนวณได้จากทรงพุ่มของพืช สามารถนำมาพยากรณ์ความอุดม

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

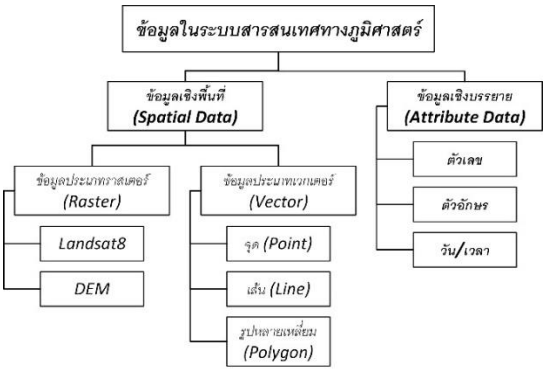
สมบูรณ์ของดินในพื้นที่โดยผ่านการสำรวจทางอ้อมจากทรงพุ่มของพืชได้ สามารถใช้ในการสำรวจและวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพื้นที่ได้

ประเด็นที่ 2 Pholgerddee และคณะ [8] ศึกษาดัชนีความแตกต่างพืชพรรณและดัชนีความแตกต่างความชื้น เพื่อประเมินและจำแนกระดับความรุนแรง ความแห้งแล้งในพื้นที่ เพื่อเตรียมรับมือกับปัญหาความแห้งแล้งอย่างยั่งยืน ผลการศึกษาพบว่า ความเปลี่ยนแปลงของพืชพรรณที่ปกคลุมต่างกัน สามารถบอกถึงความแห้งแล้งในเชิงพื้นที่ ซึ่งสามารถแสดงได้จากค่าความแตกต่างของดัชนีความแตกต่างพืชพรรณ (dNDVI) และค่าดัชนีความแตกต่างความชื้น (dNDWI) ที่แสดงถึงความแตกต่างที่ผสานกันระหว่างพืชพรรณที่ปกคลุมกับปริมาณน้ำในพื้นที่ได้ โดยสามารถนำไปจัดทำแผนที่เพื่อบอกถึงความแห้งแล้งในเชิงพื้นที่และเวลา ทดแทนการใช้ข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยาหรือในกรณีที่ข้อมูลด้านภูมิอากาศมีเพียงพอหรือไม่ครอบคลุมพื้นที่ศึกษา สอดคล้องกับ Seekaw และคณะ [9] พัฒนาดัชนีพืชพรรณมาตรฐานเพื่อประเมินความแห้งแล้งในพื้นที่ สำหรับใช้ในกรณีที่ข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยาไม่เพียงพอหรือไม่ทันต่อความต้องการและเพื่อใช้ในการติดตามความแห้งแล้ง โดยทำการวิเคราะห์คะแนนมาตรฐาน (Z-score) ดัชนีความแตกต่างพืชพรรณและตรวจสอบความถูกต้องกับดัชนีมาตรฐานน้ำฝน (Standardized Precipitation Index: SPI) ในช่วงเวลาเดียวกัน

การพัฒนาระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ เพื่อนำไปสู่การขับเคลื่อนการเกษตรด้วยข้อมูลครั้งนี้ จัดทำขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ร่วมกับการสำรวจระยะไกลในการจัดทำฐานข้อมูลพันธุ์พืชอนุรักษ์ โครงการ อพ.สธ.- มทร.ล้านนา เพื่อจัดเก็บข้อมูลการสำรวจพื้นที่ปลูกมันพื้นบ้านจังหวัดเชียงรายที่นำไปสู่การใช้ประโยชน์ในการอนุรักษ์พันธุ์พืชต่อไป

ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการพัฒนาการจัดเก็บข้อมูลในระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ ประกอบด้วยข้อมูล 2 ประเภท คือ 1) ข้อมูลเชิงพื้นที่ และ 2) ข้อมูลเชิงบรรยาย โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้ (รูปที่ 1)



รูปที่ 1 ประเภทของข้อมูลในระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์

1. ข้อมูลเชิงพื้นที่ (Spatial Data) คือ ข้อมูลที่แสดงถึงลักษณะทางกายภาพที่สามารถอ้างอิงค่าพิกัดทางภูมิศาสตร์บนผิวโลกได้ สามารถจำแนกได้ 2 รูปแบบ คือ

1.1 ข้อมูลประเภทราสเตอร์ (Raster) หรือภาพถ่าย เป็นข้อมูลที่มีโครงสร้างแบบกริดเซลล์ (Grid Cell) โดยลักษณะโครงสร้างของข้อมูลเป็นช่องเหลี่ยมเรียกว่า จุดภาพ เรียงต่อเนื่องกันในแนวแถวและคอลัมน์ เช่น แบบจำลองความสูงเชิงเลข (Digital Elevation Model: DEM) ข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ ภาพถ่ายดาวเทียมหรือภาพที่ได้จากการสแกน โดยในแต่ละจุดภาพแทน 1 ค่าข้อมูลที่สามารถบอกรายละเอียดในตำแหน่งนั้น ๆ ขึ้นอยู่กับขนาดของเซลล์ว่าจะแทนขนาดของพื้นที่กว้างและยาวเท่าไร สำหรับงานวิจัยนี้ใช้ข้อมูลประเภทราสเตอร์ 2 รูปแบบ คือ ข้อมูลแบบจำลองความสูงเชิงเลข และภาพถ่ายทางอากาศ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1.1.1 ข้อมูลแบบจำลองความสูงเชิงเลข (Digital Elevation Model: DEM) เป็นข้อมูลที่ทำให้ทราบถึงลักษณะภูมิประเทศได้จากการรังวัดความสูง

1.1.2 ข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ ที่ได้จากดาวเทียม Landsat 8 ที่ส่งขึ้นวงโคจร โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาติดตามและสังเกตการณ์การเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติหรือโดยมนุษย์เพื่อสนับสนุนงานด้านการศึกษา การทำแผนที่ เกษตรกรรม ธรณีวิทยา ป่าไม้ เป็นต้น ประกอบไปด้วย 11 แบนด์ ดังแสดงในตารางที่ 1

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

ซึ่งมีการประยุกต์ใช้วิเคราะห์ข้อมูลเชิงพื้นที่ ดังนี้ แบนด์ 1: Coastal Aerosol: การสังเกตน้ำตื้น ฝุ่นละออง แบนด์ 2: Blue: จำแนกพืชพรรณ ประเภทของป่า แบนด์ 3: Green: จำแนกพืชพรรณ ประเมินความแข็งแรงของพืช แบนด์ 4: Red: จำแนกพืชพรรณ ดินและลักษณะเมือง แบนด์ 5: NIR: จำแนกพืชพรรณ แผนที่ชายฝั่ง ปริมาณชีวมวล แบนด์ 6-7: SWIR1-2: ความชื้นของพืช ภัยแล้ง พื้นที่ที่ถูกไฟไหม้ แบนด์ 8: Panchromatic: การเพิ่มความคมชัดของภาพ ให้มีความละเอียดสูงขึ้น แบนด์ 9: Circus: การตรวจจับเมฆ แบนด์ 10-11: TIRS1-2: การทำแผนที่อุณหภูมิพื้นผิวดินและการประมาณความชื้นในดิน [10] ซึ่งสามารถดาวน์โหลดข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ ได้จาก https://glovis.usgs.gov/

ตารางที่ 1 รายละเอียดแบนด์ ดาวเทียม Landsat 8 [10]

แบนด์	ความยาวคลื่น (ไมโครเมตร)	รายละเอียดภาพ (เมตร)
1 Coastal Aerosol	0.43 - 0.45	30
2 Blue	0.45 - 0.51	30
3 Green	0.53 - 0.59	30
4 Red	0.64 - 0.67	30
5 NIR	0.85 - 0.88	30
6 SWIR 1	1.57 - 1.65	30
7 SWIR 2	2.11 - 2.29	30
8 Panchromatic	0.50 - 0.68	15
9 Circus	1.36 - 1.38	30
10 TIRS1	10.60 - 11.19	100
11 TIRS2	11.50 - 12.51	100

1.2. ข้อมูลประเภทเวกเตอร์ (Vector) เป็นข้อมูลที่สร้างขึ้นจากการอ้างอิงข้อมูลประเภทราสเตอร์หรือภาพถ่าย (Raster) เพื่อใช้เป็นตัวแทนของสิ่งต่าง ๆ ที่ปรากฏในพื้นที่จริงที่สามารถอ้างอิงได้ 3 รูปแบบ คือ

1.2.1 จุด (Point) ใช้อ้างอิงข้อมูลที่เป็นตำแหน่งที่ตั้งในพื้นที่ เช่น ตำแหน่งพันธุ์พืชอนุรักษ์ที่สำรวจ ตำแหน่งหมู่บ้าน (Village) ตำแหน่งสถานีตรวจอากาศ เป็นต้น ซึ่งข้อมูลประเภทจุดนี้ สามารถบอกรายละเอียดตำแหน่งที่ตั้งของจุดนั้น ๆ ในรูปแบบละติจูดและลองจิจูด (Latitude, Longitude) หรือ ระบบพิกัดกริดแบบยูทีเอ็ม (Universal Transverse Mercator: UTM) เป็นต้น

1.2.2 เส้น (Line) ใช้อ้างอิงข้อมูลที่มีลักษณะเส้น เช่น แม่น้ำ (River) ถนน (Road) เส้นระดับความสูง (Contour) เป็นต้น ซึ่งข้อมูลประเภทเส้นนี้ สามารถบอกรายละเอียดเกี่ยวกับลักษณะของเส้นตรง เส้นโค้ง รวมถึงความยาว (Length) ของเส้น เช่น ความยาวของถนนหรือแม่น้ำ เป็นต้น

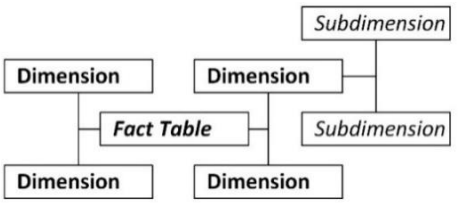
1.2.3 รูปปิดหรือรูปหลายเหลี่ยม (Polygon) ใช้อ้างอิงข้อมูลที่บอกถึงขนาดและขอบเขตของพื้นที่ เช่น ขอบเขตการปกครอง ระดับ ตำบล (Subdistrict) อำเภอ (District) จังหวัด (Province) ข้อมูลชุดดิน (Soil) และการใช้ประโยชน์ที่ดิน (Land Used) เป็นต้น ซึ่งข้อมูลประเภทรูปปิดหลายเหลี่ยมนี้สามารถบอกรายละเอียดเกี่ยวกับขนาดของพื้นที่ (Area) หรือความยาวของเส้นรอบรูปพื้นที่ (Length) ได้ เช่น ขนาดของพื้นที่ปลูกมันพื้นบ้าน ขนาดของพื้นที่การปกครอง เป็นต้น

2. ข้อมูลเชิงบรรยาย (Attribute Data) เป็นข้อมูลที่อธิบายคุณลักษณะ หรือรายละเอียดข้อมูลเชิงพื้นที่ ในรูปแบบระบบฐานข้อมูล (Database System) เช่น ข้อมูลมันพื้นบ้านที่สำรวจ จะมีข้อมูลที่เกี่ยวข้องหรือคำอธิบายเพิ่มเติม คือ มันอะไร มีลักษณะทางพฤกษศาสตร์ลักษณะของใบเป็นอย่างไร ข้อมูลการใช้ประโยชน์จากมันพื้นบ้านในท้องถิ่น ข้อมูลสภาพอากาศภายในท้องถิ่น (ปริมาณน้ำฝน อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์) ข้อมูลคำอธิบายชุดกลุ่มดิน เป็นต้น

ในส่วนของการพัฒนาระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์เพื่อนำไปสู่การขับเคลื่อนการเกษตรด้วยข้อมูลครั้งนี้ คณะผู้วิจัยใช้แนวคิดของสคีมาแบบเกล็ดหิมะ (Snowflake Schema) [11] ดังแสดงในรูปที่ 2 ที่ออกแบบมาเพื่อลดความซ้ำซ้อนกันของข้อมูล (Data Redundancy) มีองค์ประกอบที่สำคัญประกอบไปด้วยตาราง 2 ชนิด คือ ตารางข้อเท็จจริง (Fact Table) กับ

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

ตารางมิติ (Dimension Table) หรือตารางมิติย่อย (Subdimension Table) โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้



รูปที่ 2 โครงสร้างสคีมาแบบเกล็ดหิมะ

1. ตารางข้อเท็จจริง (Fact Table) เป็นตารางที่อยู่ตรงกลาง ที่ห้อมล้อมด้วยตารางมิติหรือตารางมิติย่อย ซึ่งข้อมูลในตารางข้อเท็จจริงจัดเก็บข้อมูลการสังเกตหรือเหตุการณ์ ซึ่งเป็นตารางที่ใช้เชื่อมโยงกับมิติข้อมูลที่เกี่ยวข้อง สำหรับงานวิจัยนี้ออกแบบตารางข้อเท็จจริงใน 2 ส่วน คือ

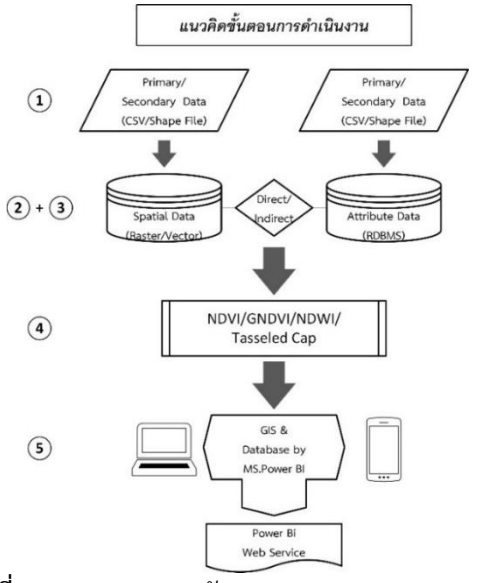
ตารางตำบล (Subdistrict) ซึ่งจะใช้เป็นตารางในการเก็บข้อมูลเชิงพื้นที่ รวมถึงรายละเอียดที่เกี่ยวข้องในพื้นที่ ซึ่งจะกล่าวถึงวิธีการดำเนินการวิจัย ดังแสดงในรูปที่ 12 ต่อไป

ตารางมันพื้นบ้าน (Yam) ซึ่งจะใช้เป็นตารางในการเก็บข้อมูล ลักษณะทางพฤกษศาสตร์และข้อมูลต่าง ๆ จากการสำรวจมันพื้นบ้านในพื้นที่จังหวัดเชียงราย ซึ่งจะกล่าวในวิธีการดำเนินการวิจัย ดังแสดงในรูปที่ 14 ต่อไป

2. ตารางมิติหรือตารางมิติย่อย (Dimension or Subdimension Table) เป็นตารางที่อธิบายรายละเอียดหรือคุณลักษณะเพิ่มเติมในมุมมองต่าง ๆ ของตารางข้อเท็จจริงเพิ่มเติม เช่น ลักษณะทางพฤกษศาสตร์พืชอนุรักษ์ การใช้ประโยชน์พืชอนุรักษ์ ดิน อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ปริมาณน้ำฝน แบบจำลองระดับสูงเชิงเลข การใช้ประโยชน์ที่ดิน เกษตรกรเจ้าของพันธุ์หรือผู้ให้ข้อมูล เป็นต้น

วิธีดำเนินการวิจัย

จากการศึกษาวัตถุประสงค์ เป้าหมายของกิจกรรมการสำรวจ เก็บรวบรวมทรัพยากร พบว่ามีองค์ความรู้ที่ต้องจัดเก็บ 2 ประเด็นหลัก คือ 1) ข้อมูลพันธุ์พืชอนุรักษ์ (มันพื้นบ้าน) คุณลักษณะทางพฤกษศาสตร์ และ 2) ข้อมูลทางภูมิศาสตร์ โดยให้ความสำคัญกับการจัดเก็บรวบรวมข้อมูลการสำรวจมันพื้นบ้าน ที่สามารถวิเคราะห์และแสดงผลบนแผนที่ทางภูมิศาสตร์ได้ คณะผู้วิจัยเลือกใช้ซอฟต์แวร์ QGIS ทำงานร่วมกับการประมวลผลภาพราสเตอร์โดยใช้ ภาษา R (R Programming) พร้อมทั้งเชื่อมโยงข้อมูลจากแหล่งต่าง ๆ ไว้ด้วยกัน ผ่านการนำเสนอด้วย Microsoft Power BI โดยมีขั้นตอนการดำเนินงาน 5 ขั้นตอน ดังนี้ 1) ระบุเป้าหมายความต้องการ 2) เก็บรวบรวมและทำความสะอาดข้อมูล 3) สร้างแบบจำลองข้อมูล 4) วิเคราะห์และประมวลผลข้อมูล 5) นำเสนอข้อมูลพันธุ์พืชอนุรักษ์ (มันพื้นบ้าน) ในรูปแบบ Visualization ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 กระบวนการพัฒนาระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์

ขั้นตอนที่ 1) ระบุเป้าหมายความต้องการ (Define the Goal)

การพัฒนาระบบครั้งนี้ คณะผู้วิจัยได้กำหนดวัตถุประสงค์ของการวิจัยว่า “เราจะจัดเก็บ รวบรวมข้อมูลการอนุรักษ์พันธุ์พืช (มันพื้นบ้าน) โครงการ อพ.สธ.-มทร.ล้านนาอย่างไร เพื่อนำไปสู่การวิเคราะห์และการแสดงผลข้อมูลระบบแผนที่ทางภูมิศาสตร์” ในรูปแบบ (Data

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

Visualization) นำไปสู่การตัดสินใจที่เข้าใจง่ายและสะดวกต่อการใช้งานได้อย่างมีประสิทธิภาพ [12] โดยใช้จังหวัดเชียงรายเป็นกรณีศึกษา

ขั้นตอนที่ 2) การเก็บรวบรวม และทำความสะอาดข้อมูล (Collect and Clean the Data)

ขั้นตอนนี้คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการจัดเก็บข้อมูลในระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ ในรูปแบบข้อมูลเชิงพื้นที่และข้อมูลเชิงบรรยาย พร้อมทั้งทำความสะอาดข้อมูลเพื่อลดความซ้ำซ้อนและข้อผิดพลาดของข้อมูลโดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

2.1 ข้อมูลเชิงพื้นที่ (Spatial Data) ของจังหวัดเชียงราย มีรายละเอียดดังนี้

2.1.1 ข้อมูลประเภทราสเตอร์ ดำเนินการจัดเก็บข้อมูล 2 ชนิด คือ

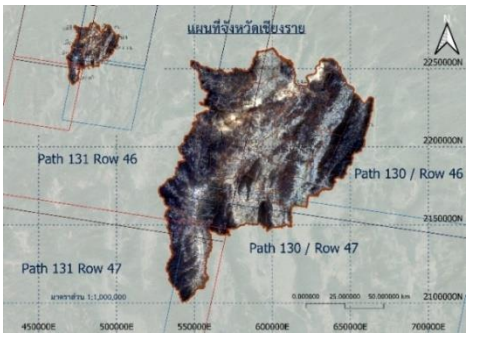
1. แบบจำลองความสูงเชิงเลข เป็นข้อมูลที่ทำให้ทราบถึงลักษณะของภูมิศาสตร์ของจังหวัดเชียงราย (ดังแสดงในรูปที่ 4)

รูปที่ 4 แบบจำลองความสูงเชิงเลข

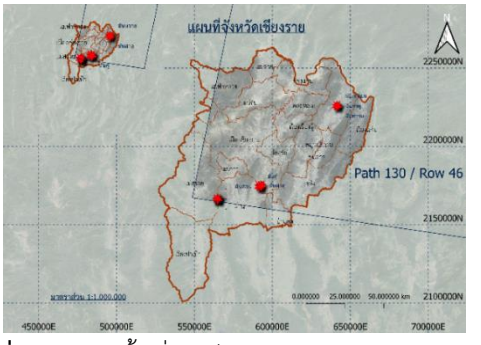
2. ข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม Landsat 8 ซึ่งจะโคจรผ่านทุก 16 วัน โดยภาพถ่ายดาวเทียมของจังหวัดเชียงราย จะเป็นภาพที่อยู่ในพาร์ท (Path) 130-131 และในแถว (Row) 46-47 โดยได้ออกแบบระบบให้สามารถเก็บข้อมูลได้ครอบคลุมจังหวัดเชียงราย (ดังแสดงในรูปที่ 5)

ซึ่งในงานวิจัยนี้ จัดเก็บตำแหน่งมันพื้นบ้านที่สำรวจ (ต้นแบบ) มีมันพื้นบ้าน 15 สายพันธุ์ (4 ตำแหน่ง) โดยมี 2 ตำแหน่งที่ใกล้กันมาก คือ อ.เมือง และ อ.พาน ส่งผลให้การมองในแผนที่เห็นเป็นจุดเดียวกัน ดังแสดงในรูปที่ 6 ซึ่งข้อมูลทั้งหมดอยู่ในพาร์ทที่ 130 และแถวที่ 46 เท่านั้น คณะผู้วิจัยจึงขอนำเสนอข้อมูลเฉพาะพาร์ทและแถวที่เกี่ยวข้อง

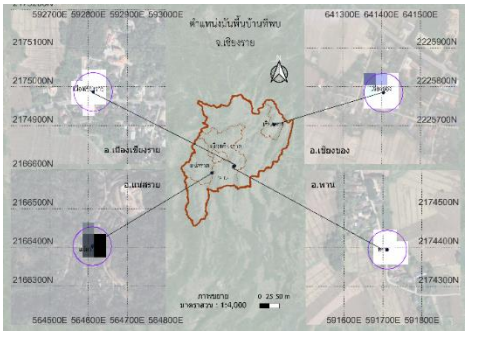
คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการรวบรวมข้อมูลภาพถ่ายทางอากาศ Landsat 8 ในบริเวณพื้นที่สำรวจมันพื้นบ้าน ทั้ง 4 ตำแหน่ง ประกอบด้วย อ.เมืองเชียงราย อ.เชียงของ อ.พาน และอ.แม่สรวย จังหวัดเชียงราย (ดังแสดงในรูปที่ 7)



รูปที่ 5 การแบ่งส่วนภาพถ่ายทางอากาศของจังหวัดเชียงราย



รูปที่ 6 บริเวณพื้นที่จัดเก็บข้อมูลงานวิจัย (พาร์ท 130 แถว 46)



รูปที่ 7 พื้นที่จัดเก็บข้อมูล มันพื้นบ้าน จังหวัดเชียงราย

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

โดยจัดเก็บข้อมูลในช่วงเดือน มกราคม – เมษายน ย้อนหลัง 5 ปี (2560-2564) ร่วมกับการคำนวณค่าดัชนีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ดัชนีความแตกต่างพืชพรรณ (Normalized Difference Vegetation Index: NDVI) [13] เป็นการหาค่าการกระจายตัวและความสมบูรณ์ของพืชพรรณโดยรวม สามารถหาค่าได้จากผลต่างการสะท้อนพืชพรรณของข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียม ดังแสดงในสมการที่ (1)

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \quad (1)$$

โดยที่:

NIR = ค่าการสะท้อนช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้

Red = ค่าการสะท้อนช่วงคลื่นระดับที่ตามองเห็นสีแดง

หมายเหตุ: ค่าที่ได้อยู่ระหว่าง -1 ถึง 1 กล่าวคือ ค่าที่อยู่ใกล้ 1 หมายถึง มีพืชพรรณปกคลุมในพื้นที่สำรวจปริมาณที่สูง ค่าที่อยู่ใกล้ 0 หรือน้อยกว่า หมายถึง ไม่มีพืชพรรณในพื้นที่สำรวจ

ดัชนีความแตกต่างพืชพรรณสีเขียว (Green Normalized Difference Vegetation Index: GNDVI) [14] เป็นการหาค่าการกระจายตัวและความสมบูรณ์ของพืชพรรณโดยรวม โดยหาค่าผลต่างการสะท้อนพืชพรรณที่ได้จากการสะท้อนแสงจากใบของพืช ดังแสดงในสมการที่ (2)

$$GNDVI = \frac{NIR - Green}{NIR + Green} \quad (2)$$

โดยที่:

NIR = ค่าการสะท้อนช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้

Green = ค่าการสะท้อนช่วงคลื่นระดับที่ตามองเห็นสีเขียว

ดัชนีความแตกต่างความชื้น (Normalized Difference Water Index: NDWI) เป็นดัชนีที่มีความเกี่ยวข้องกับปริมาณน้ำในพืช [15] ดังแสดงในสมการที่ (3)

$$NDWI = \frac{NIR - SWIR1}{NIR + SWIR1} \quad (3)$$

โดยที่:

NIR = ค่าการสะท้อนช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้

SWIR1 = ค่าการสะท้อนช่วงคลื่นอินฟราเรดคลื่นสั้น 1

การแปลงค่าแทสเซิลแคป [16] ประกอบด้วยการประเมิน 3 ดัชนี คือ ค่าความสว่าง (Brightness) ค่าความเขียว (Greenness) และค่าความชื้น (Wetness) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4) – (6)

$$\begin{aligned}\text{Brightness} = {} & 0.3029B_2 \\ & + 0.2786B_3 + 0.4733B_4 \\ & + 0.5599B_5 \\ & + 0.5080B_6 + 0.1872B_7\end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned}\text{Greenness} = {} & -0.2941B_2 \\ & - 0.2430B_3 - 0.5424B_4 \\ & + 0.7276B_5 \\ & + 0.0713B_6 - 0.1608B_7\end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned}\text{Wetness} = {} & 0.1511B_2 \\ & + 0.1973B_3 + 0.3283B_4 \\ & + 0.3407B_5 \\ & - 0.7117B_6 - 0.4559B_7\end{aligned} \quad (6)$$

โดยที่:

B2 = ค่าการสะท้อนช่วงคลื่นระดับที่ตามองเห็นสีน้ำเงิน (*Blue*)

B3 = ค่าการสะท้อนช่วงคลื่นระดับที่ตามองเห็นสีเขียว (*Green*)

B4 = ค่าการสะท้อนช่วงคลื่นระดับที่ตามองเห็นสีแดง (*Red*)

B5 = ค่าการสะท้อนช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ (*NIR*)

B6 = ค่าการสะท้อนช่วงคลื่นอินฟราเรดคลื่นสั้น 1 (*SWIR1*)

B7 = ค่าการสะท้อนช่วงคลื่นอินฟราเรดคลื่นสั้น 2 (*SWIR2)*

2.1.2 ข้อมูลประเภทเวกเตอร์ เก็บข้อมูลที่เกี่ยวข้อง 2 ประเด็นดังต่อไปนี้

ข้อมูลด้านกายภาพท้องถิ่น คือ รหัสพิกัด พันธุ์พืชอนุรักษ์ (มันพื้นบ้าน) การใช้ประโยชน์ที่ดิน ข้อมูลคำอธิบายกลุ่มชุดดิน ความอุดมสมบูรณ์ของดิน แหล่งน้ำ คุณภาพน้ำ (ชลประทานหรือตามธรรมชาติ) สภาพภูมิประเทศ รวมถึงสภาพภูมิอากาศในท้องถิ่น เช่น ปริมาณ

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

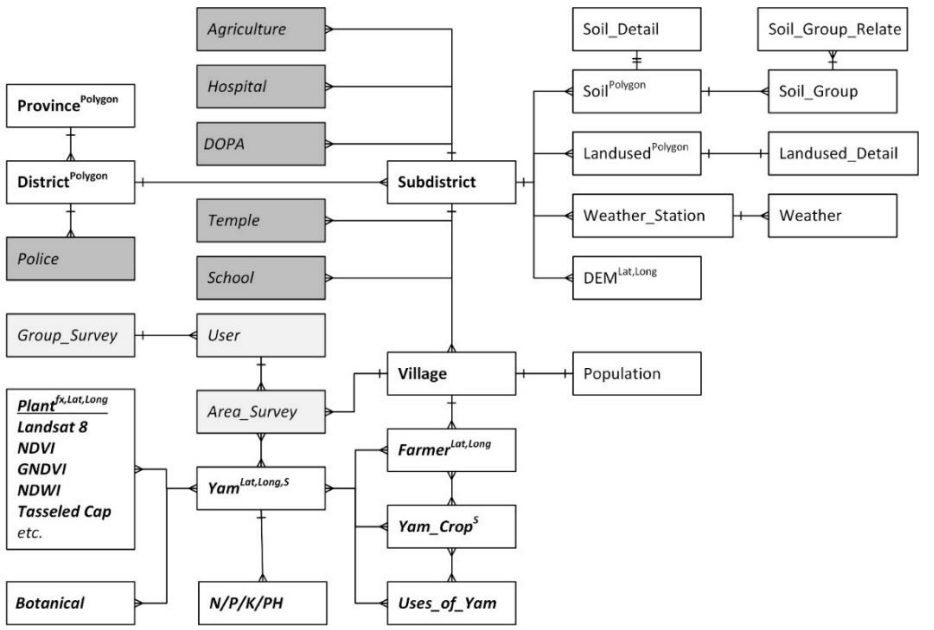
น้ำฝน อุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์ ปริมาณแสง ความเร็วลม เป็นต้น

ข้อมูลพื้นฐานท้องถิ่น เก็บข้อมูลเกี่ยวกับ ชื่อหมู่บ้านประกอบไปด้วย ประวัติหมู่บ้าน ชุมชน ตำแหน่งที่ตั้งของหมู่บ้าน (ละติจูดและลองจิจูด) ขอบเขตการปกครอง ที่ว่าการอำเภอ องค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น จำนวนประชากรจำแนกตามอายุ สถานศึกษาโรงพยาบาล ศูนย์สุขภาพชุมชนและสถานีตำรวจ เป็นต้น

2.2 ข้อมูลเชิงบรรยาย จัดเก็บข้อมูลมันพื้นบ้าน (Yam) ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ การใช้ประโยชน์ในท้องถิ่น (อาหาร ยารักษาโรค เครื่องเรือนและยาฆ่าแมลง) ช่วงเวลาการปลูก การให้ผล รวมถึงความเกี่ยวข้องกับประเพณี วัฒนธรรม ความเชื่อทางศาสนา บริเวณที่พบ รวมถึงแหล่งที่มาของข้อมูล เช่น ผู้ให้ข้อมูลคือใครและที่อยู่ของผู้ให้ข้อมูล เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 3) สร้างแบบจำลองข้อมูล (Dimensional Model)

การสร้างแบบจำลองข้อมูลระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ใช้แนวคิดสคีมาแบบเกล็ดหิมะที่เป็นการผสานการทำงานร่วมกันของข้อมูลเชิงพื้นที่และข้อมูลเชิงบรรยาย ที่มีความเกี่ยวข้องกันและความสัมพันธ์กันเข้าไว้ด้วยกันอย่างเป็นระบบ (รูปที่ 8)



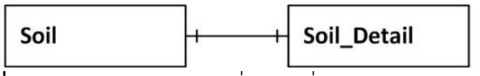
รูปที่ 8 โครงสร้างระบบฐานข้อมูลโครงการ อพ.สธ. - มทร.ล้านนา

รูปที่ 8 แสดงการออกแบบการเชื่อมโยงข้อมูลระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์โดยใช้สคีมาแบบเกล็ดหิมะประกอบไปด้วยตารางข้อเท็จจริง ตารางมิติและตารางมิติย่อยที่ผสานแนวคิดการออกแบบตารางในรูปแบบมีโครงสร้าง (Hierarchy) กล่าวคือ มีการแบ่งชั้นของข้อมูลออกเป็นชั้นย่อย ๆ จากใหญ่ไปหาเล็ก คือ ระดับจังหวัด (Province) อำเภอ (District) ตำบล Subdistrict) และหมู่บ้าน (Village) รวมถึง พื้นที่สำรวจ (Survey Area) เกษตรกร (Farmer) และมันพื้นบ้าน (Yam) เป็นต้น เพื่อให้ผู้ใช้สามารถวิเคราะห์ข้อมูลได้หลากหลายมุมมอง ตั้งแต่มุมมองภาพรวมถึงมุมมองรายละเอียด (Drill Down) โดยสามารถเขียนอธิบายความสัมพันธ์ของข้อมูลในระบบฐานข้อมูลได้ 3 รูปแบบ ซึ่งขอยกตัวอย่างการอธิบายความสัมพันธ์ในแต่ละรูปแบบ ดังต่อไปนี้

รูปแบบที่ 1 ความสัมพันธ์แบบหนึ่งต่อหนึ่ง (1 to 1) ตัวอย่างของความสัมพันธ์ข้อมูลดิน (Soil) กับรายละเอียดชุดดิน (Soil_Detail) ซึ่งการอธิบายการอ่านความสัมพันธ์ของข้อมูลจะแทนค่าที่อธิบายเริ่มต้นด้วย 1

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

เสมอ โดยสามารถอธิบายความสัมพันธ์ได้ว่า “ข้อมูลดิน 1 ข้อมูลจะอ้างถึงคำอธิบายชุดดิน 1 ชุดเท่านั้น” และ “ข้อมูลคำอธิบายชุดดิน 1 ชุดจะอ้างถึงข้อมูลดินเพียงชุดเดียวเท่านั้น” ดังแสดงในรูปที่ 9

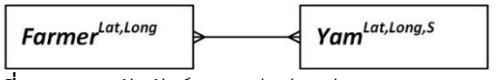


รูปที่ 9 ความสัมพันธ์แบบหนึ่งต่อหนึ่ง (1 to 1)

รูปแบบที่ 2 ความสัมพันธ์แบบหนึ่งต่อกลุ่ม (1 to Many) ตัวอย่างเช่น การอ่านความสัมพันธ์ระหว่างหมู่บ้าน (Village) กับพื้นที่สำรวจ (Area_Survey) สามารถอธิบายความสัมพันธ์ได้ว่า “หมู่บ้าน 1 หมู่บ้าน สามารถมีพื้นที่ ๆ สำรวจได้หลายพื้นที่” และ “พื้นที่สำรวจ 1 พื้นที่จะต้องสังกัดในหมู่บ้านใดหมู่บ้านหนึ่งเท่านั้น” ดังแสดงในรูปที่ 10

รูปที่ 10 ความสัมพันธ์แบบหนึ่งต่อกลุ่ม (1 to Many)

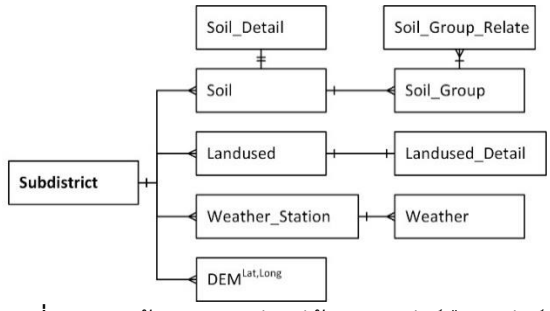
รูปแบบที่ 3 ความสัมพันธ์แบบกลุ่มต่อกลุ่ม (Many to Many) ตัวอย่างเช่น การอ่านความสัมพันธ์ระหว่าง เกษตรกร (Farmer) กับพันธุ์พืชอนุรักษ์ (มันพื้นบ้าน) สามารถอ่านความสัมพันธ์ได้ว่า “เกษตรกร 1 ท่านสามารถมีพันธุ์พืชอนุรักษ์ (มันพื้นบ้าน) ได้หลายพันธุ์” และ “พันธุ์พืชอนุรักษ์ (มันพื้นบ้าน) 1 สายพันธุ์ สามารถอยู่ในความดูแลของเกษตรกรได้หลายคน” ดังแสดงในรูปที่ 11



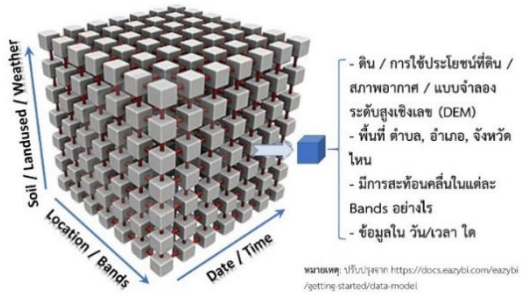
รูปที่ 11 ความสัมพันธ์แบบกลุ่มต่อกลุ่ม

จากรูปที่ 8 โครงสร้างระบบฐานข้อมูลโครงการ อพ.สธ. - มทร. ล้านนา สามารถแยกโครงสร้างข้อมูลเป็น 2 ส่วน คือ

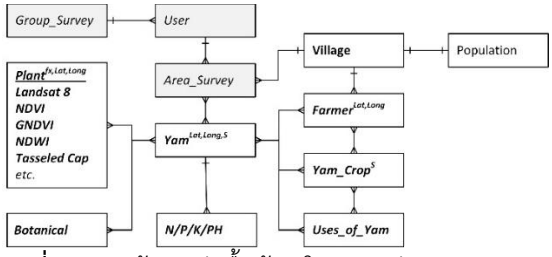
1. ข้อมูลเชิงพื้นที่ระดับจังหวัด อำเภอและตำบล ที่จัดเก็บข้อมูล ดิน (Soil) การใช้ประโยชน์ที่ดิน (Land used) สภาพภูมิอากาศในพื้นที่ (Weather) และแบบจำลองความสูงเชิงเลข (DEM) ดังแสดงในรูปที่ 12 ซึ่งจากข้อมูลสามารถสร้างระบบฐานข้อมูลในหลายมิติ (Multidimension Database) ที่สามารถอธิบายได้ว่า สภาพดิน การใช้ประโยชน์ที่ดิน สภาพอากาศในพื้นที่หรือในช่วงเวลานั้นเป็นอย่างไร เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 13



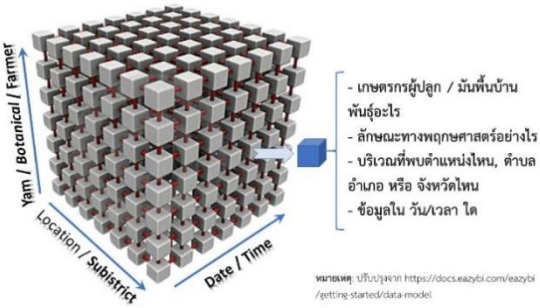
รูปที่ 12 ฐานข้อมูลมิติระดับหมู่บ้าน และพันธุ์พืชอนุรักษ์



รูปที่ 13 มิติระดับหมู่บ้าน และพันธุ์พืชอนุรักษ์

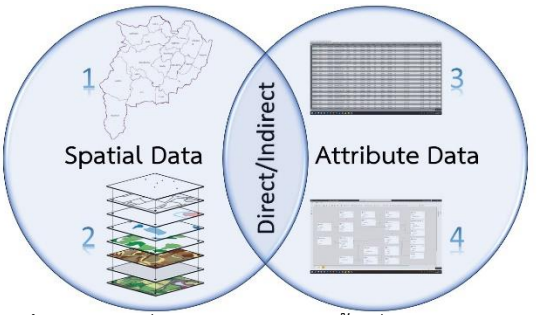


รูปที่ 14 ฐานข้อมูลมันพื้นบ้าน ในมิติระดับตำบล

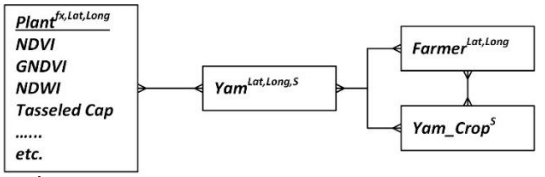


รูปที่ 15 ข้อมูลมันพื้นบ้าน ในมิติระดับตำบล

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)



รูปที่ 16 การเชื่อมโยงข้อมูลเชิงพื้นที่และข้อมูลเชิงบรรยาย



รูปที่ 17 การอ้างอิงตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ทางตรง

2. ข้อมูลเชิงบรรยายพันธุ์พืชอนุรักษ์ (มันพื้นบ้าน หรือ Yam) เก็บข้อมูลเกษตรกร (Farmer) ในพื้นที่ต่าง ๆ มีลักษณะทางพฤกษศาสตร์ (Botanical) เป็นอย่างไรหรือสามารถอธิบายได้ว่า มีการใช้ประโยชน์พันธุ์พืชอนุรักษ์ทางการแพทย์หรือใช้เป็นอาหารอย่างไร และเมื่อนำมาวิเคราะห์ข้อมูลร่วมกับข้อมูลเชิงพื้นที่ (Location) สามารถวิเคราะห์ได้ว่า การสะท้อนของคลื่นเช่น NDVI, GNDVI, Brightness, Greenness และ Wetness เป็นอย่างไร และเมื่อพิจารณาร่วมกับการเปลี่ยนแปลงตามช่วงเวลาแล้ว จะเห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของช่วงคลื่นในพื้นที่แต่ละช่วงเวลาได้ ดังแสดงในรูปที่ 14 และ 15 ตามลำดับ โดยที่ข้อมูลเชิงพื้นที่และข้อมูลเชิงบรรยายจะเชื่อมโยงหรืออ้างอิง ใน 2 รูปแบบ ดังแสดงในรูปที่ 16

การอ้างอิงตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ทางตรง (Direct) เป็นการอ้างอิงจากตำแหน่งละติจูดและลองจิจูดของสิ่งที่สนใจ เช่น ตำแหน่งละติจูดและลองจิจูดพื้นที่ปลูกมันพื้นบ้านของเกษตรกรหรือในขอบเขตที่สนใจ เช่น ขอบเขตตำบล อำเภอ หรือจังหวัด รวมถึงเป็นการอ้างอิงค่าที่อ่านได้จากภาพถ่ายดาวเทียม (Landsat 8) ทั้ง 11 แบนด์ และค่าที่คำนวณได้จากดัชนีต่าง ๆ ได้ว่ามีการสะท้อนช่วงคลื่นต่าง ๆ เช่น NDVI, GNDVI, Brightness, Greenness และ Wetness เป็นอย่างไร ดังแสดงในรูปที่ 17

การอ้างอิงตำแหน่งทางภูมิศาสตร์ทางอ้อม (Indirect) เป็นการอ้างอิงข้อมูล ในกรณีที่ข้อมูลใดก็ตามไม่ได้จัดเก็บค่าตำแหน่งละติจูดและลองจิจูดของข้อมูลไว้ สามารถใช้ค่ารหัสของหมู่บ้าน ตำบล อำเภอ หรือจังหวัดที่ได้มาจากกรมการปกครองเพื่ออ้างอิงข้อมูลที่มีความสัมพันธ์กันไว้ด้วยกัน ซึ่งการอ้างอิงทางอ้อมนี้จะใช้ประโยชน์ในการเชื่อมโยงข้อมูลเชิงพื้นที่และเชิงบรรยายเข้าไว้ด้วยกันเพื่อให้ข้อมูลทั้ง 2 ส่วนเป็นข้อมูลเดียวกัน และสามารถอ้างอิงกันได้ตลอดเวลา โดยใช้รหัส 8 หลัก ประกอบด้วย จังหวัด อำเภอ ตำบล และหมู่บ้าน ประเภทละ 2 หลัก โดยมีตัวอย่างรายละเอียดดังต่อไปนี้

รหัส 57 หมายถึง จ.เชียงราย

รหัส 5703 หมายถึง อ.เชียงของ จ.เชียงราย

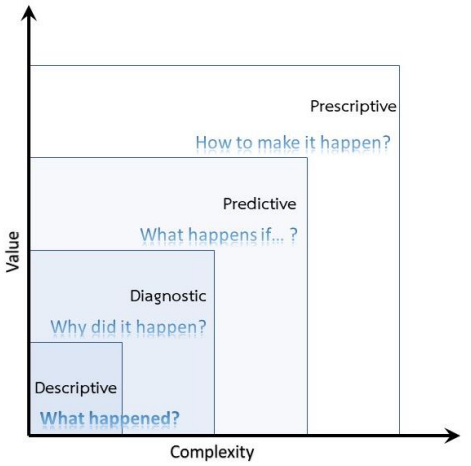
รหัส 570308 หมายถึง ต.ศรีดอนชัย อ.เชียงของ จ.เชียงราย

รหัส 57030806 หมายถึง (บ้านร่องห้า) หมู่ที่ 6 ต. ศรีดอนชัย อ.เชียงของ จ.เชียงราย

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

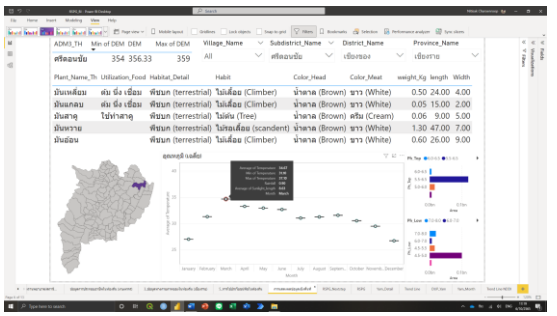
ในส่วนนี้ขออธิบายผลการศึกษาในขั้นตอนที่ 4 วิเคราะห์และประมวลผลข้อมูล และขั้นตอนที่ 5 นำเสนอข้อมูลเป็นกระบวนการหาความเข้าใจเชิงลึก (Insight) จากข้อมูลที่จัดเก็บในระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์และการสำรวจระยะไกล โดยผลของการวิจัยในครั้งนี้เป็นการวิเคราะห์และนำเสนอข้อมูลในขั้นแรก คือ การวิเคราะห์เชิงพรรณนา (Descriptive Analytic) ดังแสดงในรูปที่ 18 กล่าวคือ เป็นการศึกษาวิเคราะห์ข้อมูลพันธุ์พืชอนุรักษ์ (มันพื้นบ้าน) ร่วมกับข้อมูลเชิงพื้นที่ในอดีต และนำมาแสดงผลในรูปแบบแผนภาพหรือกราฟ เพื่ออธิบายเหตุผลให้ทราบว่าเกิดอะไรขึ้น “What happened?” โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)



รูปที่ 18 การวิเคราะห์ข้อมูล 4 รูปแบบ

1. กรณีการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงพื้นที่ร่วมกับข้อมูลเชิงบรรยาย ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถบอกได้ว่ามันพื้นบ้านที่พบในตำบลศรีดอนชัย อำเภอเชียงของ จังหวัดเชียงราย พบในตำแหน่งละติจูดหรือลองจิจูดไหน ระดับความสูงเฉลี่ยเท่าใด มีการใช้ประโยชน์อย่างไร ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ ลักษณะถิ่นอาศัย (Habitat) ลักษณะวิสัย (Habit) เป็นอย่างไร สีของหัวมัน สีของเนื้อมัน (สีอะไร) น้ำหนักหัวมันเฉลี่ย (หน่วย:กิโลกรัม) ความกว้างและความยาวของหัวมันที่พบเฉลี่ยเท่าใด (หน่วย: เซ็นติเมตร) รวมถึงในบริเวณนั้นมีสภาพภูมิอากาศ อุณหภูมิเฉลี่ย (สูงสุดและต่ำสุด) มีปริมาณน้ำฝน เท่าใด เป็นต้น ดังแสดงในรูปที่ 19

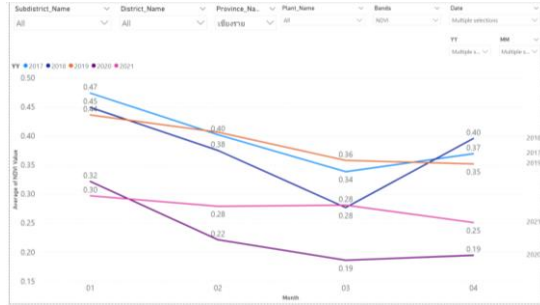


รูปที่ 19 ข้อมูลพันธุ์พืชอนุรักษ์ (มันพื้นบ้าน) ในมิติระดับตำบล

2. กรณีการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงบรรยายร่วมกับข้อมูลเชิงพื้นที่ ในส่วนนี้ขออธิบายถึงลักษณะทางภูมิศาสตร์ ที่ได้จากข้อมูลการสำรวจระยะไกล ภาพถ่ายทางอากาศย้อนหลัง 5 ปี (2017-2021 หรือ 2560-2564) ในช่วงเดือน มกราคม – เมษายน สามารถอธิบายผลการวิเคราะห์ข้อมูลได้ว่า ในบริเวณพื้นที่ปลูกพันธุ์พืชอนุรักษ์ (มันพื้นบ้าน) จังหวัดเชียงรายมีการสะท้อนของช่วงคลื่นดัชนีความแตกต่างพืชพรรณ ดัชนีความแตกต่างพืชพรรณสีเขียวและค่าความเขียว ที่บ่งบอกถึงการปกคลุมของพืชและความสมบูรณ์ของพืชในบริเวณพื้นที่สำรวจมีแนวโน้มลดลง ดังแสดงในรูปที่ 20

รูปที่ 20 ค่า NDVI, GNDVI, Greenness ในพื้นที่ปลูกมันพื้นบ้าน

เมื่อพิจารณาเฉพาะ ดัชนีความแตกต่างพืชพรรณโดยจำแนกแสดงผลในแต่ละปีเปรียบเทียบย้อนหลัง 5 ปี พบว่าในภาพรวมดัชนีความแตกต่างพืชพรรณมีแนวโน้มลดลงตามลำดับ มีเพียงเดือนเมษายน 2018 มีความชันเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีฝนตกในพื้นที่สำรวจ ส่งผลให้ดัชนีความแตกต่างพืชพรรณมีค่าเพิ่มขึ้นในช่วงดังกล่าว ดังแสดงในรูปที่ 21



รูปที่ 21 ค่าดัชนีความแตกต่างพืชพรรณ พื้นที่ปลูกมันพื้นบ้าน

เมื่อพิจารณาในส่วนการสะท้อนช่วงคลื่นของค่าดัชนีความแตกต่างความชื้นและค่าความชื้นของการแปลง

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

ค่าแทสเซิลแคป จากภาพถ่ายทางอากาศย้อนหลัง 5 ปี (2017-2021 หรือ 2560-2564) ในช่วงเดือน มกราคม – เมษายน พบว่า ค่าดัชนีความแตกต่างความชื้น และค่าความชื้น มีแนวโน้มลดลงเช่นกัน ดังแสดงในรูปที่ 22

รูปที่ 22 ค่า NDWI, Wetness พื้นที่ปลูกมันพื้นบ้าน

คณะผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของการสะท้อนของคลื่นทั้ง 2 กลุ่ม ในพื้นที่สำรวจมันพื้นบ้านทั้ง 4 ตำแหน่งของจังหวัดเชียงราย (ย้อนหลัง 5 ปี) พบว่าค่าการสะท้อนของคลื่นทั้ง 2 กลุ่ม มีความสัมพันธ์กันในระดับที่สูง ดังแสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 การวิเคราะห์ความสัมพันธ์ 2 กลุ่มดัชนี

ความสัมพันธ์	NDVI	GNDVI	Gn	NDWI	Wn	Bn
NDVI	**1.00**	**0.94**	**0.93**	0.65	0.32	-0.67
GNDVI	**0.94**	**1.00**	**0.96**	0.50	0.11	-0.52
Gn	**0.93**	**0.96**	**1.00**	0.56	0.19	-0.56
NDWI	0.65	0.50	0.56	**1.00**	**0.88**	-0.58
Wn	0.32	0.11	0.19	**0.88**	**1.00**	-0.51
Bn	*-0.67*	*-0.52*	*-0.56*	*-0.58*	*-0.51*	**1.00**

หมายเหตุ: ค่าความสว่าง (Brightness: Bn) ค่าความเขียว (Greenness: Gn) และค่าความชื้น (Wetness: Wn)

จากรูปที่ 20 รูปที่ 22 และข้อมูลในตารางที่ 2 สามารถวิเคราะห์และสรุปได้ว่า ค่าความชื้นและค่าความแตกต่างพืชพรรณสีเขียวที่มีแนวโน้มลดลง ซึ่งอาจส่งผลต่อความสมบูรณ์ของพืชและการสูญสิ้นของมันพื้นบ้านในจังหวัดเชียงราย

เมื่อพัฒนาระบบต้นแบบเสร็จ คณะผู้วิจัยทดสอบระบบกับผู้ใช้ระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์พันธุ์พืชอนุรักษ์ (มันพื้นบ้าน) ในกลุ่ม อาจารย์ เจ้าหน้าที่ผู้มีส่วนเกี่ยวข้องในโครงการ อพ.สธ.-มทร.ล้านนา จำนวน 8 ท่าน โดยแบ่งระดับพอใจของในการใช้ระบบแบ่งเป็น 5 ระดับ ดังนี้

5 หมายถึง ความพึงพอใจมากที่สุด
4 หมายถึง ความพึงพอใจมาก
3 หมายถึง ความพึงพอใจปานกลาง
2 หมายถึง ความพึงพอใจน้อย
1 หมายถึง ความพึงพอใจน้อยที่สุด
0 หมายถึง ท่านไม่ต้องการแสดงความเห็นในเรื่องนั้น ๆ

สรุปผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้สูงสุด 3 ประเด็น คือ 1) ข้อมูลมีประโยชน์ต่อผู้ใช้งาน 2) ความน่าสนใจของข้อมูลในระบบ และ 3) ความน่าเชื่อถือของข้อมูลในระบบ โดยได้รับคะแนนประเมินความพึงพอใจ 4.63, 4.50 และ 4.25 ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3 โดยเรียงลำดับค่าความพึงพอใจจากมากไปน้อย ซึ่งผู้ใช้ตอบแบบสอบถามในประเด็นจุดเด่นของระบบไว้ว่า เป็นระบบใช้งานง่าย น่าสนใจแสดงผลในรูปแบบกราฟและให้ข้อเสนอแนะเพิ่มเติม คือ ควรเพิ่มเติมข้อมูลพันธุ์พืชอนุรักษ์อื่นและจัดเก็บข้อมูลจากแหล่งอื่นเพิ่มเติม เช่น ข้อมูลจากเซนเซอร์ เป็นต้น

ตารางที่ 3 สรุปผลการประเมินความพึงพอใจ

รายละเอียดการประเมิน	$\bar{x}$
ข้อมูลมีประโยชน์ต่อผู้ใช้งาน	4.63
ความน่าสนใจของข้อมูลในระบบ	4.50
ความน่าเชื่อถือของข้อมูลในระบบ	4.25
การใช้งานง่ายของระบบ	4.00
ความครบถ้วนสมบูรณ์ของข้อมูลในระบบ	3.88
ความหลากหลายของข้อมูลในระบบ	3.88
ความเป็นปัจจุบันของข้อมูลในระบบ	3.75
ค่าเฉลี่ย	**4.125**

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

สรุปผล

การพัฒนาระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์เพื่อนำไปสู่การขับเคลื่อนการเกษตรด้วยข้อมูลนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ร่วมกับการสำรวจระยะไกลในการจัดทำฐานข้อมูลพันธุ์พืชอนุรักษ์ โครงการ อพ.สธ.- มทร.ล้านนา สำหรับจัดเก็บข้อมูลพื้นที่ปลูกมันพื้นบ้าน จังหวัดเชียงราย ให้สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการอนุรักษ์พันธุ์พืช การวิจัยครั้งนี้ดำเนินการออกแบบโครงสร้างฐานข้อมูล โดยใช้โปรแกรม QGIS ร่วมกับการประมวลผลภาพราสเตอร์ ด้วยภาษา R และนำเสนอด้วย Microsoft Power BI ซึ่งฐานข้อมูลที่พัฒนาขึ้นประกอบด้วยข้อมูลมันพื้นบ้าน ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ ตำแหน่งที่ปลูก ช่วงเวลาการปลูก ช่วงเวลาการให้ผลผลิต เกษตรกรผู้ปลูก การใช้ประโยชน์ (อาหารและการแพทย์) ชนิดของดินในบริเวณที่ปลูก สภาพอากาศ และแบบจำลองความสูงเชิงเลขของพื้นที่ปลูก รวมถึง ข้อมูลเกี่ยวกับการสำรวจระยะไกล ได้แก่ ดัชนีความแตกต่างพืชพรรณ ดัชนีความแตกต่างพืชพรรณสีเขียว ดัชนีความแตกต่างความชื้นและการแปลงค่าแทสเซิลแคป ที่ประกอบไปด้วยค่าความสว่าง ค่าความเขียวและค่าความชื้น เป็นต้น

ผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์ข้อมูลในระบบฐานข้อมูล เพื่ออธิบายถึงการเปลี่ยนแปลงเชิงพื้นที่ปลูกมันพื้นบ้าน จังหวัดเชียงราย จากภาพถ่ายทางอากาศในช่วงเดือน มกราคม – เมษายน ย้อนหลัง 5 ปี (2560-2564) การวิเคราะห์ข้อมูลพบว่า ค่าแนวโน้มดัชนีความแตกต่างพืชพรรณ ดัชนีความแตกต่างพืชพรรณสีเขียว และค่าความเขียวที่บ่งบอกถึงการปกคลุมของพืชในบริเวณพื้นที่สำรวจมีแนวโน้มลดลงและค่าดัชนีความแตกต่างความชื้นและค่าความชื้น มีแนวโน้มลดลงเช่นกัน และเมื่อวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของทั้ง 2 กลุ่มดัชนี พบว่าค่าการสะท้อนของคลื่นทั้ง 2 กลุ่มดัชนี มีความสัมพันธ์กันในระดับที่มากสอดคล้องกับ Samarawickrama และคณะ [7] ที่กล่าวว่า “ค่าดัชนีความแตกต่างพืชพรรณกับค่าความเขียวของการแปลงค่าแทสเซิลแคปมีความสัมพันธ์กันในระดับมาก” จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลดังกล่าว สามารถบอกได้ว่า ดัชนีความแตกต่างพืชพรรณและค่าดัชนีความแตกต่างความชื้นที่มีแนวโน้มลดลง อาจส่งผลต่อความสมบูรณ์ของพืช สอดคล้องกับ Pholgerddee และคณะ [8] ที่กล่าวว่า “ดัชนีความแตกต่างพืชพรรณและดัชนีความแตกต่างความชื้นสามารถประเมินและจำแนกระดับความแห้งแล้งในพื้นที่ได้” และสอดคล้องกับ Suratvanit และคณะ [4] กล่าวว่า “ดัชนีความแตกต่างพืชพรรณที่คำนวณได้จากทรงพุ่มของพืชสามารถนำมาพยากรณ์ความอุดมสมบูรณ์ของดิน” ซึ่งอาจส่งผลต่อและการสูญสิ้นของพันธุ์พืช เนื่องจากมันพื้นบ้านบางชนิดอยู่ในกลุ่มไม้เลื้อยที่อยู่ร่วมกันกับพืชอื่นแบบภาวะเกื้อกูล (อิงอาศัย) ดังนั้น การพัฒนาฐานข้อมูลข้างต้นเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถนำไปใช้ในการตัดสินใจหาแนวทางในการอนุรักษ์พันธุ์พืชได้ในอนาคต

ข้อดีและข้อควรพัฒนาจากงานวิจัย

ข้อดี: การพัฒนาระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ ครั้งนี้พัฒนาขึ้นเพื่อรวบรวมข้อมูลพันธุ์พืชอนุรักษ์ (มันพื้นบ้าน) ร่วมกับข้อมูลเชิงพื้นที่และข้อมูลจากภาพถ่ายดาวเทียม ทำให้ผู้ใช้ทราบถึงประโยชน์ที่ได้รับจากการจัดเก็บรวบรวมข้อมูลไว้ในระบบฐานข้อมูลที่สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการอนุรักษ์พันธ์พืชได้

ข้อควรพัฒนา: มี 2 ประเด็นคือ 1) งานวิจัยนี้ใช้ภาพถ่ายดาวเทียม Landsat 8 ช่วง 4 เดือน คือ มกราคม – เมษายน เนื่องจากเป็นช่วงท้องฟ้าไม่มีเมฆหรือมีเมฆน้อย ซึ่งการเก็บข้อมูลในงานวิจัยครั้งต่อไปควรดำเนินการทั้งปี เพื่อให้ได้ข้อมูลประกอบการตัดสินใจที่ดีและครอบคลุมยิ่งขึ้น และ 2) ควรค้นหาความต้องการเชิงลึก (Insight) จากผู้ใช้เพิ่มเติมเกี่ยวกับความต้องการใช้ข้อมูลการเกษตรเพื่อการตัดสินใจ เนื่องจากยังมีประเด็นการอนุรักษ์อื่น ๆ ที่ผู้ใช้ต้องการแต่ยังไม่สามารถอธิบายเป็นลายลักษณ์อักษรได้

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุน จากสถาบันวิจัยเทคโนโลยีเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา ภายใต้แผนงานอนุรักษ์พันธุกรรมพืชอันเนื่องมาจากพระราชดำริ ประจำปีงบประมาณ 2564

เอกสารอ้างอิง

1. Homhual R, Wongmaneeroj M, Jamjumrus S, Promdany S, Tongdonae W, Donsomprai P et al. Propagation of Dioscorea spp. for alternative food resources. JSTKU. 2017;6(1): 1-13. Thai.
2. Homhual R, Wongmaneeroj M, Jamjumrus S, Promdang S,Tongdonae W. Conservation and Propagation of Jam [Internet]. Bangkok: Kasetsart University Research and development institute: 2560. [citedd 21 Dec 9]. Availability From: https://www3. rdi.ku.ac.th/?p=40748. Thai.
3. Postharvest Technology Innovation Center Chiangmai University. Jam Cropping to Commercial [Internet]. Chiang Mai: Postharvest Technology Innovation Center Chiangmai University; 2552. [cited 21 Dec 9]. Availability From: https://www.phtnet.org/news52/view-news.asp?nID=42. Thai.
4. Suratvanit S, Maniin P, Nantachot C, Kaeocharean P. Soil Fertility Survey by Using Remote Sensing Technique. Paper presented at Soil survey soil information and land use: Title of meeting the 5th National Soil and Fertilizer Conference; 17 Aug 1-2 of meeting; Bangkok. Thai.
5. Pianchan P, Konsongsaen W, Lenruang S, Yachaisri A. Estimation of Longan Yield by Vegetation Indices in Phayao Province. Bangkok: Kasetsart University; 2019. Thai.
6. Pattanasak P. Relationship between Tasseled Cap Transformation and Normalized Difference Vegetation Index in the City of Chiang Mai. RUSID. 2020;1(1):1-9. Thai.
7. Samarawickrama U, Piyaratne D, Ranagalage M. Relationship between NDVI with Tasseled cap Indices: A remote sensing based analysis. IJIRT. 2017;3(12):13-9.
8. Pholgerddee P. The application of Geo-Informatics Technology for the vegetation index and vegetation index and humidity study: A case study analysis of drought in the special Economic Eastern Region. Chonburi: Burapha University; 2019. Thai.
9. Seekaw A, Mongkolsawat C, Suwanwerakamtorn R. Using standardized vegetation index to assess drought areas in northeast Thailand. Title of meeting Genentech. 2013;13 Dec 25-27 of meeting; Nonthaburi. Thai.
10. U.S. Geological Survey (USGS). Landsat—Earth Observation Satellites [Internet]. Sioux Falls: U.S. Geological Survey (USGS); 2015. [cited 22 Sep 1]. Availability From: https://pubs.usgs.gov/fs/2015/3081/fs20153081.pdf
11. Iqbal MZ, Mustafa G, Sarwar N, Wajid SH, Nasir J, Siddque S. A review of star schema and snowflakes schema. INTP. 2019;(1198):129-40.
12. Pikulyam W, Maneerat P, Chirawichitchai N. Development of data visualization for

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

particulate matter 2.5 micrometers analysis in bangkok. JARST. 2564;20(1):157-64. Thai.

13. Rouse JW, Haas RH, Schell JA, Deering DW. Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS. Texas: Remote Sensing Center Texas A&M University; 1974. Report number 19740022614. Report agency NASA.
14. ESRI. GNDVI: Green Normalized Difference Vegetation Index. [Internet]. United States: ESRI; 2021. [cited 17 Jul 22]. Availability From: https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/arcpy/image-analyst/gnvdi.htm.
15. European Drought Observatory. NDWI: Normalized Difference Water Index [Internet]. United Kingdom: European Drought Observatory; 1996. [cited 22 Sep 1]. Availability From: https://edo.jrc.ec.europa.eu/documents/factsheets/factsheet_ndwi.pdf
16. Kauth RJ, Thomas GS. The tasselled cap—a graphic description of the spectral-temporal development of agricultural crops as seen by LANDSAT. LARS Symposia. 1976:41-51.

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

JARST Journal of Applied Research on Science and Technology
Rajamangala University of Technology Thanyaburi

การศึกษาหาบริเวณที่มาของ $PM_{2.5}$ จากการวิเคราะห์ข้อมูลระยะสั้นด้วยเทคนิค Bivariate Polar Plot ณ อำเภอบ้านไผ่ จังหวัดขอนแก่น ประเทศไทย

A Study on Determining the Potential Source Area of $PM_{2.5}$ Using Bivariate Polar Plot Technique on Short-Term Monitoring Data in Bhan Phi District, Khonkhen Province, Thailand

ศิรพงศ์ สุขทวี* รัชตวรรณ เกตุวัง อดุลย์เดช ปัดภัย และ นิรัน เปี่ยมใย

Sirapong Sooktawee*, Ratchatawan Ketwang, Aduldech Patpai and Nirun Piemyai

ศูนย์วิจัยและฝึกอบรมด้านสิ่งแวดล้อม กรมส่งเสริมคุณภาพสิ่งแวดล้อม ต.คลองห้า อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี 12120

Environmental Research and Training Center, Department of Environmental Quality Promotion, Ministry of Natural Resources and Environment, Klong 5, Khlong Luang, Pathum Thani 12120, THAILAND

*Corresponding author e-mail: sooktawee@gmail.com

ARTICLE INFO

Article history:
Received: August 30, 2022
Revised: September 29, 2022
Accepted: September 30, 2022
Available online: October 18, 2022
DOI: 10.14456/jarst.2022.18

Keywords: $PM_{2.5}$, air pollution source, air quality, BVP, Bhan Phi District

ABSTRACT

The issue of particulate matter less than 2.5 microns ($PM_{2.5}$) has been concerning and important for many countries and Thailand. Many studies in Thailand have focused on the contribution of source types determined by a receptor model, the relationship between $PM_{2.5}$ and meteorological factors, and the impacts of $PM_{2.5}$ on human health. In terms of enforcement and management, it is important to know where the pollution comes from. A statistical technique, Bivariate Polar Plot (BVP), has been used to determine the potential source areas affecting air quality and $PM_{2.5}$ levels at the monitoring location. However, fewer studies are using the BVP in Thailand, especially in rural areas with many air pollution sources surrounding the monitoring station. Moreover, most studies used long-term monitoring data in the analysis. This study was conducted in Ban Phai District, Khon Kaen Province. The results show that 6 days of the 13 days monitoring period with the concentration of $PM_{2.5}$ particulate matter exceeds 50 µg/m^3, the 24-hour average standard of Thailand, and is the interim target 2

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

(IT-2) of the World Health Organization (WHO). In addition, the results showed that the analysis of short-term hourly monitoring data of $PM_{2.5}$ could reveal changes in concentrations related to meteorological factors and atmospheric stability. The BVP technique identified the potential source areas of $PM_{2.5}$ over each period, and their locations changed depending on emission and meteorological factors of the corresponding period. The potential source areas are on the north side of the highway, Ban Phai District's urban area, and the open burning area on the east side. The pollution sources on the southern side of the air quality monitoring station do not exhibit as a potential source.

บทคัดย่อ

ปัญหาฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน ($PM_{2.5}$) เป็นปัญหาที่ทั่วโลกและประเทศไทยให้ความสำคัญ ในประเทศไทยได้มีการศึกษาสัดส่วนของประเภทแหล่งกำเนิด ปัจจัยอุตุนิยมวิทยา การแพร่กระจาย และผลกระทบต่อสุขภาพ ในขณะที่การหาบริเวณที่มาของแหล่งกำเนิด $PM_{2.5}$ ที่ส่งผลกระทบต่อชุมชนหรือคุณภาพอากาศ ณ จุดตรวจวัดเป็นสิ่งจำเป็นที่จะบ่งชี้ให้เห็นถึงพื้นที่ที่ควรมีมาตรการบริหารจัดการเป็นลำดับต้น ปัจจุบันนี้มีเทคนิคทางสถิติ Bivariate Polar Plot (BVP) ที่นำมาใช้ระบุหาพื้นที่ที่มาของแหล่งกำเนิดมลพิษทางอากาศ ซึ่งการใช้เทคนิคนี้ในประเทศไทยยังมีปรากฏไม่มากและไม่พบการศึกษาในพื้นที่เมืองขนาดเล็กที่มีแหล่งกำเนิดหลายประเภทกระจายอยู่โดยรอบจุดตรวจวัดคุณภาพอากาศและฝุ่นละออง นอกจากนี้การศึกษาวิเคราะห์ข้อมูลตรวจวัดคุณภาพอากาศโดยส่วนใหญ่แล้วเป็นการใช้ข้อมูลตรวจวัดระยะเวลายาว ผลการศึกษาจากการตรวจวัด 13 วัน ณ อำเภอบ้านไผ่ จังหวัดขอนแก่น ในครั้งนี้ พบว่ามีค่าความเข้มข้นของฝุ่นละออง $PM_{2.5}$ เกิน 50 $\mu g/m^3$ ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานเฉลี่ย 24 ชั่วโมงของประเทศไทยและเป็นค่าเป้าหมายระหว่างทางระดับที่ 2 (IT-2) ขององค์การอนามัยโลก (WHO) จำนวน 6 วัน และแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงระดับความเข้มข้นที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยอุตุนิยมวิทยาและความเสถียรของบรรยากาศ รวมทั้งประสบผลสำเร็จในการใช้เทคนิค BVP เพื่อบ่งชี้บริเวณแหล่งที่มาของ $PM_{2.5}$ ได้ โดยบริเวณพื้นที่สำคัญที่ทำให้ระดับค่าความเข้มข้นของฝุ่นละออง $PM_{2.5}$ ณ จุดตรวจวัดคุณภาพอากาศมีค่าเพิ่มขึ้นมาจากถนนทางด้านทิศเหนือบริเวณตัวเมืองอำเภอบ้านไผ่ และการเผาในที่โล่งในบริเวณทางด้านทิศตะวันออก มากกว่าแหล่งกำเนิดที่อยู่ในบริเวณทางด้านใต้ของจุดตรวจวัด

คำสำคัญ: $PM_{2.5}$ แหล่งกำเนิด คุณภาพอากาศ BVP อำเภอบ้านไผ่

บทนำ

ปัญหาฝุ่นละอองขนาดเล็กกว่า 2.5 ไมครอน ($PM_{2.5}$) เป็นปัญหาที่ทั่วโลกให้ความสนใจ [1–3] และยังคงเป็นปัญหาด้านมลพิษทางอากาศที่สำคัญของประเทศไทย จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าประเทศไทยประสบปัญหาสถานการณ์ฝุ่นละออง $PM_{2.5}$ เกินค่ามาตรฐานของประเทศไทยที่กรมควบคุมมลพิษกำหนดค่ามาตรฐานของฝุ่นละออง $PM_{2.5}$ เฉลี่ย 24 ชั่วโมงไว้ไม่เกิน 50 $\mu g/m^3$ ในหลายพื้นที่ของประเทศไทยโดยเฉพาะในช่วงเดือนฤดูหนาวของทุกปี [4–7] ฝุ่น $PM_{2.5}$ นี้ยังส่งผลกระทบต่อสุขภาพของมนุษย์

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

แหล่งกำเนิดมลพิษที่เป็นที่มาของฝุ่นละอองประกอบด้วย การจราจรขนส่ง [4] การเผาในที่โล่ง [8, 9] ภาคอุตสาหกรรม [6, 10] หรือจากปฏิกิริยาเคมีในบรรยากาศในการเกิดละอองลอยทุติยภูมิ [11] และอาจมีปัจจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง เช่น ภูมิประเทศ ภาวะความกดอากาศสูง ปริมาณฝน ลักษณะการไหลเวียนของลมมรสุม ที่ทำให้ความรุนแรงของปัญหาฝุ่นละอองเพิ่มขึ้นหรือลดลงได้ [12, 13] สำหรับพื้นที่ที่ทำการศึกษาปัญหาฝุ่นละอองในประเทศไทยอยู่ในบริเวณพื้นที่กรุงเทพและปริมณฑล [4, 14–16] ภาคเหนือ [17] และพื้นที่ตำบลหน้าพระลาน จังหวัดสระบุรี [6, 18, 19] เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งยังมีการศึกษาในภูมิภาคอื่น ๆ น้อยมากเมื่อเทียบกับพื้นที่ศึกษาดังกล่าว

ปัญหาจากฝุ่นละอองเกี่ยวเนื่องกับสามส่วนหลัก คือ แหล่งกำเนิดฝุ่นละออง (Source) บรรยากาศหรืออากาศ (Media) และผู้รับ (Receptor) โดยการศึกษาทางด้านแหล่งกำเนิดได้มีการศึกษาหาสัดส่วนของประเภทแหล่งกำเนิดที่อยู่ในอนุภาคของฝุ่นละออง ณ บริเวณที่สนใจ (Receptor point) โดยใช้แบบจำลอง Receptor model ซึ่งพบว่าสัดส่วนของแหล่งกำเนิดหลักประกอบด้วยการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงดีเซล การเผาในที่โล่งและอื่น ๆ สำหรับในส่วนของการแพร่กระจายในบรรยากาศนั้น ได้มีการศึกษาการกระจายตัวของฝุ่นละอองจากแหล่งกำเนิดไปยังพื้นที่โดยรอบ การศึกษาหาเส้นทางเคลื่อนที่ของมวลอากาศย้อนกลับเพื่อดูเส้นทางที่มาของฝุ่นละออง การศึกษาผลกระทบและความสัมพันธ์กับปัจจัยทางภูมิอากาศ เป็นต้น และการศึกษาด้านกระทบของฝุ่นละอองต่อสุขภาพ [11, 16, 20–22] จากที่กล่าวมานั้นการศึกษาด้านแหล่งกำเนิดทำให้ทราบถึงประเภทของแหล่งกำเนิดหลักของ $PM_{2.5}$ หากแต่ยังไม่สามารถระบุเป็นบริเวณหรือพื้นที่ได้

สำหรับการหาพื้นที่บริเวณที่มาของมลพิษนั้น Uria-Tellaetxe I. และ Carslaw D. ได้ศึกษาและแนะนำเทคนิค Bivariate Polar Plot (BVP) ในการระบุที่มาของมลพิษทางอากาศจากแหล่งกำเนิดอุตสาหกรรมของก๊าซซัลเฟอร์ไดออกไซด์ ออกไซด์ของไนโตรเจน และฝุ่นขนาดเล็กกว่า 10 ไมครอน โดยใช้ข้อมูลการตรวจวัดมลพิษ ความเร็วและทิศทางลม มาทำการคำนวณค่าทางสถิติ เช่น ค่าเฉลี่ย และนำมาแสดงผลระบบพิกัดเชิงขั้ว (Polar Coordinate System) [23] สำหรับการศึกษาในประเทศไทยนั้น ได้มีการนำเทคนิค BVP มาใช้ในการหาบริเวณแหล่งที่มาของฝุ่นละอองในหลายพื้นที่ ในพื้นที่กรุงเทพมหานคร [4] ในบริเวณพื้นที่อุตสาหกรรมโรงโม่เหมืองหิน [6] ในบริเวณชุมชนที่ได้รับผลกระทบจากโรงไฟฟ้าชีวมวล [10] และบริเวณริมทะเลที่การพัดพาของลมมีความผันผวนสูง [5] ซึ่งเป็นที่น่าสนใจในการนำเทคนิคนี้หาบริเวณแหล่งที่มาของ $PM_{2.5}$ ณ พื้นที่เมืองขนาดเล็กในต่างจังหวัดที่มีแหล่งกำเนิดประเภทต่าง ๆ กิจกรรมในตัวเมือง การเผาในที่โล่งจากภาคเกษตรกรรม และการจราจรจากถนนสายหลักกระจายอยู่โดยรอบ

ข้อมูลจากสำนักงานสถิติจังหวัดขอนแก่นในปี พ.ศ. 2561 จังหวัดขอนแก่นที่มีพื้นที่ส่วนใหญ่เป็นพื้นที่เกษตรกรรมประมาณร้อยละ 64.2 และพบปัญหาการเผาในที่โล่งจากข้อมูลสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศที่มีการติดตามตรวจสอบสถานการณ์ไฟป่า พบว่ามีจุดความร้อนสะสมในพื้นที่ทำการเกษตร และพื้นที่อำเภอบ้านไผ่ จังหวัดขอนแก่น เป็นอำเภอขนาดไม่ใหญ่ซึ่งมีความหนาแน่นน้อยเมื่อเทียบกับอำเภอเมือง จังหวัดขอนแก่น และยังมีแหล่งกำเนิดจากกิจกรรมในตัวเมืองจากภาคจราจรขนส่งที่มีถนนสายหลัก (ถนนมิตรภาพ) ผ่านและมีพื้นที่เกษตรกรรม เช่น ไร่อ้อยและนาข้าว ซึ่งเป็นพื้นที่ศึกษาที่สามารถแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงระดับความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ จากแหล่งกำเนิดหลายประเภท และเหมาะสมในการเป็นพื้นที่ศึกษาในการนำเทคนิค BVP มาใช้หาบริเวณที่มาของ $PM_{2.5}$ ในเมืองขนาดเล็กและมีพื้นที่เกษตรกรรมและการจราจรขนส่ง โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อแสดงให้เห็นว่าเทคนิค BVP สามารถนำมาใช้บ่งชี้บริเวณที่มาของ $PM_{2.5}$ ได้ ซึ่งจะเป็นประโยชน์ในการนำไปประยุกต์ใช้ในพื้นที่อื่นของประเทศไทยต่อไป

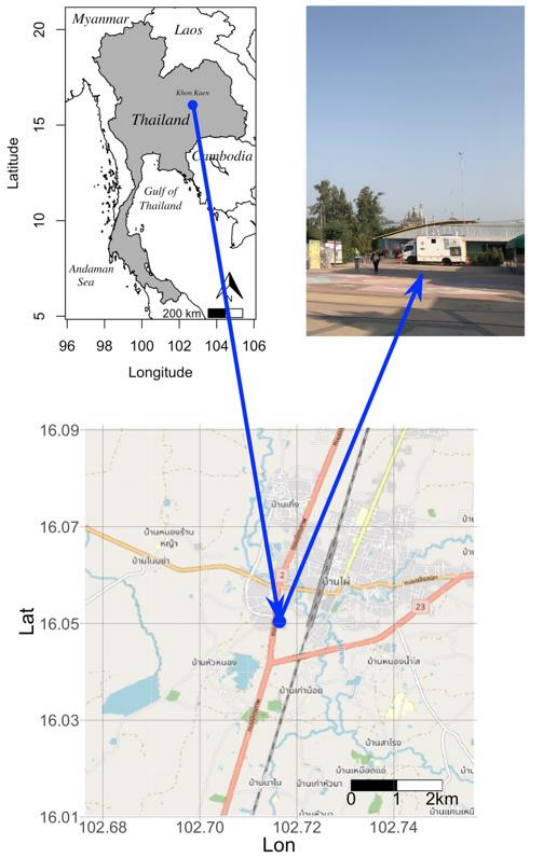
ในบทความนี้จะนำเสนอถึงการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ กับค่ามาตรฐาน

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

เฉลี่ย 24 ชั่วโมงของประเทศไทยและเป็นค่าเป้าหมายระหว่างทางระดับที่ 2 (IT-2) ขององค์การอนามัยโลก (WHO) จากนั้นทำการวิเคราะห์เพื่อแบ่งช่วงอนุกรมเวลาค่าความเข้มข้น $PM_{2.5}$ เพื่อแสดงให้เห็นถึงปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาที่เกี่ยวข้องของช่วงเวลานั้น ๆ และในลำดับสุดท้ายคือการใช้เทคนิค BVP เพื่อแสดงให้เห็นบริเวณแหล่งกำเนิดของ $PM_{2.5}$ สำหรับแต่ละช่วงเวลา

วิธีดำเนินการวิจัย

1. พื้นที่ศึกษาและข้อมูลการตรวจวัด



รูปที่ 1 ตำแหน่งรถตรวจวัดคุณภาพอากาศ (วงกลมสีฟ้า) ที่ทำการตรวจวัด $PM_{2.5}$ และอุตุนิยมวิทยา

(ก) (ข)

รูปที่ 2 เครื่องมือตรวจวัดฝุ่น $PM_{2.5}$ ที่ติดตั้งอยู่ภายในรถตรวจวัดคุณภาพอากาศแบบเคลื่อนที่ (ก) และท่อชักตัวอย่างของเครื่องตรวจวัดจากด้านบนหลังคารถ (ข)

คณะผู้วิจัยได้ทำการตรวจวัดคุณภาพอากาศในช่วงระหว่างวันที่ 18 -30 มกราคม 2565 ณ ศูนย์วิทยาศาสตร์เพื่อการศึกษาขอนแก่น ตำบลในเมือง อำเภอบ้านไผ่ จังหวัดขอนแก่น แสดงดังรูปที่ 1 ทิศเหนือของจุดตรวจวัดเป็นพื้นที่ภายนอกตัวเมืองบ้านไผ่ และสี่แยกบ้านไผ่ระหว่าง ถ.มิตรภาพ ที่มุ่งหน้าขึ้นเหนือไปยัง จ.ขอนแก่น ตัดกับ ถ.จันทร์ประสิทธิ์ เข้ายังตัวเมืองอำเภอบ้านไผ่ที่อยู่ทางด้านทิศตะวันออกเฉียงเหนือของจุดตรวจวัด สำหรับทางด้านทิศตะวันออกของจุดตรวจวัดเป็นพื้นที่ชานเมืองบ้านไผ่และพื้นที่เกษตรกรรม ในทิศตะวันตกติดกับแนว ถ.มิตรภาพ โดยถัดออกไปเป็นพื้นที่เกษตรกรรม ในทางทิศใต้เป็นพื้นที่เกษตรกรรม สี่แยกตัดกันระหว่าง ถ.มิตรภาพ และ ถ.แจ้งสนิท สำหรับการตรวจวัดฝุ่น $PM_{2.5}$ ได้ใช้เครื่องตรวจวัดอัตโนมัติ Thermo Scientific™ 1405-DF TEOM™ Continuous Dichotomous Ambient Air Monitor (รูปที่ 2) ที่ทำงานภายใต้สภาวะตามข้อกำหนดของ US.EPA เช่น อัตราการไหลของตัวอย่างอากาศที่ทำการชักตัวอย่างเข้าสู่เครื่องมือมีค่า 16.67 L/min จากนั้นแบ่งการไหลของตัวอย่างสำหรับการตรวจวัด $PM_{2.5}$ และ $PM_{2.5\text{-}10}$ 3 L/min และ 1.67 L/min ตามลำดับ สำหรับอัตราการไหลที่เหลือนั้น ตัวอย่างอากาศจะไหลผ่านกระดาษกรองขนาด 47 mm และระบายออกสู่อากาศภายนอกต่อไป โดยเครื่องตรวจวัดนี้ได้ติดตั้งอยู่ภายในรถ

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

ตรวจวัดคุณภาพอากาศแบบเคลื่อนที่ (Mobile Air Quality Monitoring Unit) ซึ่งเครื่องตรวจวัดนี้ได้ใช้เทคนิค Tapered Element Oscillating Microbalance (TEOM) ที่ US.EPA และกรมควบคุมมลพิษได้ระบุให้เป็นเทคนิคที่สามารถใช้ในการตรวจวัด $PM_{2.5}$ ได้ นอกจากนี้รถตรวจวัดคุณภาพอากาศยังได้ติดตั้งเครื่องมือสำหรับตรวจวัดทิศทางและความเร็วลมที่ระดับความสูง 10 m ข้อมูลที่ได้จากการตรวจวัดของทุกพารามิเตอร์เป็นข้อมูลรายชั่วโมงและนำค่าตรวจวัดที่ได้ไปทำการวิเคราะห์ต่อไป

2. วิธีการวิเคราะห์ข้อมูล

ในการวิเคราะห์ข้อมูลการตรวจวัดรายชั่วโมงที่ได้นั้น ลำดับแรกทำการจัดรูปแบบข้อมูลให้ตรงกับความต้องการของโปรแกรม R โดยแพ็กเกจ changepoint ในโปรแกรม R ใช้สำหรับการวิเคราะห์หาจุดเปลี่ยนของข้อมูลอนุกรมเวลา และแพ็กเกจ OpenAir ใช้สำหรับหาบริเวณที่มาของ $PM_{2.5}$ จากนั้นทำการศึกษาการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นตามช่วงเวลาด้วยการพล็อตกราฟอนุกรมเวลา (Time Series) ลำดับถัดมาทำการวิเคราะห์เพื่อหาและแบ่งช่วงระดับความเข้มข้นเพิ่มขึ้นหรือลดลงด้วยการหาจุดเปลี่ยน (Changepoints) จากการทดสอบการเปลี่ยนแปลงของค่าเฉลี่ยของชุดข้อมูลอนุกรมเวลาด้วยการทดสอบสถิติแบบผลรวมสะสม (Mean Shift CUSUM) [24] หลังจากนั้นทำการวิเคราะห์ผังลมและอุตุนิยมวิทยาที่เกี่ยวข้อง ลำดับสุดท้ายทำการวิเคราะห์หาบริเวณที่มาของ $PM_{2.5}$ ในแต่ละช่วงด้วยเทคนิค Bivariate Polar Plots (BVP) [25] ซึ่งเป็นเทคนิคแสดงผลเชิงพื้นที่ที่บ่งชี้ถึงพื้นที่ที่มีนัยสำคัญเป็นบริเวณที่มาของมลพิษ ผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ BVP ที่ได้นี้ถูกนำไปเปรียบเทียบกับพื้นที่จริงเพื่อตรวจสอบยืนยันแหล่งที่มาของการปล่อยมลพิษ $PM_{2.5}$

หลักการของ BVP ขึ้นอยู่กับความสัมพันธ์ของความเข้มข้น ความเร็ว และทิศทางลมที่เกิดขึ้นในเวลาเดียวกัน ข้อมูลการตรวจวัดรายชั่วโมงทั้งหมด ถูกวิเคราะห์โดยค่าความเข้มข้นถูกแบ่งไปในแต่ละช่วงของทิศทางลมและช่วงความเร็วลม ช่วงทิศทางลมถูกแบ่งเป็นขนาดย่อยทุก ๆ 10° และช่วงความเร็วลมแบ่งออกเป็น 30 ช่วงจากค่าสูงสุดที่ได้จากการตรวจวัด แต่ละช่วงย่อยของทิศทางลมและความเร็วลม (เช่น 0-10° กับ 1-1.5 m/s) จะเรียกว่ากริดเซลล์ จากทิศทางลม 0-360° จะมีช่วงย่อย 36 ช่วง และเมื่อคูณกับช่วงความเร็วลม 30 ช่วง จะมีจำนวนกริดเซลล์ทั้งหมด 1,080 กริดเซลล์ ค่าความเข้มข้น $PM_{2.5}$ รายชั่วโมงที่ตรวจวัดถูกแบ่งลงในกริดเซลล์ตามทิศทางและความเร็วลมของชั่วโมงนั้น ๆ และนำค่าความเข้มข้นในแต่ละกริดเซลล์มาคำนวณค่าสถิติที่เกี่ยวข้อง เช่น ค่าเฉลี่ย หลังจากนั้นค่าเฉลี่ยความเข้มข้นที่ได้แต่ละกริดเซลล์ถูกนำมาให้เฉดสีตามระดับความเข้มข้นและปรับระดับสีให้มีพื้นผิวที่เรียบ (Surface Smooth) ด้วย The Generalized Additive Model กับ isotropic smooth และแสดงเป็น $\sqrt{C_i} = s(u, v) + e_i$. เมื่อ C_i คือค่าความเข้มข้นสารมลพิษ แต่ละลำดับ i^{th} s คือ smooth function e_i คือค่าที่เหลือสำหรับลำดับที่ i^{th} สำหรับการแสดงผลนั้นจะแสดงภาพของค่าเฉลี่ยของความเข้มข้นบนพิกัดวงกลม (Polar Coordinate) โดยให้ $u = \overline{ws}.sin(2\pi/\overline{wd})$ และ $v = \overline{ws}.cos(2\pi/\overline{wd})$ เมื่อทิศทางลม คือ wd และความเร็วลม คือ ws ซึ่งสอดคล้องกับ θ และ r ในพิกัดวงกลม ดังนั้นความเข้มข้นเฉลี่ยแต่ละจุดสามารถพล็อตโดยใช้พิกัดวงกลม ความเข้มข้นบนพิกัดวงกลมสามารถบ่งชี้ถึงพื้นที่ของแหล่งที่มาของ $PM_{2.5}$ ที่มีความเป็นไปได้

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

1. ระดับความเข้มข้น $PM_{2.5}$ และปัจจัยอุตุนิยมวิทยา

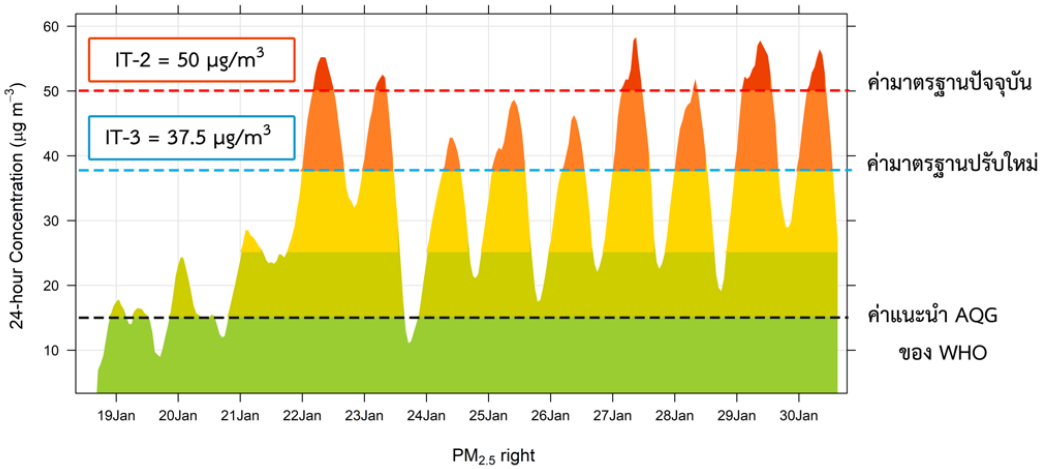
ตามเกณฑ์ค่าแนะนำคุณภาพอากาศขององค์การอนามัยโลก ซึ่งประกอบด้วยค่าแนะนำคุณภาพอากาศ และค่าเป้าหมายระหว่างทาง 5 ระดับ ประกอบไปด้วย ค่าเป้าหมายระหว่างทาง (Interim target) จำนวน 4 ค่า ได้แก่ ค่าเป้าหมายระหว่างทางระดับที่ 1 (IT-1) กำหนดค่ามาตรฐานฝุ่นละออง $PM_{2.5}$ เฉลี่ย 24 ชั่วโมง ไม่เกิน 75 $\mu g/m^3$ ค่าเป้าหมายระหว่างทางระดับที่ 2 (IT-2) ไม่เกิน 50 $\mu g/m^3$ ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานที่ประเทศไทยกำหนด ค่าเป้าหมายระหว่างทางระดับที่ 3 (IT-3) ไม่เกิน 37.5 $\mu g/m^3$

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

ค่าเป้าหมายระหว่างทางระดับที่ 4 (IT-4) ไม่เกิน 25 µg/m^3 และค่าแนะนำ (AQG level) ต้องไม่เกิน 15 µg/m^3 [1] ผลการตรวจวัดรายชั่วโมงระหว่างวันที่ 18-30 มกราคม 2565 ได้ถูกนำมาหาค่าเฉลี่ย 24 ชั่วโมงแบบเคลื่อนที่ (Moving Average) และพบว่าวันที่ 22, 23, 27, 28, 29 และ 30 มกราคม 2565 รวมจำนวน 6 วัน จาก 13 วัน มีค่าความเข้มข้นของฝุ่นละออง $PM_{2.5}$ เกิน 50 µg/m^3 ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานเฉลี่ย 24 ชั่วโมงของประเทศไทยและเป็นค่าเป้าหมายระหว่างทางระดับที่ 2 (IT-2) ที่องค์การอนามัยโลกกำหนดไว้เช่นกัน แสดงดังรูปที่ 3 และมีจำนวนชั่วโมงที่ค่าความเข้มข้นเกินค่ามาตรฐานรวมทั้งสิ้น 40 ชั่วโมง จากชั่วโมงการตรวจวัดทั้งหมด 287 ชั่วโมง คิดเป็นร้อยละ 13.94 ส่วนใหญ่พบในช่วงเช้ามืดจนถึงช่วงสายหรือช่วงบ่ายของวัน

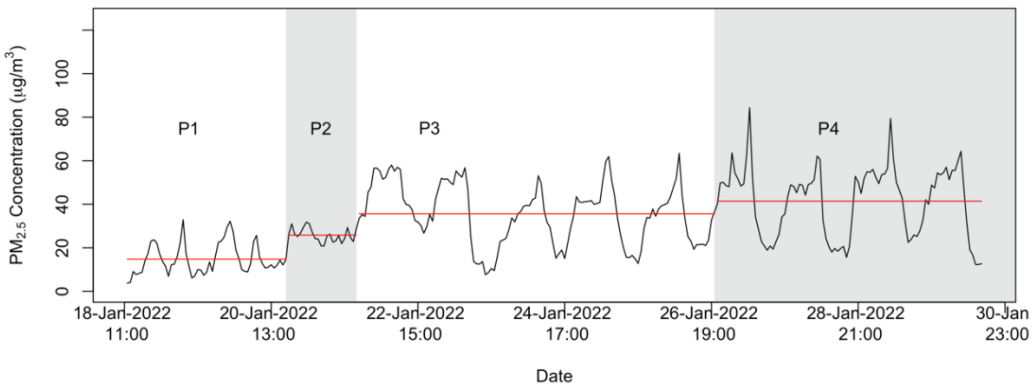
ปัจจุบันประเทศไทยได้มีการปรับค่ามาตรฐานฝุ่นละออง $PM_{2.5}$ ให้เข้มงวดขึ้น เพื่อยกระดับมาตรฐานคุณภาพอากาศของประเทศ ป้องกันผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชน โดยผ่านการประชุมรับฟังความคิดเห็นจากทุกภาคส่วน จากเดิมค่าเฉลี่ย 24 ชั่วโมง มีค่ามาตรฐานไม่เกิน 50 µg/m^3 ปรับเปลี่ยนเป็น 37.5 µg/m^3 และค่าเฉลี่ยรายปีจากเดิม 25 µg/m^3 เป็น 15 µg/m^3 โดยได้ประกาศในราชกิจจานุเบกษา เมื่อวันที่ 8 กรกฎาคม 2565 โดยที่ค่ามาตรฐานเฉลี่ย 24 ชั่วโมง ให้มีผลบังคับใช้ในวันที่ 1 มิถุนายน 2566 ดังนั้นหากมีการปรับค่ามาตรฐานฝุ่นละออง $PM_{2.5}$ เฉลี่ย 24 ชั่วโมง ให้มีค่าไม่เกิน 37.5 µg/m^3 นั้น จากผลการตรวจวัดในครั้งนี้จะเห็นได้ว่าจำนวนวันและชั่วโมงที่มีความเข้มข้น $PM_{2.5}$ เกินค่ามาตรฐานเฉลี่ย 24 ชั่วโมงจะเพิ่มมากขึ้น โดยมีจำนวนรายชั่วโมงที่ค่าความเข้มข้นเกินค่ามาตรฐานรวมทั้งสิ้น 117 ชั่วโมง จากชั่วโมงการตรวจวัดทั้งหมด 287 ชั่วโมง คิดเป็นร้อยละ 40.77 แสดงดังรูปที่ 3

นอกจากนี้การวิเคราะห์หาการเปลี่ยนแปลงของระดับความเข้มข้นที่มีนัยสำคัญด้วยหลักการทางคณิตศาสตร์ Mean Shift CUSUM และแสดงผลของค่าเฉลี่ยเป็นกราฟเส้น โดยค่าเฉลี่ยในแต่ละช่วงโดยจะเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ณ เวลาที่เป็นจุดเปลี่ยน (Changepoint) แสดงดังรูปที่ 4 การหาจุดเปลี่ยนในลักษณะนี้ดำเนินการเพื่อแบ่งช่วงเวลาที่ระดับความเข้มข้นเกิดการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญและสามารถนำไปวิเคราะห์หาคุณลักษณะเฉพาะได้ชัดเจนยิ่งขึ้น หรือค้นหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงระดับความเข้มข้นในแต่ละช่วงเวลาได้



รูปที่ 3 การเปรียบเทียบระดับค่าความเข้มข้นของฝุ่นละออง $PM_{2.5}$ เฉลี่ย 24 ชั่วโมง (Moving Average) ตามเกณฑ์ค่าแนะนำขององค์การอนามัยโลก

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)



รูปที่ 4 ความเข้มข้นรายชั่วโมงของ $PM_{2.5}$ (เส้นสีดำ) และค่าเฉลี่ย (เส้นสีแดง) ของแต่ละช่วงเวลาตามตำแหน่งจุดเปลี่ยน (Changepoints)

การตรวจวัดคุณภาพอากาศในระหว่างวันที่ 18 - 30 มกราคม 2565 จะตรงกับช่วงฤดูหนาว ซึ่งเป็นฤดูแล้ง (Dry Season) ตามประกาศกรมอุตุนิยมวิทยา เรื่อง การเริ่มต้นฤดูหนาวของประเทศไทย พ.ศ. 2564 ซึ่งมีสภาพอากาศเย็น ฝุ่นละอองขนาดเล็กมีการสะสมปานกลาง เนื่องจากลมที่พัดปกคลุมประเทศไทยมีกำลังอ่อน เมื่อพิจารณาจุดเปลี่ยนของระดับความเข้มข้น ดังรูปที่ 4 พบว่าความเข้มข้นของฝุ่นละออง $PM_{2.5}$ ในแต่ละช่วงมีค่าเฉลี่ยสูงขึ้นตามลำดับ โดยแบ่งได้เป็น 4 ช่วงการเปลี่ยนแปลง ช่วงที่ 1 ระหว่างวันที่ 18 มกราคม 2565 เวลา 12.00 น. ถึงวันที่ 20 มกราคม 2565 เวลา 18.00 น. เป็นช่วงที่มีความเข้มข้นเฉลี่ยต่ำสุด เท่ากับ 14.79 µg/m^3 พบว่าปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาของอุณหภูมิมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 23.32°C และมีความเร็วลม (WS) ค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1.70 m/s โดยมีทิศทางลม (WD) พัดมาจากทิศตะวันออก-ตะวันออกเฉียงเหนือ (East-Northeast: ENE) มีความชื้นสัมพัทธ์ (RH) ที่ต่ำเนื่องจากไม่มีฝนตก ดังตารางที่ 1 สำหรับช่วงที่ 2 ระหว่างวันที่ 20 มกราคม 2565 เวลา 18.00 น. ถึงวันที่ 21 มกราคม 2565 เวลา 18.00 น. มีช่วงความเข้มข้นเฉลี่ยเท่ากับ 25.81 µg/m^3 ปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาของอุณหภูมิมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 22.8°C และมีความเร็วลมค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1.12 m/s โดยมีทิศทางลมพัดมาจากทิศตะวันออก-ตะวันออกเฉียงใต้ (East-Southeast: ESE) และมีความชื้นสัมพัทธ์สูงเนื่องจากเป็นช่วงที่มีฝนพรำเป็นละออง สำหรับช่วงที่ 3 ระหว่างวันที่ 21 มกราคม 2565 เวลา 18.00 น. ถึงวันที่ 26 มกราคม 2565 เวลา 20.00 น. มีช่วงความเข้มข้นเฉลี่ย เท่ากับ 35.64 µg/m^3 ปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาของอุณหภูมิมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 24.35°C และมีความเร็วลมค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1.13 m/s โดยมีทิศทางลมพัดมาจากทิศเหนือ (North: N) มีความชื้นสัมพัทธ์สูงเนื่องจากเป็นช่วงที่มีฝนเช่นเดียวกันกับช่วงที่ 2 และในช่วงท้ายของการตรวจวัด คือ ระหว่างวันที่ 26 มกราคม 2565 เวลา 20.00 น. ถึงวันที่ 30 มกราคม 2565 เวลา 15.00 น. เป็นช่วงที่มีความเข้มข้นเฉลี่ยสูงสุด เท่ากับ 41.44 µg/m^3 ปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาของอุณหภูมิมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 25.77°C และมีความเร็วลมค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 1.14 m/s โดยมีทิศทางลมพัดมาจากทิศตะวันออก-ตะวันออกเฉียงใต้ (East-Southeast: ESE) มีความชื้นสัมพัทธ์ต่ำเนื่องจากไม่มีฝนตก

จากที่กล่าวมานั้นจะสังเกตเห็นได้ว่าในช่วงที่มีฝนพรำท้องฟ้าจะสลัวมีเมฆปกคลุมทำให้มีค่าความเข้มแสงลดลง (Solar Radiation) และมีค่าความชื้นสัมพัทธ์ที่สูงขึ้นกว่าในช่วงที่ไม่มีฝน แสดงให้เห็นถึงผลที่เกี่ยวข้องกับความเสถียรของบรรยากาศ การเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นทั้งสี่ช่วงนี้กล่าวได้ว่าในช่วงที่ 1 มีความเข้มข้นต่ำสุด เป็นช่วงที่บรรยากาศไม่เสถียร (Unstable Condition) มีความเข้มข้นของแสงแดดมาก ความเร็วลมสูงกว่าช่วงอื่นจึงทำให้มลพิษสะสมได้น้อย ขณะที่ในช่วงเวลาอื่นมีความเข้มแสงน้อยลง ความเร็วลมต่ำ จึงมีสภาพบรรยากาศที่เสถียร

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

มากกว่า มลพิษกระจายตัวได้ไม่ดีเกิดการสะสมมากขึ้น จึงทำให้ความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ มีค่าสูงขึ้น และการเปลี่ยนแปลงของความชื้นสัมพัทธ์ อุณหภูมิ ความเร็วลม เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อความเข้มข้นค่อนข้างชัดเจน อย่างไรก็ตามการศึกษาปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาต่อความเข้มข้นของฝุ่นละออง $PM_{2.5}$ อาจจำเป็นต้องใช้ข้อมูลการตรวจวัดในระยะยาว เพื่อพิจารณาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนและบ่งชี้ความสัมพันธ์ได้ดียิ่งขึ้น

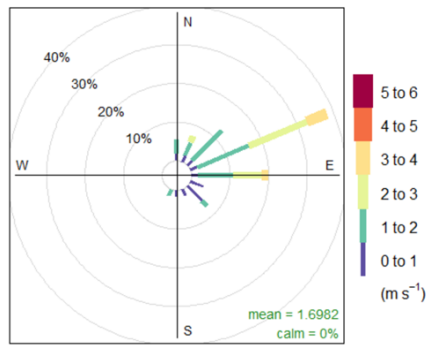
ตารางที่ 1 แสดงค่าเฉลี่ยของปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยา

ช่วง	Temp (°C)	WS (m/s)	WD	RH (%)	Solar Radiation (W/m^2)		Rain (mm)
					ค่าเฉลี่ย	ค่าสงสุด	
1	23.32	1.70	ENE	61.29	215.8	750.3	0
2	22.80	1.12	ESE	73.93	100.4	516.7	0.008
3	24.35	1.13	N	70.63	167.2	770.3	0.003
4	25.77	1.14	ESE	60.60	191.15	743.9	0

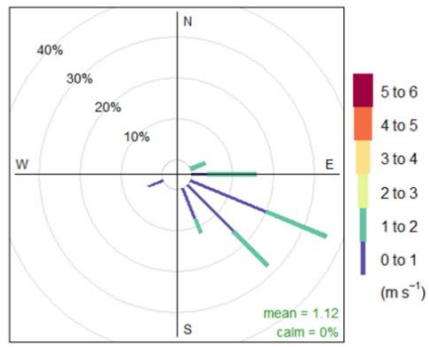
หมายเหตุ: Temp คืออุณหภูมิ WS คือความเร็วลม WD คือทิศทางลม และ RH คือความชื้นสัมพัทธ์

2. ผังลม (Wind Rose)

จากการวิเคราะห์ระดับความเข้มข้น $PM_{2.5}$ และปัจจัยทางอุตุนิยมวิทยาที่ผ่านมานั้นพบว่ายังมีปัจจัยของทิศทางลมเข้ามามีความสัมพันธ์ต่อการเคลื่อนย้ายของมวลอากาศที่อาจนำมลพิษจากแหล่งกำเนิดมายังตำแหน่งตรวจวัดคุณภาพอากาศ หาก ณ บริเวณต้นลมมีแหล่งกำเนิดอยู่ การวิเคราะห์โดยผังลม (Wind Rose) สามารถแสดงให้เห็นสัดส่วนทิศทางลมที่พัดและสัดส่วนในแต่ละช่วงของความเร็วลมตามทิศทางที่เกี่ยวข้องตลอดช่วงระยะเวลาที่ทำการตรวจวัด ผลการวิเคราะห์ผังลมตลอดช่วงการตรวจวัดแสดงให้เห็นถึงความเปลี่ยนแปลงของทิศทางลมหลักที่พัดมายังบริเวณที่ตั้งจุดรถตรวจวัดคุณภาพอากาศอย่างเห็นได้ชัด ในช่วงที่ 1 จะเห็นได้ว่าลมพัดมาจากระหว่างทิศตะวันออก (East) และทิศตะวันออกเฉียงเหนือ (NorthEast) โดยมาจากทิศตะวันออกตะวันออกเฉียงเหนือ (East-Northeast: ENE) มีสัดส่วนสูงสุด 28% (รูปที่ 5) ช่วงที่ 2 ลมพัดมาจากทิศตะวันออก - ทิศใต้ตะวันออกเฉียงใต้ (South-Southeast: SSE) เป็นส่วนใหญ่ (รูปที่ 6) ช่วงที่ 3 ลมพัดมาจากหลายทิศทางโดยส่วนใหญ่พัดมาจากทางด้านบนโดยพัดมาจากทางทิศเหนือ (Noth: N) มากสุด15% (รูปที่ 7) และช่วงที่ 4 ลมพัดมาจากทางด้านใต้เป็นส่วนใหญ่ทั้งทางด้านตะวันออกเฉียงใต้และตะวันตกเฉียงใต้โดยพัดมาจากทิศตะวันออกเฉียงใต้ (Southeast: S) มากที่สุด 16% (รูปที่ 8)

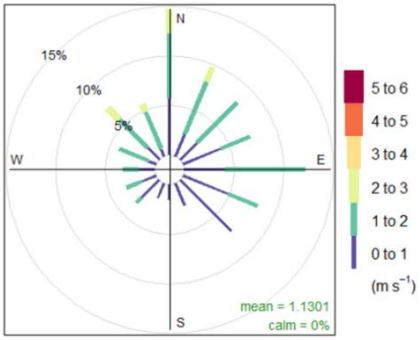


รูปที่ 5 แสดงผังลม (Wind Rose) ของช่วงที่ 1

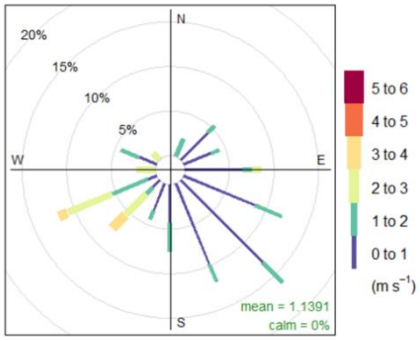


รูปที่ 6 แสดงผังลม (Wind Rose) ของช่วงที่ 2

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)



รูปที่ 7 แสดงผังลม (Wind Rose) ของช่วงที่ 3



รูปที่ 8 แสดงผังลม (Wind Rose) ของช่วงที่ 4

3. บริเวณที่มาของ $PM_{2.5}$

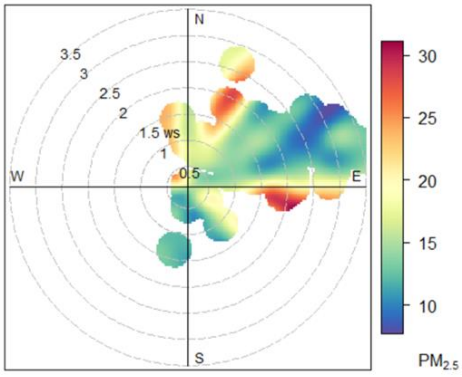
จากการวิเคราะห์ข้างต้นทั้งหมดนี้ แหล่งที่มาของฝุ่นละออง $PM_{2.5}$ ในแต่ละช่วงเวลาน่าจะมีความแตกต่างกัน ซึ่งการวิเคราะห์ผังลมนี้สามารถแสดงให้เห็นถึงลมหลักที่พัดพามายังจุดตรวจวัดเท่านั้น แต่ในบริเวณต้นลมอาจจะมีหรือไม่มีแหล่งกำเนิด $PM_{2.5}$ อยู่ เนื่องจากในการคำนวณสำหรับสร้างผังลมอยู่บนพื้นฐานการวิเคราะห์ความถี่หรือสัดส่วนการพัดพาของลมในแต่ละทิศต่อจำนวนข้อมูลทั้งหมด และเพื่อที่จะให้ทราบข้อมูลของพื้นที่นั้นได้อย่างชัดเจนมากขึ้นจึงได้มีการวิเคราะห์ BVP ซึ่งเป็นเทคนิคแสดงผลเชิงพื้นที่ที่บ่งชี้ถึงพื้นที่ที่มีนัยสำคัญของแหล่งที่มาของมลพิษ ดังนั้นจึงเหมาะที่จะนำมาใช้วิเคราะห์ต่อไป

ผลการวิเคราะห์ BVP ที่ได้แสดงดังรูปที่ 9-12 บริเวณที่มีสีแดงถึงแดงเข้ม แสดงถึงพื้นที่แหล่งกำเนิดที่มีนัยสำคัญที่ส่งผลให้ค่าความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ ณ จุดตรวจวัดในช่วงเวลานั้นมีค่าสูง โดยในช่วงที่ 1 (รูปที่ 9) มีความเข้มข้นเฉลี่ยต่ำกว่าช่วงอื่นนั้น พบว่าพื้นที่หลักที่ทำให้ค่าความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ ณ สถานีตรวจวัดมีค่าสูง (>25 $\mu g/m^3$) มาจากบริเวณทางด้านทิศเหนือตะวันออกเฉียงเหนือ (NNE) โดยมีระยะห่างจากจุดตรวจวัดประมาณ 5-7 km โดยคำนวณจากความเร็วลม 1.4-2 m/s และเวลา 1 ชั่วโมง และยังมีแหล่งที่มาของ $PM_{2.5}$ จากบริเวณทางด้านทิศตะวันออก (E) มีระยะห่างจากจุดตรวจวัดประมาณ 7.2 km สำหรับช่วงที่2 (รูปที่ 10) พื้นที่หลักที่ทำให้ค่าความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ ณ สถานีตรวจวัดมีค่าสูง (>28 $\mu g/m^3$) มาจากบริเวณทางด้านทิศตะวันออก - ตะวันออกเฉียงใต้ (ESE) พบว่าบริเวณที่ทำให้ค่าความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ มีค่าสูงอยู่ติดกับสถานีตรวจวัดจนถึงระยะ 5.4 km ในช่วงที่ 3 (รูปที่ 11) พื้นที่หลักที่ทำให้ค่าความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ ณ สถานีตรวจวัดมีค่าสูง (>45 $\mu g/m^3$) มาจากบริเวณทางด้านทิศเหนือ-ตะวันออกเฉียงเหนือ (NNE) บริเวณทิศตะวันออก (E) ไปจนถึงตะวันออกเฉียงใต้ (SE) และบริเวณทิศตะวันตก-ตะวันตกเฉียงเหนือ (WNW) พบว่าบริเวณที่ทำให้ค่าความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ มีค่าสูงอยู่ติดกับสถานีตรวจวัดจนถึงระยะ 10.8 km และเมื่อเทียบกับพื้นที่จริงแสดงดังรูปที่ 13 พบว่าบริเวณแหล่งกำเนิดทางด้านตะวันตกเฉียงเหนือเป็นบริเวณเกษตรกรรมและถนนสายรอง ในทางด้านเหนือเป็นถนนมิตรภาพและตัวเมืองอำเภอบ้านไผ่ ในทางด้านตะวันออกเป็นพื้นที่เกษตรกรรมที่มีการเผาในที่โล่งเกิดขึ้น สำหรับในช่วงที่ 4 (รูปที่ 12) พื้นที่หลักที่ทำให้ค่าความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ ณ สถานีตรวจวัดมีค่าสูง (>65 $\mu g/m^3$) มาจากบริเวณทางด้านทิศเหนือตะวันออกเฉียงเหนือ (NNE) โดยมีระยะห่างจากจุดตรวจวัดประมาณ 7.2 km

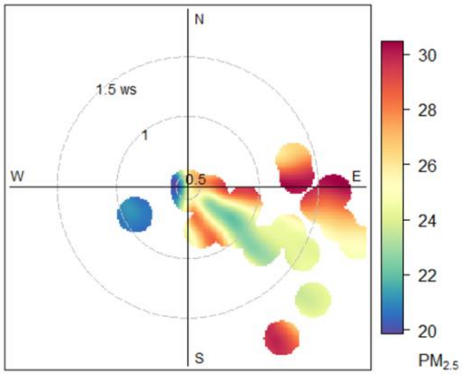
จากการวิเคราะห์ในครั้งนี้จะเห็นได้ว่าผลลักษณะการพัดพาของลม สภาพอากาศ ปริมาณการระบายและแหล่งกำเนิดมลพิษส่งผลให้พื้นที่แหล่งกำเนิดที่ทำให้ $PM_{2.5}$สูง ในแต่ละช่วงเวลาจะแตกต่างกันไป ลมหลักที่พัดมายังบริเวณที่ตั้งจุดตรวจวัดคุณภาพอากาศที่ทำการวิเคราะห์ด้วยผังลมอาจไม่ส่งผลต่อความเข้มข้น

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

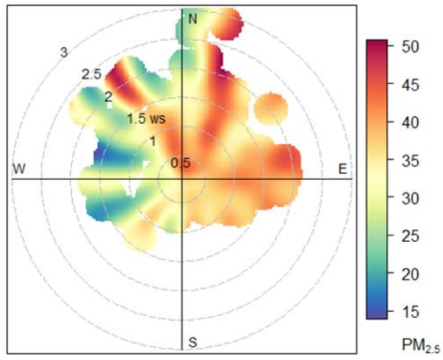
ของ $PM_{2.5}$ ให้เพิ่มสูงขึ้นก็เป็นได้ถ้าหากไม่มีแหล่งกำเนิดอยู่ ณ บริเวณต้นลม ในทางกลับกันหากทิศลมที่พัดพามายังจุดตรวจวัดไม่ได้เป็นทิศลมหลักแต่มีแหล่งกำเนิด $PM_{2.5}$ อยู่ต้นลมจะสามารถทำให้ระดับความเข้มข้น ณ จุดตรวจวัดสูงขึ้น ซึ่งข้อจำกัดของการวิเคราะห์ผังลมนี้สามารถเติมเต็มด้วยการวิเคราะห์ BVP ที่สามารถจับสัญญาณแสดงบริเวณพื้นที่ที่ส่งผลให้ความเข้มข้น $PM_{2.5}$ สูงขึ้น และภาพจากการวิเคราะห์ BVP นี้สามารถนำไปใช้แสดงผลการวิเคราะห์ของ $PM_{2.5}$ ได้ในมุมมองอื่นนอกเหนือจากเทคนิคการแสดงผลที่ได้มีการรวบรวมและนำเสนอโดยการศึกษาก่อนหน้า [26]



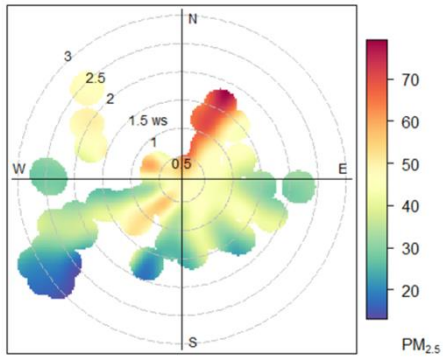
รูปที่ 9 Bivariate Polar Plot ของ $PM_{2.5}$ ช่วงที่ 1 (เฉดสีแสดงค่าความเข้มข้นเฉลี่ยในหน่วย $\mu g/m^3$)



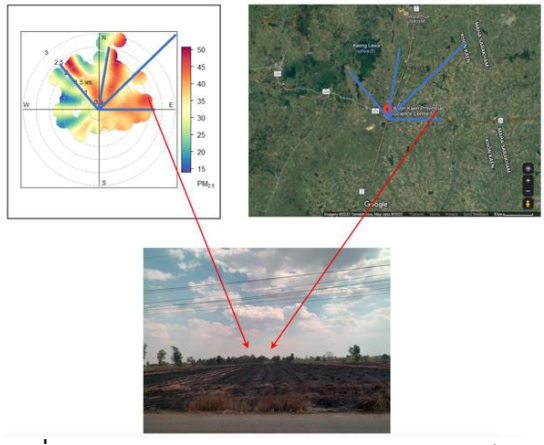
รูปที่ 10 Bivariate Polar Plot ของ $PM_{2.5}$ ช่วงที่ 2 (เฉดสีแสดงค่าความเข้มข้นเฉลี่ยในหน่วย $\mu g/m^3$)



รูปที่ 11 Bivariate Polar Plot ของ $PM_{2.5}$ ช่วงที่ 3 (เฉดสีแสดงค่าความเข้มข้นเฉลี่ยในหน่วย $\mu g/m^3$)



รูปที่ 12 Bivariate Polar Plot ของ $PM_{2.5}$ ช่วงที่ 4 (เฉดสีแสดงค่าความเข้มข้นเฉลี่ยในหน่วย $\mu g/m^3$)



รูปที่ 13 ตัวอย่างการเปรียบเทียบผลการวิเคราะห์ BVP ช่วงที่ 3 กับพื้นที่จริง (ตำแหน่งจุดตัดระหว่างแกนแนวตั้งและแกนแนวนอนของรูปผลการวิเคราะห์ BVP ในภาพซ้ายบนและจุดสีแดงในภาพขวาบนแสดงถึงตำแหน่งรถตรวจวัดคุณภาพอากาศ)

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

สรุปผล

การตรวจวัดและวิเคราะห์ข้อมูล $PM_{2.5}$ ณ ศูนย์วิทยาศาสตร์เพื่อการศึกษาขอนแก่น ตำบล ในเมือง อำเภอบ้านไผ่ จังหวัดขอนแก่น ระหว่างวันที่ 18-30 มกราคม 2565 ซึ่งเป็นการตรวจวัดระยะสั้นพบว่าสถานการณ์ฝุ่นละออง $PM_{2.5}$ มีค่าเกิน 50 $\mu g/m^3$ ในวันที่ 22, 23, 27, 28, 29 และ 30 มกราคม 2565 ซึ่งมีจำนวน 6 วัน จาก 13 วัน ที่ทำการตรวจวัด และเมื่อปรับเปลี่ยนค่ามาตรฐานเป็น 37.5 $\mu g/m^3$ ทำให้จำนวนวันที่มีความเข้มข้นเกินค่ามาตรฐานกำหนดเพิ่มมากขึ้น รวม 9 วัน จาก 13 วัน โดยปัจจัยที่เกี่ยวข้องในช่วงเวลาที่มีความเข้มข้นสูงเกี่ยวข้องกับความเสถียรของบรรยากาศโดยช่วงที่ 1 ระหว่างวันที่ 18 มกราคม 2565 เวลา 12.00 น. ถึงวันที่ 20 มกราคม 2565 เวลา 18.00 น. มีความเสถียรต่ำ $PM_{2.5}$ จึงกระจายตัวได้ดีไม่สะสมเมื่อเทียบกับช่วงเวลาอื่น

นอกจากนี้จากการวิเคราะห์ผังลม (รูปที่ 5-8) แสดงให้เห็นถึงทิศทางของลมหลักที่พัดมายังจุดตรวจวัดคุณภาพอากาศ ไม่สามารถแสดงถึงบริเวณที่มาของ $PM_{2.5}$ ได้ เนื่องจากเป็นค่าของสัดส่วนของจำนวนข้อมูลทิศทางลมในแต่ละทิศต่อจำนวนข้อมูลทั้งหมด ในขณะที่ Bivariate Polar Plots (BVP) เป็นการวิเคราะห์ข้อมูลความเข้มข้นของ $PM_{2.5}$ ที่สัมพันธ์กับข้อมูลในแต่ละช่วงของความเร็วลมและทิศทางลม ซึ่งหากบริเวณทิศทางลมหลักที่พัดมายังจุดตรวจวัดไม่มีแหล่งกำเนิดผลการวิเคราะห์ BVP จะแสดงค่าความเข้มข้นต่ำ แต่หากบริเวณทิศทางลมที่พัดมายังจุดตรวจวัดมีความถี่ต่ำนั้นมีแหล่งกำเนิดอยู่ ผลการวิเคราะห์ BVP จะแสดงค่าความเข้มข้นสูง ในการศึกษานี้ผลการวิเคราะห์ BVP (รูปที่ 9-12) แสดงให้เห็นว่าพื้นที่แหล่งกำเนิดหลักมาจากการจราจร การเผาในที่โล่ง และการทำกิจกรรมในเมือง ทำให้ค่าความเข้มข้น $PM_{2.5}$ ณ จุดตรวจวัดคุณภาพอากาศมีค่าสูง ซึ่งในแต่ละช่วงเวลาจะแตกต่างกันไป โดยเป็นผลมาจากลักษณะการพัดพาของลม สภาพอากาศ และปริมาณการระบายมลพิษในแต่ละช่วงเวลา กล่าวโดยสรุปพบว่าบริเวณที่มาหลักของฝุ่นละอองในช่วงเวลาที่ทำการศึกษานั้นมาจากแหล่งกำเนิดบริเวณด้านทิศเหนือที่เป็นถนนสายหลักบริเวณตัวเมืองอำเภอบ้านไผ่ และการเผาในที่โล่งทางด้านทิศตะวันออกมากกว่าแหล่งกำเนิดทางด้านใต้ของจุดตรวจวัด

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ศูนย์วิทยาศาสตร์เพื่อการศึกษาขอนแก่น ที่ได้สนับสนุนประสานงานต่างๆ สำหรับการดำเนินงานวิจัยในพื้นที่ศึกษา รวมถึงให้ความอนุเคราะห์สถานที่สำหรับติดตั้งรถตรวจวัดคุณภาพอากาศ และการศึกษานี้เป็นส่วนหนึ่งในโครงการระบุหาบริเวณที่มาของฝุ่นละออง PM_{10} และ $PM_{2.5}$ ที่ส่งผลต่อระดับความเข้มข้นในบรรยากาศ (รหัสโครงการ 42831และ 161428) ภายใต้แผนงานวิจัย พัฒนา เทคโนโลยีและนวัตกรรมในการจัดการสิ่งแวดล้อม (FFB650074/0061) ที่สนับสนุนโดยสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.)

เอกสารอ้างอิง

1. World Health Organization. WHO global air quality guidelines: particulate matter ($PM_{2.5}$ and PM_{10}), ozone, nitrogen dioxide, sulfur dioxide and carbon monoxide [Internet]. Geneva: World Health Organization; 2021 [cited 2021 Oct 1]. Available from: https://apps.who.int/iris/handle/10665/345329
2. World Health Organization, editor. WHO Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide Global update 2005 Summary of risk assessment. Switzerland: World Health Organization; 2006. p. 21.
3. Cheng Z, Luo L, Wang S, Wang Y, Sharma S, Shimadera H, et al. Status and characteristics

of ambient $PM_{2.5}$ pollution in global megacities. Environ Int. 2016;89–90:212–21.

4. Kanchanasuta S, Sooktawee S, Patpai A, Vatanasomboon P. Temporal variations and potential source areas of fine particulate matter in Bangkok, Thailand. Air Soil Water Res. 2020;13:1–10.

5. Kanchanasuta S, Sooktawee S, Bunplod N, Patpai A, Piemyai N, Ketwang R. Analysis of short- term air quality monitoring data in a coastal area. AIMS Environ Sci. 2021;8(6):517–31.

6. Sooktawee S, Kanabkaew T, Boonyapitak S, Patpai A, Piemyai N. Characterising particulate matter source contributions in the pollution control zone of mining and related industries using bivariate statistical techniques. Sci Rep. 2020;10(1):21372.

7. Khamkaew C, Chantara S, Wiriya W. Atmospheric $PM_{2.5}$ and its elemental composition from near source and receptor sites during open burning season in Chiang Mai, Thailand. Int J Environ Sci Dev. 2016;7(6):436–40.

8. Sooktawee S, Kongsong R, Boonyapitak S, Patpai A, Piemyai N. Identify the Plausible Potential Source Areas Related to Haze Episode in the Upper Northern Thailand. In: The 2nd Environment and Natural Resources International Conference (ENRIC 2016). Phra Nakhon Si Ayutthaya Province, Thailand; 2016. p. 18–25.

9. Kanabkaew T, Kim Oanh NT. Development of spatial and temporal emission inventory for crop residue field burning. Environ Model Assess. 2011;16(5):453–64.

10. Sooktawee S, Kanchanasuta S, Boonyapitak S, Patpai A, Piemyai N. Distinguish potential source areas of $PM_{2.5}$ and PM_{10} by statistical data analysis. IOP Conf Ser Earth Environ Sci. 2020;489:012024.

11. Punya L, Thepanondh S, Kwonpongsagoon S, Laowagul W, Sukjit N, Hanma P. Formation potentiality and source apportionment analysis of secondary organic aerosol in urban and suburban area, Thailand. Songklanakarin J Sci Technol. 2022;44(1):191–200.

12. Sooktawee S, Humphries U, Patpai A, Kongsong R, Boonyapitak S, Piemyai N. Visualization and interpretation of PM_{10} monitoring data related to causes of haze episodes in Northern Thailand. Appl Environ Res. 2015;37(2):33–48.

13. Aman N, Manomaiphiboon K, Pala- En N, Kokkaew E, Boonyoo T, Pattaramunikul S, et al. Evolution of urban haze in greater Bangkok and association with local meteorological and synoptic characteristics during two recent haze episodes. Int J Environ Res Public Health. 2020;17(24):9499.

14. Narita D, Oanh NTK, Sato K, Huo M, Permadi DA, Chi NNH, et al. Pollution characteristics and policy actions on fine particulate matter in a growing Asian economy: The case of Bangkok metropolitan region. Atmosphere. 2019;10(5):227.

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

15. Oanh N, Pongkiatkul P, Cruz M, Dung N, Phillip L, Zhuang G, et al. Monitoring and source apportionment for particulate matter pollution in six Asian cities. In: Integrated Air Quality Management. CRC Press; 2012. p. 97–124.

16. Jinsart W, Tamura K, Loetkamonwit S, Thepanondh S, Karita K, Yano E. Roadside particulate air pollution in Bangkok. J Air Waste Manag Assoc. 2002;52(9):1102–10.

17. Amnuaylojaroen T, Parasin N, Limsakul A. Health risk assessment of exposure near-future $PM_{2.5}$ in Northern Thailand. Air Qual Atmosphere Health. Forthcoming 2022.

18. Pimonsree S, Wongwises P, Pan-Aram R, Zhang M. Model analysis of PM_{10} concentration variations over a mineral products industrial area in Saraburi, Thailand. Water Air Soil Pollut. 2009;201(1–4):239–51.

19. Phetrawech T, Thepanondh S. Source contributions of PM_{10} concentrations in the Na Phra Lan pollution control zone, Saraburi, Thailand. Sci Technol Asia. 2017;22(4):60–70.

20. Sakunkoo P, Thonglua T, Sangkham S, Jirapornkul C, Limmongkon Y, Daduang S, et al. Human health risk assessment of $PM_{2.5}$-bound heavy metal of anthropogenic sources in the Khon Kaen Province of Northeast Thailand. Heliyon. 2022;8(6):e09572.

21. Amnuaylojaroen T, Inkom J, Janta R, Surapipith V. Long Range transport of Southeast Asian $PM_{2.5}$ pollution to Northern Thailand during high biomass burning episodes. Sustainability. 2020;12(23):10049.

22. Nguyen GTH, Shimadera H, Uranishi K, Matsuo T, Kondo A, Thepanondh S. Numerical assessment of $PM_{2.5}$ and O_3 air quality in continental Southeast Asia: Baseline simulation and aerosol direct effects investigation. Atmos Environ. 2019;219:117054.

23. Uria- Tellaetxe I, Carslaw DC. Conditional bivariate probability function for source identification. Environ Model Softw. 2014; 59:1–9.

24. Killick R, Eckley IA. Changepoint: An *R* package for changepoint analysis. J Stat Softw. 2014; 58(3). DOI 10.18637/jss.v058.i03.

25. Ropkins K, Carslaw DC. Openair - data analysis tools for the air quality community. R J. 2012;4(1):20.

26. Pikulyam W. [Development of data visualization for particulate matter 2.5 micrometers analysis in Bangkok]. J Appl Res Sci Tech. 2021;20(1): 157–64. Thai.

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

ระบบติดตามอุณหภูมิและความชื้นในการฟักไข่ไก่พื้นเมืองในตู้ฟักไฟฟ้าด้วยเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

Temperature and Humidity Monitoring System on Hatching Native Chickens Egg in Electric Incubator using Internet of Things Technology

กฤษฎา ภาณุมนต์วาที[1] นิกร ปรีชา[2] และ สิทธิชัย ชูสำโรง[1*]

Gitsada Panumonwatee[1] Nikorn Preecha[2] and Sittichai Choosumrong[1*]

[1]ภาควิชาทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม คณะเกษตรศาสตร์ ทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยนเรศวร อ.เมือง จ.พิษณุโลก 65000

[2]ปรีชาฟาร์ม 140 ม.17 ต.ป่าหุ่ง อ.พาน จ.เชียงราย 57120

[1]Department of Natural Resources and Environment, Faculty of Agrilculture Natural Resources and Environment, Naresuan University, Muaeng D., Pitsanulok 65000, THAILAND

[2]Preecha farm, 140 moo 17, Pa Hung S.D., Phan D., Chiang Rai 57120, THAILAND

[*] Corresponding author e-mail: sittichaic@nu.ac.th

ARTICLE INFO

Article history:

Received: August 16, 2022

Revised: October 5, 2022

Accepted: October 12, 2022

Available online: October 28, 2022

DOI: 10.14456/jarst.2022.19

Keywords: hatching chicken egg, electric incubator, Internet of things

ABSTRACT

This study presents the application of IoT technology for temperature and humidity monitoring on hatching native chicken eggs in an electric incubator to reduce the damage to the egg. The test group was divided into a non-tracking electric incubator (T1) and a tracking electric incubator (T2) while holding the 120 eggs/group. The data was collected on the initial egg weight (g/egg), infertility at day 7 (%), fertility at day 7 (%), embryo mortality at day 18 (%), chicks mortality at day 21 (%), hatchability (%) and crooked toes (%). The temperature and humidity data were sent to the database server every 30 min. From the results, summer temperature showed thesummer temperature was highest at 3.30 – 5.00 pm. (38 – 39.5°C) our technology notified the high-temperature alert to farmer. Then, The T2 treatment showed that the embryo mortality on day 18 (14%) was

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

significantly less than T1 (26%) (P<0.05), and the hatchability of T2 treatment was dramatically increased (15%) (P<0.05). However, initial egg weight, infertility at day 7, fertility at day 7, chick mortality at day 21, and crooked toes were not different (P>0.05). So, the IoT technology for tracking and notifying the temperature and humidity during the hatching process showed increased efficiency in egg hatchability, coupled with the low-cost system for implementation. The farmers can use this approach to increase production efficiency and reduce problems which occurring by using electric incubators.

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์คือนำเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งมาทำการตรวจวัด ติดตาม และแจ้งเตือนสภาพแวดล้อมในระหว่างการฟักไข่ โดยแบ่งกลุ่มทดลองออกเป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ตู้ฟักไข่ไฟฟ้าที่ไม่มีระบบติดตาม (T1) และมีระบบติดตาม (T2) ในแต่ละกลุ่มจะใช้จำนวนไข่ 120 ฟอง เก็บข้อมูลประสิทธิภาพในการฟักไข่ ได้แก่ น้ำหนักไข่ เปอร์เซ็นต์ไข่ไม่มีเชื้อ เปอร์เซ็นต์ไข่มีเชื้อ เปอร์เซ็นต์ไข่เชื้อตาย เปอร์เซ็นต์ตัวอ่อนตายที่ 18 วัน เปอร์เซ็นต์การฟักออก และเปอร์เซ็นต์ลูกไก่ที่พิการ โดยระบบติดตามจะส่งข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นในระหว่างการฟักไข่ทั้งภายในและนอกตู้ฟักไปยังระบบฐานข้อมูลในเครื่องแม่ข่ายทุก 30 นาที ผลการดำเนินงานพบว่าช่วงของวันในฤดูร้อนที่ทำการศึกษามีอุณหภูมิในช่วงเวลา 15.30 -17.00 น. สูงถึง 38.0 - 39.5°C ทำให้ระบบแจ้งเตือนไปยังผู้ปฏิบัติงานให้เข้าไปแก้ไขปัญหาที่เกิดขึ้นได้อย่างทันท่วงที ส่งผลให้ตู้ฟักไข่ T2 มีเปอร์เซ็นต์การตายของตัวอ่อนที่ 18 วัน (14%) ต่ำกว่าตู้ฟักไข่ T1 (26%) มีนัยสำคัญทางสถิติที่ P<0.05 และมีเปอร์เซ็นต์การฟักออกสูงขึ้น (15%) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (P<0.05) อย่างไรก็ตาม น้ำหนักไข่ เปอร์เซ็นต์ไข่ไม่มีเชื้อ ไข่มีเชื้อ ไข่เชื้อตาย และลูกไก่ที่พิการ มีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ (P>0.05) ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าการนำเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งมาประยุกต์ใช้สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการฟักออกของลูกที่สูงขึ้น อีกทั้งต้นทุนสำหรับการนำระบบมาประยุกต์ใช้งานมีราคาต่ำ ซึ่งสามารถนำไปพัฒนาต่อยอดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตและลดปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการฟักไข่โดยใช้ตู้ฟักไฟฟ้าได้

คำสำคัญ: การฟักไข่ไก่ ตู้ฟักไข่ไฟฟ้า อินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง

บทนำ

ความก้าวหน้าของการพัฒนาเทคโนโลยีสมัยใหม่ทำให้ปัจจุบันการฟักไข่ไม่จำเป็นต้องฟักโดยแม่ไก่เท่านั้น แต่จะมีการผลิตตู้ฟักไข่ไฟฟ้ามาฟักแทนแม่ไก่ ในการใช้ตู้ฟักแทนแม่ไก่นั้นมีข้อดีหลายประการ เช่น การแก้ปัญหาไก่ไข่ไม่เป็นที่ แก้ปัญหาไก่ไม่ฟักไข่ จัดการไข่ได้ง่ายขึ้น เข้าออกเป็นชุด ลดปัญหาไข่ไม่มีเชื้อ เชื้อตาย ไข่เน่า เหมาะกับการเลี้ยงเน้นผลผลิต ลดความสูญเสีย เป็นต้น ตู้ฟักไข่ไฟฟ้ามีปัจจัยที่สำคัญ ได้แก่ อุณหภูมิ ความชื้น การระบายอากาศ การวางไข่ และการกลับไข่ [1] การฟักไข่จะใช้ระยะเวลาในการฟักนาน 21 วัน โดยแบ่งออกเป็น 2 ช่วง ซึ่งในช่วงแรกระหว่างวันที่ 1-18 จะใช้อุณหภูมิอยู่ที่ 37.5°C และความชื้น

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

สัมพัทธ์ 55-60% นอกจากนี้จะมีการกลับไข่แบบอัตโนมัติอย่างน้อย 6 ครั้งต่อวันและมีการส่องไข่ที่ 7 และ 18 วัน เพื่อคัดเอาไข่ที่ไม่มีเชื้อออก หลังจาก 18 วัน จะเป็นระยะที่สองของการฟักซึ่งจะมีการย้ายไข่ที่มีเชื้อออกจากถาดฟักไปยังถาดเกิดลูกไก่ โดยในช่วงนี้จะใช้อุณหภูมิอยู่ที่ 36.5-37.2°C และความชื้นสัมพัทธ์ 65-70% [2]

งานวิจัยก่อนหน้านี้ [3] ได้ออกแบบตู้ควบคุมอุณหภูมิในการฟักไข่ไก่แบบกลับอัตโนมัติซึ่งมีความสามารถในการควบคุมอุณหภูมิในการฟักไข่และค่าความชื้นสัมพัทธ์ให้อยู่ในระดับที่ใกล้เคียงกันตลอดวัน ทำให้อัตราการรอดของไก่ในระยะ 18 วันแรกมีค่าที่สูงขึ้น แต่อย่างไรก็ตามถึงแม้การใช้งานตู้ฟักไข่ไฟฟ้าจะมีการควบคุมแบบอัตโนมัติบางครั้งหากระบบที่ควบคุมมีปัญหา เช่น ไฟดับ อุณหภูมิที่ไม่เหมาะสม ความชื้นอากาศที่ไม่เหมาะสม ซึ่งส่งผลกระทบโดยตรงต่อการพัฒนาของตัวอ่อนที่อยู่ระหว่างการฟักตลอดระยะเวลา 21 วัน โดยพบว่าหากอุณหภูมิสูงขึ้นเพียง 1°C นาน 4 ชั่วโมงจากอุณหภูมิปกติ จะทำให้เปอร์เซ็นต์เชื้อตายสูงขึ้นในระยะแรกของการฟัก [4] อีกทั้งระดับอุณหภูมิที่ไม่เหมาะสมยังส่งผลต่อการตายของลูกไก่เป็นจำนวนมาก รวมไปถึงลูกไก่ที่เจาะเปลือกแล้วตายในเปลือกมากก็เป็นผลมาจากการที่ความชื้นเฉลี่ยต่ำกว่าปกติ [5] ด้วยเหตุนี้ทำให้เกิดผลกระทบเชิงลบต่อระบบการผลิตลูกไก่ โดยมีโอกาสเกิดขึ้นได้ตลอดเวลาหากไม่ได้รับความเอาใจใส่จากผู้ปฏิบัติงานเอง หรือในกรณีเกิดความขัดข้องของตัวควบคุมแบบอัตโนมัติรวมไปถึงช่วงฤดูการที่อุณหภูมิภายนอกปกติสูงเกินกว่าค่าความเหมาะสมในการฟักไข่ (37.5°C) โดยปกติในช่วงฤดูร้อนจะพบปัญหาของอุณหภูมิภายนอกที่สูงส่งผลให้อุณหภูมิภายในตู้ฟักสูงด้วยเช่นกัน ทำให้ส่งผลกระทบต่อการผลิตลูกไก่ของเกษตรกรรายย่อยและทำให้มีต้นทุนในการผลิตที่สูงขึ้น

จากนโยบายไทยแลนด์ 4.0 (Thailand 4.0) ที่ส่งเสริมวิทยาการ นวัตกรรมและการนำเอาเทคโนโลยีมาประยุกต์ใช้ เพื่อให้ประชาชนมีความเป็นอยู่ที่ดีมากยิ่งขึ้น จึงเกิดแนวคิดการทำเกษตรอัจฉริยะ (Smart Farming) ที่มุ่งเน้นระบบการผลิตที่มีประสิทธิภาพ การพัฒนาผลผลิตที่มีคุณภาพมากยิ่งขึ้น โดยหนึ่งในเทคโนโลยีที่ได้ถูกนำมาประยุกต์ใช้คือเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (Internet of Things) ซึ่งเป็นรูปแบบการสื่อสารแบบ M2M (Machine to Machine) หรือระหว่างอุปกรณ์กันเอง เช่น เซนเซอร์-ไมโครคอนโทรลเลอร์-เซิฟเวอร์ ซึ่งทำให้ง่ายต่อการสร้างเครือข่ายข้อมูล การควบคุม และการสั่งการผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ซึ่งจะมีส่วนช่วยให้เกษตรกรสามารถติดตามปัจจัยที่สนใจ ผลผลิต และคุณภาพของกระบวนการผลิตได้ดียิ่งขึ้น นอกจากนี้ยังสามารถสรุปและแสดงผลข้อมูลผ่านแอปพลิเคชันต่าง ๆ เพื่อให้ทันต่อเหตุการณ์ สภาพแวดล้อมหรือข้อมูลที่เกษตรกรสนใจ [6] ดังเช่นการศึกษาของ ปวันนพัสตร์ และคณะ [7] ที่ได้พัฒนารูปแบบระบบควบคุมฟาร์มอัจฉริยะในโรงเรือนปลูกพืชโดยสามารถแสดงค่าอุณหภูมิ ค่าความชื้นในดิน สั่งการเปิด-ปิดการรดน้ำ ดูการทำงานของระบบผ่านกล้องวงจรปิดได้แบบเรียลไทม์ และมีระดับความพึงพอใจของผู้ใช้งานสูงถึง 4.6 (มากที่สุด) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาของพูลวัน และคณะ [8] ที่ได้พัฒนาระบบควบคุณอุณหภูมิและความชื้นสำหรับตู้ฟักไข่แบบอัตโนมัติโดยใช้ Raspberry Pi เป็นตัวประมวลผลและส่งค่าขึ้นบนเครื่องแม่ข่ายรูปแบบ NoSQL ซึ่งสามารถสั่งการ และควบคุมระดับของความชื้นและอุณหภูมิให้มีความผันผวนน้อย แต่อย่างไรก็ตามยังขาดผลการศึกษาส่วนที่เป็นประโยชน์ต่อเกษตรกรในเรื่องของตัวชี้วัดที่เกี่ยวข้องกับประสิทธิภาพการฟักไข่ อาทิเช่น น้ำหนักไข่ เปอร์เซ็นต์ไข่ไม่มีเชื้อ เปอร์เซ็นต์ไข่มีเชื้อ เปอร์เซ็นต์ตัวอ่อนตาย เป็นต้น

เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งจะสมบูรณ์ไม่ได้ หากขาดอีกส่วนที่สำคัญคือซอฟต์แวร์สำหรับจัดการระบบต่าง ๆ โดยหนึ่งในรูปแบบการส่งผ่านข้อมูลและการประมวลผลข้อมูลที่ได้จากเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งสู่ผู้ใช้ (Machine to User) คือการประมวลผลบนเว็บ (Web Processing Service: WPS) ที่ผู้ใช้งานสามารถ

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

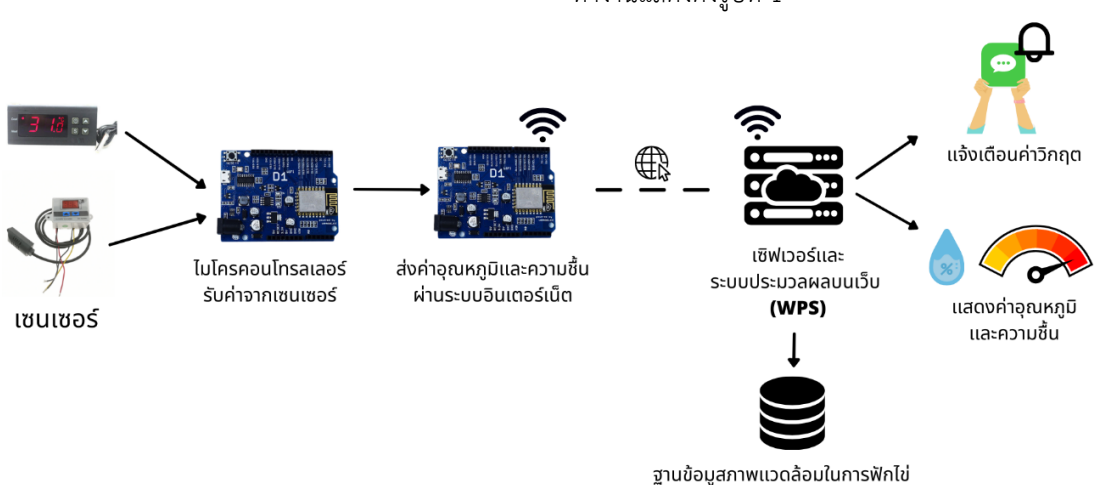
เข้าถึงและทำการวิเคราะห์ข้อมูลบนหน้าเว็บไซต์โดยเครื่องคอมพิวเตอร์ที่ไม่จำเป็นต้องมีซอฟต์แวร์หรือเครื่องมือที่ใช้ในการวิเคราะห์เนื่องจากระบบการประมวลผลบนเว็บจะดึงเครื่องมือต่าง ๆ ที่อยู่บนคลาวน์มาทำการวิเคราะห์และส่งผลลัพธ์กลับไปยังผู้ใช้ผ่านเครือข่ายอินเทอร์เน็ต ทำให้มีความสะดวกรวดเร็วในการใช้งานผ่านเว็บบราวเซอร์ของอุปกรณ์ทุกชนิดที่สามารถเข้าถึงเครือข่ายอินเทอร์เน็ตได้ อาทิเช่น สมาร์ทโฟน แท็บเล็ต คอมพิวเตอร์ โดยไม่จำกัดระบบปฏิบัติการ

ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้จึงได้นำเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่งมาเป็นเครื่องมือสำหรับติดตามและแจ้งเตือนสภาพแวดล้อมระหว่างการฟักไข่โดยใช้ตู้ฟักไข่ไฟฟ้า เพื่อให้เกิดกระบวนการฟักไข่ที่มีประสิทธิภาพ มีอัตราการตายต่ำลง โดยมีต้นทุนระบบที่ไม่สูง สามารถเข้าถึงหรือต่อยอดได้ง่าย ร่วมกับเทคโนโลยีการประมวลผลบนเว็บ ซึ่งสามารถจัดเก็บข้อมูลเชิงสถิติ และสรุปข้อมูลในรูปแบบกราฟบนเว็บแอปพลิเคชันที่สามารถใช้ง่ายและเข้าใจได้ง่าย

วิธีดำเนินการวิจัย

การออกแบบและพัฒนา

ในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้เซนเซอร์สำหรับการตรวจวัดค่าอุณหภูมิชนิด Digital Temperature Controller รุ่น STC1000 และค่าความชื้นสัมพัทธ์ ชนิด Digital Humidity Controller รุ่น XH-W3005 ที่เกษตรกรใช้ในตู้ฟักไข่ไฟฟ้าทั่วไปร่วมกับไมโครคอนโทรลเลอร์ชนิด Wemos D1 ที่มีต้นทุนต่ำ และสามารถหาซื้อได้ทั่วไป เพื่อรับค่าอุณหภูมิ ความชื้นสัมพัทธ์จากเซนเซอร์ และส่งข้อมูลไปที่ฐานข้อมูลบนเครื่องแม่ข่าย จากนั้นระบบประมวลผลบนเว็บจะทำการวิเคราะห์และแสดงผลข้อมูลอุณหภูมิและความชื้น ตามรอบการส่งข้อมูลคือ 30 นาที และบันทึกเป็นฐานข้อมูลโดยใช้ระบบจัดการฐานข้อมูล PostgreSQL ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์รหัสเปิดที่ไม่มีค่าใช้จ่าย นอกจากนี้ระบบจะแจ้งเตือนต่อเกษตรกรผ่าน Line notify เมื่ออุณหภูมิเท่ากับอุณหภูมิวิกฤต (Critical Temperature) ซึ่งถูกตั้งค่าที่ 39°C โดยมีลักษณะการทำงานแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การออกแบบและพัฒนาระบบ

การทดสอบประสิทธิภาพของตู้ฟักไข่

การศึกษาครั้งนี้ดำเนินการในช่วงเดือนมีนาคม - เมษายน พ.ศ. 2565 โดยใช้ไข่ไก่พื้นเมืองจำนวน 240 ฟอง แบ่งออกเป็นสองกลุ่มทดลองกลุ่มละ 120 ฟอง นำเข้าฟักในตู้ฟักไข่ไฟฟ้าจำนวนสองตู้ที่มีระบบการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นแบบอัตโนมัติ ขนาดกว้าง 60 cm ลึก 40 cm สูง 70 cm (Automatic Temperature and Humidity Control System) รวมไปถึงระบบกลับไข่อัตโนมัติที่ทำการกลับไข่ทุก 2 ชั่วโมง โดยแบ่งออกเป็นตู้ฟักไข่ไฟฟ้าที่ไม่มีระบบติดตาม (T1) และมีระบบติดตาม

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

(T2) ภายในตู้ฟักมีระบบการหมุนเวียนอากาศตลอดการฟักด้วยพัดลมขนาดเล็ก ใช้หลอดทังสเตนในการให้ความร้อน ติดตั้งอุปกรณ์ให้ความชื้นและติดตั้งเซนเซอร์กึ่งกลางของตู้ที่ไม่ใกล้กับแหล่งให้ความร้อน แหล่งกำเนิดความชื้นจนเกิดไป มีตำแหน่งใกล้เคียงกับไข่มากที่สุด ซึ่งให้มั่นใจว่าสามารถใช้เป็นค่าตัวแทนข้อมูลได้ ในการฟักไข่ด้วยตู้ฟักไข่ไฟฟ้าจะใช้เวลาในการฟัก 21 วัน ระหว่างการฟักไข่จะมีการตรวจสอบและประเมินพัฒนาการของตัวอ่อน โดยการส่องไข่ที่ 7 และ 18 วันของการเข้าฟักเพื่อประเมินจำนวนไข่ไม่มีเชื้อ ไข่มีเชื้อ ไข่เชื้อตาย หลังจากครบ 18 วันของการฟักไข่จะทำการย้ายไข่ที่มีเชื้อไปยังตู้เกิดและแยกไข่เชื้อตายไปนับจำนวน ภายหลังการฟักไข่ครบ 21 วัน จะทำการประเมินอัตราการฟักออก อัตราการตายและความพิการของลูกไก่

รูปที่ 2 ตู้ฟักไข่ไฟฟ้าควบคุมด้วยระบบอัตโนมัติ

ตู้ฟักไข่ทั้งสองตู้จะถูกติดตั้งในห้องฟักไข่ภายใต้สภาพแวดล้อมเดียวกัน ณ ฟาร์มไก่พื้นเมืองแห่งหนึ่งในจังหวัดพิษณุโลก โดยมีระบบการให้ความร้อนและความชื้นแบบอัตโนมัติ โดยตั้งค่าการควบคุมอุณหภูมิอยู่ที่ 37.5°C และความชื้นสัมพัทธ์ 65% หากอุณหภูมิภายในตู้ฟักสูงกว่า 37.5°C ระบบเซนเซอร์จะทำการตัดไฟฟ้าที่จ่ายไปยังแหล่งกำเนิดความร้อนในตู้ฟักทันทีเพื่อไม่ให้ความร้อนในตู้ฟักเกินค่าที่ตั้งไว้ และหากอุณหภูมิภายในตู้ฟักเริ่มลดระดับลงเหลือ 37.0°C ระบบจะทำการจ่ายไฟไปยังแหล่งกำเนิดความร้อนเพื่อรักษาระดับความร้อนให้อยู่ในช่วงระหว่าง 37.0 - 37.5°C เช่นเดียวกับความชื้นสัมพัทธ์ที่ตั้งค่าไว้ที่ 65% หากความชื้นในตู้ฟักไข่สูงถึงค่าที่ตั้งไว้จะทำให้เกิดการตัดไฟที่จ่ายไปยังแหล่งกำเนิดความชื้นทันที และถ้าความชื้นเริ่มลดระดับลงมาอยู่ที่ 60% จะทำให้ระบบจ่ายไปไฟยังแหล่งกำเนิดความชื้นเพื่อรักษาระดับความชื้นให้อยู่ระหว่าง 60 - 65% ทำให้การควบคุมทั้งอุณหภูมิและความชื้นภายในตู้ฟักอยู่ในระดับที่เหมาะสมแสดงดังรูปที่ 2

อย่างไรก็ตามถึงแม้ระบบเซนเซอร์จะสามารถควบคุมทั้งอุณหภูมิและความชื้นได้โดยอัตโนมัติ ซึ่งทั้งสองปัจจัยนี้ถือเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการฟักออกของลูกไก่ ในทางตรงกันข้ามฤดูการถือเป็นอีกหนึ่งปัจจัยที่ส่งผลต่อระบบการทำงานของตู้ฟักไข่ไฟฟ้า เนื่องจากเกษตรกรรายย่อยไม่สามารถความคุมอุณหภูมิภายนอกตู้ฟักไข่ได้เหมือนกับการฟักไข่ในเชิงอุตสาหกรรมที่ตู้ฟักไข่นั้นถูกติดตั้งไว้ในห้องที่สามารถควบคุมอุณหภูมิได้ เหตุนี้จึงทำให้ในช่วงฤดูการที่อุณหภูมิภายนอกสูงเกินกว่า 37.5°C ส่งผลให้อุณหภูมิภายนอกที่สูงขึ้นแผ่กระจายความร้อนไปยังภายในตู้ฟักผ่านทางช่องระบายอากาศของตู้ฟักเอง จึงทำให้ความร้อนภายในตู้ฟักมีค่าอุณหภูมิเกินกว่าค่าที่ตั้งไว้ แม้ความร้อนจะควบคุมด้วยระบบเซนเซอร์ก็ตามทั้งที่ระบบทำการตัดไฟที่จ่ายไปยังแหล่งให้ความร้อนทันทีเมื่ออุณหภูมิสูงถึงค่าที่ตั้งไว้ ด้วยเหตุนี้ผู้ปฏิบัติงานไม่สามารถรับรู้ได้ว่าช่วงเวลาของวันอุณหภูมิแปรผันเพียงใด ซึ่งบางวันอุณหภูมิที่สูงขึ้นในระหว่างการฟักเป็นเวลานานก็จะทำให้กระทบต่อประสิทธิภาพการฟักไข่โดยใช้ตู้ฟักไข่ไฟฟ้า

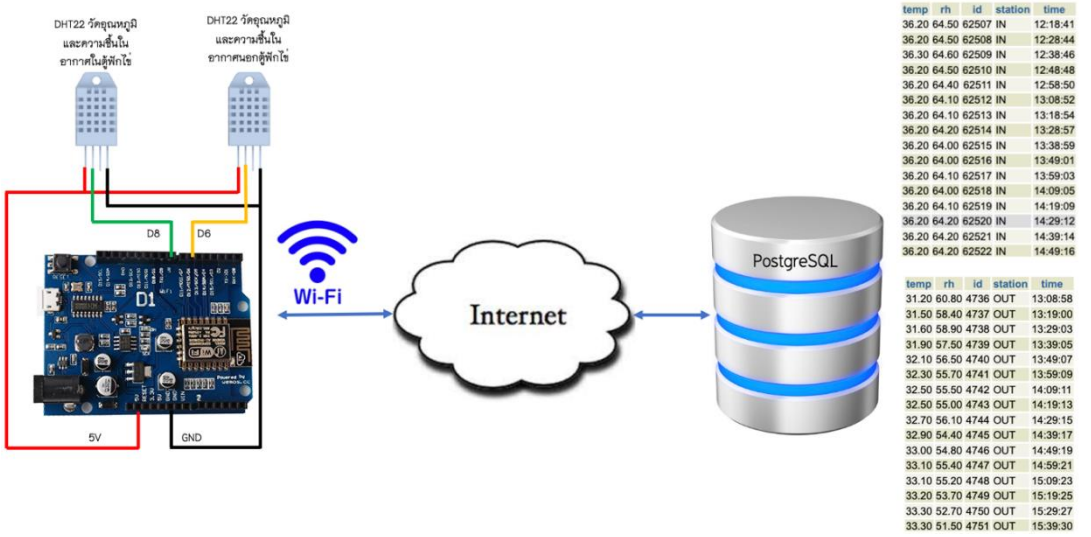
โดยการฟักไข่ตลอดระยะเวลา 21 วัน ตู้ฟักทั้งสองตู้จะติดตั้งไว้สถานที่เดียวกันซึ่งตู้ทั้งสองใบนั้นจะมีและไม่มีระบบการแจ้งเตือน สำหรับตู้ที่มีระบบการแจ้งเตือนจะทำการส่งข้อมูลอุณหภูมิและความชื้นระหว่าง

Journal of Applied Research on Science and Technology (JARST), Vol 21, Issue 2, 2022
ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

การฟักทั้งภายในและภายนอกตู้ฟักไปยังระบบเซิร์ฟเวอร์ที่เป็นฐานข้อมูลออนไลน์ทุก ๆ 30 นาที ซึ่งผู้ปฏิบัติงานสามารถตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความชื้นระหว่างการฟักได้ ยิ่งไปกว่านั้นระบบจะแจ้งเตือนผ่านแอปพลิเคชัน (LINE Notification) บนโทรศัพท์มือถือหากอุณหภูมิสูงจนถึงขั้นวิกฤต และความชื้นไม่อยู่ในช่วง 60 - 65% ทำให้ผู้ปฏิบัติงานเองสามารถรับรู้และแก้ไขในช่วงเวลาดังกล่าวที่อุณหภูมิสูงไม่ว่าจะโดยวิธีการใดก็ตามที่ทำให้ไข่ที่นำเข้าฟักอยู่ในอุณหภูมิที่เหมาะสมเพื่อลดอัตราการสูญเสีย

การวิเคราะห์ทางสถิติ

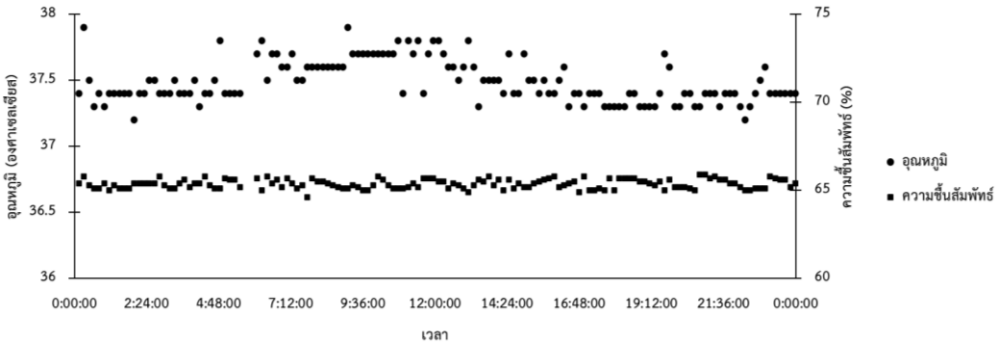
การทดลองแบ่งกลุ่มตัวอย่างออกเป็นสองกลุ่มการทดลอง (T1 และ T2) กลุ่มละ 120 ตัวอย่าง ตามแผนการทดลองแบบ Random Group Design โดยแต่ละกลุ่มถูกจะวิเคราะห์ น้ำหนักไข่ เปอร์เซ็นต์ไข่ไม่มีเชื้อ ไข่มีเชื้อ ไข่เชื้อตาย ตัวอ่อนตายที่ 18 วัน การฟักออกและลูกไก่ที่พิการจะถูกวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ $p<0.05$ โดยวิธีการทดสอบที (T-Test) ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป IBM SPSS version 26



temp	rh	id	station	time
36.20	64.50	62507	IN	12:18:41
36.20	64.50	62508	IN	12:28:44
36.30	64.60	62509	IN	12:38:46
36.20	64.50	62510	IN	12:48:48
36.20	64.40	62511	IN	12:58:50
36.20	64.10	62512	IN	13:08:52
36.20	64.10	62513	IN	13:18:54
36.20	64.20	62514	IN	13:28:57
36.20	64.00	62515	IN	13:38:59
36.20	64.00	62516	IN	13:49:01
36.20	64.10	62517	IN	13:59:03
36.20	64.00	62518	IN	14:09:05
36.20	64.10	62519	IN	14:19:09
36.20	64.20	62520	IN	14:29:12
36.20	64.20	62521	IN	14:39:14
36.20	64.20	62522	IN	14:49:16

temp	rh	id	station	time
31.20	60.80	4736	OUT	13:08:58
31.50	58.40	4737	OUT	13:19:00
31.60	58.90	4738	OUT	13:29:03
31.90	57.50	4739	OUT	13:39:05
32.10	56.50	4740	OUT	13:49:07
32.30	55.70	4741	OUT	13:59:09
32.50	55.50	4742	OUT	14:09:11
32.50	55.00	4743	OUT	14:19:13
32.70	56.10	4744	OUT	14:29:15
32.90	54.40	4745	OUT	14:39:17
33.00	54.80	4746	OUT	14:49:19
33.10	55.40	4747	OUT	14:59:21
33.10	55.20	4748	OUT	15:09:23
33.20	53.70	4749	OUT	15:19:25
33.30	52.70	4750	OUT	15:29:27
33.30	51.50	4751	OUT	15:39:30

รูปที่ 3 ตารางข้อมูลที่บันทึกในฐานข้อมูล



รูปที่ 4 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้นภายในตู้ฟักไข่

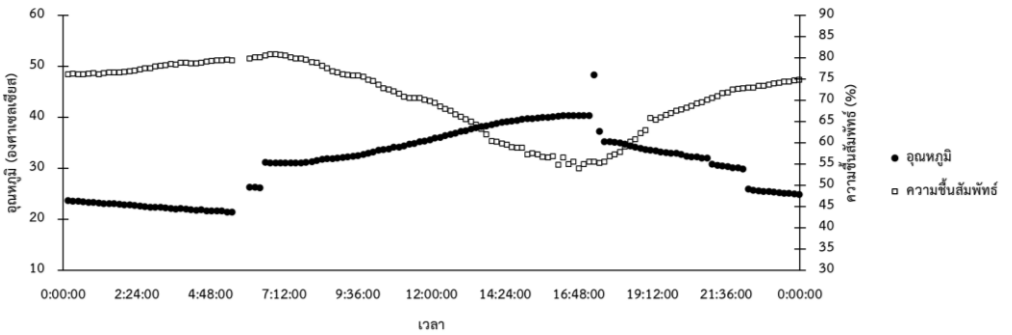
ผลการศึกษาและอภิปรายผล

จากการศึกษาผลของการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้นระหว่างการฟัก โดยการทำงานของระบบเซนเซอร์ที่ส่งข้อมูลไปยังระบบเซิร์ฟเวอร์ที่เป็นฐานข้อมูลออนไลน์ทุก 30 นาที (รูปที่ 3) ซึ่งค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิและความชื้นจะแบ่งออกเป็น 3 ช่วง ได้แก่ช่วงเช้า (06.00 - 12.00 น.) ช่วงบ่าย (12.30-18.00 น.) และช่วงกลางคืน

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

(18.30 - 05.30 น.) โดยพบว่าค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิและความชื้นภายในตู้ฟักในช่วงเช้าและช่วงกลางคืนมีระดับที่คงที่ตามค่าที่ได้กำหนดไว้คือ 37.5℃ และความชื้นสัมพัทธ์ที่ 65% (รูปที่ 4)

สำหรับเซนเซอร์ที่อยู่ภายนอกตู้ฟักจะมีค่าเฉลี่ยของอุณหภูมิและความชื้นค่อนข้างแปรปรวนเนื่องจากขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมในแต่ละวันที่ไม่สามารถควบคุมได้ (รูปที่ 5) โดยในช่วงบ่ายจะเป็นช่วงเวลาที่อุณหภูมิภายนอกตู้ฟักเริ่มสูงขึ้น โดยพบว่าในช่วงเวลา 15.30 - 17.00 น. อุณหภูมิภายนอกตู้ฟักอยู่ระหว่าง 39.0 - 40.0℃ ขณะเดียวกันส่งผลให้อุณหภูมิภายนอกที่สูงขึ้นแพร่ผ่านเข้าไปยังภายในตู้ฟักทำให้ภายในตู้ฟักเริ่มมีอุณหภูมิที่สูงด้วยเช่นกัน ด้วยเหตุนี้จากการที่อุณหภูมิภายในตู้ฟักสูงขึ้นนั้นไมโครคอนโทรลเลอร์จะส่งข้อมูลไปยังระบบเซิร์ฟเวอร์ และแจ้งเตือนไปยังแอปพลิเคชัน (LINE Notification) หากอุณหภูมิได้เกินค่าวิกฤตที่ตั้งไว้หรือความชื้นไม่อยู่ในช่วงที่เหมาะสม ทำให้ผู้ปฏิบัติงานได้ทราบอย่างรวดเร็วว่าขณะนี้อุณหภูมิภายในตู้ฟักนั้นสูงเกินกว่าวิกฤต และทำให้ผู้ปฏิบัติงานสามารถเข้าไปแก้ไขเพื่อทำให้ไข่ที่ฟักอยู่ในอุณหภูมิที่เหมาะสม เนื่องจากหากอุณหภูมิที่สูงขึ้นเป็นเวลานานและไม่ได้รับการแก้ไขหรือจัดการจากผู้ปฏิบัติงานจะทำให้กระทบต่อการพัฒนาของตัวอ่อนระหว่างการฟัก และส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการฟักอย่างชัดเจน (ตารางที่ 1) ส่วนปัญหาจากระดับความชื้นนั้นพบว่าตลอดการทดลองอุปกรณ์ควบคุมความชื้นสามารถทำงานได้ปกติ และควบคุมให้อยู่ในระดับที่เหมาะสมได้ ซึ่งไม่พบวันที่ความชื้นสัมพันธ์สูงหรือต่ำกว่าค่าที่เหมาะสมตลอดเวลาในการทดลอง



รูปที่ 5 กราฟแสดงการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิและความชื้นภายนอกตู้ฟักไข่

ตารางที่ 1 การพัฒนาของตัวอ่อนระหว่างการฟักไข่ด้วยตู้ฟักไข่ไฟฟ้าแบบมีการแจ้งเตือน (T1) และไม่มีการแจ้งเตือน (T2)

Parameter	T1 [1]	T2 [2]	*P-Value*
No. of eggs set	120.00	120.00	
Initial egg weight (g/egg)	46.60 ±0.40	46.32 ±0.44	0.633[ns]
Infertility at day 7 (%)	9.17 ±2.65	10.83 ±2.85	0.669[ns]
Fertility at day 7			
Fertile eggs (%)	81.67 ±3.55	83.33 ±3.42	0.735 [ns]
Infertile eggs (%)	9.17 ±2.65	5.83 ±2.15	0.329 [ns]
Embryo mortality at day 18 (%)	25.51 ±4.43 [a]	14.00 ±3.49 [b]	0.042
Chicks' mortality at day 21 (%)	12.24 ±3.33	9.00 ±2.88	0.461 [ns]
Hatchability (%)	61.22 ±4.95 [b]	76.00 ±4.29 [a]	0.025
Crooked toes (%)	8.16 ±2.78	4.00 ±1.79	0.222 [ns]

*อักษรที่แตกต่างกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (P<0.05) เมื่อเปรียบเทียบข้อมูลตามแนวแถว

ns หมายถึงข้อมูลไม่แตกต่างกันทางสถิติ

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

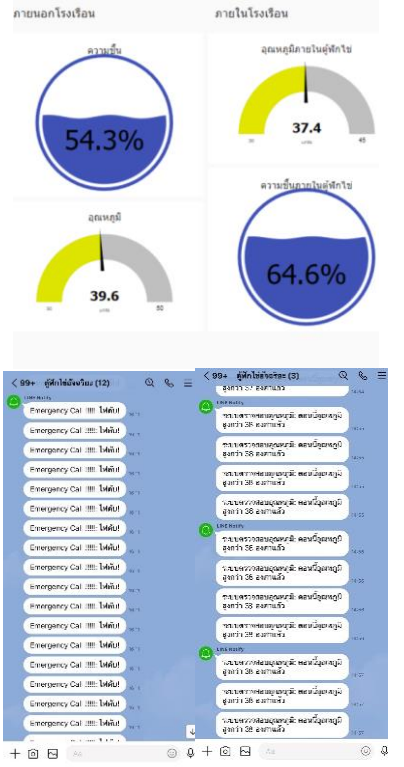
สำหรับการพัฒนาของตัวอ่อนในระหว่างการฟักตลอดระยะเวลา 21 วัน จากตารางที่ 1 พบว่า น้ำหนักไข่เฉลี่ยของกลุ่ม T1 และ T2 ก่อนนำเข้าตู้ฟัก จำนวน 120 ฟอง/กลุ่ม มีค่าเท่ากับ 46.60 ±0.40 และ 46.32 ±0.44 g ตามลำดับ หลังจากครบ 7 วัน ของการฟัก ทำการประเมินเปอร์เซ็นต์ไข่ไม่มีเชื้อ ไข่มีเชื้อ และไข่เชื้อตาย (รูปที่ 6) พบว่า ทั้งสองกลุ่มมีค่าเปอร์เซ็นต์ไข่ไม่มีเชื้อไม่แตกต่างกัน (P>0.05) โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 9.17 ±2.65 และ 10.83 ±2.85 ตามลำดับ ขณะที่เปอร์เซ็นต์ไข่ไม่มีเชื้อ และไข่ที่เชื้อตายของทั้งสองกลุ่มมีค่าไม่แตกต่างกัน (P>0.05) โดยกลุ่ม T1 มีเปอร์เซ็นต์ไข่ไม่มีเชื้อเท่ากับ 81.67 ±3.55% ตามด้วยกลุ่ม T2 ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 83.33 ±3.42% ตามลำดับ เช่นเดียวกับเปอร์เซ็นต์ไข่เชื้อตายของทั้งสองกลุ่มไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติเช่นกัน (P>0.05) โดยกลุ่ม T1 มีค่ามากที่สุด ตามด้วยกลุ่ม T2 ซึ่งมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 9.17 ±2.65 และ 5.83 ±2.15% ตามลำดับ

รูปที่ 6 ไข่มีเชื้อ (ก) ไข่ไม่มีเชื้อ (ข) และไข่เชื้อตาย (ค)

หลังจากระยะเวลาของการฟักที่ 18 วัน ทำการตรวจสอบอัตราการตายของตัวอ่อนอีกครั้ง พบว่า เปอร์เซ็นต์การตายของตัวอ่อนในกลุ่ม T1 มีค่าแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกลับกลุ่ม T2 (P<0.05) โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 25.51 ±4.43 และ 14.00 ±3.49% ตามลำดับ เมื่อครบกำหนดการฟักออกที่ 21 วัน พบว่า เปอร์เซ็นต์การฟักออกในกลุ่ม T2 มีค่าแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่ม T1 (P<0.05) โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 76.00 ±4.29 และ 61.22 ±4.95% ตามลำดับ ขณะที่เปอร์เซ็นต์ลูกไก่ที่พิการ (รูปที่ 7) และเปอร์เซ็นต์การตายของลูกไก่ (รูปที่ 8) มีค่าที่ไม่แตกต่างกันทางสถิติ (P>0.05)

รูปที่ 7 ความผิดปกติของลูกไก่ที่เกิดจากการฟักไข่ในอุณหภูมิสูง

รูปที่ 8 การตายขณะเจาะไข่



รูปที่ 9 แอพพลิเคชันที่ใช้ติดตามสภาพแวดล้อมในและนอกตู้ฟักไข่

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

จากการเปรียบเทียบการทำงานของระบบการแจ้งเตือนทำให้ทราบว่าอุณหภูมิในแต่ละวันช่วงเวลา 15.30-17.00 น. ของฤดูร้อน มีค่าเกินมาตรฐานสำหรับการฟักไข่โดยกลุ่มตู้ฟัก T2 สามารถแจ้งเตือนไปยังผู้ปฏิบัติงานได้อย่างรวดเร็วผ่านแอปพลิเคชัน LINE Notification ทำให้ผู้ปฏิบัติงานสามรถเข้าไปแก้ไขได้อย่างรวดเร็ว ในขณะที่กลุ่มตู้ฟัก T1 ที่ไม่มีระบบการแจ้งเตือนอุณหภูมิภายในตู้ฟักจะสูงตามอุณหภูมิภายนอก ซึ่งทำให้ไข่ที่ทำการฟักอยู่ในสภาวะที่ไม่เหมาะสมสำหรับการฟักเป็นเวลานานมากกว่า 1.30 ชั่วโมงต่อวัน จากอุณหภูมิที่สูงขึ้นทำให้กระทบต่อประสิทธิภาพการฟักไข่ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Sardary และ Mohammad [4] ที่ทำการศึกษาการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิ 1.1°C (จาก 37.7°C เป็น 38.8°C) จากอุณหภูมิปกติที่ทำการฟักไข่นาน 4 ชั่วโมงต่อวัน โดยแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่กลุ่มที่มีการให้ความร้อน 38.8°C ในวันที่ 1-5 8-12 14-18 และ 19-21 ของการฟัก ตามลำดับ เทียบกับกลุ่มที่มีการฟักโดยใช้อุณหภูมิปกติ (37.7°C) พบว่าเปอร์เซ็นต์การตายของตัวอ่อนระหว่างการฟักในกลุ่มที่มีการปรับอุณหภูมิสูงขึ้นเป็น 38.8°C ในวันที่ 1-5 มีอัตราการตายสูงที่สุด ตามด้วยกลุ่มที่มีการปรับอุณหภูมิในวันที่ 8-12 14-18 และ19-21 วันของการฟัก ตามลำดับ แต่ในกลุ่มที่มีการฟักโดยใช้อุณหภูมิปกติคือ 37.7°C มีเปอร์เซ็นต์การตายน้อยที่สุด เมื่อเทียบกับทุกกลุ่มที่มีการเพิ่มอุณหภูมิระหว่างการฟัก นอกจากนี้ Collins และคณะ [9] ทำการศึกษาความแตกต่างของอุณหภูมิในการฟักไข่โดยแบ่งออกเป็น 3 กลุ่มทดลอง ได้แก่ กลุ่มที่ใช้ความร้อนสูง (38.3°C) กลุ่มที่ใช้ความร้อนปกติ (37.5°C) และกลุ่มที่ใช้ความร้อนต่ำ (36.7°C) พบว่าเปอร์เซ็นต์การฟักออกในกลุ่มที่ใช้ความร้อนสูงในการฟักไข่มีค่าต่ำกว่ากลุ่มที่มีการใช้ความร้อนต่ำ และกลุ่มที่ใช้ความร้อนปกติ 83.6% 91.6% และ 93.5% ตามลำดับ จากการศึกษาสามารถบ่งชี้ได้อย่างชัดเจนว่าอุณหภูมิที่สูงขึ้นส่งผลต่ออัตราการตายของตัวอ่อนในระหว่างการฟักไข่อย่างชัดเจน ดังนั้นการนำเทคโนโลยีสมัยใหม่มาทำการติดตาม และแจ้งเตือนอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์ในระหว่างการฟักไข่โดยใช้ตู้ฟักไข่ไฟฟ้า (รูปที่ 9) ถือว่าเป็นประโยชน์สำหรับเกษตรกรรายย่อยที่จะสามารถลดปัญหาที่อาจจะเกิดขึ้นในระหว่างการฟักไข่ได้เป็นอย่างดี อีกทั้งยังสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตลูกไก่ให้สูงขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับการฟักไข่โดยไม่มีระบบติดตามและการแจ้งเตือน นอกจากนี้ยังช่วยให้เกษตรกรมีฐานข้อมูลสำหรับการฟักไข่ที่จะเป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาฟาร์มและต่อยอดระบบต่าง ๆ ในอนาคตต่อไป

สรุปผล

เทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตของสรรพสิ่ง (IoT) ที่นำมาทำการติดตาม และแจ้งเตือนสภาพแวดล้อมในระหว่างการฟักไข่ สามารถใช้งานได้จริงโดยผ่านการพัฒนาร่วมกับเกษตรกร โดยระบบสามารถแจ้งเตือนไปยังเกษตรกรผู้ดูแลตู้ฟักไข่ในระหว่างที่อุณหภูมิในช่วงวันสูงขึ้นเกินกว่าค่าปกติ หรือค่าความชื้นไม่อยู่ในช่วงที่เหมาะสม ผ่านการแจ้งเตือนด้วยระบบ LINE notify ที่ใช้งานง่าย ทำให้เกษตรกรสามารถเข้าไปแก้ไขเพื่อให้ไข่ที่ฟักอยู่ในอุณหภูมิที่ปกติ ส่งผลให้อัตราการตายของตัวอ่อนที่ 18 วันลดลง 10% และเปอร์เซ็นต์การฟักออกของลูกไก่เพิ่มขึ้น 15% ซึ่งจากประสิทธิภาพการฟักไข่ที่เพิ่มขึ้นทำให้ต้นทุนในการฟักไข่ไก่ต่อตัวลดลง ประกอบกับต้นทุนของอุปกรณ์ที่ใช้พัฒนาระบบนั้นมีค่าใช้จ่ายที่ไม่แพง และได้ทดสอบการใช้งานจริงโดยเกษตรกรจึงเป็นรูปแบบการพัฒนาตู้ฟักไข่ที่ใช้ได้จริง

เอกสารอ้างอิง

1. Tarachai P. Poultry Farm Management [internet]. Faculty of Animal Science and Technology: Maejo University; 2017; [cited 2022 Jun 1]. Availability from: http: / / www. as2. mju. ac.th/E-Book/t_prapakorn.aspx. Thai.
2. Lee Cartwright A. Incubating and Hatching Eggs. Livestock management [Internet]. The

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

Texas A&M University System; 2013; [cited 2022 Jun 1]. Availability from: https://aggie-horticulture.tamu.edu/organic/files/2011/02 / Lee- Cartwright- Incubating- and- hatching-eggs.pdf

3. Luemasueni A, Smarnpituk L, Kasor S. [Research and design incubator to control temperature the egg back automatically]. YRUJST. 2017(2):39-49. Thai.

4. Al Sardary S, Mohammad Sh. Effect of thermal manipulation during embryogenesis on hatching traits. International J Agric Sci. 2016(1):1-6.

5. Kasetsuwan S. [Chicken husbandry] 5th ed. Bangkok: Kasetsart University; 1980. Thai.

6. The secretariat of the prime minister, royal Thai government. [Thailand 4.0 Driving the future towards stability, prosperity and sustainability]. Thai Khu Fa. 2017;33(1):2-44. Thai.

7. Srisongmuang P, Srisongmuang C, Budsabok S, Homsup C. [Development of smart farms in greenhouses through the embedded system]. J Appl Res Sci Tech. 2021;20(1):1-29. Thai.

8. Poolwan J, Sripan B, Kingthong S. [Development of automatic temperature and humidity control systems for eggs incubators with internet of thing technology]. RMUTSB Acad J. 2021;(9):225-36. Thai.

9. Collins KE, Jordan BJ, McLendon BL, Navara KJ, Beckstead RB, Wilson JL. No evidence of temperature-dependent sex determination or sex- biased embryo mortality in the chicken. Poult Sci. 2013;92(12):3096-102.

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

แบบจำลองการจำแนกอากาศยานขับไล่โจมตีบนพื้นฐานข้อมูลของเป้าหมายไม่ทราบฝ่ายโดยใช้โครงข่ายประสาทเทียม

A Model of Fighter Aircraft Classification Based on Information of Unknown Target Using Artificial Neural Networks

ปธิกร อันชื่น[1] และ นันทิพัฒน์ พิศุทธางกูร[2*]

Patikorn Anchuen[1*] and Nuntipat Phisutthangkoon[2*]

[1]สำนักบัณฑิตศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช กรุงเทพมหานคร 10220

[2]ภาควิชาคอมพิวเตอร์ กองวิชาคณิตศาสตร์และคอมพิวเตอร์ กองการศึกษา โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช กรุงเทพมหานคร 10220

[1]Office of Graduate Studies, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy, Bangkok 10220, THAILAND

[2]Department of Computer Science, Navaminda Kasatriyadhiraj Royal Air Force Academy, Bangkok 10220, THAILAND

[*]Corresponding author e-mail: nuntipat_phis@rtaf.mi.th

ARTICLE INFO

Article history:
Received: July 12, 2022
Revised: October 11, 2022
Accepted: October 20, 2022
Available online: November 3, 2022
DOI: 10.14456/jarst.2022.20

Keywords: fighter aircraft, radar system, data mining, neural networks, smart weapon systems

ABSTRACT

Identifying an aircraft from unknown-target information using radar is an important mission for national security to decide military strategy. The fighter aircraft is primarily designed to air combat missions, which can inflict severe damage and is an important factor in a tactical advantage. Analyzing unknown-target information via radar system requires highly experienced experts and military intelligence to identify fighter aircraft types. However, training experts to analyze data accurately can be time-consuming and costly. Therefore, the fighter aircraft classification requires modern approaches to comply with smart weapon systems for learning complex information to support the decision-making expert and solve the shortage of human resources. This paper generates the classification model of fighter aircraft based on unknown-target information using Feed-forward

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

Back-propagation Neural Networks to learn complex information. Besides, this concept solves the shortage of skilled personnel. The created model is efficient and flexible, with learning and testing data with 95.38% and 86.30% accuracy, respectively.

บทคัดย่อ

การระบุอากาศยานจากข้อมูลเป้าหมายไม่ทราบฝ่ายด้วยการใช้เรดาห์เป็นภารกิจที่สำคัญต่อความมั่นคงของประเทศเพื่อตัดสินใจเชิงกลยุทธ์ทางทหาร เนื่องจากอากาศยานขับไล่โจมตี (Fighter Aircraft) ถูกออกแบบเพื่อภารกิจในมิติการต่อสู้ทางอากาศเป็นหลัก สามารถสร้างความเสียหายที่รุนแรงและเป็นปัจจัยที่สำคัญต่อความได้เปรียบทางยุทธวิธี การวิเคราะห์ข้อมูลเป้าหมายไม่ทราบฝ่ายผ่านระบบเรดาห์ (Radar System) จำเป็นต้องใช้ผู้เชี่ยวชาญที่มีประสบการณ์สูงและข้อมูลข่าวกรองทางทหารเพื่อระบุประเภทของอากาศยานขับไล่โจมตี อย่างไรก็ตามการฝึกอบรมผู้เชี่ยวชาญให้สามารถวิเคราะห์ข้อมูลได้อย่างแม่นยำ ทำให้เสียเวลาและค่าใช้จ่ายสูง ดังนั้นการจำแนกอากาศยานขับไล่โจมตีจำเป็นต้องอาศัยวิธีการที่ทันสมัยเพื่อสอดคล้องกับระบบอาวุธฉลาด (Smart Weapon Systems) สำหรับใช้ในการเรียนรู้ข้อมูลที่มีความซับซ้อนเพื่อช่วยสนับสนุนการตัดสินใจให้กับผู้เชี่ยวชาญ อีกทั้งสามารถแก้ปัญหาการขาดแคลนทรัพยากรมนุษย์ งานวิจัยนี้สร้างแบบจำลองการจำแนกอากาศยานขับไล่โจมตีบนพื้นฐานข้อมูลเป้าหมายไม่ทราบฝ่ายโดยใช้วิธีโครงข่ายประสาทเทียมแบบป้อนไปข้างหน้าที่มีการแพร่กระจายย้อนกลับเพื่อเรียนรู้ข้อมูลที่มีความซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งยังช่วยแก้ปัญหาการขาดแคลนบุคลากรผู้เชี่ยวชาญ แบบจำลองที่ถูกสร้างให้ประสิทธิภาพและมีความยืดหยุ่นเมื่อทดสอบกับข้อมูลที่ใช้ในการเรียนรู้และข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบมีความแม่นยำถึง 95.38% และ 86.30% ตามลำดับ

คำสำคัญ: อากาศยานขับไล่โจมตี ระบบเรดาห์ เหมืองข้อมูล โครงข่ายประสาทเทียม ระบบอาวุธที่ชาญฉลาด

บทนำ

ปัจจุบันการพัฒนาอาวุธที่มีอำนาจการทำลายล้างสูงตลอดทั้งขีดความสามารถของอากาศยานที่ส่งผลต่อภัยคุกคามทางอากาศยิ่งทวีความรุนแรงเพิ่มขึ้น ด้วยกลยุทธ์ในการสกัดกั้นและทำลายอากาศยานฝ่ายตรงข้ามที่มีประสิทธิภาพจะช่วยลดหรือป้องกันความเสียหายที่อาจจะส่งผลต่อความมั่นคงของชาติ การตัดสินใจอย่างพลวัตในเชิงกลยุทธ์ทางทหารจำเป็นต้องได้รับการตรวจสอบและพิสูจน์ตัวตนของเป้าหมายไม่ทราบฝ่ายผ่านระบบเรดาห์ (Radar System) โดยมีการวิเคราะห์ข้อมูลจากเจ้าหน้าที่ผู้เชี่ยวชาญ ระบบตรวจจับจากเรดาห์มีการประมวลผลข้อมูลจากการทำงานโดยมีการส่งสัญญาณคลื่นแม่เหล็กไฟฟ้าในช่วงความถี่ที่เหมาะสมต่อการตรวจจับไปยังทิศทางที่ถูกกำหนดไว้ล่วงหน้าและรับสัญญาณสะท้อนกลับ เพื่อนำข้อมูลจากเรดาห์มาทำการแปลงให้อยู่ในคุณลักษณะที่เหมาะสม [1] เช่น ความเร็ว ความสูง ทิศทาง และพิกัด แม้ว่าภัยคุกคามทางอากาศสามารถเกิดขึ้นได้ทั้งจากอากาศยานที่มีนักบินและอากาศยานไร้คนขับ (Unmanned Aerial Vehicle: UAV) ซึ่งแต่ละประเภทส่งผลต่อการเลือกวิธีปฏิบัติการทางอากาศเพื่อตอบโต้ภัยคุกคามที่แตกต่างกัน [2] ในขณะเดียวกันอากาศยานขับไล่โจมตี (Fighter Aircraft) แต่ละรุ่นมีขีดความสามารถในการรบที่แตกต่างกัน เช่น มีพิสัยการบินระยะไกล สามารถบินได้ทะลุกำแพงเสียง สามารถปฏิบัติภารกิจได้ทั้งทิ้งระเบิดและการโจมตีทางอากาศ โดยปัจจัยเหล่านี้มีความสำคัญต่อความได้เปรียบทางยุทธวิธี จึงจำเป็นที่จะต้องมีระบบการค้นหาและพิสูจน์ฝ่ายที่มีประสิทธิภาพเพื่อตัดสินใจเลือกใช้กลยุทธ์ตอบโต้ที่เหมาะสม

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

การป้องกันภัยทางอากาศเป็นวิธีการเพื่อทำลายหรือลดประสิทธิภาพในการโจมตีของฝ่ายตรงข้ามในระหว่างที่ถูกคุกคาม โดยมีอยู่ด้วยกัน 4 ส่วนที่สำคัญ คือ การค้นหา (Detection) การพิสูจน์ฝ่าย (Identification) การสกัดกั้น (Interception) และการทำลาย (Destruction) [3] การวิเคราะห์เป้าหมายไม่ทราบฝ่าย เพื่อสนับสนุนการตัดสินใจมีการดำเนินการ 4 ขั้นตอน ได้แก่ การวิเคราะห์แบบอากาศยานขั้นต้น การตรวจสอบความถูกต้อง การนำข้อมูลเข้าระบบ และการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงสถิติ [4] แม้จะมีระบบการป้องกันภัยทางอากาศที่มีประสิทธิภาพ แต่ยังคงต้องพึ่งพาเจ้าหน้าที่วิเคราะห์ข้อมูลที่มีความเชี่ยวชาญสูง อย่างไรก็ตามในการสร้างผู้เชี่ยวชาญอาจต้องใช้เวลาในการฝึกอบรมเป็นเวลานานก่อให้เกิดความขาดแคลนเจ้าหน้าที่ในการปฏิบัติงานเฉพาะนี้ ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาการขาดแคลนเจ้าหน้าที่ตลอดทั้งการช่วยสนับสนุนการตัดสินใจ จำเป็นต้องอาศัยการทำเหมืองข้อมูล (Data Mining) ซึ่งเป็นหนึ่งในวิธีของการแก้ปัญหาเพื่อให้ได้มาซึ่งองค์ความรู้สำหรับใช้ในการสนับสนุนการตัดสินใจ [5]

จากงานวิจัยที่ผ่านมามีการศึกษาที่เกี่ยวข้องกับการทำเหมืองข้อมูลเพื่อสกัดองค์ความรู้ที่ซ่อนอยู่ภายในข้อมูลขนาดใหญ่ (Big Data) มาใช้งานด้วยการประยุกต์ใช้เทคนิคทางคณิตศาสตร์และการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) สำหรับใช้งานทางด้านการจำแนกข้อมูล (Classification) [6] ในอดีตได้มีการพัฒนาระบบสังเกตการณ์อากาศยานแบบอัตโนมัติเพื่อแยกชนิดอากาศยานและกิจกรรมจากภาพถ่าย โดยมีการแยกชนิดประกอบด้วย อากาศยานปีกหมุน อากาศยานเครื่องยนต์เดี่ยว อากาศยานเครื่องยนต์คู่ และอากาศยานไอพ่น โดยมีการพิจารณากิจกรรมประกอบด้วย Take Off Landing Touch-and-go และ Low Approach [7] ต่อมาได้มีการเสนอการสร้างแบบจำลองเพื่อจำแนก Aircraft Economic บนพื้นฐานของ Support Vector Machine (SVM) และ Feed-forward Neural Network โดยผลลัพธ์ทั้งสองขั้นตอนวิธีสามารถจำแนกอากาศยานได้อย่างแม่นยำ [8-10] จากนั้นได้มีการพัฒนาขั้นตอนวิธี Fault Detection ที่มีความคล้ายกับขั้นตอนวิธีแรนดอมฟอเรสต์ (Random Forest) เพื่อนำไปใช้ในการตรวจสอบ UAV [11] นอกจากนี้ยังได้พัฒนาระบบจำแนกอากาศยานขับไล่โจมตีแบบอัตโนมัติจากการใช้รูปภาพเพื่อจำแนกแบบอากาศยาน ประกอบด้วย P51 Mustang G1-Fokker MiG25-F และ Mirage 2000 โดยใช้วิธี Feed-forward Neural Network แบบ Three-layer Network ซึ่งสามารถจดจำรูปแบบได้ถึง 91% [12] มีการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของขั้นตอนวิธี ได้แก่ นาอีฟเบย์ (Naïve Bayes) ต้นไม้ตัดสินใจ (Decision Tree) Random Forest และ ID3 โดยใช้เครื่องมือ RapidMiner พบว่าขั้นตอนวิธี Random Forest และ ID3 ให้ความถูกต้องแม่นยำมากที่สุด [13] ได้มีการนำขั้นตอนวิธี Deep Convolutional Neural Network (DCNN) มาจำแนกประเภทของอากาศยานจากภาพถ่ายดาวเทียมแบบสำรวจระยะไกลโดยมีความแม่นยำถึง 96.8% [14] จากงานวิจัยที่ผ่านมายังไม่มีการสร้างแบบจำลองเฉพาะด้านเพื่อใช้จำแนกประเภทอากาศยานขับไล่โจมตีที่มีประสิทธิภาพและมีความซับซ้อนต่ำ แม้ว่าจะมีการศึกษาการสร้างแบบจำลองด้วยคุณลักษณะของข้อมูลที่แตกต่างตามวัตถุประสงค์ของแต่ละงานด้วยการเปรียบเทียบขั้นตอนวิธีที่เหมาะสมจากตัวชี้วัดความถูกต้อง พบว่าขั้นตอนวิธีที่มีความซับซ้อนสูงให้ความแม่นยำในการทำนายมากกว่า ในขณะเดียวกันขั้นตอนวิธีที่มีความซับซ้อนต่ำให้ประสิทธิภาพในการจำแนกที่ดีจากข้อมูลที่มีคุณลักษณะที่แตกต่างกันอย่างสิ้นเชิงแต่กลับพบว่าข้อมูลที่มีคุณลักษณะที่คล้ายคลึงกันไม่สามารถจำแนกได้อย่างมีประสิทธิภาพ

งานวิจัยนี้ได้สร้างแบบจำลองการจำแนกอากาศยานขับไล่โจมตีบนพื้นฐานข้อมูลเป้าหมายไม่ทราบฝ่ายโดยการประยุกต์ใช้วิธีโครงข่ายประสาทเทียมที่มีความสามารถในการเรียนรู้คล้ายกับพฤติกรรมของมนุษย์และสามารถเรียนรู้พฤติกรรมที่ซับซ้อน อีกทั้งยังมีความ

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

ยืดหยุ่นสูงต่อการนำไปใช้งาน การสร้างแบบจำลองด้วยวิธีการโครงข่ายประสาทเทียมแบบป้อนไปข้างหน้าที่มีการเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับ (Feed-forward Backpropagation Neural Networks) แม้อาจจะเป็นเพียงวิธีพื้นฐานแต่สามารถเรียนรู้ข้อมูลที่มีความซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพจากการเลือกปรับค่าพารามิเตอร์ภายในขั้นตอนวิธี และการแปลงข้อมูลให้เหมาะสม ทำให้สามารถสร้างแบบจำลองที่สามารถนำไปใช้งานเพื่อช่วยสนับสนุนการตัดสินใจและลดปัญหาการขาดแคลนบุคลากรผู้เชี่ยวชาญ โดยสอดคล้องกับระบบอาวุธที่ชาญฉลาด (Smart Weapon Systems) นอกจากนี้ในทางเทคนิคการสร้างแบบจำลองในงานวิจัยยังมีความซับซ้อนที่ต่ำเมื่อเทียบกับการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) ซึ่งโครงสร้างที่ถูกนำเสนอในงานวิจัยนี้ใช้เพียงหนึ่งชั้นซ่อน แต่ยังคงประสิทธิภาพที่ดีจากกระบวนการปรับค่าพารามิเตอร์ให้เหมาะสมกับข้อมูลที่ใช้ในการเรียนรู้

วิธีดำเนินการวิจัย

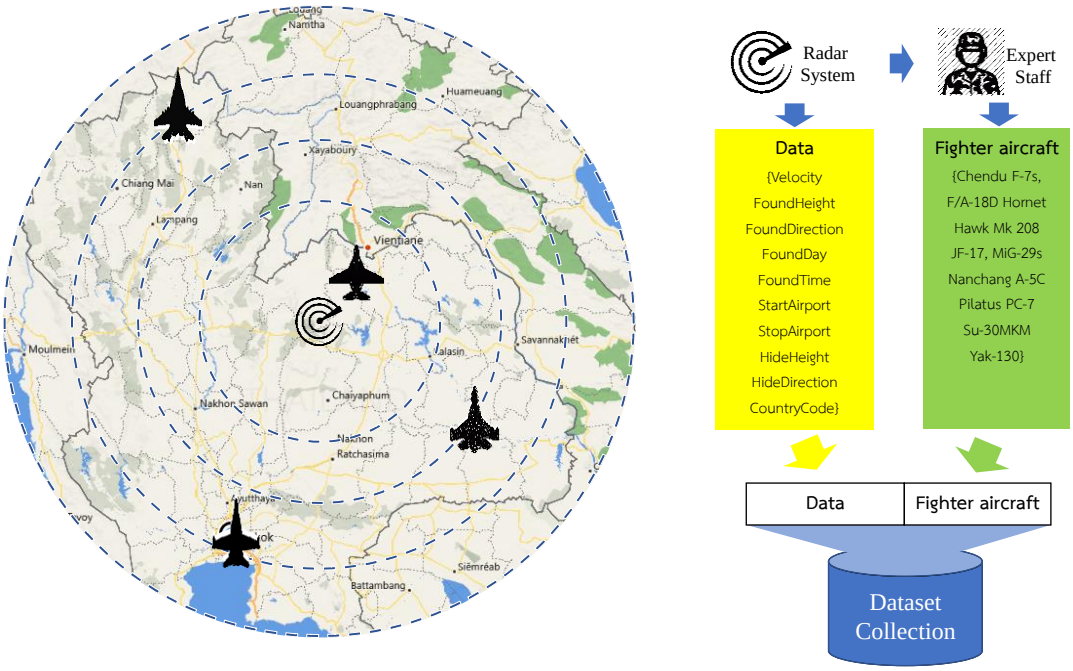
ข้อมูลที่ถูกคัดเลือกจากระบบเรดาห์

ข้อมูลจากระบบวิเคราะห์ความเคลื่อนไหวกำลังทางอากาศถูกเก็บรวบรวมไว้ในฐานข้อมูลขนาดใหญ่เพื่อใช้ในการวิเคราะห์ทางสถิติ โดยมีเจ้าหน้าที่ผู้เชี่ยวชาญวิเคราะห์ข้อมูลรูปแบบการบินของอากาศยานที่ตรวจพบจากระบบเรดาห์ด้วยค่าคุณลักษณะพื้นฐาน โดยข้อมูลค่าคุณลักษณะและผลลัพธ์จากการวิเคราะห์ของผู้เชี่ยวชาญสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 1 ซึ่งประกอบไปด้วย 11 ตัวแปร ได้แก่ ความเร็วของอากาศยาน ความสูงที่ถูกตรวจพบ ทิศทางที่ถูกตรวจพบ วันในสัปดาห์ ช่วงเวลา รหัสสนามบินที่เครื่องออกเดินทาง (Take Off) รหัสสนามบินที่เครื่องลงสู่พื้นดิน (Landing) ความสูงที่หายจากระบบเรดาห์ ทิศทางที่หายจากระบบเรดาห์ รหัสสัญชาติ และแบบอากาศยานขับไล่โจมตี

ตารางที่ 1 ข้อมูลที่ถูกคัดเลือกจากระบบเรดาห์

ตัวแปร	ความหมาย	ช่วงของข้อมูล
Velocity	ความเร็วของอากาศยาน	[2-3000] กิโลเมตรต่อชั่วโมง
FoundHeight	ความสูงที่ถูกตรวจพบ	[220-38000] ฟุต
FoundDirection	ทิศทางที่ถูกตรวจพบ	[N, NW, W, SW, S, SE, E, NE]
FoundDay	วันในสัปดาห์	[Mon, Tue, Wed, Thu, Fri, Sat, Sun]
FoundTime	ช่วงเวลา	[0-23]
StartAirport	รหัสสนามบินที่เครื่อง Take Off	[1-21]
StopAirport	รหัสสนามบินที่เครื่อง Landing	[1-21]
HideHeight	ความสูงที่หายจากระบบเรดาห์	[220-38000] ฟุต
HideDirection	ทิศทางที่หายจากระบบเรดาห์	[N, NW, W, SW, S, SE, E, NE]
CountryCode	รหัสสัญชาติ	[1, 2, 3]
Fighter Aircraft Model	แบบอากาศยานขับไล่โจมตี	[Chendu F-7s, F/A-18D Hornet, Hawk Mk 208, JF-17, MiG-29s, Nanchang A-5C, Pilatus PC-7, Su-30MKM, Yak-130, Unknown]

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)



รูปที่ 1 ข้อมูลที่ถูกเก็บรวบรวมจากระบบเรดาห์และผู้เชี่ยวชาญ

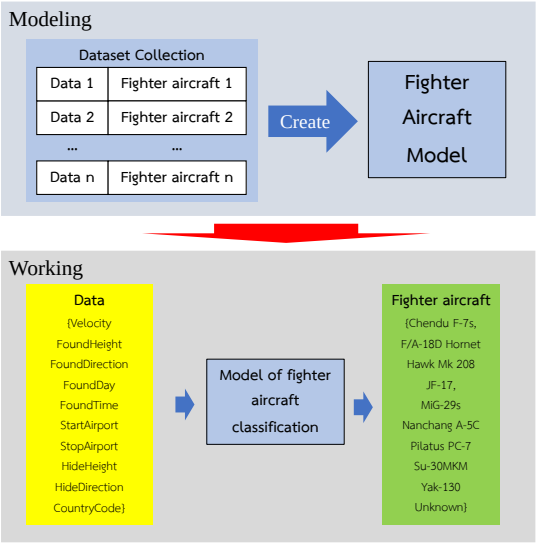
การได้มาซึ่งข้อมูลจะถูกดำเนินการผ่านกระบวนการวิเคราะห์เป้าหมายไม่ทราบฝ่ายที่ตรวจพบจากระบบเรดาห์ทางทหารที่เป็นระบบการเฝ้าตรวจสอบน่านฟ้าตลอดเวลา เมื่อมีการตรวจพบเป้าหมายไม่ทราบฝ่ายจากระบบเรดาห์ จะได้มาซึ่งข้อมูลเพื่อนำไปวิเคราะห์และระบุแบบอากาศยานในขั้นต้นจากเจ้าหน้าที่ผู้เชี่ยวชาญวิเคราะห์แบบอากาศยานดังรูปที่ 1 ด้วยข้อมูลที่แสดงบนจอภาพของระบบบัญชาการและควบคุมทางอากาศ (Air Command and Control System: ACCS) จากนั้นจะถูกตรวจสอบและวิเคราะห์ข้อมูลเพิ่มเติมเพื่อให้ข้อมูลมีความถูกต้องมากยิ่งขึ้นและทำการบันทึกข้อมูลดังกล่าว อย่างไรก็ตามข้อมูลที่เป็นส่วนสำคัญถูกคัดเลือกมาใช้กับงานวิจัยนี้ประกอบไปด้วย {Velocity, FoundHeight, FoundDirection, FoundDay , FoundTime, StartAirport, StopAirport, HideHeight, HideDirection, CountryCode} และแบบอากาศยานจะถูกพิจารณาเฉพาะอากาศยานขับไล่โจมตี โดยมีการพิจารณาทั้งหมด 10 แบบ ได้แก่ {Chendu F-7s, F/A-18D Hornet, Hawk Mk 208, JF-17, MiG-29s, Nanchang A-5C, Pilatus PC-7, Su-30MKM, Yak-130, Unknown} ในงานวิจัยนี้จะพิจารณาค่าคุณลักษณะโดยนำค่าคุณลักษณะแต่ละตัวแปรมาสร้างแบบจำลองและตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง เมื่อพบว่าค่าคุณลักษณะใดที่ให้ความถูกต้องของแบบจำลองมากกว่า 20% จะถูกนำไปพิจารณาเป็นค่าคุณลักษณะที่สำคัญ

อย่างไรก็ตามผลการวิเคราะห์อากาศยานจากผู้เชี่ยวชาญเป็นเพียงการทำนายจากข้อมูลทางคุณลักษณะที่ได้รับจากระบบเรดาห์ซึ่งเป็นข้อมูลทางเดียว และอาจจะมีความเป็นเท็จสูง จึงจำเป็นต้องมีการดำเนินการเพื่อตรวจสอบความถูกต้องโดยใช้ข้อมูลร่วมกับด้านการข่าวจากแหล่งอื่นเพื่อพิจารณา เมื่อผ่านการตรวจสอบความถูกต้องเรียบร้อย เจ้าหน้าที่จะทำการบันทึกข้อมูลเหล่านี้ไว้เป็นชุดข้อมูล เพื่อใช้ในการสนับสนุนการตัดสินใจจากการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

แม้ว่าจะมีระบบการวิเคราะห์ความเคลื่อนไหวทางอากาศที่มีประสิทธิภาพ แต่ในการดำเนินการเหล่านี้จำเป็นต้องพึ่งพาผู้เชี่ยวชาญในการวิเคราะห์แบบอากาศ

Journal of Applied Research on Science and Technology (JARST), Vol 21, Issue 2, 2022
ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

ยาน เพื่อเป็นข้อมูลในการตัดสินใจในเชิงกลยุทธ์ทางทหาร ผู้เชี่ยวชาญเหล่านี้ล้วนได้รับการฝึกอบรมและมีประสบการณ์ในการทำงานจึงสามารถที่จะวิเคราะห์ได้อย่างแม่นยำ ในขณะเดียวกันการสร้างผู้เชี่ยวชาญเฉพาะด้านจำเป็นต้องใช้เวลานานในการเรียนรู้ และมีแนวโน้มที่บุคลากรดังกล่าวขาดแคลน ดังนั้นการสร้างแบบจำลองเพื่อใช้ในการจำแนกอากาศยานขับไล่โจมตี จึงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อแก้ปัญหาเหล่านี้ได้ในเบื้องต้น ฐานข้อมูลขนาดใหญ่ที่ถูกเก็บรวบรวมค่าคุณลักษณะที่สำคัญจากระบบเรดาห์และผลการวิเคราะห์แบบอากาศยานจะถูกนำมาใช้ในการสร้างแบบจำลองเพื่อนำไปใช้ในการจำแนกอากาศยานขับไล่โจมตีดังที่แสดงในรูปที่ 2 ระหว่างการดำเนินการตรวจสอบอากาศยานไม่ทราบฝ่ายจะใช้เพียงข้อมูลคุณลักษณะที่ถูกคัดเลือกส่งให้กับแบบจำลองเพื่อจำแนกอากาศยานขับไล่โจมตี สำหรับเป็นข้อมูลในการสนับสนุนการตัดสินใจจากแบบจำลองที่ใช้ค่าคุณลักษณะที่สามารถทดแทนผู้เชี่ยวชาญเหล่านั้นได้

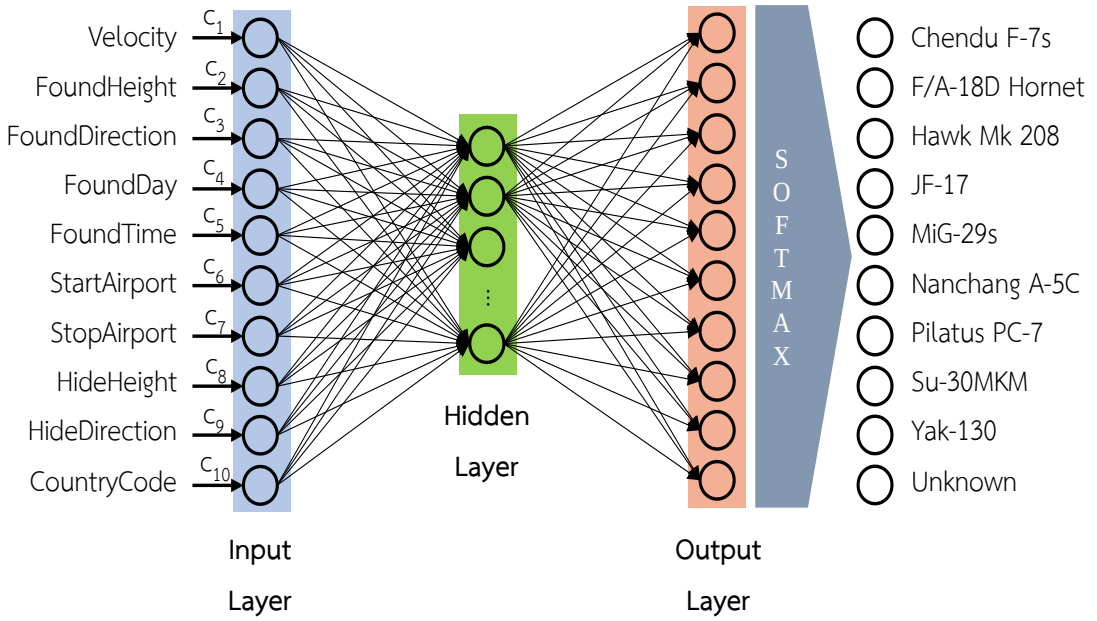


รูปที่ 2 การสร้างแบบจำลองจากฐานข้อมูลขนาดใหญ่เพื่อนำไปใช้งานสำหรับการสนับสนุนการตัดสินใจ

โครงข่ายประสาทเทียมที่ใช้ในงานวิจัย

วิธีโครงข่ายประสาทเทียมสามารถเรียนรู้พฤติกรรมทางกายภาพของระบบที่มีความซับซ้อนระหว่างข้อมูลที่เป็นอินพุตและข้อมูลเป้าหมายโดยจำเป็นต้องอาศัยชุดข้อมูลเพื่อใช้ในกระบวนการเรียนรู้ของโครงข่ายประสาทเทียมเป็นจำนวนมาก ในปัจจุบันโครงข่ายประสาทเทียมได้ถูกพัฒนาให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น ไม่ว่าจะเป็นทางด้านการเรียนรู้เชิงลึกที่สามารถเรียนรู้จากข้อมูลที่มีความซับซ้อนที่สูงมาก เช่น ข้อมูลรูปภาพ ข้อมูลวิดีโอ และข้อมูลมีลำดับ เป็นต้น วิวัฒนาการทางด้านวิทยาการทางคอมพิวเตอร์ด้วยการใช้ประโยชน์จากการประมวลผลของการ์ดจอสามารถปลดล็อคข้อจำกัดในด้านของเวลาในการประมวลผลได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามแม้ว่าวิธีการดังกล่าวได้ถูกพัฒนาให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น แต่ก็ตามมาด้วยความซับซ้อนของขั้นตอนวิธีที่ต้องใช้ทรัพยากรในการประมวลผลสูงและอาจมีข้อจำกัดทางด้านการประมวลผลเมื่อนำไปใช้งาน ในปัจจุบันการมุ่งเน้นไปที่การเรียนรู้ของเครื่องด้วยขั้นตอนวิธีที่ซับซ้อนต่ำแต่ยังคงประสิทธิภาพในการเรียนรู้ข้อมูลที่มีความซับซ้อนสูง จึงได้รับความสนใจอย่างกว้างขวาง โดยที่โครงข่ายประสาทเทียมแบบป้อนไปข้างหน้าที่มีการเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับ (Feed-forward Backpropagation Neural Networks) เป็นวิธีพื้นฐานในการสร้างแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพด้วยการใช้กระบวนการ Back Propagation เพื่อปรับปรุงค่าน้ำหนัก (Weight) และค่าขีดแบ่ง (Bias) ภายในโครงข่ายประสาทเทียม เพื่อให้มีความเหมาะสมและได้มาซึ่งแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามการกำหนดค่าตัวแปรภายในโครงข่ายประสาทเทียม เช่น จำนวนชั้นซ่อน จำนวนโหนดในชั้นซ่อน ฟังก์ชันในการตัดสินใจ การปรับข้อมูลให้เหมาะสม การล้างข้อมูล และการกำหนดค่าอัตราการเรียนรู้ ล้วนส่งผลต่อประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียม

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)



รูปที่ 3 โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียม

ตารางที่ 2 การสกัดฟีเจอร์ข้อมูลที่ถูกคัดเลือกจากระบบเรดาห์ในส่วนที่เป็นข้อความให้อยู่ในรูปแบบตัวเลข

ข้อมูล	ข้อมูลที่ถูกสกัด
[N, NW, W, SW, S, SE, E, NE]	[1,2,3,4,5,6,7,8]
[Mon, Tue, Wed, Thu, Fri, Sat, Sun]	[1,2,3,4,5,6,7]

ตารางที่ 3 : การสกัดฟีเจอร์ข้อมูลอากาศยานขับไล่โจมตีเพื่อเป็นค่าเป้าหมายของ Neurons ในชั้นเอาต์พุต

แบบอากาศยานขับไล่โจมตี	เป้าหมายของ Neurons ในชั้นเอาต์พุตในแต่ละโหนด									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Chendu F-7s	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F/A-18D Hornet	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0
Hawk Mk 208	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
JF-17	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
MiG-29s	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
Nanchang A-5C	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0
Pilatus PC-7	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0
Su-30MKM	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
Yak-130	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
Unknown	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1

แม้ว่าปัจจุบันการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) ง่ายต่อการออกแบบและการใช้งาน แต่อย่างไรก็ตามคุณลักษณะของชุดข้อมูลที่ถูกนำมาใช้ในการเรียนรู้เพื่อสร้างแบบจำลองในงานวิจัยนี้สามารถกำหนดจำนวน

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

ของชั้นซ่อนของโครงข่ายประสาทเทียมเพียง 1 ชั้นเท่านั้น เป็นผลให้ต้องการทรัพยากรในการประมวลผลข้อมูลที่ต่ำ โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 3 ซึ่งภายในประกอบไปด้วย 3 ชั้น ได้แก่ ชั้นอินพุต ซึ่งเป็นชั้นในการนำเข้าข้อมูลจากระบบเรดาห์ทั้ง 10 ตัว แปรที่ถูกปรับค่าให้เหมาะสมด้วยการนำไปคูณกับค่า Coefficient สำหรับชั้นซ่อนจะอยู่ระหว่างชั้นอินพุตและเอาต์พุตโดยชั้นนี้สามารถกำหนดให้มีมากกว่า 1 ชั้นซ่อน ซึ่งขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของข้อมูลที่ใช้ในการเรียนรู้ ชั้นเอาต์พุตเป็นชั้นที่นำข้อมูลที่ถูกประมวลผลมาจากชั้นก่อนหน้าไปใช้เพื่อพิจารณาความเป็นไปได้ของข้อมูลในการจำแนกคุณลักษณะของแบบอากาศยานด้วยฟังก์ชัน SoftMax เพื่อแปลงค่าของแต่ละโหนดในชั้นเอาต์พุตออกมาเป็นค่าความน่าจะเป็นให้มีผลรวมเท่ากับ 1 โดยจะพิจารณาเลือกคำตอบจากค่าความน่าจะเป็นที่มากที่สุด

การสกัดข้อมูลและ Pre-processing

การเรียนรู้ของเครื่องจะได้มาซึ่งค่า Coefficients ของ Weight และ Bias เพื่อนำใช้ในการจำแนกอากาศยานขับไล่โจมตี โดยที่ข้อมูลนำเข้าโครงข่ายประสาทเทียมจำเป็นที่จะต้องได้รับการสกัดฟีเจอร์ให้อยู่ในรูปของตัวเลข ดังนั้นชุดข้อมูลที่ถูกรวมรวบจะถูกแบ่งออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ข้อมูลอินพุตและข้อมูลเป้าหมาย โดยที่ข้อมูลอินพุต คือ ข้อมูลที่ถูกคัดเลือกจากระบบเรดาห์ดังที่แสดงในตารางที่ 1 ในส่วนข้อมูลที่เป็นข้อความจะถูกสกัดเพื่อให้เป็นรูปแบบตัวเลขได้ดังที่แสดงในตารางที่ 2 นอกจากนี้ข้อมูลเป้าหมายของแบบอากาศยานขับไล่โจมตีแต่ละแบบจะถูกแปลงให้อยู่ในรูปของตัวเลข โดยที่โครงสร้างของโครงข่ายประสาทเทียมในงานวิจัยนี้ ได้กำหนดให้มีค่าเอาต์พุตตามจำนวนกรอบของแบบอากาศยานขับไล่โจมตีที่ถูกนำมาพิจารณาทั้งหมด 9 แบบและแบบที่ 10 เป็นไม่ทราบแบบ (Unknown) ซึ่งได้ทำการคัดเลือกชุดข้อมูลที่มีการวิเคราะห์อากาศยานขับไล่โจมตีในอัตราส่วนที่ใกล้เคียงกันโดยมีชุดข้อมูลทั้งหมด 1,000 ชุด โดยการแบ่งข้อมูล 80 เปอร์เซ็นต์เป็นข้อมูลที่ใช้ในการเรียนรู้และที่เหลืออีก 20 เปอร์เซ็นต์เพื่อใช้ในกระบวนการทดสอบ ทั้งนี้การกำหนดข้อมูลการเรียนรู้และทดสอบเป็นอัตราส่วนที่เหมาะสมบนพื้นฐานด้วย 5-fold Cross-validation [15] ในการสกัดข้อมูลที่เป็นเป้าหมายจะถูกกำหนดไว้ดังที่แสดงในตารางที่ 3 เพื่อให้ง่ายต่อการจำแนกค่าคุณลักษณะของแต่ละโหนดจะถูกกำหนดให้อยู่ในช่วง 0 ถึง 1 ตัวอย่างเช่น ผลลัพธ์ของโหนดที่ 1 ถึง 10 มีค่าเท่ากับ {0,0,0,0,1,0,0,0,0,0} สามารถตีความได้ว่าเป็นอากาศยานขับไล่โจมตีแบบ MiG-29s

กระบวน Pre-processing เป็นกระบวนการแปลงข้อมูลให้เหมาะสมก่อนนำข้อมูลเข้าสู่โครงข่ายประสาทเทียม ในการสกัดฟีเจอร์ของค่าเป้าหมายในโครงข่ายประสาทเทียมมีค่าอยู่ระหว่างช่วง 0 ถึง 1 ดังนั้น การนำเข้าข้อมูลในชั้นอินพุตควรที่จะมีการแปลงค่าข้อมูลให้อยู่ในช่วง 0 ถึง 1 เช่นเดียวกับชั้นเอาต์พุต เพื่อส่งต่อข้อมูลระหว่างชั้นอินพุตไปยังชั้นซ่อน และชั้นซ่อนไปยังชั้นเอาต์พุต การแปลงค่าเช่นนี้จะทำให้ช่วงข้อมูลมีความสม่ำเสมอ ซึ่งจะส่งผลต่อประสิทธิภาพในการเรียนรู้ การแปลงข้อมูลให้เหมาะสมกับโครงข่ายประสาทเทียมชั้นอินพุตจะถูกดำเนินการผ่านวิธีการทำ Zero Span [16] ดังที่แสดงในสมการที่ (1)

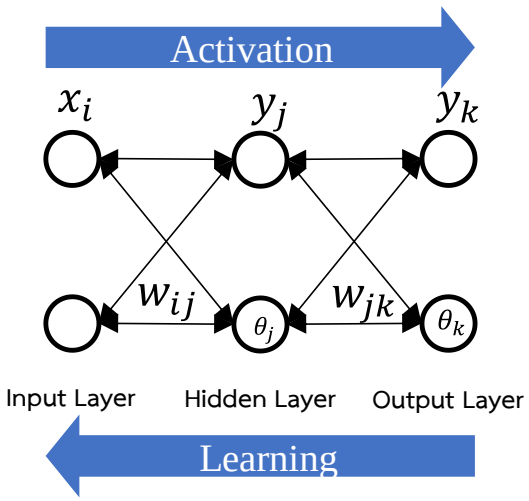
$$x = \frac{1}{X_{max} - X_{min}} X \qquad (1)$$

การสร้างแบบจำลอง

การสร้างแบบจำลองด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียมแบบป้อนไปข้างหน้าที่มีการเรียนรู้แบบแพร่ย้อนกลับจะดำเนินการด้วยการป้อนข้อมูลเพื่อให้กระบวนการดำเนินไปข้างหน้าโดยการ Activation ซึ่งมีการส่งข้อมูลและประมวลผลข้อมูลจากชั้นอินพุตไปยังชั้นซ่อนและจากชั้นซ่อนไปยังเข้าเอาต์พุต เพื่อหาค่า Error ระหว่างเป้าหมายที่ใช้ในกระบวนการเรียนรู้กับค่าเอาต์พุต แล้วทำการปรับค่า Coefficients ของ Weight และ Bias ย้อนกลับจากชั้นเอาต์พุตไปชั้นซ่อน และจากชั้นซ่อนไปชั้นอินพุต ดังที่แสดงในรูปที่ 4 ในงานวิจัยนี้ได้ประยุกต์ใช้วิธี

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

โครงข่ายประสาทเทียมที่ถูกสร้างขึ้นด้วยโปรแกรม MATLAB ที่สามารถปรับจูนการตั้งค่าภายในโครงข่ายประสาทเทียม เช่น การกำหนดอัตราการเรียนรู้เทียบกับการสุ่มค่าเริ่มต้นของค่าถ่วงน้ำหนักให้มีประสิทธิภาพ การเลือกจำนวนชั้นซ่อนในโครงข่ายที่เหมาะสม เป็นต้น [17]



รูปที่ 4 การดำเนินการของโครงข่ายประสาทเทียม

โครงข่ายประสาทเทียมในงานวิจัยนี้กำหนดให้มีชั้นซ่อนเพียง 1 ชั้น เพื่อให้มีความซับซ้อนต่ำ ในขณะที่การรับค่าของชั้นอินพุตในแต่ละโหนดจะถูกแปลงข้อมูลในอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 ดังนั้น เพื่อส่งต่อข้อมูลระหว่างชั้นอย่างสม่ำเสมอ งานวิจัยนี้มุ่งเน้นไปที่การเลือกฟังก์ชันการตัดสินใจโดยการใช้ Sigmoid Function ซึ่งมีช่วงของเรนจ์ระหว่าง 0 ถึง 1 และช่วงของโดเมนตั้งแต่ลบอินฟินิตี้ถึงอินฟินิตี้ โดยฟังก์ชันตัดสินใจสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (2)

$$S(x) = \frac{1}{1+e^{-x}} \quad (2)$$

ขั้นตอนในการสร้างแบบจำลองด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียมมีดังนี้

ขั้นตอนที่ 1: การกำหนดค่าเริ่มต้นของโครงข่ายประสาทเทียม

เป็นการสุ่มค่า Coefficients ของ Weight และ Bias โดยเริ่มต้นจะขึ้นอยู่กับค่าอัตราการเรียนรู้และอนุพันธ์ของฟังก์ชันการตัดสินใจซึ่งสามารถคำนวณได้จากอนุพันธ์ของ Sigmoid Function เท่ากับอัตราการเรียนรู้ Leaning Rate ($\propto$) ดังที่แสดงได้จากสมการที่ (3)

$$\propto = \frac{e^x}{(1+e^x)^2} \quad (3)$$

เมื่อกำหนดให้อัตราการเรียนรู้เท่ากับ 0.08 ผลลัพธ์ของค่าโดเมนที่ได้จากอนุพันธ์ของ Sigmoid Function ที่ถูกคำนวณจะมีค่าโดยประมาณ -2.4 และ 2.4 ดังนั้นการสุ่มตัวเลข Coefficients ของ Weight และ Bias จำเป็นที่จะต้องมีการกระจายตัวอยู่ระหว่าง -2.4 ถึง 2.4 ต่อจำนวนนิวรอนในชั้นก่อนหน้า (m) เพื่อเป็นการกระจายค่าของข้อมูลให้เหมาะสมกับโครงข่ายประสาทเทียมโดยสามารถแสดงได้ดังสมการที่ (4)

$$-\frac{2.4}{m} \leq w_{ij}, w_{jk}, \theta_j, \theta_k \leq \frac{2.4}{m} \quad (4)$$

ขั้นตอนที่ 2: Activation

ข้อมูลจะถูกใช้ในการสร้างแบบจำลองซึ่งถูกนำมาป้อนเข้าโครงข่ายประสาทเทียมโดยการ Activation จากชั้นอินพุตไปยังชั้นซ่อน และจากชั้นซ่อนไปยังเอาต์พุต โดยการคำนวณ Actual เอาต์พุตของนิวรอนในชั้นซ่อนและเอาต์พุตของนิวรอนในชั้นเอาต์พุต

ขั้นตอนที่ 3: Weight and Bias Learning

ผลลัพธ์เอาต์พุตของนิวรอนในชั้นเอาต์พุตจะถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าเป้าหมายเพื่อหาค่าความผิดพลาดและทำการปรับค่า Coefficients ของ Weight และ Bias

ขั้นตอนที่ 4: Iteration

การนำข้อมูลในลำดับถัดไปป้อนเข้าโครงข่ายประสาทเทียมในขั้นตอนที่ 2 โดยการใช้ค่า Coefficients ของ Weight และ Bias ใหม่เพื่อปรับค่าซ้ำจนครบตามจำนวนชุดข้อมูลที่ใช้ในกระบวนการเรียนรู้ทั้งหมด 800 ชุด ซึ่งจะถูกนับเป็น 1 Epoch และคำนวณค่าความผิดพลาดที่สามารถยอมรับได้ดังสมการที่ (5)

$$MSE = \frac{1}{800}\sum_{p=1}^{800}\sum_{k=1}^{10} e_k(p)^2 \quad (5)$$

Journal of Applied Research on Science and Technology (JARST), Vol 21, Issue 2, 2022
ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

ในการเรียนรู้แต่ละ Epoch ค่า Mean of Square Error (MSE) จะเริ่มลดลง ซึ่งจะต้องทำการกลับไปใช้ข้อมูลในชุดแรกเริ่มตั้งแต่ขั้นตอนที่ 2 อีกครั้ง จนกว่าค่า MSE จะเป็นค่าที่ยอมรับได้หรือจนกว่าจะถึงจำนวนรอบ Epoch ที่กำหนดเพื่อให้ได้ Weight และ Bias ที่มีความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน

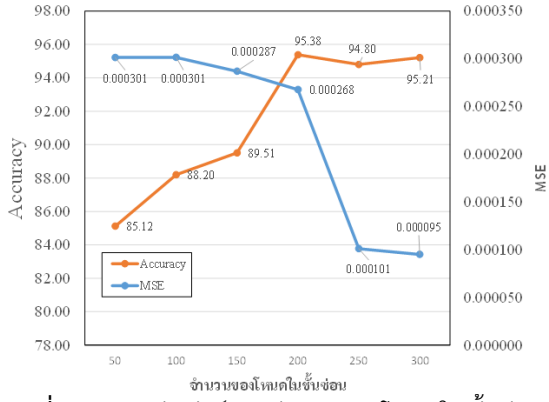
ผลการศึกษาและอภิปรายผล

การสร้างแบบจำลองเพื่อจำแนกรุ่นของอากาศยานขับไล่โจมตีด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียมสำหรับสนับสนุนการตัดสินใจให้กับผู้เชี่ยวชาญ และการอภิปรายผลการทดลองเพื่อแสดงความสัมพันธ์ท่ามกลางข้อมูลจากผลการศึกษา จะถูกนำเสนอพร้อมทั้งการให้รายละเอียดดังต่อไปนี้

ผลลัพธ์จากกระบวนการเรียนรู้

ชุดข้อมูลที่ถูกเก็บรวบรวมจากระบบเรดาห์และข้อมูลที่ถูกวิเคราะห์จากผู้เชี่ยวชาญจะถูกนำมาใช้เพื่อสร้างแบบจำลองการจำแนกอากาศยานขับไล่โจมตีบนพื้นฐานข้อมูลเป้าหมายไม่ทราบฝ่าย สำหรับค่าคุณลักษณะที่สำคัญได้ถูกคัดเลือกจาก 10 ตัวแปรตามที่ได้กล่าวไว้ก่อนหน้านี้ นอกจากนี้ยังมีการสกัดฟีเจอร์บางตัวแปรที่เป็นข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบของตัวเลขและปรับข้อมูลให้เหมาะสมด้วยการทำ Zero-span ก่อนนำเข้าโครงข่ายประสาทเทียม

ปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของโครงข่ายประสาทเทียมถูกพิจารณาเพื่อตั้งค่าให้เหมาะสมต่อรูปแบบของข้อมูลที่ใช้ในการสร้างแบบจำลอง ในงานวิจัยนี้กำหนดให้จำนวนโหนดในชั้นอินพุตเท่ากับ 10 โหนด ตามจำนวนของตัวแปรต้นและจำนวนโหนดในชั้นเอาต์พุตเท่ากับ 10 โหนด โดยมีการพิจารณาจำนวนชั้นซ่อนเพียง 1 ชั้นเท่านั้น ทั้งนี้เพื่อให้มีความความซับซ้อนของโครงข่ายประสาทเทียมน้อยที่สุดแต่ยังคงประสิทธิภาพที่ดี การกำหนดจำนวนโหนดในชั้นซ่อนจำเป็นที่จะต้องได้รับการพิจารณาที่เหมาะสมด้วยวิธี Trial and Error Method [18] แบบจำลองที่ถูกสร้างขึ้นนี้เป็นการนำโครงข่ายประสาทเทียมมาใช้ในการจำแนก (Classification) ดังนั้น สิ่งสำคัญที่สุดในการวัดประสิทธิภาพของแบบจำลอง คือ ค่าความถูกต้อง (Accuracy) ซึ่งคิดเป็นเปอร์เซ็นต์และ MSE เพื่อวัดค่าความผิดพลาดของข้อมูลในระหว่างการเรียนรู้ จำนวนโหนดในชั้นซ่อนจะถูกเปรียบเทียบกับ MSE และ Accuracy เพื่อค้นหาค่าที่เหมาะสมของจำนวนโหนดที่ต่ำที่สุดแต่ยังคงประสิทธิภาพของความถูกต้องให้ Accuracy มากกว่า 90% ซึ่งเป็นค่าที่ถูกกำหนดจากงานวิจัยนี้ จากรูปที่ 5 แสดงให้เห็นถึงค่า MSE และ Accuracy จากการทดลองด้วยการใช้ข้อมูลของชุดฝึกสอนโดยมีการกำหนดให้การเรียนรู้ 10,000 Epoch แล้วทำการบันทึกข้อมูลของค่า Coefficients ของ Weight และ Bias เพื่อใช้ในการทดสอบ ผลลัพธ์แสดงให้เห็นว่าเมื่อมีการกำหนดจำนวนโหนดในชั้นซ่อนเท่ากับ 50 โหนด จะมีค่า MSE เท่ากับ 0.000301 จากรูปที่ 5 สังเกตได้ว่าค่า MSE จะลดลงตามจำนวนของโหนดในชั้นซ่อนที่เพิ่มขึ้น ในขณะที่ Accuracy จะมีค่ามากกว่า 90% ด้วยการกำหนดโหนดในชั้นซ่อนตั้งแต่ 200 โหนด เป็นต้นไป



รูปที่ 5 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโหนดในชั้นซ่อนเทียบกับ MSE และ Accuracy

ในขณะเดียวกันเมื่อมีการเพิ่มจำนวนโหนดในชั้นซ่อนเพิ่มขึ้นค่า Accuracy จะเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงเพียงเล็กน้อย แต่กระนั้นการเพิ่มจำนวนโหนดในชั้นซ่อนมากขึ้นจะส่งผลต่อจำนวนของ Weight และ Bias ที่เพิ่ม

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

มากยิ่งขึ้นด้วยเช่นกันซึ่งความซับซ้อนของแบบจำลองจะเพิ่มขึ้นตามไปด้วยตามที่ได้แสดงในตารางที่ 4 โดยมีจำนวนของ Weight และ Bias เพียง 4,210 ตัว เมื่อกำหนดให้โหนดในชั้นซ่อนเท่ากับ 200 โหนด

ตารางที่ 4 ความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนโหนดในชั้นซ่อนและจำนวนของ Weight และ Bias

จำนวนของโหนดในชั้นซ่อน	จำนวนของ Weight และ Bias
50	1,060
100	2,110
150	3,160
200	4,210
250	5,260
300	6,310

ในการกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมและผลลัพธ์ที่ได้จากการสร้างแบบจำลองสามารถแสดงได้ดังข้อมูลในตารางที่ 5 เมื่อจำนวนโหนดในชั้นซ่อนเท่ากับ 200 โหนด โดยมี MSE เพียง 0.000268 ที่ 10,000 Epoch ซึ่งมีประสิทธิภาพในการทำนายจากข้อมูลที่ใช้เรียนรู้ (Training Accuracy) ถึง 95.38% และข้อมูลที่ใช้ในการทดสอบ (Testing Accuracy) ถึง 86.30% ตามลำดับ ในขณะที่ความถูกต้องของแบบจำลอง (Accuracy) เท่ากับ 93.50% ดังที่แสดงได้ตามตารางที่ 6 จากการคำนวณ Confusion Matrix ซึ่งในแต่ละแบบอากาศยานขับไล่โจมตีที่ถูกคาดการณ์ในแต่ละคลาส (Predicted Class) มีความแม่นยำต่ำสุดเท่ากับ 80% ในแบบอากาศยาน JF-17 และมีความแม่นยำสูงที่สุดเท่ากับ 100% ในแบบอากาศยาน Nanchang A-5C

ตารางที่ 5 ข้อมูลของแบบจำลองการที่ถูกสร้างด้วยวิธีโครงข่ายประสาทเทียม

จำนวนของโหนดในชั้นซ่อน	จำนวนของ Weight และ Bias
Input Node	10
Hidden Node	200
Hidden Layer	1
Output Node	10
MSE	0.000268
Epoch	10000
Accuracy	93.50%
Training Accuracy	95.38%
Testing Accuracy	86.30%

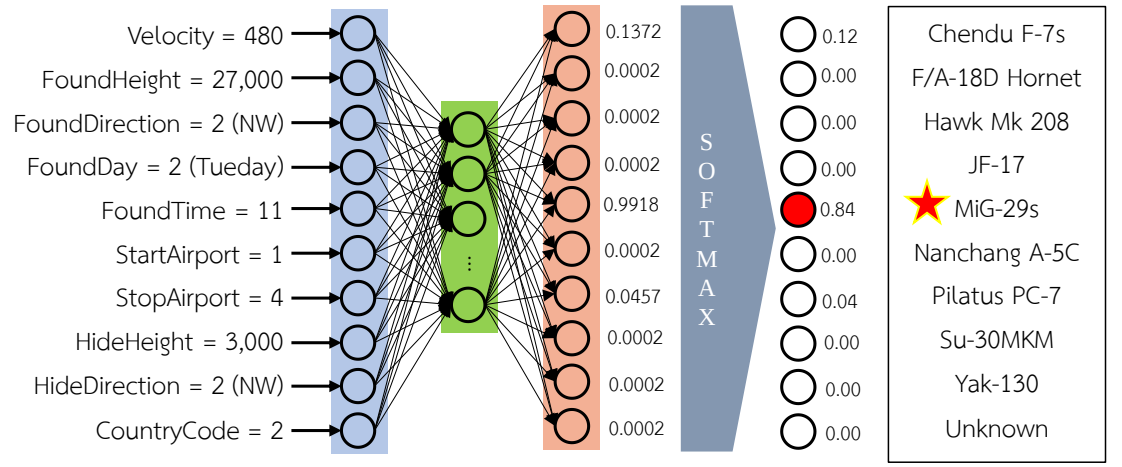
ตารางที่ 6 Confusion Matrix ของแบบจำลองการจำแนกอากาศยานขับไล่โจมตี

	Chendu F-7s	F/A-18D Hornet	Hawk Mk 208	JF-17	MiG-29s	Nanchang A-5C	Pilatus PC-7	Su-30MKM	Yak-130	Unknown	Predicted Class (%)
Chendu F-7s	125	0	0	0	4	4	4	0	0	0	91.2
F/A-18D Hornet	0	118	2	0	3	0	0	0	0	0	95.9
Hawk Mk 208	0	3	121	0	0	0	3	5	0	0	91.7
JF-17	0	0	0	4	0	0	1	0	0	0	80.0
MiG-29s	2	0	0	3	126	3	0	0	0	0	94.0
Nanchang A-5C	0	0	0	0	0	67	0	0	0	0	100.0
Pilatus PC-7	7	0	0	0	5	0	124	0	0	0	91.2

Journal of Applied Research on Science and Technology (JARST), Vol 21, Issue 2, 2022
ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

	Chendu F-7s	F/A-18D Hornet	Hawk Mk 208	JF-17	MiG-29s	Nanchang A-5C	Pilatus PC-7	Su-30MKM	Yak-130	Unknown	Predicted Class (%)
Su-30MKM	0	5	7	0	0	0	0	126	0	0	91.3
Yak-130	0	0	0	4	0	0	0	0	124	0	96.9
Unknown	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0.0
Actual Class (%)	93.3	93.7	93.1	36.4	91.3	90.5	93.9	96.2	100.0	0.0	93.5

จากข้อมูลที่ใช้ในการเรียนรู้และประสิทธิภาพโดยรวมด้วยวิธีการ 5-fold Cross-validation ซึ่งเป็นการแบ่งข้อมูลออกเป็น 5 กลุ่มโดยมีการสลับการใช้ชุดทดสอบที่แตกต่างกัน 5 ชุดซึ่งให้ความถูกต้องสูงถึง 93.5% และเมื่อนำไปใช้กับข้อมูลที่ไม่ได้ผ่านการเรียนรู้แบบจำลองมีการจำแนกอากาศยานขับไล่โจมตีได้ถูกต้องถึง 86.3%



รูปที่ 6 ตัวอย่างการจำแนกอากาศยานขับไล่โจมตีบนพื้นฐานข้อมูลเป้าหมายไม่ทราบฝ่าย

การนำไปใช้งาน

ผลลัพธ์ที่ได้จากกระบวนการสร้างแบบจำลองถูกนำไปใช้งานเมื่อมีข้อมูลค่าคุณลักษณะของเป้าหมายไม่ทราบฝ่ายที่ได้รับจากระบบเรดาห์ 10 ตัวแปร จะถูกแปลงเป็นข้อมูลเชิงตัวเลขแล้วป้อนเข้าแบบจำลองเพื่อคำนวณทางคณิตศาสตร์จากการป้อนข้อมูลเข้าไปในชั้นอินพุตและถูกส่งต่อไปยังชั้นซ่อน และจากชั้นซ่อนถูกส่งต่อมายังชั้นเอาต์พุตเพื่อคำนวณค่าตัวเลขของแต่ละโหนด จากนั้นตัวเลขที่ถูกคำนวณออกมาในแต่ละโหนดจะถูกป้อนเข้า SoftMax Function ที่ถูกวางไว้ที่ชั้นสุดท้ายของโครงข่ายประสาทเทียมเพื่อคำนวณค่าความน่าจะเป็นของแต่ละโหนดในชั้นเอาต์พุตให้มีผลรวมเท่ากับ 1 โดยเลือกคำตอบของอากาศยานขับไล่โจมตีจากโหนดที่มีค่าความน่าจะเป็นมากที่สุด เมื่อนำแบบจำลองการจำแนกอากาศยานขับไล่โจมตีไปใช้งานโดยจะต้องป้อนข้อมูลตัวแปรให้ครบทั้ง 10 ตัวแปร แบบจำลองจะทำการจำแนกข้อมูลเพื่อสนับสนุนการตัดสินใจโดยข้อมูลถูกป้อนดังรูปที่ 6 ซึ่งวัตถุไม่ทราบฝ่ายที่ถูกตรวจพบนั้นมี

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

ความเร็ว 480 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ตรวจพบในวัน Tuesday ตรวจพบเวลา 11 (หน่วย) ตรวจพบที่ทิศ NW และอื่น ๆ ผลลัพธ์ที่ได้จากการจำแนกถูกตัดสินใจได้ว่าเป้าหมายไม่ทราบฝ่ายนั้นคืออากาศยานขับไล่โจมตีรุ่น MiG-29s

ตารางที่ 7 Class ของอากาศยานขับไล่โจมตีที่ถูกทำนายจากข้อมูลของเรดาห์

Input Parameters	Chendu F-7s	F/A-18D Hornet	Hawk Mk 208	JF-17	MiG-29s	Nanchang A-5C	Pilatus PC-7	Su-30MKM	Yak-130	Unknown
Velocity	200	210	450	400	480	150	180	150	250	n/a
FoundHeight	17,000	16,000	15,000	15,000	27,000	15,000	18,000	20,000	18,000	n/a
FoundDirection	5	1	7	4	2	6	2	4	1	n/a
FoundDay	2	3	5	4	2	5	3	5	2	n/a
FoundTime	10	7	8	12	11	11	10	9	6	n/a
StartAirport	114	114	140	140	1	108	114	140	114	n/a
StopAirport	114	109	140	140	4	108	114	140	106	n/a
HideHeight	5,000	8,000	3,000	4,000	3,000	6,000	3,000	10,000	4,000	n/a
HideDirection	8	1	2	3	2	6	2	4	1	n/a
CountryCode	2	2	1	1	2	2	2	1	2	n/a
Predicted Class (%)	0.76	0.85	0.79	0.61	0.84	0.95	0.75	0.71	0.87	n/a

นอกจากนี้การคาดการณ์ในแต่ละคลาสอากาศยานขับไล่โจมตีทั้ง 9 แบบ สามารถแสดงตัวอย่างได้ดังตารางที่ 7 โดยที่ข้อมูลค่าคุณลักษณะทั้ง 10 ตัวแปร ถูกป้อนเข้าแบบจำลองเพื่อเลือกคำตอบของอากาศยานขับไล่โจมตีจากโหนดที่มีค่าความน่าจะเป็นมากที่สุด ในขณะที่ข้อมูลนำเข้าที่ไม่สอดคล้องกับขอบเขตที่กำหนดจะถูกตัดสินใจให้เป็น Unknown Class ซึ่งมีความหมายว่าแบบจำลองไม่สามารถจำแนกประเภทของอากาศยานขับไล่โจมตีได้

อภิปรายผล

ผลลัพธ์ที่ได้จากการสร้างแบบจำลองพบว่าการจำแนกอากาศยานขับไล่โจมตีมีความซับซ้อนของข้อมูลที่ไม่สามารถประเมินได้ด้วยการเปรียบเทียบความเร็วที่ตรวจพบหรือระดับความสูงที่ตรวจพบ ซึ่งจำเป็นที่จะต้องใช้ขั้นตอนวิธีโครงข่ายประสาทเทียมที่สามารถเรียนรู้ข้อมูลที่ซับซ้อนได้และมีการแยก Category ของแบบอากาศยานจำนวนมากเมื่อเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้าที่มีการจำแนกเพียงประเภทของอากาศยานเท่านั้น [4] โครงข่ายประสาทเทียมแบบแพร่ย้อนกลับที่ถูกนำเสนอในงานวิจัยนี้ตั้งอยู่บนพื้นฐานของการตั้งค่าพารามิเตอร์ภายในโครงข่ายที่เหมาะสมเพื่อให้ได้มาซึ่งแบบจำลองที่มีความซับซ้อนต่ำแต่ยังคงประสิทธิภาพที่สูง การทดลองในงานวิจัยได้ตั้งอยู่บนพื้นฐานของขอบเขตการใช้ชุดข้อมูลที่ถูกใช้เฉพาะอากาศยานขับไล่โจมตีเท่านั้นซึ่งถูกจำกัดเพียง 9 แบบ อย่างไรก็ตามตัวเลขเหล่านี้จะเป็นตัวบ่งบอกถึงประสิทธิภาพและความน่าเชื่อถือของแบบจำลองที่ถูกสร้างขึ้นถึงแม้ว่าการสร้างแบบจำลองด้วยข้อมูลในส่วนที่ใช้ในการเรียนรู้จะมีความแม่นยำถึง 95.38% แต่เมื่อมีการนำข้อมูลที่นอกเหนือจากกระบวนการเรียนรู้มาใช้ทดสอบจะมีความถูกต้องถึง 86.30%

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

สรุปผล

อากาศยานขับไล่โจมตีได้ถูกพัฒนาให้มีขีดความสามารถในการสร้างความเสียหายที่เป็นภัยต่อความมั่นคงของชาติ การปฏิบัติการป้องกันภัยทางอากาศ สามารถค้นหาเป้าหมายโดยการใช้เรดาห์เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลจากผู้เชี่ยวชาญที่มีประสบการณ์สูงและแหล่งข่าวที่น่าเชื่อถือเพิ่มเติม อย่างไรก็ตามการประสบปัญหาการขาดแคลนเจ้าหน้าที่ผู้เชี่ยวชาญอาจส่งผลเสียต่อการสนับสนุนข้อมูลเพื่อการตัดสินใจในเชิงกลยุทธ์ทางทหาร จึงจำเป็นต้องอาศัยกระบวนการในการทำเหมืองข้อมูล (Data Mining) เพื่อสกัดนำองค์ความรู้ที่ได้จากฐานข้อมูลขนาดใหญ่ (Big Data) ที่ถูกเก็บรวบรวมมาใช้ประโยชน์ในการสร้างการตัดสินใจด้วยเครื่องจักร ดังนั้นงานวิจัยนี้ได้สร้างแบบจำลองการจำแนกอากาศยานขับไล่โจมตีบนพื้นฐานข้อมูลเป้าหมายไม่ทราบฝ่าย โดยใช้วิธีโครงข่ายประสาทเทียมที่มีความแม่นยำสูง ด้วยกลไกในการตั้งค่าภายในโครงข่ายประสาทเทียมที่เหมาะสมทำให้แบบจำลองที่ถูกสร้างขึ้นมีความซับซ้อนต่ำแต่ยังคงประสิทธิภาพสูง ผลลัพธ์ที่ได้จากการสร้างแบบจำลองนั้นเป็นประโยชน์อย่างยิ่ง โดยสามารถนำไปเป็นต้นแบบสำหรับตัดสินใจแทนผู้เชี่ยวชาญ ซึ่งจะช่วยลดปัญหาการขาดแคลนบุคลากร และสอดคล้องกับระบบอาวุธฉลาด (Smart Weapon Systems) ได้

กิตติกรรมประกาศ

บทความวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนข้อมูลจากระบบวิเคราะห์ความเคลื่อนไหวกำลังทางอากาศประเทศเพื่อนบ้านจากกรมข่าวทหารอากาศเพื่อใช้ในการสร้างแบบจำลองของการจำแนกรุ่นของอากาศยานขับไล่โจมตี และขอขอบพระคุณนาวาอากาศเอก ผู้ช่วยศาสตราจารย์ภูมิพัฒน์ ดวงกลาง ที่คอยให้คำแนะนำตลอดทั้งช่วยชี้แนะแนวทางในการพัฒนางานวิจัยนี้จนสำเร็จลุล่วง

เอกสารอ้างอิง

1. Skolnik M. Introduction to radar systems. 2nd edition. New York: 1980.
2. Dragan T, Slobodan S, Srdjan B, Milorad M, Branimir K, Zoran R, et al. Failure analysis of the combat jet aircraft rudder shaft. Eng Fail Ana. 2011;18(8):1998-2007.
3. Kishore K. Air defence command – a bold test case. Manohar parrikar institute for defence studies and analyses. 2020.
4. Phummipat D, Rajana K. Models for automatic aircraft type prediction. NKRAFA JST. 2019;15: 1-8.
5. Roopa K, Rama T, Cyril P. Neural network classifier for fighter aircraft model recognition. J Intell Syst. 2018;27(3):447-63.
6. Peerasut T, Sanrach C. The comparison of data classification efficiency to predict scholarship awarded for undergraduate students by data mining techniques. JPRR. 2021;8(2):44-52.
7. Charles H. Development of An Aircraft Operation Classification system for Louisiana's Airports. Tech Report Dept of Elect & Comp Engr and Remote Sensing and Image Processing Lab. Louisiana State University: June 2003.
8. Xiao-jin L, Shu-long Z. The Model of Aircraft Economic Classification Based on Support Vecter Machine. 2009 ETP International Conference on Future Computer and

Communication. 2009. p. 128-30. doi: 10.1109/FCC.2009.9.

9. Xiao-jin L, Shu-long Z. Study on the Support Vector Machine (SVM) Model of Aircraft Economic Classification with Application in China. 2009 International Conference on Electronic Commerce and Business Intelligence. 2009. p. 177-9. doi: 10.1109/ECBI.2009.65.
10. Osses A, Gómez I, Glisser M, Gerard C, Guzmán R. Classification of Aircrafts using Artificial Neural Networks. Group. 2012.
11. Sanghyuk L, Wookje P, Sikhang J. Fault detection of aircraft system with random forest algorithm and similarity measure. Sci World J. 2014. doi.org/10.1155/2014/727359
12. Roopa K, Murthy T, Raj P. Neural network classifier for fighter aircraft model recognition. Int J Intell Syst. 2018;27(3):447-63.
13. Marzukhi S, Awang N, Alsagoff S, Mohamed H. RapidMiner and machine learning techniques for classifying aircraft data. J Phys: Conf Ser. 2021;1997:012012. doi:10.1088/1742-6596/1997/1/012012
14. Azam F, Rizvi A, Khan W, Aalsalem M, Yu H, Zikria Y. Aircraft classification based on PCA and feature fusion techniques in convolutional neural network. IEEE Access. 2021;9:161683-94.
15. Granger C. Strategies for modelling nonlinear time series relationships. The Economic Record. 1993:69(3):233–8.
16. James F. The equivalence of zero span and zero semispan. Proceedings of the American Mathematical Society. 1984:90(1):133–8.
17. Peerapong U, Patikorn A, Monthippa U, Arfat A. Estimating and synthesizing QoE based on QoS measurement for improving multimedia services on cellular networks using ANN method. IEEE Trans Netw Serv. 2020;17(1):389-402.
18. Panchai F, Panchal M. Review on methods of selecting number of hidden nodes in artificial neural network. J Comput Sci Technol. 2014:3(11):455–64.

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

การศึกษาตัวแปรเสถียรภาพการวิ่งของรถซ่อมบำรุงทางสำหรับรถไฟชานเมืองด้วยชุดทดลอง

A Study of Running Stability Parameters of Infrastructure Maintenance Vehicle for Commuter Rail with Scale Model

เทอดเกียรติ ลิมปิทีปราการ วินัย จันทร์เพ็ง และ จงใจ ชัยจันดี*

Terdkiat Limpeteeprakarn, Winai Chanpeng and Jongchai Chaijandee*

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thanyaburi, Pathum Thani 12110, THAILAND

*Corresponding author e-mail: jongchai_c@mail.rmutt.ac.th

ARTICLE INFO

Article history:
Received: September 19, 2022
Revised: November 1, 2022
Accepted: November 4, 2022
Available online: December 1, 2022
DOI: 10.14456/jarst.2022.21

Keywords: infrastructure maintenance vehicle, lateral displacements, yawing, bogie wheelset, running stability

ABSTRACT

It is important to understand the dynamic behavior of the vehicle's wheelset and the values used to assess its running stability when an increase in the speed of an infrastructure maintenance vehicle for commuter rail is required. This article presents a guideline for measuring the vehicle's performance, emphasizing the wheelset variables, including lateral displacement, yawing, and acceleration. This research was divided into three sections: an application of the theories related to wheelset motion, a synthesis of the standard on rolling stock equipment for shock and vibration, and an experimental result from a 1/6 scale model of the infrastructure maintenance vehicle created to mimic the behavior of the real vehicle with a maximum running speed of 60 km/hr. The study found that when using the parameters of a track gauge of 1 m and a nominal wheel radius of 380 mm, the values of wheelset lateral displacements, if running on a straight line and curve, shall not exceed 10 mm, 19 mm, respectively, and the average lateral accelerations of the

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

bogie and the wheelset are 37, 270 m/s^2, respectively. From the experimental results of the 1/6 scale model running on a roller rig at the maximum speed, it was found that the yaw angle shall not exceed 1.72 degrees, and the average lateral acceleration of the wheelset was four times higher than that of the standard value. This could be caused by the maximum running speed of the scale model at 34.9 km/hr which is much lower than that of infrastructure maintenance vehicle at 60 km/hr.

บทคัดย่อ

เมื่อต้องการเพิ่มความเร็วของรถซ่อมบำรุงทางสำหรับรถไฟชานเมือง การเข้าใจพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของชุดเพลาล้อรวมถึงค่าที่ใช้ในการประเมินเสถียรภาพของการวิ่งถือเป็นสิ่งสำคัญ บทความนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจะนำเสนอแนวทางการตรวจวัดสมรรถนะของรถซ่อมบำรุงทางโดยเน้นตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการส่ายตัวของชุดเพลาล้อซึ่งประกอบด้วยระยะเคลื่อนที่ด้านข้าง มุมบิดรอบตัวในแนวดิ่ง และความเร่ง โดยการวิจัยจะแบ่งเป็น 3 ส่วนคือ การประยุกต์ใช้ทฤษฎีที่เกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของชุดเพลาล้อ การสังเคราะห์มาตรฐานสำหรับติดตั้งอุปกรณ์ในตัวรถไฟจากกระแทกและการสั่นสะเทือน และการทดลองรถซ่อมบำรุงรางทางจำลองในอัตราส่วน 1 ต่อ 6 ซึ่งสร้างขึ้นเพื่อใช้เลียนแบบพฤติกรรมของรถที่ใช้งานจริงที่ความเร็วสูงสุด 60 km/hr จากการศึกษาพบว่า เมื่อคำนวณจากการใช้ค่าพารามิเตอร์ของทางวิ่งขนาด 1 m และรัศมีล้อที่กำหนด 380 mm ระยะเคลื่อนที่ด้านข้างของชุดเพลาล้อถ้าวิ่งบนทางตรงไม่ควรเกิน 10 mm และทางโค้งไม่เกิน 19 mm ความเร่งด้านข้างเฉลี่ยของท้ายแคร่และชุดเพลาล้อวิ่งไม่ควรเกิน 37 และ 270 m/s^2 ตามลำดับ จากการทดลองวิ่งรถซ่อมบำรุงทางจำลองบนชุดแท่นกลิ้งที่ความเร็วสูงสุด พบว่า ค่ามุมบิดรอบตัวในแนวดิ่งของเพลาล้อไม่ควรเกิน 1.72° และค่าความเร่งด้านข้างเฉลี่ยที่ชุดเพลาล้อมีค่าน้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐานประมาณ 4 เท่าซึ่งน่าจะมีสาเหตุมาจากการที่ความเร็วที่ใช้ทดลองสูงสุด 34.9 km/hr ซึ่งต่ำกว่าความเร็วสูงสุดสำหรับการวิ่งของรถซ่อมบำรุงทางที่ 60 km/hr

คำสำคัญ: รถซ่อมบำรุงทาง ระยะเคลื่อนที่ด้านข้าง มุมบิดรอบแกนในแนวดิ่ง ชุดเพลาล้อ เสถียรภาพในการวิ่ง

บทนำ

การกำหนดสมรรถนะในการวิ่งของรถไฟมักจะพิจารณาจาก 3 ประเด็นหลักคือ เสถียรในการวิ่ง (Running Stability) สมรรถนะในการเข้าโค้ง (Curve Performance) และความสะดวกสบายของผู้โดยสาร (Riding Comfort) [1] ทั้งนี้ตัวแปรที่นำมาใช้ในการกำหนดเสถียรภาพในการวิ่งก็คือความเร็ว โดยจะพิจารณาจากการส่ายตัว (Hunting) ของแคร่และชุดเพลาล้อ (Bogie and Wheelset) เป็นหลัก โดยปกติสำหรับรถไฟขนส่งมวลชนประเภทรางหนัก (Heavy Rail) จะมีการออกแบบให้ขบวนรถไฟมีค่าความเร็วสูงสุด (Maximum Speed) ไม่เกิน 120% ของความเร็วใช้งาน (Operating Speed) โดยขบวนรถยังมีเสถียรภาพในการวิ่ง สำหรับรถไฟชานเมือง (Commuter Rail) ความเร็วสูงสุดไม่เกิน 110% ของความเร็วใช้งาน [2] ทั้งนี้ พฤติกรรมที่บ่งบอกเสถียรภาพของการวิ่งที่สำคัญไม่ว่าจะอยู่บน

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

ทางตรงหรือทางโค้งที่ส่งผลต่อความปลอดภัยในการเดินรถคือ การส่ายตัวซึ่งแบ่งได้เป็น 2 ประเภท คือ การส่ายตัวระดับหนึ่ง (Primary Hunting) ซึ่งจะเกิดขึ้นเฉพาะกับตัวโครงสร้างตู้รถโดยสาร (Car Body) และการส่ายตัวระดับที่สอง (Secondary Hunting) ซึ่งเกิดขึ้นที่บริเวณแคร่และชุดเพลาล้อ การส่ายตัวนี้จะมีผลกระทบโดยตรงต่อสมรรถนะของรถไฟมากที่สุดเนื่องจากการสั่นสะเทือนจะมีค่าสูงกว่าระดับที่หนึ่ง [3]

สำหรับกรณีรถซ่อมบำรุงทาง (Infrastructure Maintenance Vehicle: IMV) ของรถไฟชานเมืองนิยมใช้ความเร็วสูงสุดไม่เกิน 60 km/hr เนื่องจากรถไฟชานเมืองมักจะกำหนดให้วิ่งจากต้นทางไปถึงจุดหมายปลายทางภายใน 1 hr แต่กระนั้นการออกแบบก็จะขึ้นอยู่กับตำแหน่งของศูนย์ซ่อมบำรุงขบวนรถไฟ (Depot Workshop) ตัวอย่างเช่น รถไฟฟ้าชานเมืองสาย Airport Rail Link เดิมได้กำหนดให้รถวิ่งได้สูงสุด 25 km/hr แต่เนื่องจากเวลาทำการซ่อมบำรุงมีจำกัดไม่เกิน 4 hr และเส้นทางการวิ่งรถมีระยะทาง 28.6 km ซึ่งความเร็วดังกล่าวช้าเกินไปและปัจจุบันได้มีการปรับความเร็วขึ้นเป็น 60 km/hr เรียบร้อยแล้ว นอกจากนี้ในส่วนของรถซ่อมบำรุงทางรถไฟฟ้าชานเมืองสายสีแดงก็ได้มีการกำหนดความเร็วใช้งานไว้ไม่เกิน 60 km/hr เช่นเดียวกัน โดยมีเส้นทางการวิ่งรถในช่วงบางซื่อ-รังสิต 22.6 km ทั้งนี้ ถ้าหากต้องเพิ่มความเร็วมากกว่าความเร็วดังกล่าว ตัวแปรที่สำคัญที่ต้องพิจารณาก็คือค่าตัวแปรของชุดเพลาล้อ ตัวอย่างเช่น ระยะเคลื่อนที่ด้านข้าง (Lateral Displacement) มุมบิดรอบตัวในแนวดิ่ง (Yaw Angle) และความเร่ง (Acceleration) เพื่อให้มั่นใจว่าการวิ่งที่ความเร็วดังกล่าวจะมีเสถียรภาพและความปลอดภัย โดยพฤติกรรมการเคลื่อนที่ของชุดเพลาล้อรวมถึงค่าที่ใช้ในการประเมินเสถียรภาพของการวิ่งของรถซ่อมบำรุงทางมักจะเป็นข้อมูลที่ขึ้นอยู่กับบริษัทผู้ผลิตรถซ่อมบำรุงแต่ละแห่ง นอกจากนี้ การวัดค่าตัวแปรชุดเพลาล้อจำเป็นต้องติดตั้งอุปกรณ์เครื่องมือวัดและเซ็นเซอร์เข้าไปที่ตัวรถโดยเฉพาะบริเวณโครงแคร่หรือโครงประธาน หรือ ชุดเพลาล้อ ดังนั้น ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับย่านการวัดหรือข้อจำกัดในการติดตั้งจึงถือเป็นสิ่งจำเป็น

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อจะนำเสนอแนวทางการตรวจวัดสมรรถนะของรถซ่อมบำรุงทางโดยเน้นตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการส่ายตัวของชุดเพลาล้อ ซึ่งประกอบด้วย ระยะเคลื่อนที่ด้านข้าง มุมบิดรอบตัวในแนวดิ่งและความเร่งเชิงเส้นของชุดเพลาล้อ รวมถึงข้อจำกัดในการติดตั้งอุปกรณ์ที่ใช้สำหรับในการวัดค่าตัวแปรดังกล่าว ทั้งนี้บทความนี้จะนำเสนอผลการวิจัยเป็น 3 ส่วนคือ ทฤษฎีที่เกี่ยวกับการเคลื่อนที่ของชุดเพลาล้อ มาตรฐานของอุปกรณ์ที่ติดตั้งในตัวรถไฟ และผลจากชุดทดลองรถซ่อมบำรุงทางจำลองที่สร้างขึ้นเพื่อใช้เลียนแบบพฤติกรรมของรถซ่อมบำรุงทางที่ใช้งานจริง

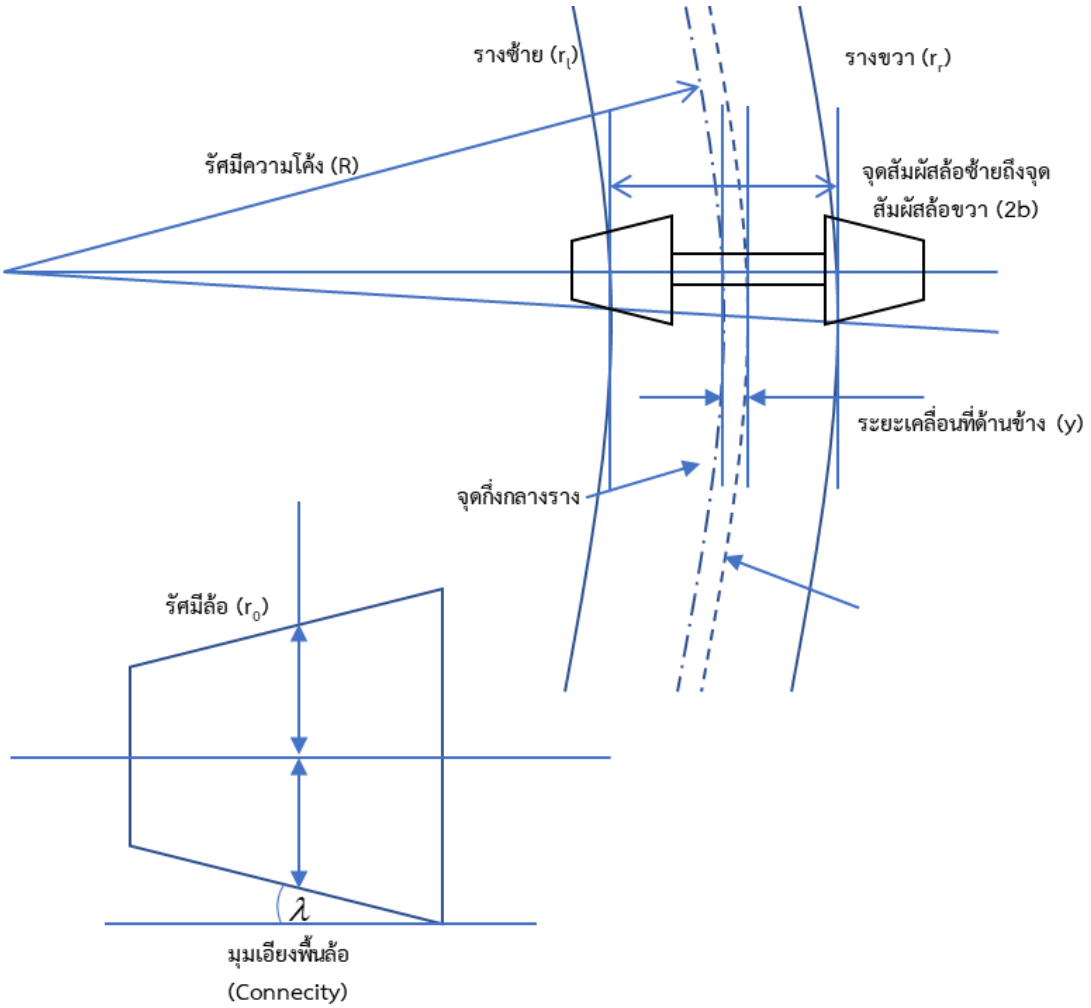
วิธีดำเนินการวิจัย

1. ทฤษฎีที่เกี่ยวข้องกับสมรรถนะของการวิ่ง

1.1 สมการของเรดเทนบาเคอร์

สำหรับการวัดสมรรถนะของตัวรถโดยเฉพาะการเคลื่อนตัวของชุดเพลาล้อจำเป็นจะต้องติดตั้งอุปกรณ์วัดระยะเคลื่อนที่ด้านข้าง (การกระจัดด้านข้าง) ซึ่งตำแหน่งของอุปกรณ์ดังกล่าวจะต้องอยู่ในจุดที่หลีกเลี่ยงการเคลื่อนตัวของชุดเพลาล้อ ในการหาค่าระยะเคลื่อนที่ด้านข้างสูงสุดสามารถใช้สมการของเรด-เทนบารเคอร์ในการประมาณระยะดังกล่าวเบื้องต้นได้

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)



รูปที่ 1 พารามิเตอร์ของชุดเพลาล้อคอนทัวร์รูปกรวยตรงขณะเข้าโค้ง [4]

จากรูปที่ 1 กำหนดให้ชุดเพลาล้อมีคอนทัวร์รูปทรงกรวยตรงโดย มีมุมเอียงพื้นล้อ (Conicity) λ มีรัศมีล้อที่ถูกกำหนด r_o เข้าโค้งที่มีรัศมีกึ่งกลางทางโค้ง R และกำหนดให้เข้าโค้งในลักษณะที่ล้อกลิ้งบนรางโดยสมบูรณ์ (Pure Rolling) ซึ่งเกิดขึ้นได้เมื่อรัศมีล้อด้านขวา r_r ใหญ่กว่า รัศมีล้อด้านซ้าย r_l โดยมีสัดส่วนตามรูปสามเหลี่ยมคล้ายที่มีมุมยอดเดียวกันที่จุดศูนย์กลางความโค้ง หากกำหนดให้ระยะจากจุดสัมผัสล้อซ้ายถึงจุดสัมผัสล้อขวามีค่าเป็น $2b$ และ y คือ ระยะเพลาที่ขยับออกไปทางนอกโค้ง หรือ ระยะเคลื่อนที่ด้านข้างของชุดเพลาล้อ (Wheel Lateral Displacement) โดยใช้สมการของเรดเทนบาเคอร์ (Redtenbacher) คำนวณดังนี้ [4]

$$y = \frac{r_o b}{\lambda R} \quad (1)$$

เมื่อ

r_o คือ รัศมีล้อที่กำหนด (mm)
b คือ ครึ่งหนึ่งของระยะจุดสัมผัสล้อ (mm)
λ คือ มุมเอียงพื้นล้อ (rad)
R คือ รัศมีกึ่งกลางทางโค้ง (mm)

จากการพิจารณาสมการของเรดเทนบาเคอร์ จะพบความสัมพันธ์ของระยะเพลาที่ต้องขยับออกไปทางนอกโค้งเพื่อทำให้รัศมีของล้อด้านนอกโค้งที่จุด

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

สัมผัสมีขนาดใหญ่ กว่าล้อด้านในโค้งที่จุดสัมผัส โดยค่าระยะที่ต้องขยับจะแปรผันตรงกับรัศมีล้อที่กำหนด และครึ่งหนึ่งของระยะจากจุดสัมผัสล้อซ้ายถึงจุดสัมผัสล้อขวา และแปรผกผันกับมุมเอียงพื้นล้อ และรัศมีกึ่งกลางทางโค้ง ซึ่งหากพิจารณาเฉพาะมุมเอียงล้อ จะพบว่าชุดเพลาจะขยับออกนอกโค้งลดลงถ้ามุมเอียงพื้นล้อมีค่ามากขึ้น [4] ทำให้สามารถคำนวณหาระยะการส่ายตัวด้านข้างเพื่อหาช่องว่างสูงสุดที่ยอมให้ได้ในกรณีที่จะติดตั้งอุปกรณ์ลงไปบริเวณใกล้เคียงกับล้อรถไฟเพื่อตรวจวัดค่าตัวแปรต่าง ๆ ทั้งของตัวรถไฟและทางวิ่งรถไฟ

ตารางที่ 1 แสดงค่าระยะเพลาที่ขยับออกไปด้านนอกโค้งสูงสุดจากกรณีของชุดเพลาล้อของขบวนรถไฟของการรถไฟแห่งประเทศไทย โดยเปรียบเทียบคอนทัวร์ของล้อรถไฟ 3 ชนิด ประกอบด้วย คอนทัวร์วิฑูร คอนทัวร์ P8 และ คอนทัวร์ S1002 เมื่อค่ารัศมีล้อที่กำหนด 380 mm ค่ารัศมีความโค้ง 200 m และค่าครึ่งหนึ่งของระยะระหว่างจุดสัมผัสล้อซ้ายถึงจุดสัมผัสล้อขวา 500 mm จะได้ระยะเพลาที่ขยับออกไปด้านนอกโค้งสูงสุด 19 mm กรณีที่เป็นคอนทัวร์วิฑูรที่มีมุมเอียงพื้นล้อ 0.05 rad

ตารางที่ 1 ระยะเพลาที่ขยับออกไปด้านนอกโค้งสูงสุด

คอนทัวร์	มุมเอียงพื้นล้อ (rad)	ระยะเพลาที่ขยับออกไปด้านนอกโค้งสูงสุด (mm)
วิฑูรย์	0.05	19
P8	0.1	9.5
S1002	0.067	14.2

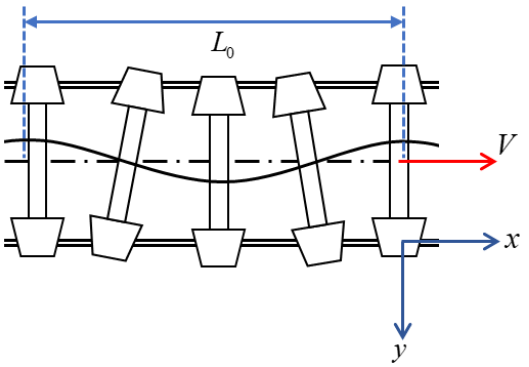
1.2 สมการคลิงเกล (Klingel)

ในการกำหนดช่วงความถี่ในการตรวจวัดการส่ายตัวของรถไฟจะพิจารณาระยะเคลื่อนที่ด้านข้างและความเร่งด้านข้างโดยสามารถประมาณการความถี่ในการส่ายตัวเบื้องต้นจากสมการของคลิงเกล ซึ่งจะใช้ค่าความยาวคลื่นไซน์ในการหาค่าความถี่ในการส่ายตัว การคำนวณความยาวคลื่นไซน์ (Wave Length) หาได้จากสมการดังต่อไปนี้ [5]

$$L_0 = 2\pi\sqrt{\frac{r_0 b}{\lambda}} \qquad (2)$$

หากกำหนดให้ชุดเพลาล้อเคลื่อนไปตามแกน x ดังแสดงในรูปที่ 2 ด้วยความเร็ว (V) ความถี่ (f) ในหน่วยเฮิรตซ์ การส่ายของชุดเพลาล้อคำนวณได้จาก

$$f = \frac{V}{L_0} \qquad (3)$$



รูปที่ 2 การส่ายตัวของชุดเพลาล้อขณะวิ่งบนทางตรง [5]

2. มาตรฐานของอุปกรณ์ที่จะติดตั้งในขบวนรถไฟ

2.1 ระดับการทดสอบอุปกรณ์

ในทางปฏิบัติ [6] การทดสอบอุปกรณ์ที่จะนำมาติดตั้งในขบวนรถไฟนั้นจะต้องสามารถผ่านเกณฑ์

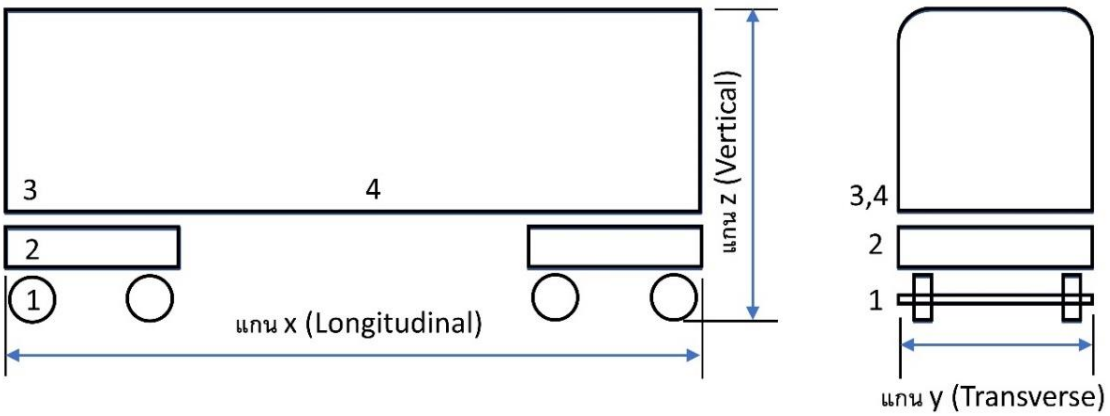
ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

ของการสั่นสะเทือนและการกระแทกของมาตรฐาน EN 61373 (Railway applications - Rolling stock equipment - Shock and vibration tests) โดยจะแบ่งออกได้เป็น 3 ระดับคือ การทดสอบแบบสุ่มการทำงาน (Functional Random Vibration Tests) การทดสอบจำลองตลอดอายุการใช้งาน (Simulated Long Life Test) และการทดสอบแรงกระแทก (Shock Test) ทั้งนี้การทดสอบระดับที่ 1 จะเป็นการทดสอบขั้นต่ำที่แสดงให้เห็นว่าอุปกรณ์ที่นำมาทดสอบสามารถทำงานได้เมื่ออยู่ภายใต้สภาวะการเดินรถปกติ โดยฟังก์ชันการทำงานต้องมีการตกลงร่วมกันระหว่างผู้ผลิตและผู้ใช้งานอุปกรณ์ก่อนเริ่มการทดสอบ สำหรับการทดสอบระดับที่ 2 มีจุดมุ่งหมายเพื่อทดสอบความแข็งแรงทางกลของอุปกรณ์ ในระดับการสั่นสะเทือนที่สูงขึ้นกว่าการใช้งานปกติ ทั้งนี้ฟังก์ชันการใช้งานบางอย่างอาจไม่จำเป็นต้องสมบูรณ์ และการทดสอบระดับที่ 3 ซึ่งเป็นขั้นสุดท้ายมีวัตถุประสงค์เพื่อจำลองเหตุการณ์ที่เกิดจากแรงกระแทกซึ่งเกิดขึ้นไม่บ่อย ถึงแม้ฟังก์ชันการทำงานของอุปกรณ์จะไม่สามารถใช้งานได้ แต่สถานะของสัญญาณต่าง ๆ จะต้องไม่มีการเปลี่ยน นอกจากนี้อุปกรณ์ก็จะต้องไม่มีการเคลื่อนตัวจากตำแหน่งยึดหรือเกิดความเสียหาย

2.2 ตำแหน่งติดตั้งอุปกรณ์และย่านการวัดค่าความเร่ง

ในการทดสอบอุปกรณ์ที่จะนำมาติดตั้งในขบวนรถไฟนั้น ตำแหน่งที่ติดตั้งจะมีผลต่อค่าการสั่นสะเทือนที่ใช้ในการทดสอบซึ่งมีอยู่ด้วยกัน 3 ตำแหน่ง คือ ติดตั้งบริเวณชุดเพลาล้อ ติดตั้งบริเวรณท้ายแคร่รถไฟ และติดตั้งกับพื้นตู้รถไฟซึ่งแบ่งย่อยได้อีก 2 แบบคือ ติดตั้งแนบกับพื้นตู้รถไฟโดยตรง หรือติดตั้งอยู่ในกล่องก่อนนำไปติดกับพื้น รูปที่ 3 แสดงจุดการติดตั้งอุปกรณ์ซึ่งสามารถกระทำได้ 4 จุด ตารางที่ 2 แสดงช่วงของค่าความเร่งเฉลี่ย (Root Mean Square: RMS) ที่ใช้ในการทดสอบอุปกรณ์ที่นำมาติดตั้งในขบวนรถไฟโดยเฉพาะในส่วนของท้ายแคร่และชุดเพลาล้อโดยแสดงค่าทั้ง 3 ระดับของการทดสอบตามมาตราฐาน EN 61373

นอกจากนี้ จากการใช้สมการที่ (2) และ (3) คำนวณค่าความถี่ได้ 1.3 Hz (คอนทัวร์วิฑูรย์และความเร็ว 60 km/hr) และมาตรฐาน EN 61373 ได้กำหนดความถี่ในการวัดความเร่งด้านต่ำไว้ที่ 2-5 Hz โดยขึ้นอยู่กับน้ำหนักของชุดเพลาล้อ ดังนั้นจึงกำหนดให้ค่าความถี่ตามมาตรฐานดังกล่าวเป็นค่าที่ใช้ในการอ่านค่าความเร่งของชุดเพลาล้อจากการทดลอง



รูปที่ 3 จุดติดตั้งอุปกรณ์ในขบวนรถไฟ 4 จุด คือ เพลาล้อ ท้ายแคร่ ท้ายตู้รถไฟ และกลางตู้รถไฟ [6]

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

ตารางที่ 2 ช่วงของค่าความเร่งเฉลี่ย (RMS) ที่ใช้ในการทดสอบอุปกรณ์ตามมาตรฐาน EN 61373 [6]

รูปแบบการทดสอบ	ตำแหน่งที่วัดค่า	ความเร่ง RMS (m/s^2)		
		ความเร่งแกน x (Longitudinal)	ความเร่งแกน y (Transverse)	ความเร่งแกน z (Vertical)
1. สภาวะปกติ	แคร่รถไฟ	2.5	4.7	5.4
	เพลาล้อ	17.0	34.0	38.0
2. การจำลองตลอดอายุใช้งาน	แคร่รถไฟ	20.0	37.0	42.5
	เพลาล้อ	135.0	270.0	300.0
3. กระแทกรุนแรง	แคร่รถไฟ		300.0	
	เพลาล้อ		1000.0	

หมายเหตุ : ค่า Root Mean Square (RMS) คำนวณจากค่าที่วัดได้คูณกับ 0.707

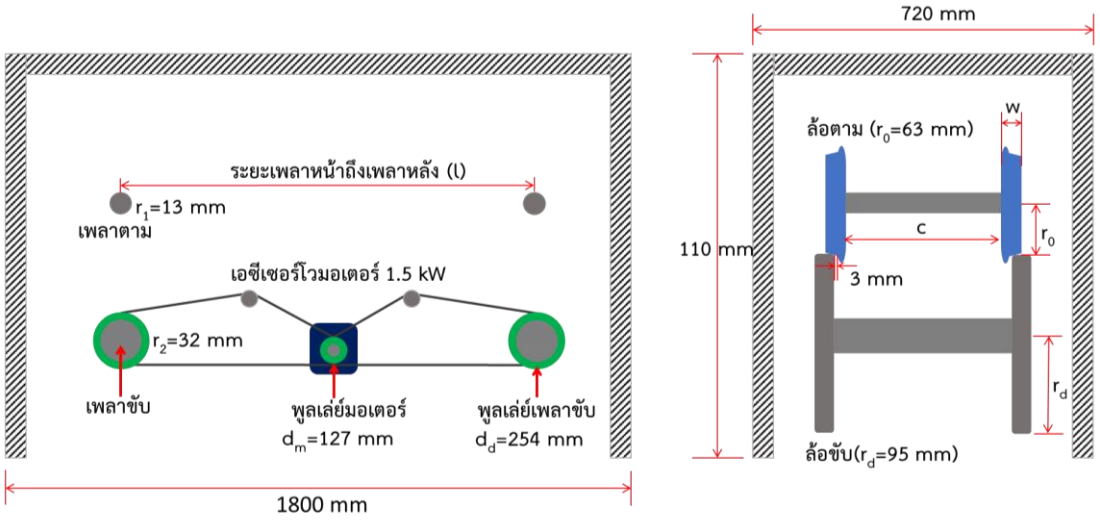
(ก) (ข) (ค)

รูปที่ 4 (ก) รถซ่อมบำรุงทางจริง (ข) ชุดแท่นกลิ้ง และ(ค) ชุดทดลองรถซ่อมบำรุงทางจำลอง

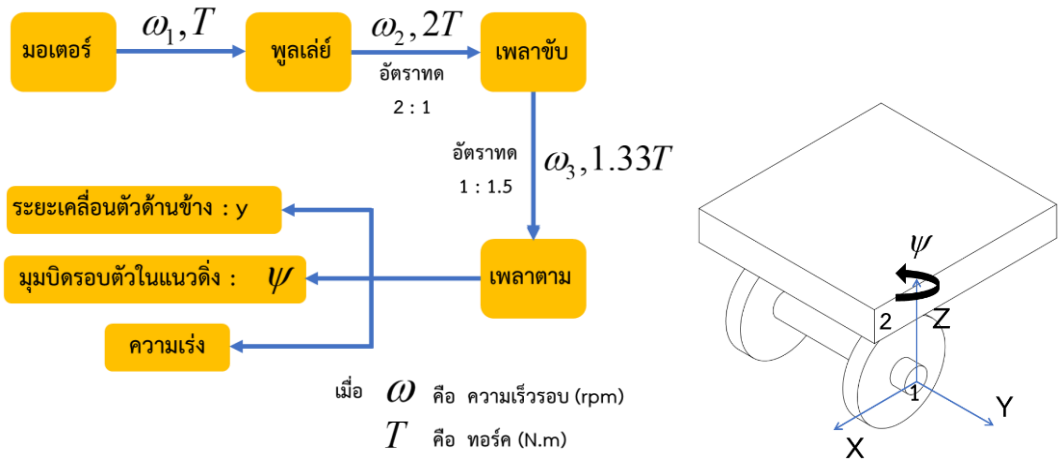
ตารางที่ 3 ค่าพารามิเตอร์ของรถซ่อมบำรุงทางจริงและชุดจำลอง

พารามิเตอร์	รถซ่อมบำรุงทางจริง	รถซ่อมบำรุงทางจำลอง
1. น้ำหนักตัวรถ (kg)	17,000	67.5
2. ความยาวตัวรถ (mm)	8,450	1400
3. ความกว้างตัวรถ (mm)	2,875	540
4. ความสูงของตัวรถ (mm)	1,080	219
4. ระยะเพลาหน้าถึงเพลาหลัง (Wheelbase) (mm)	5,000	667
5. ระยะด้านหลังล้อซ้ายถึงล้อขวา (Back to Back) (mm)	923	154
6. รัศมีล้อที่กำหนด (Wheel Radius) (mm)	380	63
7. ความกว้างของล้อ (mm)	135	28
8. คอนทัวร์ล้อ (Wheel Profile)	S1002	S1002
9. ความกว้างทางรถไฟ (Track Gauge) (mm)	1,000	200
10. คอนทัวร์ราง (Rail Profile)	UIC60	UIC60

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)



รูปที่ 5 ขนาดโครงชุดทดลองรถซ่อมบำรุงทางจำลอง รัศมีของเพลาขับและเพลาตาม และเส้นผ่านศูนย์กลางพูลเล่ย์เพลาขับและมอเตอร์



(ก) (ข)

รูปที่ 6 (ก) พารามิเตอร์ของการวัดสมรรถนะของชุดทดลอง (ข) ระบบพิกัดฉากบอกทิศทางการวัดความเร่งและมุมบิดในแนวดิ่งเพลาล้อ

3. การทดลองรถซ่อมบำรุงทางจำลอง

3.1 วิธีการทดลอง

รูปที่ 4 และตารางที่ 3 แสดงข้อมูลของรถซ่อมบำรุงทางจริงและชุดทดลองรถซ่อมบำรุงทางจำลองบนชุดแท่นกลิ้ง โดยตัวรถซ่อมบำรุงทางจริงมีเพียง 2 เพลา (Two-Axle Vehicle) และมีระบบรองรับน้ำหนักที่เป็นแหนบชนิดยูไอซีดับเบิ้ลลิงค์ [7] พร้อมทั้งโชคอัพติดตั้งอยู่ ทั้งนี้ ในการประเมินเบื้องต้นของค่าตัวแปรที่เกี่ยวข้องกับการส่ายตัวสำหรับรถซ่อมบำรุงทาง จะประกอบด้วย ระยะเคลื่อนที่ด้านข้างเพลาล้อ มุมบิดในแนวดิ่งเพลาล้อ และความเร่งเชิงเส้นของชุดเพลาล้อ จะอาศัยค่าที่อ่านได้จากการทดลองกับการวิ่งของแคร่รถซ่อมบำรุงทางจำลองวิ่งบนชุดแท่นกลิ้งขนาด กว้างxยาวxสูง เท่ากับ 720x1800x110 mm ที่พัฒนาขึ้นโดยทุนวิจัยของ สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ดังแสดงในรูปที่ 5 แคร่จำลองที่พัฒนาขึ้นนั้นสามารถวิ่งได้เฉพาะทางตรงเท่านั้นโดยจะมีขนาด 1 ต่อ 6 เทียบกับขนาดจริง มีระบบรองรับน้ำหนักประกอบด้วยแหนบและโช๊คอัพที่มีฟังก์ชันการทำงานใกล้เคียงกับการใช้งานจริง มีล้อของแคร่จำลองเป็นคอนทัวร์ S1002 ที่มีรัศมี 63 mm และหนา 28 mm มีล้อของชุดแท่นกลิ้ง (รางจำลอง) ที่มีรัศมี 95 mm และหนา 18 mm โดยสร้างตามคอนทัวร์ของราง UIC 60 ในการทดลองนี้เมื่อวางล้อของแคร่จำลองลงบนล้อของชุดแท่นกลิ้งจะมีช่องว่างระหว่างบังใบล้อและรางจำลองประมาณ 3 mm ในทางปฏิบัติระยะเคลื่อนที่ด้านข้างเพลาล้อจะอยู่ประมาณ 7-10 mm ก่อนที่บังใบล้อจะชนกับรางรถไฟ [5, 9] ในการทดลองจะใช้เซอร์โวมอเตอร์แบบเอซีเป็นต้นกำลังซึ่งมีกำลังสูงสุดที่ 1.5 kW และสามารถปรับความเร็วรอบได้สูงสุด 1500 rpm โดยมีอัตราทดจากมอเตอร์ (ω_1) ไปยังเพลาขับ (ω_2) เท่ากับ 2 ต่อ 1 โดยอาศัยการส่งกำลังจากมอเตอร์ด้วยพูลเล่ย์ขนาด 127 mm ดังแสดงในรูปที่ 6 ในงานวิจัยนี้จะเริ่มต้นจากการตั้งค่าความเร็วรอบของเพลาขับไว้ 3 ระดับคือ 200 300 และ 400 rpm และในส่วนของเพลาตามซึ่งมีอัตราทดจากเพลาขับไปยังเพลาตามเท่ากับ 1 ต่อ 1.5 โดยอาศัยความแตกต่างของล้อขับและล้อตามทำให้ความเร็วรอบของเพลาตาม (ω_3) เพิ่มเป็น 300 450 และ 600 rpm ซึ่งเมื่อใช้ค่ารัศมีล้อตามที่ 63 mm ค่าประกอบสัดส่วนกายภาพ (Geometry Scaling Factor) เท่ากับ 6 และกฎความเหมือน (Similarity Laws) ด้วยวิธีการของ DLR [8] ซึ่งกำหนดให้ความเร็วของแบบจริงเท่ากับความเร็วแบบจำลองคูณด้วยค่ารากที่สองของค่าประกอบสัดส่วนกายภาพ $(\sqrt{6})$ จะทำให้ได้ค่าความเร็วของรถซ่อมบำรุงทางจำลองเท่ากับ 7.12 10.7 และ 14.2 km/hr หรือ คิดเป็นความเร็วของรถซ่อมบำรุงทางจริงเท่ากับ 17.4 26.2 และ 34.9 km/hr ตามลำดับ ทั้งนี้ถ้าหากต้องการความเร็วในการทดลองให้เท่ากับค่าความเร็วสูงสุดของการวิ่งใช้งานปกติของรถซ่อมบำรุงทางบนเส้นทางวิ่งของรถไฟชานเมืองที่ 60 km/hr จะต้องปรับความเร็วรอบของเพลาขับให้ได้ประมาณ 1030 rpm แต่เนื่องจากเกิดการสลิปขึ้นที่บริเวณพูลเล่ย์มอเตอร์จึงไม่สามารถทำความเร็วดังกล่าวได้

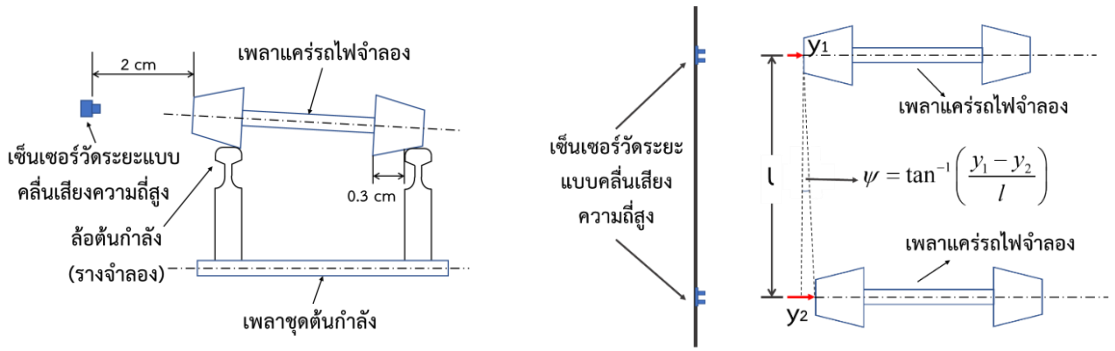
3.2 อุปกรณ์และตำแหน่งการวัดระยะเคลื่อนที่ด้านข้างของเพลาล้อ (y) และมุมบิดในแนวดิ่งเพลาล้อ (ψ)

การวัดระยะเคลื่อนที่ด้านข้างเพลาล้อรถซ่อมบำรุงทางจำลองจะใช้เซ็นเซอร์วัดระยะแบบคลื่นเสียงความถี่สูง(Ultrasonic Sensor) โดยติดตั้งไว้ที่โครงของชุดแท่นกลิ้งที่ระยะห่างจากเพลาล้อ 2 cm ดังรูปที่ 7(ก) และ 8(ก) สำหรับช่วงความถี่ที่ใช้ในการวัดระยะเคลื่อนที่ด้านข้างจะอาศัยการประมาณการโดยใช้สมการที่ (2) และ (3) ซึ่งคำนวณค่าความถี่ได้ 1.3 Hz (คอนทัวร์วิฑูรย์และความเร็ว 60 km/hr) ผู้วิจัยจึงกำหนดให้มีอัตราการสุ่มตัวอย่างข้อมูล (Sampling Rate) ที่ 10 Hz นอกจากนี้ สำหรับการวัดค่ามุมบิดในแนวดิ่งเพลาล้อจะอาศัยค่าผลต่างของการวัดระยะเคลื่อนที่ด้านข้างของชุดเพลาตามหน้า (y_1) และเพลาตามหลัง (y_2) ในช่วงเวลา 10 s มาคำนวณหาค่ามุมบิดดังกล่าวตามกฎตรีโกณมิติดังรูปที่ 7(ข)

3.3 อุปกรณ์และตำแหน่งการวัดความเร่ง

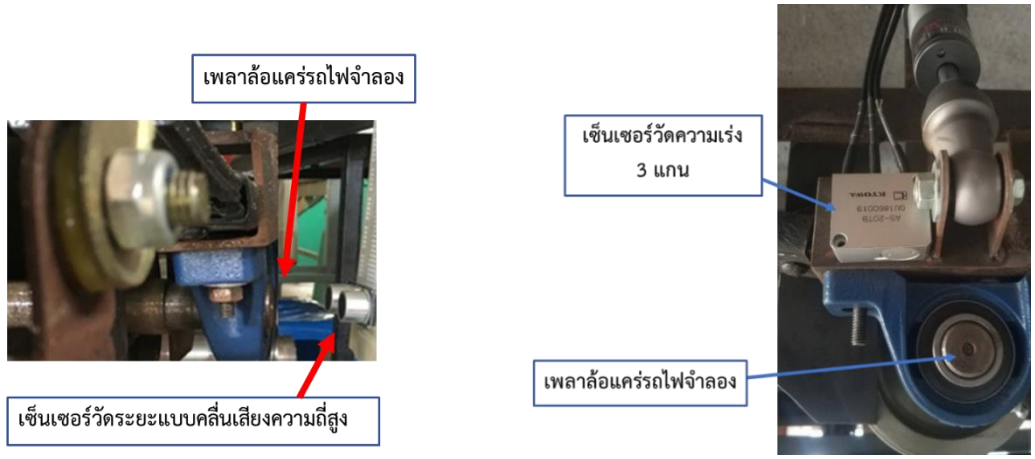
การวัดการสั่นสะเทือนของเพลาล้อและท้ายแคร่รถซ่อมบำรุงทางจำลองจะอาศัยเครื่องมือวัดความเร่ง EDX200-A โดยใช้เซ็นเซอร์แบบวัดความเร่ง 3 แกน (X, Y, Z) ขนาด 10g และมีอัตราสุ่มตัวอย่าง (Sampling Rate) เท่ากับ 500 Hz ดังแสดงในรูปที่ 6 (ข) และ 8(ข)

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)



(ก) (ข)

รูปที่ 7 (ก) ตำแหน่งของเซนเซอร์วัดระยะเคลื่อนที่ด้านข้างเพลาล้อ (ข) วิธีการคำนวณมุมบิดในแนวดิ่งของเพลาล้อ



(ก) (ข)

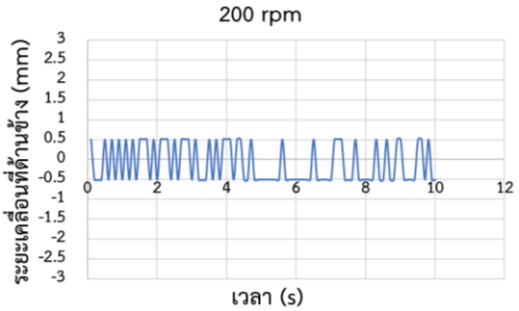
รูปที่ 8 (ก) เซนเซอร์ที่ใช้ในการวัดระยะเคลื่อนที่ด้านข้างเพลาล้อ (ข) เซนเซอร์วัดความเร่ง 3 แกน

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

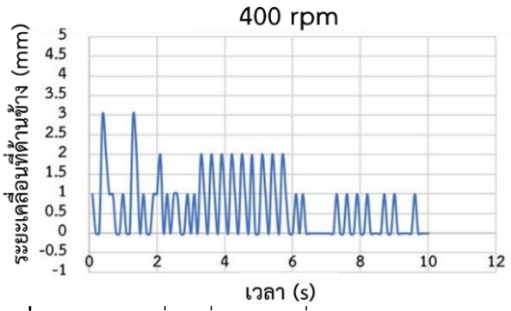
1. ระยะเคลื่อนที่ด้านข้างเพลาล้อ

รูปที่ 9-11 แสดงระยะเคลื่อนที่ด้านข้างของชุดเพลาล้อของแคร่จำลองที่ความเร็วรอบของเพลาขับ 200 300 และ 400 rpm ในช่วงเวลา 10 s เมื่อเริ่มพิจารณาที่ความเร็ว 200 rpm พบว่า ระยะเคลื่อนที่ด้านข้างจะมีค่าสูงสุด 0.5 mm และมีการส่ายตัวกลับไปกลับมาเป็นแบบคงที่สม่ำเสมอ ในขณะที่ความเร็ว 300 rpm พบว่าการส่ายตัวเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงตลอดช่วงเวลาที่ทำการวัดโดยมีค่าสูงสุด 2 mm แต่ยังไม่มีเสียงดังเกิดขึ้นจากการกระทบกันระหว่างบังใบล้อกับรางจำลอง ทั้งนี้ในช่วงเริ่มต้นและในช่วงปลายของการวัด ค่าความเฉื่อยของเพลามีผลทำให้กราฟไม่คงที่เหมือนกรณีที่ 200 rpm และเมื่อเพิ่มความเร็ว 400 rpm พบว่า การส่ายตัวจะมีทิศทางไปทางด้านใดด้านหนึ่งโดยเฉพาะโดยมีระยะเคลื่อนที่ด้านข้างสูงสุด 3 mm ซึ่งเท่ากับช่องว่างที่มีอยู่ระหว่างล้อของแคร่จำลองกับล้อของชุดแท่นกลิ้ง โดยระยะเคลื่อนที่ด้านข้างก็จะลดลงจึงทำให้ไม่สามารถแสดงค่าความเร็ววิกฤตได้ ทั้งนี้ ที่ความเร็ว 400 rpm (คิดเป็นความเร็วสูงสุดของรถซ่อมบำรุงทางจริงประมาณ 34.9 km/hr) จึงถือเป็นข้อจำกัดของชุดทดลองซึ่งระยะเคลื่อนที่ด้านข้างสูงสุดดังกล่าวจะมีค่าน้อยกว่าระยะเคลื่อนที่ของชุดเพลาล้อที่ความเร็ววิกฤตที่มาจากผลการศึกษาระยะเคลื่อนที่ด้านข้างของแบบจำลองที่อัตราส่วน 1 ต่อ 4.5 ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วง 4.6 ถึง 6.8 mm [10]

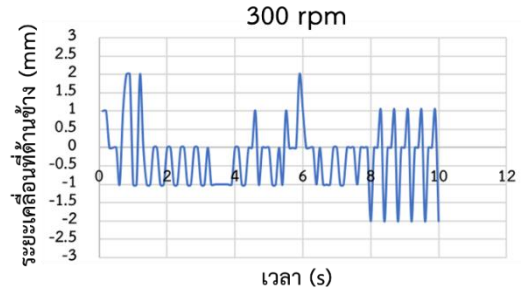
Journal of Applied Research on Science and Technology (JARST), Vol 21, Issue 2, 2022
ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)



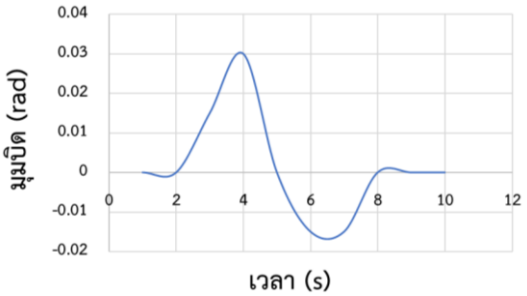
รูปที่ 9 ระยะเคลื่อนที่ด้านข้างที่ 200 rpm



รูปที่ 11 ระยะเคลื่อนที่ด้านข้างที่ 400 rpm



รูปที่ 10 ระยะเคลื่อนที่ด้านข้างที่ 300 rpm



รูปที่ 12 มุมบิดในแนวดิ่งเพลาล้อ

ตารางที่ 4 ความเร่งเฉลี่ย RMS ของท้ายแคร่และชุดเพลาล้อรถซ่อมบำรุงทางจำลองทดลองที่ความเร็ว 3 ระดับ

ตำแหน่ง	ความเร็วรอบ (rpm)	ความเร่งในแนวแกน x RMS (m/s^2)	ความเร่งในแนวแกน y RMS (m/s^2)	ความเร่งในแนวแกน z RMS (m/s^2)
ท้ายแคร่	200	17.4	26.3	21.6
	300	22.0	37.5	34.2
	400	23.3	35.3	36.6
ชุดเพลาล้อ	200	44.1	71.0	130
	300	60.5	67.7	217
	400	63.3	66.0	263

2. มุมบิดในแนวดิ่งเพลาล้อ

การวัดมุมบิดในแนวดิ่งของเพลาล้อ (ψ) ของรถซ่อมบำรุงทางจำลองหาได้จากการนำค่าผลต่างของการวัดระยะเคลื่อนที่ด้านข้างของเพลาตามหน้าและเพลาตามหลังมาคำนวณโดยอาศัยสูตรตรีโกณมิติ ค่าระยะห่างระหว่างเพลาหน้าและเพลาหลัง (Wheelbase) 667 mm จากการทดลองพบว่าความเร็วทั้ง 3 ระดับมีค่ามุมสูงสุดอยู่ที่ 0.03 rad (1.72°) โดยค่าของการวัดแกว่งอยู่ที่ -0.015 rad ถึง 0.03 rad ดังแสดงในรูปที่ 12

3. ความเร่งของท้ายแคร่และชุดเพลาล้อ

ตารางที่ 4 แสดงค่าความเร่งที่อ่านได้จากท้ายแคร่และชุดเพลาล้อของรถซ่อมบำรุงทางจำลองที่ความเร็ว 3 ระดับ เมื่อพิจารณาเฉพาะที่ความเร่งด้านข้าง (Lateral Acceleration) หรือ ความเร่งในแนวแกน y พบว่า ค่าความเร่งด้านข้างเฉลี่ยที่อ่านได้

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

จากการทดลองอยู่ในย่านที่แนะนำให้ใช้ทดสอบทั้งในส่วนของแคร่รถไฟและชุดเพลาล้อ ตัวอย่างเช่น ที่แคร่รถไฟมีค่ามาตรฐาน 37 m/s^2 และมีค่าการทดลอง 37.5 m/s^2 และที่ชุดเพลาล้อมีค่ามาตรฐาน 270 m/s^2 และมีค่าการทดลอง 67.7 m/s^2 นอกจากนี้ ยังสังเกตได้ว่าค่าความเร่งด้านข้างเฉลี่ยที่ชุดเพลาล้อมีค่าน้อยกว่าค่าที่กำหนดไว้ในมาตรฐานประมาณ 4 เท่าซึ่งน่าจะมีสาเหตุมาจากการที่ความเร็วที่ใช้ทดลองสูงสุดเท่ากับ 34.9 km/hr ซึ่งต่ำกว่าความเร็วสูงสุดสำหรับการวิ่งของรถซ่อมบำรุงทางที่ 60 km/hr

สรุปผล

การวัดสมรรถนะการวิ่งของรถซ่อมบำรุงทางจำเป็นต้องทราบย่านของค่าที่จะต้องตรวจวัดเพื่อให้สามารถเตรียมอุปกรณ์ที่จะใช้ได้ถูกต้องโดยรวมถึงการสอบเทียบอีกด้วย ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาแนวทางการกำหนดย่านการวัดของตัวแปรขึ้นจำนวน 3 ตัว โดยตัวแรกคือ ระยะเคลื่อนที่ด้านข้างของชุดเพลาล้อที่ประยุกต์ใช้หลักการทางวิศวกรรมซึ่งพบว่าถ้าวิ่งบนทางตรงระยะดังกล่าวต้องไม่เกิน 10 mm และทางโค้งไม่เกิน 19 mm สำหรับสองตัวแปรที่เหลือคือ มุมบิดรอบตัวในแนวดิ่งของเพลาล้อ และความเร่งในแนวแกน Y จะอาศัยข้อมูลจากชุดทดลองรถซ่อมบำรุงทางจำลองขนาด 1 ต่อ 6 บนชุดแท่นกลิ้งซึ่งจำลองได้เฉพาะการวิ่งทางตรงประกอบด้วย มุมบิดรอบตัวในแนวดิ่งของเพลาล้อไม่ควรเกิน 1.72° และความเร่งด้านข้างเฉลี่ย หรือความเร่งในแกน y ของแคร่ท้ายและชุดเพลาล้อไม่เกิน 37 และ 270 m/s^2 ตามลำดับ ทั้งนี้ชุดทดลองที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้มีข้อจำกัดในการทำความเร็วไม่เกิน 34.9 km/hr ซึ่งจำเป็นจะต้องได้รับการปรับปรุงเพื่อให้สามารถทำความเร็วได้เกินค่าความเร็ววิกฤตซึ่งจะทำทราบเสถียรภาพการวิ่งของรถซ่อมบำรุงทางได้

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ ทุนสนับสนุนการพัฒนาวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ภายใต้กองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์วิจัย และนวัตกรรม ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2564 (รหัสทุน ววน. FRB640013 และรหัสโครงการวิจัย FR64E0704C.5)

เอกสารอ้างอิง

1. Garg VK, Dukkipati RV. Dynamics of Railway Vehicle Systems. 1st Edition. Cambridge: Academic Press. September 1984.
2. Promla S. Requirement for Red-Line Commuter Rail System Project. Paper presented at: Train Performance Calculation and Design Meeting; 21 Mar 24; Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thailand.
3. Ahmadian M, Yang S. Effect nonlinearities on locomotive bogie hunting stability. Vehicle System Dynamics. International Journal of Vehicle Mechanics and Mobility. 1998;29(6):365-84.
4. Siwakosit W. Principle of Railway Engineering. 2nd Edition. Bangkok: Kasetsart University Press. 2020.
5. Iwniki S. Handbook of Railway Vehicle Dynamics 1st Edition. Boca Raton: CRC Press; 2006.
6. CENELEC. Railway applications - Rolling stock equipment - Shock and vibration tests. BS EN 61373. Brussels: British Standard; 2010.

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

7. Matej J, Seńko J, Awrejcewicz J. Dynamic properties of two-axle freight wagon with UIC double-link suspension as a non-smooth system with dry friction. Applied Non-Linear Dynamical Systems Springer Proceedings in Mathematics & Statistics. 2014;93:255-68.

8. Gretzschel M, Jaschinski A. Design of an active wheelset on a scaled roller rig. Vehicle System Dynamics. 2004;41(5):365-81.

9. Siahkouhi M, Dadgostar Y, Jing G. Investigation of lateral displacement of the train due to passing from nose rail of high speed turnout. 7th International Conference on Recent Advances in Railway Engineering. Tehran-Iran. 2021.

10. Visayataksin N, Sooklamai M. Railway bogie vibration analysis by mathematical simulation model and a scaled four-wheel railway bogie set. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2018.

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

การจำลองการผลิตไฟฟ้าจากกังหันน้ำโดยใช้โปรแกรมแลปวิว

Simulation of the Generating Electricity from Water Turbines Using the LabVIEW

พงษ์ศิลป แก้วรัตนศรีโพธิ์*

Phongsin Kaewrattanasripho*

สาขาวิชาวิศวกรรมเทคโนโลยีระบบราง วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต อ.เมือง จ.ปทุมธานี 12000

Field of Railway System Technology Engineering, College of Engineering, Rangsit University, Pathumthani 12000, THAILAND

*Corresponding author e-mail: phongsin.k@rsu.ac.th

ARTICLE INFO

Article history:

Received: August 31, 2022

Revised: November 2, 2022

Accepted: November 4, 2022

Available online: December 2, 2022

DOI: 10.14456/jarst.2022.22

Keywords: Generating electricity, water turbine, LabVIEW

ABSTRACT

This article shows a simulation of water turbine energy generation using LabVIEW. The objectives of this research were to 1) design and simulate the generating electricity from water turbines, 2) find an error in the simulation, and 3) find the characteristics of electricity generation with water turbines. Input variables are flow rate, pressure, torque, speed, voltage, and current to calculate water power, turbine power, electric power, water turbine efficiency, generator efficiency, and total system efficiency. A graphic user interface can adjust the flow rate and electric load. These variables will be displayed on the monitor, which makes it easy to control and understand the dynamics of the generating electricity from water turbines. The following findings were obtained 1) the simulation result has an average water power value of 266.67 W, an average water turbine power value of 51.13 W, an average electric power value of 41.17 W, an average water turbine efficiency value of 17.87 %, an average generator efficiency value 80.49 % and an average total system efficiency value 14.39 %. Which has a combined error of 1.55 %

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

or an average error of 0.26 %, 2) the simulation can show the relationship between the volume of water flow and the power produced, the relationship between turbine efficiency and the power produced, the relationship between turbine efficiency and the volume of water flow. The forecast error values were estimated by root mean square error (RMSE) with values of 0.14, 0.59 and 0.06, respectively.

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการจำลองการสร้างพลังงานเพื่อผลิตไฟฟ้าจากกังหันน้ำโดยใช้โปรแกรมแลปวิว ซึ่งมีวัตถุประสงค์ 1) เพื่อออกแบบและจำลองการผลิตไฟฟ้าจากกังหันน้ำ 2) เพื่อหาคุณลักษณะของการผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันน้ำ 3) เพื่อหาค่าความคลาดเคลื่อนของชุดจำลอง โดยระบบจะรับตัวแปรอินพุตคือ อัตราการไหล ความดันน้ำ แรงบิด ความเร็วรอบ แรงดันไฟฟ้า และกระแสไฟฟ้า เพื่อคำนวณหากำลังน้ำ กำลังกังหันน้ำ กำลังไฟฟ้า ประสิทธิภาพกังหันน้ำ ประสิทธิภาพเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ประสิทธิภาพรวมของระบบ สามารถปรับอัตราการไหล และโหลดทางไฟฟ้าด้วยส่วนติดต่อผู้ใช้กราฟิก (Graphic User Interface) โดยตัวแปรทั้งหมดนี้จะถูกแสดงผลที่จอ ซึ่งทำให้ง่ายต่อการควบคุมและเข้าใจพลวัตรของการผลิตไฟฟ้าจากกังหันน้ำได้เป็นอย่างดี ผลการวิจัยพบว่า 1) ผลการจำลองค่ากำลังน้ำเฉลี่ยเท่ากับ 266.67 W ค่ากำลังกังหันน้ำเฉลี่ยเท่ากับ 51.13 W ค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้เท่ากับ 41.17 W ค่าประสิทธิภาพกังหันน้ำเฉลี่ยเท่ากับ 17.87 %, ค่าประสิทธิภาพเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเท่ากับ 80.49 % และค่าประสิทธิภาพรวมทั้งระบบเฉลี่ยเท่ากับ 14.39 % ซึ่งมีค่าผิดพลาดรวมกัน 1.55 % หรือมีค่าผิดพลาดเฉลี่ย 0.26 % 2) ชุดจำลองสามารถแสดงความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำกับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกังหันน้ำกับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ และความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกังหันน้ำกับอัตราการไหลของน้ำ ซึ่งได้ประเมินค่าผิดพลาดจากการพยากรณ์โดยรากที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง (RMSE) มีค่ากับ 0.14, 0.59 และ 0.06 ตามลำดับ

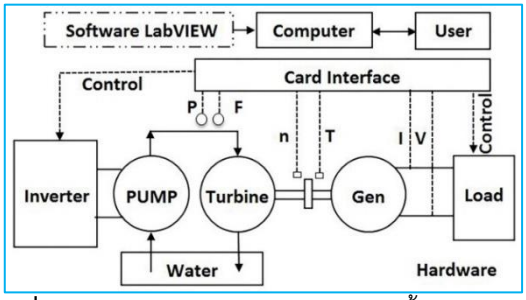
คำสำคัญ: ผลิตไฟฟ้า กังหันน้ำ แลปวิว

บทนำ

การผลิตไฟฟ้าจากกังหันน้ำ เป็นหัวข้อหนึ่งในการเรียนภาคปฏิบัติเพื่อให้เกิดความรู้และทักษะที่เชื่อมโยงกัน สำหรับห้องปฏิบัติการที่ต้องการสร้างระบบการผลิตไฟฟ้าจากกังหันน้ำเพื่อการศึกษาคุณลักษณะต่าง ๆ นั้นมีข้อจำกัดเกี่ยวกับพื้นที่ในการสร้างอ่างเก็บน้ำขนาดใหญ่เพื่อให้ได้ปริมาณน้ำและความดันน้ำในปริมาณมาก พื้นที่ติดตั้งขนาดเครื่องจักรที่มีขนาดใหญ่และราคาแพง ดังนั้นเพื่อแก้ปัญหาดังกล่าวจึงจำลองการผลิตไฟฟ้าจากกังหันน้ำ งานวิจัยการผลิตไฟฟ้าจากกังหันน้ำที่ผ่านมา [1-3] ได้ออกแบบและสร้างระบบการผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันน้ำ โดยใช้พลังน้ำจากแหล่งน้ำธรรมชาติที่มีกำลังน้ำ 1-3 kW สามารถผลิตไฟฟ้าได้ 0.68-2.1 kW [1,2] ซึ่งใช้มอเตอร์ไฟฟ้าเหนี่ยวนำ 3 เฟสมาดัดแปลงเป็นเครื่องกำเนิด [3] และใช้เครื่องกำเนิดไฟฟ้าแบบแม่เหล็กถาวร จากงานวิจัยที่ผ่านมา [4,5] ได้ออกแบบและสร้างระบบการผลิตไฟฟ้าโดยใช้พลังน้ำที่สร้างขึ้นไปหมุนกังหันน้ำที่ต่อเพลาร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า สามารถผลิตไฟฟ้าได้ 0.9-1.02 kW โดยแสดงผลบนหน้าจอคอมพิวเตอร์ ซึ่งจะเห็นได้ว่างานวิจัยที่กล่าวข้างต้นนั้นสามารถออกแบบและสร้างให้ได้ผลตามทฤษฎี

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

ได้ ดังนั้นงานวิจัยในครั้งนี้จะออกแบบและจำลองการผลิตไฟฟ้าด้วยกังหันน้ำให้ได้ผลตามทฤษฎีเช่นกัน แต่จะแตกต่างจากงานวิจัยที่ผ่านมา ตรงที่งานวิจัยนี้สามารถควบคุมกำลังน้ำ ควบคุมโหลดทางไฟฟ้า และแสดงผลต่าง ๆ ผ่านหน้าจอคอมพิวเตอร์แบบเรียลไทม์ (Real Time) ภาพรวมของการจำลองการผลิตไฟฟ้าจากกังหันน้ำในงานวิจัยนี้แสดงดังรูปที่ 1



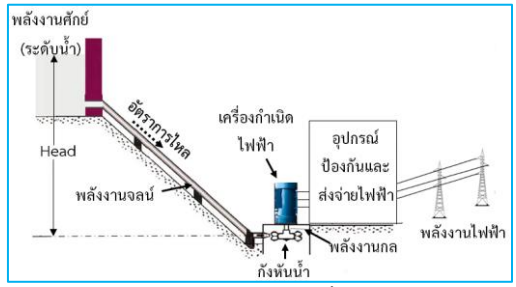
รูปที่ 1 ภาพรวมของการจำลองในงานวิจัยนี้

โดยฮาร์ดแวร์จะนำอินเวอร์เตอร์มาควบคุมปั๊มน้ำ เพื่อทำให้น้ำมีอัตราการไหล และความดันตามที่ต้องการ (เสมือนเขื่อนที่กักเก็บน้ำไว้ จะทำให้น้ำมีพลังงานศักย์ และเมื่อน้ำถูกปล่อยจึงทำให้น้ำมีพลังงานจลน์) ไปหมุนกังหันน้ำเพื่อเป็นต้นกำลังให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ซึ่งจะจ่ายไฟให้กับโหลดที่เป็นหลอดไฟ เซนเซอร์จะทำการตรวจจับอัตราการไหล (F) ความดันน้ำ (P) แรงบิดของกังหันน้ำ (T) ความเร็วรอบของกังหันน้ำ (n) กระแสไฟฟ้า (I) และแรงดันไฟฟ้า (V) ส่งสัญญาณไปที่การ์ดอินเตอร์เฟส นำไปประมวลผลในคอมพิวเตอร์ ส่วนซอฟต์แวร์เป็นโปรแกรมแลปวิว ใช้เขียนให้ผู้ใช้สามารถควบคุมอัตราการไหล ความดันน้ำ โหลด ผ่านทางคอมพิวเตอร์ และแสดงผลการวัด ค่าที่ควบคุม และค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่หน้าจอคอมพิวเตอร์

วิธีการดำเนินการวิจัย

ดำเนินการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องมี 2 เรื่อง หลักคือการผลิตไฟฟ้าจากกังหันน้ำ [6, 7] และโปรแกรมแลปวิว [8, 9] ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1. การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานน้ำเป็นการเปลี่ยนแปลงสภาพของน้ำจากสถานะพลังงานศักย์เป็นพลังงานจลน์ และเป็นพลังงานกล ทำให้กังหันน้ำหมุน ซึ่งเป็นต้นกำลังหมุนเครื่องกำเนิดไฟฟ้า และผลิตไฟฟ้าเข้าระบบส่งจ่ายไฟฟ้าและจ่ายให้ผู้ต้องการไฟฟ้า แสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2 การผลิตไฟฟ้าจากพลังงานน้ำ

1.1 กำลังและพลังงานของน้ำ จากกฎทรงพลังงาน (Energy Conservation) จะได้ว่าเมื่อน้ำที่ตกลงมาจากที่สูง พลังงานศักย์ของน้ำจะเปลี่ยนเป็นพลังงานจลน์ทั้งหมด ซึ่งสามารถเขียนเป็นสูตรได้ดังนี้

$$E_p = E_k \quad (1)$$

$$mgH = 0.5mv^2 \quad (2)$$

$$v^2 = 2gH \quad (3)$$

ซึ่งค่าความเร็วของน้ำหาได้จาก

$$v = (20H)^{0.5} \quad (4)$$

เมื่อ E_p คือ พลังงานศักย์ของน้ำ (J)

E_k คือ พลังงานจลน์ของน้ำ (J)

m คือ มวลของน้ำ (kg)

g คือ ค่าความเร่งเนื่องจากแรงโน้มถ่วงของโลก (มีค่าคงที่ 9.8 m/s^2 ประมาณ 10 m/s^2)

H คือ เฮด, หัวน้ำ หรือความสูงของน้ำจากระดับอ้างอิง (m)

v คือ ความเร็วของน้ำ (m/s)

การนำพลังงานน้ำมาหมุนกังหัน เพื่อผลิตไฟฟ้านั้นจะพิจารณาตัวแปรที่สำคัญคือ เฮด ความเร็วของน้ำ และอัตราการไหลของน้ำ ซึ่งหาค่าได้จาก

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

$$Q = Av \quad (5)$$

นำสมการ (4) แทนค่าสมการ (5) จะได้

$$Q = A(20H)^{0.5} \quad (6)$$

เมื่อ Q คือ อัตราการไหลของน้ำ (m^3/s)
A คือ พื้นที่หน้าตัดของลำน้ำ (m^2)

ซึ่งจะเห็นได้ว่าอัตราการไหลของน้ำจะแปรผันโดยตรงกับขนาดพื้นที่หน้าตัดของลำน้ำ และเฮด

1.2 การหาประสิทธิภาพรวมทั้งระบบ ในทางทฤษฎีถ้าน้ำมีความดัน 3 bar (หรือสูง 30 m) มีอัตราการไหลผ่านกังหันน้ำ 25 m^3/h จะได้ Hydroelectric Power เท่ากับ 2 kW (2.7 HP) สำหรับการปฏิบัติจะน้อยกว่า 2 kW เนื่องมาจากการเกิดการไหลในท่อทำให้อัตราการไหลที่กระทบกังหันลดลง การสูญเสียเนื่องจากแรงเสียดทานระหว่างน้ำกับผิวท่อ (Fluid Friction Losses) แรงเสียดทานระหว่าง Shaft กับ Bearing (Mechanical Friction Losses) และการสูญเสียจากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ดังนั้นการหาประสิทธิภาพระบบมีดังนี้คือ

ประสิทธิภาพกังหันน้ำ (η_{turbine}) หาได้จาก

$$\eta_{\text{turbine}} = \frac{P_{\text{turbine}}}{P_{\text{fliud}}} \quad (7)$$

ประสิทธิภาพเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (η_G) หาได้จาก

$$\eta_G = \frac{P_G}{P_{\text{turbine}}} \quad (8)$$

ประสิทธิภาพรวมทั้งระบบ (η_{total}) หาได้จาก

$$\eta_{\text{total}} = \eta_{\text{turbine}}.\eta_G \quad (9)$$

กำลังกังหันน้ำหาได้จาก

$$P_{\text{turbine}} = T\omega \quad (10)$$

นำ $\omega = 2\pi n$ แทนค่าสมการที่ 10 จะได้

$$P_{\text{turbine}} = \frac{T2\,\pi\,n}{60} \quad (11)$$

หรือถ้าทราบประสิทธิภาพเครื่องกำเนิดไฟฟ้า จะหากำลังกังหันน้ำได้จาก

$$P_{\text{turbine}} = \frac{P_G}{\eta_G} \quad (12)$$

เมื่อ P_{turbine} คือ กำลังกังหันน้ำ (W)
P_{fluid} คือ กำลังน้ำ ($\frac{Nm}{s}$หรือ W)
P_G คือ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (W)
T คือ แรงบิดทางกล (Nm)
ω คือ ความเร็วเชิงมุม (rad/s)
n คือ ความเร็วรอบของกังหันน้ำ (rpm)

กำลังของน้ำ (P_{fluid}) ขึ้นอยู่กับอัตราการไหลของน้ำ และเฮดสุทธิ (ΔH) ซึ่งหาค่าได้จากสมการ (13)

$$P_{\text{fluid}} = (\Delta H)Q \quad (13)$$

กรณีที่ Q มีหน่วยเป็น m^3/h และ ΔH มีหน่วยเป็น bar สามารถหาค่ากำลังน้ำจากสมการ (14)

$$\begin{aligned} P_{\text{fluid}} &= \left[bar\frac{m^3}{h}\right]\left[\frac{100000\text{N/m}^2}{1\,\text{bar}}\right]\left[\frac{1h}{3600s}\right] \\ &= \frac{1000}{36}(\Delta H)Q \\ &= \frac{(\Delta H)Q}{36} \text{ มีหน่วยเป็น kW} \end{aligned} \quad (14)$$

2. โปรแกรม LabVIEW เป็นโปรแกรมการจัดการในด้านการวัดและเครื่องมือวัดอย่างมีประสิทธิภาพ แลปวิวเป็นโปรแกรมประเภท Graphic User Interface (GUI) ลักษณะภาษาของโปรแกรมเป็นภาษารูปภาพ (Graphical Language) ซึ่งง่ายต่อการเขียนโปรแกรม มีความสะดวกและสามารถลดเวลาในการเขียนโปรแกรม โดยเฉพาะงานเขียนโปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อเชื่อมต่อกับอุปกรณ์อื่น ๆ เช่น Port, DAQ (Data Acquisition) หรือ Card ต่าง ๆ รวมถึงการจัดวางตำแหน่งในหน่วยความจำเพื่อที่จะสามารถรวบรวมข้อมูลมาใช้ในการคำนวณและเก็บข้อมูล เมื่อสร้างเสร็จผู้ที่นำไปใช้งานก็ง่ายต่อการเรียนรู้ โปรแกรมแลปวิวประกอบด้วย 2 ส่วนคือ

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

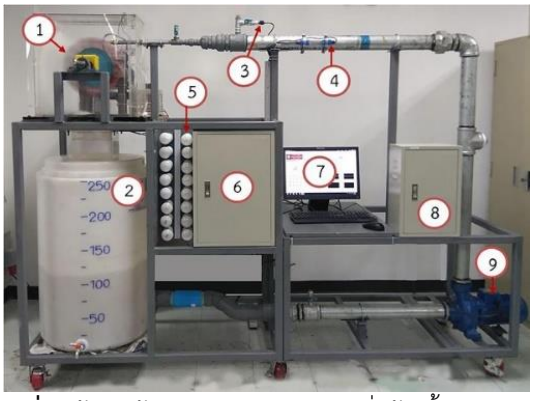
2.1 Front Panel เป็นส่วนที่ใช้สื่อสารกันระหว่างผู้ใช้กับโปรแกรม มี 2 ส่วนคือ 1) ตัวควบคุม (Controls) เช่น ช่องสำหรับใส่ค่า ปุ่มเลือกค่า ปุ่มปรับค่า สวิตช์เลือก 2) ตัวแสดงผล (Indicator) เช่นจอแสดงผล กราฟ เกจ มิเตอร์

2.2 Block Diagram เป็นเสมือนกับ Source Code ของโปรแกรมที่พัฒนาขึ้นด้วยแลปวิว สามารถที่จะทำงานได้ทันทีและมีการตรวจสอบข้อผิดพลาดของโปรแกรมตลอดเวลา ภายใน Block Diagram จะมีฟังก์ชันต่าง ๆ เช่น Measurement, Instrument, Vision and Motion, Connectivity, Mathematics, Signal Processing, Data Communication, Control & Simulation, FPGA Interface และอื่น ๆ

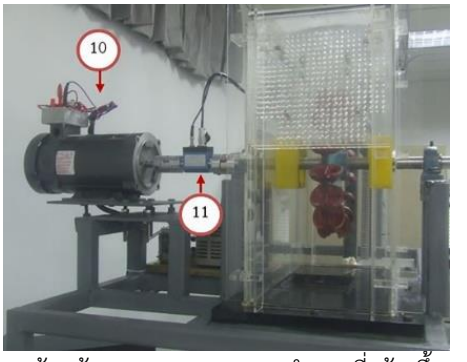
เมื่อดำเนินการศึกษาทฤษฎีที่เกี่ยวข้องเสร็จแล้ว จึงดำเนินการออกแบบและสร้างระบบจำลองการผลิตไฟฟ้าจากกังหันน้ำแสดงดังรูปที่ 3 และ 4 เขียนโปรแกรมเพื่อควบคุมและแสดงผลดังรูปที่ 5 และ 6 ทำการทดสอบและแก้ไขปรับปรุงให้ถูกต้อง

สำหรับในรูปที่ 3 เป็นการจำลองการผลิตไฟฟ้าจากกังหันน้ำมีรายละเอียดดังนี้

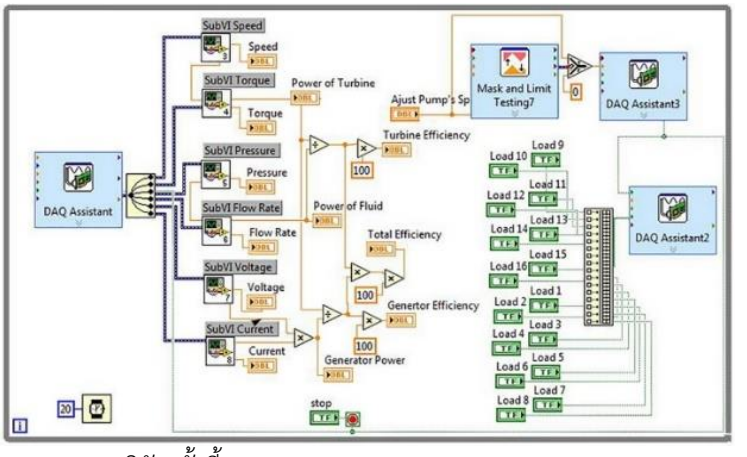
หมายเลข 1 กังหันน้ำ
หมายเลข 2 แท็งก์น้ำ
หมายเลข 3 เซนเซอร์ความดัน
หมายเลข 4 เซนเซอร์อัตราการไหล
หมายเลข 5 หลอดไฟฟ้า
หมายเลข 6 ตู้คอนโทรล
หมายเลข 7 จอมอนิเตอร์
หมายเลข 8 ตู้ควบคุมไฟฟ้ากำลัง
หมายเลข 9 ปั๊มน้ำ
หมายเลข 10 เครื่องกำเนิดไฟฟ้า
หมายเลข 11 เซนเซอร์แรงบิดและความเร็วรอบ



รูปที่ 3 ด้านหน้าของระบบการจำลองที่สร้างขึ้น



รูปที่ 4 ด้านข้างของของระบบการจำลองที่สร้างขึ้น



รูปที่ 5 Block Diagram ของงานวิจัยครั้งนี้

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

รูปที่ 6 หน้าต่าง Front Panel ของงานวิจัยครั้งนี้

ในรูปที่ 6 เป็นหน้าต่าง Front Panel ของงานวิจัยครั้งนี้ เพื่อใช้ควบคุมและแสดงผลการจำลองการผลิตไฟฟ้าจากกังหันน้ำมีรายละเอียดดังนี้

หมายเลข 12 ปุ่มควบคุมปั๊มน้ำ

หมายเลข 13 ปุ่มกดเปิด/ปิดโหลดไฟฟ้า

หมายเลข 14 แสดงค่าอัตราการไหลของน้ำในหน่วยของ m^3/h, l/min และ gal/min

หมายเลข 15 แสดงค่ากำลังไฟฟ้า

หมายเลข 16 แสดงค่าแรงดันไฟฟ้า

หมายเลข 17 แสดงค่ากระแสไฟฟ้า

หมายเลข 18 แสดงค่าความดันในหน่วยของ bar, MPa และ psi

หมายเลข 19 แสดงค่าแรงบิดในหน่วยของ Nm, lb.ft และ kgf.cm

หมายเลข 20 แสดงค่ากำลังของน้ำ

หมายเลข 21 แสดงค่าประสิทธิภาพกังหันน้ำ

หมายเลข 22 แสดงค่าความเร็วรอบในหน่วยของ rpm และ rad/s

หมายเลข 23 แสดงค่ากำลังของกังหันน้ำ

หมายเลข 24 แสดงค่าประสิทธิภาพรวม

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

เมื่อควบคุมปั๊มน้ำให้ทำงานที่ 60, 80 และ 100% ของพิกัดได้ Q เท่ากับ 4.79, 6, 6.96 m^3/h ตามลำดับ และใส่โหลดให้กับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า นำผลการจำลองมาวิเคราะห์เปรียบเทียบกับค่าทางทฤษฎีปรากฏผลดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ผลการจำลอง

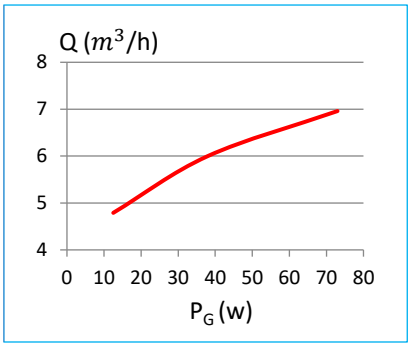
รายการ	การจำลอง	ทฤษฎี	Error (%)
$P_{fluid_{เฉลี่ย}}$ (W)	266.67	265.93	0.28
$P_{turbine_{เฉลี่ย}}$ (W)	51.13	50.93	0.39
$P_{G_{เฉลี่ย}}$ (W)	41.17	41.20	0.07
$\eta_{turbine_{เฉลี่ย}}$ (%)	17.87	17.85	0.11
$\eta_{G_{เฉลี่ย}}$ (%)	80.49	80.83	0.42
$\eta_{total_{เฉลี่ย}}$ (%)	14.39	14.43	0.28

จากตารางที่ 1 จะพบว่าค่ากำลังน้ำเฉลี่ยของการจำลองมีค่า 266.67 W และค่ากำลังน้ำเฉลี่ยทางทฤษฎีมีค่า 265.93 W ซึ่งมีค่าความผิดพลาดเท่ากับ 0.28 % ค่ากำลังกังหันน้ำเฉลี่ยของการจำลองมีค่า 51.13 W และค่ากำลังกังหันน้ำเฉลี่ยทางทฤษฎีมีค่า 50.93 W ซึ่งมีค่าความผิดพลาดเท่ากับ 0.39 % ค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้เฉลี่ยของการจำลองมีค่า 41.17 W และค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้เฉลี่ยทางทฤษฎีมีค่า 41.20 W ซึ่งมีค่าความผิดพลาดเท่ากับ 0.07 % ค่าประสิทธิภาพกังหันน้ำเฉลี่ยของการจำลองมีค่า 17.87 % และค่าประสิทธิภาพกังหันน้ำเฉลี่ยทางทฤษฎีมีค่า 17.85 % ซึ่งมีค่าความผิดพลาดเท่ากับ 0.11 % ค่าประสิทธิภาพเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเฉลี่ยของการจำลองมีค่า 80.49 % และค่าประสิทธิภาพเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเฉลี่ยทางทฤษฎี

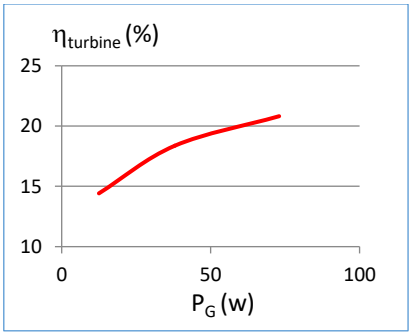
ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

มีค่า 80.83 % ซึ่งมีค่าความผิดพลาดเท่ากับ 0.42 % และค่าประสิทธิภาพรวมทั้งระบบเฉลี่ยของการจำลองมีค่า 14.39 % และค่าประสิทธิภาพรวมทั้งระบบเฉลี่ยทางทฤษฎีมีค่า 14.43 % ซึ่งมีค่าความผิดพลาดเท่ากับ 0.28 %

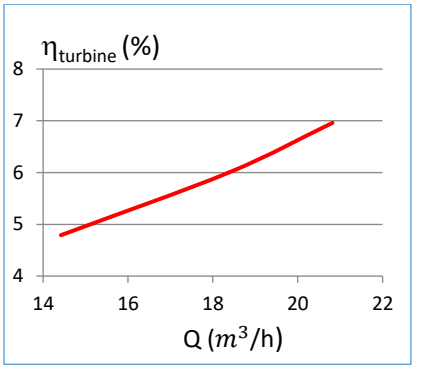
ถ้านำค่าจากการจำลองมาแสดงคุณลักษณะของอัตราการไหลของน้ำ กำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้ และประสิทธิภาพกังหันน้ำ โดยพล็อตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำกับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้แสดงดังรูปที่ 7 กราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกังหันน้ำกับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้แสดงดังรูปที่ 8 และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกังหันน้ำกับอัตราการไหลของน้ำแสดงดังรูปที่ 9 ซึ่งประเมินค่าผิดพลาดจากการพยากรณ์โดยรากที่สองของค่าเฉลี่ยความผิดพลาดกำลังสอง (RMSE) มีค่ากับ 0.14, 0.59 และ 0.06 ตามลำดับ



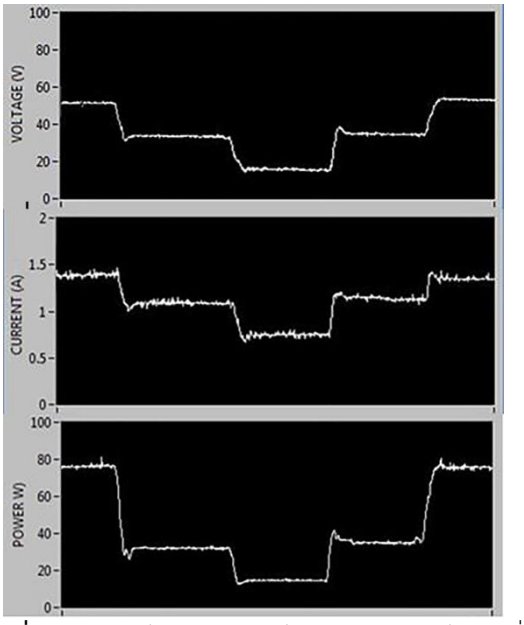
รูปที่ 7 ความสัมพันธ์ระหว่างอัตราการไหลของน้ำกับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้



รูปที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกังหันน้ำกับกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้



รูปที่ 9 ความสัมพันธ์ระหว่างประสิทธิภาพกังหันน้ำกับอัตราการไหลของน้ำ



รูปที่ 10 แรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้

สำหรับรูปคลื่นแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้จากเครื่องกำเนิดไฟฟ้า (ขนาด 0.5 HP 1,750 rpm) แสดงดังรูปที่ 10 โดยควบคุมอัตราการไหลที่ 100 %, 80 %, 60 % ซึ่งได้ค่าแรงดันไฟฟ้า 53.79 V , 33.43 V และ 17.98 V กระแสไฟฟ้า 1.36 A, 1.14 A และ 0.72 A กำลังไฟฟ้า 73 W, 38 W และ 12.5 W ตามลำดับ

การวิจัยครั้งนี้สามารถอภิปรายผลได้คือ ผลการจำลองการผลิตไฟฟ้าจากกังหันน้ำมีความถูกต้องเมื่อเปรียบเทียบกับการคำนวณทางทฤษฎี ซึ่งสอดคล้อง

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

กับงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่ได้ศึกษาและกล่าวไว้ในข้างต้น ทำให้สามารถนำไปใช้ศึกษาได้เป็นอย่างดี การใช้งานทำได้ง่ายและสะดวก สามารถควบคุมและดูผลจากโปรแกรมได้ทันที เหมาะสำหรับใช้เพื่อการศึกษาและงานวิจัยด้านพลังงาน

สำหรับข้อเสนอแนะคือควรใช้วัสดุ อุปกรณ์ที่ไม่เกิดสนิมได้ง่าย เช่น ปั๊มน้ำ ท่อ เป็นสแตนเลส ถ้าไม่สามารถทำได้ควรบำรุงรักษาโดยการสตาร์ทให้ปั๊มทำงาน และเปลี่ยนน้ำเพื่อยืดอายุการใช้งาน

สรุปผล

การวิจัยนี้ได้จำลองการผลิตไฟฟ้าจากกังหันน้ำโดยใช้อินเวอร์เตอร์ควบคุมปั๊มน้ำ เพื่อให้ได้อัตราการไหลและความดันน้ำตามต้องการไปหมุนกังหันน้ำ ซึ่งต่อเพลาร่วมกับเครื่องกำเนิดไฟฟ้า โดยมีหลอดไฟเป็นโหลดทางไฟฟ้า ทำการควบคุม และแสดงผลด้วยโปรแกรมแลปวิว ซึ่งได้ผลเป็นไปตามวัตถุประสงค์ โดยค่ากำลังน้ำเฉลี่ยเท่ากับ 266.67 W ค่ากำลังกังหันน้ำเฉลี่ยเท่ากับ 51.13 W ค่ากำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้เท่ากับ 41.17 W ค่าประสิทธิภาพกังหันน้ำเฉลี่ยเท่ากับ 17.87 % ค่าประสิทธิภาพเครื่องกำเนิดไฟฟ้าเท่ากับ 80.49 % และค่าประสิทธิภาพรวมทั้งระบบเฉลี่ยเท่ากับ 14.39 % โดยมีค่าผิดพลาดรวมกัน 1.55 % หรือมีค่าผิดพลาดเฉลี่ย 0.26 % สำหรับแรงดันไฟฟ้า กระแสไฟฟ้า และกำลังไฟฟ้าที่ผลิตได้นั้นจะมีค่าน้อยหรือมากขึ้นอยู่กับตัวแปรที่สำคัญคือ อัตราการไหลของน้ำ (ในงานวิจัยนี้ควบคุมอัตราการไหล โดยควบคุมความเร็วรอบของปั๊มน้ำ) ซึ่งอัตราการไหลนั้นขึ้นอยู่กับขนาดพื้นที่หน้าตัดของลำน้ำและเฮด โดยเกิดจากพลังงานศักย์ และถูกเปลี่ยนให้เป็นพลังงานจลน์ซึ่งเป็นความเร็วของน้ำ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยในครั้งนี้ ได้รับการสนับสนุนจากศูนย์สนับสนุนและพัฒนาการเรียนการสอน มหาวิทยาลัยรังสิต

เอกสารอ้างอิง

1. King Mongkut's University of Technology Thonburi. Installation and maintenance manual [Internet]. Bangkok: Ministry of Energy. 2017 [cited 2021 May 27]. Available from: https://Shorter.asia/m54Se
2. Thanatawutthikorn K, Santiwarakorn R, Nakhonsi S. An design study of mini hydro power plant from canal by twin vertical axis hydro turbine [Internet]. Khon kaen: Farm engineering and automation technology research group. 2017 [cited 2021 May 27]. Available from: https://feat.kku.ac.th/feat4/16.pdf
3. Khwanphet S. A study and test of a 5 kW water turbine for electricity generation [master's thesis]. Pathumthani: Rajamangala University of Technology Thanyaburi; 2017.
4. Lahamornchaiyakul W. The study of optimum parameters for low head micro water turbine using computational fluid dynamics (CFD) [master's thesis]. Pathumthani: Rajamangala University of Technology Thanyaburi; 2009.
5. Charoensuk N, Pattarakewit T, Chotisawad P. Control and Data Acquisition System for Francis. Phra Nakhon Si Ayutthaya: Research and development institute, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi; 2012.
6. Kaewrattanasripho P. The hydroelectric power generation. Pathumthani: College of engineering, Rangsit University; 2012.
7. Husain Z, Abdulla MZ, Alimuddin Z. Basic fluid mechanics and hydraulic machines. Hyderabad: BSP; 2008.

8. National Instruments Corporate. LabVIEW user manual. Austin: 2003.
9. Kaewrattanasripho P, Sangkaew P. [Simulation of Wind Turbine Characteristic Using LabVIEW]. JARST. 2018;17(1):55-61. Thai.

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

JARST Journal of Applied Research on Science and Technology
Rajamangala University of Technology Thanyaburi

ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาขั้วแคโทดระหว่าง Ag/C กับ AgMnxOy/C สำหรับเซลล์เชื้อเพลิงแอลคาไลน์น้ำตาลกลูโคสแบบไม่มีเยื่อเลือกผ่าน

Efficiency of Cathode Catalyst Between Ag/C and AgMnxOy/C for Glucose Membraneless Alkaline Fuel Cell

จักรพงศ์ ไชยบุรี* กันทรากร สุวรรณรักษา และ สิตานันท์ บุญยอด

Chakkrapong Chaiburi*, Kantrakorn Suwanraksa and Sitanan Bunyord

สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง อ.ป่าพะยอม จ.พัทลุง 93210

Department of Chemistry, Faculty of Science, Thaksin University, Phatthalung campus, Phatthalung, 93210, THAILAND

*Corresponding author e-mail: chakkrapong@tsu.ac.th

ARTICLE INFO

Article history:
Received: September 20, 2022
Revised: November 14, 2022
Accepted: November 16, 2022
Available online: December 19, 2022
DOI: 10.14456/jarst.2022.23

Keywords: alkaline fuel cells, glucose, reduction reaction, cathode electrode, fuel cell

ABSTRACT

This research aims to analyse and develop catalysts for use in membraneless alkaline glucose solution fuel cells. Glucose solution is a polyalcohol group. Glucose solution can be developed for use in oxidation reactions. The advantage of glucose solution is that it is a form of renewable energy, contributing to its suitability for alkaline fuel cells. Catalysts for cathode electrodes for use in membraneless glucose solution fuel cells are studied in this research. The AgMnxOy/C catalyst is resistant to the oxidation of glucose solution. After doping with glucose solution fuel, it is possible to test the electricity generation efficiency of alkaline fuel cells using glucose solution fuel at a concentration of 0.1 M. For the anode electrode, the catalytic performance of PdNi/C was further improved by synthesising Ni with Pd in a 1:1 atomic ratio. The experimental results involve a direct glucose membraneless alkaline fuel cell (DGMAFC). Using the PdNi/C anode and the AgMnxOy/C cathode showed a higher power density of about 77.30 % than using the PdNi/C anode and the Ag/C cathode. Therefore,

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

selection of glucose solution can be developed for renewable energy to increase energy. It is then necessary to study physical characteristics such as the alloy ratio and to study the electro-oxidation-reduction reactions of catalysts using scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive X-ray spectroscopy (EDS), and cyclic voltammetry (CV).

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาเพื่อนำมาใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงอัลคาไลน์สารละลายกลูโคสแบบไม่มีเยื่อเลือกผ่าน โดยเชื้อเพลิงสารละลายกลูโคสเป็นกลุ่มโพลีแอลกอฮอล์ สารละลายกลูโคสสามารถพัฒนาเพื่อใช้ในการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน โดยข้อดีของสารละลายกลูโคสคือ เป็นพลังงานทดแทนที่หมุนเวียนได้ ซึ่งเป็นเหตุผลที่ทำให้สารละลายกลูโคสเหมาะสมสำหรับการพัฒนาเพื่อใช้ในเชื้อเพลิงอัลคาไลน์ จากการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับขั้วแคโทดเพื่อนำมาใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงสารละลายกลูโคสแบบไม่มีเยื่อเลือกผ่านในงานวิจัยนี้ คือตัวเร่งปฏิกิริยา AgMnxOy/C ซึ่งสามารถทนทานต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของสารละลายกลูโคสเนื่องมาจากการเจือด้วยเชื้อเพลิงสารละลายกลูโคส และทดสอบประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงอัลคาไลน์ในการผลิตกระแสไฟฟ้าโดยใช้เชื้อเพลิงสารละลายกลูโคสที่ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ สำหรับขั้วแอโนดของงานวิจัยนี้จึงได้พัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยา PdNi/C โดยการสังเคราะห์ธาตุ Ni มาผสมกับธาตุ Pd ในอัตราส่วน Atomic ratio 1:1 จากผลการทดลองการทำงานของเซลล์เชื้อเพลิงอัลคาไลน์ป้อนกลูโคสโดยตรงแบบไม่มีเยื่อเลือกผ่าน (A Direct Glucose Membraneless Alkaline Fuel Cells (DGMAFC)) การเปรียบเทียบระหว่าง ตัวเร่งปฏิกิริยา PdNi/C เป็นขั้วแอโนด และตัวเร่งปฏิกิริยา AgMnxOy/C เป็นขั้วแคโทดแสดงค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้ามากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา PdNi/C เป็นขั้วแอโนด และตัวเร่งปฏิกิริยา Ag/C เป็นขั้วแคโทด ร้อยละ 77.30 ดังนั้นการเลือกใช้สารละลายกลูโคสซึ่งเป็นวัตถุดิบสามารถพัฒนาเป็นพลังงานทดแทนที่หมุนเวียนได้มาใช้ให้เกิดประโยชน์ในด้านพลังงาน โดยทำการศึกษาลักษณะทางกายภาพ อัตราส่วนของโลหะผสม และการศึกษาปฏิกิริยาออกซิเดชัน-รีดักชันของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscopy (SEM), Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS) และ Cyclic Voltammetry (CV)

คำสำคัญ: เซลล์เชื้อเพลิงอัลคาไลน์ กลูโคส ปฏิกิริยารีดักชัน ขั้วแคโทด เซลล์เชื้อเพลิง

บทนำ

เซลล์เชื้อเพลิงแอลคาไลน์แบบไม่มีเยื่อเลือกผ่านจากน้ำตาลกลูโคส (Glucose Membraneless Alkaline Fuel Cell) ได้พัฒนารูปแบบการป้อนเชื้อเพลิงน้ำตาลกลูโคสต่อเนื่อง ซึ่งเป็นการป้อนเชื้อเพลิงของเหลวโดยตรง (Direct Liquid Fuel Cell) จากการพัฒนารูปแบบเซลล์เชื้อเพลิงดังกล่าวซึ่งไม่มีการใช้เยื่อเลือกผ่านส่งผลให้ราคาต้นทุนในการผลิตต่ำลง รวมถึงตัวเร่งปฏิกิริยาที่ใช้ในงานวิจัยไม่ได้ใช้โลหะพลาตินัม (Pt) ซึ่งมีราคาสูง โดยรวมราคาในการผลิตถูกลง แต่ในทางกลับกันการออกแบบดังกล่าวส่งผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยาในขั้วแคโทดมีการสัมผัสสารเชื้อเพลิง การสัมผัสสารเชื้อเพลิงของตัวเร่งปฏิกิริยาอาจส่งผลให้ปฏิกิริยารีดักชันของออกซิเจน (Oxygen Reduction Reaction, ORR) เกิดการเปลี่ยนแปลงได้ [1] ซึ่งส่งผลให้ประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงลดลงตามไปด้วย ดังนั้นเพื่อเป็นการแก้ไขปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นจึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาที่สามารถทนทานต่อ

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

การเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เพื่อให้เหมาะสมต่อการใช้ตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับขั้วแคโทดในเซลล์เชื้อเพลิงดังกล่าว

การศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับขั้วแคโทดในช่วงเริ่มต้น นักวิจัยศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาจากโลหะพลาตินัม (Pt) [2] แต่เนื่องจากโลหะดังกล่าวมีราคาค่อนข้างสูง เพื่อเป็นการแก้ปัญหาดังกล่าว การพัฒนาตัวเร่งปฏิกิริยาขั้วแคโทดที่ประกอบด้วยโลหะชนิดอื่น อาทิ Au/Ni-foam [3] Ag/Ni-foam [4] และ MoO_2/β-MnO_2 composite [5] ตัวเร่งปฏิกิริยา MnxOy เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่แสดงปฏิกิริยา Oxygen reduction reaction (ORR) มีแนวโน้มที่ดี ในสารละลายอิเล็กโทร-ไลน์อัลคาไลน์ ซึ่งแมงกานีสเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและต้นทุนต่ำ [6] ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา MnxOy แสดงปฏิกิริยา Oxygen reduction reaction (ORR) ขึ้นอยู่กับ Valence state ลักษณะสัณฐานของตัวเร่งปฏิกิริยา และลักษณะของผลึก [6-8] Calegaro และคณะ [9] แสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่าง MnxOy บนคาร์บอนสามารถให้ 4-electron pathway ซึ่งทางผู้วิจัย Calegaro และคณะ จากการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยา MnxOy ประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น

ดังนั้นบทความวิจัยนี้จึงมีแนวคิดในการทดลองสังเคราะห์ตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงไฟฟ้าโลหะผสมซิลเวอร์-แมงกานิสบนวัสดุรองรับคาร์บอน (AgMnxOy/C) สำหรับเป็นตัวเร่งปฏิกิริยาขั้วแคโทด เมื่อเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา MnxOy ร่วมกับธาตุ Ag จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตกระแสไฟฟ้าดังข้อมูลที่กล่าวมาข้างต้น โดยวิเคราะห์ลักษณะเชิงเคมีไฟฟ้าเบื้องต้นด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี (Cyclic Voltammetry) วิเคราะห์ลักษณะกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด พร้อมทั้งวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบบริเวณพื้นที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคสเปกโทรสโคปีแบบกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (EDS)

วิธีดำเนินการวิจัย

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับขั้วแอโนด

การเตรียม 20 wt.% PdNi/C

การเตรียม 20 wt.% PdNi/C ปริมาณ 1 กรัม โดยนำผงคาร์บอนวัลแคนปริมาณ 0.8 กรัม สารประกอบแพลเลเดียม (II) คลอไรด์ (คำนวณเฉพาะธาตุแพลเลเดียม) ปริมาณ 0.1 กรัม และสารประกอบนิกเกิล(II)คลอไรด์ (คำนวณเฉพาะธาตุนิกเกิล) ปริมาณ 0.1 กรัม ผสมลงในน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 50 มิลลิลิตร จากนั้นกวนสารเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นปรับค่าพีเอส (pH) ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 2 โมลาร์ ให้มีค่า pH ประมาณ 11 เติมสารประกอบโซเดียมโบโรไฮไดรด์ ($NaBH_4$) กวนสารต่อเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เมื่อครบกำหนดกรองสารที่ได้ล้างด้วยน้ำกลั่น 2-3 รอบ นำไปอบแห้งในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

การเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยาสำหรับขั้วแคโทด

1. การเตรียม 20 wt.% AgMnxOy/C

เตรียมสารละลาย 1 M $AgNO_3$ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร และ สารละลาย 1 M $KMnO_4$ 10 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันภายโต้การกวนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส จากนั้น หยด 65% HNO_3 จนสารละลายมี pH เป็นกรด เมื่อสารละลายเป็นกรดแล้วนำมาลดอุณหภูมิในอ่างน้ำแข็งให้ได้อุณหภูมิ 0 องศาเซลเซียส สารละลายและตะกอนจะมีสีดำ-น้ำเงินจากนั้นนำมาแยกตะกอนโดยการหมุนเหวี่ยงและนำไปอบแห้งที่ 60-70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ชั่งตะกอนของ $AgMn_x$ที่ได้หลังจากการอบ 0.49 กรัม เติมน้ำปราศจากไอออน 50 มิลลิลิตร กวนให้เข้ากัน (ส่วนที่ 1) จากนั้นเตรียม Vulcan XC-72 Carbon ปริมาณ 1.50 กรัม เติมน้ำปราศจากไอออน 30 มิลลิลิตร และเติมเอทานอล 3 มิลลิลิตร นำไปอัลตราโซนิก 10-15 นาที (ส่วนที่ 2) จากนั้นนำส่วนที่ 2 เทผสมกับส่วนที่ 1 นำไปอัลตราโซนิก 10-15 นาที จากนั้นนำตะกอนและส่วนผสมที่ได้ไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และนำไปเผาที่อุณหภูมิที่ 400 องศาเซลเซียส

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จะได้ เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา 20 wt.% AgMnxOy/C

2. การเตรียม 20 wt.% Ag/C

การเตรียม 20 wt.% Ag/C ปริมาณ 1 กรัม โดยนำผงคาร์บอนวัลแคน ปริมาณ 0.8 กรัม และสารประกอบซิลเวอร์ไนเตรต (คำนวณเฉพาะธาตุ Ag) ปริมาณ 0.2 กรัม ผสมลงในน้ำปราศจากไอออนปริมาตร 50 มิลลิลิตร จากนั้นกวนสารเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดปรับค่าพีเอส (pH) ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 2 โมลาร์ ให้มีค่าพีเอสประมาณ 11 เติมสารประกอบโซเดียมโบโรไฮไดรด์ ($NaBH_4$) กวนสารต่อเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เมื่อครบกำหนดกรองสารที่ได้ล้างด้วยน้ำกลั่น 2-3 รอบ นำไปอบแห้งในตู้อบลมร้อนที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

การตรวจสอบเอกลักษณ์ทางกายภาพ

กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope, FT-SEM ยี่ห้อ Quanta 450 FEG) ศึกษาลักษณะของพื้นผิว และรูปร่างของตัวเร่งปฏิกิริยาที่เตรียม โดยใช้ตัวอย่างที่แห้งและคงลักษณะรูปร่าง นำตัวอย่างที่แห้งแล้วไปติดบนแท่นวางตัวอย่างโดยใช้วัสดุในการเชื่อมติดตัวอย่างกับแท่นวางตัวอย่าง เช่น Conductive Carbon Paint และ Double Slided Carbon Tape เป็นต้น และศึกษาวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบบริเวณพื้นที่ผิวตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคสเปกโทรสโคปีแบบกระจายพลังงานของรังสีเอกซ์ (Energy Dispersive X-ray Spectrometter, EDX ยี่ห้อ Oxford Instruments X-Max 50)

การเตรียมสารแขวนลอยตัวเร่งปฏิกิริยา (Catalyst ink)

เตรียมการทดสอบโดยชั่งตัวเร่งปฏิกิริยาปริมาณ 28 มิลลิกรัม และละลายด้วยสารละลายผสมไอโซโพรพานอล และน้ำปราศจากไอออน อัตราส่วน 7:3 โดยปริมาตร และนำส่วนผสมที่เตรียมไปอัลตราโซนิกเป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้สารละลายเข้ากัน

การเตรียมขั้วไฟฟ้าทำงาน (Working Electrode)

โดยขัดผิวหน้าขั้วไฟฟ้าคาร์บอนอสัณฐาน (Glassy Carbon) ด้วยผงอะลูมินาผสมน้ำปราศจากไอออน จากนั้นล้างด้วยน้ำปราศจากไอออนและเช็ดทำความสะอาดด้วยเอทานอล 95 %V/V อีกครั้งหนึ่ง รอจนเอทานอลระเหยหมดทำการหยดสารละลาย 5 wt% Nafion (บริษัท Sigma-Aldrich) ปริมาตร 1.5 ไมโครลิตร เมื่อสาร Nafion แห้งหมาดหยดสารแขวนลอยตัวเร่งปฏิกิริยา 5 ไมโครลิตร พักไว้ 24 ชั่วโมง จึงนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมทรี

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้าด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี (CV)

การศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยาเชิงไฟฟ้า AgMnxOy/C ของการเกิดปฏิกิริยารีดักชันในเชื้อเพลิงน้ำตาลกลูโคสและสารละลายแอลคาไลน์ (KOH) ด้วยเทคนิคไซคลิก-โวลแทมเมททรี กำหนดค่าพารามิเตอร์ให้มีช่วงค่าศักย์ไฟฟ้าจาก -1.2 V ถึง 1.2 V อัตราการการสแกนหยาบ (Rough Scan Rate) เท่ากับ 50 $mV.s^{-1}$ และอัตราการสแกนละเอียด (Fine Scan Rate) เท่ากับ 10 $mV.s^{-1}$

การศึกษาเบื้องต้นในสารละลายแอลคาไลน์ (KOH) ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาณ 50 มิลลิลิตร จากนั้นทำให้สารละลายอิ่มตัวด้วยแก๊สไนโตรเจนเป็นเวลา 30 นาที ใน Glass Cell ต่อขั้วไฟฟ้าทำงานที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาเข้ากับเครื่องโพเทนธิออสเตท ($EmStat^3$) โดยใช้ขั้วไฟฟ้าที่มีตัวเร่งปฏิกิริยาแผ่นโลหะพลาตินัม (Pt) เป็นขั้วไฟฟ้าร่วม และใช้ขั้วไฟฟ้าซิลเวอร์-ซิลเวอร์คลอไรด์เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง

การศึกษาในสารละลายน้ำตาลกลูโคสและสารละลายแอลคาไลน์ (KOH) โดยเติมสารละลายน้ำตาลกลูโคสลงในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาณ 50 มิลลิลิตร ให้มีความเข้มข้น 0.1 ถึง 0.5 โมลาร์ โดยลำดับ ดำเนินการศึกษาเช่นเดียวกับการศึกษาเบื้องต้นในสารละลายแอลคาไลน์

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

การวัดประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงน้ำตาลกลูโคสแบบแอลคาไลน์การวัดประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงน้ำตาลกลูโคสแบบแอลคาไลน์ตัวเร่งปฏิกิริยา PdNi/C กับ Ag/C และ PdNi/C กับ AgMnxOy/C

ตอนที่ 1 ชั่งตัวเร่งปฏิกิริยา ปริมาณ 0.05 กรัม ผสมลงในสารละลายแนฟฟิออน ปริมาตร 20 ไมโครลิตร ผสมสารทั้งหมดให้เข้าด้วยวิธีอัลตราโซนิคเป็นเวลา 5 นาที

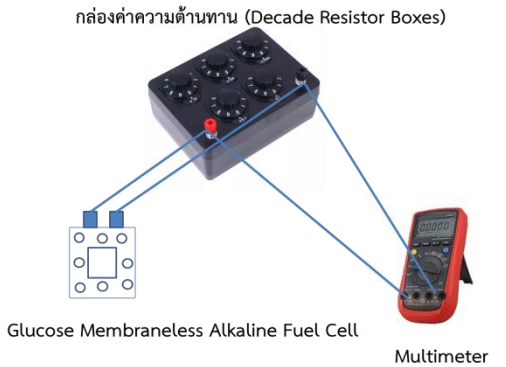
ตอนที่ 2 ตัดผ้าคาร์บอน ขนาด 2.5 x 3.0 เซนติเมตร นำไปวางทับบนแผ่นโลหะสแตนเลส จากนั้นนำบล็อกสแตนเลสซึ่งมีช่องว่างสำหรับระบายสารตัวเร่งปฏิกิริยา ขนาด 2.0 x 2.5 เซนติเมตร วางทับ นำสารตัวเร่งปฏิกิริยาจากตอนที่ 1 ระบายลงบนผ้าคาร์บอนจนหมด แล้วนำไปอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 45 นาที

การเตรียมแผ่นกั้นขั้วไฟฟ้า และแผ่นป้อนอากาศ (Air Cathode)

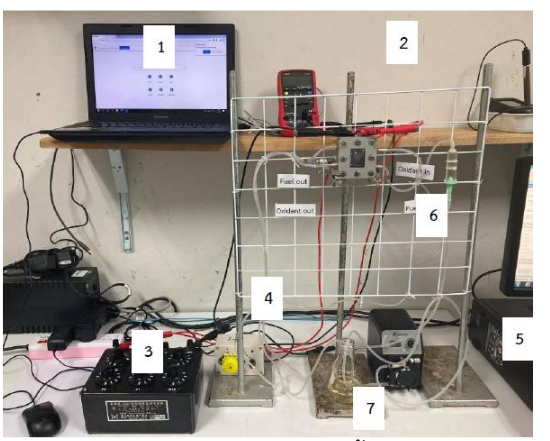
การเตรียมแผ่นกั้นขั้วไฟฟ้าโดยนำกระดาษโครมาโทกราฟีตัดให้มีขนาด 2.5 x 3.0 เซนติเมตร และการเตรียมแผ่นป้อนอากาศ (Air Cathode) นำผ้าคาร์บอนที่มีการเคลือบด้วยสารเทฟล่อน (PTFE) ตัดให้มีขนาด 2.5 x 3.0 เซนติเมตร

การทดสอบประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิงแอลคาไลน์ป้อนเชื้อเพลิงน้ำตาลกลูโคสโดยตรง

เตรียมสารละลายน้ำตาลกลูโคสโดยเจือจางสารละลายน้ำตาลกลูโคสให้มีความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 0.1 โมลาร์ จากนั้นป้อนสารละลายเข้าโครงเรือนฝั่งขั้วแอโนดด้วยอัตราการไหล 0.5 มิลลิลิตรต่อนาที และป้อนอากาศเข้าโครงเรือนฝั่งขั้วแคโทดด้วยอัตราการไหล 4 มิลลิลิตรต่อนาที ต่อวงจรเข้ากับกล่องค่าความต้านทาน (Decade Resistor Boxes) เพื่อวัดค่าความต่างศักย์ไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิงแสดงดังรูปที่ 1 โดยปรับค่าความต้านทานจาก 90,000 ถึง 3,000 โอห์ม และจัดอุปกรณ์การทดลองประสิทธิภาพดังรูปที่ 2 โดยที่หมายเลข 1 คือ คอมพิวเตอร์บันทึกผล, 2 คือ มัลติมิเตอร์อ่านค่าศักย์ไฟฟ้า, 3 คือ กล่องค่าความต้านทาน (Decade resistor boxes), 4 คือ มอเตอร์ปั๊มอากาศ, 5 คือ มอเตอร์ปั๊มสารเชื้อเพลิง, 6 คือ เซลล์เชื้อเพลิงแอลคาไลน์ป้อนเชื้อเพลิงโดยตรงรูปแบบเซลล์เดี่ยว (Fuel Cell TSU 01), 7 คือ ขวดสารละลายเชื้อเพลิง



รูปที่ 1 การต่อวงจรวัดความต่างศักย์ไฟฟ้าจากเซลล์เชื้อเพลิง



รูปที่ 2 การวัดประสิทธิภาพเซลล์เชื้อเพลิงสารละลายกลูโคสแบบไม่มีเยื่อเลือกผ่านร่วมกับ Air Cathode ที่ได้รับการออกแบบ

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

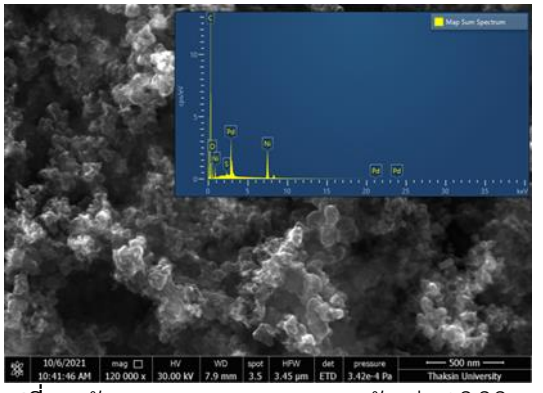
การศึกษาลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาและการวิเคราะห์ปริมาณธาตุต่างๆที่อยู่ในตัวเร่งปฏิกิริยา

ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope

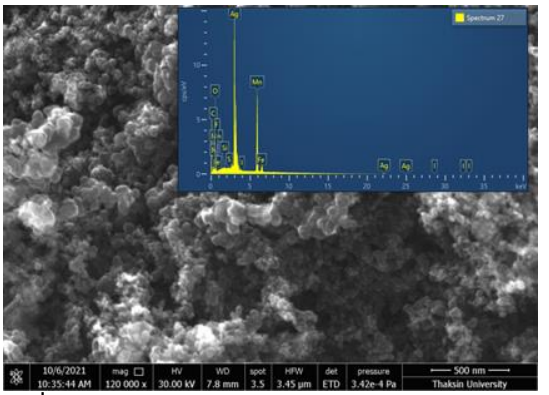
ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

(SEM) ที่กำลังขยายแตกต่างกัน พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีลักษณะเป็นทรงกลม และจะกันเป็นกลุ่มก้อนอยู่ทั่วพื้นผิวและลักษณะพื้นผิวตัวเร่งปฏิกิริยาแต่ละธาตุที่ศึกษาแสดงผลในรูปที่ 3 - 5 และผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเครื่อง Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) พบว่าธาตุที่เป็นสัดส่วนของตัวเร่งปฏิกิริยาชนิดต่าง ๆ

ตัวเร่งปฏิกิริยา PdNi/C มีลักษณะแผ่นหนาเกาะกันหนาแน่นเป็นกลุ่มก้อนบนพื้นผิวคาร์บอน ซึ่งเป็นผลให้ตัวเร่งปฏิกิริยามีปริมาณพื้นที่ผิวในการเกิดปฏิกิริยาสูง แสดงดังรูปที่ 3



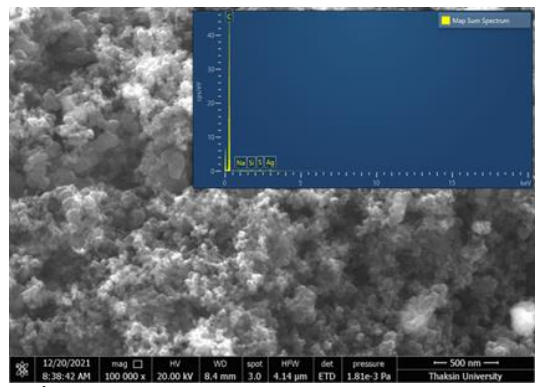
รูปที่ 3 ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา PdNi/C และองค์ประกอบของธาตุตัวเร่งปฏิกิริยา PdNi/C



รูปที่ 4 ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา AgMnxOy/C และองค์ประกอบของธาตุตัวเร่งปฏิกิริยา AgMnxOy/C

ตัวเร่งปฏิกิริยา AgMnxOy/C มีลักษณะพื้นที่ผิวเป็นทรงกลมขนาดเล็กมาก เกาะกันหนาแน่นเป็นกลุ่มก้อนบนพื้นผิวคาร์บอน แสดงดังรูปที่ 4

ตัวเร่งปฏิกิริยา Ag/C มีลักษณะพื้นที่ผิวเป็นทรงกลมขนาดเล็กมาก เกาะกันหนาแน่นเป็นกลุ่มก้อนบนพื้นผิวคาร์บอน แสดงดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 ลักษณะทางกายภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา Ag/C และองค์ประกอบของธาตุตัวเร่งปฏิกิริยา Ag/C

ตารางที่ 1 วิเคราะห์ผลองค์ประกอบของธาตุด้วยเครื่อง Energy Dispersive Spectroscopy (EDS)

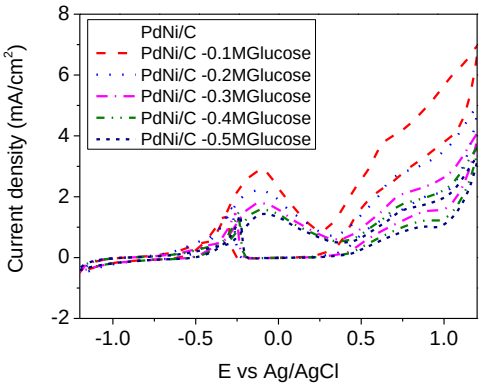
ตัวเร่งปฏิกิริยา	องค์ประกอบของธาตุ	ร้อยละโดยน้ำหนัก (wt%)
PdNi/C	Pd	5.88
	Ni	6.36
AgMnxOy/C	Ag	0.17
	Mn	0.53
Ag/C	O	8.11
	Ag	0.63

จากตารางที่ 1 จากการวิเคราะห์ผลองค์ประกอบของธาตุ ด้วยเครื่อง Energy Dispersive Spectroscopy (EDS) ซึ่งเป็นการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุเฉพาะจุดไม่น้อยกว่า 3 จุด แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย ซึ่งเป็นเทคนิคของเครื่องมือ EDS จึงอาจทำให้ผลการทดลองในเรื่องร้อยละโดยน้ำหนักขององค์ประกอบของธาตุคลาดเคลื่อน ไม่ตรงกับที่ได้ในขั้นเตรียมตัวเร่งปฏิกิริยา

Journal of Applied Research on Science and Technology (JARST), Vol 21, Issue 2, 2022
ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

การวิเคราะห์ประสิทธิภาพตัวเร่งปฏิกิริยาทางเคมีไฟฟ้าด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี (CV)

1. สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาขั้วแอโนด



รูปที่ 6 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของตัวเร่งปฏิกิริยา PdNi/C ในสารละลาย KOH 0.1M และสารละลายกลูโคสที่ความเข้มข้น 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 M ที่ scan rate 0.01 V/s บรรยากาศ N_2

ตัวเร่งปฏิกิริยา PdNi/C (รูปที่ 6) เมื่อเจือด้วยสารละลายกลูโคสที่ความเข้มข้น 0.1 M จะแสดงปฏิกิริยาออกซิเดชันช่วง Potential ที่ -0.35 ถึง 0.19 V และให้ค่า Current Density ที่ 2.87 mA/cm^2 ที่ Potential -0.099 V ตัวเร่งปฏิกิริยา PdNi/C ที่ไม่เจือด้วยสารละลายกลูโคส จะแสดงปฏิกิริยาออกซิเดชันช่วง Potential ที่ -0.68 ถึง -0.72 V และให้ค่า Current Density ที่ 1.23 mA/cm^2 ที่ Potential -0.70 V ซึ่งตัวเร่งปฏิกิริยา PdNi/C เมื่อเจือด้วยสารละลายกลูโคสที่ความเข้มข้น 0.1 M จะแสดงปฏิกิริยาออกซิเดชันให้ค่า Current Density มากกว่าร้อยละ 57.14 เมื่อไม่เจือด้วยสารละลายกลูโคส โดยการเติมโลหะ Ni ร่วมกับโลหะ Pd สามารถช่วยเพิ่มปฏิกิริยาออกซิเดชันของกลูโคส ซึ่งเป็นสารกลุ่มโพลีแอลกอฮอล์ ซึ่งราคาของโลหะ Ni มีราคาไม่แพง เมื่อเทียบกับโลหะ Pd จึงมีแนวโน้มในการพัฒนา

จากการศึกษาสมบัติการเกิดปฏิกิริยารีดอกซ์ (Redox Process) ของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเทคนิคไซคลิกโวแทมเมทรี [10] เป็นปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดคุณลักษณะทางไฟฟ้าเคมี โดยใช้เทคนิคการวิเคราะห์คุณลักษณะทางเคมีไฟฟ้าด้วยวิธีไซคลิกโวลแทมเมทรีซึ่งกลไกการเกิดปฏิกิริยาเคมีไฟฟ้าของตัวเร่งปฏิกิริยา Pd ที่ขั้วแอโนดในสภาวะด่าง ดังกรณีที่ทำการสแกนไปข้างหน้าที่ช่วงความต่างศักย์ -1.2 ถึง -0.5 V vs Ag/AgCl มีการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันแสดงการดูดซึมและดูดซับของไฮโดรเจนบนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา (ดังแสดงในรูปที่ 6) ดังสมการที่ (1)

$$Pd\text{-}H_{abs/ads} + OH^- \longrightarrow Pd - H_2O + e^- \quad (1)$$

ในช่วงความต่างศักย์ -0.5 ถึง 0.5 V vs Ag/AgCl จะเกิดปรากฏการณ์การดูดซับของไฮดรอกไซด์ไอออน (OH^-) บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา (Pd) ดังสมการที่ (2) ซึ่งเริ่มต้นในช่วงความต่างศักย์ติดลบมากๆ นอกจากนี้ยังมีการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของ Pd ดังสมการที่ (3) และ (4) โดยอาจมีบางส่วนที่เกิดขึ้นซ้อนทับกับช่วงของการคายไฮโดรเจนที่อยู่บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยา

$$Pd + OH^- Pd \longrightarrow -OH_{ads} + e^- \quad (2)$$

$$Pd - OH_{ads} + OH^- \longrightarrow Pd - O + H_2O + e^- \quad (3)$$

$$Pd - OH_{ads} + Pd - OH_{ads} \longrightarrow Pd - O + H_2O \quad (4)$$

ที่ความต่างศักย์มากกว่า 0.5 V vs. Ag/AgCl เกิดการสร้างชั้น Pd (II) Oxide บนพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาเป็นขั้นแรกของการเกิดออกไซด์บนพื้นผิวโลหะตัวเร่งปฏิกิริยา และที่ค่าความต่างศักย์เพิ่มสูงขึ้นตัวเร่งปฏิกิริยาจะเกิดเป็นโลหะออกไซด์เพิ่มมากขึ้นในสภาวะการสแกนย้อนกลับที่ช่วงความต่างศักย์มีค่าระหว่าง -0.25 ถึง -1.20 V vs Ag/AgCl ปฏิกิริยาการรีดักชันของ Pd (II) Oxide จึงเกิดขึ้นดังสมการที่ (5)

$$Pd - O + H_2O + 2e^- \longrightarrow Pd - 2OH^- \quad (5)$$

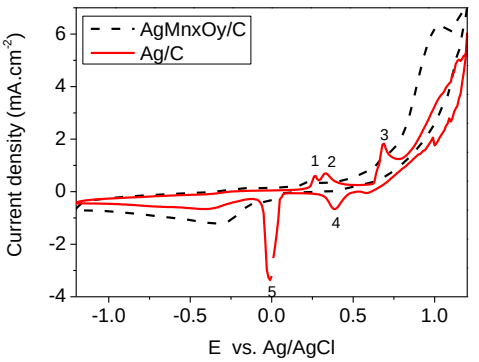
2. สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยาขั้วแคโทด

การศึกษาทำการทดลองในสารละลายแอลคาไลน์ที่ความเข้มข้น 0.1 M ซึ่งจะเห็นได้ว่าเมื่อสแกนช่วง

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

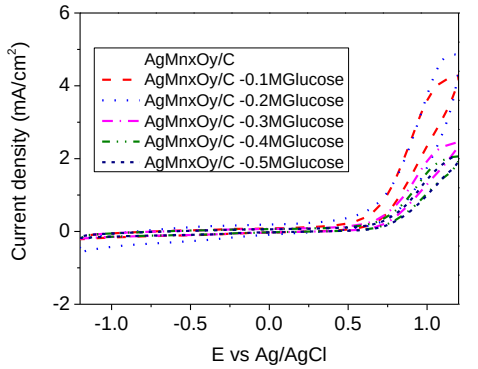
Anodic current ตัวเร่งปฏิกิริยา Ag/C (รูปที่ 7) แสดงปฏิกิริยาออกซิเดชัน 3 ตำแหน่ง ตำแหน่งที่ 1 ช่วงค่าศักย์ไฟฟ้า 0.17 ถึง 0.25 V เป็นการก่อตัวของ Monolayer AgOH และ Ag(I) [11] ในตำแหน่ง ที่ 2 ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.25 ถึง 0.43 V เกิดปฏิกิริยาการดูดซับอิเล็กตรอนของ AgO^- และเกิดชั้น Hydrous oxide ชั้นภายใน ส่วนในตำแหน่งที่ 3 ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.57 ถึง 0.76 V เป็นการฟื้นตัวของตัวเร่งปฏิกิริยา Ag และเกิดชั้น Oxide ภายนอก เพื่อทำปฏิกิริยาในรอบการสแกนต่อไป [11]

ตัวเร่งปฏิกิริยา Ag/C (รูปที่ 7) แสดงปฏิกิริยารีดักชัน (Cathode current) ในตำแหน่งที่ 3 และตำแหน่งที่ 4 แสดงศักย์ไฟฟ้าช่วง 0.30 ถึง 0.56 V และศักย์ไฟฟ้าช่วง -0.10 ถึง 0.05 V ตามลำดับ เกิด Silver oxide ต่อเนื่องมาจากช่วง Anodic current [11] ตัวเร่งปฏิกิริยา AgMnxOy/C (รูปที่ 7) เมื่อสแกนช่วง Anodic current ตัวเร่งปฏิกิริยา AgMnxOy/C ค่าศักย์ไฟฟ้า 0.40 ถึง 1.10 V เป็นการฟื้นตัวของตัวเร่งปฏิกิริยา Ag และเกิดชั้น Oxide ภายนอก

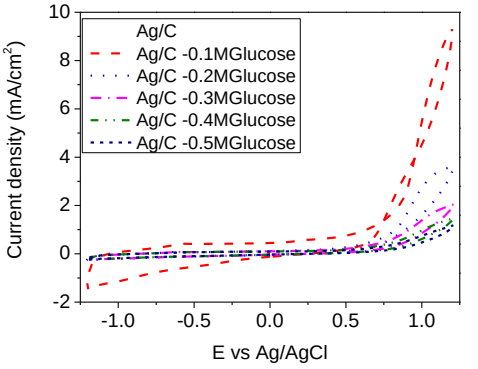


รูปที่ 7 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของตัวเร่งปฏิกิริยา AgMnxOy/C และ Ag/C ในสารละลาย KOH 0.1 M ที่ scan rate 0.01 V/s บรรยากาศ N_2

ในส่วนขององค์ประกอบMnxOy ของตัวเร่งปฏิกิริยา AgMnxOy/C (รูปที่ 7) แสดงปฏิกิริยารีดักชันช่วงค่าศักย์ไฟฟ้าที่ -1.20 ถึง -0.50 V เป็นการฟื้นตัวของตัวเร่งปฏิกิริยา MnO_2 เพื่อทำปฏิกิริยาในรอบการสแกนต่อไปดังสมการที่ 8 ซึ่งทับซ้อนกับช่วง -0.50 ถึง -0.15 V เกิดปฏิกิริยาการดูดซับอิเล็กตรอนของ $MnOOHO^-$ ดังสมการที่ (7)



รูปที่ 8 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของตัวเร่งปฏิกิริยา AgMnxOy/C ในสารละลาย KOH 0.1 M เจือด้วยสารละลายกลูโคสที่ความเข้มข้น 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 M ที่ scan rate 0.01 V/s บรรยากาศ N_2



รูปที่ 9 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของตัวเร่งปฏิกิริยา Ag/C ในสารละลาย KOH 0.1 M เจือด้วยสารละลายกลูโคสที่ความเข้มข้น 0.1 0.2 0.3 0.4 0.5 M ที่ scan rate 0.01 V/s บรรยากาศ N_2

สมการการเกิดปฏิกิริยาของโลหะแมงกานีสสมการที่ (6-9) [12]

$$2MnO_2 + 2H_2O + 2e^- \longrightarrow 2MnOOH + 2OH^- \quad (6)$$

$$2MnOOH + O_2 \longrightarrow 2(MnOOHO^-) \quad (7)$$

$$2(MnOOHO^-) + 2e\text{-} \longrightarrow 2MnO_2 + 2OH^- \quad (8)$$

$$\text{สมการรวม} : O_2 + 2H_2O + 4e^- \longrightarrow 4OH^- \quad (9)$$

Journal of Applied Research on Science and Technology (JARST), Vol 21, Issue 2, 2022
ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

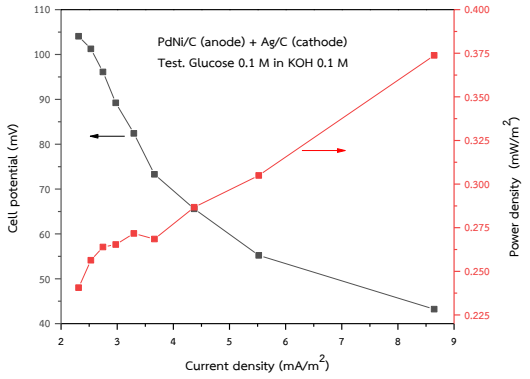
การศึกษาในสารละลายน้ำตาลกลูโคสและสารละลายแอลคาไลน์ (KOH) โดยเติมสารละลายน้ำตาลกลูโคสลงในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 0.1 โมลาร์ ปริมาณ 50 มิลลิลิตร ให้มีความเข้มข้น 0.1 ถึง 0.5 โมลาร์ โดยลำดับ

ตัวเร่งปฏิกิริยา AgMnxOy/C Ag/C เมื่อเจือด้วยสารละลายกลูโคสที่ความเข้มข้น 0.1 0.2 0.3 0.4 และ 0.5 M (รูปที่ 8 และ 9) สามารถทนต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้ ซึ่งเป็นคุณสมบัติของขั้วแคโทดซึ่งต้องการให้เกิดเฉพาะปฏิกิริยารีดักชัน และปฏิกิริยารีดักชันจะลดลงเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายกลูโคส ดังรูปที่ 8 และ 9 ซึ่งอาจมีการรบกวนของไฮโดรคาร์บอนที่ไม่นำไฟฟ้าคือสารละลายกลูโคสที่ความเข้มข้นมากกว่า 0.1 M ซึ่งอาจขัดขวางการทำปฏิกิริยารีดอกซ์ ส่งผลให้แสดงค่าปฏิกิริยารีดักชันลดลง สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา AgMnxOy/C และ Ag/C (ดังรูปที่ 8 และ 9) เมื่อเจือด้วยสารละลายกลูโคสที่ความเข้มข้น 0.1 M ยังคงแสดงปฏิกิริยาปฏิกิริยารีดักชัน จึงทำให้พอสรุปได้ว่าตัวเร่งปฏิกิริยา AgMnxOy/C และ Ag/C สามารถนำไปใช้ในขั้วแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้สารละลายกลูโคสเป็นเชื้อเพลิงในสารละลายอัลคาไลน์ได้ และมีความสามารถในการทนต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันเมื่อเจือด้วยสารละลายกลูโคส

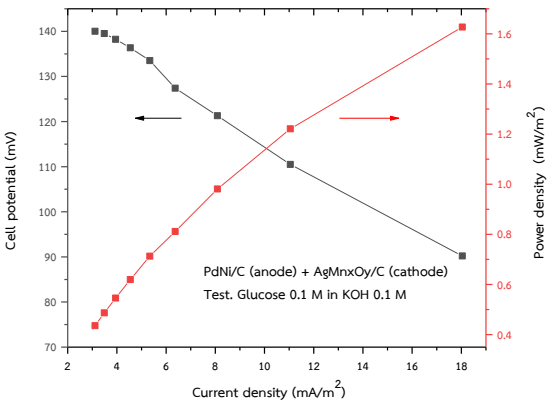
ในการวัดประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่าง PdNi/C กับ Ag/C จัดอุปกรณ์ดังรูปที่ 10

ตัวเร่งปฏิกิริยา PdNi/C เป็นขั้วแอโนด และตัวเร่งปฏิกิริยา AgMnxOy/C เป็นขั้วแคโทด (รูปที่ 11) มีประสิทธิภาพในการให้แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 0.14 V ที่ความต้านทาน 90,000 โอห์ม และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 1.63 mW/m^2 สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา PdNi/C เป็นขั้วแอโนด และตัวเร่งปฏิกิริยา Ag/C เป็นขั้วแคโทด (รูปที่ 10) มีประสิทธิภาพในการให้แรงดันไฟฟ้าเท่ากับ 0.104 V ที่ความต้านทาน 90,000 โอห์ม และความหนาแน่นกำลังไฟฟ้าเท่ากับ 0.37 mW/m^2

การวัดประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่าง PdNi/C กับ AgMnxOy/C จัดอุปกรณ์ดังรูปที่ 11



รูปที่ 10 การวัดประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงแอลคาไลน์น้ำตาลกลูโคสแบบไม่มีเยื่อเลือกผ่านระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่าง PdNi/C กับ Ag/C



รูปที่ 11 การวัดประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงแอลคาไลน์น้ำตาลกลูโคสแบบไม่มีเยื่อเลือกผ่านระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยาระหว่าง PdNi/C กับ AgMnxOy/C

การเปรียบเทียบระหว่าง ตัวเร่งปฏิกิริยา PdNi/C เป็นขั้วแอโนด และตัวเร่งปฏิกิริยา AgMnxOy/C เป็นขั้วแคโทดแสดงค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้ามากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา PdNi/C เป็นขั้วแอโนด และตัวเร่งปฏิกิริยา Ag/C เป็นขั้วแคโทด ร้อยละ 77.30 ที่ตรงกับการทดสอบประสิทธิภาพด้วยเทคนิค Cyclic

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

Voltammetry อย่างมีนัยสำคัญ สืบเนื่องจากตัวเร่งปฏิกิริยา MnxOy เป็นตัวเร่งปฏิกิริยาที่แสดงปฏิกิริยา Oxygen reduction reaction (ORR) มีแนวโน้มที่ดี ในสารละลายอิเล็กโทรไลน์อัลคาไลน์ ซึ่งแมงกานีสเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมและต้นทุนต่ำ [6] ประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยา MnxOy แสดงปฏิกิริยา Oxygen reduction reaction (ORR) ขึ้นอยู่กับ Valence state ลักษณะสัณฐานของตัวเร่งปฏิกิริยา และลักษณะของผลึก [6-8] Calegaro และคณะ [9] แสดงให้เห็นว่าความสัมพันธ์ระหว่าง MnxOy บนคาร์บอนสามารถให้ 4-electron pathway ซึ่งทางผู้วิจัย Calegaro และคณะ จากการศึกษาตัวเร่งปฏิกิริยา MnxOy ประสิทธิภาพเพิ่มมากขึ้น เมื่อนำ MnxOy มาเตรียมร่วมกับโลหะ Ag เป็น AgMnxOy/C ทำให้มีการผลิตกระแสไฟฟ้าเพิ่มมากขึ้น ดังรูปที่ 11 สำหรับการวัดประสิทธิภาพของเซลล์เชื้อเพลิงเพื่อหาค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้า ซึ่งได้มากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา PdNi/C เป็นขั้วแอโนด และตัวเร่งปฏิกิริยา Ag/C เป็นขั้วแคโทด ดังรูปที่ 10

สรุปผล

ผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของตัวเร่งปฏิกิริยาด้วยเครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) ที่กำลังขยายแตกต่างกัน พบว่าตัวเร่งปฏิกิริยามีลักษณะเป็นทรงกลม และจะกันเป็นกลุ่มก้อนอยู่ทั่วพื้นผิว สำหรับตัวเร่งปฏิกิริยา AgMnxOy/C และ Ag/C สามารถนำไปใช้ในขั้วแคโทดของเซลล์เชื้อเพลิงที่ใช้สารละลายกลูโคสเป็นเชื้อเพลิงในสารละลายอัลคาไลน์ได้ และมีความสามารถในการทนต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน เมื่อเจือด้วยสารละลายกลูโคสที่ความเข้มข้น 0.1 M ส่วนสารละลายกลูโคสที่ความเข้มข้นมากกว่า 0.1 M อาจมีการรบกวนของไฮโดรคาร์บอนที่ไม่นำไฟฟ้าซึ่งอาจขัดขวางการทำปฏิกิริยารีดอกซ์ ส่งผลให้แสดงค่าปฏิกิริยารีดักชันลดลงเมื่อนำไปใช้ในเซลล์เชื้อเพลิงแอลคาไลน์น้ำตาลกลูโคสแบบไม่มีเยื่อเลือกผ่าน เมื่อทำการทดสอบประสิทธิภาพของตัวเร่งปฏิกิริยาภายในเซลล์เชื้อเพลิงแอลคาไลน์น้ำตาลกลูโคสแบบไม่มีเยื่อเลือกผ่าน พบว่าการเปรียบเทียบระหว่างตัวเร่งปฏิกิริยา PdNi/C เป็นขั้วแอโนด และตัวเร่งปฏิกิริยา AgMnxOy/C เป็นขั้วแคโทดแสดงค่าความหนาแน่นกำลังไฟฟ้ามากกว่าตัวเร่งปฏิกิริยา PdNi/C เป็นขั้วแอโนด และตัวเร่งปฏิกิริยา Ag/C เป็นขั้วแคโทด ร้อยละ 77.30 ที่ตรงกับกับการทดสอบประสิทธิภาพด้วยเทคนิค Cyclic Voltammetry อย่างมีนัยสำคัญ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณทุนวิจัยแผนบูรณาการพัฒนาศักยภาพ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี วิจัยและนวัตกรรม ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2564

เอกสารอ้างอิง

1. Karim NA, Kamarudin SK. An overview on non-platinum cathode catalysts for direct methanol fuel cell. Appl Energ. 2013;103: 212-20.
2. Ren X, Lv Q, Liu L, Liu B, Wang Y, Liu A, et al. Current progress of Pt and Pt-base electrocatalysts used for fuel cells. Sustain Energy Fuels. 2020;4(1):15-30.
3. Chen J, Zheng H, Kang J, Yang F, Cao Y. Xiang M. An alkaline direct oxidation glucose fuel cell using three-dimensional structural Au/Ni-foam as catalytic electrodes. RSC Adv. 2017;7(5):3035-42.
4. Chen J, Zhao CX, Zhi MM, Wang K, Deng L, Xu G. Alkaline direct oxidation glucose fuel cell system using silver/nickel foams as electrodes. Electrochimica Acta. 2012;66:133-38.
5. Han XJ, Sun PX, Pan WJ, Chen LJ, Chen ZJ, Zhang Q, et al. Porous multi-layer MoO_2/β-

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

MnO_2 composite cathode for phosphorylated glucose fuel cell. J Solid State Electr. 2021; 25(6):1861-69.

6. Valim RB, Santos MC, Lanza MRV, Machado SAS, Lima FHB, Calegaro ML. Oxygen reduction reaction catalyzed by **ε**-MnO_2: Influence of the crystalline structure on the reaction mechanism. Electrochimica Acta. 2012;85:423–31.

7. Selvakumar K, Kumar SMS, Thangamuthu R, Ganesan K, Murugan P, Rajput P, et al. Physiochemical investigation of shape-designed MnO_2 nanostructures and their influence on oxygen reduction reaction activity in alkaline solution. J Phys Chem C. 2015;119:6604–18.

8. Sun W, Hsu A, Chen R. Carbon-supported tetragonal MnOOH catalysts for oxygen reduction reaction in alkaline media. J Power Sources. 2011;196:627–35.

9. Calegaro ML, Lima FHB, Ticianelli EA. Oxygen reduction reaction on nanosized manganese oxide particles dispersed on carbon in alkaline solutions. J Power Sources. 2006;158:735–39.

10. Laiwan P, Therdthianwong A, Therdthianwong S. Influence of carbon support type and metal adsorption time on performance of Pd/C catalyst for ethanol electro-oxidation in alkaline: The 54th Kasetsart University Annual Conference; 2016\February\2-5. Bangkok. Thailand.

11. Lu Y, Wang Y, Chen W. Silver nanorods for oxygen reduction: Strong effects of protecting ligand on the electrocatalytic activity. J Power Sources. 2011;196(6):3033–38.

12. Kostowskyj MA, Kirk D, Thorpe S. Ag and Ag–Mn nanowire catalysts for alkaline fuel cells. Int J Hydrog Energy. 2010;35:5666–72.

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

Effect of Paclobutrazol Concentrations and Foliar Application Times on Flowering of 'Mahachanok' Mango

Yaowarat Wongsrisakulkaew*, Unaroj Boonprakob and Lop Phavaphutanon

Department of Horticulture, Faculty of Agriculture at Kamphaeng Saen, Kasetsart University, Nakhon Pathom 73140, THAILAND

*Corresponding author e-mail: yaowarat.w@ku.th

ARTICLE INFO

Article history:
Received: July 21, 2022
Revised: November 27, 2022
Accepted: November 29, 2022
Available online: December 26, 2022
DOI: 10.14456/jarst.2022.24

Keywords: flowering, foliar application, Mahachanok mango, paclobutrazol

ABSTRACT

Paclobutrazol (PBZ) is a growth regulator that has been widely used to stimulate mango flowering by soil drenching. This study aimed to investigate the suitable concentration of PBZ and the number of application times that can induce flowering by foliar application. The experimental design was Completely Randomized Design (CRD) with 10 treatments and 4 replications. 'Mahachanok' mango trees were used in this study. They received two and three PBZ foliar applications, applied at 15 days after pruning (DAP) with 1,000 2,000, 3,000 and 4,000 mg/L and repeated with PBZ 2,000 mg/L for the second time and third time at 30 and 45 DAP comparing to 2,000 mg/L of PBZ at 30 DAP and non-PBZ application as the control treatment. The results showed that PBZ foliar application stimulated earlier flowering and a higher percentage of flowering shoots than the control. The earliest flowering was presented when they got 1,000 mg/L at 15 days and repeated at 30 days with 2,000 mg/L of PBZ, flowered within 106.5 DAP and 72.5 % of new shoots flowering. Moreover, the length of mango panicles with PBZ treatments was significantly shorter than that of the control treatment. PBZ doses and the number of application times caused phytotoxic symptoms in vegetative shoots and inflorescences. However, there were found phytotoxic symptoms of shoots and panicles on the PBZ treatments at the rate of 2,000

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

mg/L and above, at the first foliar application (15 DAP). The phytotoxic symptoms on shoots and panicles occurred after mango trees received foliar application at 15 and 90 days, respectively.

INTRODUCTION

Mango is considered a commercially important tropical fruit crop in Thailand. The cultivation of mango trees is highly well-known among planters all across the country. This is because mangoes can be cultivated for a variety of consuming purposes. Various species of mangoes are grown for ripe fruit production, while others are used for fruit preservation and production, and they can be edible as fresh fruits like apple fruits. The annual production of mangoes plays an important role in the Thai economy. The well-known commercial cultivar is Mahachanok.

Mango flowering is a physiological process that starts fruit production [1] and it is the first of several events that set the stage for mango production each year. It also influences the quality and quantity of fruits [2]. Mango trees flower in response to the age of the last vegetative flush in tropical conditions. Synchronization of the vegetative tree canopies is a necessary first step in the flowering management program. Synchronization growth is best accomplished by tip pruning all of the stems on the tree [3]. The next step is to decide whether to use paclobutrazol (PBZ). PBZ has been used with considerable success to induce flowering in several fruit crops such as apple [4], pummelo [5], apricot [6] and mango [7]. PBZ inhibits gibberellin biosynthesis reduces vegetative growth and induces water-stress tolerance and increases total non-structural carbohydrates (TNC) [8]. PBZ has been widely marketed throughout the tropics to stimulate mango flowering. Soil application of PBZ has been found to be more responsive in regard to suppressing vegetative growth and enhancing the reproductive growth in mango [9]. Studies have shown that PBZ is needed to be applied annually to increase mango fruit yields [10]. In recent years, many reports showed that the application of PBZ by soil drenching produced an uneven distribution of the chemical throughout the plant, as noticed by the uneven size of the panicles in the lower versus the upper part of the tree. Overdose may cause undesirable effects such as stunting of flushes, panicle malformation, vegetative and root growth of mango was reduced [11]. In areas where PBZ is applied regularly, there may be a risk of environmental contamination due to its residues persisting in soil for a very long time [12]. In another experiment, but with the variety ‘Namdokmai-sitong’, the application was carried out 15 and 30 days after pruning with doses of 500, 1,000, 1,500 and 2,000 mg/L, which resulted in a decrease in vegetative growth and an improvement in the number of flowers and buds [7]. In this context, the objective of this work is to evaluate the effects of PBZ doses applied by foliar application and foliar application time on flowering of ‘Mahachanok’ mango.

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

MATHERIALS AND METHODS

Experimental details

The experiment was carried out in the orchard of Tropical Fruit Research and Development Center, Kasetsart University, Kamphaeng Saen Campus, Nakhon Pathom province, Thailand. Mango trees cv. Mahachanok aged 6 years were selected as samples. Tip pruning was used to stimulate new shoots from all the branches of the tree (Figure 1). PBZ application rate was 200 mL of PBZ per shoot. The trees were randomly selected, and their shoots were marked around the canopy of each tree. The trees were monitored for flowering after the foliar application of PBZ.

(a)

(b)

(c)

Figure 1 New flush at 15 days (a), 30 days (b) and 45 days (c) after pruning in 'Mahachanok' mango.

Experimental design and data analysis

This study employed the Completely Randomized Design (CRD) method. Ten shoots of a mango tree represented one replication. There were four replications with ten treatments conducted in this study, as shown in Table 1. The data were collected in terms of parameters, including the percentage of flowering shoots, the time duration from the stage of shoots pruning to the flower emergence stage, panicle length that was measured when 50% blooming, and phenological changes of shoots. The data were analyzed using analysis of variance, and the means were further calculated using Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) at $p \leq 0.05$.

Table 1 PBZ doses and the number of foliar application times in each treatment.

Treatment	PBZ (mg/L)		
	15 DAP	30 DAP	45 DAP
1 (control)	-	-	-
2	-	2,000	-
3	1,000	2,000	-

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

Treatment	PBZ (mg/L)		
	15 DAP	30 DAP	45 DAP
4	2,000	2,000	-
5	3,000	2,000	-
6	4,000	2,000	-
7	1,000	2,000	2,000
8	2,000	2,000	2,000
9	3,000	2,000	2,000
10	4,000	2,000	2,000

RESULTS AND DISCUSSIONS

The study results showed that the foliar application of PBZ could induce a higher percentage of flowering shoots than the control trees. The mango trees received 1,000 mg/L at 15 days and the treatment was replicated at 30 days with 2,000 mg/L of PBZ. They obtained the highest percentage of flowering shoots of 72.5%. On the other hand, the control trees did not have any flowering shoots. Foliar application of PBZ could stimulate earlier flowering. There was a significant difference in time taken from shoot pruning to flower emergence of 'Mahachanok' mango. Trees treated with PBZ had a significantly earlier time to flowering than the control tree. Trees receiving 1,000 mg/L at 15 days and repeated at 30 days with 2,000 mg/L of PBZ had the earliest flowering at 106.5 days from shoot pruning (Table 2).

A significant difference was found on the length of panicles. The mango trees treated with PBZ had a significantly shorter panicle compared with the control. However, the higher concentration of PBZ gave a shorter panicle. Panicles from the trees receiving 2,000 mg/L of PBZ at 15 days and repeated at 30 days with 2,000 mg/L and repeated at 45 days with 2,000 mg/L of PBZ had the shortest panicle of 15.5 cm. The panicle length applied three times foliar application was shorter than that with twice times (Table 2). The acceptable panicle length was 30-35 cm.

The shoots receiving the PBZ application showed its effect by significantly decreasing the length of shoots and panicles (Table 2). In this study, the phytotoxic symptoms of shoots and panicles were found on the PBZ treatments at the rate of 2,000 mg/L and above at the first foliar application (15 DAP). The shoots receiving the PBZ at 4,000 mg/L at 15 DAP were stunted and panicle malformation was found (Figures 2 and 3). PBZ doses and the number of application times caused phytotoxic symptoms in vegetative shoots and inflorescence. The phytotoxic symptoms at shoots and panicles occurred after mango trees received foliar application for 15 and 90 days, respectively.

Pruning after harvest helped the emergence of floral buds, which gave rise to the new shoots. This produced more homogenous and strong buds for the next harvest. Subsequently, stems and shoots started to emerge at the same time [13]. PBZ, which is associated with climatic conditions and branch maturation, brings about conditions that are suitable for flowering. Furthermore, the combination of this product with nitrate sprays fosters floral initiation [3]. 'Mahachanok' mango trees are in the group of plants with intense vegetation capacity. Shoot tip pruning decreases the auxin synthesis at the

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

apex of branches [14], causing the transport of assimilated cytokinin to the axillary buds of branches under flowering conditions, contributing to the formation of axillary inflorescences [15].

Table 2 Effect of PBZ on the percentage of flowering shoots, time to flowering and length of a panicle of 'Mahachanok' mango after foliar application of PBZ at a different rate.

Treatment	Flowering shoot (%)	Time to flowering (days)	Length of panicles (cm)
T1	0.00 g	172.75 a	42.13 a
T2	12.50 f	111.25 c	33.00 c
T3	72.50 a	106.50 d	37.75 b
T4	32.50 de	107.25 d	28.63 d
T5	37.50 cd	107.75 d	28.50 d
T6	55.00 b	107.50 d	16.28 f
T7	25.00 e	107.25 d	24.65 e
T8	45.00 bc	107.75 d	15.50 f
T9	40.00 cd	107.50 d	26.65 de
T10	7.50 fg	162.25 b	25.50 e
F-test	*	*	*
cv.(%)	22.28	1.26	4.81

Means in each column followed by the same letter (s) are not significantly different at the 5% level by DMRT.

* = significantly different at $p \leq 0.05$

In mango trees, PBZ is known as one of the widely used plant growth regulators. It is basically used to inhibit gibberellin synthesis, which subsequently induces the process of flowering and fruiting. As a consequence, the vegetative growth decreases, and reproductive organs and the yield potential increase. The stage of flowering is very significant since it is the first stage of attaining fruit. In the literature, a number of current studies have significantly indicated that the quantity of flowering contributes to yields, and the duration of time that flowers start growing is significantly influenced by the time of fruit maturity. It has been accepted that early flowering gives rise to early fruit maturity. However, Mango trees used as commercial varieties do not flower regularly each year. In general, flowering is also alternate, causing considerable variation in the time of fruit maturity. The induction of flowering will certainly guarantee higher yields and promising returns to the planter [16].

After PBZ is used with mango trees, the chemical is transported up through the shoots, and because of its anti-gibberellins properties, the synthesis of flowering inhibitors is blocked, which, subsequently, allowing the flower-promoting factors to work. In this study, the effectiveness of PBZ application was found in decreasing shoot length. This is because PBZ inhibits

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

gibberellin biosynthesis by preventing the step in the oxidation of ent-kaurene to ent-kaurenoic acid [17], inducing unelongated shoots, even though cell division still occurs. Triazole compounds are anti-gibberellic that could adjust the gibberellin levels in shoot buds. PBZ application could increase the number of flowering shoots because the vegetative growth is low, and the reserves in the tree are higher. Similar findings were also found in Silva *et al*.'s [18] study on mango cv. Kent. In 'Tommy Atkins' mango, triazole products foster a transformation from the vegetative phase to the flowering phase, a cultivar that is difficult to change the phases [3]. Similarly, resembled results are reported in apples [4]. Additionally, PBZ is also found that it could induce flowering in mango trees because vegetative growth was decreased. The involvement of gibberellin in mango was also reported by Yamashita *et al*. [19], who maintained that gibberellin acted as a flowering inhibitor. The use of PBZ could stimulate a higher percentage of flowering shoots than those of the control trees. The finding in this research was also supported by the study of Yeshitela *et al*. [8], who claimed that PBZ produced the highest number of flowers per panicle in mango trees. The trees that received PBZ of more than 2,000 mg/L by the foliar application were stunted, and panicle malformation was found, giving rise to the decrease in the physiological and biochemical characteristics of leaf tissues in terms of PBZ doses [20].

PBZ, a triazole derivative, has been effectively utilized to induce and manipulate flowering, fruiting and tree vigor in several perennial fruit crops. Nevertheless, the use of PBZ in mango is quite prevalent. Soil application of PBZ has been effective in promoting flowering and increasing yields in many fruit crops. However, conflicting reports on its impact on fruit quality parameters are observed. Apart from reducing gibberellin levels, PBZ increases cytokinin contents, root activities and C : N ratio, whereas its influence on nutrient uptake lacks consistency. In soil and water environments, PBZ has been described as an environmentally stable compound with a half-life of more than a year, under both aerobic and anaerobic conditions [21, 22]. However, the multiple foliar application of PBZ was effective in promoting uniform off-season flowering in mango trees, without detrimental side-effects on non-uniform growth retardation and flowering [23, 24].

(a)

(b)

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

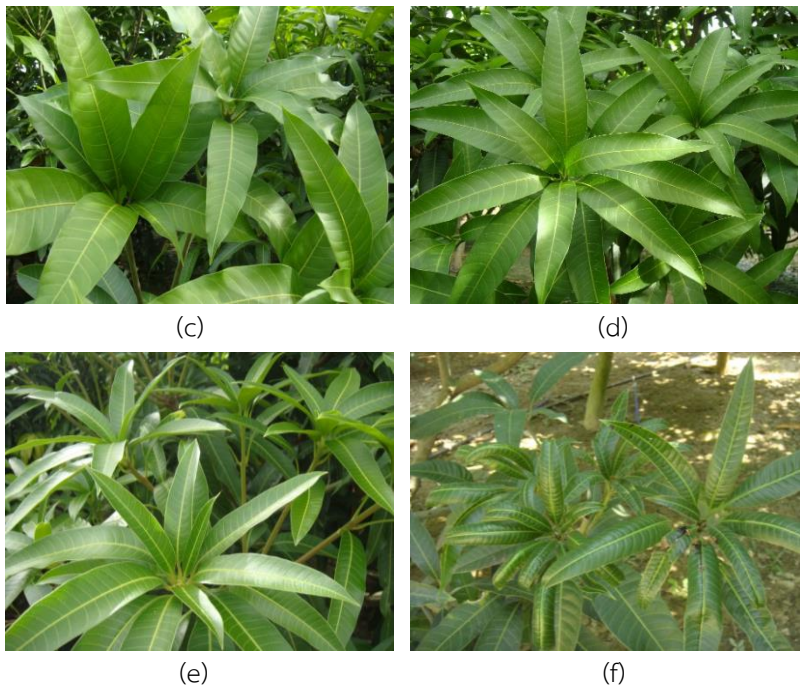
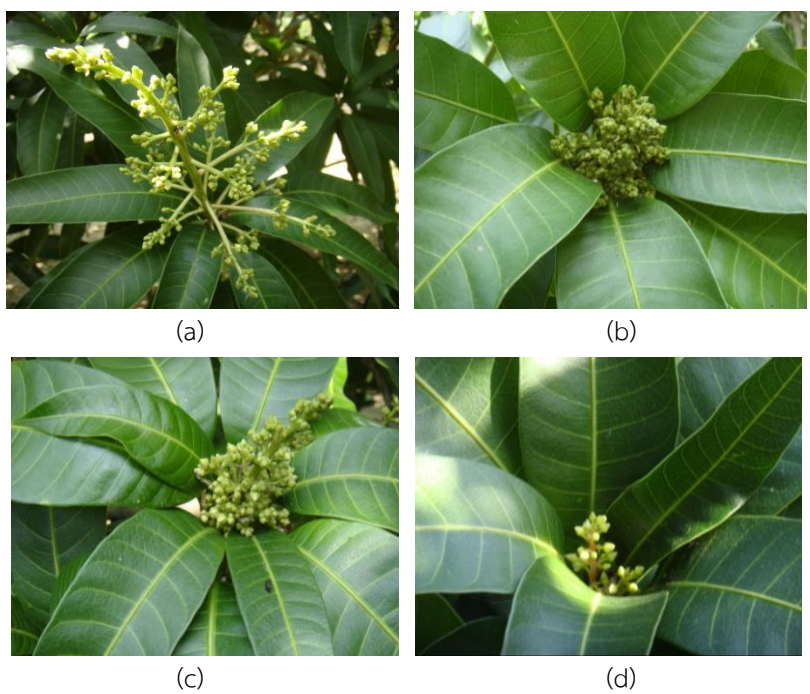


Figure 2 The normal 'Mahachanok' mango (a) and *p*hytotoxic symptoms of shoots after PBZ foliar application for 2,000 mg/L at 15, 30 and 45 DAP (b), 3,000 and 2,000 mg/L PBZ at 15 and 30 DAP, respectively (c), 3000 mg/L PBZ at 15 DAP and 2,000 mg/L PBZ at 30 and 45 DAP (d), 4,000 and 2,000 mg/L PBZ at 15 and 30 DAP, respectively (e), and 4,000 mg/L PBZ at 15 DAP and 2,000 mg/L PBZ at 30 DAP and 45 DAP (f)



ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

(e) (f)

Figure 3 The normal 'Mahachanok' mango (a) and phytotoxic symptoms of panicles after PBZ foliar application for 4,000 and 2,000 mg/L PBZ at 15 and 30 DAP, respectively (b), 2,000 mg/L PBZ at 15, 30 and 45 DAP (c), 2,000 mg/L PBZ at 15 and 30 DAP (d), 3,000 mg/L PBZ at 15 DAP and 2,000 mg/L PBZ at 30 DAP and 45 DAP, respectively (e), and 3,000 mg/L PBZ at 15 DAP and 2,000 mg/L PBZ at 30 DAP (f)

CONCLUSION

The PBZ applying as foliar application after pruning for mango trees cv. Mahachanok could induce earlier flowering, and it also increased the percentage of flowering shoots more than the non-sprayed trees. There was a significant difference in the time taken from shoot pruning to flower emergence of 'Mahachanok' mango. Trees with PBZ application have significantly affected faster flowering period than the non-sprayed trees. The earliest flowering was presented when they got 1,000 mg/L at 15 days and repeated at 30 days with 2,000 mg/L of PBZ. Moreover, the length of mango panicles with PBZ treatments was significantly shorter than with control treatment. However, the rate of PBZ use that negatively affected the phytotoxic symptoms of shoots and panicles was observed at more than 2,000 mg/L when first applied (15 DAP). Therefore, concentrations of PBZ and the number of foliar sprays could influence flowering period, panicle length and phytotoxic symptoms in mango trees cv. Mahachanok.

ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by a grant from the program Strategic Scholarships for Frontier Research Network from the Higher Education Commission, Thailand. The authors would like to thank the Department of Horticulture, Faculty of Agriculture at Kamphaeng Saen, Kasetsart University, Thailand.

REFERRENCES

1. Ramírez F, Davenport TL. Mango (*Mangifera indica* L.) flowering physiology. Sci Hortic. 2010;126(2):65-72.

2. Tiwari DK, Patel VB, Pandey K. Floral induction in mango: physiological, biochemical and molecular basis. Int J Chem Studies. 2018;6 (1):252-9.

3. Davenport TL. Reproductive physiology of mango. Braz J Plant Physiol. 2007;19:363-76.
4. Zhu LH, Peppel A, Li XY, Welander M. Changes of leaf water potential and endogenous cytokinins in young apple trees treated with or without paclobutrazol under drought conditions. Sci Hortic. 2004;99:133-41.
5. Phadung P, Krisanapook K, Phavaphutanon L. Paclobutrazol, water stress and nitrogen induced flowering in 'Khao Nam Phueng' pummelo. Kasetsart J (Nat Sci). 2011;45(2): 189-200.
6. Arzani K, Roosta HR. Effects of paclobutrazol on vegetative and reproductive growth and leaf mineral content of mature apricot (*Prunus armeniaca* L.) trees. J Agric Sci Technol. 2004;6:43–55.
7. Wongsrisakulkaew Y, Boonprakob B, Sethpakdee R, Juntawong N. Effect of paclobutrazol concentrations and time of foliar application on flowering of 'Namdokmai-Sitong' mango. Int J GEOMATE. 2017;12(30): 23-7.
8. Yeshitela T, Robbertse PJ, Stassen PJC. Paclobutrazol suppressed vegetative growth and improved yield as well as fruit quality of 'Tommy Atkins' mango (*Mangifera indica*) in Ethiopia. N Z J Crop Hortic Sci. 2004;32: 281–93.
9. Singh DK, Ram S. Level of paclobutrazol residues in shoot and fruit of mango. Indian J Plant Physiol. 2000;5:186-8.
10. Yadava RBR, Singh VK. Long term effects of paclobutrazol (PP 333) on yield and quality of Dashehari mango (*Mangifera indica* L.). Indian J Plant Physiol. 1998;3(2):166–7.
11. Singh Z. Effect of (2RS, 3RS) paclobutrazol on tree vigour, flowering, fruit set and yield in mango. Acta Hortic. 2000;525:459-62.
12. Sharma D, Mahesh DA. Uptake of soil applied paclobutrazol in mango (*Mangifera indica* L.) and its persistence in fruit and soil. Chemosophere. 2005;60:164-9.
13. Davenport TL. Pruning strategies to maximize tropical mango production from the time of planting to restoration of old orchards. HortScience. 2006;41(3):544-8.
14. Taiz L, Zeiger E. Fisiologia vegetal. 5 ed. Porto Alegre: Artmed; 2012.
15. Srivastava LM. Plant growth and development: hormones and the environment. New York: Academic Press; 2002.
16. Kumar A, Ram S, Singh CP. Application methods of paclobutrazol in mango Cvs & Its residual effect in leaf, fruit and orchard soil. Int J res agric for. 2020;7(2):24-39.
17. Sterrett JP. Paclobutrazol: A promising growth inhibitor for injection into woody plants. J Am Soc Hortic Sci. 1985;110(1):4-8.
18. Silva GJ, Souza NEM, Rodrigues JD, Ono EO, Mouco MAC. Uniconazole on mango floral induction cultivar 'Kent' at submediosaofrancisco region, Brazil. Acta Hortic. 2010;884:677-82.

ISSN: 2773-9376 (Print), 2773-9473 (Online)

19. Yamashita K, Kitazono K, Iwasaki S. Flower bud differentiation of Satsuma Mandarin as promoted by soil-drenching treatment with IAA, BA or paclobutrazol solution. J Jpn Soc Hortic Sci. 1997;66(1):67-76.

20. Souza MA, Mésquita AC, Simões WL, Ferreira KM, Araujo FJ. Physiological and biochemical characterization of mango tree with paclobutrazol application via irrigation. Pesq Agropec Trop. 2016;46(4):442-9.

21. Oliveira GP, Siqueira DL, Salomao LCC, Cecon PR, Machado DLM. Paclobutrazol and branch tip pruning on the flowering induction and quality of mango tree fruits. Pesq Agropec Trop. 2017;47(1):7-14.

22. Parnsakhorn S, Langkapin J, Phriknunchan S, Srichumpol A. Effect of osmotic solution concentration on mass transfer and quality of melon after osmosis. JARST. 2020;19(2): 132-43.

23. Tongumpai P, Jutamanee K, Subhadarshanbandhu S. Effect of paclobutrazol on flowering of mango cv. Khiew Sawoey. Acta Hortic. 1991; 291:67-70.

24. Hunter DM, Proctor JTA. Paclobutrazol bioassay using the axillary growth of a grape shoot. Hort Science. 1990;25:309-10.

Institute of Research and Development
Rajamangala University of Technology Thanyaburi
39 M.1 Klong 6, Thanyaburi, Pathumthani 12110, Thailand
Tel (02) 549-4681 Fax. (02) 577-5038, (02) 549-4680
www.ird.rmutt.ac.th

TCI
ศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย
Thai-Journal Citation Index Centre

THAIJO