



วารสารวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี



Research Journal

Rajamangala University of Technology Thanyaburi

Volume 19 Issue 2 July-December 2020

ISSN Print: 1686-8420
Online: 2651-2289

ปีที่ 19 ฉบับที่ 2 (กรกฎาคม-ธันวาคม 2563)

RJ-RMUTT
Science and Technology



วารสารวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ปีที่ 19 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม 2563

วัตถุประสงค์

วารสารวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี (RJ-RMUTT) เป็นวารสารที่เผยแพร่องค์ความรู้ และประสบการณ์ทางด้านวิชาการและวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยมีจุดหมายและวัตถุประสงค์ของวารสารวิจัยดังนี้

1. เพื่อเผยแพร่แนวความคิด งานวิจัย การพัฒนาและประเด็นสำคัญในด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
2. เพื่อกระตุ้นให้เกิดการอภิปรายทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีทุกสาขาวิชา ซึ่งเป็นทั้งงานวิจัยพื้นฐานและงานวิจัยประยุกต์

ทั้งนี้วารสารวิจัยของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีอยู่ในฐานข้อมูลดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (Thai Journal Citation Index Centre, TCI Centre) โดยผ่านการรับรองคุณภาพจาก TCI และจะมุ่งเน้นพัฒนาคุณภาพเพื่อเข้าสู่ฐานข้อมูลสากลต่อไป

ที่ปรึกษา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์สมหมาย	ผิวสอาด	อธิการบดี
รองศาสตราจารย์กฤษณ์ชนม์	ภูมิภิตติพิชญ์	รองอธิการบดี
นายพงศ์พิชญ์	ด่วนภูษา	รองอธิการบดี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์สิริแซ	พงษ์สวัสดิ์	ผู้เชี่ยวชาญเฉพาะด้าน
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	เหล่าศิริหงษ์ทอง	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ศาสตราจารย์พิเชษฐ	ลิ้มสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์คมสัน	มาลีสี	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ศาสตราจารย์สนอง	เอกสิทธิ์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์เกษียรหญิงพรอนงค์	อร่ามวิทย์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ชูกิจ	ลิมปิจำนงค์	สถาบันส่งเสริมการสอนวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
รองศาสตราจารย์วสกร	บัลลังก์โพธิ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

กองบรรณาธิการภายใน

รองศาสตราจารย์บุญยัง	ปลั่งกลาง	คณะวิศวกรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์จตุรงค์	ลิ่งกาพินธุ์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์จักรี	ศรีนนท์ฉัตร	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์สรพงษ์	ภวสุปรีย์	คณะวิศวกรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์อมร	ไชยสัตย์	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์นริศร์	บาลทิพย์	คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

จัดทำโดย

สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
เลขที่ 39 หมู่ที่ 1 ตำบลคลองหก อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110
โทรศัพท์ 0 2549 4681 โทรสาร 0 2577 5038 และ 0 2549 4680
Website: <http://www.ird.rmutt.ac.th>

คณะผู้จัดทำ

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

ออกแบบปก

นางสาวสรัญญา	สุวินัย	สถาบันวิจัยและพัฒนา
นางสาวมนต์ทิชา	รัตนพันธ์	สถาบันวิจัยและพัฒนา

จัดทำรูปเล่ม

นางสาวสรัญญา	สุวินัย	สถาบันวิจัยและพัฒนา
--------------	---------	---------------------

คำนำ

วารสารวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี (RJ-RMUTT) เป็นวารสารที่ส่งเสริมงานด้านวิจัยและดำเนินงานวิจัยทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีซึ่งอยู่ในฐานข้อมูลของศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (Thai Journal Citation Index, TCI Centre) รับผิดชอบบทความวิจัย บทความวิชาการ เปิดรับบทความทั้งเป็นภาษาไทยและภาษาอังกฤษ โดยครอบคลุมในสาขาวิชาต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อเผยแพร่และถ่ายทอดผลงานวิจัยและวิชาการ รวมถึงแนวคิดในการพัฒนางานวิจัย เพื่อกระตุ้นให้เกิดเป็นแนวทางการอภิปรายทุกสาขาซึ่งเป็นทั้งงานวิจัยพื้นฐาน และวิจัยประยุกต์ ทั้งภายใน และภายนอกมหาวิทยาลัย

สำหรับวารสารวิจัยปีที่ 19 ฉบับที่ 2 (กรกฎาคม – ธันวาคม 2563) ได้รวบรวมผลงานทางวิชาการจากผลการวิจัยทั้งสิ้น จำนวน 15 บทความ ประกอบด้วยบทความจากผลงานวิจัยจากหลากหลายสาขา ซึ่งได้ผ่านการกลั่นกรองจากผู้ทรงคุณวุฒิ (peer review) ทั้งภายนอกและภายในมหาวิทยาลัย กองบรรณาธิการหวังเป็นอย่างยิ่งว่าทุกบทความจะเป็นประโยชน์และสามารถช่วยพัฒนางานวิจัยแก่ผู้ที่สนใจให้ก้าวหน้าต่อไปได้

กองบรรณาธิการ

สารบัญ

พอลิเมอร์ไมโครแคปซูลกักเก็บอนุภาคนาโนโฟโตแคตาลิสต์สำหรับการกำจัดสีย้อมในน้ำเสีย	1
Polymer Microcapsules Encapsulating Photocatalyst Nanoparticles for Dye Treatment in Wastewater	
ณฤดี ศรีสว่าง, ปิยาลักษณ์ เงินชุกกลิน, อมร ไชยสัตย์ และ ปรียาภรณ์ ไชยสัตย์	
Structural and Mechanical Properties of Cubic Na₂O: First-Principles Calculations	17
Tanisara Noinonmueng and Kanoknan Phacheerak	
การปรับปรุงคุณภาพน้ำโดยกระบวนการทางชีวภาพสำหรับแหล่งน้ำสาธารณะ กรณีศึกษาบึงแก่นนคร	25
Water Quality Improvement by Biological Process for Public Water Resource: A Case Study Bueng Kaennakorn	
พิสิษฐ์ ตันกิตติรัตนากุล, วนัสพรวิทย์ สวัสดิ์ และ ศศิธร หาสิน	
คุณภาพการปรากฏลายนิ้วมือแฝงบนโลหะแต่ละประเภทโดยใช้วิธีการปิดผงฝุ่นสีดำ	34
The Quality Appearance of Latent Fingerprint on Various Metals by Using Black Dust Powder	
ณัฐธิดา ปนสันเทียะ และ วรวัช วิชชุวาณิชย์	
การเพิ่มประสิทธิภาพการติดตามเอกสารด้วยเทคโนโลยีเว็บ	45
Increasing Efficiency for Document Tracking using Web Technology	
อุไรวรรณ อินทร์แหยม, อนุพัฒน์ ชมสุทธา, มุฮัมหมัดซัมรี ทาเนาะ, พลรัตน์ พวงศิริ และ สหวิษ เงินปลับพลา	
การปรับปรุงกระบวนการโหลดสินค้าของธุรกิจวัสดุทดแทนไม้โดยใช้ผังสายธารคุณค่าและการจำลองสถานการณ์	60
Loading Process Improvement of Wood Substitute Industry Using Value Stream Mapping and Simulation	
จารุวิทย์ ไกรวงศ์ และ สิริอร เศรษฐมานิต	
Process Modelling of Microwave-assisted Fast Pyrolysis of Empty Fruit Bunch to Produce Biodiesel Production	73
Poj Hansirisawat, Thongchai R. Srinophakun and Somboon Sukpancharoen	
การพัฒนาแอปพลิเคชัน Chatbot สำหรับงานบริการนักศึกษา กรณีศึกษากองพัฒนานักศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ	85
Development of Chatbot Application for Student Services Case Study: Division of Student Development Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi	
สุมนา บุชบก, ณัฐพร เพ็ชรพงษ์ และ จิรนุช สิงห์โตแก้ว	

สารบัญ (ต่อ)

การจัดการสารเคมีและของเสียอันตรายในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ	95
Management of Chemicals and Hazardous Waste in Environmental Engineering Laboratory Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi ปิติพร มโนคูน และ ภัทรมาศ เทียมเงิน	
การแปลงข้อมูลการลงทุนโดยตรงจากต่างประเทศในประเทศไทย: กรณีศึกษาประเทศอาเซียน	105
Transformations Foreign Direct Investment Data in Thailand: Case Study of ASEAN Countries ลัคนา วัฒนชะวีระกุล	
การศึกษาเปรียบเทียบการปกปิดร่องรอยหลักฐานดิจิทัล ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกู้คืนข้อมูลของซอฟต์แวร์นิติวิทยาศาสตร์	117
A Comparative Study of Digital Anti-Forensic Techniques Affecting the Effectiveness of Forensic Data Recovery Software ทรงวุฒิ นาคศิลป์ และ วรชัย วิชชุวานิชย์	
ผลของความเข้มข้นสารละลายออสโมติกต่อการถ่ายเทมวลสารและคุณภาพของเมล่อนหลังการออสโมซิส	132
Effect of Osmotic Solution Concentration on Mass Transfer and Quality of Melon after Osmosis สุนัน ปานสาคร, จตุรงค์ ลังกาพินธุ์, ศุภณัฐ พริกบุญจันทร์ และ อาทิพัฒน์ ศรีชุมพล	
ระบบสืบค้นฐานความรู้เชิงความหมายเพื่อส่งเสริมวัฒนธรรมและประเพณีชาวเขาเผ่าม้ง บ้านเข็กน้อย อำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์ โดยใช้เวิร์ดเพรสและออนโทโลยี	144
The Semantic Knowledge Base Searching System for Promoting Cultural and Traditional of Mong Tribe, Bankeknoi, Kaokor District, Phetchabun Province using WordPress and Ontology ดวงจันทร์ สีหาราช	
การควบคุมอุณหภูมิดินเพื่อการเพาะกล้าไม้เบญจมาศ	156
Temperature Control in Soil for the Growth of Chrysanthemum Sprout มานพ แยมแพง, จักรวาล บุญหวาน, ศิริชัย เทพา, ธนาพล สุขชนะ, พิมพ์พรรณ ปรี่องาม, รัตน์ชัย ไพรินทร์ และ มนพร คุปตาสา	
ผลของผงชาเขียวต่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียว	164
Effect of Green Tea Powder on Development of Fresh Milk Egg Thai Custard Dessert Product Supplemented with Green Tea Powder วัฒนา วิริวุฒิก	





พอลิเมอร์ไมโครแคปซูลกักเก็บอนุภาคนาโนโฟโตแคตาลิสต์สำหรับการกำจัดสีย้อมในน้ำเสีย Polymer Microcapsules Encapsulating Photocatalyst Nanoparticles for Dye Treatment in Wastewater

ณฤดี ศรีสว่าง¹ ปิยาลักษณ์ เงินชุกกลิ่น² อมร ไชยสัตย์^{1,3} และ ปรียาภรณ์ ไชยสัตย์^{1,3*}

Narudee Srisawang¹, Piyalak Ngernchuklin², Amorn Chaiyasat^{1,3} and Preeyaporn Chaiyasat^{1,3*}

¹ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี

²สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) อ.คลองหลวง จ.ปทุมธานี

³หน่วยวิจัยออกแบบและพัฒนาวัสดุขั้นสูง คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี

¹Department of Chemistry, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thanyaburi, Pathumthani 12110, THAILAND

²Thailand Institute of Scientific and Technological Research (TISTR), Klong Luang, Pathumthani, 12120, THAILAND

³Advanced Materials Design and Development (AMDD) Research Unit, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thanyaburi, Pathumthani 12110, THAILAND

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

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Article history:	In this work, poly(methyl methacrylate-acrylic acid-divinyl
Received: 30 April, 2020	benzene) (P(MMA-AA-DVB)) microcapsules encapsulating both bismuth
Revised: 26 May, 2020	vanadate (BiVO_4) and magnetite (Fe_3O_4) nanoparticles were prepared
Accepted: 23 June, 2020	by microsuspension iodine transfer polymerization for the treatment
Available online: 14 August, 2020	of dyes in wastewater. The colloidal stable spherical microcapsules
DOI: 10.14456/rj-rmutt.2020.13	with high encapsulation efficiency were produced. The extraction of
Keywords: bismuth	PMMA segment in polymer microcapsule shell using various solvents
vanadate nanoparticle,	was carried out to increase the porosity of polymer shell leading to
microcapsule, poly(methyl	the increase of dye and encapsulated nanoparticle interaction. It was
methacrylate), dye	found that using polymer microcapsules at 0.5 wt% of acetone as a
treatment	solvent presented the highest dye removal efficiency equal to that of

pristine BiVO_4 nanoparticles. The dye removal efficacy of the microcapsules was gradually reduced when they were reused for 5 times. However, the treatment efficiency was still higher than 50 %. Therefore, the obtained P(MMA-AA-DVB) microcapsules exhibited high performance for dye treatment in wastewater.

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้ ได้ทำการเตรียมพอลิ(เมทิลเมทาคริเลท-อะคริลิก แอซิด-ไดไวนิลเบนซีน) ไมโครแคปซูล กักเก็บทั้งอนุภาคนาโนบิสหมักวานาเดทและเหล็กออกไซด์ ด้วยกระบวนการสังเคราะห์แบบแขวนลอยโดยกลไกอนุพลีอิสระแบบโยกย้ายไอโอดีนสำหรับการบำบัดสีย้อมในน้ำเสีย ได้ไมโครแคปซูลทรงกลมที่มีความเสถียรทางคอลลอยด์และมีประสิทธิภาพในการกักเก็บสูง ทำการสกัดส่วนของพอลิเมทิลเมทาคริเลทในเปลือกไมโครแคปซูลโดยใช้ตัวทำละลายชนิดต่าง ๆ เพื่อเพิ่มรพูนในเปลือกพอลิเมอร์ซึ่งจะทำให้มีการเพิ่มขึ้นของอันตรกิริยาระหว่างสีย้อมกับอนุภาคนาโนที่ถูกหุ้มอยู่ภายใน พบว่าการใช้พอลิเมอร์ไมโครแคปซูลที่ร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักของตัวทำละลายอะซิโตน ให้ประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมสูงที่สุดเท่ากับการใช้อนุภาคนาโนบิสหมักวานาเดทตั้งต้นโดยตรง ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมของไมโครแคปซูลจะค่อย ๆ ลดลงเมื่อใช้ซ้ำ 5 ครั้ง อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพการบำบัดยังคงมากกว่าร้อยละ 50 ดังนั้นพอลิ(เมทิลเมทาคริเลท-อะคริลิก แอซิด-ไดไวนิลเบนซีน) ไมโครแคปซูลที่เตรียมได้จึงมีประสิทธิภาพสูงสำหรับการบำบัดสีย้อมในน้ำเสีย

คำสำคัญ: อนุภาคนาโนบิสหมักวานาเดท ไมโครแคปซูล พอลิเมทิลเมทาคริเลท บำบัดสีย้อม

บทนำ

อุตสาหกรรมสิ่งทอเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่มีความสำคัญต่อเศรษฐกิจของประเทศ เนื่องจากช่วยเปลี่ยนวัตถุดิบสิ่งทอจากพวกเส้นด้ายดิบ และผ้าดิบเป็น

วัสดุสำเร็จ (Finishing Product) เพื่อใช้เป็นวัตถุดิบของอุตสาหกรรมขึ้นปลาย หรือจำหน่ายให้ผู้บริโภคโดยตรง ทำให้สามารถเพิ่มมูลค่าให้กับผลิตภัณฑ์สิ่งทอและลดการนำเข้าวัตถุดิบจากต่างประเทศได้เป็นอย่างดี แต่อุตสาหกรรมสิ่งทอต้องใช้น้ำในการย้อมผ้าเป็นปริมาณมาก เนื่องจากในกระบวนการผลิตซึ่งใช้สารเคมีและสีย้อมที่เหมาะสมสำหรับปรับปรุงคุณสมบัติของเส้นใยจำเป็นต้องอาศัยน้ำเป็นตัวกลาง เพื่อการล้างทำความสะอาดผ้าในขั้นตอนต่าง ๆ ซึ่งเมื่อปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมจะทำให้มีสารเคมีและสีย้อมต่าง ๆ เช่น คริสตัลไวโอเลต (Crystal Violet) เมทิลีนบลู (Methylene blue) สีย้อมอะโซ (Azo Dyes) และสีย้อมอะมิโนแอนทราควิโนน (Amino Anthraquinone) เป็นต้น (1) ปนเปื้อนออกมา ซึ่งเป็นสาเหตุให้มีค่าบีโอดี (Biochemical Oxygen Demand, BOD) และซีโอดี (Chemical Oxygen Demand, COD) สูงเกินมาตรฐาน ทำให้แหล่งน้ำดังกล่าวเกิดภาวะขาดออกซิเจนที่ละลายน้ำได้ (Dissolved Oxygen, DO) ส่งผลกระทบโดยตรงกับสิ่งมีชีวิตที่อยู่ในน้ำและทำให้เกิดภาวะน้ำเน่าเสียตามมา การกำจัดหรือทำลายสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียให้หมดไปหรือเหลือน้อยที่สุดให้ได้ตามมาตรฐานที่กำหนดและไม่ทำให้เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมจึงเป็นสิ่งจำเป็น น้ำเสียจากแหล่งที่ต่างกันจะมีคุณสมบัติแตกต่างกันจึงต้องเลือกวิธีการบำบัดที่เหมาะสม ซึ่งวิธีการบำบัดหรือทำลายสิ่งปนเปื้อนในน้ำเสียที่กำลังได้รับความนิยมวิธีหนึ่ง คือ กระบวนการทางโฟโตแคตตาไลติก (Photocatalytic Process) โดยอาศัยหลักการโฟโตแคตตาไลซิส (Photocatalysis) ของสารกึ่งตัวนำ (Semiconductor) หรือสารโฟโตแคตตาไลสต์ (Photocatalyst) เช่น ทังสเตน

ออกไซด์ (Tungsten Oxide; WO_3) (2, 3) ไทเทเนียมไดออกไซด์ (Titanium Dioxide; TiO_2) (4) และบิสมัทวานาเดท (Bismuth Vanadate; BiVO_4) (5, 6) โดยเทคนิคนี้อาศัยหลักการกระตุ้นด้วยแสง (แสงธรรมชาติหรือแหล่งกำเนิดแสงอื่น ๆ) ทำให้เกิดการเคลื่อนที่ของอิเล็กตรอนจากแถบวาเลนซ์ (Valence Band; VB) ไปยังแถบการนำ (Conduction Band; CB) ซึ่งทำให้เกิดช่องว่าง (hole; h^+) ที่แถบวาเลนซ์ และอิเล็กตรอน (electron; e^-) ที่แถบการนำ ซึ่งทำให้มีประสิทธิภาพสูงในการออกซิไดซ์และรีดิวซ์สีย้อม (7-9) ซึ่งวิธีนี้จะมีข้อดีคือ มีความคงทนต่อสภาพแวดล้อม เหมาะกับประเทศไทยที่มีแสงอาทิตย์เพียงพอในการเร่งปฏิกิริยา และสารกึ่งตัวนำมีราคาไม่แพง ซึ่งไทเทเนียมไดออกไซด์เป็นสารกึ่งตัวนำที่มีการใช้งานอย่างกว้างขวาง มีความคงทนต่อสภาพแวดล้อม และมีสมบัติที่ดีในการเกิดปฏิกิริยาภายใต้สภาวะที่มีแสงอัลตราไวโอเลต (UV light) แต่อย่างไรก็ตาม หากพิจารณาสภาวะแสงธรรมชาติหรือแสงอาทิตย์แล้ว แสงอัลตราไวโอเลตจะมีปริมาณน้อยมากเมื่อเทียบกับแสงช่วงตามองเห็น (Visible light) ดังนั้น การบำบัดสารอินทรีย์ด้วยไทเทเนียมไดออกไซด์จึงมีประสิทธิภาพจำกัด แต่หากใช้สารกึ่งตัวนำที่มีสมบัติการดูดกลืนช่วงแสงตามองเห็น เช่น ทังสเตนออกไซด์และบิสมัทวานาเดท น่าจะเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ได้มากขึ้น อย่างไรก็ตาม การทำงานของสารกึ่งตัวนำเหล่านี้ ยังมีความเสถียรค่อนข้างต่ำ โดยในกรณีการเคลือบสารกึ่งตัวนำในรูปของฟิล์มบางลงบนขั้วไฟฟ้า (10-12) พบว่าฟิล์มบางจะหลุดออกจากขั้วไฟฟ้าได้ง่ายเมื่อใช้กับตัวอย่างจริง หรือในกระบวนการบำบัดที่ใช้อนุภาคนำสารกึ่งตัวนำโดยตรงก็ยังมีข้อจำกัดด้านความเสถียรของอนุภาค และการเก็บสารกึ่งตัวนำที่ผ่านกระบวนการบำบัดเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้ ดังนั้น หากเพิ่มความเสถียรของสารกึ่งตัวนำ เช่น การหุ้มไว้ภายในพอลิเมอร์แคปซูล (Polymer Capsule) น่าจะเพิ่มประสิทธิภาพให้กับสารกึ่งตัวนำเหล่านี้ได้ นอกจากนี้ หากกักเก็บอนุภาคแม่เหล็กไว้ภายในพอลิเมอร์แคปซูล

ดังกล่าวด้วย จะช่วยให้สามารถนำแคปซูลกลับมาใช้ใหม่ได้ด้วยการใช้แม่เหล็กดูดพอลิเมอร์แคปซูลออกจากระบบ หลังจากการบำบัด จึงเป็นการแก้ไขปัญหาที่ตรงจุดสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัด และสะดวกในการนำกลับมาใช้ใหม่ได้เป็นอย่างดี

เทคนิคหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ในการเตรียมพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลกักเก็บอนุภาคนาโนบิสมัทวานาเดทและอนุภาคนาโนแม่เหล็กไว้ภายในได้อย่างมีประสิทธิภาพ คือ กระบวนการสังเคราะห์แบบแขวนลอยด้วยกลไกอนุมูลิสรแบบโยกย้ายไอโอดีน (Suspension Iodine Transfer Polymerization) (13, 14) เนื่องจากเป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพในการกักเก็บ (Encapsulation Efficiency) สูง โดยเริ่มจากการนำอนุภาคนาโนบิสมัทวานาเดทและอนุภาคนาโนแม่เหล็กที่ปรับสภาพพื้นผิวแล้วไปกระจายตัวในมอนอเมอร์ที่มีตัวริเริ่มปฏิกิริยา (Initiator) ก่อนนำไปผสมกับชั้นของสารละลายสารลดแรงตึงผิว เช่น พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl Alcohol; PVA) เมื่อใช้แรงเฉือนสูงจะได้หยดของมอนอเมอร์ (ที่มีอนุภาคนาโนบิสมัทวานาเดทและอนุภาคนาโนแม่เหล็กกระจายอยู่ภายใน) กระจายตัวอยู่ในน้ำ เมื่อให้ความร้อนที่เหมาะสม ตัวริเริ่มปฏิกิริยาจะเกิดการแตกตัวเป็นอนุมูลอิสระ (Free Radical) แล้วเกิดพอลิเมอไรเซชันกับมอนอเมอร์ภายในหยด สุดท้าย จะได้พอลิเมอร์ไมโครแคปซูลกักเก็บทั้งอนุภาคนาโนบิสมัทวานาเดทและอนุภาคนาโนแม่เหล็กไว้ภายใน

ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ จะศึกษาการเตรียมพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลกักเก็บอนุภาคนาโนบิสมัทวานาเดทและอนุภาคนาโนแม่เหล็กด้วยกระบวนการสังเคราะห์ดังกล่าว โดยในส่วนของการเลือกแคปซูลจะมีพอลิเมทิล อะคริเลท (Polymethyl Acrylate; PMA) เป็นองค์ประกอบ ซึ่งเมื่อถูกไฮโดรไลซิสในสภาวะเบสทำให้เปลี่ยนเป็นพอลิอะคริลิก แอซิด (Polyacrylic Acid; PAA) ที่มีหมู่คาร์บอกซิลอยู่ในสายโซ่ซึ่งตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงพีเอช (pH Responsive) (15) โดยหมู่คาร์บอกซิลเหล่านี้จะแตกตัวในสภาวะเบส จะทำให้

พอลิเมอร์ไมโครแคปซูลที่เตรียมได้มีการพองตัวและดูดซับน้ำเข้าไปสัมผัสกับอนุภาคนาโนบิสมีทวานาเดทที่ถูกกักเก็บอยู่ภายในได้ง่าย เมื่อมีแสงช่วยเร่งปฏิกิริยาจะสามารถผลิตไฮดรอกซิลแรดิคัล (Hydroxyl Radical; OH[•]) ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงในการออกซิไดซ์สารอินทรีย์สีย้อม สามารถเปลี่ยนหรือทำลายโครงสร้างของสีย้อม เช่น เมทิลินบลูได้เป็นอย่างดี และจะทำการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมของไมโครแคปซูลที่เตรียมได้ด้วยการเพิ่มรูพรุนที่เปลือกของแคปซูล โดยการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการสกัดพอลิเมทิลเมทาคริเลท (Polymethyl Methacrylate; PMMA) ที่เป็นองค์ประกอบของเปลือกด้วยตัวทำละลายชนิดต่าง ๆ

วิธีดำเนินการวิจัย

สารเคมี

บิสมัทไนเตรท (Bismuth (III) nitrate; Bi(NO₃)₃, Aldrich, Mexico; Reagent grade 98 %), แอมโมเนียมเมทาวานาเดท (Ammonium metavanadate; NH₄VO₃, Sigma-Aldrich, USA; purity ≥99 %) และ กรดเอทิลีนไดอะมีน เททระอะซิติก (Ethylenediamine tetraacetic acid; EDTA, VETEC, India; Reagent grade 98 %) ใช้สำหรับการเตรียมอนุภาคนาโนบิสมีทวานาเดท (BiVO₄ nanoparticles) 3-(ไตรเมทอกซิลไพล) โพรพิล เมทาคริเลท (3-(Trimethoxysilyl) propyl methacrylate; MPS, Sigma-Aldrich, USA; purity 98 %) ใช้เป็นสารคู่ควบไซเลน (Silane coupling agent) เพื่อทำการเปลี่ยนหมู่ฟังก์ชันของอนุภาคนาโนบิสมีทวานาเดท และเอทานอล (Ethanol, RCI Labscan, Thailand; purity 99.5 %) ใช้สำหรับการล้างอนุภาคนาโนบิสมีทวานาเดทที่เปลี่ยนหมู่ฟังก์ชัน (m-BiVO₄) เฟอร์รัส (II) คลอไรด์ (Ferrous (II) chloride; FeCl₂, Sigma-Aldrich, Germany; purity ≥99 %) เฟอร์ริก (III) คลอไรด์ (Ferric (III) chloride; FeCl₃, Aldrich, USA; purity 97 %) กรดโอเลอิก (Oleic acid; OA, Aldrich, USA; purity 90 %) โทลูอีน

(Toluene; RCI Labscan, Thailand; purity 99.5 %) แอมโมเนีย (Ammonia; AppliChem Panreac, Spain; purity 30 %) และโซเดียมคลอไรด์ (Sodium chloride; NaCl, Ajax Finechem, Australia; purity 99.9 %) ใช้สำหรับเตรียมอนุภาคนาโนเหล็กออกไซด์ (Fe₃O₄) เมทิลเมทาคริเลท (Methyl methacrylate; MMA, Aldrich, USA; purity 99 %) เมทิลอะคริเลท (Methylacrylate; MA, Aldrich, USA; purity 99 %) และไดไวนิลเบนซีน (Divinyl benzene; DVB, Aldrich, USA; purity 99 %) เป็นมอนอเมอร์สำหรับเตรียมเปลือกพอลิเมอร์ไมโครแคปซูล เบนโซอิลเปอร์ออกไซด์ (Benzoyl peroxide; BPO, Merck, Germany; Analytical reagents) ใช้เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาที่สามารถละลายได้ในตัวทำละลายไม่มีขั้ว สารยอกย่ายสลายโซ่ คือ ไอโอดิฟอร์ม (Iodoform; CHI₃, Aldrich, USA; purity 99 %) และสารลดแรงตึงผิวที่ใช้ คือ พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ (Polyvinyl alcohol; PVA, Aldrich, USA; degree of saponification 87-90 % and molecular weight 3-7×10⁴ g/mol) อะซิโตน (Acetone; Sigma-Aldrich, Germany; purity 99.5 %) ไดคลอโรมีเทน (Dichloromethane; DCM, QReC, New Zealand; purity 99.5 %) และเตตระไฮโดรฟูแรน (Tetrahydrofuran; THF, RCI Labscan, Thailand; purity 99.8%) ใช้สำหรับการศึกษาการเพิ่มรูพรุนที่ผิวพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลโดยการสกัดด้วยตัวทำละลาย

การเตรียมอนุภาคนาโนบิสมีทวานาเดท

ในการเตรียมอนุภาคนาโนบิสมีทวานาเดทซึ่งเป็นสารกึ่งตัวนำสำหรับการกักเก็บในพอลิเมอร์ไมโครแคปซูล แบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ

1. การเตรียมอนุภาคนาโนบิสมีทวานาเดท

เริ่มจากการเตรียมสารเชิงซ้อนของสารกึ่งตัวนำเริ่มต้น 2 ส่วน ดังนี้

ส่วนที่ (1) ทำการละลายบิสมัทไนเตรทในน้ำ (ความเข้มข้นประมาณร้อยละ 10-20 โดยน้ำหนัก) ที่มีสารละลายกรด เอทิลีนไดอะมีนเททระอะซิติก (EDTA)

(อัตราส่วนโมลต่อบิสมีทไนเตรทประมาณ 0.5-2) เป็นสารคีเลต แล้วปรับพีเอชของสารละลายให้อยู่ในสภาวะเบส (8-10) โดยปรับเปลี่ยนสภาวะให้เหมาะสมเพื่อให้สารละลายไม่เกิดการตกตะกอน

ส่วนที่ (2) ละลายแอมโมเนียมเมทาวานาเดทในน้ำ (อัตราส่วนโมลของบิสมีทไนเตรทและแอมโมเนียมเมทาวานาเดทเท่ากับหนึ่ง) ที่มีสารคีเลตละลายอยู่ (อัตราส่วนโมลต่อแอมโมเนียมเมทาวานาเดทประมาณ 0.5-2) แล้วปรับพีเอชของสารละลายให้อยู่ในสภาวะเบส (8-10) ด้วยสารละลายแอมโมเนียม ไฮดรอกไซด์ โดยปรับเปลี่ยนสภาวะให้เหมาะสมเพื่อให้สารละลายไม่เกิดการตกตะกอน

ผสมสารละลายส่วนที่ (1) และ (2) เข้าด้วยกันที่อุณหภูมิห้อง จะได้สารเชิงซ้อนของสารกึ่งตัวนำเริ่มต้น แล้วทำการระเหยน้ำที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ก่อนนำผงที่ได้ไปทำการเผาที่อุณหภูมิประมาณ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลาประมาณ 6 ชั่วโมง (16) และทำการศึกษาสมบัติต่าง ๆ ของอนุภาคที่เตรียมได้ คือ สัณฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (Transmission Electron Microscopy; TEM, Tecnai 20, Philips, Netherlands) และ วัด ขนาด อนุภาคด้วยเครื่องวัดการกระเจิงแสง (Dynamic Light Scattering; DLS, Delsa Nano-C Beckman Coulter, USA)

2. การปรับปรุงพื้นผิวโดยการกราฟท์ด้วยสารคู่ควบไซเลน

เนื่องจากอนุภาคนาโนบิสมีทวานาเดทเป็นอนุภาคอนินทรีย์ การที่จะกระจายตัวโดยตรงในชั้นมอนอเมอร์ที่เป็นสารอินทรีย์ได้ดี และไม่เกิดการแยกชั้นออกมาในระหว่างการสังเคราะห์อาจทำได้ยาก ดังนั้น ในขั้นตอนนี้ จะทำการปรับปรุงพื้นผิว (Surface Modification) อนุภาคนาโนบิสมีทวานาเดท เพื่อนำไปใช้ในการเตรียมพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลในขั้นตอนต่อไป โดยจะทำการกราฟท์อนุภาคนาโนบิสมีทวานาเดทด้วยมอนอเมอร์ที่มีหมู่ไซเลน (17-19) คือ 3-ไตรเมทอกซีไซลิล

โพรพิล เมทาคริเลทหรือเอ็มพีเอส (20) โดยเริ่มต้นจากการละลายเอ็มพีเอส (ความเข้มข้นประมาณร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก) ในน้ำที่มีสภาวะกรด (ปรับพีเอชด้วยกรดอะซิติกจนมีพีเอชประมาณ 4) จากนั้นปั่นจนละลายเป็นเนื้อเดียวกันประมาณ 30 นาที เพื่อให้เกิดการไฮโดรไลซิสเติมอนุภาคนาโนบิสมีทวานาเดทลงไป (อัตราส่วนของเอ็มพีเอส ต่อ อนุภาคนาโนบิสมีทวานาเดท เป็น 1 ต่อ 1 โดยน้ำหนัก) (21) จากนั้น ทำการปั่นต่อไปเป็นเวลาประมาณ 2 ชั่วโมง จนสารทั้งสองกระจายเข้าด้วยกัน แล้วหยดสารหยดปฏิกิริยา (ไฮโดรควิโนความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก) เพื่อป้องกันการเกิดพอลิเมอร์เชนกันเอง (Self Polymerization) ของเอ็มพีเอส นำไปใส่ในขวดกันกลมและทำให้อยู่ในสภาวะแก๊สไนโตรเจนโดยการใช้ปั๊มดูดสลับกับการเป่าแก๊สไนโตรเจนประมาณ 5 รอบ นำไปให้ความร้อนในอ่างควบคุมอุณหภูมิประมาณ 110 องศาเซลเซียส ด้วยอัตราการบิน 500 รอบต่อนาที เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จะได้ อนุภาคนาโนบิสมีทวานาเดทที่มีเอ็มพีเอส กราฟท์ (ผ่านหมู่ไซเลน) อยู่บนผิว จากนั้น นำไปล้างด้วยเอทานอลประมาณ 3 รอบ เพื่อกำจัดเอ็มพีเอสที่เหลืออยู่ในระบบ และทำการศึกษาดัวยเทคนิคฟูเรียรทรานสฟอร์มอินฟราเรด สเปกโทรสโคปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy; FTIR, Nicolet iS5, Thermo Scientific, USA) เพื่อยืนยันการกราฟท์

การเตรียมอนุภาคนาโนหลักออกไซด์

ซังเฟอร์ริก (II) คลอไรด์ 0.50 กรัม ละลายน้ำ 15 มิลลิลิตร จะได้สารละลายสีเหลือง ใส่ลงในขวดสังเคราะห์ จากนั้น ซังเฟอร์รัส (III) คลอไรด์ 0.875 กรัม ละลายน้ำ 15 มิลลิลิตร ผสมสารละลายเฟอร์ริก (II) คลอไรด์: เฟอร์รัส (III) คลอไรด์ ในอัตราส่วน 1: 2 ลงในขวดกันกลม จะได้สารละลายสีเหลืองเข้ม เติมกรดโอเลอิก 1.5 กรัม ที่ละลายในโทลูอีน 20 มิลลิลิตร ลงในขวดกันกลม จะเกิดการแยกชั้นระหว่างชั้นโทลูอีนกับชั้นน้ำ จากนั้น ทำให้อยู่ในสภาวะแก๊สไนโตรเจน แล้วนำขวดกัน

กลมแช่ลงในเครื่องเขย่าที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 5 นาที ผิดสารละลาย 25 % แอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ 5 มิลลิลิตร แล้วรอ 1 ชั่วโมง เมื่อครบ 1 ชั่วโมง นำมาเทใส่กรวยแยกแล้วเติมสารละลายโซเดียมคลอไรด์ความเข้มข้น 4 โมลาร์ ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้จนแยกเป็น 2 ชั้น ไขส่วนล่างทิ้ง (ชั้นน้ำ) เก็บส่วนบนไว้ (22)

การเตรียมพอลิเมอร์ไมโครแคปซูล

การเตรียมพอลิเมอร์ไมโครแคปซูล เริ่มจากผสมมอนอเมอร์ คือ เมทิลเมทาคริเลต เมทิลอะคริเลต และไดไวนิลเบนซีน ที่อัตราส่วน 55: 25: 20 ร้อยละโดยน้ำหนัก (1.925 0.875 และ 0.70 กรัม ตามลำดับ) อนุภาคนาโนบิสมีทวานาเดทและอนุภาคนาโนเหล็กออกไซด์ 1.50 และ 0.25 กรัม ตามลำดับ เบนโซิลเปอร์ออกไซด์ร้อยละ 8 ของมอนอเมอร์ เป็นตัวริเริ่มปฏิกิริยาและสารโอยกย่ายสายโซ่ คือ ไอโอโดฟอร์ม ที่อัตราส่วน 1:10 โมลของตัวริเริ่มปฏิกิริยาให้เป็นเนื้อเดียวกันตามลำดับ เป็นชั้นสารอินทรีย์หรือชั้นน้ำมัน จากนั้นเทลงในชั้นน้ำ คือ สารละลายพอลิไวนิลแอลกอฮอล์ความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ปริมาตร 45 มิลลิลิตร ทำการปั่นเตรียมหยดด้วยโฮโมจีไนเซอร์ (Homogenizer) โดยใช้อัตราเร็ว 5,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที จะได้สารแขวนลอยที่มีหยดสารอินทรีย์กระจายตัวในชั้นน้ำ นำสารแขวนลอยที่เตรียมได้เทลงในขวดกันกลมแล้วปิดด้วยจุกยางซิลิโคน ทำให้อยู่ในบรรยากาศแก๊สไนโตรเจนแล้วนำไปใส่เครื่องเขย่าที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้น เปลี่ยนเป็นอุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาการสังเคราะห์ ให้หยดสารละลายไฮโดรควิโนนความเข้มข้นร้อยละ 1 โดยน้ำหนัก ประมาณ 3-4 หยด เพื่อหยุดปฏิกิริยา จะได้สารแขวนลอยของพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลกักเก็บอนุภาคนาโนบิสมีทวานาเดทและอนุภาคนาโนเหล็กออกไซด์

ก่อนนำไปทดสอบประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมในน้ำเสีย จะทำการไฮโดรไลซิสพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลที่ได้ เพื่อเปลี่ยนพอลิเมทิลอะคริเลตเป็นพอลิอะคริลิก แอซิด โดยนำไมโครแคปซูลที่ได้ 20 มิลลิกรัม กระจายตัวในสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.05 โมลาร์ ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ปั่นเป็นเวลา 24 ชั่วโมง (15) จากนั้น ล้างด้วยน้ำกลั่น แล้วทำให้แห้งในตู้อบสุญญากาศ

การศึกษาการเพิ่มรพูนที่ผิวพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลโดยการสกัดด้วยตัวทำละลาย

ในขั้นตอนนี้ จะศึกษาผลของการสกัดพอลิเมทิลเมทาคริเลตซึ่งเป็นองค์ประกอบของเปลือกพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลต่อลักษณะสัณฐานวิทยา พื้นผิวและประสิทธิภาพการกำจัดสีย้อมของพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลที่เตรียมได้ โดยใช้ตัวทำละลาย 4 ชนิด คือ โทลูอิน ไดคลอโรมีเทน อะซิโตน และเททระไฮโดรฟูแรน โดยทำการปั่นพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลในตัวทำละลายทั้ง 4 ชนิดเป็นเวลา 2 ชั่วโมง ที่ความเข้มข้นของพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลร้อยละ 0.5 1 และ 5 โดยน้ำหนักของตัวทำละลาย และศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาและรูปร่างด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope; SEM, JSM-6510, JEOL Ltd, Japan)

การทดสอบประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์

ในการทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมในงานวิจัยนี้เลือกใช้เมทิลีนบลูเป็นตัวแทนสีย้อมต้นแบบ

โดยทำการติดตามการลดลงของสีย้อมด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer เทียบกับกราฟมาตรฐาน (Calibration Curve) ในการหาความเข้มข้นของสีย้อมที่ลดลง และรายงานผลเป็นมิลลิกรัมของสีย้อมที่ถูกบำบัดต่อกรัมของอนุภาคนาโนบิสมีทวานาเดทที่อยู่ภายในพอลิเมอร์แคปซูล

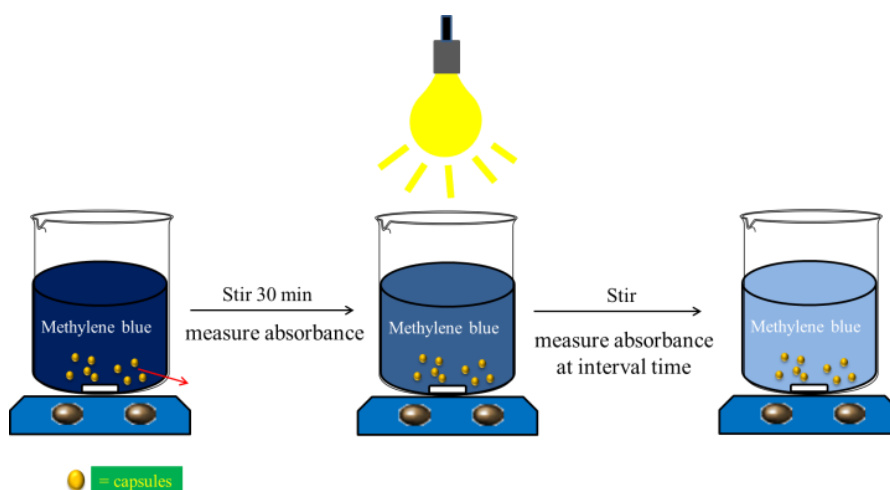
ทำการเตรียมสารละลายเมทิลีนบลูที่มีความเข้มข้น 1 2 3 4 และ 5 พีพีเอ็ม และวัดค่าการดูดกลืนแสง (Absorbance) ด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer ที่ความยาวคลื่นสูงสุด (λ_{max}) 664 นาโนเมตร เพื่อทำกราฟมาตรฐาน จากนั้นเตรียมน้ำเสียสังเคราะห์ที่มีเมทิลีนบลูเป็นสีย้อมต้นแบบที่มีความเข้มข้น 5 พีพีเอ็มเติมพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลลงในน้ำเสียสังเคราะห์ แล้วปั่นในที่มืดเป็นเวลา 30 นาที จากนั้น ฉายแสงให้น้ำเสีย น้ำน้ำเสียไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่เวลา 0.5 1 2

และ 3 ชั่วโมง จากนั้น คำนวณหาความเข้มข้นของเมทิลีนบลูที่ลดลงจากสมการที่ 1

$$y = mx + c \quad (1)$$

เมื่อ y คือ ค่าการดูดกลืนแสงที่เวลาต่าง ๆ
 m คือ ค่าความชัน
 x คือ ความเข้มข้นของเมทิลีนบลู
 c คือ จุดตัดแกน

แผนภาพการทดสอบประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียแสดงดังรูปที่ 1



รูปที่ 1 การทดสอบประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมในน้ำเสีย

การศึกษาลักษณะเฉพาะของพอลิเมอร์ไมโครแคปซูล

1. ลักษณะสัณฐานวิทยา

นำพอลิเมอร์แคปซูลที่เตรียมได้ไปศึกษาลักษณะรูปร่างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ในกรณีของกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงจะเตรียมตัวอย่างโดยการหยดสารแขวนลอยของพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลที่เตรียมได้ทั้งก่อนและหลังการสังเคราะห์ลงบนกระจกสไลด์ 1-2 หยด ปิดด้วยกระจกปิดสไลด์ ทำการตรวจวัดด้วยกำลังขยายที่เหมาะสม ส่วนในกรณีของกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด เตรียมตัวอย่างโดยนำพอลิเมอร์แคปซูลที่เตรียมได้ไปทำให้แห้งก่อนนำไปโรย

ลงบนแผ่นคาร์บอนที่ติดอยู่บนแท่นวางตัวอย่าง (Stub) และทำการเคลือบด้วยทองคำ จากนั้นตรวจวัดตัวอย่างโดยใช้กำลังขยายที่เหมาะสม

2. ร้อยละการบรรจุและประสิทธิภาพในการกักเก็บอนุภาคนาโนบิสมัทวานาเดตและอนุภาคนาโนเหล็กออกไซด์ใน พอลิเมอร์ไมโครแคปซูล

ทำการวิเคราะห์ร้อยละการบรรจุของอนุภาคนาโนบิสมัทวานาเดตและอนุภาคนาโนเหล็กออกไซด์ในพอลิเมอร์ไมโครแคปซูล (%Loading experiment; %L_{expt}) โดยการนำสารแขวนลอยที่ได้หลังจากการสังเคราะห์มาแยกด้วยแท่งแม่เหล็ก ส่วนของแคปซูลที่มีอนุภาคนาโนแม่เหล็กอยู่ภายในจะถูกดูดติดกับแท่ง

แม่เหล็ก ส่วนอนุภาคนาโนบิสมีทวานาเดทที่ไม่ถูกหุ้มจะตกตะกอนนอนก้นขวด นำสารส่วนที่ตกตะกอนนี้ไปเผาที่อุณหภูมิ 500 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที จากนั้นนำน้ำหนักที่ได้จากการเผาลบออกจากน้ำหนักอนุภาคนาโนบิสมีทวานาเดทที่ใช้ในสภาวะการทดลอง แล้วคำนวณหาร้อยละการบรรจุ โดยเปรียบเทียบกับร้อยละการบรรจุทางทฤษฎี (%Loading theory; %L_{th}) ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$\%L_{th} = \frac{W_{BiVO_4/Fe_3O_4} \times 100}{W_{BiVO_4/Fe_3O_4} + W_m \times (\%Conversion)/100} \quad (2)$$

เมื่อ W_{BiVO_4/Fe_3O_4} คือ น้ำหนักของอนุภาคนาโนบิสมีทวานาเดทและอนุภาคนาโนเหล็กออกไซด์ และ W_m คือ มอนอเมอร์จากสภาวะการทดลอง

ส่วนประสิทธิภาพการกักเก็บอนุภาคนาโนบิสมีทวานาเดทและอนุภาคนาโนเหล็กออกไซด์หรือร้อยละการกักเก็บ (%Encapsulation; %EE) สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (3) ดังนี้

$$\%EE = \frac{\%L_{ext}}{\%L_{th}} \times 100 \quad (3)$$

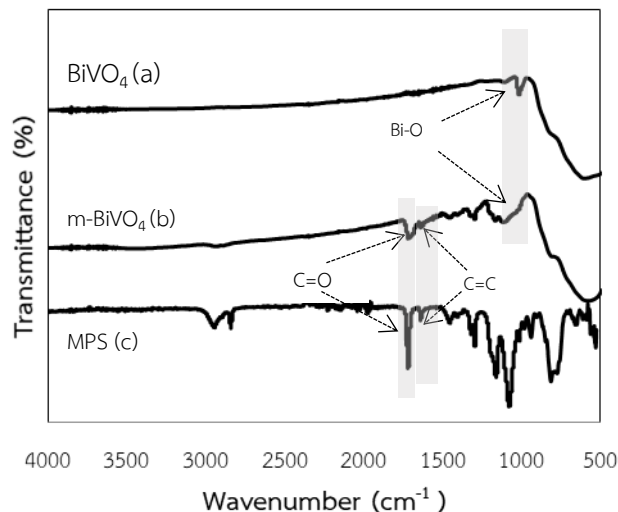
3. ขนาดและปริมาณของอนุภาคพอลิเมอร์อิสระในชั้นน้ำ

นำสารแขวนลอยที่ได้หลังจากการสังเคราะห์ไปทำการดูดด้วยแท่งแม่เหล็ก สารแขวนลอยจะเกิดการแยกชั้น จากนั้น นำชั้นน้ำที่เหลือไปอบที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง คำนวณหาปริมาณอนุภาคพอลิเมอร์อิสระในชั้นน้ำ (%Free Polymer Particle; %F_p) โดยใช้สมการที่ (4) ดังต่อไปนี้

$$\%F_p = \frac{W_{Fp}}{W_m \times (\%Conversion)/100} \times 100 \quad (4)$$

เมื่อ W_{Fp} คือ น้ำหนักอนุภาคพอลิเมอร์ในชั้นน้ำที่เหลือหลังจากการอบ

W_m คือ น้ำหนักมอนอเมอร์ที่ใช้ในการทดลองนี้



รูปที่ 2 ฟลูเรียร์ทรานฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัมของอนุภาคนาโนบิสมีทวานาเดท (a) อนุภาคนาโนบิสมีทวานาเดทที่กราฟต์ด้วยเอ็มพีเอส (b) และเอ็มพีเอส (c)

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

การเตรียมอนุภาคนาโนบิสมีทวานาเดท

จากการเตรียมอนุภาคนาโนบิสมีทวานาเดทพบว่าอนุภาคนาโนบิสมีทวานาเดท มีลักษณะเป็นผง

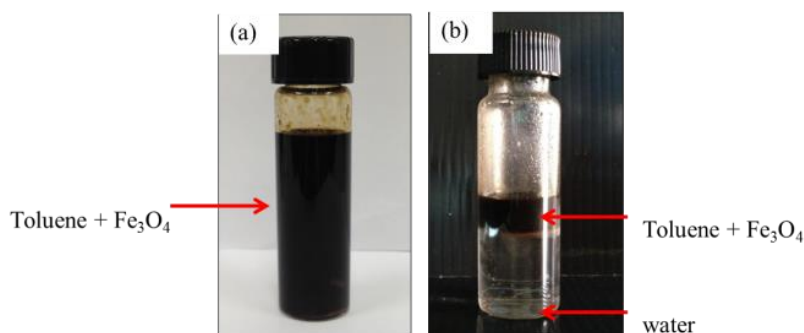
สีเหลือง มีอนุภาคเป็นทรงกลม ขนาดเล็กในระดับนาโนเมตร โดยขนาดอนุภาคเฉลี่ยประมาณ 2 นาโนเมตร แต่มีบางส่วนที่จับกันเป็นก้อน ก่อนนำไปใช้ในขั้นตอนการเตรียมแคปซูล จะทำการกราฟท์อนุภาคนาโนบิสมีทวานาเดทด้วยสารคู่ควบไซเลน คือ 3-ไตรเมทอกซีไซลิล

โพรฟิล เมทาคริลเลท หรือเอ็มพีเอส เพื่อเพิ่มความไม่ชอบน้ำ ซึ่งคาดว่าจะทำให้อนุภาคนาโนบิสมีทวานาเดทซึ่งเป็นสารอินทรีย์สามารถกระจายตัวในชั้นสารอินทรีย์และคงอยู่ในหยดมอนอเมอร์ในระหว่างการสังเคราะห์ที่ได้ดีขึ้น จากการศึกษาโครงสร้างทางเคมีด้วยเทคนิคฟลูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ (FTIR) เพื่อยืนยันการกราฟท์เอ็มพีเอสลงบนอนุภาคนาโนบิสมีทวานาเดท พบว่า นอกจากพบหมู่ Bi-O ที่ความยาวคลื่นประมาณ $700-800\text{ cm}^{-1}$ (23, 24) ของบิสมีทวานาเดทแล้ว ยังมีหมู่ C-H เพิ่มขึ้นที่ความยาวคลื่นประมาณ $2,800-3,000\text{ cm}^{-1}$ หมู่ C=O เพิ่มขึ้นที่ความยาวคลื่นประมาณ $1,600-1,700\text{ cm}^{-1}$ และมีหมู่ C=C เพิ่มขึ้นที่ความยาวคลื่นประมาณ $1,500-1,600\text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นหมู่ฟังก์ชันที่พบในเอ็มพีเอส จึงสามารถยืนยันได้ว่าสามารถกราฟท์อนุภาคนาโนบิสมีทวานาเดทด้วยเอ็มพีเอสได้สำเร็จ ดังรูปที่ 2 (21) ซึ่งจะได้นำอนุภาคนาโนบิสมีทวานาเดทที่มีหมู่ไฮดรอกซิลไปทำการเตรียมพอลิเมอร์ไมโคร

แคปซูลในขั้นตอนต่อไป นอกจากการเพิ่มความไม่ชอบน้ำให้กับอนุภาคแล้ว การที่มีหมู่ $C=C$ จากเอ็มพีเอสที่ผิวของอนุภาคนาโนบิสมีทวานาเดท จะทำให้สามารถเกิดการพอลิเมอไรเซชันกับมอนอเมอร์ผ่านกลไกการสังเคราะห์แบบอนุมูลอิสระได้ ทำให้อนุภาคนาโนบิสมีทวานาเดทจะถูกกักเก็บไว้ภายในแคปซูลได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

การเตรียมอนุภาคนาโนเหล็กออกไซด์

อนุภาคนาโนของเหล็กออกไซด์จะกระจายตัวอยู่ในชั้นของโทลูอิน ดังรูปที่ 3 (a) และเกิดการแยกชั้นอย่างชัดเจนกับน้ำหลังจากการเติมโซเดียมคลอไรด์ ดังรูปที่ 3 (b) เมื่อทดสอบด้วยแม่เหล็กพบว่าอนุภาคนาโนของเหล็กออกไซด์จะเคลื่อนที่มาติดที่แม่เหล็กทั้งหมดแสดงว่ามีความเป็นแม่เหล็ก โดยการศึกษาลักษณะสัญญาณวิทยาดวงกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่านพบว่า อนุภาคเหล็กออกไซด์เป็นทรงกลมและมีขนาดอนุภาคประมาณ 5 นาโนเมตร



รูปที่ 3 การแยกชั้นของอนุภาคนาโนเหล็กออกไซด์ที่มีกรดโอเลอิกร้อยละ 0.3 โดยน้ำหนัก ก่อน (a) และหลัง (b) การเติมโซเดียมคลอไรด์

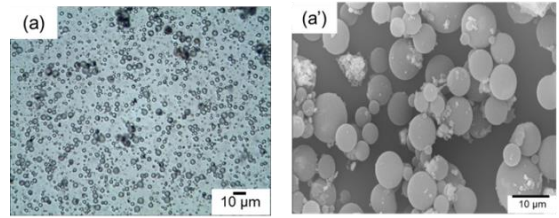
การเตรียมพอลิเมอร์ไมโครแคปซูล

การเตรียมพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลด้วยกระบวนการสังเคราะห์แบบแขวนลอยโดยกลไกการแยกวัฏภาคภายใน (Internal Phase Separation) เป็นเทคนิคที่มีประสิทธิภาพในการกักเก็บค่อนข้างสูง (25, 26) โดยการผสมสารที่ต้องการกักเก็บกับมอนอเมอร์และตัวริเริ่มปฏิกิริยา เตรียมเป็นหยดมอนอเมอร์ กระจายตัวในชั้นน้ำ เมื่อเกิดการสังเคราะห์เกิดสายโซ่พอลิเมอร์

จนกระทั่งมีความยาวสายโซ่ถึงค่าความยาววิกฤต (Critical Chain Length) สายโซ่พอลิเมอร์จะไม่สามารถละลายเข้ากันได้กับสารภายในหยดมอนอเมอร์อีก จึงเกิดการแยกวัฏภาคและเคลื่อนที่ออกมาที่รอยต่อระหว่างผิวของหยดมอนอเมอร์กับน้ำ และเกิดการจัดเรียงตัวเป็นเปลือกแคปซูล ซึ่งการเกิดแคปซูลและประสิทธิภาพในการกักเก็บขึ้นกับปัจจัยต่าง ๆ ที่สำคัญ คือ ความหนืดภายใน (Internal Viscosity) และค่าแรงตึงระหว่างผิว

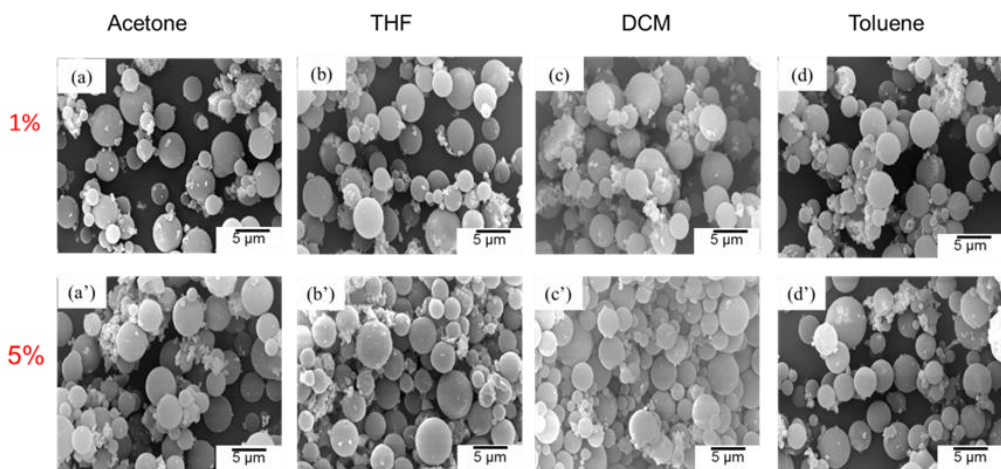
(Interfacial Tension) ระหว่างพอลิเมอร์กับน้ำ และสารที่ต้องการกักเก็บกับน้ำ

ในงานวิจัยนี้ใช้มอนอเมอร์สามชนิดเป็นองค์ประกอบของเปลือกแคปซูล คือ เมทิลเมทาคริเลต เมทิลอะคริเลต และไดไวนิลเบนซีน เนื่องจากพอลิเมทิลเมทาคริเลตเป็นพอลิเมอร์ มีความชอบน้ำค่อนข้างสูงและสามารถเกิดเป็นเปลือก ไมโครแคปซูลหุ้มสารต่าง ๆ ด้วยกลไกการแยกวัฏภาคภายในได้ดี ส่วนพอลิเมทิลอะคริเลตเมื่อทำการไฮโดรไลซิสจะเปลี่ยนเป็นพอลิอะคริลิกแอซิดซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่ตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงพีเอช (15) และพอลิไดไวนิลเบนซีนเป็นพอลิเมอร์โครงสร้างแหะซึ่งจะทำให้ได้ไมโครแคปซูลที่มีความแข็งแรง จากการทดลองพบว่า ลักษณะของไมโครแคปซูลที่เตรียมได้เป็นทรงกลมและมีพื้นผิวเรียบ มีร้อยละการกักเก็บอนุภาคนาโนบิสมัทวานาเดตสูงเข้าใกล้ร้อยละ 100 และมีปริมาณของอนุภาคพอลิเมอร์อิสระในชั้นน้ำค่อนข้างต่ำ (6-10 %) จากการตรวจสอบลักษณะรูปร่างด้วยกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง พบว่า แคปซูลมีลักษณะเป็นทรงกลม มีขนาดในระดับไมโครเมตร สอดคล้องกับการตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดซึ่งพบว่าพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลมีลักษณะทรงกลม พื้นผิวเรียบ และมีขนาดอนุภาคประมาณ 5-10 ไมโครเมตร ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 Optical (a) และ SEM (a') micrographs ของพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลกักเก็บอนุภาคนาโนบิสมัทวานาเดตและอนุภาคนาโนแม่เหล็ก

เมื่อทำการไฮโดรไลซิสเพื่อเปลี่ยนพอลิเมทิลอะคริเลตเป็นพอลิอะคริลิก แอซิด ซึ่งมีสมบัติตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงพีเอช จะทำให้ไมโครแคปซูลนี้มีความชอบน้ำมากขึ้น เนื่องจาก ในสภาวะเบส จะเกิดการแตกตัวของหมู่คาร์บอกซิลของพอลิอะคริลิกแอซิดเป็นหมู่คาร์บอกซิเลตไอออน จึงจะทำให้แคปซูลเกิดการพองตัวและดูดน้ำได้มากขึ้น จึงมีโอกาสน้ำซึ่งมีสีขุ่นจะเข้าไปสัมผัสกับอนุภาคนาโนบิสมัทวานาเดตที่อยู่ภายในได้มากขึ้น ซึ่งจะส่งผลให้ประสิทธิภาพการกำจัดสีขุ่นสูงขึ้น โดยพบว่าหลังการไฮโดรไลซิส ค่าศักย์ซีตา (zeta potential) ของพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลมีค่าเป็นลบ (ประมาณ -28 ถึง -38 mV) เป็นการยืนยันถึงการเกิดขึ้นของพอลิอะคริลิก แอซิด



รูปที่ 5 SEM micrographs ของพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลกักเก็บอนุภาคนาโนบิสมัทวานาเดตและอนุภาคนาโนแม่เหล็กหลังเพิ่มรพูนที่ผิวพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลโดยการสกัดด้วยตัวทำละลายชนิดต่าง ๆ

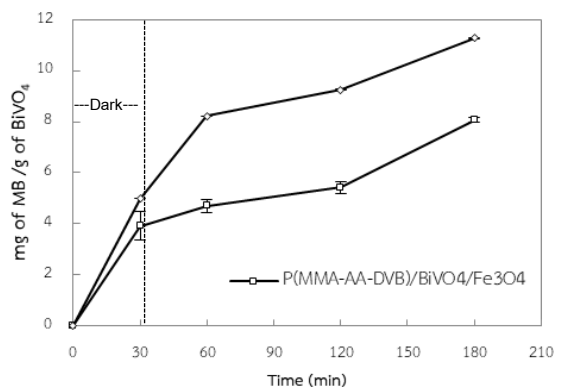
การศึกษาการเพิ่มรูพรุนที่ผิวพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลด้วยตัวทำละลาย

เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิส จะเกิดที่ผิวของอนุภาคนาโนโฟโตแคตตาไลสต์หรือสารกึ่งตัวนำ ดังนั้น ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมจึงขึ้นอยู่กับประสิทธิภาพของสีย้อมในน้ำเสียบกับอนุภาคนาโนโฟโตแคตตาไลสต์ นอกจากการเพิ่มความชอบน้ำให้กับเปลือกพอลิเมอร์แคปซูลแล้ว การเพิ่มรูพรุนที่ผิวของพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลเพื่อให้สามารถเข้าไปสัมผัสกับอนุภาคนาโนโฟโตแคตตาไลสต์ที่ถูกกักเก็บอยู่ภายในแคปซูลได้เป็นอีกแนวทางหนึ่ง ในขั้นตอนนี้จะศึกษาผลของการสกัดพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลต่อลักษณะพื้นฐานวิทยาและพื้นผิวของไมโครแคปซูล เมื่อศึกษาลักษณะพื้นฐานวิทยาด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด พบว่าหลังการสกัดด้วยตัวทำละลายชนิดต่าง ๆ ลักษณะพื้นผิวของพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจน ดังรูปที่ 5 ดังนั้น จึงจะนำไปศึกษาการบำบัดสีย้อมเพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพต่อไป

การทดสอบประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์

ในการทดสอบประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมในงานวิจัยนี้เลือกใช้เมทิลีนบลูเป็นตัวแทนสีย้อมที่สามารถละลายน้ำได้ดี ทำการทดลองในน้ำสถานะเบส (pH 10) ซึ่งเป็นสถานะที่หมู่คาร์บอกซิลของพอลิอะคริลิกแอซิดเกิดการแตกตัวเป็นหมู่คาร์บอกซิเลทไอออนได้ดี การศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดเมทิลีนบลูโดยใช้อนุภาคนาโนบิสมัทวานาเดตโดยตรงเปรียบเทียบกับอนุภาคนาโนบิสมัทวานาเดตที่ถูกกักเก็บอยู่ใน P(MMA-AA-DVB)/BiVO₄/Fe₃O₄ ไมโครแคปซูล โดยทำการติดตามการลดลงของสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยการวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงเทียบกับค่ากราฟมาตรฐานในการหาความเข้มข้นของสีย้อมที่ลดลง และรายงานผลเป็นมิลลิกรัมของเมทิลีนบลูที่ลดลงต่อกรัมของอนุภาคนาโน

บิสมัทวานาเดตที่ใช้ จากผลการศึกษาพบว่า ในสภาวะที่ยังไม่มีการให้แสงแก่ระบบเป็นเวลา 30 นาที ทั้งสภาวะที่ใช้อนุภาคนาโนบิสมัทวานาเดตโดยตรงและใช้ P(MMA-AA-DVB)/BiVO₄/Fe₃O₄ ไมโครแคปซูล มีความเข้มข้นของสารละลายสีย้อมเมทิลีนบลูลดลงบางส่วน ซึ่งน่าจะเนื่องจากการดูดซับของเมทิลีนบลูที่ผิวของอนุภาคหรือแคปซูล ทำให้ปริมาณของเมทิลีนบลูในสารละลายลดลง จากนั้น เมื่อทำการให้แสงแก่ระบบ การบำบัดเมทิลีนบลูจะเพิ่มขึ้นเนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิส โดยการใช้อนุภาคนาโนบิสมัทวานาเดตโดยตรงจะมีประสิทธิภาพในการบำบัดเมทิลีนบลูได้มากกว่าการใช้ P(MMA-AA-DVB)/BiVO₄/Fe₃O₄ ไมโครแคปซูล เนื่องจากการใช้อนุภาคนาโนบิสมัทวานาเดตโดยตรงจะมีการสัมผัสของน้ำเสียบกับผิวของอนุภาคนาโนบิสมัทวานาเดตได้มากกว่ากรณีที่อยู่ภายในแคปซูลซึ่งถูกหุ้มด้วยเปลือกพอลิเมอร์ ดังรูปที่ 6

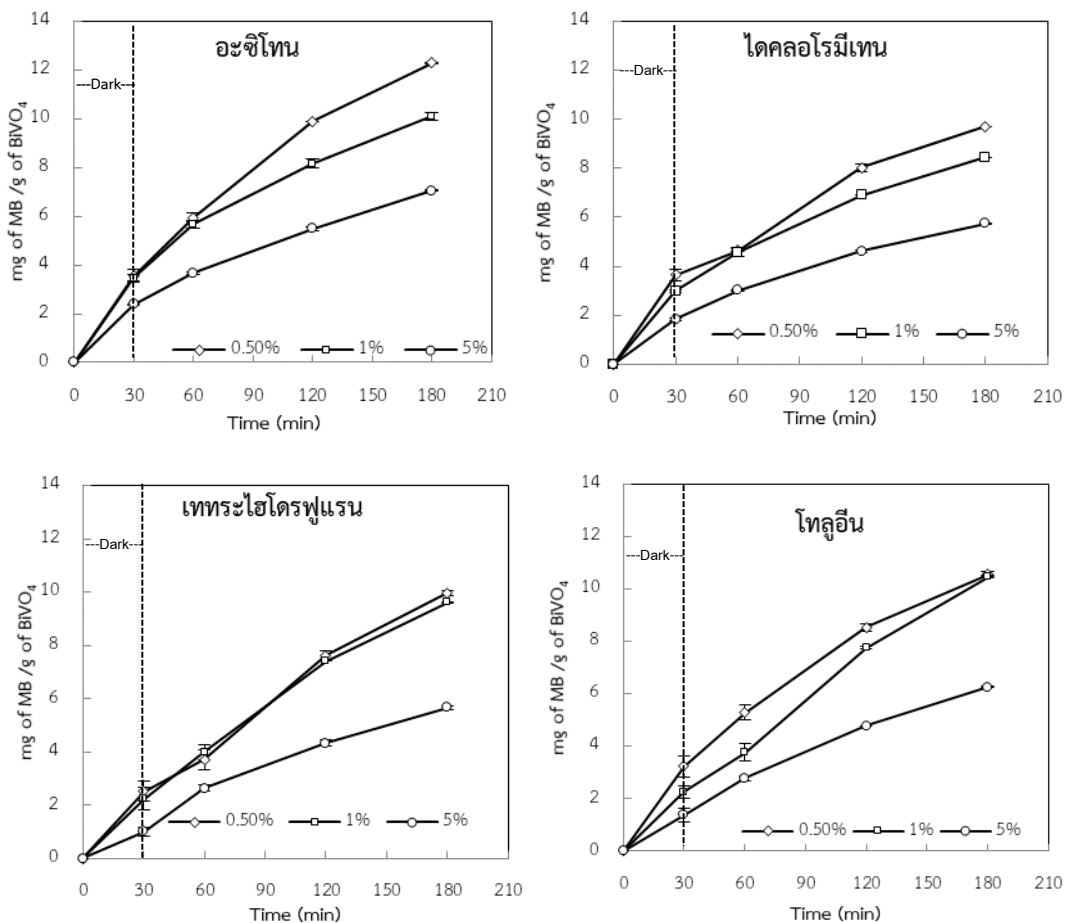


รูปที่ 6 กราฟแสดงประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมเมทิลีนบลูในหน่วยมิลลิกรัมของเมทิลีนบลูต่อกรัมของอนุภาคนาโนบิสมัทวานาเดต เมื่อใช้อนุภาคนาโนบิสมัทวานาเดต ($\diamond$) และ P(MMA-AA-DVB)/BiVO₄/Fe₃O₄ ($\square$)

เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตตาไลซิสจะเกิดขึ้นที่ผิวของอนุภาคนาโนโฟโตแคตตาไลสต์ ดังนั้น การเพิ่มโอกาสในการสัมผัสของสีย้อมในน้ำเสียบกับอนุภาคนาโนโฟโตแคตตาไลสต์จะเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อม จึงได้ทำการศึกษาการเพิ่มรูพรุนหรือความขรุขระของผิวไมโคร

แคปซูลโดยการสกัดส่วนของพอลิเมทิลเมทาคริเลทที่เปลือกแคปซูลด้วยตัวทำละลายชนิดต่าง ๆ จากการศึกษาประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลที่สกัดด้วยตัวทำละลาย 4 ชนิด คือ โทลูอีน ไดคลอโรมีเทน อะซิโตน และเทระไฮโดรฟูแรน ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ พบว่า ในสถานะที่ใช้อะซิโตนในการสกัดจะมีประสิทธิภาพสูงมากกว่าตัวทำละลายชนิดอื่น ๆ และเมื่อ

ลดความเข้มข้นของ พอลิเมอร์ไมโครแคปซูลในการสกัดลง ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียจะเพิ่มขึ้นตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบความเข้มข้นของพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลที่ร้อยละ 0.5 1 และ 5 โดยน้ำหนัก พบว่าที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 โดยน้ำหนักมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมเมทิลีนบลูสูงที่สุด ดังรูปที่ 7



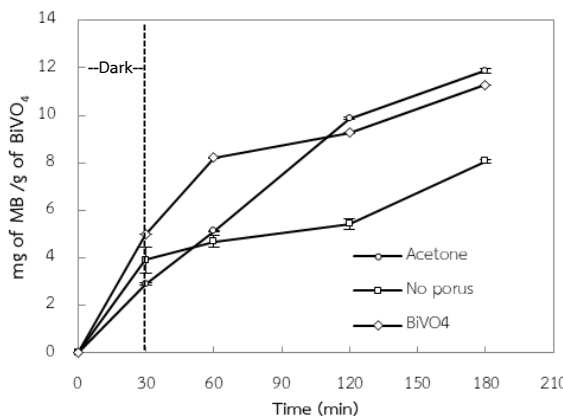
รูปที่ 7 กราฟแสดงประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมเมทิลีนบลูในหน่วยมิลลิกรัมของเมทิลีนบลูต่อกรัมของอนุภาคนาโนบิสมัทวานาเดตที่ถูกกักเก็บใน $P(MMA-AA-DVB)/BVO_4/Fe_3O_4$ ไมโครแคปซูล ที่สกัดด้วยตัวทำละลายชนิดต่าง ๆ ที่ร้อยละ 0.50 (◇) 1 (□) และ 5 (○) โดยน้ำหนัก

เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการบำบัดเมทิลีนบลูในน้ำเสียสังเคราะห์โดยใช้พอลิเมอร์ไมโครแคปซูลที่สกัดด้วยอะซิโตน พอลิเมอร์ไมโครแคปซูลตั้งต้น (ก่อนการสกัดด้วยอะซิโตน) และอนุภาคนาโนบิสมัทวานาเดต พบว่าพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลที่สกัดด้วยอะซิ

โตนซึ่งน่าจะมีรูพรุนที่ผิวของแคปซูล มีประสิทธิภาพในการบำบัดเมทิลีนบลูสูงขึ้นกว่าพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลก่อนการสกัด และใกล้เคียงกับการใช้อนุภาคนาโนบิสมัทวานาเดตตั้งต้นโดยตรง ดังรูปที่ 8 ซึ่งน่าจะเป็นเนื่องจาก การสกัดพอลิเมทิลเมทาคริเลทด้วยอะซิโตนทำให้เกิดรูพรุนที่ผิว

ของเปลือกไมโครแคปซูล ทำให้น้ำเสียสามารถเข้าไปสัมผัสกับผิวของอนุภาคนาโนโพโตแคตาไลสต์ได้มากขึ้น และสามารถเกิดปฏิกิริยาโฟโตแคตาไลซิสได้เช่นเดียวกับการใช้อนุภาคนาโนบิสมีทวานาเดทโดยตรงจึงทำให้มีประสิทธิภาพในการบำบัดเมทิลีนบลูได้ดีเช่นเดียวกัน

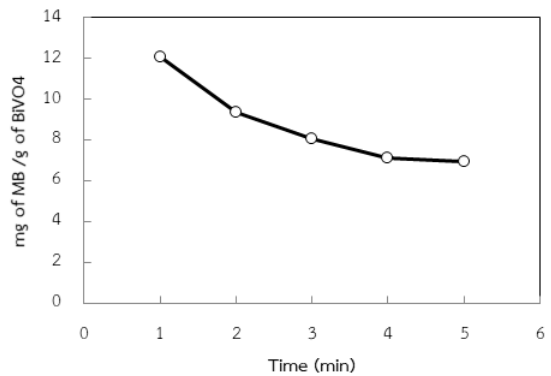
อย่างไรก็ตาม ในการเตรียม P(MMA-AA-DVB)/BiVO₄/Fe₃O₄ ไมโครแคปซูลมีการกักเก็บอนุภาคนาโนแม่เหล็กไว้ภายในด้วยซึ่งจะทำให้สามารถแยกออกจากระบบหลังการบำบัดได้ง่ายโดยการดึงดูดด้วยแม่เหล็ก และสามารถนำไมโครแคปซูลดังกล่าวกลับมาใช้ใหม่ได้ ดังนั้นจึงจะนำพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลดังกล่าวไปทำการศึกษาความเป็นไปได้ในการนำกลับมาใช้ซ้ำ



รูปที่ 8 กราฟแสดงประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมเมทิลีนบลูในหน่วยมิลลิกรัมของเมทิลีนบลูต่อกรัมของอนุภาคนาโนบิสมีทวานาเดท เมื่อใช้อนุภาคนาโนบิสมีทวานาเดท (◇) P(MMA-AA-DVB)/BiVO₄/Fe₃O₄ ไมโครแคปซูลก่อนการสกัด (□) และ P(MMA-AA-DVB)/BiVO₄/Fe₃O₄ ไมโครแคปซูลหลังการสกัด (○)

เมื่อนำ P(MMA-AA-DVB)/BiVO₄/Fe₃O₄ ไมโครแคปซูลที่สกัดด้วยอะซิโตนมาศึกษาการนำกลับมาใช้ซ้ำ จำนวน 5 ครั้ง พบว่า ประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมเมทิลีนบลูมีแนวโน้มค่อย ๆ ลดลงตามจำนวนครั้งในการใช้ซ้ำที่เพิ่มขึ้น ดังรูปที่ 9 แต่อย่างไร

ก็ตาม พอลิเมอร์ไมโครแคปซูลยังมีประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมเมทิลีนบลูได้มากกว่าร้อยละ 50



รูปที่ 9 กราฟแสดงประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมเมทิลีนบลูโดยนำ P(MMA-AA-DVB)/BiVO₄/Fe₃O₄ ไมโครแคปซูลกลับมาใช้ซ้ำที่จำนวนครั้งต่าง ๆ

สรุปผล

จากการศึกษาการเตรียมพอลิ(เมทิลเมทาคริลเลท-อะคริลิก แอซิด-ไดไวนิลเบนซีน) ไมโครแคปซูลกักเก็บอนุภาคนาโนบิสมีทวานาเดทและเหล็กออกไซด์เพื่อการบำบัดสีย้อมในน้ำเสียสังเคราะห์ พบว่าพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลมีร้อยละการกักเก็บอนุภาคนาโนบิสมีทวานาเดทสูง (ประมาณร้อยละ 100) และเมื่อเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดสีย้อมเมทิลีนบลูด้วยการสกัดด้วยตัวทำละลายเพื่อเพิ่มรูพรุนที่เปลือกของพอลิเมอร์ไมโครแคปซูล พบว่าพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลที่ทำการสกัดที่ความเข้มข้นร้อยละ 0.5 ของพอลิเมอร์ไมโครแคปซูลในตัวทำละลายอะซิโตนมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมเมทิลีนบลูได้ดีที่สุดและใกล้เคียงกับการใช้อนุภาคนาโนบิสมีทวานาเดทโดยตรง นอกจากนี้ สามารถแยกไมโครแคปซูลออกจากระบบหลังการบำบัดได้ง่ายโดยการดึงดูดด้วยแม่เหล็กเนื่องจากมีการกักเก็บอนุภาคนาโนแม่เหล็กไว้ภายในด้วย และเมื่อนำไมโครแคปซูลกลับมาใช้ซ้ำ พบว่ายังมีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมเมทิลีนบลูได้มากกว่าร้อยละ 50 เมื่อใช้ซ้ำ 5 ครั้ง ถึงแม้ว่าประสิทธิภาพจะค่อย ๆ ลดลงตามจำนวนครั้งที่เพิ่มขึ้น ดังนั้น ในงานวิจัยนี้ จึงประสบความสำเร็จใน

การเตรียมพอลิ(เมทิลเมทาคริเลท-อะคริลิก แอซิด-ไดไวนิล เบนซีน) ไมโครแคปซูลกักเก็บอนุภาคนาโนปัสสาวนาเดท และเหล็กออกไซด์ที่มีประสิทธิภาพในการบำบัดสีย้อมใน น้ำเสียสังเคราะห์และสามารถนำกลับมาใช้ซ้ำได้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากทุนวิจัยจาก โครงการการสร้างภาคีในการผลิตบัณฑิตระดับปริญญาโท- เอกของสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.)

เอกสารอ้างอิง

1. Mahato N, Sharma K, Sinha M, Baral ER, Koteswararao R, Dhyani A, et al. Bio-sorbents, industrially important chemicals and novel materials from citrus processing waste as a sustainable and renewable Bioresource: A review. *J Adv Res.* 2020;23:61-82
2. Hepel M, Hazelton S. Photoelectrocatalytic degradation of diazo dyes on nanostructured WO_3 electrodes. *Electrochimica Acta.* 2005;50(25-26):5278-91.
3. Zheng Q, Lee C. Visible light photoelectrocatalytic degradation of methyl orange using anodized nanoporous WO_3 . *Electrochim. Acta.* 2014;115:140-5.
4. Kim C, Kim JT, Kim KS, Jeong S, Kim HY, Han YS. Immobilization of TiO_2 on an ITO substrate to facilitate the photoelectrochemical degradation of an organic dye pollutant. *Electrochim. Acta.* 2009;54(24):5715-20.
5. Yin W, Wang W, Zhou L, Sun S, Zhang L. CTAB-assisted synthesis of monoclinic BiVO_4 photocatalyst and its highly efficient degradation of organic dye under visible-light irradiation. *J Hazard Mater.* 2010;173(1-3):194-9.
6. Sun M, Guo P, Wang M, Ren F. The effect of pH on the photocatalytic performance of BiVO_4 for phenol mine sewage degradation under visible light. *Optik.* 2019;179:672-9.
7. Fernández-Domene RM, Sánchez-Tovar R, Lucas-Granados B, Muñoz-Portero M-J, Ramírez-Grau R, García-Anton J. Visible-light photoelectrodegradation of diuron on WO_3 nanostructures. *J Environ Manage.* 2018;226:249-55.
8. Forgacs E, Cserhati T, Oros G. Removal of synthetic dyes from wastewaters: a review. *Environment international.* 2004;30(7):953-71.
9. Akpan UG, Hameed BH. Parameters affecting the photocatalytic degradation of dyes using TiO_2 - based photocatalysts: a review. *J Hazard Mater.* 2009;170(2-3):520-9.
10. Chatchai P, Murakami Y, Kishioka S-y, Nosaka AY, Nosaka Y. Efficient photocatalytic activity of water oxidation over $\text{WO}_3/\text{BiVO}_4$ composite under visible light irradiation. *Electrochim. Acta.* 2009;54(3):1147-52.
11. Chatchai P, Nosaka AY, Nosaka Y. Photoelectrocatalytic performance of $\text{WO}_3/\text{BiVO}_4$ toward the dye degradation. *Electrochim. Acta.* 2013;94:314-9.

12. Chatchai P, Kishioka S-y, Murakami Y, Nosaka AY, Nosaka Y. Enhanced photoelectrocatalytic activity of FTO/WO₃/BiVO₄ electrode modified with gold nanoparticles for water oxidation under visible light irradiation. *Electrochim. Acta.* 2010;55(3):592-6.
13. Chaiyasat P, Noppalit S, Okubo M, Chaiyasat A. Innovative synthesis of high performance poly (methyl methacrylate) microcapsules with encapsulated heat storage material by microsuspension iodine transfer polymerization (ms ITP). *Sol Energy Mater Sol Cells.* 2016;157:996-1003 :996-1003.
14. Chaiyasat P, Noppalit S, Okubo M, Chaiyasat A. Do encapsulated heat storage materials really retain their original thermal properties. *Phys Chem Chem Phys..* 2015;17(2):1053-9.
15. Jantang S, Chaiyasat P. High Performance Poly (methyl methacrylate- acrylic acid-divinylbenzene) Microcapsule Encapsulated Heat Storage Material for Thermoregulating Textiles. *Fibers Polym.* 2018; 19(10): 2039-48.
16. Okunaka S, Tokudome H, Hitomi Y, Abe R. Preparation of fine particles of sheelite-monoclinic phase BiVO₄ via an aqueous chelating method for efficient photocatalytic oxygen evolution under visible-light irradiation. *J Mater Chem A.* 2016;4(10):3926-32.
17. Tomovska R, Daniloska V, Asua JM. Surface modification of TiO₂ nanoparticles via photocatalitically induced reaction: Influence of functionality of silane coupling agent. *Appl Surf Sci.* 2013;264:670-3.
18. Zhao J, Milanova M, Warmoeskerken MM, Ditschk V. Surface modification of TiO₂ nanoparticles with silane coupling agents. *Colloids Surf A.* 2012;413:273-9.
19. Moghaddam E, Youzbashi A, Kazemzadeh A, Eshraghi M. Photoluminescence investigation of ZnO quantum dots surface modified with silane coupling agent as a capping agent. *J Lumin.* 2015;168:158-62.
20. Xie Y, Hill CA, Xiao Z, Militz H, Mai C. Silane coupling agents used for natural fiber/ polymer composites: A review. *Composites Part A.* 2010;41(7):806-19.
21. Tangsongcharoen W, Punyamoonwongsa P, Chaiyasat P. High performance biocompatible cellulose- based microcapsules encapsulating gallic acid prepared by inverse microsuspension polymerization. *Polymer International.* 2019;68(4):714-23.
22. Sadchaiyaphum J, Phapugrangkul P, Chaiyasat P, Chaiyasat A. High Encapsulation Efficiency of Magnetite Nanoparticles in Hydrophobic Polymer Microcapsules using Microsuspension Conventional Radical Polymerization. *Orient J Chem.* 2019;35(2):516-22.
23. Shi Y, Hu Y, Zhang L, Yang Z, Zhang Q, Cui H, et al. Palygorskite supported BiVO₄ photocatalyst for tetracycline hydrochloride removal. *Appl Clay Sci.* 2017;137:249-58.

24. Ke D, Peng T, Ma L, Cai P, Dai K. Effects of hydrothermal temperature on the microstructures of BiVO_4 and its photocatalytic O_2 evolution activity under visible light. *Inorganic Chemistry*. 2009;48(11):4685-91.
25. Chaiyasat P, Islam MZ, Chaiyasat A. Preparation of poly (divinylbenzene) microencapsulated octadecane by microsuspension polymerization: oil droplets generated by phase inversion emulsification. *RSC Adv*. 2013;3(26):10202-7.
26. Chaiyasat P, Chaiyasat A, Boontung W, Promdsorn S, Thipsit S. Preparation and characterization of poly (divinylbenzene) microcapsules containing octadecane. *Mater Sci Appl*. 2011;2(08):1007.



Structural and Mechanical Properties of Cubic Na₂O: First-Principles Calculations

Tanisara Noinonmueng and Kanoknan Phacheerak*

College of Nanotechnology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok 10520, THAILAND

*Corresponding author e-mail: kanoknan.ph@kmitl.ac.th

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article history:

Received: 29 May, 2020

Revised: 5 June, 2020

Accepted: 8 July, 2020

Available online: 14 August, 2020

DOI: 10.14456/rj-rmutt.2020.14

Keywords:

structural properties,
mechanical properties,
Na₂O, first-principles

This work presents the investigation of the structural and mechanical properties of Na₂O in cubic structure (hereafter denoted as cubic Na₂O) by using the first-principles calculations within the local density approximation (LDA) and the generalized gradient approximation (GGA) in the functional form by Perdew-Wang 91 (PW91). The structural parameters such as the equilibrium volume (V_0), the bulk modulus (B_0), and its pressure derivative (B'_0) can be obtained by fitting the calculated energy (E) and volume (V) data with the third-order Birch - Murnaghan's equation of state whereas the elastic constants can be obtained from the stress-strain approach. The calculated equilibrium structural parameters and all three elastic constants (C_{11} , C_{12} , and C_{44}) show a good agreement with the experimental and other theoretical values. All elastic constants and bulk moduli calculated from LDA are slightly larger than those values calculated from GGA, by the reason of the lattice constant calculated from LDA is slightly smaller than that calculated from GGA. By using the calculated elastic constants and Born's criteria, the cubic Na₂O was found to be mechanically stable at ambient pressure. Consistent with the calculated elastic constants (C_{ij}), other elastic moduli such as bulk modulus (B), shear modulus (G), Young's modulus (Y), and Poisson ratio (ν) of cubic Na₂O can be obtained by Voigt-Reuss-Hill (VRH) method. Because the B/G and ν values can be used to determine the brittleness and ductility of materials, our calculated B/G and ν values indicate that cubic Na₂O behaves as a brittle material at ambient pressure.

Furthermore, the hardness of cubic Na_2O can also be obtained by using G/B and G values. The details of the structural and mechanical properties calculations for cubic Na_2O were presented and discussed.

INTRODUCTION

Sodium oxide (Na_2O) crystallizes in the cubic structure. It has received a great of interest in many applications for instance, solid-state batteries, gas detectors, and fuel cells (1-3). There are several research studies about this compound in both experimentally and theoretically, following are some examples. Zintl et al. (4) reported the lattice parameter of Na_2O crystal by powder diffraction experiment. Wu et al. (5) reported the high-pressure behavior of Na_2O by using synchrotron angle-dispersive powder X-ray diffraction. On the theoretical side, Dovesi et al. (6) used the Hartree-Fock method to calculate the lattice constants and elastic properties of Li_2O , Na_2O , and K_2O . Shukla et al. (7) reported the electronic structure calculations of Li_2O and Na_2O by using the Wannier function based on Linear Combination of Molecular Orbital (LCAO) formalism. Moakafi et al. (8) used first-principles calculations to study the electronic and optical properties of Li_2O , Na_2O , K_2O , and Rb_2O . Thomson et. al. (9) investigated the electronic structure and phonon spectra in Na_2O by using density functional theory (DFT) method. Although, there are several experimental and theoretical works on Na_2O have been reported. There are only few works focused on the mechanical properties of Na_2O . Thus, this work presents the study of the structural and mechanical properties of cubic

Na_2O by using the first-principles calculations to provide more understanding and information for the researcher in this material.

MATERIALS AND METHODS

Computational Method

The computational method used is based on first principles density functional theory (DFT) (10, 11) with the plane wave pseudo-potential method as implemented in Vienna Ab-initio Simulation Package (VASP) (12). For the exchange- correlation terms, we used both local density approximation (LDA) (13, 14) and generalized gradient approximation (GGA) in Perdew-Wang 91 (PW91) functional form (15). The projector augmented wave (PAW) was used for the pseudo-potential. The calculation was performed on a $4 \times 4 \times 4$ Monkhorst-Pack scheme (16) for k -point sampling integrations and the plane wave expansion was set up to 600 eV. The total change in energy less than 10^{-3} eV and the force less than 10^{-3} eV/Å were used as convergence criteria for structural relaxation. The cubic structure of Na_2O used in this calculation is shown Fig. 1.

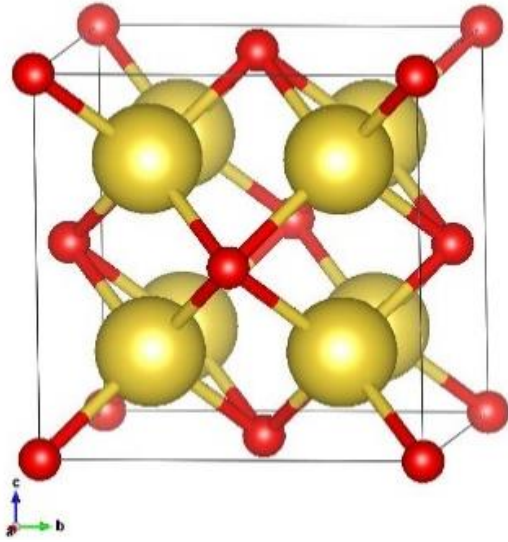


Figure 1 Crystal structure of cubic Na₂O. The yellow spheres correspond to the Na atoms and the red spheres correspond to the O atoms.

The calculated energy (E) and volume (V) data of a unit cell of cubic Na₂O were fitted to the third-order Birch - Murnaghan's equation of state (17, 18) to obtain the equilibrium volume (V_0), the bulk modulus (B_0), and its pressure derivative (B'_0). The third-order Birch - Murnaghan's equation of state is written as,

$$E(V) = E_0 + \frac{9}{16} V_0 B_0 \left\{ \left[\left(\frac{V_0}{V} \right)^{\frac{2}{3}} - 1 \right]^3 B'_0 + \left[\left(\frac{V_0}{V} \right)^{\frac{2}{3}} - 1 \right]^2 \left[6 - 4 \left(\frac{V_0}{V} \right)^{\frac{2}{3}} \right] \right\} \quad \dots(1)$$

The elastic constants (C_{ij}) are the crucial parameters for the calculation of mechanical properties of materials. For cubic structure, there are 3 independent elastic constants, namely C_{11} , C_{12} , and C_{44} (19). Their values can be determined from the stress-strain approach. The three independent elastic constants are demonstrated as,

$$\begin{pmatrix} \sigma_{xx} \\ \sigma_{yy} \\ \sigma_{zz} \\ \sigma_{yz} \\ \sigma_{zx} \\ \sigma_{xy} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} C_{11} & C_{12} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{11} & C_{12} & 0 & 0 & 0 \\ C_{12} & C_{12} & C_{11} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & C_{44} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_{xx} \\ e_{yy} \\ e_{zz} \\ e_{yz} \\ e_{zx} \\ e_{xy} \end{pmatrix} \quad \dots(2)$$

where σ_{ij} ($i, j = x, y, z$) are the stress components, e_{ij} ($i, j = x, y, z$) are the strain components, and $C_{\alpha\beta}$ ($\alpha, \beta = 1, 2, 3, 4, 5, 6$) are the elastic constants. According to the calculated elastic constants, other elastic moduli including bulk modulus (B), shear modulus (G), Young's modulus (E) and Poisson's ratio (ν) can be obtained by Voigt-Reuss-Hill (VRH) method as described in Ref. (20) and (21). In cubic structure, the equations are demonstrated as

$$B_V = B_R = \frac{1}{3} (C_{11} + 2C_{12}) \quad (3)$$

$$G_V = \frac{1}{5} (C_{11} - C_{12} + 3C_{44}) \quad (4)$$

$$G_R = \frac{5(C_{11} - C_{12})C_{44}}{4C_{44} + 3(C_{11} - C_{12})} \quad (5)$$

$$B = \frac{B_V + B_R}{2} \quad (6)$$

$$G = \frac{G_V + G_R}{2} \quad (7)$$

where V and R represent the Voigt and Reuss approximation, respectively. Then the Young's modulus (E) and Poisson's ratio (ν) can be calculated from,

$$E = \frac{9BG}{3B+G} \quad (8)$$

$$\nu = \frac{3B-2G}{2(3B+G)} \quad (9)$$

RESULTS AND DISCUSSIONS

Structural properties

The crystal structure of Na₂O is cubic structure (cubic Na₂O) with Fm-3m (no. 225). The cubic Na₂O contains 12 atoms per unit cell (8 Na

atoms and 4 O atoms). To obtain the equilibrium structure of cubic Na_2O , we first calculated energy as a function of volume, $E(V)$, as shown in Figure 2 for both LDA and GGA approximation. Then fitted the calculated E - V data with the third-order Birch - Murnaghan's equation of state (17, 18) to obtain the equilibrium volume (V_0), the bulk modulus (B_0), and its pressure derivative (B'_0). The fitting results are listed in Table 1.

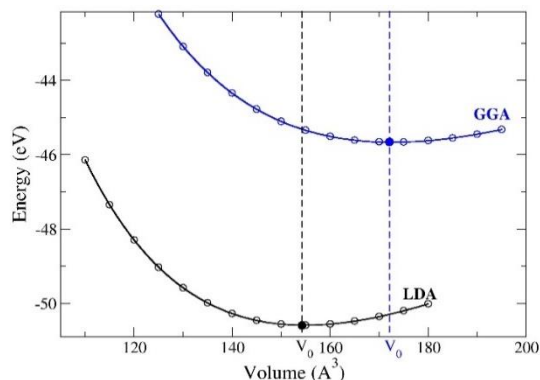


Figure 2 The calculated energy (E) and volume (V) data from LDA (black color) and GGA (blue color) approximations. The solid circles represent the equilibrium volume (V_0).

Table 1 Calculated lattice constants (a), bulk modulus (B), and its pressure derivative (B') of cubic Na_2O

	This work		Other calculations		Exp.
	LDA	GGA	LDA	GGA	
a (Å)	5.363	5.562	5.398 ⁽⁹⁾ , 5.408 ⁽⁸⁾	5.583 ⁽⁹⁾ , 5.592 ⁽⁸⁾	5.49 ⁽²²⁾
B (GPa)	59.09	47.04	56 ⁽⁹⁾ , 57.79 ⁽⁸⁾	54 ⁽⁹⁾ , 47.11 ⁽⁸⁾	55.6 ⁽⁵⁾
B'	4.45	4.41	4.20 ⁽⁸⁾	4.71 ⁽⁸⁾	-

Table 2 Calculated elastic constants (C_{ij}) and other elastic moduli of cubic Na_2O .

	This work		Other calculations		Exp.
	LDA	GGA	LDA	GGA	
C_{11} (GPa)	120	98.6	114 ⁽⁹⁾	114 ⁽⁹⁾	-
C_{12} (GPa)	24.1	12.6	37.8 ⁽⁹⁾	34.7 ⁽⁹⁾	-
C_{44} (GPa)	32.7	25.2	32.8 ⁽⁹⁾	27.4 ⁽⁹⁾	-
B (GPa)	56.1	41.3	56 ⁽⁹⁾ , 57.79 ⁽⁸⁾	54 ⁽⁹⁾ , 47.11 ⁽⁸⁾	55.6 ⁽⁵⁾
G (GPa)	38.1	31.3	-	-	-
E (GPa)	93.2	75.0	-	-	-
ν	0.223	0.197	-	-	-
B/G	1.472	1.319	-	-	-
H_V (GPa)	7.80	7.69	-	-	-

From Table1, we can see that our calculated results are in good agreement with the previously works. The lattice constant calculated from LDA is 2.32 % smaller than the value from experiment and it is only 1.32 % higher than the experimental value by using GGA. We can see that LDA gives a slightly smaller lattice constant and a slightly larger bulk modulus than GGA.

Mechanical properties

The elastic constants and elastic moduli are the crucial information to study the mechanical properties in materials. All elastic constants and bulk moduli calculated from LDA are slightly larger than those values calculated from GGA, by the reason of the lattice constant calculated from LDA is slightly smaller than that calculated from GGA. The calculated elastic constants for cubic Na₂O are listed in Table2. Our calculated elastic constants are consistent with other calculations. Note that, there are no experimental results for elastic constants in cubic Na₂O.

The elastic constants C_{11} represents the elasticity in length whereas the other elastic constants, C_{12} and C_{44} represent the elasticity in shape. In general, we can see that C_{11} has the largest value, implying that the deformation in length is stronger than the deformation in shape.

Moreover, the stability of crystal can be considered from the mechanical stability. For cubic structure, the mechanical stability must obey Born's criteria (23) by the limitations on elastic constants as following relations, $C_{11} > 0$;

$C_{44} > 0$; $C_{11} - C_{12} > 0$; $C_{11} + 2C_{12} > 0$. Our calculated results from both LDA and GGA calculations indicate that the obtained elastic constants of cubic Na₂O at ambient pressure satisfy the mechanical stability criteria.

The calculated elastic moduli including the bulk modulus (B), shear modulus (G), Young's modulus (E), Poisson's ratio (ν), and B/G ratio are also listed in Table2. The bulk modulus (B), shear modulus (G) and Young's modulus (E) reflect the resistance of materials against volume change, the resistance of materials against shape change and stiffness of materials, respectively. By using VRH approximation, the bulk modulus (B) from both LDA and GGA approximations are consistent with those obtained by the third-order Birch-Murnaghan equation of state fittings. Our calculated bulk moduli are in good agreement with the experimental value. The ν and B/G value are used to determine the brittleness and ductility of materials (24). A material with $\nu < 0.26$ or $B/G < 1.75$ is brittle, if not it is ductile. From Table2, the calculated ν and B/G values from both LDA and GGA approximations indicate that cubic Na₂O compound can be classified as brittle material at ambient pressure. The B and G also are used to determine hardness in materials. Hardness is a measure of the resistance of materials against the deformations. The hardness (H_V) of cubic Na₂O is determined using the equation proposed by Tian et. al. (25) for low hardness materials, written as, $H_V = 0.92(\frac{G}{B})^{1.137}G^{0.708}$. From this relation, we can see that the high hardness corresponds to the high G/B and G values. The

hardness values calculated from LDA and GGA are 7.80 GPa and 7.69 GPa respectively. The calculated hardness obtained from LDA is a bit larger than that obtained from GGA.

CONCLUSION

In summary, the first-principles calculations method within LDA and GGA approximations were used to investigate the structural and mechanical properties of cubic Na_2O . The calculated lattice constant and elastic constants are in good agreement with the available experimental and theoretical data. All elastic constants and bulk moduli calculated from LDA are slightly larger than those values calculated from GGA, by the reason of the lattice constant calculated from LDA is slightly smaller than that calculated from GGA. By using the calculated elastic constants and Born's criteria, cubic Na_2O was found to be mechanically stable at ambient pressure. Moreover, the elastic moduli such as bulk modulus (B), shear modulus (G), Young's modulus (E), and Poisson ratio (ν) of cubic Na_2O were obtained by the calculated elastic constants (C_{ij}). The Poisson's ratio and B/G ratio indicate a brittle manner of cubic Na_2O . The hardness of cubic Na_2O also were obtained by the G/B and G values. We hope our work will provide more understanding and information for the researcher in Na_2O material.

ACKNOWLEDGMENT

The authors would like to acknowledge the High Performance Computing Laboratory

(HPCL), College of Nanotechnology (KMITL) for providing computational resources.

REFERENCES

1. Jamal M, Venugopal G, Shareefuddin M, Chary MN. Sodium ion conducting glasses with mixed glass formers $\text{NaI-Na}_2\text{O-V}_2\text{O}_5\text{-B}_2\text{O}_3$: application to solid state battery. *Mater Lett*. 1999;39(1):28-32.
2. Cho KI, Lee SH, Cho KH, Shin DW, Sun YK. $\text{Li}_2\text{O-B}_2\text{O}_3\text{-P}_2\text{O}_5$ solid electrolyte for thin film batteries. *J Power Sources*. 2006;163(1):223-8.
3. Lee KB, Beaver MG, Caram HS, Sircar S. Performance of Na_2O promoted alumina as CO_2 chemisorbent in sorption-enhanced reaction process for simultaneous production of fuel-cell grade H_2 and compressed CO_2 from synthesis gas. *J Power Sources*. 2008;176(1):312-9.
4. Zintl E, Harder A, Dauth B. Gitterstruktur der oxyde, sulfide, selenide und telluride des lithiums, natriums und kaliums. *Zeitschrift für Elektrochemie und angewandte physikalische Chemie*. 1934;40(8):588-93.
5. Wu X, Zhang Y, Zhang J, Liu R, Yang J, Yang B, et al. High pressure X-ray diffraction study of sodium oxide (Na_2O): Observations of amorphization and equation of state measurements to 15.9 GPa. *J Alloy Compd*. 2020;823:153793.
6. Dovesi R, Roetti C, Freyria-Fava C, Prencipe M, Saunders V. On the elastic properties of

- lithium, sodium and potassium oxide. An ab initio study. *Chem Phys.* 1991;156(1):11-9.
7. Shukla A, Dolg M, Fulde P, Stoll H. Towards a quantum-chemical description of crystalline insulators: a Wannier-function-based Hartree-Fock study of Li_2O and Na_2O . *J Chem Phys.* 1998;108(20):8521-7.
 8. Moakafi M, Khenata R, Bouhemadou A, Khachai H, Amrani B, Rached D, et al. Electronic and optical properties under pressure effect of alkali metal oxides. *Eur Phys J B.* 2008;64(1):35-42.
 9. Thompson M, Shen X, Allen PB. Density functional calculation of electronic structure and phonon spectra of Na_2O . *Phys Rev B.* 2009;79(11):113108.
 10. Hohenberg P, Kohn W. Inhomogeneous Electron Gas. *Phys Rev.* 1964;136(3B):B864-71.
 11. Kohn W, Sham LJ. Self-Consistent Equations Including Exchange and Correlation Effects. *Phys Rev.* 1965;140(4A):A1133-8.
 12. Kresse G, Furthmüller J. Efficient iterative schemes for ab initio total-energy calculations using a plane-wave basis set. *Phys Rev B.* 1996;54(16):11169-86.
 13. Ceperley DM, Alder BJ. Ground State of the Electron Gas by a Stochastic Method. *Phys. Rev. Lett.* 1980;45(7):566-9.
 14. Perdew JP, Zunger A. Self-interaction correction to density-functional approximations for many-electron systems. *Phys Rev B.* 1981;23(10):5048-79.
 15. Perdew JP, Chevary JA, Vosko SH, Jackson KA, Pederson MR, Singh DJ, et al. Atoms, molecules, solids, and surfaces: Applications of the generalized gradient approximation for exchange and correlation. *Phys Rev B.* 1992;46(11):6671-87.
 16. Monkhorst HJ, Pack JD. Special points for Brillouin-zone integrations. *Phys Rev B.* 1976;13(12):5188-92.
 17. Birch F. Finite Elastic Strain of Cubic Crystals. *Phys Rev.* 1947;71(11):809-24.
 18. Murnaghan FD. The compressibility of media under extreme pressure. *Am J Math.* 1944;49(2):235.
 19. Kittel C. *Introduction to Solid State Physics.* USA: John Wiley & Sons, Inc; 1996.
 20. Hill R. The Elastic Behaviour of a Crystalline Aggregate. *Proc Phys Soc Sec A.* 1952;65(5):349-54.
 21. Reuss A. Berechnung der Fließgrenze von Mischkristallen auf Grund der Plastizitätsbedingung für Einkristalle. *ZAMM. J Appl Math Mech.* 1929;9(1):49-58.
 22. Zintl E, Harder A, Dauth B. Lattice Structure of the oxides, sulfides, selenides and tellurides of lithium, sodium and potassium. *Z Elektrochem.* 1934;40:588.
 23. Born M, Huang K. *Dynamical theory of crystal lattices.* Clarendon press; 1954.
 24. Pugh S. XCII. Relations between the elastic moduli and the plastic properties of polycrystalline pure metals. *The London,*

Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science. 1954;45(367):823-43.

25. Tian Y, Xu B, Zhao Z. Microscopic theory of hardness and design of novel superhard crystals. *Int J Refract Met H*. 2012;33:93-106.



การปรับปรุงคุณภาพน้ำโดยกระบวนการทางชีวภาพสำหรับแหล่งน้ำสาธารณะ กรณีศึกษาบึงแก่นนคร

Water Quality Improvement by Biological Process for Public Water Resource: A Case Study Bueng Kaennakorn

พิสิษฐ์ ตันกิตติรัตนากุล วันสพรธรรม์ สวัสดิ์ และ ศศิธร หาสิน*

Pisit Tonkittirattanakul, Vanatpornratt Sawasdee and Sasitorn Hasin*

สาขาวิชานวัตกรรมจัดการสิ่งแวดล้อม วิทยาลัยนวัตกรรมการจัดการ มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์
ในพระบรมราชูปถัมภ์ จ.ปทุมธานี 13180

Program in Innovation of Environmental Management, College of Innovative Management, Valaya
Alongkorn Rajabhat University under the Royal Patronage, Pathumthani 13180, THAILAND

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

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Article history:	This research aims to water quality improvement by
Received: 4 June, 2020	bioaugmentation process (Biological) in Buen Kaennakorn. The selected
Revised: 17 June, 2020	microbes consist of 3 stains <i>Pediococcus spp.</i> <i>Pichia spp.</i> and <i>Dekkera spp.</i>
Accepted: 3 July, 2020	that input into 10 points of Buen Kaennakorn. The parameters that effect
Available online: 14 August, 2020	to eutrophication phenomenon was measured. This research found that
DOI: 10.14456/rj-mutt.2020.15	temperature in Buen Kaennakorn between 29-35 °C that suitable for growth
Keywords:	of organisms, aquatic plants, and algae. The pH at release point of
water quality improvement,	microorganisms was between 7.5-7.9 that also suitable for growth of
Bueng Kaennakorn,	organisms, aquatic plants, and algae. Dissolve oxygen (DO) was 10.8-4.5 mg
biological process, selected	L ⁻¹ . The initial state, dissolve oxygen was less than 5 mg L ⁻¹ that was not
microbes, eutrophication	suitable for rest area. After biological treatment with selected microbes that
phenomenon	can be increase dissolve oxygen and lead to high water quality category 2
	that suitable for rest area. In term of nitrogen: phosphorus ratio was
	R = 11.155 mg L ⁻¹ that higher than 10. This ratio was showed the higher
	nitrogen in water resource and phosphorus was limits the eutrophication
	phenomenon in Buen Kaennakorn. After biological treatment with selected

microbes that can be decrease the nitrogen: phosphorus ratio was $R = 6.275 \text{ mg L}^{-1}$ that can be reduced within specified range and was not affect to eutrophication phenomenon. In term of blue green algae that was investigated with optical microscope. The results showed that selected microbe can be destroy and decrease of algae. Therefore, the selected microbe that good choice can be used to water quality improvement in Buen Kaennakorn and effective for water quality improvement.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อการปรับปรุงคุณภาพน้ำโดยใช้กระบวนการทางชีวภาพในบึงแก่นนคร กลุ่มจุลินทรีย์คัดสายพันธุ์เพื่อการบำบัดน้ำเสียนั้นจะใช้จุลินทรีย์ทั้งหมด 3 สกุล *Pediococcus spp.*, *Pichia spp.* และ *Dekkera spp.* เติมน้ำในพื้นที่บึงแก่นนครทั้งหมด 10 จุด มีการตรวจวัดพารามิเตอร์ที่ส่งผลต่อการเกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน จากผลการวิจัยพบว่าในบึงแก่นนครมีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 29-35 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นอุณหภูมิที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของสิ่งมีชีวิต พืชน้ำและสาหร่าย ในส่วนค่าพีเอช ทั้ง 10 จุด ตามจุดปล่อยจุลินทรีย์พบว่ามีความอยู่ในช่วง 7.5-7.9 ตลอดระยะเวลาการทำการตรวจวัด ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ ค่าออกซิเจนละลายในน้ำ (Dissolve Oxygen: DO) พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 4.5-10.8 มิลลิกรัม/ลิตร ในช่วงเริ่มต้นมีค่าออกซิเจนละลายในน้ำไม่ถึง 5 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งเป็นค่าที่คุณภาพน้ำที่ไม่เหมาะสมสำหรับพื้นที่การพักผ่อนหย่อนใจ แต่เมื่อผ่านการปรับปรุงคุณภาพน้ำโดยจุลินทรีย์คัดสายพันธุ์ ทำให้ค่าออกซิเจนละลายในน้ำเพิ่มขึ้น เมื่อเทียบกับประเภทการใช้ประโยชน์ของแหล่งน้ำผิวดินพบว่า อยู่ในประเภทที่ 2 ซึ่งเหมาะสมกับการเป็นแหล่งพักผ่อนหย่อนใจ พารามิเตอร์อัตราส่วนระหว่างไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส พบว่าค่า $R = 11.155$ มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งมีค่ามากกว่า 10 แสดงให้เห็นว่าในบึงแก่นนครมีปริมาณไนโตรเจนมาก และฟอสฟอรัสเป็นตัวจำกัดการเกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน หลังจากการใช้จุลินทรีย์คัดสายพันธุ์เพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำ พบว่าค่า $R = 6.275$

มิลลิกรัม/ลิตร ถือได้ว่าลดลงอยู่ในช่วงที่กำหนด ไม่ส่งผลกระทบต่อการเกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน และในส่วนของปริมาณสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน จากการส่องกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง พบว่าจุลินทรีย์คัดสายพันธุ์สามารถทำลายเซลล์สาหร่าย และลดปริมาณสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินได้ ดังนั้นการนำจุลินทรีย์คัดสายพันธุ์มาใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำในบึงแก่นนคร จึงถือได้ว่าเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่ดีและมีประสิทธิภาพสำหรับการปรับปรุงคุณภาพน้ำในบึงแก่นนคร

คำสำคัญ: การปรับปรุงคุณภาพน้ำ บึงแก่นนคร กระบวนการทางชีวภาพ จุลินทรีย์คัดสายพันธุ์ ปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน

บทนำ

ปัจจุบันการขยายตัวของชุมชนเมืองมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ส่งผลให้เกิดการขยายตัวของพื้นที่เมืองออกไปเกิดการเพิ่มจำนวนประชากรที่อยู่รวมตัวกันหนาแน่นมากขึ้นในพื้นที่ต่างจังหวัด โดยเฉพาะจังหวัดขอนแก่น ถือเป็นจังหวัดที่มีความเจริญอย่างมาก ชุมชนเมืองเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก ทำให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อม โดยเฉพาะอย่างยิ่งปัญหาด้านมลพิษทางน้ำ เนื่องจากชุมชนที่อาศัยอยู่บริเวณโดยรอบหรือใกล้เคียงพื้นที่แหล่งน้ำสาธารณะนั้น สามารถทำให้เกิดการปนเปื้อนน้ำเสียจากชุมชนลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะ ดังนั้นเมื่อแหล่งน้ำสาธารณะไม่ได้รับการดูแลอย่างถูกวิธี ส่งผลให้เกิดการเน่าเสีย ปัญหาหลักที่ทำให้แหล่งน้ำสาธารณะเกิดการเน่า

เสีย คือ การเกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (Eutrophication) เป็นปรากฏการณ์ที่แหล่งน้ำมีธาตุอาหารอุดมสมบูรณ์ ทำให้สาหร่ายและพืชน้ำเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว (1) เมื่อเวลาผ่านไปพืชน้ำและสาหร่ายน้ำจะตายทับถมกันจนทำให้น้ำเน่าเสีย ปริมาณออกซิเจนละลายลดลง เกิดความเสื่อมโทรมของแหล่งน้ำและคุณภาพน้ำ ปัจจัยที่สำคัญที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ ยูโทรฟิเคชัน คือ ปริมาณธาตุอาหาร ประกอบด้วยไนโตรเจนและฟอสฟอรัส นอกจากนี้ยังมีปัจจัยอื่น ๆ ที่สนับสนุนการเกิดปรากฏการณ์ คือ เวลา ความเข้มแสง และอุณหภูมิ (2, 3) โดยปกติปริมาณธาตุอาหารในแหล่งน้ำธรรมชาติมีเพียงพอต่อความต้องการของพืชน้ำ และสาหร่ายในน้ำสำหรับการเจริญเติบโต แต่เนื่องจากการขยายตัวของชุมชนเมือง ส่งผลให้ปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสจากน้ำเสียชุมชนเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ดังนั้นการแก้ปัญหาการเกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชันได้อย่างรวดเร็ว คือ การลดปริมาณหรือกำจัดพืชน้ำหรือสาหร่ายโดยผ่านกระบวนการบำบัดน้ำเสีย ซึ่งกระบวนการบำบัดน้ำเสียสามารถแบ่งได้เป็น 3 ประเภท คือ กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางกายภาพ กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางเคมี และกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ (4) โดยกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางกายภาพนั้นเป็นการใช้หลักการทางกายภาพ เช่น การดักด้วยตะแกรง (Screening) การกรอง (Filtration) เป็นต้น กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางกายภาพนั้น เหมาะสมกับการกำจัดสิ่งสกปรกที่ไม่ละลายน้ำ จึงเป็นการกำจัดสิ่งสกปรกขั้นต้นเพื่อนำไปสู่กระบวนการขั้นถัดไป กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางเคมี เป็นการทำปฏิกิริยากับสิ่งเจือปนในน้ำเสียที่มีอยู่ในรูปสารละลาย เพื่อการกำจัดและปรับปรุงคุณภาพน้ำให้ดีขึ้น เช่น การทำให้เป็นกลาง (Neutralization) การทำให้ตกตะกอน (Precipitation) และปฏิกิริยาออกซิเดชัน – รีดักชัน (Oxidation-Reduction) เป็นต้น กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ เพื่อลดปริมาณสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน รวมถึงลดปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสนั้น เป็นการใช้

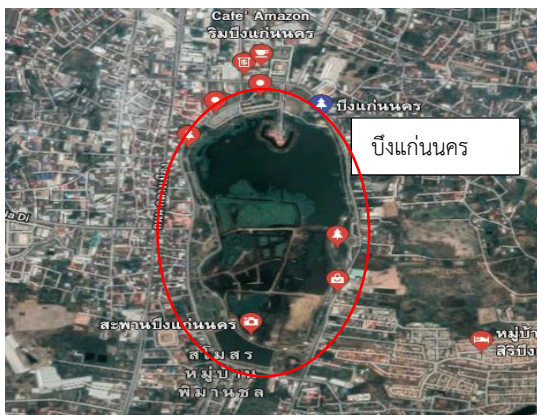
จุลินทรีย์ (Microorganisms) ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำ โดยกระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพสามารถแบ่งได้เป็น 2 แบบ คือ การบำบัดแบบไม่ใช้ออกซิเจน (Anaerobic Treatment) และการบำบัดแบบใช้ออกซิเจน (Aerobic Treatment) ซึ่งกระบวนการบำบัดในแต่ละวิธีนั้นมีลักษณะที่แตกต่างกัน และเหมาะสมกับลักษณะของน้ำเสียที่แตกต่างกัน เพื่อให้การปรับปรุงคุณภาพน้ำมีประสิทธิภาพสูงสุด จากงานวิจัยที่ผ่านมา มีงานวิจัยเพื่อการลดปัญหาการเกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชันในแหล่งน้ำ โดยใช้พืชที่สามารถดูดซับปริมาณไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้ นักวิจัย Jiang และคณะ (5) ได้ศึกษาประสิทธิภาพในการดูดซับไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของ *Phragmites communis* และ *Zizania latifolia* ซึ่งจากงานวิจัยพบว่าพืชสองชนิดมีประสิทธิภาพในการดูดซับไนโตรเจนและฟอสฟอรัสได้ ทำให้สามารถลดการเกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชันได้ นอกจากนี้ยังมีกระบวนการกำจัดไนโตรเจนจากแหล่งน้ำโดยใช้วิธี Nitrification denitrification-anaerobic ammonia oxidation จากงานวิจัยของ Sharp R, และคณะ (6) ซึ่งถือเป็นวิธีทางชีวภาพที่อาศัยกระบวนการทำงานของจุลินทรีย์ จากผลการวิจัยพบว่าสามารถลดปริมาณไนโตรเจนได้ถึง 80 % ทำให้ไม่ส่งผลกระทบต่อเกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชันในแหล่งน้ำ ดังนั้นในงานวิจัยนี้เลือกใช้กระบวนการบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ โดยกลุ่มจุลินทรีย์คัดเลือกสายพันธุ์ ทั้งหมด 3 สกุล *Pediococcus spp.* *Pichia spp.* และ *Dekkera spp.* ในพื้นที่ศึกษาบึงแก่นนคร จังหวัดขอนแก่น โดยจุลินทรีย์คัดเลือกสายพันธุ์ทั้ง 3 ชนิดมีความสามารถในการย่อยสลายสารอินทรีย์ และสามารถทนอยู่ได้ในอุณหภูมิที่มีความแตกต่างกันได้ นอกเหนือจากนี้ *Dekkera spp.* ยังสามารถผลิตเอนไซม์ที่ใช้ในการย่อยเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสได้ ส่งผลให้สามารถเข้าไปย่อยสลายสาหร่ายที่ส่งผลต่อการเกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชันได้อีกด้วย (7) อย่างไรก็ตามการใช้วิธีทางชีวภาพนั้นยังสามารถลดการใช้สารเคมีสำหรับกำจัดสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินในกระบวนการ

ปรับปรุงคุณภาพน้ำ คือ คอปเปอร์ซัลเฟต (CuSO_4) ซึ่งเมื่อใช้ในปริมาณมากจะส่งผลกระทบต่อสิ่งมีชีวิตที่อาศัยในแหล่งน้ำ และยังสามารถเกิดการสะสมของโลหะหนักในชั้นดินใต้ท้องน้ำ (Benthic Zone) อีกด้วย (8) ดังนั้นการใช้จุลินทรีย์เฉพาะทางเพื่อปรับปรุงคุณภาพน้ำนั้น ถือเป็นทางเลือกที่ดีและหลีกเลี่ยงการใช้สารเคมีได้

วิธีดำเนินการวิจัย

พื้นที่ศึกษา

บึงแก่นนคร (รูปที่ 1) เป็นบึงขนาดใหญ่ มีเนื้อที่ 603 ไร่ ตั้งอยู่ในเขตเทศบาลนครขอนแก่น มีชื่อเดิมว่า บึงบอน เป็นบึงขนาดใหญ่ รูปร่างรี มีถนนรอบบึงอยู่ชั้นนอก ทางเท้าและที่พักผ่อนอยู่ริมบึงด้านใน ปัจจุบันบึงแก่นนครเป็นพื้นที่รับน้ำทิ้งจากครัวเรือนที่มาจากเทศบาลเมืองเก่าจังหวัดขอนแก่น และเกิดปัญหากลิ่นเหม็นในช่วงต้นฤดูฝนเป็นประจำ เนื่องจากการเกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน เป็นปรากฏการณ์ที่ปริมาณสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในแหล่งน้ำ ส่งผลให้น้ำเน่าเสียและเกิดกลิ่นเหม็นในบึงแก่นนคร รบกวนพื้กระจายไปทั่วบริเวณซึ่งเป็นแหล่งพักผ่อนของประชาชนและนักท่องเที่ยว (9)



รูปที่ 1 แสดงพื้นที่บึงแก่นนคร และการใช้ประโยชน์จากรอบบึงแก่นนคร

การปรับปรุงคุณภาพน้ำในบึงแก่นนครโดยใช้กลุ่มจุลินทรีย์

การใช้กลุ่มจุลินทรีย์คัดสายพันธุ์สำหรับการวิจัยได้รับจาก บริษัท จี แอนด์บี เอนไซม์ จำกัด ซึ่งมีจุลินทรีย์สกุลหลัก 3 สกุล คือ *Pediococcus spp.*, *Pichia spp.* และ *Dekkera spp.* กำหนดจุดเติมจุลินทรีย์ในบึงแก่นนคร จังหวัดขอนแก่น จำนวน 10 จุด ดังรูปที่ 2 (ก) – (ญ)



รูปที่ 2 (ก) – (ญ) จุดเติมจุลินทรีย์ในบึงแก่นนคร จังหวัดขอนแก่น จำนวน 10 จุด

การวิเคราะห์คุณภาพน้ำในบึงแก่นนคร

มีการวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design: CRD) โดยวางรูปแบบการทดลอง 5 x 4 Factorial Arrangement จำนวน 3 ซ้ำ โดยเก็บข้อมูลในช่วงฤดูฝน เนื่องจากเป็นช่วงที่มีการเกิดปัญหาอุทกภัยเป็นอย่างมากระหว่าง

พารามิเตอร์ชี้วัดคุณภาพน้ำก่อนและหลังการบำบัด ดัง
ตารางที่ 1

ตารางที่ 1 พารามิเตอร์ตรวจวัดคุณภาพน้ำก่อนและหลังการบำบัด

พารามิเตอร์	วิธีวิเคราะห์
อุณหภูมิ (Temperature; °C)	Meter (DIGICON WA-48SD)
ค่าพีเอช (pH)	pH Meter
ค่าออกซิเจนละลายในน้ำ (DO)	DO Meter
ไนเตรต (NO_3^-)	Cadmium Reduction Method
ออร์โทฟอสเฟต ($\text{OPO}_4\text{-P}$)	Ascorbic Method
ปริมาณสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (Blue green algae)	Optical Microscope

จากนั้นวิเคราะห์ข้อมูล โดยใช้สถิติเชิงพรรณนา (Descriptive Statistics) ได้แก่ ค่าเฉลี่ย (Mean) และ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation) และ สถิติเชิงอนุมาน (Inferential Statistic) เพื่อใช้ในการ ทดสอบสมมติฐาน (Hypothesis Testing) ในการใช้กลุ่ม จุลินทรีย์คัดสายพันธุ์สำหรับการแก้ไขปัญหการเกิด ปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชั่น จากนั้นจึงนำไปสู่การ สังเคราะห์ข้อมูลต่อไป

การคำนวณอัตราส่วนระหว่างไนโตรเจนและฟอสฟอรัส

ในการศึกษาการเกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชั่น นั้น อัตราส่วนระหว่างไนโตรเจนและฟอสฟอรัสถือเป็นสิ่ง สำคัญมาก เนื่องจากในแหล่งน้ำมีทั้งไนโตรเจน และ ฟอสฟอรัสที่สามารถส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์ได้ (3) ซึ่ง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$R = \frac{[TN]}{[OPO_4 P]} \quad (1)$$

เมื่อ

[TN] = ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในแหล่งน้ำ (มิลลิกรัม/ลิตร)

[$\text{OPO}_4\text{-P}$] = ปริมาณออร์โทฟอสเฟต (มิลลิกรัม/ลิตร)

ถ้าค่า $R > 10$ แสดงว่าแหล่งน้ำมีปริมาณ ไนโตรเจนมาก และฟอสฟอรัสเป็นตัวจำกัดการเกิดยูโทร ฟิเคชั่น ถ้าค่า $R < 5$ แสดงว่าแหล่งน้ำมีปริมาณ

ฟอสฟอรัสค่อนข้างมาก และไนโตรเจนเป็นตัวจำกัดการ เกิดยูโทรฟิเคชั่น

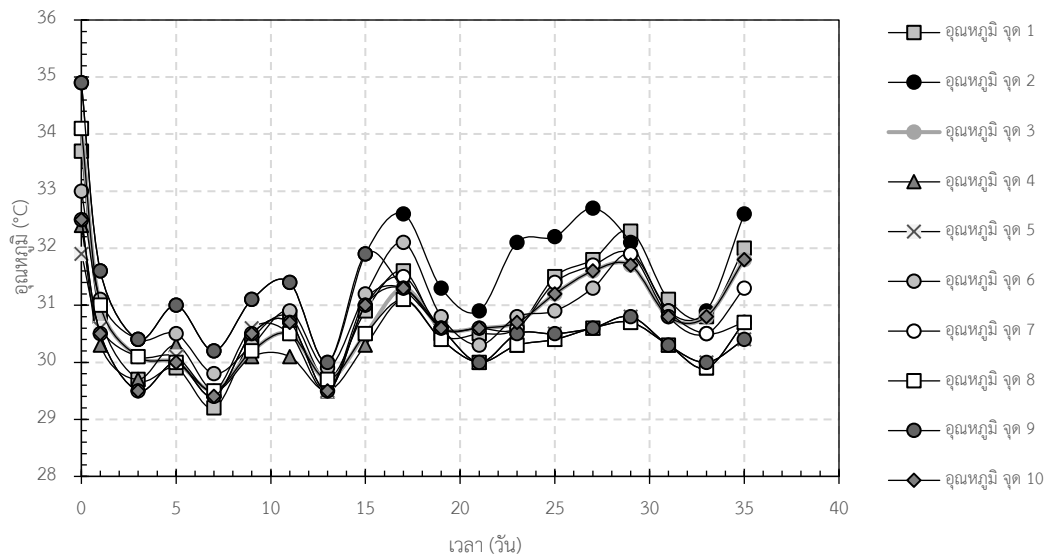
ผลการศึกษาและอภิปรายผล

ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำในบึงแก่นนครโดย ใช้กลุ่มจุลินทรีย์คัดสายพันธุ์สกุลหลัก 3 สกุล คือ *Pediococcus spp.*, *Pichia spp.* และ *Dekkera spp.* ที่ จุดปล่อยจุลินทรีย์ที่กำหนดไว้ 10 จุด รอบบึงแก่นนคร มี การติดตามพารามิเตอร์ที่สำคัญ ดังแสดงในตารางที่ 1 จากผลการวิจัยแสดงดังนี้

1) คุณภาพน้ำก่อนและหลังกระบวนการบำบัดทาง ชีวภาพโดยกลุ่มจุลินทรีย์คัดสายพันธุ์

การติดตามคุณภาพน้ำก่อนและหลังการบำบัด โดยกลุ่มจุลินทรีย์คัดสายพันธุ์นั้น ประกอบด้วย พารามิเตอร์ที่มีผลกระทบต่อ การเกิดปรากฏการณ์ยูโทร ฟิเคชั่น อุณหภูมิถือเป็นปัจจัยแรกที่สำคัญ เนื่องจาก อุณหภูมิเป็นพารามิเตอร์ทางกายภาพที่ส่งผลกระทบต่อ อัตราการเติบโตของพืชน้ำ และจุลินทรีย์ โดยอุณหภูมิที่ เหมาะสมควรอยู่ในช่วง 30-35 องศาเซลเซียส จากการ ตรวจวัดในแหล่งน้ำทั้ง 10 จุด พบว่ามีอุณหภูมิอยู่ในช่วง 29-35 องศาเซลเซียส (รูปที่ 3) ถือได้ว่าเป็นช่วงอุณหภูมิ

ที่เหมาะสมต่อสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ และไม่เร่งปฏิกิริยา
การเกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน



รูปที่ 3 อุณหภูมิในบึงแก่นนครทั้ง 10 จุด ตามจุดปล่อยจุลินทรีย์

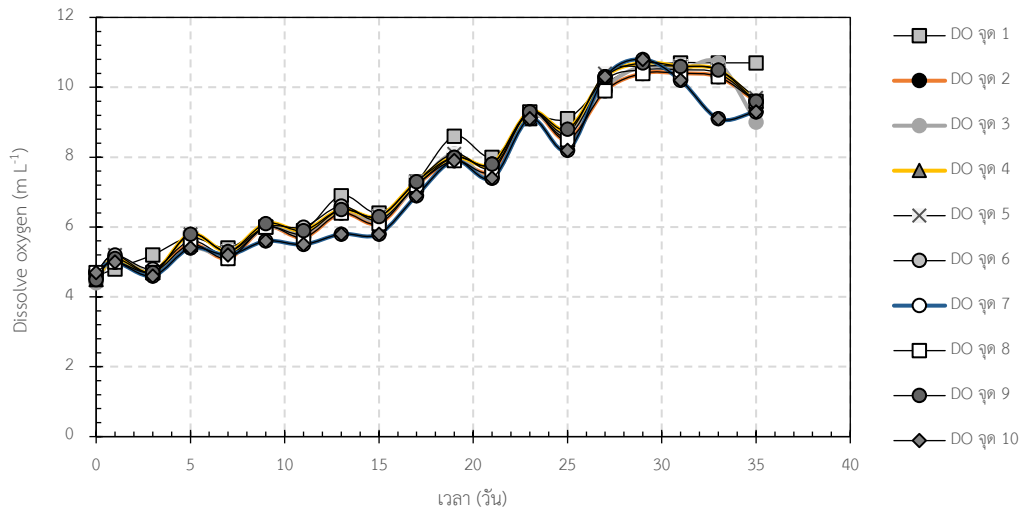
เมื่อพิจารณาค่าพีเอชในบึงแก่นนคร ทั้ง 10 จุด ตามจุดปล่อยจุลินทรีย์พบว่ามีความอยู่ในช่วง 7.5-7.9 ตลอดระยะเวลาการทำการตรวจวัด ซึ่งเป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ พารามิเตอร์ถัดไปที่มีความสำคัญสำหรับการเกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน คือ ค่าออกซิเจนละลายในน้ำ (Dissolve Oxygen: DO) ซึ่งเป็นพารามิเตอร์ที่ส่งผลกระทบโดยตรงต่อปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน (10) โดยจากการตรวจวัดค่าออกซิเจนละลายในบึงแก่นนครทั้งหมด 10 จุด พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 4.5-10.8 มิลลิกรัม/ลิตร โดยในช่วงวันเริ่มต้นนั้นพบว่าค่าออกซิเจนละลายในน้ำมีค่าน้อยกว่า 5 มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งในแหล่งน้ำควรมีค่าออกซิเจนละลายในน้ำมากกว่า 5 มิลลิกรัม/ลิตร (11) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงให้เห็นว่าแหล่งน้ำนั้นมีคุณภาพดี และจากรูปที่ 4 แสดงให้เห็นว่าเมื่อผ่านการเติมจุลินทรีย์คัตสายพันธุ์ ทำให้ค่าออกซิเจนละลายในน้ำเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากกลุ่มจุลินทรีย์คัตสายพันธุ์ทั้ง 3 ชนิด สามารถเข้าไปลดจำนวนสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินได้ ทำให้ออกซิเจนสามารถละลายลงสู่แหล่งน้ำได้มากขึ้น ในส่วนพารามิเตอร์

ไนโตรเจนนั้น ไนเตรต (NO_3^-) ถือเป็นตัวแทนของไนโตรเจน เนื่องจากในการสร้างชีวมวลของสาหร่ายจะใช้ไนโตรเจนในรูปไนเตรต และปริมาณฟอสฟอรัสในรูปของออร์โธฟอสเฟต ซึ่งไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเป็นพารามิเตอร์ที่สำคัญที่ส่งผลกระทบต่อแหล่งน้ำ (12) กระตุ้นให้พืชน้ำและสาหร่ายเกิดการเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้เกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน ดังนั้นจึงมีการพิจารณาในส่วนไนเตรต และฟอสฟอรัส เพื่อคาดการณ์การเกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน โดยใช้ความสัมพันธ์ระหว่างปริมาณไนโตรเจน และฟอสฟอรัส ซึ่งโดยปกติการสร้างเซลล์สาหร่ายต้องใช้อัตราส่วนของไนโตรเจนต่อฟอสฟอรัส คือ 7:1 (3) ซึ่งในแหล่งน้ำสามารถบ่งชี้ได้ว่าไนโตรเจนหรือฟอสฟอรัสที่เป็นสาเหตุหลักทำให้เกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน จากผลการวิเคราะห์ พบว่าบึงแก่นนครมีไนโตรเจนเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้เกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน

เนื่องจากมีค่า $R = 11.155$ มิลลิกรัม/ลิตร (โดยคำนวณจากค่าไนโตรเจน และฟอสฟอรัสที่ตรวจวัดได้) ซึ่งมีค่ามากกว่า 10 แสดงให้เห็นว่าในบึงแก่นนครมี

ปริมาณไนโตรเจนมาก และฟอสฟอรัสเป็นตัวจำกัดการเกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน หลังจากการใช้จุลินทรีย์คัดสายพันธุ์ จึงมีการวิเคราะห์อัตราส่วนของไนโตรเจน

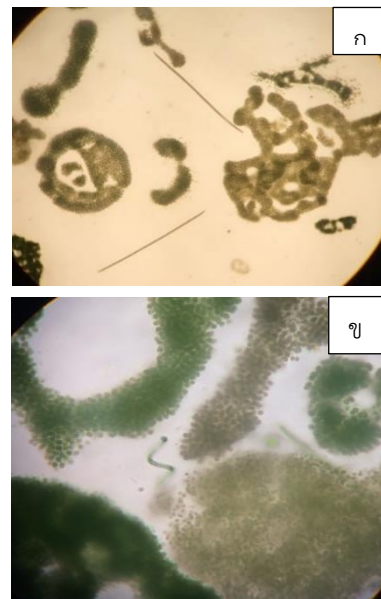
และฟอสฟอรัส พบว่าค่า $R = 6.275$ มิลลิกรัม/ลิตร ซึ่งมีค่าอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตของสาหร่ายในแหล่งน้ำไม่มากเกินไป



รูปที่ 4 ปริมาณออกซิเจนละลายในน้ำในบึงแก่นนคร

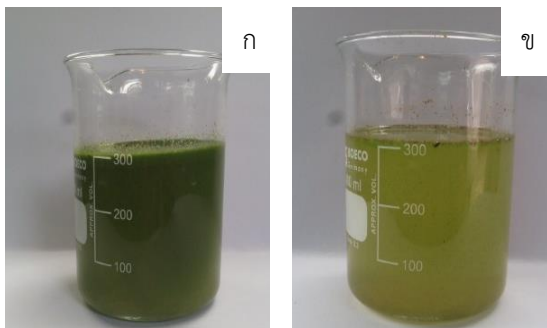
2) ปริมาณสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงิน (Blue green algae)

โดยทั่วไปสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินสามารถพบได้ในแหล่งน้ำผิวดินทั่วไป มีบทบาทสำคัญในห่วงโซ่อาหารในสิ่งแวดล้อม (13) ซึ่งสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินนั้น สามารถเจริญเติบโตได้ดีในสภาวะที่เหมาะสม มีอุณหภูมิ แสง ธาตุอาหารโดยเฉพาะไนโตรเจนและฟอสฟอรัส ซึ่งเมื่อมีธาตุอาหารมากเกินไป ทำให้เกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชันในแหล่งน้ำนั้น ๆ ดังนั้นการตรวจสอบสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินในแหล่งน้ำ ก่อนและหลังจากการเติมกลุ่มจุลินทรีย์คัดสายพันธุ์ เป็นสิ่งจำเป็น นอกเหนือจากพารามิเตอร์อื่น ๆ จากการส่องกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง เพื่อติดตามการทำงานของกลุ่มจุลินทรีย์คัดสายพันธุ์ ดังรูปที่ 5



รูปที่ 5 แสดงลักษณะสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินจากการส่องกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง (ก) คือลักษณะสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินก่อนการเติมจุลินทรีย์คัดสายพันธุ์ และ (ข) ลักษณะสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินหลังการเติมจุลินทรีย์คัดสายพันธุ์

จากรูปแสดงให้เห็นว่าจุลินทรีย์คัดสายพันธุ์สามารถทำลายเซลล์ของสาหร่ายและยับยั้งการเจริญเติบโตของสาหร่าย อีกทั้งยังสามารถปรับสภาพน้ำให้มีความขุ่นลดลง ดังนั้นหลังจากการเติมจุลินทรีย์คัดสายพันธุ์ทำให้น้ำในแหล่งน้ำใสขึ้น ดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 ตัวอย่างน้ำในบึงแก่นนคร (ก) ก่อนการเติมจุลินทรีย์คัดสายพันธุ์ (ข) หลังการเติมจุลินทรีย์คัดสายพันธุ์

สรุปผล

การปรับปรุงคุณภาพน้ำโดยใช้กระบวนการทางชีวภาพ กลุ่มจุลินทรีย์คัดสายพันธุ์เพื่อการบำบัดน้ำเสียนั้นจะใช้จุลินทรีย์ทั้งหมด 3 สกุล *Pediococcus spp.*, *Pichia spp.* และ *Dekkera spp.* โดยเติมในพื้นที่บึงแก่นนครทั้งหมด 10 จุดนั้น สามารถใช้ในการปรับปรุงคุณภาพน้ำในบึงแก่นนคร ช่วยเพิ่มค่าออกซิเจนละลายในน้ำ และสามารถลดปริมาณธาตุอาหารที่เป็นสาเหตุสำคัญสำหรับการเกิดปรากฏการณ์ยูโทรฟิเคชัน ถือเป็นอีกหนึ่งทางเลือกที่ดีและมีประสิทธิภาพสำหรับการปรับปรุงคุณภาพน้ำในบึงแก่นนคร ทำให้บึงแก่นนครเป็นพื้นที่พักผ่อนหย่อนใจ และชุมชนโดยรอบพื้นที่มีคุณภาพชีวิตที่ดีขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณบริษัท จี แอนด์ บี เอนไซม์ จำกัด ที่ให้ความอนุเคราะห์เชื้อจุลินทรีย์คัดสายพันธุ์สำหรับการดำเนินการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

1. Zamparas M, Zacharias I. Restoration of eutrophic freshwater by managing internal nutrient loads A review. *Sci Total Environ.* 2014;496:551-62.
2. อ่อนจันทร์ โคตรพงษ์, อัศมน ลิ้มสกุล, วุฒิชัย แพงแก้ว, บุญชอบ สุทมนัสวงษ์. พลวัตของธาตุอาหารพืช ยูโทรฟิเคชัน และเมตาบอลิซึม ของระบบนิเวศในพื้นที่ชุ่มน้ำทะเลน้อย [Nutrient dynamics, eutrophication and ecosystem metabolism in Thalenoi wetland]. *วารสารการจัดการสิ่งแวดล้อม.* 2553;6(2):1-18.
3. มลิวรรณ บุญเสนอ. นิเวศพิษวิทยา (Ecotoxicology). พิมพ์ครั้งที่ 5. นครปฐม: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตพระราชวังสนามจันทร์; 2560.
4. สันตัต ศิริอนันต์ไพบูลย์. ระบบบำบัดน้ำเสีย Wastewater Treatment System. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: สำนักพิมพ์ท็อป จำกัด; 2557.
5. Rajasekhar P, Fan L, Nguyen T, Roddick FA. A review of the use of sonication to control cyanobacterial blooms. *Water Res.* 2012;46:4319-29.
6. Sharp R, Khunjar W, Daly D, Perez-Terrero J, Chandran K, Niemiec A, et al. Nitrogen removal from water resource recovery facilities using partial nitrification, denitrification-anaerobic ammonia oxidation (PANDA). *Sci Total Environ.* 2020;724:138283.
7. Oelofse A, Pretorius IS, Toit MD. Significance of *Brettanomyces* and *Dekkera* during

- Winemaking: A Synoptic Review. *Enol Vitic.* 2008;29(2):128-44.
8. Jiang CL, Cui GB, Fan XQ. Purification capacity of ditch wetland to agricultural non-point pollutants. *Huan Jiang Ke Xue.* 2004;25:125–8.
 9. บึงแก่นนคร [อินเทอร์เน็ต]. [สืบค้นเมื่อวันที่ 15 เม.ย. 2563]. จาก: <https://www.paiduaykan.com/travel>
 10. Yi L, Gao B, Liu H, ZhangY, Du C, Li Y. Characteristics and assessment of toxic metal contamination in surface water and sediments near a uranium mining area. *Int J Environ Res Public Health.* 2020;17:548.
 11. กรมควบคุมมลพิษ. พระราชบัญญัติส่งเสริมและรักษาคุณภาพสิ่งแวดล้อมแห่งชาติ พ.ศ. 2535 กฎประกาศ และระเบียบที่เกี่ยวข้องด้านการควบคุมมลพิษ. พิมพ์ครั้งที่ 5. กรุงเทพมหานคร: โรงพิมพ์องค์การสงเคราะห์ทหารผ่านศึก; 2555.
 12. Ansari AA, Gill SS. Eutrophication: Causes, Consequences and Control. 2nd ed. Switzerland: Springer; 2014.
 13. Lemley DA, Adams JB. Chapter 1 Eutrophication. *Encyclopedia of Ecology.* 2nd ed. Elsevier; 2018.



คุณภาพการปรากฏลายนิ้วมือแฝงบนโลหะแต่ละประเภทโดยใช้วิธีการปิดผงฝุ่นสีดำ

The Quality Appearance of Latent Fingerprint on Various Metals by Using Black Dust Powder

ณัฐธิดา ปนสันเทียะ และ วรวัช วิชชวานิชย์*

Nattida Ponsunthia and Woratouch Vichuwanich*

คณะนิติวิทยาศาสตร์ โรงเรียนนายร้อยตำรวจ อ.สามพราน จ.นครปฐม 73110

Forensic Science Faculty, Royal Police Cadet, Samphran, Nakhonpathom 73110, THAILAND

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

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article history:

Received: 5 May, 2020

Revised: 29 June, 2020

Accepted: 22 July, 2020

Available online: 14 August, 2020

DOI: 10.14456/rj-rmutt.2020.16

Keywords: appearance of latent fingerprint, sex, round, time, metal type

The objective of this research was to study the appearances of latent fingerprints occurring on different types of metal by using the dusting method. The black power was used to compare quality appearances. The sample group consisted of six members including 3 men and 3 women. The experiment was conducted by testing 3 men on five different types of metal including copper sheet (C1100), Brass sheet (C2801), Galvanized sheet (G3302), coin and Aluminum. The duration of the experiment was 1 hour, 3 hours, 6 hours, 1 day, 3 days, 5 days, 1 week, 2 weeks, 3 weeks and 4 weeks repeating 3 times. The women was testing the same as men. After that, the AFIS machine was used for minutiae count to compare the appearances of the latent fingerprint. The results indicated that the appearances of latent fingerprint between male and female were significant difference. The statistically significant result was 0.05 ($T = 1.672$, $Sig = 0.000$) After consideration, The appearances of latent fingerprint in male were more obvious than female and the quality of latent fingerprint appearances in each metal was statistically significant difference 0.05 ($F = 7979.118$, $Sig = 0.000$) founded that copper, brass and coin had high resolution respectively there was no a significant difference on the quality of latent fingerprint appearances

in each duration with repeating 3 round and times. Types of metal giving the high resolution are copper, brass and coin respectively. As the different types of metal have different porous, the different porous occur due to different chemical bond. The research indicated that metals are the interesting physical evidence due to the high in daily life. Although 1 month passed, the resolution's still obvious. Therefore; Metal can be used for physical evidence in a crime scene.

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการปรากฏขึ้นของลายนิ้วมือแฝงที่เกิดขึ้นบนโลหะต่าง ๆ ด้วยการใช้วิธีการปัดฝุ่นโดยใช้ผงฝุ่นสีดำและเปรียบเทียบกับคุณภาพการปรากฏลายนิ้วมือแฝงบนโลหะแต่ละประเภท โดยมีกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 6 คน แบ่งเป็นเพศชายจำนวน 3 คน และเพศหญิง จำนวน 3 คน ทำการทดลองพิมพ์ลายนิ้วมือแฝงของกลุ่มตัวอย่างลงบนโลหะ 5 ประเภท คือ แผ่นทองแดง (C1100), แผ่นทองเหลือง (C2801), แผ่นสังกะสี (G3302), เหรียญกษาปณ์ และอลูมิเนียม ทำใน 10 ช่วงเวลา คือ 1 ชั่วโมง 3 ชั่วโมง 6 ชั่วโมง 1 วัน 3 วัน 5 วัน 1 สัปดาห์ 2 สัปดาห์ 3 สัปดาห์ และ 4 สัปดาห์ จำนวน 3 รอบ หลังจากนั้นใช้เครื่องตรวจสอบลายพิมพ์นิ้วมืออัตโนมัติ (AFIS) นับจำนวนจุด Minutiae เพื่อเปรียบเทียบกับรอยลายนิ้วมือแฝง แล้วนำค่าที่ได้มาทำการวิเคราะห์ข้อมูล ผลการวิจัยพบว่า คุณภาพการปรากฏลายนิ้วมือแฝงบนโลหะของเพศชายและเพศหญิงแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ($T = 1.672$, $Sig = 0.000$) เมื่อพิจารณาแล้วพบว่าเพศชายมีความชัดเจนมากกว่าเพศหญิง และคุณภาพการปรากฏลายนิ้วมือแฝงบนโลหะทั้ง 5 ประเภทแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ($F = 7979.118$, $Sig = 0.000$) พบว่า ทองแดง ทองเหลือง และเหรียญ มีคุณภาพความคมชัดสูงมาก ตามลำดับ ในขณะที่คุณภาพการปรากฏลายนิ้วมือแฝงบนโลหะในแต่ละช่วงเวลาและการทดลองทั้ง 3 รอบ ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ กล่าวคือวัสดุประเภทโลหะมีความพรุนค่อนข้างสูง โลหะ

แต่ละชนิดความพรุนของโลหะขึ้นอยู่กับพันธะเคมีของโลหะนั้น ๆ รวมไปถึงความบริสุทธิ์ด้วย หากโลหะมีความพรุนมากเท่าไรคุณภาพความคมชัดของลายนิ้วมือจึงมีมากขึ้นด้วยจากการวิจัยจะเห็นได้ว่าโลหะเป็นวัตถุพยานอีกชนิดหนึ่งที่น่าสนใจและพบมากให้อุปกรณ์การใช้งานในชีวิตประจำวัน ถึงแม้ระยะเวลาจะผ่านไป 1 เดือน แต่คุณภาพของลายนิ้วมือแฝงก็ยังปรากฏได้ชัดเจน สามารถใช้เป็นวัตถุพยานในสถานที่เกิดเหตุได้

คำสำคัญ: การปรากฏขึ้นของลายนิ้วมือแฝง เพศ รอบที่ เวลา ประเภทโลหะ

บทนำ

การเก็บรวบรวมพยานหลักฐานในการสืบสวนหาตัวผู้กระทำผิดมารับโทษตามกฎหมาย เป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญมากเนื่องจากพยานหลักฐานแต่ละชิ้นสามารถระบุตัวผู้กระทำผิดและขั้นตอน ในการกระทำผิดได้โดยพยานหลักฐานที่สามารถพบได้ในสถานที่เกิดเหตุ เช่น คราบเลือด คราบอสุจิ คราบน้ำลาย รอยฟัน เส้นผม และรอยลายนิ้วมือ เป็นต้น แต่รอยลายนิ้วมือเป็นพยานหลักฐานที่มีความสำคัญ และพบมากที่สุดบนวัตถุพยาน สามารถนำมาตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์บุคคลเพื่อยืนยันตัวผู้กระทำผิด ได้อย่างถูกต้อง เพราะลายนิ้วมือของมนุษย์มีลักษณะพิเศษไม่เหมือนกัน แม้กระทั่งฝาแฝดที่เกิดจากไข่ใบเดียวกันซึ่งมีรหัสพันธุกรรม (DNA) เหมือนกัน ก็ยังคงมีลายนิ้วมือที่

แตกต่างกัน นอกจากนั้นลายนิ้วมือยังไม่มี การเปลี่ยนแปลงรูปแบบ (Ridge) ตั้งแต่เกิดจนตาย (1) ซึ่งรอยลายนิ้วมือที่พบในสถานที่เกิดเหตุสามารถแบ่งออกได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ รอยลายนิ้วมือที่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (Visible Fingerprints หรือ VFPs) และรอยลายนิ้วมือที่มองไม่เห็นหรือมองเห็นด้วยตาเปล่าไม่ชัดเจน (Latent Fingerprints หรือ LFPs) VFPs เกิดจากนิ้วมือที่เปื้อนเลือดหรือสีไปสัมผัสกับวัตถุพยานเกิดเป็นรอยลายนิ้วมือบนพื้นผิววัตถุ นั้น หรืออาจเกิดจากการประทับนิ้วมือบนวัตถุผิวมัน (Plastic Fingerprints) เช่น ดินน้ำมัน ช็อกโกแลตก้อน หรือปูนที่ยังไม่แห้ง ทำให้มองเห็นรอยลายนิ้วมือที่ปรากฏ บนพื้นผิววัตถุได้อย่างชัดเจน ส่วน LFPs เกิดจากคราบเหงื่อและคราบไขมันที่ถูกขับออกจากต่อมเหงื่อที่อยู่บนเส้นขนของลายนิ้วมือเมื่อนิ้วมือไปสัมผัสกับวัตถุจะทำให้คราบเหงื่อและคราบไขมันติดอยู่บนพื้นผิววัตถุนั้น เนื่องจากคราบเหงื่อและคราบไขมันมีลักษณะใสไม่มีสีจึงทำให้มองเห็นรอยลายนิ้วมือที่ปรากฏบนพื้นผิววัตถุนั้นไม่ชัดเจนหรือไม่สามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า (2) โดยรอยลายนิ้วมือที่พบบนวัตถุพยานที่รวบรวมได้ในสถานที่เกิดเหตุส่วนใหญ่เป็นลายนิ้วมือประเภท LFPs ซึ่งเป็นที่ยอมรับในทางกฎหมายของทุกประเทศทั่วโลกในการนำมาใช้ตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์บุคคล วัตถุพยานหลักฐานส่วนใหญ่ที่พบในสถานที่เกิดเหตุ เช่น ปลอกกระสุนปืน มีด ทุเรียน ทุเรียนพระเครื่อง และอาวุธพกพาต่าง ๆ จะเป็นวัตถุที่มีส่วนประกอบของโลหะซึ่งเป็นพื้นผิวที่ไม่มีรูพรุน (Non-Porous Surface) พื้นผิวประเภทนี้จะไม่สามารถดูดซับเอาส่วนประกอบใด ๆ ของคราบเหงื่อและ ไขมันได้ ทำให้รอยลายนิ้วมือยังคงปรากฏอยู่บนพื้นผิววัตถุได้เป็นเวลานานหากไม่ถูกลบทิ้งหรือได้รับ ผลกระทบจากสภาวะแวดล้อม (3)

วิธีการตรวจหา LFPs บนวัตถุพยานที่เป็นโลหะนั้น สำนักงานพิสูจน์หลักฐานตำรวจ สำนักงานตำรวจแห่งชาติ จะนิยมใช้อยู่ 4 วิธี คือ การปิดผงฝุ่นดำ (Carbon Black Dust) การอบโอภาว (Super Glue) ร่วมกับการปิดผงฝุ่นดำ การอบโอภาวร่วมกับการฉายแสงความยาวคลื่นต่าง ๆ (Polilight) และการอบโอภาวร่วมกับการย้อมสีโรดาไมน 6G (Rhodamine 6G) แล้วจึงฉายแสงความยาวคลื่นต่าง ๆ ซึ่งในการปิดผงฝุ่นดำนั้นต้องใช้ความชำนาญในการปิดโดยปิดตามเส้นลายนิ้วมือและไม่ให้เป็นการทำลาย LFPs และต้องไม่ใช้ผงฝุ่นในการปิดมากเกินไป เพราะผงฝุ่นมักฟุ้งกระจายในอากาศส่งผลเสียต่อระบบทางเดินหายใจ นอกจากนั้นการปิดผงฝุ่นดำไม่สามารถใช้หา LFPs ที่มีอายุ (Aged LFPs) ได้ (4)

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้เป็นการศึกษาเชิงทดลอง ผู้วิจัยสนใจที่จะศึกษาเกี่ยวกับการปรากฏของลายนิ้วมือบนโลหะประเภทต่าง ๆ ในระยะเวลาที่ต่างกัน ซึ่งโลหะที่จะนำมาทำการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้สามารถพบได้ในชีวิตประจำวัน ซึ่งวัสดุที่มีส่วนประกอบของโลหะที่พบมากในสถานที่เกิดเหตุ เช่น ปลอกกระสุนปืน เหยี่ยว ทุเรียน แม่ทุเรียน ลูกบิด ประตู มีดและอาวุธพกพา ซึ่งอาจเป็นอาวุธหรือสิ่งของของผู้ต้องสงสัยที่ส่งรอยไว้ในที่เกิดเหตุ โดยจะทำการศึกษาระยะเวลาที่คาดว่าลายนิ้วมือแฝงจะยังปรากฏได้ชัดเจนเพื่อสืบหาและระบุตัวตนได้ต่อไป ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้จะสามารถนำไปใช้ในกระบวนการยุติธรรมหรือการสอบสวนของเจ้าหน้าที่ตำรวจได้

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการปรากฏขึ้นของลายนิ้วมือแฝงที่เกิดขึ้นบนโลหะต่าง ๆ ประกอบด้วย แผ่นทองแดง (C1100) แผ่นทองเหลือง (C2801) แผ่นสังกะสี (G3302) อลูมิเนียม และเหรียญกษาปณ์ (ใช้ด้านที่มีพระบรมรูปของรัชกาลที่ 9 พ.ศ. 2549) ด้วยการใช้วิธีการปิดฝุ่นโดยใช้ผงฝุ่นสีดำ และเปรียบเทียบคุณภาพการปรากฏลายนิ้วมือแฝงบนโลหะแต่ละประเภท

วิธีดำเนินการวิจัย

กลุ่มประชากรที่ใช้ในการวิจัย

ผู้ร่วมทำการทดลอง ในการศึกษาครั้งนี้ ใช้ผู้ร่วมทำการทดลองทั้งสิ้น 6 คน เป็นเพศชาย 3 คน และเพศหญิง 3 คน

โลหะที่ใช้ในการทดลอง

แผ่นทองแดง (C1100) แผ่นทองเหลือง (C2801) แผ่นสังกะสี (G3302) อลูมิเนียม และเหรียญกษาปณ์ (ใช้ด้านที่มีพระบรมรูปของรัชกาลที่ 9 พ.ศ. 2549)

การเตรียมวัตถุพยานตัวอย่าง

วัตถุพยานตัวอย่างที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย แผ่นทองเหลือง แผ่นทองแดง แผ่นสแตนเลส แผ่นสังกะสี และเหรียญกษาปณ์ โดยนำแผ่นโลหะมาตัดให้มีขนาด $3 \times 3 \text{ cm}^2$ แล้วนำมาทำความสะอาดในเอทานอลเป็นเวลา 10 นาที แล้วจึงล้างด้วยน้ำและทิ้งไว้ให้แห้งเพื่อจำลอง LFPs ต่อไป

เก็บลายนิ้วมือแฝงจากผู้ร่วมทำการทดลอง

การกดนิ้วมือของผู้ร่วมทำการทดลองให้กดลงไปตรง ๆ บนโลหะแต่ละชนิดซึ่งวางไว้บนเครื่องชั่ง โดยที่ผู้ร่วมทำการทดลองจะต้องออกแรงในการกด 900 – 1,000 กรัม จากนั้นดึงมือขึ้นในแนวตั้งเพื่อป้องกันมิให้นิ้วมือมีการบิดหรือเคลื่อนที่ซึ่งอาจทำให้ลายนิ้วมือแฝงที่ได้มีความคลาดเคลื่อนไป โดยทำการประทับไปที่ละนิ้วโดยใช้ระยะเวลาที่นิ้วหัวแม่มือ นิ้วชี้ นิ้วกลาง นิ้วนาง และนิ้วก้อย สัมผัสโลหะในแต่ละครั้งให้ใกล้เคียงกันมากที่สุด นำโลหะที่ประทับลายนิ้วมือแฝงเรียบร้อยแล้วเก็บใส่ตะกร้า นำไปวางไว้ในที่อุณหภูมิห้อง

การตรวจเก็บลายนิ้วมือแฝงจะทำการตรวจเก็บ 10 ครั้ง ตามระยะเวลาดังนี้ 1 ชั่วโมง 3 ชั่วโมง 6 ชั่วโมง 1 วัน 3 วัน 5 วัน 7 วัน 2 สัปดาห์ 3 สัปดาห์และ 4

สัปดาห์ เมื่อเก็บลายนิ้วมือแฝงได้ตามระยะเวลาที่กำหนดแล้ว นำมาปิดด้วยผงฝุ่นสีดำโดยใช้แปรงขนอ่อน

หลังจากที่ปิดด้วยผงฝุ่นสีดำแล้วนำมาตรวจสอบลายนิ้วมือแฝงแต่ละนิ้วโดยระบบตรวจสอบลายพิมพ์นิ้วมืออัตโนมัติ (Automated Fingerprint Identification System) หรือ AFIS โดยนับจุดที่ปรากฏวิธีการวิเคราะห์ข้อมูลและสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูล

การวิเคราะห์ระดับคุณภาพของลายนิ้วมือแฝงอาศัยเกณฑ์การแปลค่าคะแนนเฉลี่ยของจำนวน minutiae ที่ตรวจพบบนโลหะ แล้วแบ่งค่าเฉลี่ยของจำนวน minutiae ที่ได้ ออกเป็นช่วงอันดับ 5 ระดับ เพื่อนำมาอธิบายความหมายของระดับคุณภาพของการตรวจสอบลายนิ้วมือแฝง โดยมีวิธีการ ดังนี้

$$\text{ระดับ} = \frac{\text{คะแนนสูงสุด} - \text{คะแนนต่ำสุด}}{\text{จำนวนชั้น}}$$

ได้ช่วงความกว้างของแต่ละระดับคือ 10.68 ซึ่งสามารถแบ่งเกณฑ์ได้ดังนี้

47.36 - 58.04	ระดับ (A) สูงมาก
36.67 - 47.35	ระดับ (B) สูง
25.98 - 36.66	ระดับ (C) ปานกลาง
15.29 - 25.97	ระดับ (D) น้อย
4.60 - 15.28	ระดับ (E) น้อยมาก

ในการวิเคราะห์ข้อมูลเพื่อศึกษาเปรียบเทียบการปรากฏชั้นของรอยลายนิ้วมือแฝงที่ตรวจเก็บ ใช้สถิติเชิงอนุมาน คือ เป็นทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของกลุ่มตัวอย่าง 2 กลุ่ม ที่เป็นอิสระต่อกัน โดยใช้สถิติการทดสอบค่า t-test independent และทดสอบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของตัวแปรที่มีมากกว่า 2 กลุ่ม เทคนิคทางสถิติที่ใช้ในการทดสอบคือ F-test การวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-Way Analysis of Variance) โดยมีค่านัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 และสมมติฐานที่กำหนดไว้

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

การวิเคราะห์คุณภาพการปรากฏลายนิ้วมือแฝงบนโลหะแต่ละประเภท

จากตารางที่ 1 แสดงข้อมูลเกี่ยวกับการตรวจภาพการปรากฏลายนิ้วมือแฝงบนโลหะแต่ละประเภทของกลุ่มตัวอย่าง โดยใช้เครื่อง AFIS นับจำนวนจุด Minutiae จำแนกตามคนที่และแยกเป็นเพศชายและเพศหญิง อย่างละจำนวน 450 ครั้ง จากการตรวจภาพ พบว่า

คนที่ 1 เพศชาย ระดับความชัดการปรากฏลายนิ้วมือแฝงบนโลหะความชัดระดับ (A) มีจำนวน 90 ครั้ง รองลงมาคือ คือ ความชัดระดับ (D) และ (E) อย่างละจำนวน 30 ครั้ง

คนที่ 2 เพศชาย ระดับความชัดการปรากฏลายนิ้วมือแฝงบนโลหะความชัดระดับ (A) มีจำนวน 90 ครั้ง รองลงมาคือ คือ ความชัดระดับ (D) และ (E) อย่างละจำนวน 30 ครั้ง

ตารางที่ 1 แสดงข้อมูลเกี่ยวกับการตรวจภาพการปรากฏลายนิ้วมือแฝงบนโลหะแต่ละประเภทของกลุ่มตัวอย่าง โดยใช้เครื่อง AFIS นับจำนวนจุด Minutiae จำแนกตามลำดับคนที่และเพศ

คนที่ 3 เพศชาย ระดับความชัดการปรากฏลายนิ้วมือแฝงบนโลหะความชัดระดับ (A) มีจำนวน 90 ครั้ง รองลงมาคือ คือ ความชัดระดับ (D) จำนวน 31 ครั้ง และ ความชัดระดับ (E) จำนวน 29 ครั้ง

คนที่ 1 เพศหญิง ระดับความชัดการปรากฏลายนิ้วมือแฝงบนโลหะความชัดระดับ (A) มีจำนวน 90 ครั้ง รองลงมาคือ คือ ความชัดระดับ (C) จำนวน 30 ครั้ง และความชัดระดับ (E) จำนวน 30 ครั้ง

คนที่ 2 เพศหญิง ระดับความชัดการปรากฏลายนิ้วมือแฝงบนโลหะความชัดระดับ (A) มีจำนวน 90 ครั้ง รองลงมาคือ คือ ความชัดระดับ (C) และ (E) อย่างละจำนวน 30 ครั้ง

คนที่ 3 เพศหญิง ระดับความชัดการปรากฏลายนิ้วมือแฝงบนโลหะความชัดระดับ (A) มีจำนวน 90 ครั้ง รองลงมาคือ คือ ความชัดระดับ (C) และ (E) อย่างละจำนวน 30 ครั้ง ตามลำดับ

ระดับความชัดการปรากฏลายนิ้วมือแฝงบนโลหะ							
คนที่	เพศ	ระดับ (A)	ระดับ (B)	ระดับ (C)	ระดับ (D)	ระดับ (E)	รวม
		คมชัดสูงมาก	คมชัดสูง	คมชัดปานกลาง	คมชัดน้อย	คมชัดน้อยมาก	
1	ชาย	90	0	0	30	30	150
2	ชาย	90	0	0	30	30	150
3	ชาย	90	0	0	31	29	150
1	หญิง	90	0	30	0	30	150
2	หญิง	90	0	30	0	30	150
3	หญิง	90	0	30	0	30	150
รวม		540	0	90	91	179	900



รูปที่ 1 ลายนิ้วมือหลังจากที่ประทับบนแผ่นโลหะ

ตารางที่ 2 แสดงข้อมูลเกี่ยวกับการตรวจภาพการปรากฏลายนิ้วมือแฝงบนโลหะแต่ละประเภทของกลุ่มตัวอย่าง โดยใช้เครื่อง AFIS นับจำนวนจุด Minutiae จำแนกตามเพศ

เพศ	ระดับความชัดการปรากฏลายนิ้วมือแฝงบนโลหะ					รวม
	ระดับ (A)	ระดับ (B)	ระดับ (C)	ระดับ (D)	ระดับ (E)	
	คมชัดสูงมาก	คมชัดสูง	คมชัดปานกลาง	คมชัดน้อย	คมชัดน้อยมาก	
ชาย	270	0	0	91	89	450
หญิง	270	0	90	0	90	450
รวม	540	0	90	91	179	900

ตารางที่ 3 แสดงข้อมูลเกี่ยวกับการตรวจภาพการปรากฏลายนิ้วมือแฝงบนโลหะแต่ละประเภทของกลุ่มตัวอย่าง โดยใช้เครื่อง AFIS นับจำนวนจุด Minutiae จำแนกตามรอบที่ทำการทดลอง

รอบที่ทำการทดลอง	ระดับความชัดการปรากฏลายนิ้วมือแฝงบนโลหะ					รวม
	ระดับ (A)	ระดับ (B)	ระดับ (C)	ระดับ (D)	ระดับ (E)	
	คมชัดสูงมาก	คมชัดสูง	คมชัดปานกลาง	คมชัดน้อย	คมชัดน้อยมาก	
รอบที่ 1	270	0	30	30	60	300
รอบที่ 2	270	0	30	27	63	300
รอบที่ 3	270	0	30	34	56	300
รวม	540	0	90	91	179	900

จากตารางที่ 2 แสดงข้อมูลเกี่ยวกับการตรวจภาพการปรากฏลายนิ้วมือแฝงบนโลหะแต่ละประเภทของกลุ่มตัวอย่าง โดยใช้เครื่อง AFIS นับจำนวนจุด Minutiae จำแนกตามเพศ แยกเป็นเพศชายและเพศหญิง อย่างละจำนวน 450 ครั้ง จากการตรวจภาพ พบว่า เพศชายระดับความชัดการปรากฏลายนิ้วมือแฝงบนโลหะ ความ

ชัดระดับ (A) มีจำนวน 270 ครั้ง รองลงมาคือ ความชัดระดับ (D) มีจำนวน 91 ครั้ง และระดับ (E) มีจำนวน 89 ครั้ง สำหรับเพศหญิง ระดับความชัดการปรากฏลายนิ้วมือแฝงบนโลหะ ความชัดระดับ (A) มีจำนวน 270 ครั้ง รองลงมาคือ คือ ความชัดระดับ (C) มีจำนวน 90 ครั้ง และความชัดระดับ (E) มีจำนวน 90 ครั้ง ตามลำดับ

จากตารางที่ 3 แสดงข้อมูลเกี่ยวกับการตรวจภาพการปรากฏลายนิ้วมือแฝงบนโลหะแต่ละประเภทของกลุ่มตัวอย่าง โดยใช้เครื่อง AFIS นับจำนวนจุด Minutiae จำแนกตามรอบที่ทำการทดลอง แยกเป็นรอบที่ 1 – 3 รอบละ 300 ครั้ง จากการตรวจภาพ พบว่า

รอบที่ 1 ระดับ (A) คมชัดสูงมาก มีจำนวน 270 ครั้ง รองลงมาคือ คือ ความชัดระดับ (C) มีจำนวน 30 ครั้ง ความชัดระดับ (D) มีจำนวน 30 ครั้ง และความชัดระดับ (E) มีจำนวน 60 ครั้ง

รอบที่ 2 ระดับ (A) คมชัดสูงมาก มีจำนวน 270 ครั้ง รองลงมาคือ คือ ความชัดระดับ (C) มีจำนวน 30 ครั้ง ความชัดระดับ (D) มีจำนวน 27 ครั้ง และความชัดระดับ (E) มีจำนวน 63 ครั้ง

รอบที่ 3 ระดับ (A) คมชัดสูงมาก มีจำนวน 270 ครั้ง รองลงมาคือ คือ ความชัดระดับ (C) มีจำนวน 30 ครั้ง ความชัดระดับ (D) มีจำนวน 27 ครั้ง และความชัดระดับ (E) มีจำนวน 63 ครั้ง ตามลำดับ

ตารางที่ 4 แสดงข้อมูลเกี่ยวกับการตรวจภาพการปรากฏลายนิ้วมือแฝงบนโลหะแต่ละประเภทของกลุ่มตัวอย่าง โดยใช้เครื่อง AFIS นับจำนวนจุด Minutiae จำแนกตามช่วงเวลาทำการทดลอง

ช่วงเวลาที่ทำ การทดลอง	ระดับความชัดการปรากฏลายนิ้วมือแฝงบนโลหะ					รวม
	ระดับ (A)	ระดับ (B)	ระดับ (C)	ระดับ (D)	ระดับ (E)	
	คมชัดสูงมาก	คมชัดสูง	คมชัดปานกลาง	คมชัดน้อย	คมชัดน้อยมาก	
ชั่วโมงที่ 1	54	0	9	8	19	90
ชั่วโมงที่ 2	54	0	9	8	19	90
ชั่วโมงที่ 3	54	0	9	8	19	90
วันที่ 1	54	0	9	9	18	90
วันที่ 3	54	0	9	9	18	90
วันที่ 5	54	0	9	9	18	90
สัปดาห์ที่1	54	0	9	10	17	90
สัปดาห์ที่2	54	0	9	10	17	90
สัปดาห์ที่3	54	0	9	10	17	90
สัปดาห์ที่4	54	0	9	10	17	90
รวม	540	0	90	91	179	900

จากตารางที่ 4 แสดงข้อมูลเกี่ยวกับการตรวจภาพการปรากฏลายนิ้วมือแฝงบนโลหะแต่ละประเภทของกลุ่มตัวอย่าง โดยใช้เครื่อง AFIS นับจำนวนจุด Minutiae จำแนกตามช่วงเวลาทำการทดลอง แยกเป็นช่วงเวลา 10 ช่วงเวลา ดังนี้ คือ 1 ชั่วโมง 2 ชั่วโมง 3 ชั่วโมง 1 วัน 3 วัน 5 วัน 1 สัปดาห์ 2 สัปดาห์ 3 สัปดาห์ และ 4 สัปดาห์ ช่วงเวลาละ 90 รอบ จากการตรวจภาพ พบว่า

ชั่วโมงที่ 1 – ชั่วโมงที่ 3 ระดับ (A) คมชัดสูงมาก มีจำนวน 54 ครั้ง รองลงมาคือ คือ ความชัดระดับ (C) มีจำนวน 9 ครั้ง ความชัดระดับ (D) มีจำนวน 8 ครั้ง และความชัดระดับ (E) มีจำนวน 19 ครั้ง

วันที่ 1 – วันที่ 5 ระดับ (A) คมชัดสูงมาก มีจำนวน 54 ครั้ง รองลงมาคือ คือ ความชัดระดับ (C) มี

จำนวน 9 ครั้ง ความขัดระดับ (D) มีจำนวน 9 ครั้ง และความขัดระดับ (E) มีจำนวน 18 ครั้ง

สัปดาห์ที่ 1 - สัปดาห์ที่ 4 คมขัดสูงมาก มีจำนวน 54 ครั้ง รองลงมาคือ คือ ความขัดระดับ (C) มีจำนวน 9 ครั้ง ความขัดระดับ (D) มีจำนวน 10 ครั้ง และความขัดระดับ (E) มีจำนวน 17 ครั้ง ตามลำดับ

จากตารางที่ 5 แสดงข้อมูลเกี่ยวกับการตรวจภาพการปรากฏลายนิ้วมือแฝงบนโลหะแต่ละประเภทของกลุ่มตัวอย่าง โดยใช้เครื่อง AFIS นับจำนวนจุด Minutiae จำแนกตามประเภทของโลหะ 5 ประเภท

ตารางที่ 5 แสดงข้อมูลเกี่ยวกับการตรวจภาพการปรากฏลายนิ้วมือแฝงบนโลหะแต่ละประเภทของกลุ่มตัวอย่าง โดยใช้เครื่อง AFIS นับจำนวนจุด Minutiae จำแนกตามประเภทของโลหะ

ประเภทของโลหะ	ระดับความขัดการปรากฏลายนิ้วมือแฝงบนโลหะ					รวม
	ระดับ (A)	ระดับ (B)	ระดับ (C)	ระดับ (D)	ระดับ (E)	
	คมขัดสูงมาก	คมขัดสูง	คมขัดปานกลาง	คมขัดน้อย	คมขัดน้อยมาก	
ทองแดง	180	0	0	0	0	180
ทองเหลือง	180	0	0	0	0	180
อลูมิเนียม	0	0	90	87	3	180
เหรียญ	180	0	0	0	0	180
สังกะสี	0	0	0	4	176	180
รวม	540	0	90	91	179	900

ทดสอบสมมติฐานที่ตั้งไว้

ตารางที่ 6 แสดงผลการวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างการปรากฏคุณภาพของลายนิ้วมือแฝง ด้วยการใช่วิธีการปิดฝุ่นโดยใช้ผงฝุ่นสีดำหาลายนิ้วมือแฝง จำแนกตามเพศ

เพศ	$\bar{X}$	S.D.	t	Sig
ชาย	25.37	19.40	1.672	0.000
หญิง	23.30	17.66		

*มีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

จากตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างการปรากฏคุณภาพของ

ได้แก่ ทองแดง ทองเหลือง แผ่นสังกะสี เหรียญ และอลูมิเนียม ทำการทดสอบประเภทของโลหะอย่างละ 180 ครั้ง จากการตรวจภาพ พบว่า

ทองแดง ทองเหลือง และเหรียญ มีความคมขัดระดับ (A) คือ คมขัดสูงมาก มีจำนวน 180 ครั้ง

อลูมิเนียม มีความคมขัดระดับ ระดับ (C) มีจำนวน 90 ครั้ง ความขัดระดับ (D) มีจำนวน 87 ครั้ง และความขัดระดับ (E) มีจำนวน 3 ครั้ง สังกะสี ความคมขัดระดับ (D) มีจำนวน 4 ครั้ง และความขัดระดับ (E) มีจำนวน 176 ครั้ง ตามลำดับ

ลายนิ้วมือแฝง ด้วยการใช่วิธีการปิดฝุ่นโดยใช้ผงฝุ่นสีดำหาลายนิ้วมือแฝง จำแนกตามเพศ พบว่า กลุ่มตัวอย่างที่มีเพศต่างกัน มีการปรากฏคุณภาพของลายนิ้วมือแฝงต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ซึ่งไม่เป็นไปตามสมมติฐาน

จากตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างการปรากฏคุณภาพของลายนิ้วมือแฝง ด้วยการใช่วิธีการปิดฝุ่นโดยใช้ผงฝุ่นสีดำหาลายนิ้วมือแฝง จำแนกตามรอบที่ พบว่า กลุ่มตัวอย่างที่ทำการทดสอบรอบที่ต่างกัน มีการปรากฏคุณภาพของลายนิ้วมือแฝงไม่ต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ซึ่งไม่เป็นไปตามสมมติฐาน

ตารางที่ 7 แสดงผลการวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างการปรากฏคุณภาพของลายนิ้วมือแฝง ด้วยการใช้วิธีการปิดฝุ่นโดยใช้ผงฝุ่นสีดำหาลายนิ้วมือแฝง จำแนกตามรอบที่

แหล่งความแปรปรวน	SS	df	M.S.	F	Sig
ระหว่างกลุ่ม	31.692	2	15.846	0.046	0.955
ภายในกลุ่ม	309961.550	897	345.554		
รวม	309993.243	899			

ตารางที่ 8 แสดงผลการวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างการปรากฏคุณภาพของลายนิ้วมือแฝง ด้วยการใช้วิธีการปิดฝุ่นโดยใช้ผงฝุ่นสีดำหาลายนิ้วมือแฝง จำแนกตามเวลา

แหล่งความแปรปรวน	SS	df	M.S.	F	Sig
ระหว่างกลุ่ม	1839.419	9	204.380	.590	.806
ภายในกลุ่ม	308153.823	890	346.240		
รวม	309993.243	899			

ตารางที่ 9 แสดงผลการวิเคราะห์เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างการปรากฏคุณภาพของลายนิ้วมือแฝง ด้วยการใช้วิธีการปิดฝุ่นโดยใช้ผงฝุ่นสีดำหาลายนิ้วมือแฝง จำแนกตามประเภทของโลหะ

แหล่งความแปรปรวน	SS	df	M.S.	F	Sig
ระหว่างกลุ่ม	301537.544	4	75384.386	7979.118	0*000.
ภายในกลุ่ม	8455.699	895	9.448		
รวม	309993.243	899			

จากตารางที่ 8 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างการปรากฏคุณภาพของลายนิ้วมือแฝง ด้วยการใช้วิธีการปิดฝุ่นโดยใช้ผงฝุ่นสีดำหาลายนิ้วมือแฝง จำแนกตามเวลา พบว่ากลุ่มตัวอย่างที่ทำการทดสอบเวลาที่ต่างกัน มีการปรากฏคุณภาพของลายนิ้วมือแฝงไม่ต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ซึ่งไม่เป็นไปตามสมมติฐาน

จากตารางที่ 9 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างการปรากฏคุณภาพของลายนิ้วมือแฝง ด้วยการใช้วิธีการปิดฝุ่นโดยใช้ผงฝุ่นสีดำหาลายนิ้วมือแฝง จำแนก ตามประเภทของโลหะพบว่า กลุ่มตัวอย่างที่มีทดสอบด้วยประเภทของโลหะที่ต่างกัน มีการปรากฏคุณภาพของลายนิ้วมือแฝงต่างกัน อย่างมี

นัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ซึ่งเป็นไปตามสมมติฐาน จึงได้ทดสอบความแตกต่างเป็นรายคู่ ด้วยวิธีของ LSD ปรากฏผลดังตารางที่ 9

จากตารางที่ 10 เมื่อทำการทดสอบความแตกต่างของการปรากฏคุณภาพของลายนิ้วมือแฝงที่ปรากฏตามประเภทของโลหะ ที่แตกต่างกัน เป็นรายคู่ พบว่ามีจำนวน 10 คู่ ได้แก่

คู่ที่ 1 กลุ่มตัวอย่างที่ทดสอบด้วยทองแดง มีการปรากฏคุณภาพของลายนิ้วมือแฝงดีกว่ากลุ่มตัวอย่างที่ทดสอบด้วยทองเหลือง

คู่ที่ 2 กลุ่มตัวอย่างที่ทดสอบด้วยทองแดง มีการปรากฏคุณภาพของลายนิ้วมือแฝงดีกว่ากลุ่มตัวอย่างที่ทดสอบด้วยแผ่นสังกะสี

คู่ที่ 3 กลุ่มตัวอย่างที่ทดสอบด้วยทองแดง มีการปรากฏคุณภาพของลายนิ้วมือแฝงดีกว่ากลุ่มตัวอย่างที่ทดสอบด้วยเหรียญ

คู่ที่ 4 กลุ่มตัวอย่างที่ทดสอบด้วยทองแดง มีการปรากฏคุณภาพของลายนิ้วมือแฝงดีกว่ากลุ่มตัวอย่างที่ทดสอบด้วยอลูมิเนียม

คู่ที่ 5 กลุ่มตัวอย่างที่ทดสอบด้วยทองเหลือง มีการปรากฏคุณภาพของลายนิ้วมือแฝงดีกว่ากลุ่มตัวอย่างที่ทดสอบด้วยแผ่นสังกะสี

คู่ที่ 6 กลุ่มตัวอย่างที่ทดสอบด้วยทองเหลือง มีการปรากฏคุณภาพของลายนิ้วมือแฝงดีกว่ากลุ่มตัวอย่างที่ทดสอบด้วยเหรียญ

คู่ที่ 7 กลุ่มตัวอย่างที่ทดสอบด้วยทองเหลือง มีการปรากฏคุณภาพของลายนิ้วมือแฝงดีกว่ากลุ่มตัวอย่างที่ทดสอบด้วยอลูมิเนียม

คู่ที่ 8 กลุ่มตัวอย่างที่ทดสอบด้วยแผ่นสังกะสี มีการปรากฏคุณภาพของลายนิ้วมือแฝงดีกว่ากลุ่มตัวอย่างที่ทดสอบด้วยเหรียญ

คู่ที่ 9 กลุ่มตัวอย่างที่ทดสอบด้วยแผ่นสังกะสี มีการปรากฏคุณภาพของลายนิ้วมือแฝงดีกว่ากลุ่มตัวอย่างที่ทดสอบด้วยอลูมิเนียม

คู่ที่ 10 กลุ่มตัวอย่างที่ทดสอบด้วยเหรียญ มีการปรากฏคุณภาพของลายนิ้วมือแฝงดีกว่ากลุ่มตัวอย่างที่ทดสอบด้วยอลูมิเนียม

ตารางที่ 10 แสดงผลการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยรายคู่ (LSD) ของการปรากฏคุณภาพของลายนิ้วมือแฝง ด้วยการใช้วิธีการปิดฝุ่นโดยใช้ผงฝุ่นสีดำ จำแนกตามประเภทของโลหะ

ประเภทของโลหะ		ทองแดง	ทองเหลือง	แผ่นสังกะสี	เหรียญ	อลูมิเนียม
	ค่าเฉลี่ย	11.5467	10.5750	38.5872	7.6372	53.3244
ทองแดง	11.5467	-	0.97167* (.003)	-41.77778* (.0002)	3.90944* (.000)	-27.04056* (.000)
ทองเหลือง	10.5750	-	-	-42.74944* (.000)	2.93778* (.000)	-28.01222* (.000)
แผ่นสังกะสี	38.5872	-	-	-	45.68722* (.005)	14.73722* (.000)
เหรียญ	7.6372	-	-	-	-	-30.95000* (.000)
อลูมิเนียม	53.3244	-	-	-	-	-

สรุปผล

คุณภาพการปรากฏลายนิ้วมือแฝงบนโลหะแต่ละประเภทโดยใช้วิธีการปิดผงฝุ่นสีดำ พบว่ามีประเด็นที่น่าสนใจ สามารถนำมาอภิปรายได้ดังนี้ ระดับความชัดการปรากฏลายนิ้วมือแฝงบนโลหะ พบว่า การปรากฏลายนิ้วมือแฝงบนโลหะของเพศชายและหญิงมีความแตกต่างกัน เพศชายมีความชัดมากกว่าเพศหญิง เนื่องจากเพศชายมีปริมาณสารคัดหลั่งจากต่อมเหงื่อมากกว่าเพศหญิง โดยองค์ประกอบทางเคมีหลักที่พบในลายนิ้วมือ คือ Amino acid ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่อยู่ในสารคัดหลั่งจากต่อมเหงื่อบนเส้นขนของลายนิ้วมือ ในการทดสอบทั้ง 3 รอบ มีความคมชัดสูงมาก มีมากที่สุด

สำหรับช่วงเวลาที่ทำการทดลอง พบว่าทุกช่วงเวลาให้ความคมชัดสูงมาก เป็นส่วนใหญ่ ซึ่งในระยะเวลา

1 ชั่วโมง 3 ชั่วโมง 6 ชั่วโมง และ 1 วัน จะให้ความคมชัดของลายนิ้วมืออยู่ในระดับที่สูงมาก เนื่องจาก Amino acid ในสารคัดหลั่งจากต่อมเหงื่อยังไม่เกิดปฏิกิริยากับอากาศ และประเภทของโลหะที่ทำให้ระดับความคมชัดสูงมาก ได้แก่ ทองแดง ทองเหลือง และเหรียญ ตามลำดับ กล่าวคือวัสดุประเภทโลหะมีความพรุนค่อนข้างสูง โลหะแต่ละชนิดความพรุนของโลหะขึ้นอยู่กับพันธะเคมีของโลหะนั้น ๆ (5) รวมไปถึงความบริสุทธิ์และมีคุณสมบัติความมันวาวมากเท่าไรคุณภาพความคมชัดของลายนิ้วมือจึงมีมากขึ้นด้วย ซึ่งสอดคล้อง

กับการศึกษาของ เอกจิตรา มีไชยธร การปรากฏขึ้นของลายนิ้วมือแฝงบนกระดาษด้วยนินไฮดริน (6) และสอดคล้องกับการศึกษาของเสาวภาคย์ เปียชิน องค์ประกอบทางเคมีของลายนิ้วมือที่มีผลกระทบต่อการติดของลายนิ้วมือแฝงในประชากรไทย (7) จากการวิจัยจะเห็นว่าโลหะเป็นวัตถุพยานอีกชนิดหนึ่งที่สามารถตรวจเก็บลายนิ้วมือแฝงได้ถึงแม้ระยะเวลาจะผ่านไป 2 เดือน เป็นวัตถุพยานที่น่าสนใจและพบมากให้อุปกรณ์การใช้งานในชีวิตประจำวัน แต่การที่จะบอกอายุหรือระยะเวลาของลายนิ้วมือที่ตรวจเก็บได้ให้แน่นอนนั้นเป็นเรื่องที่ยาก เนื่องจากปัจจัยการคงอยู่ของลายนิ้วมือที่ควบคุมได้ยาก (8) รวมไปถึงสภาพแวดล้อมและสภาพอากาศด้วย ดังนั้นความเป็นจริงในสถานที่เกิดเหตุยังคงต้องใช้วัตถุพยานอื่น ๆ ร่วมด้วย

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ รศ.พ.ต.อ. วรรัช วิชชวานิชย์ ซึ่งเป็นอาจารย์ที่ปรึกษาวิทยานิพนธ์ คณาจารย์และบุคลากร คณะนิติวิทยาศาสตร์ โรงเรียนนายร้อยตำรวจ ที่ให้คำปรึกษาการทำวิทยานิพนธ์ และขอขอบพระคุณกลุ่มงานตรวจลายนิ้วมือแฝง กองพิสูจน์หลักฐานกลาง สำนักงานกองพิสูจน์หลักฐานตำรวจ ที่ช่วยเหลือประสานงานและดูแลเรื่องการใช้วัสดุอุปกรณ์ทางวิทยาศาสตร์ สำหรับทำการวิทยานิพนธ์ ประจำปี 2562

เอกสารอ้างอิง

1. Jackson ARW, Jackson JM. Forensic Science Paperback. 3rd ed. England: Prentice Hall; 2011.
2. Choi MJ, McDonagh AM, Maynard P, Roux C. Metal-containing nanoparticles and nano-structured particles in fingerprint detection. FORENSIC SCI INT 2008;179(1):87-97.
3. ไทพีศรีนิติ ภัคติกุล. การตรวจพบพยานหลักฐานจากสถานที่เกิดเหตุ. พิมพ์ครั้งที่ 2. เชียงใหม่: คณะสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่; 2547.
4. อรรถพล แซ่มสุวรรณวงศ์. นิติวิทยาศาสตร์ 2 เพื่อการสืบสวนสอบสวน. พิมพ์ครั้งที่ 4. กรุงเทพมหานคร: ทิธิจิพวันตั้ง; 2546.
5. Ramos AS, Vieira MT. An efficient strategy to detect latent fingerprints on metallic surfaces. FORENSIC SCI INT. 2012;217:196-203.
6. เอกจิตรา มีไชยธร.การปรากฏขึ้นของลายนิ้วมือแฝงบนกระดาษด้วยนินไฮดริน [Latent fingerprints on paper developed with ninhydrin] .วารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยศิลปากร. 2561;2(1):247-55.
7. เสาวภาคย์ เปียชิน. องค์ประกอบทางเคมีของลายนิ้วมือที่มีผลกระทบต่อการติดของลายนิ้วมือแฝงในประชากรไทย [Chemical compositions of fingerprints affect latent fingerprinting among Thai populations]. วารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยศิลปากร. 2557;1(4):50-62.
8. Qing G, Zhang M, Visualizing latent fingerprints by electrodeposition of metal nanoparticles. Journal of Electrochemical Chemistry. 2013;693:122-6.



การเพิ่มประสิทธิภาพการติดตามเอกสารด้วยเทคโนโลยีเว็บ

Increasing Efficiency for Document Tracking using Web Technology

อุไรวรรณ อินทร์แหยม* อนุพัฒน์ ชมสุทธา มุฮัมหมัดซัมรี ทาเนาะ พลรัตน์ พวงศิริ และ สหวิช เงินปลับพลา

Uraiwan Inyaem^{1*}, Anupat Chomsutta¹, Muhammadsamree Thanoh¹, Pollarat Puangsiri¹ and Sahavit Ngerplaplar¹

¹ภาควิชาคณิตศาสตร์และวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
อ.ธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

¹Department of Mathematics and Computer Science, Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thanyaburi, Pathumthani 12110, THAILAND

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

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article history:

Received: 22 April, 2020

Revised: 2 June, 2020

Accepted: 29 July, 2020

Available online: 19 October, 2020

DOI: 10.14456/rj-rmutt.2020.17

Keywords: tracking system, document work, technology web, Joget workflow

Nowadays, in house and an external organization trading are necessary to have a purchase document-sales to be written between the buyer and the seller. For especially in corporate, the purchase-sales need to check several steps for the details of the purchase document. Which is vulnerable to document loss, missing responsible for tracking documents. From the cooperation government office has found this problem, the researcher proposes the framework of website system for supporting organization. The objective of this research is the employees in the organization easily tracking documents and to prevent document loss issues within an organization. Staffs in the organization of each department can check the address of the document from the document tracking report within the website so increasing efficiency for the organization. The proposed system is developed from the navigation of Joget workflow conjunction with PHP language. The complete proposed system is installed and evaluated form 3 experts and 30 users by using satisfaction assessment questionnaires. The result assessment from expert show that the average value of 4.45 and the

ปัจจุบัน การติดต่อซื้อขายภายในองค์กร และภายนอกองค์กร จำเป็นจะต้องมีเอกสารการซื้อขาย เพื่อเป็นลายลักษณ์อักษรระหว่างผู้ซื้อ-ผู้ขาย สำหรับการซื้อ-การขายภายในองค์กรจำเป็นต้องมีการตรวจสอบรายละเอียดของเอกสารการซื้อขาย หลายขั้นตอน ซึ่งเสี่ยงต่อการสูญหายของเอกสาร ขาดผู้รับผิดชอบในการติดตามเอกสาร สำหรับหน่วยงานราชการที่ทีมวิจัยได้ร่วมกันดำเนินโครงการวิจัยนี้ ก็ประสบปัญหาดังกล่าวทางผู้วิจัยจึงเกิดแนวคิดในการจัดทำเว็บไซต์เพื่อใช้ติดตามเอกสารด้วยเทคโนโลยีเว็บภายในองค์กร โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อแก้ปัญหาให้บุคลากรภายในองค์กรสามารถติดตามงานเอกสารได้สะดวก และเพื่อป้องกันปัญหาการสูญหายของเอกสารภายในองค์กร โดยบุคลากรในองค์กรของแต่ละหน่วยงาน จะสามารถตรวจสอบที่อยู่ของงานเอกสาร จากรายงานการติดตามเอกสารภายในเว็บไซต์เป็นการเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานให้กับองค์กร ระบบเว็บไซต์ที่พัฒนาขึ้นจากการนำเครื่องมือโจเก็ทเวิร์กโฟลว์มาพัฒนาร่วมกับภาษา PHP ระบบที่พัฒนาเสร็จเรียบร้อยแล้วไปติดตั้งและทดสอบระบบการทำงาน โดยมีการประเมินประสิทธิภาพของระบบด้วยแบบสอบถามการประเมินความพึงพอใจจากผู้ใช้งาน 2 กลุ่มคือผู้เชี่ยวชาญ 3 คน และผู้ใช้งานทั่วไป 30 คน ผลการประเมินจากผู้เชี่ยวชาญได้ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.45 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.85 ส่วนผลการประเมินความพึงพอใจจากผู้ใช้งานทั่วไปได้ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.50 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.97 วิเคราะห์ผลว่าระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถติดตามงานเอกสาร สร้างความสะดวกสบายต่อผู้ใช้งานภายในองค์กร และป้องกันการสูญหายของเอกสารภายในองค์กรได้

เครื่องมือและภาษาที่ใช้ในการพัฒนาระบบ

ระบบที่นำเสนอในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาขึ้นจากโปรแกรม Visual Studio Code, ภาษา HTML, ภาษา PHP ในการพัฒนาระบบเป็นหลัก ส่วนภาษา CSS, JavaScript, jQuery, Bootstrap เข้ามาช่วยเสริมในฟังก์ชันต่าง ๆ รวมไปถึงการตกแต่งหน้าเว็บไซต์ และมีการเขียนโค้ดเพื่อรับ/ส่งข้อมูลไปจัดเก็บที่ฐานข้อมูล โดยพัฒนาฐานข้อมูลด้วย PhpMyAdmin

1. HTML5 คือ ภาษามาร์คอัพ (Markup Language) ที่ใช้สำหรับเขียนเว็บไซต์ ซึ่งภาษา HTML5 ถูกพัฒนาต่อมาจากภาษา HTML และพัฒนาขึ้นมาโดย WHATWG (The Web Hypertext Application Technology Working Group) โดยได้มีการปรับปรุงเพิ่มคุณลักษณะหลายอย่างเข้ามาเพื่อให้ผู้พัฒนาสามารถใช้งานได้ง่ายมากยิ่งขึ้น (1)

2. CSS และ Bootstrap ในปัจจุบันมีการพัฒนาขึ้นด้วยกลุ่มนักพัฒนาจากทั่วทุกหนแห่งในโลก มีการอัปเดตแก้ไขข้อผิดพลาดอยู่ตลอดเวลา เพื่อรองรับการทำงานได้อย่างไม่มีปัญหาพร้อมกับการพัฒนาเทคโนโลยีบนเว็บเบราว์เซอร์ เช่น CSS และ HTML ซึ่งในปัจจุบันเราจะเห็นว่า Bootstrap มีตัวอย่างธีมให้ดาวน์โหลดมากมาย มีทั้งที่สามารถดาวน์โหลดใช้ได้ฟรีและแบบเสียเงินซื้อ มีหลายเว็บไซต์เลือกที่จะใช้ Bootstrap กันมากขึ้น สำหรับกลุ่มนักพัฒนามักมีการนำ Bootstrap มาใช้กับ โปรเจกต์ใหญ่หลายตัวแล้วและที่ผ่านมาก็สามารถตอบโจทย์ของผู้ใช้งานได้เป็นอย่างดี ถึงแม้ Bootstrap จะมีโครงสร้างพื้นฐานที่บังคับให้การออกแบบเป็นไปตามกรอบแนวคิดที่มีมาให้ แต่เราก็สามารถที่จะเขียนพวก CSS และ Stylesheet เพิ่มเติมเพื่อเข้าไปจัดการกับส่วนติดต่อกับผู้ใช้งานต่าง ๆ ที่ต้องการได้ แต่ทั้งนี้ก็ต้องเข้าใจโครงสร้างก่อน มิเช่นนั้นเมื่อนำไปใช้งานกับอุปกรณ์ต่าง ๆ อาจก่อให้เกิดปัญหาในการแสดงผลได้ (2)

3. jQuery เป็น JavaScript Library ที่มีการรวบรวมฟังก์ชันของ JavaScript ต่าง ๆ ให้อยู่ในรูปแบบ

กรอบแนวความคิดที่สะดวกและง่ายต่อการใช้งาน มีความยืดหยุ่นรองรับต่อการใช้งานระหว่างเบราว์เซอร์ คือไม่ว่าจะใช้งานบนเว็บเบราว์เซอร์ใดในไลบรารีของ jQuery จะมีการเลือกใช้ฟังก์ชันที่เหมาะสมต่อการทำงานและแสดงผลในเว็บเบราว์เซอร์ที่กำลังรันอยู่ ซึ่งช่วยลดปัญหาการทำงานที่ผิดพลาดในฝั่งของไคลเอนท์ได้ จากปัญหาก่อนนี้นักโปรแกรมเมอร์ทั้งหลายในสมัยก่อน ๆ มักจะทดสอบโปรแกรมและพัฒนามบน IE (Internet Explorer ซึ่งเป็นเว็บเบราว์เซอร์ที่คนใช้มากที่สุดเกือบ 95 % เมื่อสมัย 5-6 ปี) แต่อย่างไรก็ตามตอนนี้ได้มีหลายเว็บเบราว์เซอร์ได้เกิดขึ้นมากมาย เช่น Chrome, Firefox หรือ Safari และบางคำสั่งของ JavaScript จะไม่ทำงานหรือไม่สนับสนุน ในเว็บเบราว์เซอร์บางตัว ด้วยเหตุผลนี้เองการใช้ jQuery มาเป็นทางเลือกก็สามารถช่วยแก้ปัญหานี้เป็นได้อย่างดี ทั้งยังสะดวกต่อการใช้งาน เพราะเป็นคำสั่งที่เข้าใจง่ายและเขียนได้ในรูปแบบที่สั้น รองรับการทำงานทั้งใน HTML รูปแบบเดิม หรือ CSS, element, DOM element, effect การจัดการเหตุการณ์ ต่าง ๆ หรือแม้กระทั่งการพัฒนา Ajax ด้วย jQuery ก็สามารถทำได้ง่ายโดยคำสั่งเหล่านี้ยังคงทำงานอยู่ภายใต้คำสั่งของภาษา JavaScript แต่การเรียกใช้งานกรอบแนวคิดหรือฟังก์ชันต่าง ๆ จะถูกกำหนดรูปแบบตามที่ได้ถูกออกแบบไว้ในไลบรารีของ jQuery (3)

4. Visual Studio Code หรือ VSCode เป็นโปรแกรม Code Editor ที่ใช้ในการแก้ไขและปรับแต่งโค้ด จากค่ายไมโครซอฟท์ มีการพัฒนาออกมาในรูปแบบของ Open Source จึงสามารถนำมาใช้งานได้แบบฟรีที่ต้องการความเป็นมืออาชีพ ซึ่ง Visual Studio Code นั้น เหมาะสำหรับนักพัฒนาโปรแกรมที่ต้องการใช้งานข้ามแพลตฟอร์ม รองรับการใช้งานทั้งบน Windows, macOS และ Linux สนับสนุนทั้งภาษา JavaScript, TypeScript และ Node.js สามารถเชื่อมต่อกับ Git ได้นำมาใช้ได้ง่ายไม่ซับซ้อน มีเครื่องมือส่วนขยายต่าง ๆ ให้เลือกใช้อย่างมากมาย ตัวอย่างเช่น การเปิดใช้งานภาษาอื่น ๆ ทั้ง ภาษา C++, C#, Java, Python, PHP

หรือ Go มีธีมให้ใช้งาน มีDebugger และมีCommands เป็นต้น (4)

5. โจเกิดเวิร์กโฟลว์ เป็นซอฟต์แวร์โอเพนซอร์ซที่ใช้ในการสร้างระบบงานเวิร์กโฟลว์ได้โดยไม่ต้องมีความรู้ในเรื่องของการเขียนโปรแกรมแต่อย่างใด ในการทำงานนั้นทุก ๆ องค์กรไม่ว่าจะเล็กหรือใหญ่ล้วนจะต้องมีเวิร์กโฟลว์ด้วยกันทั้งสิ้น ไม่ว่าเวิร์กโฟลว์นั้น จะเล็กหรือใหญ่ จะเป็นระเบียบหรือไม่ก็ตาม เช่น เวิร์กโฟลว์ของการเบิกจ่าย พนักงานจะต้องขออนุมัติจากหัวหน้าแผนก เมื่อหัวหน้าแผนกอนุมัติ ก็จะต้องตรวจสอบว่าอยู่ในวงเงินที่หัวหน้าแผนกสามารถอนุมัติได้หรือไม่ ถ้าได้ ก็ส่งเรื่องไปให้การเงินทำเรื่องเบิกจ่าย ถ้าวงเงินมาเกินก็จะต้องส่งเรื่องให้ผู้อำนวยการ เป็นต้น (5)

วิธีดำเนินการวิจัย

ทีมผู้วิจัยได้ดำเนินการพัฒนาซอฟต์แวร์ตามขั้นตอน คือ การวางแผน การออกแบบ การพัฒนาระบบ การติดตั้งและทดสอบ โดยได้มีการนำเทคโนโลยีเชิงวัตถุมาใช้ในกระบวนการพัฒนาระบบ (6-8) เป็นการนำหลักการเชิงวัตถุมาใช้เป็นแนวทางในการดำเนินงานในขั้นตอนต่าง ๆ ตามกระบวนการพัฒนาระบบ โดยในงานวิจัยนี้จะเน้นไปที่ขั้นตอนการวิเคราะห์ และออกแบบระบบตามแนวทางเชิงวัตถุ ที่นำเครื่องมือสำคัญที่จะช่วยให้นักวิเคราะห์ระบบสร้างแบบจำลองเชิงวัตถุเพื่อนำเสนอระบบก็คือ ภาษา UML (Unified Modeling Language) (9, 10) ซึ่งเป็นภาษาแผนภาพที่พัฒนาขึ้นมาเพื่อสนับสนุนงานด้านการวิเคราะห์ และออกแบบระบบเชิงวัตถุขั้นตอนการพัฒนาระบบจะใช้กระบวนการรวบรวมสัญลักษณ์ที่ใช้ ในงานวิจัยได้นำแผนภาพตามมาตรฐาน UML มาใช้งาน คือ แผนภาพยูสเคส (Usecase diagram) และแผนภาพคลาส (Class diagram) และแผนภาพลำดับการทำงาน ตามลำดับสำหรับแผนภาพยูสเคส (Usecase Diagram) ใช้สำหรับบรรยายความต้องการของระบบที่จะพัฒนาขึ้นว่ามีความสามารถอะไรบ้าง และผู้ใช้งานสามารถทำงานอะไร

ได้บ้าง โดยวัตถุประสงค์เพื่อแสดงให้เห็นสถานการณ์ต่าง ๆ ที่ผู้ใช้งานสามารถใช้ระบบ แต่ละสถานการณ์ที่ระบบสามารถให้บริการกับผู้ใช้งานตามความต้องการได้ แผนภาพคลาส (Class Diagram) สร้างขึ้นเพื่อใช้บรรยายโครงสร้างของคลาสที่ประกอบกันอยู่ในระบบงานรวมถึงขณะที่ระบบทำงาน คลาสจะต้องถูกนำไปสร้างเป็นวัตถุแล้วใช้งานวัตถุอะไรบ้าง ดังนั้นเมื่อเราเห็นแผนภาพคลาสเราจะต้องสามารถเข้าใจถึงส่วนประกอบของวัตถุที่สร้างขึ้นจากคลาส รวมทั้งแอตทริบิวต์และเมธอดที่อยู่ในวัตถุที่ถูกสร้างขึ้นจากคลาสด้วย ส่วนแผนภาพลำดับการทำงาน (Sequence Diagram) แสดงให้เห็นลำดับของการส่งงานวัตถุให้ทำงานไปจนกระทั่งเสร็จงานหนึ่งงาน โดยทั่วไปเรามักใช้แผนภาพลำดับการทำงานบรรยายลำดับเหตุการณ์ในแผนภาพยูสเคส ภายในยูสเคสจะประกอบด้วยลำดับเหตุการณ์ที่ผู้ใช้งาน (Actor) จะใช้งานระบบอย่างไรบ้าง ทำให้แผนภาพลำดับงานจะแสดงให้เห็นถึงลำดับเมื่อผู้ใช้งานมาใช้งานตามแผนภาพยูสเคส มีการส่งงานวัตถุให้ทำงาน เป็นลำดับ จนจบการทำงานตามที่กำหนดไว้ในแผนภาพยูสเคส ตามลำดับ ในย่อหน้าถัดไป จะอธิบายขั้นตอนการดำเนินงานอย่างละเอียด

1. การวางแผน

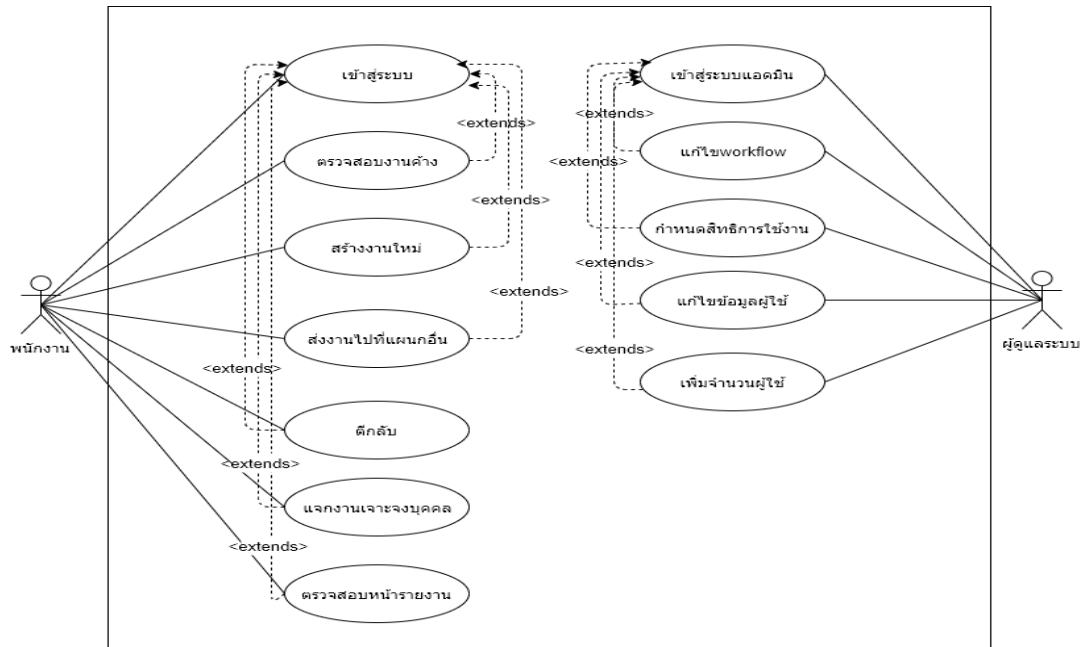
ทางทีมวิจัยได้มีการประชุมเพื่อสรุปความต้องการของผู้ใช้งานและวางแผนการดำเนินงาน โดยรายละเอียดจะเกี่ยวข้องกับฟังก์ชันที่มีทั้งหมดบนระบบที่พัฒนาขึ้น ใช้เครื่องมือหรือโปรแกรมหรือภาษาอะไรสำหรับการพัฒนา ระบบฐานข้อมูลใช้เก็บข้อมูลอะไรบ้าง เมื่อได้ข้อสรุปความต้องการของผู้ใช้งานแล้วดำเนินการวางแผนขั้นตอนการทำงาน ช่วงเวลาการทำงาน และกำหนดผู้รับผิดชอบ โดยรายละเอียดจะเกี่ยวข้องกับส่วนหน้าบ้านของระบบที่พัฒนา (Front End) มีหน้าที่ออกแบบหน้าเว็บไซต์ให้มีความน่าเชื่อถือ และส่วนหลังบ้าน (Back End) มีหน้าที่ทำฝั่งงานของระบบและจัดการกับฐานข้อมูลส่วนของการจัดเก็บข้อมูลเพื่อวิเคราะห์และออกแบบ ในงานวิจัยนี้ ใช้กรณีศึกษาในส่วนของหน่วยงานสถาบันวิจัยและพัฒนาด้านวิทยาศาสตร์และ

เทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.) ในส่วนของสำนักบริหารการคลัง (สคค.) โดยมีกองการเงินและบัญชี กองพัสดุและคลังวัสดุ เป็นเส้นทางเดินของเอกสาร

2. การออกแบบ

ในส่วนของส่วนหน้าบ้าน (Frontend) จะทำการออกแบบหน้าเว็บไซต์ให้เหมาะกับสำนักงาน และ

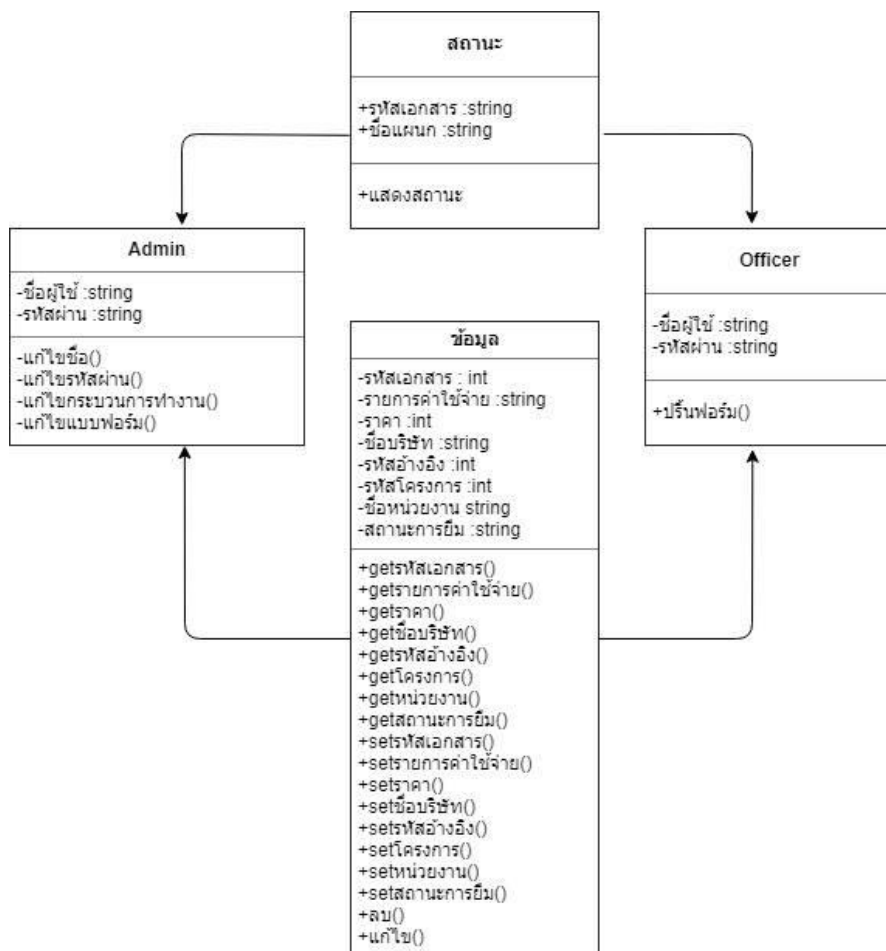
ส่วนของหลังบ้าน (Back End) ได้มีการออกแบบผังงานของเว็บไซต์ที่ได้จากการสรุปความต้องการมา แล้วนำมาสร้างเป็นผังงานแบบชั่วคราว เพื่อให้เห็นภาพของระบบได้อย่างชัดเจน มีการออกแบบส่วนแผนภาพยูสเคส ดังแสดงในรูปที่ 1



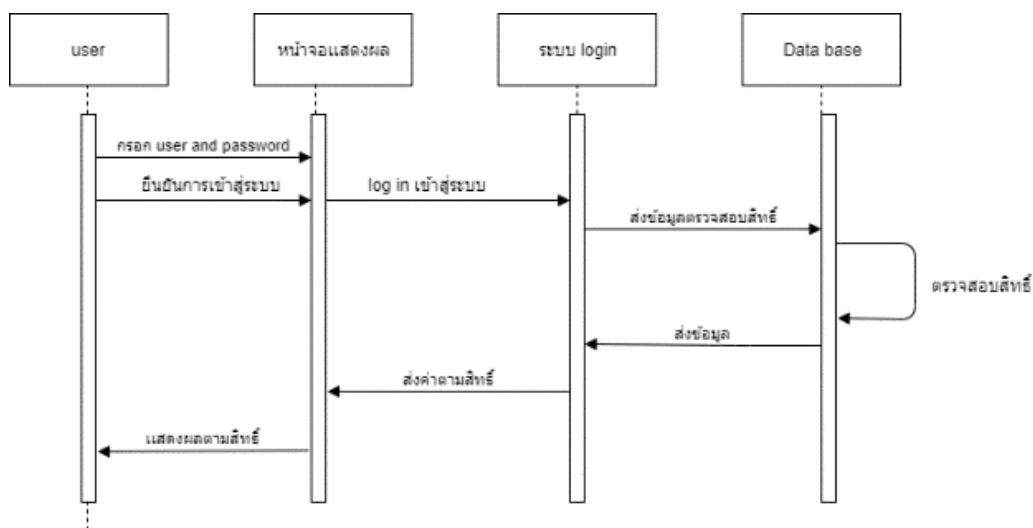
รูปที่ 1 แผนภาพยูสเคสของระบบ

จากรูปที่ 2 แสดงการทำงานของระบบที่ประกอบด้วยส่วนของพนักงานและส่วนของผู้ดูแลระบบ แยกการทำงานกันอย่างเป็นสัดส่วน ในการทำงานของระบบพนักงานสามารถเข้าสู่ระบบเพื่อตรวจสอบงานค้างรวมถึงสร้างงานใหม่เพื่อส่งงานไปที่แผนกอื่นได้นอกจากนี้ พนักงานยังสามารถตีกลับเอกสารที่ต้องการแจ้งงานให้กับบุคคลที่เฉพาะเจาะจงบุคคลและสามารถตรวจสอบหน้ารายงานต่าง ๆ ได้ สำหรับผู้ดูแลระบบสามารถเข้าสู่ระบบ แก้ไขงานเวิร์คโฟลว์ กำหนดสิทธิการใช้งานให้กับผู้ใช้งาน แก้ไขข้อมูลของผู้ใช้งาน และเพิ่มจำนวนผู้ใช้งานได้

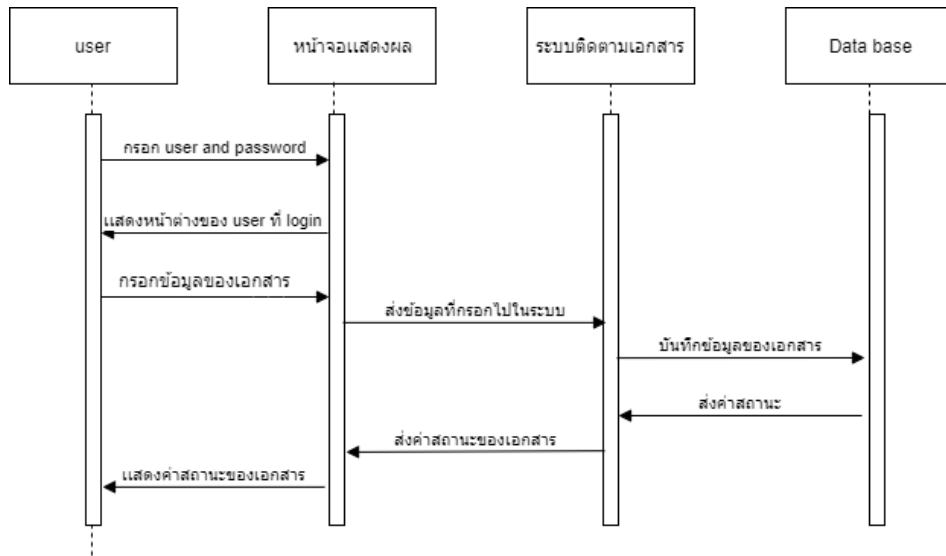
ในรูปที่ 2 แสดงแผนภาพคลาสของระบบที่อธิบายมุมมองการทำงานของผู้ดูแลระบบ (Admin) สถานะของเอกสาร ข้อมูล และพนักงาน (Officer) สำหรับระบบเว็บไซต์ที่พัฒนาขึ้น ในส่วนของ 1) ผู้ดูแลระบบมีการเก็บข้อมูล คือชื่อผู้ใช้งานและรหัสผ่าน โดยผู้ดูแลระบบสามารถแก้ไขชื่อ รหัสผ่าน แก้ไขกระบวนการทำงานและแก้ไขฟอร์มได้ 2) สถานะของเอกสาร มีการเก็บข้อมูลส่วนของรหัสเอกสาร ชื่อแผนก ที่แสดงสถานะได้ 3) พนักงานมีการเก็บข้อมูลชื่อผู้ใช้ รหัสผ่าน พนักงานสามารถส่งพิมพ์ฟอร์มต่าง ๆ ได้ ส่วนเอกสารจะมีการเก็บข้อมูลต่าง ๆ และตรวจสอบสถานะได้



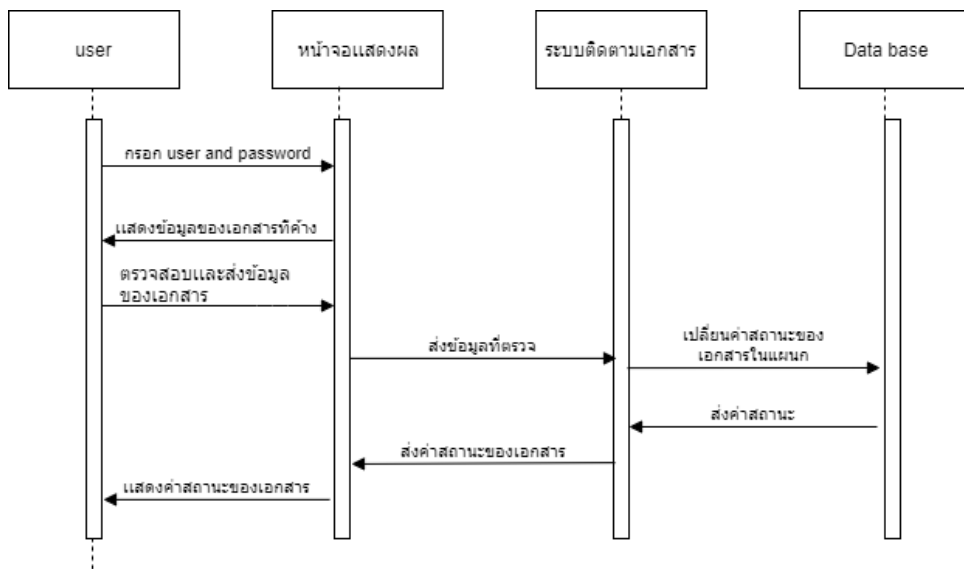
รูปที่ 2 แผนภาพคลาสของระบบ



รูปที่ 3 แผนภาพลำดับการทำงานเข้าสู่ระบบ



รูปที่ 4 แผนภาพลำดับการสร้างเอกสารใหม่



รูปที่ 5 แผนภาพลำดับกระบวนการการทำงานของระบบติดตาม

แผนผังการทำงานที่แสดงลำดับการปฏิสัมพันธ์ (Sequence of Interactions) ระหว่างพนักงาน เอกสาร สถานะเอกสาร และผู้ดูแลระบบ โดยมีการส่งข้อความ (Messaging) ที่มีการรับส่งข้อมูลระหว่างกัน ในรูปที่ 3 แสดงแผนภาพลำดับการทำงานเข้าสู่ระบบ ที่พนักงาน กรอกชื่อผู้ใช้และรหัสผ่านที่หน้าจอแสดงผล หลังจากกด ยืนยันข้อมูลแล้ว จากนั้นข้อมูลจะถูกส่งไปที่ระบบ

ฐานข้อมูลเพื่อตรวจสอบสิทธิ์ผลลัพธ์จะส่งเป็นข้อมูลมา แสดงที่หน้าจอแสดงผลตามสิทธิ์ของผู้ใช้งาน

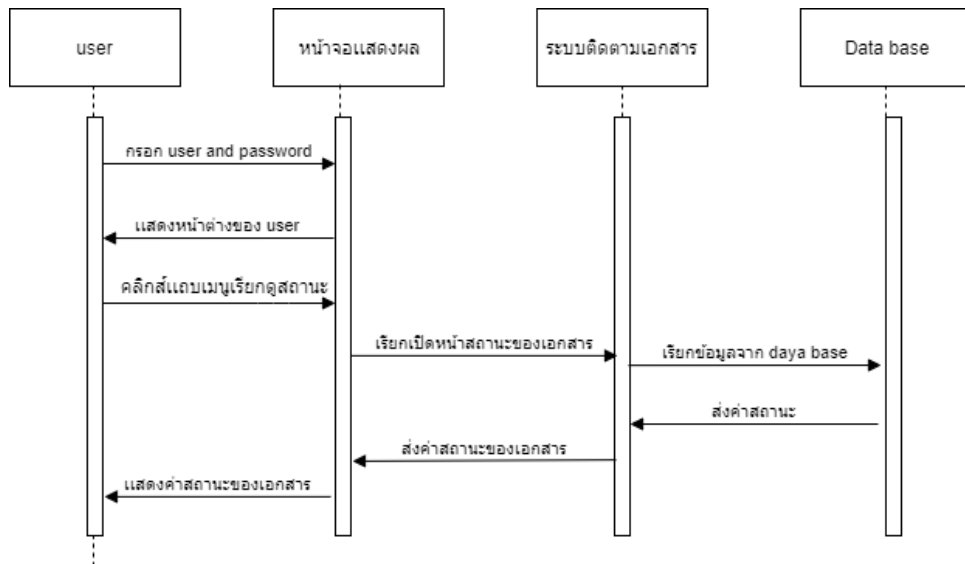
สำหรับรูปที่ 4 แสดงแผนภาพลำดับการสร้างเอกสารใหม่ โดยมีผู้เกี่ยวข้อง 4 ส่วนด้วยกัน คือผู้ใช้งาน หน้าจอแสดงผล ระบบติดตามเอกสาร และฐานข้อมูล โดยเมื่อการทำงานเริ่มต้น หน้าจอแสดงผลสร้างเอกสารใหม่ จากนั้นผู้ใช้งานกรอกข้อมูลผู้ใช้งานและรหัสผ่านที่หน้าจอแสดงผล ข้อมูลที่กรอกไปในระบบจะถูกส่งไปในระบบ

ติดตามเอกสาร เพื่อบันทึกหลักฐานข้อมูล และส่งค่าสถานะของเอกสารกลับมาที่หน้าจอแสดงผล ผู้ใช้งานสามารถตรวจสอบสถานะของเอกสารได้

กระบวนการทำงานของระบบติดตามที่แสดงในรูปที่ 5 เริ่มต้นด้วยผู้ใช้งานกรอกข้อมูลผู้ใช้งานและรหัสผ่านที่หน้าจอแสดงผล เมื่อระบบตรวจสอบสิทธิ์ผ่านเรียบร้อยแล้วผู้ใช้งานสามารถตรวจสอบข้อมูลของเอกสารค้าง และจัดส่งเอกสารไปยังระบบติดตามเอกสาร เพื่อเปลี่ยนสถานะของเอกสารในแต่ละแผนก และบันทึก

ลงฐานข้อมูล และส่งค่าสถานะของเอกสารกลับมาที่หน้าจอแสดงผลให้ผู้ใช้งานได้ทราบ

ในรูปที่ 6 แสดงแผนภาพลำดับกระบวนการเรียกดูสถานะของเอกสาร โดยเริ่มการทำงานจากผู้ใช้งานกรอกข้อมูลผู้ใช้และรหัสผ่านที่หน้าจอแสดงผล ผู้ใช้งานคลิกแถบเมนูเรียกดูสถานะเอกสาร โดยคลิกเปิดหน้าสถานะเอกสารในระบบติดตามเอกสาร ระบบจะไปดึงข้อมูลจากฐานข้อมูลมาแสดงผลสถานะและส่งค่าสถานะของเอกสารไปยังหน้าจอแสดงผลให้ผู้ใช้งานทราบตามต้องการได้



รูปที่ 6 แผนภาพลำดับกระบวนการเรียกดูสถานะของเอกสาร

3. การพัฒนาระบบ

ส่วนหน้าของระบบพัฒนาเป็นเว็บไซต์โดยใช้โปรแกรม Visual Studio Code 1.38.1 พัฒนาร่วมกับเฟรมเวิร์ค Bootstrap ภาษา HTML, CSS, Javascript สำหรับตกแต่ง เชื่อมต่อกับฐานข้อมูล MySQL ส่วนการทำงานของหลังบ้านของระบบพัฒนาโดยใช้ ใจเก็ตเวิร์กโพล์ ร่วมกับ ภาษาพีเอสบี (PHP) เชื่อมต่อกับฐานข้อมูล MySQL สำหรับการเก็บข้อมูลและกำหนดสิทธิ์การเข้าถึงให้กับผู้ใช้งาน โดยแบ่งเป็นระดับผู้ใช้งานทั่วไปและผู้ดูแลระบบ โดยผู้ดูแลระบบสามารถแก้ไขลำดับการทำงานในระบบและแก้ไขข้อมูลต่าง ๆ ในระบบได้

ทุกอย่าง และมีการนำข้อมูลที่มีมาแสดงผลในรูปแบบตามความต้องการ

4. การทดสอบระบบ

คณะผู้วิจัยทำการทดสอบระบบและประเมินผลด้วยแบบสอบถาม มีการคำนวณค่าความเที่ยงตรงของแบบสอบถาม (IOC: Index of Item Objective Congruence) โดยแบบสอบถามพิจารณาจากผู้เชี่ยวชาญแล้วทำการสุ่มผู้ใช้งานมาทำการทดลองใช้งานระบบ เพื่อหาระดับความพึงพอใจของผู้ใช้งาน เมื่อพัฒนาระบบเสร็จเรียบร้อยแล้ว ก็ทำการติดตั้งระบบและมี

การประเมินผลระบบด้วยแบบสอบถามความพึงพอใจ
ของการใช้ระบบกับผู้เชี่ยวชาญและผู้ใช้งานระบบ

5. การนำไปใช้

ส่วนหน้าของระบบในส่วนของหน้าเว็บไซต์ให้
ผู้ใช้งานทดสอบใช้งานให้ครบทุกฟังก์ชัน และส่วนหลัง
ของระบบ ผู้ดูแลระบบจะจัดการเรื่องการสร้างข้อมูล
แก้ไข และลบข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับระบบการทำงานและ
นำมาข้อมูลจากระบบฐานข้อมูลมาแสดงเป็นรายงานต่าง ๆ

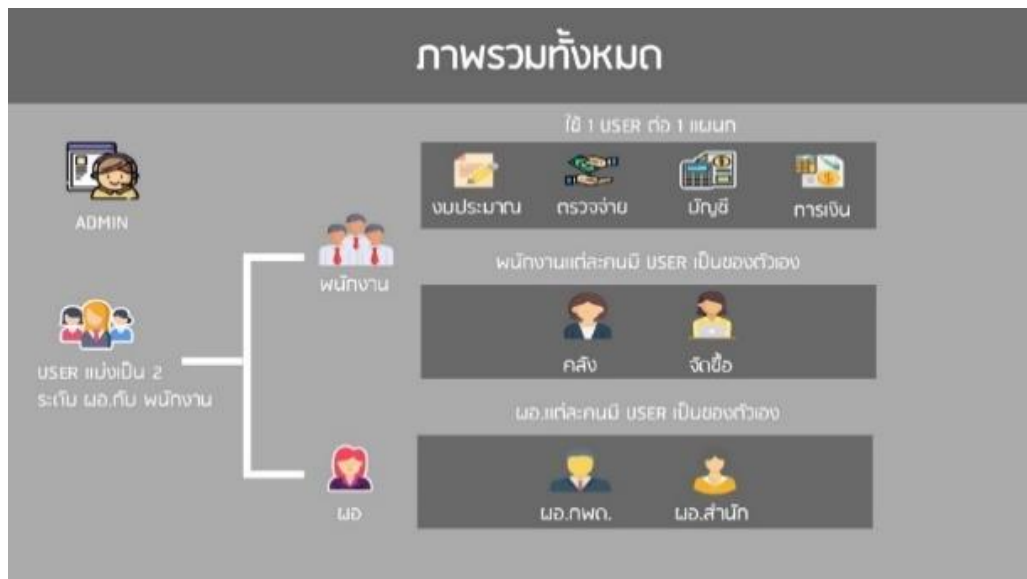
ผลการศึกษาและอภิปรายผล

ระบบที่พัฒนาขึ้น ได้พัฒนาตามความต้องการ
ของผู้ใช้งาน ซึ่งมีกระบวนการทำงานของระบบติดตาม
และภาพรวมการทำงานทั้งหมด ดังแสดงในรูปที่ 7 โดยการ
ทำงานของส่วนหน้าของระบบดำเนินการโดยผู้ใช้งานที่
ประกอบด้วยพนักงานและผู้อำนวยการ พนักงานสามารถ
ดำเนินการงบประมาณ ตรวจสอบ บัญชี การเงินได้ ส่วน
ผู้อำนวยการจะสามารถตรวจสอบรายงานต่าง ๆ ได้ตาม
ความต้องการ ส่วนหลังระบบจะบริหารจัดการโดยผู้ดูแล

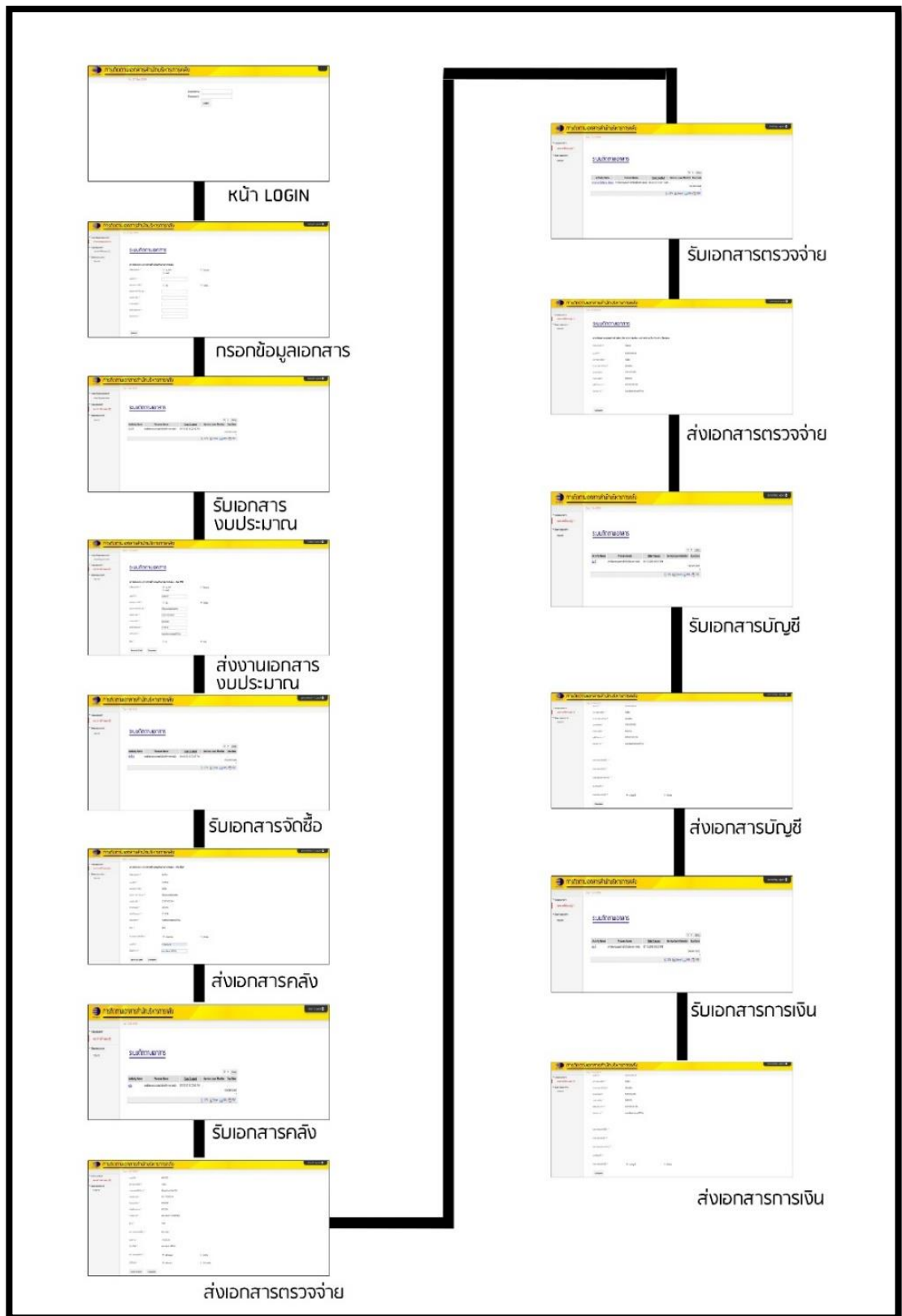
ระบบ จัดการด้านสร้างข้อมูล แก้ไข และลบข้อมูล
ที่เกี่ยวข้องกับระบบได้

รูปที่ 8 กระบวนการทำงานของเว็บไซต์ เริ่มต้น
จากหน้าเข้าสู่ระบบ (LOGIN) ผู้ใช้สามารถกรอกข้อมูล
เอกสาร รับเอกสารงบประมาณ ส่งเอกสาร รับเอกสาร
จัดซื้อ ส่งเอกสารคลัง รับเอกสารคลัง ส่งเอกสารตรวจจ่าย
รับเอกสารตรวจจ่ายส่งเอกสารตรวจจ่าย รับเอกสารบัญชี
ส่งเอกสารบัญชี รับเอกสารการเงิน ส่งเอกสารการเงิน เป็น
ขั้นตอนสุดท้ายก่อนเสร็จสิ้นกระบวนการ โดยรายละเอียด
ของการทำงานแต่ละหน้าเว็บเพจในส่วนของผู้ใช้งานแสดง
ได้ไว้ดังนี้

1. หน้าเข้าสู่ระบบเป็นหน้าแรกของเว็บไซต์ที่
ผู้ใช้งานในองค์กรแต่ละหน่วยงาน เข้าสู่ระบบเพื่อดูการะ
งานของตนเอง ในงานวิจัยนี้ใช้กรณีศึกษาของหน่วยงาน
สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย
(วว.) เป็นรัฐวิสาหกิจประเภทที่จัดตั้งขึ้น เพื่อดำเนินการ
ตามนโยบายพิเศษ ของรัฐในสังกัดกระทรวงวิทยาศาสตร์
และเทคโนโลยี (วท.) ดังรูปที่ 9



รูปที่ 7 กระบวนการทำงานของระบบติดตาม



รูปที่ 8 กระบวนการทำงานของเว็บไซต์



รูปที่ 9 หน้าเข้าสู่ระบบ

2. หน้าหน่วยงานงบประมาณ ผู้ใช้งานสามารถสร้างเอกสารได้ที่หน้าจอนี้ เมื่อเริ่มต้นสร้างงานเอกสารเสร็จจะสามารถส่งต่องานเอกสารให้หน่วยงานถัดไป ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 หน่วยงานงบประมาณ

3. หน้าเอกสารงานที่ค้าง แสดงเอกสารงานที่ค้างของแต่ละหน่วยงาน มีทั้งหมด 6 หน่วยงาน ได้แก่ ผอ. หน่วยงานจัดซื้อ หน่วยงานคลัง หน่วยงานตรวจจ่าย หน่วยงานบัญชี หน่วยงานการเงิน ดังรูปที่ 11



รูปที่ 11 หน้างานเอกสารที่ค้าง

4. หน้าตรวจสอบงาน และส่งเอกสารต่อ แต่ละหน่วยงานจะมีหน้าตรวจสอบงานไม่เหมือนกัน โดยจะมีทั้งหมด 7 หน่วยงาน ได้แก่ หน่วยงานงบประมาณ ผอ. หน่วยงานจัดซื้อ หน่วยงานคลัง หน่วยงานตรวจจ่าย หน่วยงานบัญชี หน่วยงานการเงิน ดังรูปที่ 12



รูปที่ 12 หน้าตรวจสอบ และส่งเอกสาร

5. หน้ารายงานหรือหน้าติดตามสถานะของงานเอกสาร เป็นหน้าสำหรับตรวจสอบงานเอกสารแต่ละฉบับ ว่าเอกสารอยู่ในหน่วยงานใด ดังรูปที่ 13



รูปที่ 13 หน้ารายงานหรือหน้าติดตามสถานะงานเอกสาร

ส่วนรายละเอียดของการทำงานแต่ละหน้าเว็บเพจในส่วนของหลังระบบที่จัดการโดยผู้ดูแลระบบ โดยมีฟังก์ชันที่ทำงาน ได้แก่ การเพิ่ม การลบข้อมูลผู้ใช้งาน จัดการข้อมูล สร้างกระบวนการของเอกสารและฟอร์มการทำงานต่าง ๆ แสดงไว้ในรูปที่ 14-17

ในรูปที่ 14 ผู้ดูแลระบบสามารถเพิ่มหรือลบผู้ใช้งาน โดยกระบวนการทำงานจะเริ่มต้นที่หน้าหลักตรวจสอบสิทธิ์ ออกแบบเอกสาร ทำงาน และติดตามเอกสารตามลำดับ รูปที่ 15 แสดงรายละเอียดเกี่ยวกับข้อมูลผู้ใช้งาน เช่น ชื่อ นามสกุล อีเมล หน้าที่ แผนกสถานะ เป็นต้น รูปที่ 16-17 แสดงการติดตามเอกสารสำหรับหน่วยงานต่าง ๆ



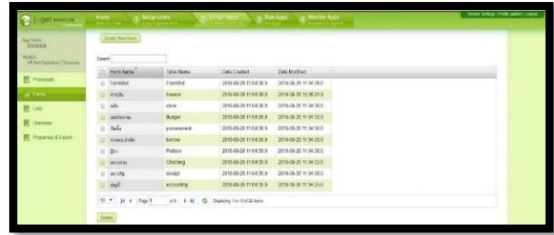
รูปที่ 14 หน้าเพิ่ม-ลบข้อมูลของผู้ใช้งาน



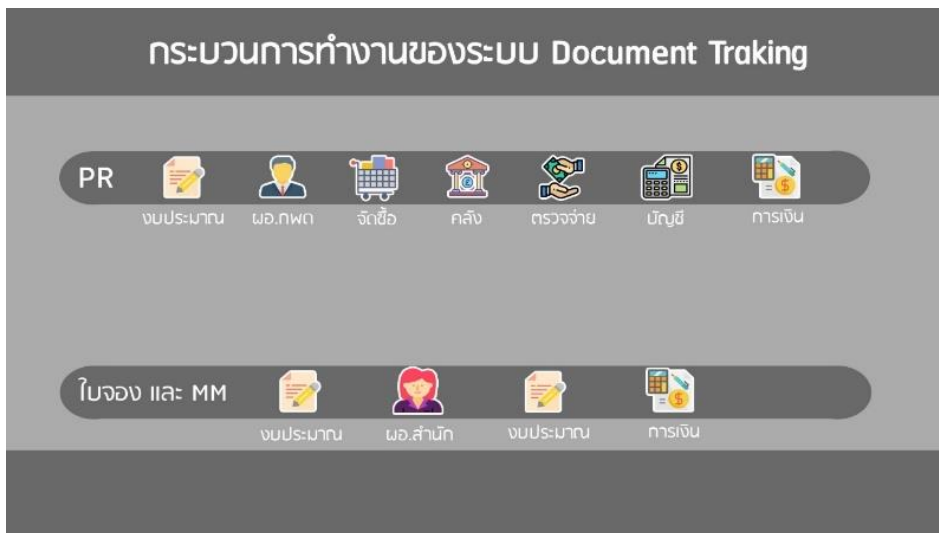
รูปที่ 16 หน้าสร้างกระบวนการในระบบ



รูปที่ 15 หน้าข้อมูลของผู้ใช้งาน



รูปที่ 17 หน้าตัวอย่างการสร้างฟอร์ม



รูปที่ 18 กระบวนการทำงานของระบบติดตามเอกสาร

กระบวนการทำงานของระบบติดตามสามารถแสดงเป็นภาพรวมในรูปที่ 18 ตัวอย่างเช่นประชาสัมพันธ์ จะเกี่ยวข้องกับงบประมาณ ผู้อำนวยการหน่วยงาน จัดซื้อ กองคลัง ตรวจจ่าย ฝ่ายบัญชี และการเงิน เป็นต้น ซึ่งทำให้ผู้ใช้งานสามารถติดตามและตรวจสอบสถานะ รวมทั้งค้นหาผู้รับผิดชอบเอกสารได้อย่างครบถ้วน รวดเร็ว และแม่นยำอีกด้วย จึงแสดงให้เห็นว่าการเพิ่มประสิทธิภาพการติดตามเอกสารด้วยเทคโนโลยีเว็บดีขึ้นจากเดิมที่ไม่มีระบบอะไรเลย ใช้การ

ติดตามโดยเจ้าหน้าที่ ทีมผู้วิจัยจึงได้ดำเนินการติดตั้งระบบที่พัฒนาเสร็จสมบูรณ์แล้วเพื่อทดสอบประสิทธิภาพของการทำงานด้วยการหาความพึงพอใจการใช้งานด้วยแบบสอบถามความพึงพอใจจากผู้ใช้ในการใช้งานระบบ โดยแบ่งเป็นการประเมินด้วยผู้เชี่ยวชาญ และผู้ใช้ทั่วไป ซึ่งมีหลักเกณฑ์การประเมินประกอบด้วย 5 ด้าน คือ 1) รูปแบบเว็บไซต์ง่ายต่อการอ่านและการใช้งาน 2) การใช้รูปแบบตัวอักษรที่เหมาะสม 3) ความสามารถของระบบในการติดตามเอกสาร 4) ความถูกต้องในการ

เชื่อมโยงภายในเว็บไซต์ และ 5) ความถูกต้องของการทำงานระบบในภาพรวม โดยในตารางที่ 1 หลักเกณฑ์การแปลความหมายของค่าคะแนนเฉลี่ย ดังนี้

ตารางที่ 1 หลักเกณฑ์การแปลความหมายของค่าคะแนนเฉลี่ยเป็นระดับการปฏิบัติ

ช่วงของค่าเฉลี่ย (ขีดจำกัดขั้นที่แท้จริง)	การแปลความหมาย
4.51 – 5.00	มากที่สุด
3.51 – 4.50	มาก
2.51 – 3.50	ปานกลาง
1.51 – 2.50	น้อย
1.00 – 1.50	น้อยที่สุด

ตารางที่ 2 หลักเกณฑ์การแปลความหมายค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน กรณีประมาณค่า 3 ระดับ

ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน	ความหมาย
มากกว่า 0.75	มีความแตกต่างกันมาก
0.50 – 0.75	มีความแตกต่างค่อนข้างมาก
น้อยกว่า 0.50	มีความแตกต่างกันน้อย

จากตารางที่ 3 เป็นค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความพึงพอใจโดยรวมเท่ากับ 4.41 และ 0.63 ตามลำดับ แปลผลได้ว่า ระบบที่พัฒนาขึ้นพอใจมาก มีความแตกต่างค่อนข้างมาก จากตารางที่ 4 เป็นค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความพึงพอใจโดยรวมเท่ากับ 4.44 และ 0.83 ตามลำดับ แปลผลได้ว่า ระบบที่พัฒนาขึ้นพอใจมาก มีความแตกต่างกันมาก

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความพึงพอใจด้านรูปแบบเว็บไซต์และวิธีการใช้งานของผู้เชี่ยวชาญ

ลำดับที่	เกณฑ์การประเมิน	n = 3		
		$\bar{x}$	S. D.	การแปลความหมาย
1	รูปแบบเว็บไซต์ต่อการอ่านและการใช้งาน	4.67	0.58	พอใจมาก มีความแตกต่างค่อนข้างมาก
2	การใช้รูปแบบตัวอักษรที่เหมาะสม	4.33	0.98	พอใจมาก มีความแตกต่างกันมาก
3	ความสามารถของระบบในการติดตามเอกสาร	4.55	0.58	พอใจมาก มีความแตกต่างค่อนข้างมาก
4	ความถูกต้องในการเชื่อมโยงภายในเว็บไซต์	4.13	0.45	พอใจมาก มีความแตกต่างกันน้อย
5	ความถูกต้องของการทำงานระบบในภาพรวม	4.37	0.55	พอใจมากที่สุด มีความแตกต่างค่อนข้างมาก
รวม		4.41	0.63	พอใจมาก มีความแตกต่างค่อนข้างมาก

ตารางที่ 4 ค่าเฉลี่ยและค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานความพึงพอใจด้านรูปแบบเว็บไซต์และวิธีการใช้งานส่วนของผู้ใช้งานระบบ

ลำดับที่	เกณฑ์การประเมิน	n = 30		
		$\bar{x}$	S. D.	การแปลความหมาย
1	รูปแบบเว็บไซต์ง่ายต่อการอ่านและการใช้งาน	4.67	0.98	พอใจมาก มีความแตกต่างกันมาก
2	การใช้รูปแบบตัวอักษรที่เหมาะสม	4.50	0.75	พอใจมาก มีความแตกต่างค่อนข้างมาก
3	ความสามารถของระบบในการติดตามเอกสาร	4.10	0.75	พอใจมาก มีความแตกต่างค่อนข้างมาก
4	ความถูกต้องในการเชื่อมโยงภายในเว็บไซต์	4.50	0.87	พอใจมาก มีความแตกต่างกันมาก
5	ความถูกต้องของการทำงานระบบในภาพรวม	4.44	0.79	พอใจมากที่สุด มีความแตกต่างค่อนข้างมาก
รวม		4.44	0.83	พอใจมาก มีความแตกต่างกันมาก

สรุปผล

ในการทำวิจัย คณะผู้วิจัยได้ดำเนินการพัฒนาระบบติดตามเอกสารด้วยเทคโนโลยีเว็บ สำหรับเอกสาร การซื้อ-การขาย เพื่อเป็นลายลักษณ์อักษรระหว่างผู้ซื้อ-ผู้ขายภายในองค์กรขึ้น เพื่อลดปัญหาเดิมที่พบเจอ ระบบที่พัฒนาขึ้นทำให้เพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานโดยผู้ใช้งานระบบสามารถตรวจสอบรายละเอียดของเอกสาร การซื้อ-การขาย หลายขั้นตอน ซึ่งเสี่ยงต่อการสูญหายของเอกสาร ตรวจสอบและหาผู้รับผิดชอบในการติดตามเอกสารได้ โดยระบบที่พัฒนาขึ้นการประเมินความพึงพอใจของการใช้งานจากผู้ใช้งาน พบว่าผลการประเมินความพึงพอใจการใช้งานระบบโดยผู้เกี่ยวข้องจำนวน 3 คน พบว่าค่าเฉลี่ยความพึงพอใจเท่ากับ 4.41 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.63 และผู้ใช้งานทั่วไปจำนวน 30 คน พบว่าค่าเฉลี่ยความพึงพอใจเท่ากับ 4.44 และค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.83 แปลผลได้ว่าระดับความพึงพอใจเป็นมาก สามารถนำระบบที่พัฒนาขึ้นไปใช้งานได้จริงอย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้เป็นความร่วมมือระหว่างมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีกับสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่ง ประเทศไทย (วว.) คณะผู้วิจัยขอขอบคุณสำหรับทีมวิจัยที่เข้มแข็ง ผู้ใช้งาน ผู้อำนวยการ และผู้ที่เกี่ยวข้องทุกคนสำหรับข้อมูลและคำแนะนำที่ทำให้งานวิจัยครั้งนี้สำเร็จลุล่วงได้อย่างดี

เอกสารอ้างอิง

1. บริษัท ซอฟท์เมลท์ จำกัด. HTML คือ อะไร? [อินเทอร์เน็ต]. [สืบค้นเมื่อวันที่ 25 ก.ย. 2562]. จาก: <https://www.softmelt.com>
2. บริษัท ไทยครีเอท จำกัด. (2003-2019). CSS BOOTSTRAP คืออะไร? [อินเทอร์เน็ต]. [สืบค้นเมื่อวันที่ 25 ก.ย. 2562]. จาก <https://www.thaicreate.com>
3. บริษัท ไทยครีเอท จำกัด. JAVASCRIPT JQUERY คืออะไร? [อินเทอร์เน็ต]. [สืบค้นเมื่อวันที่ 25 ก.ย. 2562]. จาก : <https://www.thaicreate.com>.

4. เว็บไซต์ PHP เว็บส่งเสริมการเรียนรู้. รู้จักกับ Visual Studio Code (วิชวล สตูดิโอ โค้ด). [อินเทอร์เน็ต]. [สืบค้นเมื่อวันที่ 25 ก.ย. 2562]. จาก : <https://mindphp.com>
5. สำนักงานส่งเสริมอุตสาหกรรมซอฟต์แวร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน). Joget คืออะไร?. [อินเทอร์เน็ต]. [สืบค้นเมื่อวันที่ 25 ก.ย. 2562]. จาก : <https://sites.google.com>
6. โอภาส เอี่ยมสิริวงศ์. การวิเคราะห์และออกแบบระบบ (ฉบับปรับปรุงเพิ่มเติม). กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดยูเคชั่น; 2560.
7. อรยา ปรีชาพานิช. คู่มือเรียน การวิเคราะห์และออกแบบระบบ: System Analysis and Design: ฉบับสมบูรณ์. นนทบุรี: ไอทีซี พรีเมียร์; 2557.
8. ชีรวัฒน์ ประกอบผล, เอกพันธ์ คำปัญญา. การวิเคราะห์และออกแบบระบบ. กรุงเทพฯ: ชัคเชสมิเดีย; 2552.
9. กิตติ ภัคดีวัฒนกุล, กิตติพงษ์ กลมกล่อม. UML วิเคราะห์และออกแบบระบบเชิงวัตถุ. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: เคทีพี คอมพ์ แอนด์ คอนซัลท์; 2547.
10. Podeswa H. UML for the IT Business Analysis: A Practical Guide to Requirements Gathering Using the Unified Modeling Language 2ED (P). Boston: Course Technology Cengage Learning; 2010.



การปรับปรุงกระบวนการไหลสินค้าของธุรกิจวัสดุทดแทนไม้โดยใช้ผังสายธารคุณค่า และการจำลองสถานการณ์

Loading Process Improvement of Wood Substitute Industry Using Value Stream Mapping and Simulation

จารุวิทย์ ไกรวงศ์^{1*} และ สิริอร เศรษฐมานิต²

Charuwit Kraiwong^{1*} and Siri-on Setamanit²

¹สาขาวิชาการจัดการโลจิสติกส์และโซ่อุปทาน บัณฑิตวิทยาลัย จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

²ภาควิชาพาณิชยศาสตร์ คณะพาณิชยศาสตร์และการบัญชี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย เขตปทุมวัน กรุงเทพฯ 10330

¹Logistics and Supply Chain Management, Chulalongkorn University, Patumwan, Bangkok 10330, THAILAND

²Commerce Department, Faculty of Commerce and Accountancy, Chulalongkorn University Patumwan, Bangkok 10330, THAILAND

*Corresponding author e-mail: charuwit.k@hotmail.com

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article history:

Received: 12 May, 2020

Revised: 19 June, 2020

Accepted: 29 July, 2020

Available online: 20 October, 2020

DOI: 10.14456/rj-rmutt.2020.18

Keywords: value stream mapping, simulation model, loading process, process improvement, wood substitute

The aim of this research is to study and analyze the current operations and bottleneck of loading process of Wood Substitute industry by using Value Stream Mapping (VSM) to identify ways to reduce non-value added time of loading process. Then, simulation models are used to evaluate and compare the efficiency and effectiveness of each improvement idea. The case study used in this research is a warehouse in a company that manufacture and sales of wood substitute products. The improvement effectiveness is measured by two criterions which are an average total time of loading process and an average waiting time at warehouse. The researchers propose four ideas to reduce non-value added time including 1) Reduce pick and transfer goods while loading 2) Reduce a waiting time of loading the uncompleted manufacturing and packaging 3) The combination of reduce pick and transfer goods while loading and reduce a waiting time of loading the uncompleted manufacturing and

packaging and 4) Adding load resources. The results show that adding load resources idea is the most effective way to reduce the average total time of loading process and the average waiting time at warehouse. The reduction of the average total time of loading process, the average waiting time at warehouse for Flatbed Truck, and the average waiting time at warehouse for container truck are 3%, 92% and 94%, respectively.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและวิเคราะห์สภาพการดำเนินงานกระบวนการโหลดสินค้าของอุตสาหกรรมวัสดุทดแทนไม้ และเพื่อวิเคราะห์หาจุดคอขวด (Bottleneck) ของกระบวนการด้วยแผนภาพสายธารคุณค่า ที่นำไปสู่การหาแนวทางการลดระยะเวลาที่ไม่ก่อให้เกิดคุณค่า ของกระบวนการโหลดสินค้า ประกอบกับการนำแบบจำลองสถานการณ์ มาช่วยในการหาผลลัพธ์ และเปรียบเทียบผลลัพธ์ของแต่ละแนวทาง โดยใช้คลังสินค้าหนึ่งของบริษัทผู้ผลิตและจัดจำหน่ายวัสดุทดแทนไม้แห่งหนึ่ง เป็นตัวแทนของการศึกษา โดยมีเกณฑ์ชี้วัดประสิทธิภาพของการปรับปรุง 2 เกณฑ์ ประกอบด้วย ระยะเวลารวมเฉลี่ยของการเข้ามารับสินค้า และระยะเวลารอคอยเฉลี่ยเพื่อโหลดสินค้าของรถบรรทุก ซึ่งจากการศึกษาและวิเคราะห์สาเหตุของคอขวดที่เกิดขึ้นในกระบวนการโหลดสินค้า นำไปสู่การนำเสนอแนวทางการลดระยะเวลาการโหลดสินค้า 4 แนวทาง ได้แก่ 1) การลดการรื้อไม้และการขนย้ายไม้ระหว่างโหลดสินค้า 2) การลดระยะเวลารอคอยในระหว่างโหลดสินค้าจากการรอสินค้าในการผลิตและการบรรจุสินค้า 3) การลดการรื้อไม้และการขนย้ายไม้ระหว่างโหลดสินค้า ร่วมกับการลดระยะเวลารอคอยในระหว่างโหลดสินค้าจากการรอสินค้าในการผลิต และการบรรจุสินค้า และ 4) การเพิ่มชุดโหลด (Load Resource) ในกระบวนการโหลดสินค้า จากการศึกษาพบว่า แนวทางการเพิ่มชุดโหลดในกระบวนการโหลดสินค้า ทำให้ระยะเวลารวมเฉลี่ยของการเข้ามารับสินค้า และ

ระยะเวลารอคอยเฉลี่ยเพื่อโหลดสินค้าของรถบรรทุก ลดลงมากที่สุด โดยสามารถลดระยะเวลาเฉลี่ยของการเข้ามารับสินค้าลงได้ร้อยละ 3 และสามารถลดระยะเวลารอคอยเฉลี่ยเพื่อโหลดสินค้าประเภทถฟืนเรียบ และตู้คอนเทนเนอร์ลงได้ ร้อยละ 92 และ 94 ตามลำดับ

คำสำคัญ: แผนภาพสายธารคุณค่า แบบจำลองสถานการณ์ กระบวนการโหลดสินค้า การปรับปรุงกระบวนการ วัสดุทดแทนไม้

บทนำ

อุตสาหกรรมวัสดุทดแทนไม้นับได้ว่าเป็นอุตสาหกรรมหนึ่งที่เติบโตขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเป็นผลจากเทคโนโลยีของการผลิตและการพัฒนาผลิตภัณฑ์วัสดุทดแทนไม้ที่เพิ่มขึ้น ทำให้วัสดุทดแทนไม้ที่ผลิตออกมาจำหน่ายในปัจจุบัน มีความทนทาน แข็งแรง และมีลักษณะที่คล้ายกับแผ่นไม้ธรรมชาติมาก (1) ประกอบกับพฤติกรรมของผู้บริโภคที่ได้ให้ความสำคัญกับสิ่งแวดล้อมมากขึ้น (2) อีกทั้งราคาที่ต่ำกว่าไม้ธรรมชาติถึง 3 – 4 เท่า ทำให้อัตราการเติบโตของรายได้และกำไร เฉลี่ยสูงถึงร้อยละ 8 ในช่วงปี พ.ศ. 2557 ถึง 2561 (3)

ผลิตภัณฑ์วัสดุทดแทนไม้ประเภทหนึ่งที่กำลังได้รับความนิยมเป็นอย่างมากประเภทหนึ่ง คือ ไม้ปาร์ติเกิลบอร์ด โดยผลิตภัณฑ์ประเภทนี้เป็นสินค้าที่มีลักษณะและคุณภาพของสินค้าที่ใกล้เคียงกันไม่ว่าจะเป็นผู้ผลิตรายใดก็ตาม ทำให้ไม้ปาร์ติเกิลบอร์ดถูกจัดอยู่ใน

ประเภทของสินค้าโภคภัณฑ์ (Commodity) ซึ่งลักษณะสำคัญข้อหนึ่งของสินค้าประเภทดังกล่าวนี้ คือ ราคาของสินค้าจะถูกกำหนดโดยอุปสงค์ (Demand) และอุปทาน (Supply) ของตลาด (4) ทำให้ผู้ผลิตไม่สามารถควบคุมราคาหรือกำหนดราคาได้ด้วยตนเอง ส่งผลให้องค์กรธุรกิจในอนาคตต้องมุ่งเน้นให้ความสำคัญกับการเพิ่มขีดความสามารถทางการแข่งขันและผลกำไรให้กับธุรกิจโดยรักษาต้นทุนให้เท่าเดิม หรือลดน้อยลงกว่าเดิม ตลอดจนการสร้างมูลค่าเพิ่ม และการลดระยะเวลาการดำเนินงานที่สูญเปล่าหรือที่ไม่ก่อให้เกิดมูลค่าเพิ่มในกระบวนการดำเนินงานขององค์กร เพื่อให้เกิดประสิทธิภาพตลอดทั้งโซ่อุปทาน

อย่างไรก็ตามการลดระยะเวลาที่สูญเปล่าในกระบวนการดำเนินงานนั้น สามารถดำเนินการได้อย่างหลากหลายเนื่องจากระยะเวลาการดำเนินงาน ประกอบไปด้วย ระยะเวลาของการทำงานในทุก ๆ กระบวนการที่จะทำให้การดำเนินงานของธุรกิจสำเร็จจุล่ง ซึ่งกว่าร้อยละ 90 ของระยะเวลาการดำเนินงาน เป็นเวลาที่ไม่ได้เกิดมูลค่าเพิ่ม โดยเมื่อแยกระยะเวลาการดำเนินงานทั้งหมดออกระยะเวลาของกระบวนการย่อยแล้ว พบว่ากระบวนการไหลตสินค้า เป็นกระบวนการที่มีระยะเวลานานและเมื่อเทียบกับกระบวนการอื่น ๆ แล้ว กระบวนการดังกล่าวมีระยะเวลาที่สูญเปล่าในอัตราส่วนที่สูงมาก ซึ่งจะระยะเวลายาวนานนี้ นำไปสู่ปัญหาทั้งด้านประสิทธิภาพในการทำงาน ต้นทุนด้านเวลา ค่าใช้จ่ายด้านคลังสินค้า การขนส่ง และโลจิสติกส์โดยรวม หากผู้ประกอบการหรือผู้ผลิตสามารถที่จะลดความสูญเปล่าข้างต้นได้ ก็จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพและกำไรของธุรกิจที่จะเพิ่มขึ้นต้นไปด้วยเช่นกัน

จากงานวิจัยที่ผ่านมา ได้มีการศึกษาและการวิเคราะห์ความสูญเปล่าที่เกิดขึ้นในกระบวนการโดยการใช้ระบบการผลิตแบบลีนและแผนภาพสายธารคุณค่า ทำให้เห็นลำดับขั้นตอนการไหลของกระบวนการได้ชัดเจนมากยิ่งขึ้น และง่ายต่อการวิเคราะห์ความสูญเปล่า (5) ประกอบกับการนำทฤษฎีแถวคอยเข้ามาใช้ใน

การศึกษาเพื่อแก้ปัญหาความแออัดและลดปัญหาการรอคอยที่มีระยะเวลานาน ประกอบกับการวิเคราะห์ข้อมูลสถิติ การแจกแจงของข้อมูล รวมถึงองค์ประกอบของแถวคอย ไม่ว่าจะเป็น ลักษณะการเข้ามาของผู้ใช้บริการ จำนวนหน่วยการให้บริการ และระยะเวลาในการให้บริการ เพื่อที่จะนำข้อมูลเหล่านี้ไปใช้ในการหาแนวทางการลดระยะเวลาของการดำเนินงาน (6) นอกจากนี้เครื่องมือที่จะเข้ามาช่วยทำให้สามารถเห็นถึงผลลัพธ์ของการทำงานและแนวทางในการลดระยะเวลาได้ดียิ่งขึ้นอีกตัว คือ แบบจำลองสถานการณ์ โดยขั้นตอนของการสร้างแบบจำลอง จะเริ่มตั้งแต่การศึกษาขั้นตอนการทำงานในแต่ละกระบวนการ ไม่ว่าจะเป็น ระยะเวลาในการทำงานของแต่ละกระบวนการ ทรัพยากรที่ใช้ ตลอดจนการนำข้อมูลที่ได้ไปสร้างและพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์ของทั้งแบบจำลองต้นแบบและแบบจำลองเพื่อการปรับปรุงกระบวนการ (7) ควบคู่ไปกับบทวนเอกสารหรือทฤษฎีต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องโดยผลลัพธ์ของการศึกษา พบว่า การจัดให้มีอุปกรณ์ที่ทันสมัยและเหมาะสมเพื่ออำนวยความสะดวกในการขนถ่ายและการไหลของสินค้า การย้ายงานที่ไม่จำเป็นต้องทำในเวลาเร่งด่วนไปทำภายหลังในช่วงเวลาที่มีปริมาณผู้เข้ารับบริการต่ำ (8) การออกแบบพื้นที่ดำเนินงานอย่างถูกต้อง และมีระบบติดตามสถานะของสินค้าที่อยู่บริเวณสถานที่จัดเก็บ และการขยายพื้นที่ทางกายภาพเพื่อลดความแออัด (9) จะเป็นแนวทางที่จะช่วยลดระยะเวลาและเพิ่มประสิทธิภาพของกระบวนการทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

จากที่กล่าวมาข้างต้น งานวิจัยนี้จึงจะมุ่งเน้นศึกษากระบวนการทำงานและระยะเวลาในการเข้ามารับสินค้าในปัจจุบันของโรงงานไม้ปาร์ติเกิลบอร์ด และค้นหาจุดคอขวดหรือกระบวนการทำงานที่ก่อให้เกิดเวลาในการรอคอยในระบบ ตลอดจนนำเสนอแนวทางในการปรับปรุงกระบวนการทำงานที่จะลดระยะเวลารวมในการเข้ามารับสินค้าของผู้ขนส่ง ผ่านเกณฑ์การชี้วัดประสิทธิภาพของการปรับปรุง 2 เกณฑ์ คือ ระยะเวลา

รวมเฉลี่ยของการเข้ามารับสินค้าและระยะเวลารอคอยเฉลี่ยเพื่อโหลดสินค้าของรถบรรทุก

วิธีดำเนินการวิจัย

แบบแผนของการวิจัย

จากวัตถุประสงค์ของการศึกษาที่มุ่งเน้นการค้นหาค่าเหตุและปรับปรุงระยะเวลารวมเฉลี่ยของการเข้ามารับสินค้าและระยะเวลารอคอยเฉลี่ยเพื่อโหลดสินค้าของรถบรรทุก โดยการศึกษาแบบและการดำเนินงานธุรกิจ ผ่านข้อมูล 2 ส่วน ได้แก่ ส่วนที่ 1 การศึกษารูปแบบการดำเนินงานและกระบวนการการโหลดสินค้าผ่านการสังเกตและการสัมภาษณ์ผู้เชี่ยวชาญจำนวน 3 ท่าน พนักงาน เจ้าหน้าที่ประจำหน่วยงาน จำนวน 4 ท่าน และผู้มีส่วนเกี่ยวข้อง เช่น ผู้ให้บริการขนส่ง จำนวน 2 บริษัท และส่วนที่ 2 การวิเคราะห์ข้อมูลกระบวนการโหลดสินค้าจากรายงานสรุปการปฏิบัติงานของหน่วยงานที่เกี่ยวข้องเพื่อนำข้อมูลมาใช้ในการวิเคราะห์และค้นหาค่าเหตุจุดคอขวด ที่ส่งผลต่อระยะเวลาการเข้ามารับสินค้าและระยะเวลารอคอยเฉลี่ยเพื่อโหลดสินค้าที่นานในปัจจุบันนำไปสู่การนำเสนอและออกแบบแนวทางในการลดระยะเวลาดังกล่าว

โดยจากข้อมูลที่ได้ทั้ง 2 ส่วนนั้น ได้นำมาใช้ในการคัดเลือกคลังสินค้าและประเภทของรถบรรทุกที่เข้ามาโหลดสินค้าภายในโรงงานการศึกษา โดยเลือกจากคลังสินค้าและประเภทรถบรรทุกที่มีปริมาณการใช้งานและมีจำนวนครั้งของการเกิดปัญหาในการโหลดสินค้าสูงที่สุด เป็นตัวแทนของการศึกษาในครั้งนี้ ซึ่งจากการวิเคราะห์ พบว่า คลังสินค้า D เป็นคลังสินค้าที่มีปริมาณรถบรรทุกเข้ามาโหลดสินค้ามากที่สุด อีกทั้งเมื่อวิเคราะห์ข้อมูลด้านระยะเวลาตั้งแต่พนักงานขับรถบรรทุกทำการลงคิวเพื่อเข้าโหลดสินค้า จนกระทั่งโหลดสินค้าเสร็จสิ้นและเคลื่อนออกจากคลังสินค้านี้ดังกล่าวไป พบว่า มี

รถบรรทุกที่ใช้ระยะเวลาเกินกว่า 1 ชั่วโมง ถึงร้อยละ 55 และประเภทรถที่มีเข้ามาโหลดสินค้ามากที่สุด นั่นคือรถบรรทุกประเภทพ่นเรียบ และรถบรรทุกประเภทตู้คอนเทนเนอร์ ทั้งนี้ข้อมูลดังกล่าวยังได้มีการนำมาใช้วิเคราะห์การดำเนินงานในกระบวนการโหลดสินค้าของโรงงานการศึกษาในปัจจุบันภายใต้แผนภาพสายธารคุณค่าสถานะปัจจุบัน

วิเคราะห์แผนภาพสายธารคุณค่าสถานะปัจจุบัน และแนวทางสำหรับลดระยะเวลาดำเนินการประยุกต์ใช้

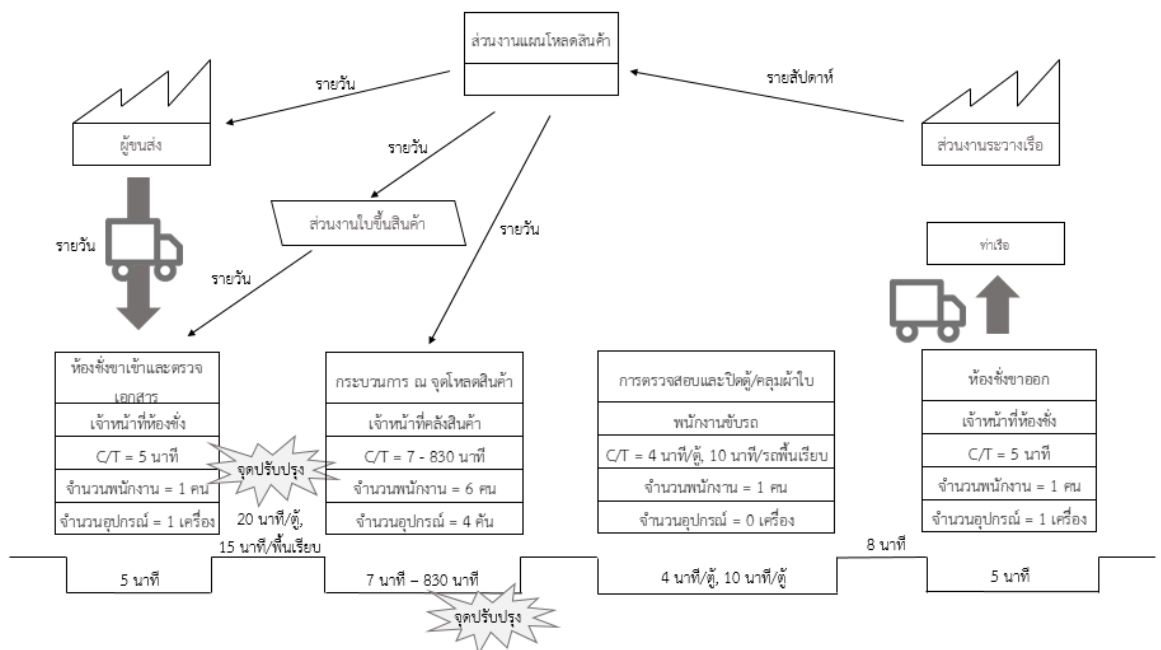
การนำข้อมูลที่ได้จากการศึกษารูปแบบการดำเนินงานที่เกี่ยวข้องกับการโหลดสินค้าของโรงงานการศึกษาจากการสัมภาษณ์และข้อมูลจากรายงานสรุปการปฏิบัติงาน เข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์ค้นหาจุดที่เป็นคอขวดของกระบวนการโดยผ่านการประยุกต์ใช้เครื่องมือสายธารคุณค่า (Value Stream Mapping: VSM) โดยสามารถแสดงแผนภาพสายธารคุณค่าสถานะปัจจุบันได้ ดังรูปที่ 1

จากการวิเคราะห์แผนภาพสายธารคุณค่าสถานะปัจจุบันของกระบวนการโหลดสินค้าโรงงานการศึกษา พบว่า จุดที่เป็นคอขวดของกระบวนการโหลดสินค้าและควรจะมีการพัฒนาปรับปรุงอยู่ด้วยกัน 2 จุด คือ จุดที่ 1 ระยะเวลาของการรอคอยเพื่อโหลดสินค้า ณ จุดโหลดสินค้า และ จุดที่ 2 ระยะเวลาการโหลดสินค้า เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวมีระยะเวลาของการดำเนินงานและการรอคอยที่สูงกว่ากระบวนการอื่น ๆ โดยจากการวิเคราะห์การเกิดปัญหาที่เกิดขึ้นทั้ง 2 จุด พบว่า สาเหตุของปัญหาเป็นผลมาจาก 3 สาเหตุหลัก คือ 1) ปัญหาในการรื้อไม้และการขนย้ายไม้ระหว่างการโหลดสินค้า 2) ปัญหาของการไม่พร้อมของสินค้าในระหว่างการโหลดสินค้า และ 3) ข้อจำกัดด้านอุปกรณ์และชุดโหลดสินค้า ซึ่งจากสาเหตุของปัญหาข้างต้น และการทบทวนงานวิจัย ตลอดจนการนำเครื่องมือและเทคนิคในเรื่องของการลดความสูญเปล่าตามแนวคิดลีน (10) เข้ามาประยุกต์ใช้ในการออกแบบแนวทางการลดระยะเวลา

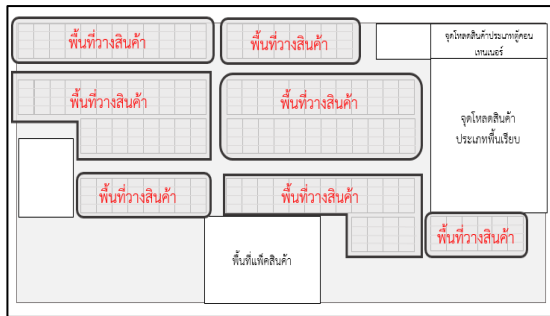
ผู้วิจัยจึงได้นำเสนอแนวทางในการปรับปรุงระยะเวลาของกระบวนการไหลสินค้า โดยแบ่งเป็น 4 แนวทาง ดังนี้

แนวทางที่ 1 การลดการรื้อไม้และการขนย้ายไม้ระหว่างการไหลสินค้า โดยหลักการของแนวทางนี้คือ ปรับเปลี่ยนการวางผังและการไหลของสินค้า (Warehouse Layout and Flow) ภายในคลังสินค้า D เพื่อลดปัญหาการรื้อไม้ ซึ่งเป็นปัญหาที่เกิดขึ้นในระหว่างกระบวนการไหลสินค้าสูงที่สุด คือ ร้อยละ 39 ของปัญหาที่เกิดขึ้นทั้งหมด โดยจากเดิมที่มีระบบการจัดเก็บภายในคลังสินค้าอย่างไร้รูปแบบ เป็นการจัดเก็บสินค้าที่ไม่มีการบันทึกหรือกำหนดตำแหน่งของการจัดวางสินค้าแต่ละชนิด โดยสินค้าแต่ละชนิดจะสามารถจัดวางที่ตำแหน่งใดก็ได้ในคลังสินค้าที่มีพื้นที่ว่าง รวมถึงใน

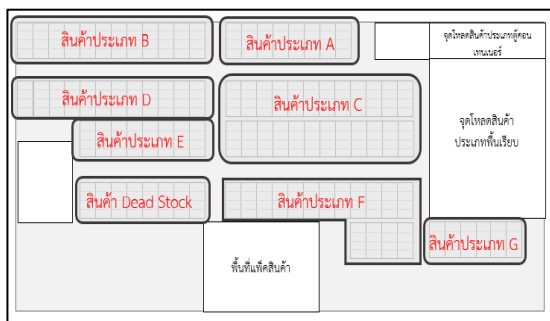
พื้นที่ดังกล่าวยังมีการวางสินค้าที่ไม่เคลื่อนไหว (Dead Stock) รวมอยู่กับสินค้าประเภทอื่นด้วย ดังรูปที่ 2 ส่งผลให้ยากต่อการหาสินค้า และการขนย้ายสินค้าออกจากพื้นที่การจัดเก็บ ตลอดจนมีการขนย้ายสินค้าซ้ำซ้อนทางผู้วิจัยจึงเสนอแนวคิดในการวางผังการจัดวางสินค้าและรูปแบบการไหลของสินค้าภายในคลังสินค้าในรูปแบบของระบบการจัดเก็บสินค้าตามประเภทของสินค้า โดยกำหนดให้มีการจัดวางสินค้าตามประเภทหรือลักษณะของสินค้า กล่าวคือ จะมีการวางสินค้าตามประเภทของสินค้า ไม่ว่าจะเป็นความหนาและขนาดของผลิตภัณฑ์ พร้อมทั้งกำหนดให้มีการระบุโซนที่ชัดเจนของแผนผังการวาง (Layout) ดังรูปที่ 3



รูปที่ 1 แผนภาพสายธารคุณค่าสถานะปัจจุบันกระบวนการไหลสินค้าโรงงานกรณีศึกษา



รูปที่ 2 แผนผังการวางสินค้าภายในคลังสินค้า D ในปัจจุบัน



รูปที่ 3 แผนผังการวางสินค้าภายในคลังสินค้า D ตามประเภทหรือลักษณะของสินค้า

นอกจากนี้การออกแบบผังการวางสินค้าภายในคลังสินค้าในรูปแบบของระบบการจัดเก็บสินค้าตามประเภทของสินค้านั้น จะสามารถลดปัญหาของการขนย้ายไม่ระหว่างคลังสินค้าได้อีกประการหนึ่ง เนื่องด้วยการจัดเก็บสินค้าที่เป็นหมวดหมู่ และทราบโซนหรือพื้นที่การวางสินค้าแต่ละหมวดหมู่ที่ชัดเจน จะทำให้พนักงานขนย้ายสินค้าสามารถที่จะนำสินค้าไปยังพื้นที่ดังกล่าวตั้งแต่ต้น ลดปัญหาของสินค้าในหมวดหมู่เดียวกันแต่ถูกจัดเก็บอยู่ในต่างพื้นที่หรือต่างคลังสินค้า

แนวทางที่ 2 การลดระยะเวลารอคอยในระหว่างการโหลดสินค้าจากการรอสินค้าในการผลิต และการบรรจุสินค้า โดยหลักการของแนวคิดนี้ คือ การตรวจสอบความพร้อมของสินค้าก่อนการแจ้งรถบรรทุกให้เข้ามาโหลดสินค้าภายในโรงงาน เนื่องจากในปัจจุบันการแจ้งยืนยันการเข้ามาโหลดสินค้าไปยังผู้ให้บริการขนส่ง ไม่ได้มีการตรวจสอบความพร้อมของสินค้าที่จะทำการโหลด ส่งผลทำให้เกิดกรณีของการเข้ามาเพื่อโหลด

สินค้าของรถบรรทุกแต่สินค้ายังอยู่ในกระบวนการผลิตหรือยังอยู่ในกระบวนการบรรจุ ส่งผลให้พนักงานขับรถจะต้องรอนกว่าสินค้านี้จะทำการผลิตหรือการบรรจุจนเสร็จสิ้น จึงสามารถทำการโหลดสินค้าได้ แนวทางนี้จึงได้มีการออกแบบกระบวนการในรูปแบบของการประสานงานระหว่างเจ้าหน้าที่จัดทำแผนโหลดสินค้ากับเจ้าหน้าที่วางแผนการผลิต ผ่านระบบที่ใช้ในปัจจุบัน และการแจ้งตรวจสอบและยืนยันผ่านทางโทรศัพท์อีกครั้งสำหรับสินค้าที่จะทำการโหลดเร่งด่วน เนื่องจากเจ้าหน้าที่วางแผนการผลิตจะทราบข้อมูลสถานะของรายการสินค้าทุกรายการ ซึ่งจะสามารถยืนยันสถานะของสินค้าที่จะทำการโหลดได้ก่อนที่จะแจ้งยืนยันการเข้ามาโหลดสินค้า

แนวทางที่ 3 การลดการรื้อไม้และการขนย้ายไม้ระหว่างการโหลดสินค้า ร่วมกับการลดระยะเวลารอคอยในระหว่างการโหลดสินค้าจากการรอสินค้าในการผลิต และการบรรจุสินค้า โดยหลักการของแนวทางนี้ คือ การนำหลักการของแนวทางที่ 1 และแนวทางที่ 2 ซึ่งได้แก่ การลดการรื้อไม้และการขนย้ายไม้ระหว่างการโหลดสินค้า และการลดระยะเวลารอคอยในระหว่างการโหลดสินค้าจากการรอสินค้าในการผลิต และการบรรจุสินค้ามาเป็นแนวทางในการปรับปรุงระยะเวลาควบคู่กัน

แนวทางที่ 4 การเพิ่มชุดโหลดในกระบวนการโหลดสินค้า โดยหลักการของแนวทางนี้ คือ การเพิ่มจำนวนชุดโหลดในกระบวนการโหลดสินค้า ซึ่งจะช่วยให้ทรัพยากรที่ใช้ในกระบวนการโหลดสินค้าเพิ่มขึ้น กล่าวคือ ณ ปัจจุบันคลังสินค้า D มีชุดโหลดประจำคลังสินค้า 2 ชุด โดยแบ่งเป็นชุดโหลดสำหรับรถพื้นเรียบ 1 ชุด และ ชุดโหลดสำหรับรถคอนเทนเนอร์ 1 ชุด ในแต่ละชุดโหลดจะประกอบไปด้วย รถโฟล์คลิฟท์ จำนวน 2 คัน ที่ใช้สำหรับการขนย้ายสินค้าจากบริเวณที่จัดเก็บมายังจุดโหลดสินค้าจำนวน 1 คัน และสำหรับการยกสินค้าบรรจุเข้าตู้ หรือวางบนทางรถพื้นเรียบ จำนวน 1 คัน พนักงานโหลดสินค้าอีก 2 คนต่อชุดโหลด และ

ชานชาลาสำหรับขนถ่ายสินค้าจำนวน 1 ชานชาลา แต่อย่างไรก็ตามด้วยโครงสร้างของคลังสินค้าที่ได้ออกแบบให้มีชานชาลาสำหรับโหลดสินค้าสำหรับรถพื้นเรียบจำนวน 4 ชานชาลาและสำหรับรถคอนเทนเนอร์ จำนวน 2 ชานชาลา ทางผู้วิจัยจึงได้มีการออกแบบแนวทางดังกล่าวนี้ให้มีการเพิ่มทรัพยากรสำหรับการโหลดสินค้าเพียงแคในส่วนของรถโฟล์คลิฟท์จากเดิมจำนวน 2 คัน เป็น 4 คัน และพนักงานสำหรับขับรถโฟล์คลิฟท์จากเดิมจำนวน 2 คน เป็น 4 คน สำหรับการโหลดสินค้าในแต่ละประเภท

การจำลองสถานการณ์มาช่วยในการวิเคราะห์แนวทางที่เหมาะสม สำหรับลดระยะเวลา และแผนภาพสายธารคุณค่าสถานะอนาคต

ในส่วนที่ 1 จากการศึกษาทำให้เข้าใจกระบวนการการโหลดสินค้าของโรงงานกรณีศึกษาและสามารถวิเคราะห์หาจุดคอขวดของกระบวนการตลอดจนการออกแบบแนวทางในการลดระยะเวลาทั้ง 4 แนวทาง ขั้นตอนต่อมาคือการสร้างและพัฒนาแบบจำลองสถานการณ์ของสถานะปัจจุบัน ผ่านโปรแกรม Arena เวอร์ชัน 15.1 เพื่อเป็นตัวแทนของสถานการณ์การดำเนินงานในปัจจุบันของโรงงานกรณีศึกษา พร้อมทั้งเพื่อใช้หาผลลัพธ์ของการดำเนินงานตามแต่ละแนวทางที่ได้เสนอมาข้างต้น โดยใช้ข้อมูลสถิติการเข้ามาโหลดสินค้าภายในโรงงานกรณีศึกษา ซึ่งเป็นข้อมูลจากรายงานสรุปการปฏิบัติงาน ระหว่างเดือนสิงหาคม พ.ศ. 2561 ถึง เดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2562 โดยมีสมมติฐานในการสร้างแบบจำลองสถานการณ์ คือ

1. รถบรรทุกที่เข้ามารับสินค้าจะเริ่มเข้ามาตั้งแต่เวลา 08.00 น. ถึง 21.00 น.

2. พนักงานในกระบวนการโหลดสินค้าจะเริ่มดำเนินงานตั้งแต่เวลา 08.00 น. ถึง 17.00 น. โดยมีเวลาพักกลางวันของพนักงานเวลา 12.00 น. ถึง 13.00 น. เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แต่หลังจาก 17.00 น. หากยังคงมีรถบรรทุกที่ลงคิวไว้แต่ยังโหลดสินค้าไม่แล้วเสร็จ หรือมี

รถบรรทุกที่อนุญาตให้เข้ามารับสินค้าหลังเวลา 17.00 น. พนักงานจะต้องโหลดสินค้า ต่อจนกว่าจำนวนรถในระบบจะโหลดจนเสร็จสิ้น

ดังนั้นการกำหนดความยาวในการประมวลผล (Replication Length) จะเท่ากับ 7 ชั่วโมง หรือจนกว่ารถบรรทุกจะออกจากระบบทั้งหมด ซึ่งเท่ากับจำนวนชั่วโมงและรูปแบบการดำเนินงานของระบบจริง ทั้งนี้เพื่อให้ค่าที่ได้จากแบบจำลองสถานการณ์มีความคลาดเคลื่อนอยู่ในค่าที่ยอมรับได้ ผู้วิจัยจึงได้มีการกำหนดจำนวนรอบการทำงานซ้ำ (Number of Replication) เท่ากับ 1,050 รอบ

ส่วนที่ 2 เป็นการวิเคราะห์ผลและเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างแบบจำลองสถานะปัจจุบันและแบบจำลองสถานการณ์การปรับปรุงระยะเวลา ว่าแตกต่างกันหรือไม่ โดยพิจารณาจากระยะเวลารวมเฉลี่ยของการเข้ามารับสินค้าและระยะเวลารอคอยเฉลี่ยเพื่อโหลดสินค้าของรถบรรทุก เป็นเกณฑ์การวัดประสิทธิภาพผ่านการใช้โปรแกรม *Output Analyzer* สำหรับการทดสอบค่าเฉลี่ยระหว่างแบบจำลองภายใต้เงื่อนไขต่าง ๆ ด้วยวิธี *pair t-test* ว่าค่าเฉลี่ยของชีวิตประสิทธิภาพที่ได้จากแบบจำลองสถานการณ์แต่ละคู่ แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% หรือไม่ จากนั้นนำแนวทางที่ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด มาจัดทำแผนภาพสายธารคุณค่าสถานะอนาคต เพื่อเป็นตัวแทนของการดำเนินงานภายใต้สถานการณ์การปรับปรุงระยะเวลาที่ดีที่สุด และเพื่อให้เข้าใจและเห็นภาพของรูปแบบกระบวนการทำงานได้อย่างชัดเจนมากยิ่งขึ้น

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

การทดสอบความถูกต้องแบบจำลองสถานการณ์ของสถานะปัจจุบัน

เมื่อใช้โปรแกรมจำลองสถานการณ์ Arena เวอร์ชัน 15.1 ในการสร้างแบบจำลองสถานการณ์สถานะปัจจุบันของกระบวนการโหลดสินค้าของโรงงาน

กรณีศึกษา ผ่านจำนวนรอบการทำซ้ำ เท่ากับ 1,050 รอบ หลังจากการประมวลผลของแบบจำลองสถานการณ์ดังกล่าว ทางผู้วิจัยจึงได้ทำการตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลองสถานะปัจจุบัน โดยวิธีการตรวจสอบความถูกต้องที่ผู้วิจัยเลือก คือ การเปรียบเทียบผลลัพธ์จากแบบจำลองสถานการณ์กับผลลัพธ์จากระบบจริงโดยทำการเปรียบเทียบช่วงความเชื่อมั่น (Confidence Interval) ที่ 95% ของค่าเฉลี่ยของระยะเวลาการไหลตสินค้าประเภทรถพื้นเรียบและค่าเฉลี่ยของระยะเวลาการไหลตสินค้าประเภทรถตู้คอนเทนเนอร์ (ตารางที่ 1)

จากตารางที่ 1 ทำให้เห็นได้ว่าช่วงความเชื่อมั่นที่ 95 % ของระยะเวลาการไหลตสินค้าประเภทรถพื้นเรียบ และระยะเวลาการไหลตสินค้าประเภทรถตู้คอนเทนเนอร์ ในแบบจำลองสถานการณ์สถานะปัจจุบันตกอยู่ในช่วงเดียวกับระบบจริง ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าแบบจำลองสถานการณ์สถานะปัจจุบันสามารถเป็นตัวแทนระบบจริงของกระบวนการเข้ามารับสินค้าภายในโรงงานกรณีศึกษาได้

ตารางที่ 1 การเปรียบเทียบช่วงความเชื่อมั่นที่ 95% ระหว่างระบบจริงและแบบจำลองสถานการณ์สถานะปัจจุบัน

ประเภทระยะเวลา	สถานการณ์	ค่าเฉลี่ย	Confidence Interval 95%		
			ค่า Half width	Lower bound	Upper bound
ระยะเวลาการไหลต	ระบบจริง	23.934	0.926	23.008	24.860
สินค้าประเภทรถพื้นเรียบ	แบบจำลองสถานะปัจจุบัน	23.900	0.603	23.297	24.503
ระยะเวลาการไหลต	ระบบจริง	44.251	1.992	42.259	46.243
สินค้าประเภทรถตู้คอนเทนเนอร์	แบบจำลองสถานะปัจจุบัน	43.000	1.220	41.780	44.220

ผลลัพธ์จากการทดสอบแนวคิดการปรับปรุงระยะเวลาด้วยแบบจำลองสถานการณ์

จากการสร้างแบบจำลองสถานการณ์การปรับปรุงระยะเวลาตามแนวทางการลดระยะเวลา ทั้ง 4 แนวทาง สามารถสรุปผลลัพธ์การเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างแบบจำลองสถานะปัจจุบันและแบบจำลองสถานการณ์การปรับปรุงระยะเวลาในแต่ละแนวทาง ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (ตารางที่ 3) ดังนี้

แนวทางที่ 1 คือ การลดการรื้อไม้และการขนย้ายไม้ระหว่างการไหลตสินค้า โดยจากข้อมูลจริงที่ผู้วิจัยได้ทำการบันทึกระยะเวลาของกระบวนการไหลตสินค้ากรณีที่เกิดปัญหาและกรณีที่ไม่เกิดปัญหาดังกล่าว เป็นเวลา 10 วัน คือ ระหว่างวันที่ 25 ธันวาคม พ.ศ. 2562 ถึง 3 มกราคม พ.ศ. 2563 แนวทางดังกล่าวสามารถลด

ระยะเวลาเฉลี่ยของการไหลตสินค้าลงได้ร้อยละ 46 ผู้วิจัยจึงกำหนดให้ระยะเวลาของกระบวนการรื้อไม้และระยะเวลาของการกระบวนการขนย้ายในแบบจำลองสถานการณ์เป็นร้อยละ 54 ของระยะเวลาการไหลตสินค้ากรณีการรื้อไม้และรอการขนย้ายไม้ระหว่างการไหลตสินค้าในปัจจุบัน

จากการเปรียบเทียบผลลัพธ์ ระหว่างแบบจำลองสถานะปัจจุบันและแบบจำลองสถานการณ์การปรับปรุงระยะเวลาตามแนวทางดังกล่าว สามารถลดระยะเวลารอคอยเฉลี่ยเพื่อไหลตสินค้าประเภทรถตู้คอนเทนเนอร์ลง ร้อยละ 14 และระยะเวลารอคอยเฉลี่ยเพื่อไหลตสินค้าประเภทรถพื้นเรียบลงร้อยละ 10 แต่ไม่สามารถลดระยะเวลารวมเฉลี่ยของการเข้ามารับสินค้าโดยแนวทางที่ได้กล่าวมาข้างต้น จะใช้ระยะเวลาในการ

ปรับเปลี่ยนรูปแบบการวางสินค้า 1 เดือน และมีต้นทุนที่เกิดขึ้นในครั้งแรกของการดำเนินการปรับเปลี่ยนเป็นจำนวนเงิน 66,650 บาท ซึ่งเป็นต้นทุนที่เกิดจากการเช่ารถโฟล์คลิฟท์ และค่าเชื้อเพลิงที่ใช้ในการเคลื่อนย้ายสินค้า จำนวน 1 คัน คิดเป็นเงิน 37,500 บาท และต้นทุนการจ้างพนักงาน จำนวน 3 คน คิดเป็นเงิน 29,250 บาท

แนวทางที่ 2 คือ การลดระยะเวลาการรอคอยในระหว่างการผลิตสินค้า จากการรอสินค้าในการผลิตและการบรรจุสินค้า โดยจากผลการทดลองตรวจสอบความพร้อมของสินค้าก่อนแจ้งยืนยันผู้ขนส่ง เป็นเวลา 1 เดือนระหว่างเดือนตุลาคม ถึง เดือนพฤศจิกายน พ.ศ. 2562 แนวทางดังกล่าวสามารถลดระยะเวลาของการเข้ามารับสินค้าภายในโรงงานกรณีศึกษา กรณีรอผลิตสินค้าหรือแพ็คสินค้าระหว่างการไหลสินค้าลงได้จากปัจจุบันร้อยละ 10 โดยผลลัพธ์จากการเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างแบบจำลองสถานะปัจจุบัน และแบบจำลองสถานการณ์การปรับปรุงระยะเวลาตามแนวทางดังกล่าวสามารถลดระยะเวลาการรอคอยเฉลี่ยเพื่อไหลสินค้าประเภทรถตู้คอนเทนเนอร์ลงได้ ร้อยละ 9 แต่ไม่สามารถลดระยะเวลาการรวมเฉลี่ยของการเข้ามารับสินค้า และลดระยะเวลาการรอคอยเฉลี่ยเพื่อไหลสินค้าประเภทรถพื่นเรียบลงได้

แนวทางที่ 3 คือ การลดการรื้อไม้และการขนย้ายไม้ระหว่างการไหลสินค้า ร่วมกับการลดระยะเวลาการรอคอยในระหว่างการผลิตสินค้าจากการรอสินค้าในการผลิต และการบรรจุสินค้า โดยจากการเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างแบบจำลองสถานะปัจจุบันและแบบจำลองสถานการณ์การปรับปรุงระยะเวลาตามแนวทางดังกล่าวสามารถลดระยะเวลาการรอคอยเฉลี่ยเพื่อไหลสินค้าประเภทรถตู้คอนเทนเนอร์ลงได้ ร้อยละ 26 และสามารถลดระยะเวลาการรอคอยเฉลี่ยเพื่อไหลสินค้าประเภทรถพื่นเรียบลง ร้อยละ 13 แต่ไม่สามารถลดระยะเวลาการรวมเฉลี่ยของการเข้ามารับสินค้าได้ โดยแนวทางนี้ จะมีต้นทุนที่เกิดขึ้นในครั้งแรกของการดำเนินการ เป็นจำนวนเงิน

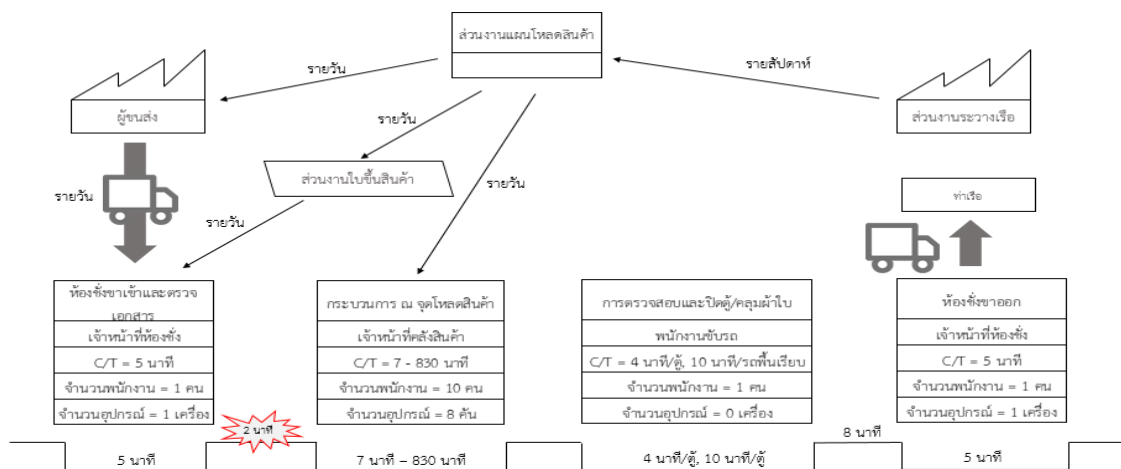
66,650 บาท ซึ่งเป็นต้นทุนที่เกิดจากการปรับเปลี่ยนพื้นที่และรูปแบบการวางสินค้าเช่นเดียวกับในแนวทางที่ 1

แนวทางที่ 4 คือ การเพิ่มชุดไหลในกระบวนการไหลสินค้า โดยการเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างแบบจำลองสถานะปัจจุบันและแบบจำลองสถานการณ์การปรับปรุงระยะเวลาตามแนวทางดังกล่าวสามารถลดระยะเวลาการรวมเฉลี่ยของการเข้ามารับสินค้าลง ร้อยละ 3 ระยะเวลาการรอคอยเฉลี่ยเพื่อไหลสินค้าประเภทรถตู้คอนเทนเนอร์ลง ร้อยละ 94 และระยะเวลาการรอคอยเฉลี่ยเพื่อไหลสินค้าประเภทรถพื่นเรียบลง ร้อยละ 92 แต่อย่างไรก็ตามสำหรับการเพิ่มจำนวนรถโฟล์คลิฟท์ และเจ้าหน้าที่ ณ จุดไหลสินค้า จะมีต้นทุนที่เกิดขึ้น เป็นจำนวนเงิน 136,000 บาทต่อเดือน ซึ่งเป็นต้นทุนที่เกิดจากการเช่ารถโฟล์คลิฟท์เพิ่มจำนวน 4 คัน คิดเป็นเงิน 100,000 บาทต่อเดือน และต้นทุนการจ้างพนักงาน เพิ่มจำนวน 4 คน คิดเป็นเงิน 36,000 บาทต่อเดือน

สำหรับผลทดสอบทางสถิติด้วย วิธี paired t-test ด้วยโปรแกรม Output Analyzer สำหรับการทดสอบค่าเฉลี่ยของระยะเวลาการรวม และระยะเวลาการรอคอยระหว่างแบบจำลองสถานะปัจจุบันและแบบจำลองการปรับปรุงระยะเวลาในแต่ละแนวทาง สามารถแบ่งผลการทดสอบได้เป็น 3 ประเภท ดังนี้ 1) แนวทางที่มีผลทดสอบระยะเวลาการรวมเฉลี่ยของรถบรรทุกที่เข้ามารับสินค้า ระยะเวลาการรอคอยเพื่อไหลสินค้าประเภทรถพื่นเรียบ และระยะเวลาการรอคอยเพื่อไหลสินค้าประเภทรถตู้คอนเทนเนอร์ แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จำนวน 1 แนวทาง คือ แนวทางการเพิ่มชุดไหลในกระบวนการไหลสินค้า 2) แนวทางที่มีผลทดสอบในส่วนองระยะเวลาการรอคอยเพื่อไหลสินค้าประเภทรถพื่นเรียบ และระยะเวลาการรอคอยเพื่อไหลสินค้าประเภทรถตู้คอนเทนเนอร์ แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จำนวน 2 แนวทาง คือ แนวทางการลดการรื้อไม้และการขนย้ายไม้ระหว่างการไหลสินค้า และแนวทางการลดการรื้อไม้และการขนย้ายไม้ระหว่างการไหลสินค้า ร่วมกับการลดระยะเวลาการรอคอยในระหว่างการผลิตสินค้าจากการรอ

สินค้าในการผลิต และการบรรจุสินค้า 3) แนวทางที่มีผลทดสอบในส่วนของระยะเวลาการรอคอยเพื่อโหลดสินค้าประเภทตู้คอนเทนเนอร์ แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จำนวน 1 แนวทาง คือ แนวทางการลดระยะเวลารอคอยในระหว่างการโหลดสินค้าจากการรอสินค้าในการผลิต และการบรรจุสินค้า จึงสรุปได้ว่ามีเพียงแนวทางการเพิ่มชุดโหลดในกระบวนการโหลดสินค้าเท่านั้น ที่มีผลลัพธ์ของเกณฑ์ชี้วัดประสิทธิภาพของการปรับปรุงทั้ง 2 เกณฑ์ ในแบบจำลองการปรับปรุงระยะเวลาลดลงจากระบบปัจจุบัน ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

ดังนั้นจากผลการเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างแบบจำลองสถานะปัจจุบันและแบบจำลองสถานการณ์การปรับปรุงระยะเวลาทั้ง 4 แนวทาง และผลการตรวจสอบทางสถิติที่ได้กล่าวมาข้างต้น จึงสรุปได้ว่า แนวทางการเพิ่มชุดโหลดในกระบวนการโหลดสินค้า เป็นแนวทางที่ดีที่สุด คือสามารถที่จะลดระยะเวลารวมเฉลี่ยของการเข้ามารับสินค้าและระยะเวลารอคอยเฉลี่ยเพื่อโหลดสินค้าของรถบรรทุกลงได้จากระบบปัจจุบัน นำไปสู่การสร้างแผนภาพสายธารคุณค่าสถานะอนาคตภายใต้เงื่อนไขของแนวทางดังกล่าว แสดงได้ดังรูปที่ 4



รูปที่ 4 แผนภาพสายธารคุณค่าสถานะอนาคตกระบวนการโหลดสินค้าโรงงานกรณีศึกษา

ตารางที่ 2 สรุปผลลัพธ์การเปรียบเทียบผลลัพธ์ระหว่างแบบจำลองสถานะปัจจุบันและแบบจำลองสถานการณ์การปรับปรุงระยะเวลาแต่ละแนวทางที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

แนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพ	เกณฑ์ชี้วัด	ระยะเวลาเฉลี่ยของแบบจำลองสถานการณ์สถานะปัจจุบัน (นาที)	ระยะเวลาเฉลี่ยของแบบจำลองสถานการณ์การเพิ่มประสิทธิภาพ (นาที)	ผลทดสอบความแตกต่างที่ระดับนัยสำคัญ 0.05
แนวทางที่ 1 การลดการรื้อไม้และการขนย้ายไม้ระหว่างการโหลดสินค้า	ระยะเวลารวมของการเข้ามารับสินค้า	139.00 ± 2.6464	138.89 ± 2.6735	ไม่แตกต่าง
	ระยะเวลารอคอย ณ จุดโหลดประเภทพื้นเรียบ	14.862 ± 1.2630	13.319 ± 1.1451	ลดลง 10%
	ระยะเวลารอคอย ณ จุดโหลดประเภทตู้คอนเทนเนอร์	21.682 ± 1.9660	18.205 ± 1.7053	ลดลง 14%
แนวทางที่ 2 การลดระยะเวลารอคอยในระหว่างการโหลดสินค้าจากการรอสินค้าในการผลิต และการบรรจุสินค้า	ระยะเวลารวมของการเข้ามารับสินค้า	139.00 ± 2.6464	139.26 ± 2.7840	ไม่แตกต่าง
	ระยะเวลารอคอย ณ จุดโหลดประเภทพื้นเรียบ	14.862 ± 1.2630	14.494 ± 1.1974	ไม่แตกต่าง
	ระยะเวลารอคอย ณ จุดโหลดประเภทตู้คอนเทนเนอร์	21.682 ± 1.9660	19.599 ± 1.9443	ลดลง 9%

แนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพ	เกณฑ์ชี้วัด	ระยะเวลาเฉลี่ยของ แบบจำลองสถานการณ์ สถานะปัจจุบัน (นาที)	ระยะเวลาเฉลี่ยของ แบบจำลองสถานการณ์การ เพิ่มประสิทธิภาพ (นาที)	ผลทดสอบความ แตกต่างที่ระดับ นัยสำคัญ 0.05
แนวทางที่ 3 การลดการรื้อไม้และ การขนย้ายไม้ระหว่างการผลิต สินค้า ร่วมกับการลดระยะเวลา คอยในระหว่างการผลิตสินค้า จากการรอสินค้าในการผลิต และ การบรรจุสินค้า	ระยะเวลารวมของการเข้ามารับสินค้า	139.00 ± 2.6464	138.86 ± 2.8104	ไม่แตกต่าง
	ระยะเวลารอคอย ณ จุดโหลด	14.862 ± 1.2630	13.084 ± 1.0643	ลดลง 13%
	ประเภทพื่นเรียบ			
	ระยะเวลารอคอย ณ จุดโหลด	21.682 ± 1.9660	16.942 ± 1.8161	ลดลง 23%
แนวทางที่ 4 การเพิ่มชุดโหลดใน กระบวนการโหลดสินค้า	ระยะเวลารวมของการเข้ามารับสินค้า	139.00 ± 2.6464	135.50 ± 2.7488	ลดลง 3%
	ระยะเวลารอคอย ณ จุดโหลด	14.862 ± 1.2630	1.12 ± 0.1681	ลดลง 92%
	ประเภทพื่นเรียบ			
	ระยะเวลารอคอย ณ จุดโหลด	21.682 ± 1.9660	1.32 ± 0.2522	ลดลง 94%
	ประเภทตู้คอนเทนเนอร์			

สรุปผล

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นในการศึกษาเพื่อหาแนวทางการเพิ่มประสิทธิภาพด้านระยะเวลารวมเฉลี่ยของการเข้ามารับสินค้าและระยะเวลารอคอยเฉลี่ยเพื่อโหลดสินค้า ด้วยการวิเคราะห์ปัญหาผ่านแผนภาพสายธารคุณค่า และการจำลองสถานการณ์ผ่านโปรแกรม Arena ซึ่งจะทำให้สามารถเลือกวิธีการหรือแนวทางที่ดีที่สุดนำไปสู่การประยุกต์ใช้และพัฒนากระบวนการทำงานของกระบวนการโหลดสินค้าที่เหมาะสมและให้ผลลัพธ์อย่างมีประสิทธิภาพ โดยผลของการศึกษาในแต่ละกระบวนการ สรุปได้ดังนี้ จากขั้นตอนของการเก็บรวบรวมข้อมูลซึ่งประกอบด้วยข้อมูล 2 ประเภท คือ ข้อมูลปฐมภูมิ ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จากผู้มีส่วนเกี่ยวข้อง และการสังเกตการณ์การดำเนินงานของกระบวนการโหลดสินค้าของโรงงานกรณีศึกษา และข้อมูลทุติยภูมิ ซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จากการเก็บรวมของหน่วยงานโหลดสินค้าของโรงงานกรณีศึกษา อาทิ ข้อมูลปริมาณจำนวนรถบรรทุกที่เข้ามาโหลดสินค้าในแต่ละเดือน และข้อมูลระยะเวลาในแต่ละกระบวนการของการโหลดสินค้า เป็นต้น ซึ่งจากข้อมูลดังกล่าวนี้ ทางผู้วิจัยได้นำไปใช้ในการสร้างและวิเคราะห์ แผนภาพสายธารคุณค่าสถานะปัจจุบันของการดำเนินการกระบวนการโหลดสินค้าของโรงงานกรณีศึกษา โดยพบว่า จุดคอขวดของ

กระบวนการโหลดสินค้าและควรจะมีการพัฒนาปรับปรุงคือ ระยะเวลาของการรอคอยเพื่อโหลดสินค้า ณ จุดโหลดสินค้า และระยะเวลาการโหลดสินค้า เนื่องจากกระบวนการดังกล่าวมีระยะเวลาของการดำเนินงานและการรอคอยที่สูงกว่ากระบวนการอื่น ๆ อีกทั้งเมื่อวิเคราะห์จุดคอขวดดังกล่าว ทำให้ทราบว่าสาเหตุของปัญหาเกิดขึ้นจาก 3 สาเหตุหลัก คือ 1) ปัญหาในการรื้อไม้และการขนย้ายไม้ระหว่างการผลิตสินค้า 2) ปัญหาของการไม่พร้อมของสินค้าในระหว่างการผลิตสินค้า และ 3) ข้อจำกัดด้านอุปกรณ์และชุดโหลดสินค้า

จากสาเหตุของปัญหาข้างต้น ประกอบกับการทบทวนงานวิจัยก่อนหน้านี้ ตลอดจนการนำเครื่องมือและเทคนิคในเรื่องของการลดความสูญเสีย ตามแนวคิดสินค้าเข้ามาประยุกต์ใช้ในการออกแบบแนวทางการลดระยะเวลา ผู้วิจัยจึงได้นำเสนอแนวทางในการลดระยะเวลา โดยแบ่งเป็น 4 แนวทาง ซึ่งได้แก่ แนวทางที่ 1 การลดการรื้อไม้และการขนย้ายไม้ระหว่างการผลิตสินค้า แนวทางที่ 2 การลดระยะเวลารอคอยในระหว่างการผลิตสินค้า

จากการรอสินค้าในการผลิต และการบรรจุสินค้า แนวทางที่ 3 การลดการรื้อไม้และการขนย้ายไม้ระหว่างการผลิตสินค้า ร่วมกับการลดระยะเวลารอคอยในระหว่างการผลิตสินค้าจากการรอสินค้าในการผลิต

และการบรรจุสินค้า และแนวทางที่ 4 การเพิ่มชุดโหลตในกระบวนการโหลตสินค้า โดยผลลัพธ์ความแตกต่างทางสถิติระหว่างแบบจำลองสถานะปัจจุบันและแบบจำลองสถานการณ์การปรับปรุงระยะเวลา โดยพิจารณาจากเกณฑ์ชี้วัด 2 เกณฑ์ คือ ระยะเวลารวมเฉลี่ยของการเข้ามารับสินค้า และระยะเวลารอคอยเฉลี่ยเพื่อโหลตสินค้าของรถบรรทุก ผลการเปรียบเทียบแบบจำลองสถานการณ์ภายใต้เงื่อนไขตามแนวทางต่าง ๆ โดยเรียงตามลำดับผลลัพธ์ที่สามารถลดระยะเวลาตามเกณฑ์ที่กำหนดไว้จากมากไปน้อย ได้แก่ แนวทางที่ 4 แนวทางที่ 3 แนวทางที่ 1 และแนวทางที่ 2 ตามลำดับ และเมื่อทดสอบความแตกต่างทางสถิติของผลลัพธ์แบบจำลองสถานการณ์การปรับปรุงระยะเวลา ด้วยวิธี paired t-test พบว่า มีเพียงแนวทางเดียวเท่านั้น ที่มีผลทดสอบระยะเวลาเฉลี่ยของรถบรรทุกที่เข้ามารับสินค้า ระยะเวลารอคอยเพื่อโหลตสินค้าประเภทรถพื้นเรียบ และระยะเวลารอคอยเพื่อโหลตสินค้าประเภทรถตู้คอนเทนเนอร์ แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ จำนวน 1 แนวทาง คือ แนวทางที่ 4

ดังนั้นจากการเปรียบเทียบข้างต้นทำให้สรุปได้ว่า แนวทางที่ 4 คือ การเพิ่มชุดโหลตในกระบวนการโหลตสินค้าเป็นแนวทางที่สามารถลดระยะเวลาเฉลี่ยที่มากที่สุด เนื่องจากในสถานะปัจจุบันของการดำเนินการโหลตสินค้าที่รถบรรทุกแต่ละประเภทจะสามารถเข้าไป ณ จุดโหลตสินค้าได้เพียงครั้งละ 1 คัน เท่านั้น ส่งผลให้เกิดแถวคอยและระยะเวลารอคอยที่ค่อนข้างนานของรถบรรทุก ดังนั้นการเพิ่มชุดโหลตสินค้าเข้าไปในกระบวนการโหลตสินค้าอีก 1 ชุด ในแต่ละประเภทการโหลต จะทำให้รถบรรทุกสามารถเข้าไปยังจุดโหลตสินค้าได้ถึงครั้งละ 2 คัน ซึ่งจะสามารถลดแถวคอย ณ จุดโหลตสินค้าลงได้ จึงส่งผลให้ระยะเวลารอคอยเฉลี่ยลดลงมากที่สุด อีกทั้งยังเป็นผลทำให้ระยะเวลาเฉลี่ยของการเข้ามารับสินค้าของรถบรรทุกลดลงด้วย ถัดมาคือแนวทางที่ 3 แนวทางที่ 1 และ แนวทางที่ 2 เนื่องจากการลดระยะเวลาในกระบวนการโหลตสินค้าในกรณีที่

เกิดปัญหาค้างระหว่างการโหลตสินค้าได้ ซึ่งส่งผลให้ระยะเวลาของการโหลตสินค้าเฉลี่ยลดลง แต่อย่างไรก็ตามจากจำนวนรถบรรทุกในแถวคอยที่ไม่ได้มีการเปลี่ยนแปลง จึงทำให้ระยะเวลารวมของการเข้ามารับสินค้าของรถบรรทุกจึงไม่แตกต่างไปจากปัจจุบัน

นอกจากนี้จากผลลัพธ์ที่ได้กล่าวมาข้างต้น จะเห็นว่าแนวทางหรือวิธีการในการลดระยะเวลาเฉลี่ยของการเข้ามารับสินค้า และระยะเวลารอคอยเฉลี่ยเพื่อโหลตสินค้า ตลอดจนระยะเวลากระบวนการโหลตสินค้าภายในคลังสินค้า ในแต่ละแนวทางจะให้ผลลัพธ์หรือประสิทธิผลที่แตกต่างกันออกไป ซึ่งอาจขึ้นอยู่กับลักษณะของระยะเวลาการดำเนินงานที่แตกต่างกันออกไปในแต่ละประเภทรถบรรทุก และปริมาณทรัพยากรที่ใช้ในกระบวนการ โดยจากผลการวิจัย พบว่าการเพิ่มทรัพยากรในกระบวนการโหลตสินค้า เป็นวิธีการที่สามารถให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด ซึ่งสอดคล้องกับหลาย ๆ งานวิจัยที่ได้เคยศึกษาไว้ อาทิ งานวิจัยของ Adebiyi, Sulaimon และ Oyatoye E.O. (2011) ที่ได้มีการศึกษาว่าการขยายพื้นที่ทางกายภาพและอุปกรณ์การขนถ่ายของท่าเรือแห่งหนึ่งในประเทศไนจีเรียสามารถที่จะลดปัญหาความแออัดที่เกิดขึ้นกับท่าเรือดังกล่าวได้ โดยถึงแม้ว่าวิธีการหรือแนวคิดดังกล่าวจะมีต้นทุนที่เกิดขึ้นจากการดำเนินการ แต่เมื่อพิจารณาในเรื่องของความสัมพันธ์ด้านต้นทุนที่เกิดขึ้น พบว่า ผลลัพธ์ที่ได้จากการลดระยะเวลาการดำเนินงานลงได้ ส่งผลต่อการประหยัดต้นทุนด้านอื่นของบริษัทตามมา อาทิ ความสามารถในการสร้างอรรถประโยชน์ของรถบรรทุก ทำให้ผู้ขนส่งสามารถบริหารจัดการการขนส่งเที่ยวที่ 2 ได้ดียิ่งขึ้น ส่งผลต่ออัตราค่าขนส่งของบริษัทที่จะลดลงสำหรับเที่ยวที่ 2 กว่าร้อยละ 10 ของอัตราค่าบริการ ในเที่ยวที่ 1 หรือรวมถึงต้นทุนในค่าจ้างนอกเวลาของพนักงานที่จะลดลงได้ด้วย

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความกรุณาจากบริษัทกรณีศึกษาในการให้ข้อมูลที่น่ามาใช้เป็น

กรณีศึกษา และขอขอบคุณผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องที่คอยให้คำแนะนำ ชี้แนะ ในส่วนของข้อมูลและรูปแบบการดำเนินงาน ตลอดจนให้แนวคิดเพิ่มเติมเพื่อให้งานวิจัยนี้สำเร็จและสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

1. วรธรรม อุ่นจิตติชัย. วัสดุทดแทนไม้. กรุงเทพฯ: กลุ่มงานพัฒนาอุตสาหกรรมไม้ สำนักวิจัยและพัฒนาการป่าไม้ กรมป่าไม้; 2555.
2. ญัชชการณณ์ จริญญาพัฒน์, สาลินี อาจารย์. การผลิตแผ่นขึ้นไม้อัดจากเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 2561;28(2):469-76.
3. กณิศ อ่ำสกุล. จับตลาดตลาดส่งออกไม้และวัสดุในเวียดนาม เติบโตสดใสไปอีก 2-3 ปี. Economic Intelligence Center [อินเทอร์เน็ต]. 2560. [สืบค้นเมื่อวันที่ 2 ก.ค. 2561]. จาก : <https://www.scbeic.com/th/detail/product/4293>
4. Cunningham M, Smith E. Exploring the Supply and Demand Drivers of Commodity Prices. Reserve Bank of Australia; 2019.
5. โสภิตา ศิลาอ่อน. การประยุกต์ใช้เทคนิคสินค้าและผังสายธารคุณค่าในการจัดการโซ่อุปทานของอุตสาหกรรมยาและเวชภัณฑ์ [วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ]. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2552.
6. Treadwell, M. Queueing Models and Assessment Tools for Improving Mass Dispensing and Vaccination Clinic Planning. Master of Science University of Maryland; 2006.
7. Haji M, Darabi H. A simulation case study: Reducing outpatient waiting time of otolaryngology care services using VBA. Paper presented at the Automation Science and Engineering (CASE); 2011.
8. ใจรักษ์ ยอดมงคล. การปรับปรุงประสิทธิภาพด้านการรรับยาผู้ป่วยนอกโรงพยาบาลมหาวิทยาลัย [วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารธุรกิจ]. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2559.
9. Oyatoye EO, Adebisi SO, Bolanle AB, Chinweze OJ. Application of Queuing theory to port congestion problem in Nigeria. European Journal of Business and Management. 2011;3:24-36.
10. แท้ปึง ดอน, ลุยสเตอร์ ทอม, ชูเกอร์ ทอม, วิทยา สุฤทธดำรง, ยุพา กลอนกลาง, และ สุนทร ศรีลังกา. มุ่งสู่ "สิน" ด้วยการจัดการสายธารคุณค่า=Value stream management. กรุงเทพฯ: อี. ไอ. สแควร์; 2550.



Process Modelling of Microwave-assisted Fast Pyrolysis of Empty Fruit Bunch to Produce Biodiesel Production

Poj Hansirisawat¹, Thongchai R. Srinophakun^{1*} and Somboon Sukpancharoen²

¹Interdisciplinary of Sustainable Energy and Resources Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Bangkok 10900, THAILAND

²Department of Mechatronics and Robotics Engineering, Faculty of Technical Education, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathumthani 12110, THAILAND

*Corresponding author e-mail: fengtcs@hotmail.com

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article history:

Received: 5 June, 2020

Revised: 3 July, 2020

Accepted: 30 July, 2020

Available online: 20 October, 2020

DOI: 10.14456/rj-rmutt.2020.19

Keywords: biodiesel, empty fruit bunch, process modelling, response surface methodology (RSM)

Every year, an empty fruit bunch (EFB) is extensively produced in Thailand, and this EFB has the potential to use it as the source of energy. A novel waste-to-energy technology of converting this agricultural waste into the value-added product has been studied. Microwave-assisted pyrolysis (MAP) is selected as the case study. However, to extend the study of represent model of the biodiesel production plant, the development of the mathematical equation of this plant was performed with the aid of Design-Expert V.12.0.8 (trial) software. The distillate to feed ratio of the distillation column, the temperature of a heat exchanger, and the pressure of a decanter drum is selected as the independent variables for determining the product yield and utility cost. The result showed that the characteristic equations which can be used as a representative model for the yield of biodiesel, the yield of gasoline, and utility cost were significant with a 95% confidence level. The R-squared value predicted by the model was found to be 0.95-1.00. The mathematical model can be used for the analysis of product yield and the operating cost. The target of optimization has been set for maximizing product yields and minimizing the utility cost of the

plant. The result showed that at the optimum operating conditions of the set of constraints e.g. distillate-to-feed ratio, the temperature, the pressure were 0.9, 60 C, 21.83 bar, respectively. At this optimum point, the values of biodiesel yield, gasoline yield, and utility cost are 5,909.45 kg/hr., 4,169.92 kg/hr., and 514.23 USD/hr., respectively.

INTRODUCTION

Nowadays, an empty fruit bunch (EFB) has been excessively produced in Thailand. According to the news report, the quantity of EFB produced in Thailand was around 34,114 tons in 2019. EFB has a potential as a source of energy to produce the precious product such as bio-oil. Many of research utilized fast pyrolysis to transform this agricultural residue into the bio-oil. But, recently, the novel technique of fast pyrolysis that it utilized the microwave substituting the fluidized bed is called Microwave-assisted pyrolysis (MAP). This technique has benefits for improved conversion efficiency of electrical power to heat, lower overall energy consumption, and a less complex stream of the pyrolytic products (1, 2). Therefore, this work developed the MAP process of EFB in Aspen Plus V.8.8 software. However, to extend the analysis of the model of the biodiesel production plant, the mathematical model is studied. Since the biodiesel plant has a purpose to generate biofuel production, some of the operating parameters will be investigated to maximize the yield of the product. In the case of mathematical development, this work utilized Design-Expert V.12.0.8 (trial) for designing the experiment and evaluation of the characteristic equation of the model.

Therefore, the objective of this work is to develop the fast pyrolysis plant, and the mathematical model of some independent parameters with the yield of the production plant. Developing this mathematical model can be used for optimization for maximizing the profit, and minimizing the utility cost.

MATERIALS AND METHODS

Process modelling

Table 1 Proximate and ultimate analysis of EFB (4)

Ultimate analysis	Air-dried (% wt.)
Carbon	43.80
Hydrogen	6.20
Oxygen	42.64
Nitrogen	0.44
Sulfur	0.09
Proximate analysis	
Moisture	8.34
Volatile	73.16
Ash	6.30
Fixed Carbon	12.20

Since the EFB is the raw material of this work, the elemental composition is presented in Table 1. The composition utilized in this study was cited from Kerdsuwan et al. (3). The base method of properties is selected for SOLIDS. The assumptions of the simulation were set up as

follows: (a) The model is steady-state, (b) The model is isothermal and no pressure loss, (c) Most of the chemical device takes place at an equilibrium state, (d) All gases are ideal gases.

In the case of flow rate of EFB, it has been assumed for 28,000 kg/hr. For the operation process of the biodiesel production plant, the pretreatment is firstly required for modifying properties of EFB to be matched with the MAP mechanism. These pretreatment processes [A1] are drying and grinding. The purpose of drying is to remove the moisture content of the raw material since it possibly reduces the performance of the fast pyrolysis. But in the case of microwave implementation on fast pyrolysis, the moisture content will be acted as the microwave absorber that consequently improves the microwave heating mechanism (4). Hence, the appropriate range of moisture content should be reviewed. According to the work of Omar et al. (5), they have stated that the estimated proper moisture content was around 30% wt. for maximizing the microwave heating mechanism. Hence, this study selected the moisture content of EFB for 30%. Another pretreatment process is grinding. This step is to purposely reduce the size of the feedstock to enhance the pyrolysis mechanism. In the case of conventional fast pyrolysis, according to the review of Bridgwater (6), he has reported that the typical range of optimal size of EFB for fast pyrolysis is between 250 – 500 μm . In the case of MAP, Zhang et al. (7) has already summarized

that the optimal particle size of any biomass feedstock that was reacted with the microwave-induced pyrolysis reaction should be roughly two times larger than the one that used for conventional pyrolysis. Hence, this work utilized the particle size for approximately 800 μm . When the pretreatment process has completely performed, pretreated EFB is then moved to the MAP process [A2] to transform into the value-added product, which is syn-gas, bio-oil, biochar. The kinetic reaction of fast pyrolysis of this study mostly cited from the research work of Peters et al. (8). These three products are mixed in a single stream and needed to be separated of each other in the separation section [A3]. Then, the cyclone will firstly separate the biochar of the pyrolyzed vapor. To separate the condensable vapor of incondensable vapor, this work utilized two flash drums condensate the bio-oil in vapor form. The by-products of this plant, the syngas, and biochar, were used for providing the heat inside the plant through the combustion process (A4). The main product of this work, bio-oil, will be further processed on the upgrading section to remove the impurities. The schematic of pretreatment, MAP, separation, combustion was shown in Figure 1.

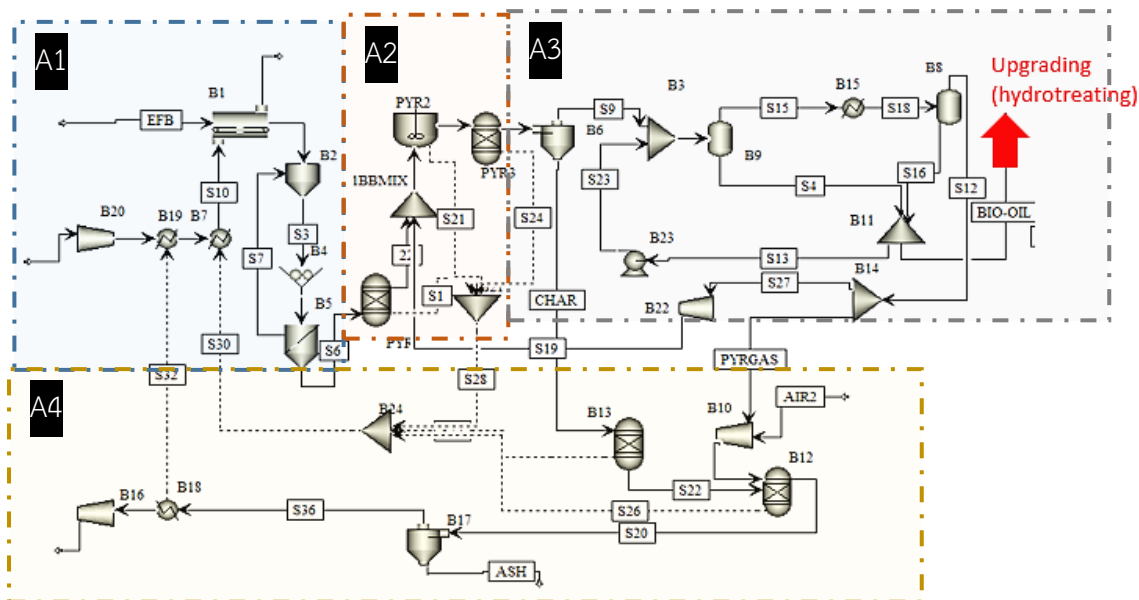


Figure 1 Pretreatment section [A1], MAP section [A2], Separation section [A3], Combustion section [A4] in Aspen Plus

For the upgrading section [A5], the hydrotreating process is performed in this sense. The hydrotreating required H_2 gases to react with bio-oil to pull out the impurities, which are basically oxygen and sulfur content. The required hydrogen consumption in this study was assumed for $0.05 \text{ g } H_2 / \text{g bio-oil}$ (9). After the bio-oil has completely hydrotreated, this upgraded stream will be transferred to the distillation section [A6] to separate the gasoline and biodiesel production of each other. This study utilized two distillation columns to remove gasoline and biodiesel, respectively. The operating conditions of both gasoline and diesel columns have been shown in Table 2.

Apart from the precious products, the heavy stream, as a heavy residue of the distillation process, will be introduced into the hydrocracking process [A7] to perform the extraction of H_2 gases to recycle within the plant. The schematic of hydrotreating, distillation, and

hydrocracking section that developed on Aspen Plus software was shown in Figure 2.

To summarize the operating conditions e.g. temperature and pressure, Table 3 has provided information on the main equipment throughout the plane.

Table 2 General information of distillation columns

Conditions	Gasoline col.	Diesel col.
Calculation type	Equilibrium	Equilibrium
Number of stages	9	8
Condenser	Partial-vapor-Liquid	Total
Reboiler	Kettle	Kettle
Reflux ratio (mass basis)	1.2	1.2
Distillate to feed ratio	0.51	0.45
The free water reflux ratio	0	0

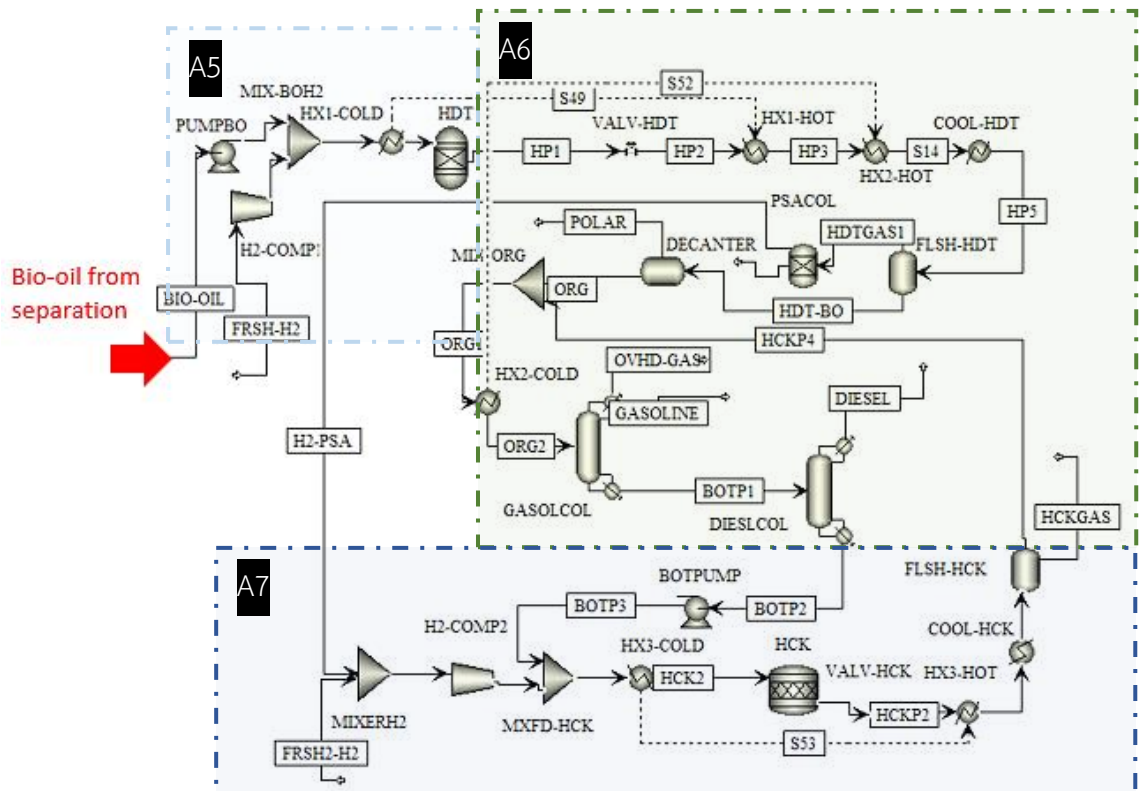


Figure 2 Hydrotreating section [A5], Distillation section [A6], Hydrocracking section [A7]

Table 3 Temperature and pressure in each equipment

Section	Equipment	Temperature/ Pressure
Pretreatment (A1)	B20 (compressor)	(-) / 1.2 bar
	B19, B7 (heat exchanger)	(-) / 1.2 bar
Fast pyrolysis (A2)	PYR1 (pyrolysis combustor, RYield)	500 °C / 1.2 bar
	PYR2 (pyrolysis combustor, RCSTR)	
	PYR3 (pyrolysis combustor, RYield)	
Separation (A3)	B9 (Flash drum, Flash2)	100 °C / 1.01325 bar
	B15 (heat exchanger)	250 °C / 1.01325 bar
	B8 (Flash drum, Flash2)	50 °C / 0 bar
Heat recovery (A4)	B10 (compressor)	(-) / 10 bar
	B13 (RYield)	1,296 °C / 10 bar
	B12 (RGibbs)	1,296 °C / 10 bar
Hydrotreating (A5)	PUMPBO (compressor)	(-) / 87 bar
	H2-COMP (compressor)	(-) / 87 bar

Section	Equipment	Temperature/ Pressure
Distillation (A6)	HX1-COLD (heat exchanger)	360 °C / 87 bar
	HDT (Ryield)	387 °C / 87 bar
	FLSH-HDT (flash drum, Flash2)	50 °C / 20 bar
	PSACOL (pressure swing adsorption, sep)	40 °C / 14 bar
Hydrocracking (A7)	BOTPUMP (compressor)	(-) / 90 bar
	H2-COMP (compressor)	(-) / 90 bar
	HX3-COLD (heat exchanger)	550 °C / 90 bar
	HCK (Rstoic)	677 °C / 90 bar
	COOL-HCK (heat exchanger)	50 °C / 1.01325 bar
	FLSH-HCK (Flash 2)	50 °C / 20 bar

Design of experiments

To achieve developing the process modeling, the experimental investigation should be performed for collecting the data as a result of the simulation. These data will be further used to develop the mathematical model of the biodiesel production plant. To developing the useful model, the suitable relationship between the independent variables and the response values is required. The objectives of this work are maximizing the product and minimizing the operating cost. Therefore, the yield of biodiesel, yield of gasoline, and utility cost are selected as the response values. In terms of the independent variables, the major parameters that significantly influence on the defined response were presented. In this sense, the distillation section is one of the most promising processes that directly influence the distinguish of gasoline and biodiesel out of the mixing stream. For the literature review, it has been founded that the main energy consumption shares a typical chemical

plant accounting for around half of the total (10). To match the distillation column specification, the distillate to feed ratio of the column is selected as one of the variables. For the other two variables, this work selected the pressure of the flash drum (FLSH-HDT) and the temperature of the heat exchanger (COOL-HDT) as the independent variables. These two devices purposely remove the light hydrocarbons (C1-C4) and H₂ gas out of the hydrotreated stream. According to the study, these light hydrocarbons acted as the toxic compound in the bio-oil production (11). Apart from the independent factors, the other parameters were assumed to be a constant value.

After specifying the levels of independent factors, the levels were entered into the Design-Expert 12.0.8 (trial), and the experimental design matrix was given, as shown in Table 4. According to the methodology used 16 runs were obtained. Subtype was randomized. The design type was Central Composite Design (CCD).

Table 4 The design matrix of the experiment

Run	Level of factors employed		
	A (-)	B (°C)	C (bar)
1	0.825	40	25
2	0.825	6.36414	25
3	0.9	20	15
4	0.825	40	25
5	0.698866	40	25
6	0.951134	40	25
7	0.825	40	8.18207
8	0.9	60	15
9	0.825	73.6359	25
10	0.825	40	41.8179
11	0.9	20	35
12	0.75	20	15
13	0.75	20	35
14	0.75	60	35
15	0.9	60	35
16	0.75	60	15

Where A is distillate to feed ratio of distillation of biodiesel in mass basis; B is the temperature of heat exchanger [COOL-HDT]; C is the pressure of flash drum [FLSH-HDT]

RESULTS AND DISCUSSIONS

The product composition of biodiesel and gasoline, as a result of simulating the Aspen Plus, has been shown in Table 5.

Table 5 Detailed compositions of the gasoline and the biodiesel obtained from the simulation.

Compositions	Mass fraction (%)	
	Gasoline	Diesel
WATER	1.32	0
CO ₂	0.54	0
PROPANE	0.23	0
PROPENE	0.11	0
BUTANE	1.21	0
PHENOL	0.03	0.61
P-ISOPROPENYL-PHENOL	0	0.62
BENZENE	5.83	0
TOLUENE	1.64	0.02
M-XYLENE	0.77	0.82
ETHYLBENZENE	0.67	0.45
ISO-PROPYLBENZENE	0.42	3.87
PENTANE	3.04	0
N-HEXANE	6.11	0
N-HEPTAN	6.13	0.01
N-OCTANE	6.36	0.66
N-NONANE	0.91	5.29
MTYNONAN	0.13	5.03
UNDECAN	0.01	5.81
DODECAN	0	6.23
TRIDECAN	0	5.76
TETDECAN	0	5.97
PENTDECA	0	6.68
OCTDECAN	0	6.52
CYCLOPENTANE	5.58	0
CYCLOHEXENE	11.44	0
CYCLOHEXANE	15.76	0
METHYLCYCLOPENTANE	10.68	0
METHYLCYCLOHEXANE	12.07	0.06
N-PROPYLCYCLOHEXANE	0.85	11.9

Compositions	Mass fraction (%)	
	Gasoline	Diesel
BICYCLOHEXYL	0	7.89
BICYCLOPROPYLHEXYL	0	7.02
NAPHTLEN	0	2.56
CHRYSENE	0	14.23
FURAN	1.97	0
DIMETHYLFURAN	4.32	0
ETHANOL	0.42	0
PROPANOL	0.44	0
BUTANOL	0.43	0
HEXANOL	0.02	0.28
PENTANOL	0.29	0.1
CYCLOHEXANOL	0.07	0.66

For the CCD, a total of 16 experimental runs of formulations was proposed by Design Experts software. It can be noticed that the run number 4 can be neglected because it has the same set of variables. Three factors are focused on, including the distillate to feed ratio of biodiesel column (A), the temperature of heat exchanger [COOL-HDT] (B), and the pressure of flash drums [FLSH-HDT] (C). The investigation then examined the various effects of the independent factors on the yield of biodiesel (kW), the yield of gasoline (kg/hr) and utility cost of this plant (USD/hr), to develop the characteristic model. The expected values for the plan of the experiment along with the recorded responses are presented in Table 6.

Table 6 Experimental matrix of CCD with defined response values

Run	Level of factors employed			Responses		
	A (-)	B (°C)	C (bar)	Y ₁ (kg/hr)	Y ₂ (kg/hr)	Y ₃ (USD/hr)
1	0.825	40	25	5,904.42	4,145.34	528.07
2	0.825	6.36414	25	6,245.04	3,500.96	544.70
3	0.9	20	15	6,080.53	4,047.73	531.52
4	0.825	40	25	5,904.32	4,146.09	528.07
5	0.698866	40	25	5,441.36	4,675.33	533.06
6	0.951134	40	25	6,300.68	3,704.23	520.34
7	0.825	40	8.18207	5,486.66	4,771.30	524.32
8	0.9	60	15	5,756.67	4,372.41	512.88
9	0.825	73.6359	25	5,631.94	4,411.90	513.09
10	0.825	40	41.8179	6,179.30	3,548.35	530.51
11	0.9	20	35	6,533.09	3,089.74	536.98
12	0.75	20	15	5,587.27	4,614.40	535.15
13	0.75	20	35	5,999.73	3,727.11	539.75
14	0.75	60	35	5,647.82	4,352.32	520.09
15	0.9	60	35	6,148.76	3,774.51	516.58
16	0.75	60	15	5,288.15	4,893.06	516.66

Where A = Mass to distillate ratio of DIESELCO, B = Temperature of COOL-HDT (°C), C = Pressure of FLSH-HDT (bar), Y₁ = Yield of biodiesel (kg/hr), Y₂ = Yield of gasoline (kg/hr), Y₃ = Utility cost (USD/hr)

According to Table 6, the set of response will be used for developing the mathematical equation as a representative model of the system. The polynomial equations will be present as a relation between the varying parameters and the specified objectives of this study. The analysis of variance of the characteristic equation was performed. The results of the analysis are shown in Table 7. In this case, if the P-value of any independent variable is lower than the significance level of 0.05, it will be considered that the variable is significant with a confidence level of 95%. The model of the yield of biodiesel, yield of gasoline, and utility cost were found to be significant with a predicted R-Squared value of 0.9972, 0.9925, and 0.9595, respectively.

It can be noticed that all of these independent parameters, a distillate-to-feed

ratio of a distillation column, the temperature of the heat exchanger, the pressure of flash drums, are significant with the proposed responses. For physical conditions of the heat exchanger and flash drums, are somewhat certainly relevant to the product yield and cost. Because these two independent parameters are the conditions that directly influencing the product composition as a result of changing its physical properties e.g. phase separation. But in the case of the distillate-to-feed ratio, its effect on the product composition might be not obvious. However, there is similar research that has experimented on the distillate-to-feed ratio on energy consumption in the separation device. They reported that this ratio was significantly impacted the product purity, as a result of the reflux rate of the condensed product at the overhead of the column (12).

Table 7 ANOVA of linear, quadratic and interactive terms of the biodiesel production plant on responses (P-value)

Sources	P-value of the responses		
	Yield of biodiesel	Yield of gasoline	Utility cost
Model	< 0.0001*	< 0.0001*	< 0.0001*
A-distillate-to-feed of distillation column	< 0.0001*	< 0.0001*	< 0.0001*
B-temp. of heat exchanger	< 0.0001*	< 0.0001*	< 0.0001*
C-pressure flash drum	< 0.0001*	< 0.0001*	0.0006*
A*B	0.1073	0.1949	-
A*C	0.0532	0.1278	-
B*C	0.0095*	< 0.0001*	-
A*A	0.0156*	0.0786	-
B*B	0.0135*	0.0003*	-
C*C	0.0004*	0.4240	-
R ²	0.9996	0.9990	0.9780

*significant

The model proposes the following polynomial equations for mass yield of biodiesel (Y_1), mass yield of gasoline (Y_2), and utility cost (Y_3), respectively:

$$Y_1 = 1,468.27 + 6,685.77A - 5.48B + 25.81C - 4.76AB + 12.09AC - 0.08BC - 2,083.47A^2 + 0.03B^2 - 0.25C^2 \quad (1)$$

$$Y_2 = 9,966.04 - 8,884.09A + 7.25B - 40.60C + 8.8AB - 21.31AC + 0.44BC + 3,165.08A^2 - 0.16B^2 + 0.07C^2 \quad (2)$$

$$Y_3 = 569.28 - 34.25A - 0.48B + 0.20C \quad (3)$$

The linear graph plot of the responses, as a result of varying the variables, is shown in Figure 3. This figure signified the comparison between predicted and simulation value of mass yield of biodiesel, the mass yield of gasoline, and utility cost by graph Y_1 , Y_2 , Y_3 , respectively. It can be observed that the developed linear correlation is fitted well with the actual value.

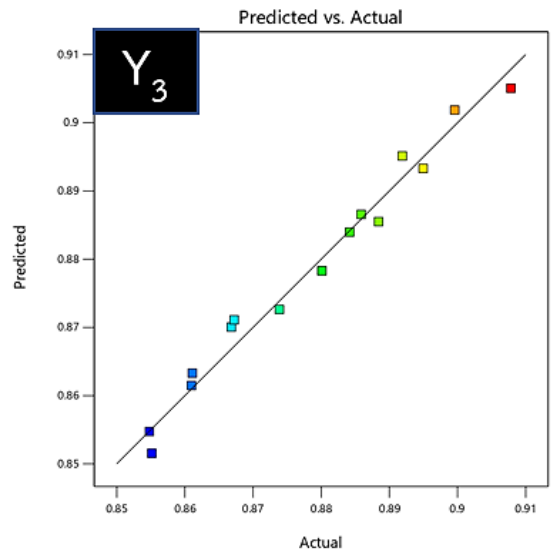
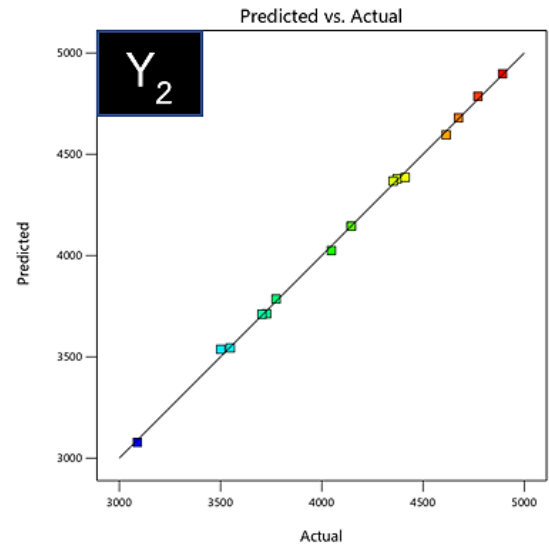
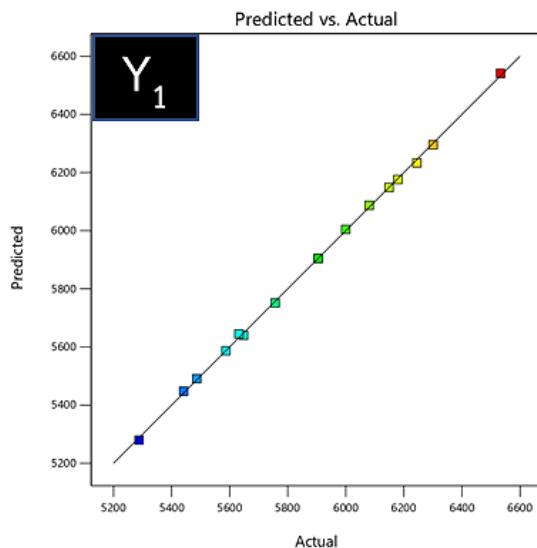


Figure 3 Linear correlation plot between the simulation and predicted response where Y_1 is the yield of biodiesel; Y_2 is the yield of gasoline; Y_3 is utility cost

For obtaining the optimal operating condition of interested independent parameters, the target of optimization has been set for acquiring the highest product yield and lowest utility cost. The optimum operating condition and outcomes have been presented in Table 8.

Table 8 The optimal condition of the plant

Constraints (Independent factors)	Target (importance)	Optimal value
Independent factors		
Distillate-to-feed ratio	In range	0.9
The temperature (°C)	In range	60
The pressure (bars)	In range	21.83
Responses		
Biodiesel yield (kg/hr)	Maximize	5,909.45
Gasoline yield (kg/hr)	Maximize	4,169.92
Utility cost (USD/hr)	Minimize	514.23

CONCLUSION

This work focused on the effective utilization of agricultural waste, EFB in this case, to create some value-added bio-oil. The novel technology of fast pyrolysis where microwave heating is implemented was utilized. The developed mathematical model of the operating parameters in the distillation section with the objective of maximization of product and minimization of utility costs are also studied. The result showed the developed characteristic model indicated that the distillation process directly influences both of the yields of product and utility cost of this biodiesel production plant. The temperature and pressure, as conditions of the separation process, are certainly significant with the yield and cost, because of its capability of changing the phase of a product. For the distillation column, varying the distillate-to-feed ratio is recycling the condensed product, which has been undergone the distillation process, strongly related to the purity of the product, and subsequently the energy consumption of the

column. These developed equations can be utilized for further analysis on the maximization of product and mitigation of operating cost.

ACKNOWLEDGEMENT

This research is supported by the Graduate Program Scholarship from The Graduate School, Kasetsart University, and Thailand Advanced Institute of Science and Technology and Tokyo Institute of Technology (TAIST-Tokyo Tech) program under the National Science and Technology Development Agency (NSTDA). This research was supported by grants funded by the National Research Council of Thailand (NRCT) and the Research University Network.

REFERENCES

1. Salema AA, Ani FN. Microwave-assisted pyrolysis of oil palm shell biomass using an overhead stirrer. *J ANAL APPL PYROL.* 2012;96:162-72.
2. Yin C. Microwave-assisted pyrolysis of biomass for liquid biofuels production. *Bioresource Technol.* 2012;120:273-84.
3. Kerdsuwan S, Laohalidanond K. Renewable energy from palm oil empty fruit bunch. In: Nayeripour M, editor. *Renewable energy-trends and applications.* InTech; 2011. p. 123-50.
4. Zhang Y, Chen P, Liu S, Fan L, Zhou N, Min M, et al. Microwave-assisted pyrolysis of biomass for bio-oil

- production. In: Samer M, editor. Pyrolysis: InTech; 2017. p. 129-65.
5. Omar R, Idris A, Yunus R, Khalid K, Isma MA. Characterization of empty fruit bunch for microwave-assisted pyrolysis. *Fuel*. 2011;90(4):1536-44.
 6. Bridgwater AV. Review of fast pyrolysis of biomass and product upgrading. *Biomass Bioenerg*. 2012;38:68-94.
 7. Zhang Y, Chen P, Liu S, Peng P, Min M, Cheng Y, et al. Effects of feedstock characteristics on microwave-assisted pyrolysis—a review. *Bioresource Technol*. 2017;230:143-51.
 8. Peters JF, Banks SW, Bridgwater AV, Dufour J. A kinetic reaction model for biomass pyrolysis processes in Aspen Plus. *Appl Energ*. 2017;188:595-603.
 9. Iisa K, French RJ, Orton KA, Dutta A, Schaidle JA. Production of low-oxygen bio-oil via ex situ catalytic fast pyrolysis and hydrotreating. *Fuel*. 2017;207:413-22.
 10. Lee J, Son Y, Lee KS, Won W. Economic analysis and environmental impact assessment of heat pump-assisted distillation in a gas fractionation unit. *Energies*. 2019;12(5):852-70.
 11. Pattiya A, Titiloye JO, Bridgwater AV. Fast pyrolysis of agricultural residues from cassava plantation for bio-oil production. *Carbon*. 2009;51:51-9.
 12. Sakhre V. Reactive Distillation: Modeling, Simulation, and Optimization. In: Steffen V, editor. *Distillation-Modelling, Simulation and Optimization*: IntechOpen; 2019.



การพัฒนาแอปพลิเคชัน Chatbot สำหรับงานบริการนักศึกษา กรณีศึกษา กองพัฒนานักศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

Development of Chatbot Application for Student Services Case Study: Division of Student Development Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

สุมนา บุซบก* ณัฐพร เพ็ชรพงษ์ และ จิรณัฐ สิงห์โตแก้ว

Sumana Budsabok*, Nattaporn Pechpong and Chiranut Singtokaeo

สาขาระบบสารสนเทศและคอมพิวเตอร์ธุรกิจ คณะบริหารธุรกิจและเทคโนโลยีสารสนเทศ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์พระนครศรีอยุธยาหันตรา ต.หันตรา อ.พระนครศรีอยุธยา จ.พระนครศรีอยุธยา 13000

Computing and Information Technology, Business Administration And Information Technology, Rajamangala University of Technology, Suvarnabhumi Phra Nakhon Si Ayutthaya Hantra Center, Hantra Sub-district, Phra Nakhon Si Ayutthaya Province 13000, THAILAND

*Corresponding author e-mail: sumana.p@rmutsb.ac.th

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article history:

Received: 1 June, 2020

Revised: 29 June, 2020

Accepted: 6 August, 2020

Available online: 20 October, 2020

DOI: 10.14456/rj-rmutt.2020.20

Keywords: applications, chat bots, division of student development

The Development of Chatbot Application for Student Services Case Study of Student Development Division, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi has objectives to 1) develop Chatbot application for student services in the case study of Student Development Division, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi 2) find out the effectiveness of the Chatbot application for student services in the case study of the Student Development Division, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi 3) study the satisfaction of employees and students in using Chatbot application for student service work in case studies of Student Development Division, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi. The tools used in this research were Chatbot application which was passed the evaluation by 2 IT experts, and Chatbot application development model and the user satisfaction evaluation form for student service jobs in the case study of Student Development Division, Rajamangala University of

Technology Suvarnabhumi along with mean and standard deviation used for data analysis. The results revealed that Chatbot application for student services in the case study of the Student Development Division, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi got the highest efficiency level in development, with the average value of 4.50, and standard deviation of 0.20. The satisfaction of users of Chatbot application for student services in the case study of Student Development Division, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi was at the high level, with the average of 4.46, and the standard deviation of 0.03, which means that the developed Chatbot application can effectively reduce the questionnaire answering time of student development staff and students at Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi.

บทคัดย่อ

การพัฒนาแอปพลิเคชัน Chatbot สำหรับงานบริการนักศึกษา กรณีศึกษา กองพัฒนานักศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ มีวัตถุประสงค์ดังนี้ 1) เพื่อพัฒนาแอปพลิเคชัน Chatbot สำหรับงานบริการนักศึกษา กรณีศึกษา กองพัฒนานักศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ 2) เพื่อหาประสิทธิภาพของแอปพลิเคชัน Chatbot สำหรับงานบริการนักศึกษา กรณีศึกษา กองพัฒนานักศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ 3) เพื่อศึกษาความพึงพอใจของพนักงาน และนักศึกษาที่มีต่อแอปพลิเคชัน Chatbot สำหรับงานบริการนักศึกษา กรณีศึกษา กองพัฒนานักศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยในครั้งนี้คือ แอปพลิเคชัน Chatbot ที่ผ่านการประเมินผลจากผู้เชี่ยวชาญด้านเทคโนโลยีสารสนเทศจำนวน 2 คน แบบประเมินรูปแบบการพัฒนาแอปพลิเคชัน Chatbot และแบบประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานที่มีต่อแอปพลิเคชัน Chatbot สำหรับงานบริการนักศึกษา กรณีศึกษา กองพัฒนานักศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ สถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลคือ

ค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน ผลการวิจัยพบว่า แอปพลิเคชัน Chatbot สำหรับงานบริการนักศึกษา กรณีศึกษา กองพัฒนานักศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ที่พัฒนาขึ้นอยู่ในเกณฑ์ระดับประสิทธิภาพมากที่สุด โดยมีค่าเฉลี่ยรวมเท่ากับ 4.50 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.20 และความพึงพอใจของผู้ใช้แอปพลิเคชัน Chatbot สำหรับงานบริการนักศึกษา กรณีศึกษา กองพัฒนานักศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ อยู่ในเกณฑ์ระดับมาก ค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.46 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.03 แสดงว่าแอปพลิเคชัน Chatbot ที่พัฒนาขึ้นสามารถลดระยะเวลาการตอบคำถามของเจ้าหน้าที่งานพัฒนานักศึกษาและนักศึกษามหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิได้อย่างมีประสิทธิภาพ

คำสำคัญ: แอปพลิเคชัน แชทบอท กองพัฒนานักศึกษา

บทนำ

กองพัฒนานักศึกษา (สำนักงานอธิการบดี) ได้รับการจัดตั้งให้เป็นส่วนราชการ หน่วยงานหนึ่งภายใต้การจัดตั้งส่วนราชการในมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล

สุวรรณภูมิ กระทรวงศึกษาธิการ เพื่อให้เป็นหน่วยงานดำเนินงานเกี่ยวกับการพัฒนาคุณภาพนักศึกษา โดยการให้บริการและจัดสวัสดิการด้านต่าง ๆ แก่นักศึกษา เช่น จัดกิจกรรมเสริมหลักสูตร กิจกรรมกีฬา จัดหาทุนการศึกษา แนะนำอาชีพและจัดหางาน ให้บริการด้านหอพักนักศึกษา บริการให้คำปรึกษาแก้ปัญหาแก่นักศึกษา จัดอบรมให้ความรู้ต่าง ๆ แก่นักศึกษาเพื่อส่งเสริมและสนับสนุน การผลิตบัณฑิตให้สมบูรณ์ทั้งร่างกายและจิตใจ มีอำนาจและหน้าที่ความรับผิดชอบเกี่ยวกับการบริหารงานด้านการส่งเสริมและพัฒนา นักศึกษา งานด้านกิจกรรมนักศึกษา

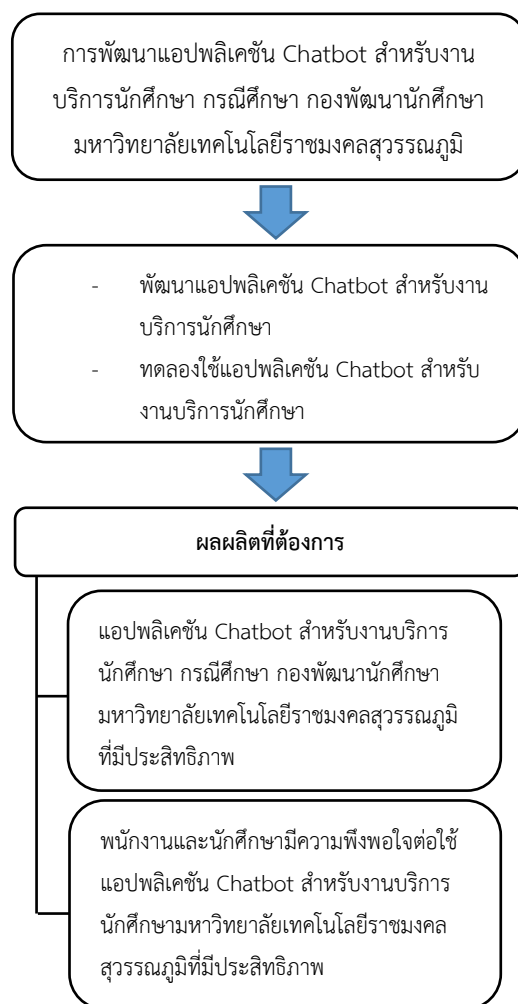
กองพัฒนานักศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ให้ความสำคัญต่อการพัฒนานักศึกษา กิจกรรมนักศึกษา คือ งาน หรือ กิจกรรมทั้งหมดที่กระทำอย่างเป็นระบบเพื่อกระตุ้นและส่งเสริมให้นักศึกษาได้พัฒนาตนเองทั้งด้านร่างกาย จิตใจ อารมณ์ สังคม และบุคลิกภาพได้อย่างเต็มตามศักยภาพในการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพ ควบคู่ไปกับงานด้านวิชาการ (1)

จากที่ได้กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่ากองพัฒนานักศึกษาเป็นกลุ่มงานที่เน้นการให้บริการนักศึกษา ซึ่งบริบทในการทำงาน ก็จะเป็นไปในรูปแบบของการถาม-ตอบ ชี้แจงข้อมูลต่าง ๆ ให้กับนักศึกษา ซึ่งในบางครั้งไม่สามารถตอบคำถามได้ครบทุกคำถาม หรือให้บริการได้ไม่ทั่วถึงในแต่ละวัน และในแต่ละวันก็จะเป็นคำถามเดิม ๆ ที่จะต้องชี้แจงให้นักศึกษาทราบ ทำให้พนักงานเสียเวลาในการให้ข้อมูลที่ซ้ำ ๆ บ่อยครั้ง

จากปัญหาดังกล่าว ผู้วิจัยจึงได้นำ แอปพลิเคชัน Chatbot มาช่วยในการตอบคำถามแทนพนักงาน ซึ่ง Chatbot คือ โปรแกรมอย่างหนึ่งที่ถูกสร้างมาเพื่ออำนวยความสะดวกในการช่วยตอบ คือ จะช่วยตอบข้อความตอบคำถาม ให้ข้อมูล ให้ความช่วยเหลือ ให้ความบันเทิง และอื่น ๆ อีกมากมาย ซึ่งขึ้นอยู่กับที่ตั้งค่าของผู้พัฒนาว่าต้องการให้ทำอะไรได้บ้าง Chatbot จะทำให้การทำงานสะดวกสบายมากขึ้น ยิ่งโดยเฉพาะกับธุรกิจหรือ

บริษัทใหญ่ ๆ ที่มักจะมีลูกค้าเข้ามาถามคำถามเดิม ๆ หรือติดต่อนปัญหาเรื่องซ้ำ ๆ เดิม ๆ จะช่วยเบาแรงและทำให้สามารถให้บริการแก่ลูกค้าได้อย่างทั่วถึงภายในเวลาอันรวดเร็ว (2) จากคุณสมบัติของ Chatbot ผู้วิจัยจึงคิดที่จะพัฒนาแอปพลิเคชัน Chatbot สำหรับงานบริการนักศึกษา กรณีศึกษา กองพัฒนานักศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิขึ้น โดยมีกรอบแนวคิดในการทำวิจัยดังนี้

กรอบแนวคิดในการวิจัย



รูปที่ 1 กรอบแนวคิดในการวิจัย

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาข้อมูลเบื้องต้น

ผู้วิจัยได้ทำการศึกษาและรวบรวมข้อมูลจากการสอบถามผู้อำนวยการกองพัฒนานักศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์พื้นที่หัตถรา พบว่าระบบการทำงานภายในองค์กร มีการบันทึกข้อมูลของนักศึกษา และบุคคลภายนอกที่เข้ามาติดต่อในแต่ละวัน เช่น ข้อมูลกิจกรรมของนักศึกษา แผนงาน งานหอพัก และงานอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับนักศึกษาซึ่งเป็นคำถามเดิม ๆ บ่อยครั้ง เพื่อนำไปวิเคราะห์ข้อคำถามและคำตอบที่จะป้อนข้อมูลเข้าสู่ระบบ Chatbot

ผู้วิจัยได้รวบรวมข้อมูลเกี่ยวกับการให้บริการนักศึกษาของกองพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์พื้นที่หัตถราสามารถแบ่งข้อมูลได้ดังนี้

1. ประวัติความเป็นมา
2. แผนที่มีหลัก
3. ปฏิทินการศึกษา
4. หลักสูตรการศึกษา
5. การลงทะเบียน
6. ระเบียบนักศึกษา
7. ทุนการศึกษา
8. กิจกรรมกีฬา
9. บริการด้านหอพัก

ด้านซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการพัฒนาระบบ

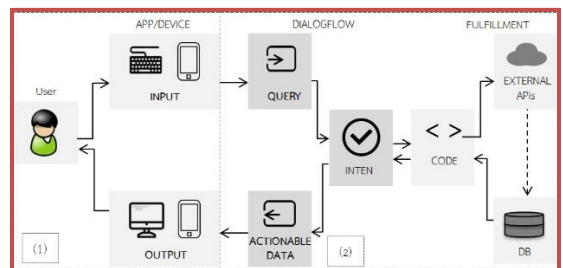
ผู้วิจัยทำการพัฒนาโต้ตอบการสนทนาอัตโนมัติให้อยู่ในลักษณะแอปพลิเคชัน หมายถึง ระบบที่ถูกพัฒนาขึ้นมานั้นจะสามารถแสดงผลบน Smartphone ได้ ซึ่งทำให้ระบบสามารถตอบสนอง ความต้องการในด้าน Multi-User กล่าวคือผู้ใช้งานหลาย ๆ คนจะสามารถใช้งานฐานข้อมูลเดียวกันได้ แอปพลิเคชันมีข้อดีที่สามารถใช้งานได้ง่าย สะดวกและรวดเร็ว เนื่องจากมีความต้องการที่ต้องใช้ งานผ่าน Smartphone เท่านั้น

ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้ ผู้วิจัยได้พัฒนาระบบโต้ตอบการสนทนาอัตโนมัติโดยมีเครื่องมือ ดังนี้

1. Dialogflow
2. แอปพลิเคชัน LINE
3. LINE Developer

ออกแบบและพัฒนาระบบ

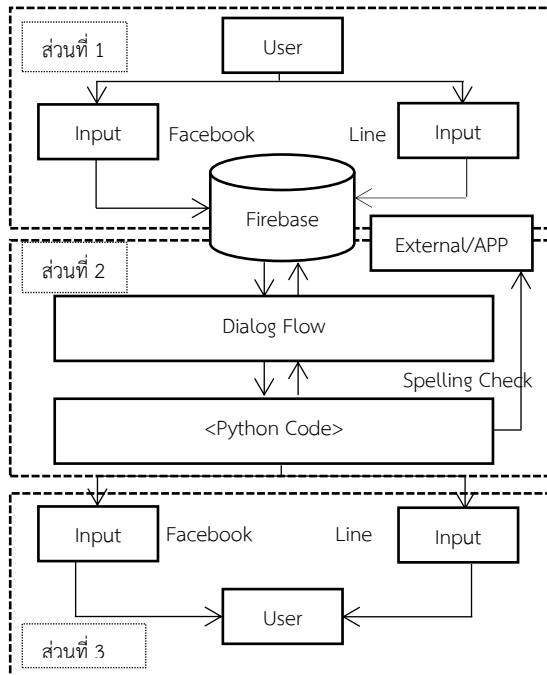
การออกแบบภาพรวมของระบบ ในการนี้ผู้วิจัยเลือกใช้แอปพลิเคชัน Line เป็นตัวกลางในการสนทนายระหว่าง ผู้ใช้งานกับระบบโต้ตอบการสนทนาอัตโนมัติ ซึ่งใช้ Web hook ของ Line เป็นตัวกลางในการช่วยติดต่อกับแอปพลิเคชันซึ่งแอปพลิเคชันสามารถเชื่อมต่อกับฐานข้อมูล เพื่อจัดเก็บ ข้อมูลคำถาม โดยมีกระบวนการทำงานในภาพรวมดังต่อไปนี้ (3)



รูปที่ 2 ภาพรวมของระบบ Chatbot

จากรูปที่ 2 ส่วนที่ (1) ผู้ใช้งานนำเข้าข้อมูลเข้าระบบผ่านทางเครื่องคอมพิวเตอร์หรือสมาร์ทโฟนและแสดงผลข้อมูล (2) DialogFlow ทำความเข้าใจคำถามของผู้ใช้งานตาม Inten ของระบบ Chatbot ที่พัฒนาขึ้น และตัดสินใจความต้องการของผู้ใช้และส่งต่อไปให้กับ Backend Server ซึ่งเชื่อมต่อกับ Database โดย Backend จะทำหน้าที่ตัดสินใจและส่งข้อมูลกลับไปให้ผู้ใช้งาน

ผู้วิจัยสามารถออกแบบสถาปัตยกรรมระบบแอปพลิเคชัน Chatbot สำหรับงานบริการนักศึกษากรณีศึกษา กองพัฒนานักศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ดังรูปที่ 3



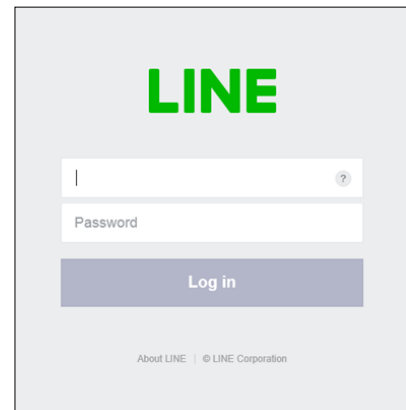
รูปที่ 3 สถาปัตยกรรมระบบการพัฒนาแอปพลิเคชัน Chatbot สำหรับงานบริการนักศึกษา กรณีศึกษา กองพัฒนานักศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

จากรูปที่ 3 สถาปัตยกรรมระบบแอปพลิเคชัน Chatbot ในที่นี้ส่วนที่ 1 หมายถึง เจ้าหน้าที่ นักเรียน นักศึกษาและบุคคลภายนอก คือ USER เข้าระบบผ่าน Facebook หรือ Line โดยระบบจะเก็บข้อมูลไว้ที่ฐานข้อมูล Firebase ส่วนที่ 2 หมายถึง ฐานข้อมูล Firebase ส่งข้อมูลไปกลับที่ Dialog Flow ซึ่งเขียนโค้ดโดย Python และส่งข้อมูลไปยัง External เพื่อสำรองข้อมูล ส่วนที่ 3 หลังจากเขียนโค้ดโดย Python แล้ว ก็ส่งข้อมูลกลับไปยัง USER โดยส่งออกผ่าน Facebook หรือ Line ออกแบบและพัฒนาระบบ

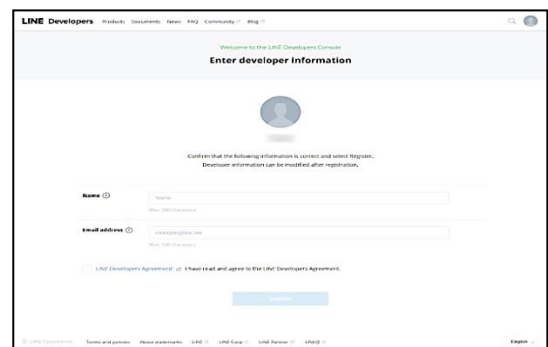
- ขั้นตอนที่ 1 การเปิดการใช้งาน Messaging API
เข้าสู่เว็บไซต์ <https://developers.line.biz>
และกดที่ปุ่มเข้าสู่ระบบด้วย LINE account เพื่อทำการเริ่มสร้าง Chatbot รูปที่ 4 และ 5
- ขั้นตอนที่ 2 การสร้าง Provider

ในกรณีที่เข้า LINE Developers console เป็นครั้งแรก ก็จะมีให้กรอกชื่อและ Email ของนักพัฒนา ก่อนใส่ข้อมูลแล้วกดสมัคร (รูปที่ 6)

- ขั้นตอนที่ 3 การใส่ชื่อ Provider หรือชื่อ Chatbot ที่ต้องการสร้าง



รูปที่ 4 การ Log in เข้าสู่ระบบด้วย LINE Account



รูปที่ 5 การสร้าง Provider

รูปที่ 6 การใส่ชื่อ Provider

ขั้นตอนการทดลองใช้โปรแกรมและการประเมินผล

ผู้วิจัยมีกระบวนการในการทดลองประเมินผลการพัฒนาแอปพลิเคชัน Chatbot สำหรับงานบริการนักศึกษา กรณีศึกษา กองพัฒนานักศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์พระนครศรีอยุธยา ดังนี้

1. ประเมินรูปแบบโดยผู้เชี่ยวชาญด้านเทคโนโลยีสารสนเทศ 1 ครั้ง เพื่อปรับปรุงแก้ไข
2. ประเมินประสิทธิภาพโดยผู้เชี่ยวชาญด้านเทคโนโลยีสารสนเทศ จำนวน 2 ท่าน
 - ผู้อำนวยการกองพัฒนานักศึกษา
 - เจ้าหน้าที่ผู้รับผิดชอบงานด้านพัฒนานักศึกษา
3. ประเมินความพึงพอใจของพนักงานเจ้าหน้าที่และนักศึกษาที่มีต่อแอปพลิเคชัน Chatbot จำนวน 30 คน

ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบประสิทธิภาพของแอปพลิเคชัน Chatbot โดย Blackbox Testing (4) โดยอาศัยค่าทางสถิติการวัดระดับความคิดเห็นของผู้เชี่ยวชาญที่มีต่อ แอปพลิเคชัน Chatbot ที่พัฒนาขึ้น คือ การหาค่าเฉลี่ยเลขคณิต

ค่าเฉลี่ยเลขคณิตของข้อมูลที่ไม่ได้แจกแจงความถี่สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n x_i}{N}$$

โดยที่ $\bar{x}$ คือ ค่าเฉลี่ยในการประเมิน

$\sum_{i=1}^n x_i$ คือ ผลรวมของคะแนนที่ได้จากการประเมิน

n คือ จำนวนผู้ใช้งานทั้งหมดที่ใช้ในการประเมิน

ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน กลุ่มตัวอย่าง (ค่า S.D. ของกลุ่มตัวอย่าง) สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$S.D. = \sqrt{\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{(n - 1)}}$$

โดยที่ S.D. คือ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

x_i คือ คะแนนที่ได้จากการประเมิน

$\bar{x}$ คือ ค่าเฉลี่ยของการประเมิน

n คือ จำนวนผู้ใช้งานทั้งหมดที่ใช้ในการประเมิน

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

ผลการพัฒนาแอปพลิเคชัน Chatbot สำหรับงานบริการนักศึกษา กรณีศึกษา กองพัฒนานักศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ศูนย์พระนครศรีอยุธยา มีดังนี้

- ขั้นตอนที่ 1 ผู้ใช้งานระบบสามารถสแกน QR Code เพื่อเข้าสู่ แอปพลิเคชัน



รูปที่ 7 QR Code เพื่อเริ่มใช้งานระบบ



รูปที่ 8 หน้าจอแรกของระบบ

- ขั้นตอนที่ 2 เลือกเมนู เมื่อเข้าสู่แอปพลิเคชัน ระบบจะพาผู้ใช้เข้าสู่หน้าเมนูหลักโดยมีเมนูย่อยให้เลือก ดังรูปที่ 9



รูปที่ 9 หน้าจอเมนูหลัก

จากรูปที่ 10 หน้าเมนูหลัก จะมี 9 เมนูย่อยดังนี้

1. ประวัติความเป็นมา
2. แผนที่มหาวิทยาลัย
3. หอพักนักศึกษา
4. หลักสูตรการศึกษา
5. ปฏิทินการศึกษา
6. คู่มือนักศึกษา
7. ระเบียบนักศึกษา
8. กิจกรรมนักศึกษา

9. กรอกใบสมัครออนไลน์

- ขั้นตอนที่ 3 เมื่อกดเลือกเมนูปฏิทินจะแสดง หน้าจอ ดังรูปที่ 10



รูปที่ 10 หน้าเมนูปฏิทินการศึกษา

จากรูปเมื่อคลิกเข้าไปที่ link ของ ปฏิทินจะ แสดงหน้าจอ ดังรูปที่ 11 หากผู้ใช้ต้องการค้นหาข้อมูล สามารถดูได้จาก เมนูภายในแอปพลิเคชันที่สร้างขึ้นได้ ตลอดเวลาที่ต้องการค้นหาข้อมูล



รูปที่ 11 หน้า website ปฏิทินการศึกษา

การประเมินประสิทธิภาพของแอปพลิเคชัน Chatbot

จากตารางที่ 1 สรุปได้ว่าการพัฒนาแอปพลิเคชัน Chatbot สำหรับงานบริการนักศึกษา กรณีศึกษา กองพัฒนานักศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ มีประสิทธิภาพอยู่ในระดับมากที่สุดโดยมีค่าเฉลี่ยรวมทุกด้านเท่ากับ ($\bar{X}$ = 4.50, S.D. = 0.70) และเมื่อพิจารณาเป็นรายด้าน พบว่า ผู้เชี่ยวชาญประเมินความเหมาะสมด้านความรวดเร็วในการทำงานของระบบมาก

ที่สุด ($\bar{X}$ = 4.70, S.D. = 0.60) รองลงมาด้านความถูกต้องในการทำงานของระบบและด้านความเหมาะสมในการทำงานของระบบ มีระดับความเหมาะสมเท่ากัน ($\bar{X}$ = 4.60, S.D. = 0.30) ต่อมา ด้านการรักษาความปลอดภัยของระบบ ($\bar{X}$ = 4.10, S.D. = 0.50) และด้านความสะดวกและง่ายต่อการใช้งานของระบบ ($\bar{X}$ = 4.40, S.D. = 0.00) ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ผลการประเมินประสิทธิภาพของแอปพลิเคชัน Chatbot สำหรับงานบริการนักศึกษา กรณีศึกษา กองพัฒนานักศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ (โดยผู้เชี่ยวชาญด้านเทคโนโลยีสารสนเทศ และผู้เชี่ยวชาญด้านข้อมูล)

รายการประเมิน	$\bar{X}$	S.D.	การแปลผล
1. ด้านความเหมาะสมในการทำงานของระบบ	4.60	0.30	มากที่สุด
2. ด้านความถูกต้องในการทำงานของระบบ	4.60	0.30	มากที่สุด
3. ด้านความสะดวกและง่ายต่อการใช้งานของระบบ	4.10	0.50	มาก
4. ด้านความรวดเร็วในการทำงานของระบบ	4.70	0.60	มากที่สุด
5. ด้านการรักษาความปลอดภัยของระบบ	4.40	0.00	มาก
ค่าเฉลี่ยรวมทุกด้าน	4.50	0.20	มากที่สุด

ตารางที่ 2 ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานที่มีต่อแอปพลิเคชัน Chatbot สำหรับงานบริการนักศึกษา กรณีศึกษา กองพัฒนานักศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ (สำหรับพนักงานและนักศึกษา)

รายการประเมิน	$\bar{X}$	S.D.	การแปลผล
1. ด้านความน่าสนใจ	4.47	0.07	มาก
2. ด้านช่องทางการเข้าใช้งาน	4.48	0.71	มาก
3. ด้านความเร็วในการเข้าใช้งาน	4.36	0.01	มาก
4. ด้านความสะดวกในการใช้งาน	4.43	0.11	มาก
5. ด้านสถานที่และเวลา	4.49	0.05	มาก
6. ด้านความชอบ	4.51	0.10	มากที่สุด
ค่าเฉลี่ยรวมทุกด้าน	4.46	0.27	มาก

การประเมินผลความพึงพอใจของผู้ใช้งานที่มีต่อแอปพลิเคชัน Chatbot

จากตารางที่ 2 สรุปได้ว่าการพัฒนาแอปพลิเคชัน

Chatbot สำหรับงานบริการนักศึกษา กรณีศึกษา กองพัฒนานักศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ผู้ใช้งานมีความพึงพอใจค่าเฉลี่ยรวมทุกด้านเท่ากับ

($\bar{X}$ = 4.46, S.D. = 0.27) หากพิจารณาเป็นรายด้านพบว่า ด้านความชอบมีระดับความพึงพอใจมากที่สุด ($\bar{X}$ = 4.51, S.D. = 0.27) รองลงมาด้านสถานที่และเวลา ($\bar{X}$ = 4.49, S.D. = 0.05) ต่อมาด้านช่องทางการเข้าใช้งาน ($\bar{X}$ = 4.48, S.D. = 0.71) ต่อมาด้านความน่าสนใจ ($\bar{X}$ = 4.47, S.D. = 0.07) ต่อมาด้านความสะดวกในการใช้งาน ($\bar{X}$ = 4.43, S.D. = 0.11) และด้านความเร็วในการเข้าใช้งาน ($\bar{X}$ = 4.36, S.D. = 0.01) ตามลำดับ

สรุปผล

แอปพลิเคชัน Chatbot สำหรับงานบริการนักศึกษา กรณีศึกษา กองพัฒนานักศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ โดยการประยุกต์ใช้โปรแกรม (5) Dialogflow Application Line และ LINE Developer (6) ในการพัฒนา แอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้นมีประสิทธิภาพอยู่ในเกณฑ์ระดับมากจากการประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญทั้งด้านเทคโนโลยี และ ด้านเนื้อหา ผู้วิจัยได้ทำการทดสอบการใช้งาน โดยมีพนักงานที่เกี่ยวข้องกับการให้บริการข้อมูลนักศึกษา และ นักศึกษาเป็นผู้ทดลองใช้แอปพลิเคชัน พบว่า กลุ่มผู้ใช้งานมีความพึงพอใจต่อแอปพลิเคชันอยู่ในเกณฑ์ระดับมาก เนื่องจากสามารถนำไปใช้งานได้จริง และลดภาระงานแก่พนักงานผู้รับผิดชอบ นักศึกษาสามารถใช้แอปพลิเคชันในการถามตอบข้อสงสัยเกี่ยวกับข้อมูลฝ่ายพัฒนานักศึกษาได้อย่างรวดเร็วตลอดเวลาซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย (7) ได้ศึกษาแนวทางการพัฒนาด้านแบบแชทบอทสำหรับให้คำแนะนำระบบกองทุนอุดหนุนการวิจัย งบประมาณแผ่นดิน มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม พบว่าแชทบอทที่พัฒนาขึ้นใช้งานได้จริง และช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานในองค์กรได้เป็นอย่างดีและสอดคล้องกับบทความของ (8) การนำเทคโนโลยี AI มาใช้ในอุตสาหกรรมไม่เพียงช่วยอำนวยความสะดวกให้กับผู้จัดงานและนักเดินทางไมซ์พบว่า เทคโนโลยี AI ได้เข้ามาเพิ่มประสบการณ์ที่ดีให้กับลูกค้าและสร้างประสิทธิภาพในการดำเนินงานในธุรกิจ

ไม่ซีให้ดีขึ้นในทุก ๆ ด้าน

กิตติกรรมประกาศ

ขอกราบขอบพระคุณผู้อำนวยการกองพัฒนานักศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ในการให้คำปรึกษา และให้ความอนุเคราะห์ทางด้านข้อมูล อีกทั้งคอยให้คำแนะนำเสมอมา จนงานวิจัยได้สำเร็จ ลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

1. กองพัฒนานักศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ. วิสัยทัศน์ พันธกิจ และการวิเคราะห์ SWOT [อินเทอร์เน็ต]. 2548; [สืบค้นเมื่อวันที่ 25 ม.ค. พ.ศ. 2563]. จาก: http://student.rmutsb.ac.th/sd_we.php
2. CIPHER. Chatbot คืออะไร สำคัญแค่ไหน [อินเทอร์เน็ต]. 2560; [สืบค้นเมื่อวันที่ 25 ม.ค. 2563]. จาก: <https://blogs.cipher.co.th/what-is-chatbot>.
3. Kobkrit.com. การพัฒนาระบบหุ่นยนต์โต้ตอบสนทนาอัตโนมัติภาษาไทย (Chatbot) ด้วย Dialogflow. [อินเทอร์เน็ต]. 2561; [สืบค้นเมื่อวันที่ 21 พ.ย. 2562]. จาก: <https://bit.ly/3in47Dq>.
4. PSU IT Blog. การทดสอบซอฟต์แวร์. [อินเทอร์เน็ต]. 2562; [สืบค้นเมื่อวันที่ 27 มี.ค. 2563]. จาก: <https://bit.ly/2ZtyCjs>.
5. แนะนำ Dialogflow สำหรับการสร้าง Chatbot. [อินเทอร์เน็ต]. 2562; [สืบค้นเมื่อวันที่ 15 พ.ย. 2562]. จาก : <http://blog.niwpopkom.com/2019/04/dialogflow-chatbot.html>.
6. Line messaging api. [อินเทอร์เน็ต]. 2561; [สืบค้นเมื่อวันที่ 20 พ.ย. 2562]. จาก: mindphp.com/บทความ/line-application/5317-line-messaging-api-json.html.

7. จิรันดร บุษวดใช้. แนวทางการพัฒนาต้นแบบ
แพลตฟอร์มสำหรับให้คำแนะนำระบบขอทุนอุดหนุน
การวิจัย งบประมาณแผ่นดิน มหาวิทยาลัยราชภัฏ
นครปฐม. ใน: เอกสารประกอบการประชุมวิชาการ
ระดับชาติ ครั้งที่ 9 มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
“พัฒนางานวิจัย สร้างสรรค์อุดมศึกษาไทย ก้าวไกล
สู่ Thailand 4.0”. ประกอบการประชุมวิชาการ
ระดับชาติ ครั้งที่ 9 มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม
“พัฒนางานวิจัย สร้างสรรค์อุดมศึกษาไทย ก้าวไกล
สู่ Thailand 4.0”; 28-29 ก.ย. 2560; มหาวิทยาลัย
ราชภัฏนครปฐม. นครปฐม: โรงพิมพ์มหาวิทยาลัย
ศิลปากร; 2560. น. 1906-13.
8. MICE INTELLIGENCE CENTER. ปัญญาประดิษฐ์ (AI)
คือกุญแจสู่อนาคตสำหรับธุรกิจใหม่ [อินเทอร์เน็ต].
2561; [สืบค้นเมื่อวันที่ 20 พ.ย. 2562]. จาก:
[https://intelligence. businesseventsthailand
.com/th/pdfviews/57315573724821.pdf](https://intelligence.businesseventsthailand.com/th/pdfviews/57315573724821.pdf).



การจัดการสารเคมีและของเสียอันตรายในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

Management of Chemicals and Hazardous Waste in Environmental Engineering Laboratory Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi

ปิติพร มโนคุ่น และ ภัทรมาศ เทียมเงิน*

Pitiporn Manokhun and Phattharamat Thiamngoen *

สาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคล
สุวรรณภูมิ ศูนย์นนทบุรี อ.เมือง จ.นนทบุรี 11000

Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala
University of Technology Suvarnabhumi, Nonthaburi Campus, Meung, Nonthaburi 11000, THAILAND

*Corresponding author e-mail: Phattharamat.t@rmutsb.ac.th

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article history:

Received: 28 May, 2020

Revised: 19 June, 2020

Accepted: 6 August, 2020

Available online: 20 October, 2020

DOI: 10.14456/rj-rmutt.2020.21

Keywords: chemical,
hazardous wastes,
management, laboratory

Chemicals are used in studies, experiments, and research from the laboratory called chemical wastes, that may be in the form of solids, liquids, or gases. In case of improper handling, these wastes probably affect human health and contaminate the environment. This project was studied at the environmental engineering laboratories of the Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi. The purpose of this project is to create a management system for chemicals and hazardous wastes from laboratories, and to evaluate the knowledge of students who are laboratory users. This study can be divided into 3 parts that are chemical management in the laboratory, hazardous waste management, and prevention of hazards in the laboratory. The information systems and chemical storage platform using the GHS systems (Globally Harmonized System for Classification and Labeling of Chemicals) were investigated and were able to classify the 3 types of chemicals according to hazards in the laboratory that were physical hazards, health hazards, and environmental hazards. For chemical

waste management, the studied laboratory generated hazardous liquid wastes which were collected into corrosion-resistant containers, and hazardous solid wastes were managed by preparing a suitable container in order to collect wastes during waiting for appropriate disposal. The aspect of safety and prevention of the hazards in laboratories was developed the media to communicate to all laboratory users that are signboard and video regarding to hazard types, chemical waste types, and laboratory safety. The researcher evaluated the comprehension of 48 students by conducting pre-test and post-test in 3 studied parts. The results showed that students had more knowledge in all aspects. The increase of knowledge for chemical management in the laboratory, hazardous waste management, and prevention of hazards in the laboratory was 36%, 27%, and 24, respectively. This obviously indicates that the students understand the laboratory management system, which leads to use the laboratory much more correctly and safely.

บทคัดย่อ

การใช้สารเคมีในการเรียน การทดลองและวิจัยทำให้เกิดสารเคมีเหลือทิ้งหรือปนเปื้อนที่เรียกว่า ของเสียเคมี อาจอยู่ในรูปของของแข็ง ของเหลว หรือก๊าซ ของเสียเหล่านี้หากไม่ได้จัดการอย่างถูกวิธีอาจเกิดผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์และปนเปื้อนสู่สิ่งแวดล้อมได้ การจัดทำโครงการครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อจัดทำระบบการจัดการสารเคมี และของเสียอันตรายจากห้องปฏิบัติการ วิศวกรรมสิ่งแวดล้อมและประเมินผลความรู้ นักศึกษา สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม โดยแบ่งการศึกษออกเป็น 3 ด้าน คือ การจัดการสารเคมีในห้องปฏิบัติการ ด้านการจัดการของเสียอันตราย การหาแนวทางป้องกันอันตราย อันเกิดจากห้องปฏิบัติการ ผลการศึกษาการจัดเก็บสารเคมีโดยใช้หลักจีเอชเอส สามารถจำแนกสารเคมีตามความเป็นอันตรายออกเป็น 3 ด้าน ได้แก่ 1. ด้านกายภาพ 2. ด้านสุขภาพ และ 3. ด้านสิ่งแวดล้อม การจัดการของเสียเคมี สามารถแบ่งประเภทของเสียได้เป็น 2 ประเภท คือ 1. ของเสียอันตรายชนิดของเหลว 2. ของเสียอันตรายชนิดของแข็ง โดยจัดเตรียมภาชนะรองรับ

แยกตามประเภทเพื่อรวบรวมส่งกำจัดอย่างถูกวิธี แนวทางการป้องกันอันตรายในห้องปฏิบัติการ ผู้ศึกษาจัดทำป้ายให้ความรู้และวิดีโอเกี่ยวกับประเภทความเป็นอันตราย ประเภทของเสียเคมีและวิธีการป้องกันอันตราย ในการใช้ห้องปฏิบัติการ ทำการประเมินความรู้ ความเข้าใจของนักศึกษาจำนวน 48 คน แบ่งการทดสอบเป็น 3 ด้าน ดังนี้ 1. การจัดเก็บสารเคมีในห้องปฏิบัติการ จากผลการทดสอบนักศึกษามีความรู้เพิ่มขึ้นร้อยละ 36 2. การจัดการของเสียในห้องปฏิบัติการ จากผลการทดสอบนักศึกษามีความรู้เพิ่มขึ้นร้อยละ 26.5 และ 3. การป้องกันอันตรายในห้องปฏิบัติการ จากผลการทดสอบนักศึกษามีความรู้เพิ่มขึ้นร้อยละ 23.9 ซึ่งแสดงให้เห็นว่านักศึกษามีความเข้าใจในการใช้ห้องปฏิบัติการอย่างถูกต้องและปลอดภัยมากยิ่งขึ้น

คำสำคัญ: สารเคมี ของเสียอันตราย การจัดการห้องปฏิบัติการ

บทนำ

สารเคมีนั้นมีความสำคัญในการทดลองและการทำงานวิจัยในห้องปฏิบัติการมีหลายชนิดขึ้นอยู่กับวัตถุประสงค์ของการทดลองในปฏิบัติการและงานวิจัย โดยแบ่งออกเป็นกลุ่มใหญ่ ๆ 2 กลุ่ม คือ สารประกอบอินทรีย์ และสารประกอบอนินทรีย์ (1) การจำแนกความเป็นอันตรายของสารเคมีที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลายคือ ระบบการจำแนกประเภทและการติดฉลากสารเคมีที่เป็นระบบเดียวกันทั่วโลก (Globally Harmonised System for Classification and Labeling of Chemicals, GHS) (2)

การใช้สารเคมีในการเรียน การสอน รวมถึงงานวิจัยต่าง ๆ ทำให้เกิดสารเคมีเหลือทิ้งหรือปนเปื้อนเรียกว่า ของเสียอันตรายจากห้องปฏิบัติการ ซึ่งได้แก่ สารเคมีเหลือใช้ในห้องปฏิบัติการเคมี สารเคมีที่ไม่ทราบชื่อ สารเคมีที่หมดอายุหรือเสื่อมสภาพ สารเคมีที่หกหรือไหลและเก็บกลับคืนมา ตัวทำละลายอินทรีย์ กล่าวโดยสรุปคือทุกสิ่งที่ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อีกต่อไปในห้องปฏิบัติการเคมีและจำเป็นต้องกำจัดทิ้งโดยวิธีใดวิธีหนึ่ง (3-5) นอกจากนี้ยังรวมถึงวัตถุอื่น ๆ ที่ถูกปนเปื้อน เช่น ถังมือ กระดาษ เป็นต้น (6) จัดว่าเป็นของเสียอันตรายทั้งสิ้น ของเสียอันตรายประเภทของเสียสารเคมีส่งผลกระทบต่อสุขภาพของผู้เกี่ยวข้องและสิ่งแวดล้อม เพราะการศึกษาวิจัยมักต้องใช้สารเคมีที่มีทั้งคุณและโทษมากมาย ผู้ปฏิบัติงานและผู้เกี่ยวข้องจึงได้รับผลกระทบทั้งจากการเป็นผู้ที่ใช้สารเคมีเองโดยตรงและหรือผลกระทบทางอ้อมจากมลภาวะที่มีในห้องปฏิบัติการ เพราะการทิ้งโดยไม่แยกกลุ่มแยกประเภทอาจทำให้ได้รับอันตรายจากของเสีย นั้น เช่น การระเบิดเพราะสารเคมีในของเสียทำปฏิกิริยากันและอาจเป็นช่องทางของการรั่วไหลแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อม (2)

ปัจจุบันกรมควบคุมมลพิษ ได้กำหนดวิธีการคัดแยกประเภทของเสียห้องปฏิบัติการสิ่งแวดล้อมไว้ 2 ประเภท ดังนี้ 1. ของเสียประเภทที่ไม่เป็นอันตราย ได้แก่ ของเสียทั่วไป กระดาษ/พลาสติกที่รีไซเคิลได้ แก้วของเสียที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้ว สารละลายมาตรฐาน

2. ของเสียประเภทที่เป็นอันตราย ได้แก่ ของเสียประเภทสารละลายกรดหรือสารละลายด่าง ของเสียประเภทกรดที่มีโลหะผสมอยู่ ของเสียประเภทสารอินทรีย์ที่มีสารฮาโลเจนผสมอยู่ ของเสียประเภทสารอินทรีย์ที่ไม่มีสารฮาโลเจนผสมอยู่ โดยการจัดการของห้องปฏิบัติการส่วนใหญ่จะใช้หลักการแยกเก็บของเสียตามประเภทการวิเคราะห์ (7) หรือแยกเก็บตามประเภทที่เป็นอันตราย (6) แล้วจึงรวบรวมเพื่อส่งกำจัดต่อไป นอกจากนี้ยังมีการทำให้เป็นกลางโดยเฉพาะของเสียประเภทของเหลวที่มีสภาพเป็นกรด หรือด่างเข้มข้น การนำกลับมาใช้ซ้ำหรือนำกลับมาใช้ใหม่ เช่น ตัวทำละลายที่ไม่มีสิ่งเจือปนที่ระเหยอยู่มากนัก หรืออะซิโตนที่ใช้ล้างภาชนะสามารถรวบรวมนำไปกลั่นลำดับส่วนเพื่อนำกลับมาใช้ใหม่ได้ การตกตะกอนโลหะหนักในน้ำเสียเพื่อแยกออกการส่งกำจัด รวมถึงการลดปริมาณตัวอย่างที่ใช้ (7) เพื่อให้เกิดของเสียอันตรายจากห้องปฏิบัติการน้อยที่สุด

ห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ จัดตั้งขึ้นเพื่อประกอบการเรียน การสอน ในวิชาต่าง ๆ เช่น วิชาปฏิบัติการเคมีสำหรับวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ปฏิบัติการทางวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม โครงการทางวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม เป็นต้น ห้องปฏิบัติการนับเป็นแหล่งก่อให้เกิดของเสียอันตรายซึ่งยังไม่มีมาตรการบำบัดให้ถึงชนิดและปริมาณของของเสียสารเคมีที่เกิดขึ้นแน่ชัดในแต่ละปีจนถึงปัจจุบัน และยังไม่มีการจำแนกประเภทของเสียที่เกิดจากห้องปฏิบัติการอย่างชัดเจน รวมถึงแนวทางการจัดการของเสียสารเคมีที่ถูกต้องและเหมาะสม งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแนวทางจัดการสารเคมี และของเสียอันตรายที่เกิดขึ้นในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมในการจัดเก็บและรอกการกำจัดอย่างเหมาะสม ตลอดจนการป้องกันอันตรายและแก้ไขปัญหอนี้เกิดจากของเสียเคมีจากห้องปฏิบัติการ พร้อมทั้งถ่ายทอดองค์ความรู้ ความเข้าใจในการจัดการของเสียเคมีแก่นักศึกษาและผู้ที่เกี่ยวข้องที่ปฏิบัติงานในห้องปฏิบัติการ

วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินการศึกษาแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ประกอบด้วย ส่วนที่ 1. การศึกษาการจัดการสารเคมี ส่วนที่ 2. การศึกษาประเภทและจัดการของเสียเคมีในห้องปฏิบัติการ และส่วนที่ 3. การหาแนวทางการป้องกันอันตรายอันเกิดจากของเสียจากห้องปฏิบัติการ โดยมีรายละเอียด ดังนี้

1. การศึกษาการจัดการสารเคมี โดยทำการสำรวจชนิดของสารเคมีในห้องปฏิบัติการสาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม และจำแนกสารเคมีโดยใช้ระบบการจำแนกประเภทและการติดฉลากสารเคมีที่เป็นระบบเดียวกันทั่วโลก (Globally Harmonized System for Classification and Labeling of Chemicals, GHS) เป็นระบบการจำแนกประเภท การติดฉลาก และการแสดงรายละเอียดในเอกสารข้อมูลความปลอดภัย (Safety Data Sheet, SDS) ของสารเคมีและเคมีภัณฑ์ที่องค์การสหประชาชาติพัฒนาขึ้นเพื่อให้ใช้สื่อสารและมีความเข้าใจเกี่ยวกับอันตรายที่เกิดจากสารเคมีนั้น ๆ ในทิศทางเดียวกันโดยระบบนี้มีการจัดแบ่งความเป็นอันตรายออกเป็น 3 ด้าน คือ ด้านกายภาพ ด้านสุขภาพ และด้านสิ่งแวดล้อม แต่ละด้านแบ่งย่อยเป็นชนิดต่าง ๆ และใช้สัญลักษณ์แสดงความเป็นอันตราย 9 รูป ดังรูปที่ 1 โดยแสดงนัยถึงความเสี่ยงของอันตรายของสาร ดังนั้นสารที่อยู่ในกลุ่มที่มีความเป็นอันตรายอย่างเดียวกัน อาจใช้สัญลักษณ์ไม่เหมือนกัน ทั้งนี้ขึ้นอยู่กับระดับความรุนแรงของอันตรายประเภทนั้น ๆ (8) โดยการติดฉลากแสดงความเป็นอันตรายบนภาชนะบรรจุสารเคมีและจัดเก็บตามหมวดหมู่อักษรในตู้เก็บสารเคมี ตัวอย่างแบบฟอร์มในการจำแนกสารเคมีในห้องปฏิบัติการแสดงดังตารางที่ 1

2. การศึกษาประเภทและจัดการของเสียเคมีในห้องปฏิบัติการ ทำการศึกษาประเภทของของเสียที่เกิดขึ้นจากการทดลอง วิจัย ในห้องปฏิบัติการ จากนั้นจัดแยกประเภทของของเสีย รวมทั้งจัดหาภาชนะรองรับแยกตามประเภท กำหนดจุดทิ้งและรวบรวมเพื่อรอการกำจัด

Flame	Flame over circle	Exploding bomb
		
Corrosion	Gas cylinder	Skull and crossbones
		
Exclamation mark	Environment	Health Hazard
		

รูปที่ 1 สัญลักษณ์แสดงความเป็นอันตราย 9 รูป

ตารางที่ 1 แบบฟอร์มในการจำแนกสารเคมีในห้องปฏิบัติการ

ชื่อสาร	ประเภทความเป็นอันตราย	สัญลักษณ์แสดงความเป็นอันตราย	ตู้เก็บ	รหัสสารเคมี

3. การหาแนวทางการป้องกันอันตรายอันเกิดจากของเสียจากห้องปฏิบัติการ โดยจัดทำป้ายและสื่อให้ความรู้แก่นักศึกษา ทำการประเมินผลความรู้โดยใช้แบบทดสอบ ทำการทดสอบก่อนและหลังการให้ความรู้แก่นักศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ จำนวน 48 คน (ทดสอบ 100 เปอร์เซ็นต์) ศึกษาในระดับชั้นปีที่ 1-4 แบ่งการทดสอบเป็น 3 ด้าน ได้แก่ 1. ด้านการจัดเก็บสารเคมีในห้องปฏิบัติการ 2. ด้านการจัดการของเสียในห้องปฏิบัติการ และ 3. ด้านการป้องกันอันตรายในห้องปฏิบัติการ วิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณโดยใช้สถิติพรรณนาและวิเคราะห์ข้อมูลเชิงคุณภาพโดยวิธีการจำแนกเป็นความเรียง

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

1. การจัดการสารเคมีในห้องปฏิบัติการ

สารเคมีที่ใช้ภายในห้องปฏิบัติการวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

ส่วนใหญ่ แบ่งเป็นสารเคมีที่ใช้ในการเรียน การสอน ปฏิบัติการพื้นฐานและปฏิบัติการทางด้านวิศวกรรม สิ่งแวดล้อมร้อยละ 70 รวมถึงการศึกษาโครงการของ นักศึกษาร้อยละ 30 แต่เดิมมีการจัดเก็บภายในตู้เก็บ สารเคมีแบ่งแยกตามตัวอักษร แยกสารเคมีที่เป็นของแข็ง และของเหลวออกจากกัน โดยไม่มีการระบุความเป็น อันตรายของสารเคมี การดำเนินการศึกษาได้ทำการ จำแนกประเภทความเป็นอันตรายของสารเคมีตามระบบสากล GHS ในห้องปฏิบัติการ

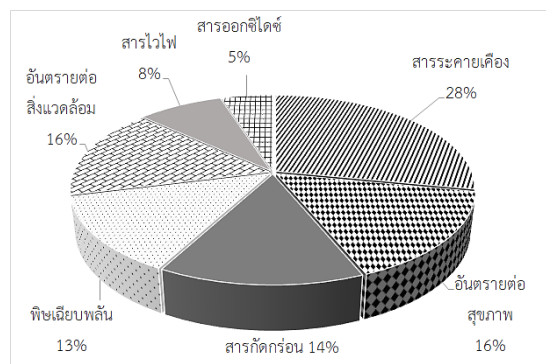
จากการศึกษาชนิดสารเคมีในห้องปฏิบัติการ สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม พบสารเคมีในห้องปฏิบัติการ ทั้งหมด 101 ชนิด สามารถแยกประเภทความเป็น อันตรายได้ 81 ชนิด ไม่จัดเป็นสารเคมีอันตราย 20 ชนิด เมื่อนำมาแยกประเภทความเป็นอันตรายของสารเคมี ตามระบบ GHS จำแนกออกเป็น 3 ด้าน ได้แก่ 1. ด้าน ภายนอกกายภาพ แบ่งประเภทความเป็นอันตรายออกเป็น 3 ประเภท คือ 1) สารไวไฟ 2) สารกัดกร่อน และ 3) สาร ออกซิไดซ์ 2. ด้านสุขภาพ แบ่งประเภทความเป็น อันตรายออกเป็น 3 ประเภท คือ 1) การระคายเคือง 2) ความเป็นพิษเฉียบพลัน และ 3) สารกัดกร่อน และ 3.ด้านสิ่งแวดล้อม แบ่งประเภทความเป็นอันตราย ออกเป็นความเป็นอันตรายต่อสิ่งแวดล้อม ซึ่งพบว่า สารเคมีประเภทการระคายเคืองมีจำนวนมากเป็นอันดับ หนึ่ง มีจำนวน 34 ชนิด โดยจำนวนชนิดสารเคมีแบ่งตาม ความเป็นอันตรายแสดงดังตารางที่ 2 และรูปที่ 1

ทั้งนี้สารเคมีบางชนิดอาจจำแนกประเภทความ อันตรายได้หลายประเภทและพบว่ามีการศึกษาบางชนิดไม่ จัดเป็นสารประเภทที่มีความเป็นอันตราย ซึ่งเป็นสารเคมี ที่ใช้สำหรับการเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อในการวิเคราะห์ ชนิดและหาปริมาณของจุลินทรีย์ จากนั้นทำการติดฉลาก แสดงความเป็นอันตรายของสารเคมีโดยระบบ GHS และ จัดวางสารเคมีเป็นหมวดหมู่อักษรโดยติดป้ายแสดงลำดับ ของสารไว้ที่ขวดและจัดวางแยกตามหมวดหมู่ตัวอักษร ติดป้ายรายการบริเวณหน้าตู้เก็บสารเคมีแสดงลำดับสาร ชื่อสารเคมี แยกตามหมวดหมู่อักษรเพื่อสะดวกต่อการ

หยิบใช้ ทำการแยกเก็บสารเคมีชนิดของแข็งและสารเคมี ชนิดของเหลวออกจากกัน ส่วนสารละลายที่เตรียมขึ้นใน ห้องปฏิบัติการจากการเรียนและการจัดทำโครงการนั้น ผู้ เตรียมต้องติดฉลากไว้ข้างขวด โดยมีรายละเอียดต่าง ๆ ได้แก่ ชนิดของสาร วันที่เตรียม วันหมดอายุ เพื่อให้ผู้อื่น ทราบและทำการแยกเก็บในตู้เก็บสารเคมีอีกตู้หนึ่ง

ตารางที่ 2 จำนวนชนิดสารเคมีในห้องปฏิบัติการแบ่ง ตามประเภทความเป็นอันตราย

ประเภท	จำนวนชนิด
การระคายเคือง	34
เป็นอันตรายต่อสุขภาพ	19
สารกัดกร่อน	17
พิษเฉียบพลัน	16
อันตรายต่อสิ่งแวดล้อม	13
สารไวไฟ	10
สารออกซิไดซ์	6



รูปที่ 2 ร้อยละของความเป็นอันตรายของสารเคมี ประเภทต่าง ๆ ที่ใช้ในห้องปฏิบัติการ

2. การจัดการของเสียในห้องปฏิบัติการ

จากการศึกษาของเสียในห้องปฏิบัติการ วิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ก่อนดำเนินการศึกษาไม่มีการแยก ประเภทและสถานที่จัดเก็บของเสียชนิดของแข็งอย่าง ชัดเจน ส่วนของเสียสารเคมีที่เป็นของเหลวมีถังแยกของ เสียที่มีฤทธิ์เป็นกรดและด่างออกจากกันเท่านั้น ไม่มีภาต พลาสติกรอง (Secondary Container) เพื่อป้องกันการ

หก รั่วไหลของของเสีย ไม่มีป้ายบอกรายละเอียดข้อมูลต่าง ๆ จากการดำเนินการศึกษาพบว่าของเสียที่เกิดขึ้นในห้องปฏิบัติการแบ่งได้เป็น 2 ประเภท ได้แก่ ของเสียสารเคมีที่เป็นของเหลวและของเสียชนิดของแข็ง ซึ่งแต่ละประเภทมีการจัดการ ดังนี้



รูปที่ 3 ถังที่เตรียมไว้รองรับของเสียสารเคมีชนิดของเหลว

2.1 ของเสียสารเคมีที่เป็นของเหลวที่เกิดขึ้นในห้องปฏิบัติการมาจากการศึกษาในรายวิชาปฏิบัติที่มีการทดลองการวิเคราะห์งานวิจัยต่าง ๆ เมื่อทำการทดสอบค่าความเป็นกรดต่าง ของเสียเคมีที่เกิดขึ้นส่วนมาก มีค่าความเป็นกรดเท่ากับ 0 แสดงว่าเป็นกรดแก่และค่าความเป็นด่างสูงซึ่งจัดเป็นของเสียประเภทเคมีกัดกร่อน (Corrosive Chemical) ผู้ศึกษาจึงจัดเตรียมภาชนะรองรับของเสียสารเคมีที่เป็นของเหลวแยกเป็น 3 ภาชนะ ได้แก่ ถังประเภทกรด ถังประเภทด่าง และถังที่รองรับของเสียจากการวิเคราะห์ COD (Chemical Oxygen Demand) ซึ่งมีกรดซัลฟิวริกและโครเมียม (9) เจือปนในของเสียและมีปริมาณการวิเคราะห์มากกว่าพารามิเตอร์อื่นในห้องปฏิบัติการ แสดงดังรูปที่ 3 โดยมีป้ายแสดงความเป็นอันตรายของของเสียเคมี ข้อมูลที่ระบุบนป้ายประกอบด้วย ประเภทของของเสีย ชื่อห้องปฏิบัติการ วันที่เริ่มบรรจุ และวันที่หยุดบรรจุของเสีย ประเภทของเสีย/ประเภทความเป็นอันตราย ส่วนประกอบของของเสีย (เท่าที่ระบุได้) โดยถังที่ใช้รองรับของเสียเป็นถังพลาสติกประเภท HDPE PP หรือ PE ที่มีฝาปิดมิดชิด

ขนาดบรรจุ 10-20 ลิตร ที่ถังรองรับมีขีดบอกปริมาตรในการเทของเสีย โดยปริมาณของเสียไม่ควรเกิน 80% ของความจุของภาชนะ เพื่อความปลอดภัยในการเก็บและการเคลื่อนย้าย จัดเตรียมภาชนะพลาสติก (Secondary Container) รองถังที่บรรจุของเสีย เพื่อป้องกันการหก รั่วไหลของของเสีย

2.2 ประเภทของของเสียชนิดของแข็งที่เกิดขึ้นในห้องปฏิบัติการ ได้แก่

1. ขวดแก้ว ขวดสารเคมีที่ใช้หมดแล้ว เช่น ขวดแก้วเปล่าที่เคยบรรจุสารเคมีทั้งชนิดของเหลว และ ของแข็ง ขวดพลาสติกเปล่าที่เคยบรรจุสารเคมีทั้งชนิดของเหลวและของแข็ง

2. เครื่องแก้ว หรือขวดสารเคมีแตก เช่น ปิเปต บิวเรต หลอดทดลอง ปีกเกอร์ที่แตกหัก ชำรุด

3. ขยะปนเปื้อนสารเคมี ได้แก่ ขยะที่มีการปนเปื้อนสารเคมี หรือบรรจุภัณฑ์ที่ปนเปื้อนสารเคมี เช่น กระดาษชำระที่เช็ดสารเคมีหก ถังมือ เศษผ้า หน้ากาก

การวางภาชนะรองรับของเสียชนิดของแข็ง ได้แก่ อุปกรณ์เครื่องแก้วแตก ขวดแก้วและภาชนะบรรจุสารเคมีใช้แล้วและสารเคมีหมดอายุทำการรวบรวมบนชั้นวางด้านหน้าห้องปฏิบัติการ ในส่วนของเครื่องแก้วที่แตกจัดเตรียมถังพลาสติกแบบมีฝาปิดรองรับ ส่วนขยะที่มีการปนเปื้อนสารเคมี เช่น กระดาษชำระ ถังมือที่ใช้แล้วทิ้งลงในถังขยะบริเวณจุดล้างอุปกรณ์ซึ่งแยกออกจากถังขยะทั่วไป มีฝาปิดมิดชิดและเก็บรวบรวมทุกวันโดยจัดเก็บในพื้นที่จัดเก็บที่ได้เตรียมไว้เพื่อรอการนำไปกำจัดอย่างถูกวิธี

3. การหาแนวทางป้องกันอันตรายอันเกิดจากห้องปฏิบัติการ

ก่อนการดำเนินการศึกษา แนวทางป้องกันอันตรายอันเกิดจากห้องปฏิบัติการมีเพียงการแนะนำกฎระเบียบ ข้อควรปฏิบัติในการใช้ห้องปฏิบัติการจากอาจารย์ผู้สอนในแต่ละวิชานั้น เมื่อมีการดำเนินการ

ศึกษาจึงได้จัดทำป้ายและสื่อเพื่อใช้เป็นแนวทางป้องกันอันตราย ดังนี้

3.1 จัดทำป้ายให้ความรู้ ผู้ศึกษาได้จัดทำโปสเตอร์ให้ความรู้ในเรื่องประเภทของสารเคมี ประเภทของของเสียเคมี และมาตรการเชิงป้องกันเกี่ยวกับสารเคมีอันตราย ติดในห้องปฏิบัติการบริเวณที่ง่ายต่อการอ่านและการสังเกต

3.2 จัดทำสื่อให้ความรู้แก่นักศึกษา สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม สื่อให้ความรู้เป็นวิดีโอที่เกี่ยวกับประเภทความเป็นอันตรายของสารเคมี ประเภทของของเสียเคมีตามระบบ GHS การจัดการของเสีย และแนวทางการป้องกันอันตรายในห้องปฏิบัติการ ความยาว 4.56 นาที ได้เผยแพร่ทางสื่อออนไลน์เพื่อให้นักศึกษาสามารถเข้าถึงข้อมูลได้ง่าย



รูปที่ 4 การแต่งกายป้องกันส่วนบุคคล

3.3 การป้องกันส่วนบุคคล จากการสำรวจการใช้อุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคลนักศึกษาในห้องปฏิบัติการสาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม ซึ่งปัจจุบันนักศึกษาที่เข้ามาใช้ห้องปฏิบัติการในการทำการทดลอง ในการเรียน หรือการศึกษาปริญญาโทพบว่ามีร้อยละ 73 มีการสวมใส่อุปกรณ์ป้องกันครบถ้วน ร้อยละ 37 มีการสวมใส่อุปกรณ์

ป้องกันบางส่วนเท่านั้น เช่น การสวมเสื้อกาวน์ หรือถุงมือเพียงอย่างเดียว ทั้งนี้ขึ้นกับการใช้สารเคมีแต่ละประเภทที่แตกต่างกันออกไปตามความอันตราย แต่อย่างไรก็ตามหากมีการทำการศึกษาที่เกิดปฏิกิริยารุนแรง หรือเกิดก๊าซที่เป็นอันตราย จำเป็นต้องแต่งกายและสวมใส่อุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคลให้เหมาะสม เพื่อป้องกันอันตรายที่อาจจะเกิดจากปฏิบัติการ โดยมีการสวมใส่หน้ากากป้องกันไอระเหยจากสารเคมี แวนตาถุงมือยาง ให้เหมาะสมกับการปฏิบัติงานนั้น ๆ ดังรูปที่ 4

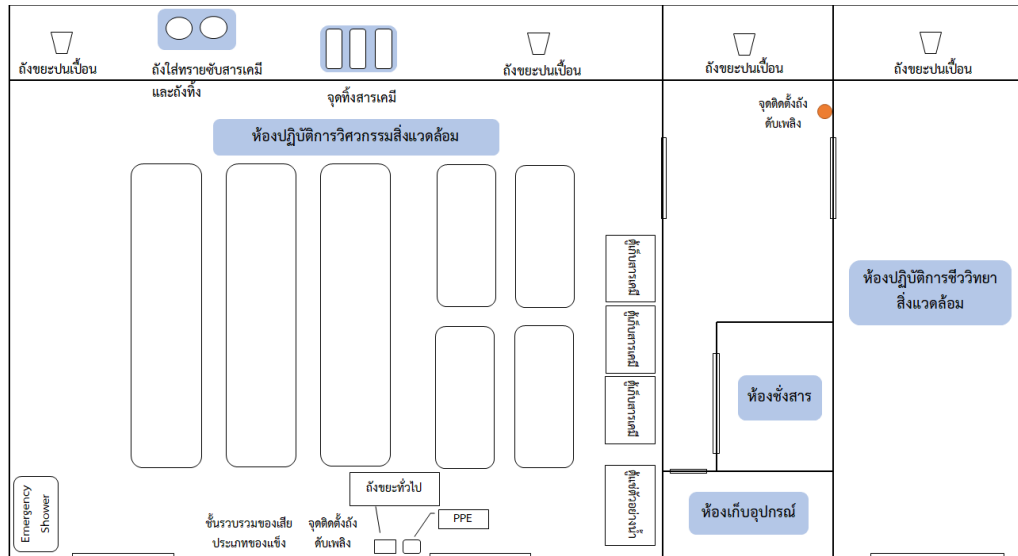


รูปที่ 5 ภาชนะบรรจุทรายสำหรับซับสารเคมี

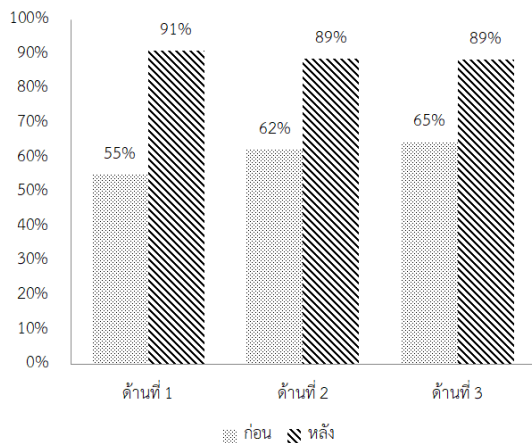
3.4 การจัดเตรียมอุปกรณ์ป้องกันอันตรายที่จะเกิดขึ้นในห้องปฏิบัติการ ผู้ศึกษาทำการเตรียมอุปกรณ์ป้องกันอุบัติเหตุ ได้แก่ ถังใส่ทรายสำหรับซับสารเคมี (8) ที่หกหรือรั่วไหลลงตามพื้นเพื่อป้องกันการแพร่กระจายของสารเคมี ในการดูดซับสารเคมีประเภทตัวทำละลาย กรด หรือด่าง เนื่องจากทรายเป็นวัสดุดูดซับที่มีความเฉื่อยไม่ว่องไวในการทำปฏิกิริยาเคมี อุปกรณ์แสดงดังรูปที่ 5 ซึ่งวิธีการใช้อุปกรณ์ได้แสดงในสื่อที่ใช้ในการให้ความรู้แก่นักศึกษา และทำการติดตั้งถึงดับเพลิงชนิดผงเคมีแห้งซึ่งเหมาะกับการดับเพลิงที่เกิดจากวัสดุทั่วไปจากน้ำมันเชื้อเพลิง ก๊าซ หรือของเหลวที่ไวไฟ และการลุกไหม้จากไฟที่เกิดจากไฟฟ้า จำนวน 2 จุด คือ บริเวณหน้าห้องปฏิบัติการและบริเวณผนังใกล้ห้องชีววิทยา เพราะเป็นบริเวณที่สังเกตเห็นได้ง่าย สะดวกต่อการใช้งาน นอกจากนี้ได้จัดทำแผนผังการวางถังดับเพลิงและจุด

วางแผนรองรับของเสียต่าง ๆ ในห้องปฏิบัติการ แสดงดังรูปที่ 6 โดยถึงดับเพลิงผ่านการตรวจสอบสภาพถังทุก 6 เดือน พร้อมวิธีใช้งาน ซึ่งทางคณะกรรมการอบรมเรื่องการ

ดับเพลิงเบื้องต้นและการซ้อมหนีไฟให้นักศึกษาเป็นประจำทุกปี



รูปที่ 6 แผนผังการวางถังดับเพลิงและภาชนะรองรับของเสียในห้องปฏิบัติ



รูปที่ 7 เปรียบเทียบความแตกต่างของผลการทดสอบก่อนและหลังให้ความรู้

3.5 ประเมินผลความรู้ของนักศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม จำนวน 48 คน เป็นเพศชาย 19 คน เพศหญิง 29 คน ที่เข้าใช้ห้องปฏิบัติการ โดยทำแบบทดสอบก่อนและหลังการจัดการอบรมให้ความรู้ระยะเวลาดำเนินการทดสอบห่างกัน 1 สัปดาห์ โดยแบบทดสอบเป็นแบบปรนัยจำนวนทั้งหมด 30 ข้อ

แบ่งเป็น 3 ด้าน เพื่อประเมินความรู้ ความเข้าใจของนักศึกษาหลังจากได้รับชมสื่อและป้ายให้ความรู้ โดยมีคำถามด้านต่าง ๆ ดังนี้ 1. ด้านการจัดเก็บสารเคมีในห้องปฏิบัติการ มีจำนวน 10 ข้อ ตัวอย่างเช่น การจำแนกประเภทของสารเคมีตามระบบ GHS ประกอบด้วยสัญลักษณ์แสดงความเป็นอันตรายที่ประเภท ระบบ GHS แบ่งประเภทความเป็นอันตรายเป็นกี่ด้านอะไรบ้าง Safety Data Sheet (SDS) คืออะไร การเก็บรักษาสารเคมีข้อใดถูกต้อง ข้อใดกล่าวถูกต้องเกี่ยวกับการจัดเก็บสารเคมีในบรรจุภัณฑ์ที่มีวัสดุเหมาะสม 2. ด้านการจัดการของเสียอันตราย มีจำนวน 10 ข้อ ตัวอย่างเช่น ของเสียภายในห้องปฏิบัติการหมายถึงอะไร ของเสียสารเคมีกักต่อนมีค่าความเป็นกรดเป็นด่างเท่าไร การติดฉลากบนภาชนะบรรจุของเสียควรคำนึงถึงอะไร ข้อใดคือข้อควรปฏิบัติและข้อควรระวังในการจัดการของเสีย 3. ด้านการป้องกันอันตรายในห้องปฏิบัติการมีจำนวน 10 ข้อ ตัวอย่างเช่น การเตรียมสารเคมีประเภทกรด ต่างหรือสารระเหยควรทำอย่างไร หากผิวหนังเราโดนกรด

ควรทำอะไรเป็นลำดับแรก ถ้ากรดที่เตรียมหลงพื้น ควรทำอะไร เป็นต้น เมื่อทำการวิเคราะห์ผลประเมินแบบทดสอบในแต่ละด้านโดยนำร้อยละจำนวนนักศึกษาที่ตอบถูกมาทำการเปรียบเทียบความแตกต่างของผลการประเมินแบบทดสอบทั้งก่อนและหลังให้ความรู้ พบว่าหลังจากได้ให้ความรู้ในแต่ละด้านผลที่ได้คือ ด้านที่ 1 เรื่องการจัดเก็บของเสียมี จำนวนนักศึกษาที่ตอบถูกก่อนให้ความรู้คิดเป็นร้อยละ 55 หลังจากให้ความรู้จำนวนนักศึกษาที่ตอบถูกคิดเป็นร้อยละ 91 ด้านที่ 2 เรื่องการจัดการของเสียอันตราย จำนวนนักศึกษาที่ตอบถูกก่อนให้ความรู้คิดเป็นร้อยละ 62 หลังจากให้ความรู้จำนวนนักศึกษาที่ตอบถูกคิดเป็นร้อยละ 89 ด้านที่ 3 เรื่องการป้องกันในห้องปฏิบัติการ จำนวนนักศึกษาที่ตอบถูกก่อนให้ความรู้ร้อยละ 65 หลังจากให้ความรู้จำนวนนักศึกษาที่ตอบถูกคิดเป็นร้อยละ 89 แสดงดังรูปที่ 7 โดยภาพรวมของการทดสอบหลังได้รับความรู้ พบว่านักศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมมีความรู้ ความเข้าใจ สูงกว่าร้อยละ 80 ซึ่งถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ดีมาก อีกกว่าร้อยละ 10 ที่นักศึกษาสาขาวิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อมไม่เข้าใจ เช่น เรื่องความรู้เกี่ยวกับระบบ GHS ประเภทของของเสียเคมี การรับสารเคมีเข้าสู่ร่างกายนั้น ภายหลังจากประเมินผลแบบทดสอบแล้ว ผู้ศึกษาดำเนินการจัดประชุมเพื่อสรุปผลการทดสอบ แลกเปลี่ยนข้อคิดเห็น และให้ความรู้ในเรื่องที่นักศึกษาไม่เข้าใจดังกล่าวข้างต้นเพื่อให้ นักศึกษามีความรู้ ความเข้าใจอย่างถูกต้อง

สรุปผล

การจัดการระบบข้อมูลและการจัดการสารเคมี จำแนกประเภทของสารเคมีตามระบบ GHS ในห้องปฏิบัติการ แยกประเภทความเป็นอันตรายของสารเคมีตามระบบ GHS ออกเป็น 3 ด้าน ได้แก่ 1. ด้านกายภาพ 2. ด้านสุขภาพ และ 3. ด้านสิ่งแวดล้อม การจัดการของเสียประเภทของเสียสารเคมีที่เป็นของเหลวที่เกิดขึ้นในห้องปฏิบัติการส่วนใหญ่จัดเป็นของเสียประเภทเคมีกัดกร่อน ประเภทของของเสียชนิดของแข็ง แบ่ง

ออกเป็น 1. ขวดแก้ว ขวดสารเคมีที่ใช้หมดแล้ว 2. เครื่องแก้ว หรือขวดสารเคมีแตก 3. ขยะปนเปื้อนสารเคมี โดยจัดภาชนะรองรับของเสียแต่ละชนิดให้เหมาะสมและมีชั้นวางแยกประเภทชัดเจน ทำการประเมินความรู้ ความเข้าใจของนักศึกษาจำนวน 48 คน แบ่งการทดสอบเป็น 3 ด้าน ดังนี้ ด้านที่ 1) การจัดเก็บสารเคมีในห้องปฏิบัติการ จากผลการทดสอบนักศึกษามีความรู้เพิ่มขึ้นร้อยละ 36 ด้านที่ 2) การจัดการของเสียในห้องปฏิบัติการ จากผลการทดสอบนักศึกษามีความรู้เพิ่มขึ้นร้อยละ 27 ด้านที่ 3) การป้องกันอันตรายในห้องปฏิบัติการ จากผลการทดสอบนักศึกษามีความรู้เพิ่มขึ้นร้อยละ 24 เมื่อเปรียบเทียบนักศึกษามีความรู้ความเข้าใจในเรื่องการจัดเก็บสารเคมีเพิ่มมากขึ้นมากที่สุด รองลงมาคือ เรื่องการจัดการของเสียอันตราย ส่วนเรื่องการป้องกันอันตรายในห้องปฏิบัติการจำเป็นต้องให้ความรู้ในเรื่องนี้เพิ่มเติม

แนวทางป้องกันอันตรายอันเกิดจากห้องปฏิบัติการ ผู้ศึกษาได้จัดทำป้ายให้ความรู้เรื่องและสื่อวิดีโอที่เกี่ยวกับประเภทความเป็นอันตรายของสารเคมี ประเภทของของเสียเคมี และวิธีการป้องกันอันตรายในการใช้ห้องปฏิบัติการ โดยสิ่งสำคัญสำหรับนักศึกษาที่ใช้ห้องปฏิบัติการควรคำนึงเป็นอันดับแรกคือ การแยกของเสียอันตรายออกจากของเสียไม่อันตรายเพื่อช่วยลดปริมาณของเสียอันตราย ระมัดระวังการรั่วไหลหรือหกหล่นซึ่งอาจทำให้เกิดปฏิกิริยารุนแรงจนก่อให้เกิดเพลิงไหม้หรือระเบิดซึ่งเป็นอันตรายต่อตัวเองและสถานศึกษาได้ สถานที่เก็บรวบรวมของเสียควรเก็บในที่มืดซิด ไม่ควรเก็บไว้นานใกล้ท่อระบายน้ำเพื่อป้องกันการรั่วไหล รวมทั้งการสวมอุปกรณ์ป้องกันส่วนบุคคลเพื่อป้องกันอันตรายอันเกิดจากห้องปฏิบัติการ

ข้อเสนอแนะในการดำเนินงานขั้นตอนต่อไปควรจัดทำระบบจัดเก็บข้อมูลสารเคมีให้สามารถตรวจสอบข้อมูล เช่น ปริมาณ จำนวน วันหมดอายุของสารเคมีที่มีในห้องปฏิบัติการ จัดทำข้อมูลความปลอดภัยสารเคมีที่ผู้ใช้ห้องปฏิบัติการสามารถเข้าถึงได้ง่าย เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

โครงการฉบับนี้สำเร็จลุล่วงได้ด้วยความรู้และความช่วยเหลืออย่างสูงยิ่งจากกองทุนส่งเสริมงานวิจัย เพื่อยกระดับปริญญานิพนธ์สู่งานวิจัย ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2562 ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ที่สนับสนุนทุนวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

1. Walters AUC, Lawrence W, Jalsa NK. Chemical laboratory safety awareness, attitudes and practices of tertiary students. Safety Sci. 2017;96:161-71.
2. โครงการยกระดับมาตรฐานความปลอดภัยห้องปฏิบัติการวิจัยในประเทศไทย. แนวปฏิบัติเพื่อความปลอดภัยในห้องปฏิบัติการ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ. สำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ; 2555.
3. Winder C, Azzi R, Wagner D. The development of the globally harmonized system (GHS) of classification and labelling of hazardous chemicals. J Hazardous Mater. 2005;125(1):29-44.
4. เสาวนีย์ สัตยดิษฐ์. การจัดการของเสียชีวภาพและของเสียสารเคมีในห้องปฏิบัติการวิจัยวิทยาศาสตร์ทางสัตวแพทย คณะสัตวแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล. Journal of Safety and Health. 2013;6(23):15-23.
5. วรพจน์ กนกกันตพงษ์. การจัดการของเสียอันตรายในห้องปฏิบัติการ. วารสาร มจร.วิชาการ. 2550;11(21):95-102.
6. กรมควบคุมมลพิษ. คู่มือการจัดการของเสียห้องปฏิบัติการสิ่งแวดล้อม. กรุงเทพมหานคร: กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. 2547.
7. นภัสนันท์ จันทรา. การจัดการของเสียอันตรายของห้องปฏิบัติการในโรงงานอุตสาหกรรมอาหารทะเล เครื่องบริษัทพัฒนากรู๊ป [วิทยานิพนธ์ปริญญามหาบัณฑิต]. สงขลา: มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์; 2554.
8. โครงการยกระดับมาตรฐานความปลอดภัยห้องปฏิบัติการวิจัยในประเทศไทย. แนวปฏิบัติเพื่อความปลอดภัยในห้องปฏิบัติการ [อินเทอร์เน็ต]. กรุงเทพฯ: จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2555 [สืบค้นเมื่อวันที่ 5 เม.ย. 2563]. จาก: <http://esprel.labsafety.nrct.go.th/home.asp>.
9. ธีรยุทธ วิไลวัลย์, สุชาติา ชินะจิตร, จุฑามาศ ทรัพย์ประดิษฐ์. ของเสียจากห้องปฏิบัติการที่นักเคมี(มัก)มองข้าม. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2560.



การแปลงข้อมูลการลงทุนโดยตรงจากต่างประเทศในประเทศไทย: กรณีศึกษาประเทศ อาเซียน

Transformations Foreign Direct Investment Data in Thailand: Case Study of ASEAN Countries

ลักขณา วัฒนชะชีวะกุล

Lakhana Watthanacheewakul

สาขาวิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ต.หนองหาร อ.สันทราย จ.เชียงใหม่ 50290

Program in Statistics, Faculty of Science, Maejo University, Nonghan, Sansai, Chiang Mai 50290, THAILAND

*Corresponding author e-mail: lakhanaw@yahoo.com

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article history:

Received: 28 May, 2020

Revised: 13 July, 2020

Accepted: 10 August, 2020

Available online: 20 October, 2020

DOI: 10.14456/rj-rmutt.2020.22

Keywords: Box-Cox

transformation, exponential transformation, Yeo-Johnson transformation, coefficient of skewness, normally distributed

Foreign direct investment (FDI) data in Thailand of the countries in Asian (12 months) are symmetry, left-skewed or right-skewed. The normally distributed data are an important assumption in the statistical analysis methods. If the data do not correspond with the assumption, data transformation will be used. The objective of this research is to compare six transformation methods: square root transformation, logarithm base ten transformation, inverse transformation, Box-Cox transformation, Exponential transformation, and Yeo-Johnson transformation. The results reveal that square root transformation can transform FDI data of Laos and Myanmar to symmetry and normally distributed data. Logarithm base ten transformation can transform FDI data of Cambodia and Myanmar to symmetry and normally distributed data. Inverse transformation can transform FDI data of Vietnam to near symmetry and normally distributed data. Box-Cox transformation can transform FDI data of Cambodia Laos Myanmar Vietnam and Singapore to symmetry and normally distributed data. Exponential transformation can transform FDI data of Cambodia Laos and Myanmar to symmetry and normally

distributed data. Yeo-Johnson transformation can transform FDI data of Cambodia Laos Myanmar and Singapore to symmetry and normally distributed data. Reflect technique can adjust left-skewed data to right-skewed data. If data are both negative and positive value, they should be adjusted to the positive value before transforming data.

บทคัดย่อ

ข้อมูลการลงทุนโดยตรงจากต่างประเทศที่เข้ามาลงทุนในประเทศไทยของประเทศในกลุ่มอาเซียน (ระยะ 12 เดือน) มีทั้งสมมาตร เบ้ขวา หรือเบ้ซ้าย วิธีการวิเคราะห์ทางสถิติมีข้อสมมติที่สำคัญคือข้อมูลมีการแจกแจงปกติ หากข้อมูลไม่ได้มีการแจกแจงปกติ การแปลงข้อมูลจะถูกนำมาใช้ โดยการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแปลงทั้ง 6 วิธี ได้แก่ การถอตรากที่สอง การใช้ลอการิทึมฐานสิบ การใช้ส่วนกลับ การแปลงของบ็อกซ์-ค็อกซ์ การแปลงเลขชี้กำลัง และการแปลงของยอ-จอห์นสัน ผลจากการวิจัย ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่า วิธีการแปลงโดยการถอตรากที่สองสามารถแปลงข้อมูลการลงทุนฯ ของประเทศลาว และประเทศเมียนมาร์ ให้มีความสมมาตรและการแจกแจงปกติ วิธีการแปลงโดยใช้ลอการิทึมฐานสิบสามารถแปลงข้อมูลการลงทุนฯ ของประเทศกัมพูชา และประเทศเมียนมาร์ ให้มีความสมมาตรและการแจกแจงปกติ วิธีการแปลงโดยใช้ส่วนกลับสามารถแปลงข้อมูลการลงทุนฯ ของประเทศเวียดนาม ให้ใกล้เคียงความสมมาตรและการแจกแจงปกติ วิธีการแปลงของบ็อกซ์-ค็อกซ์ สามารถแปลงข้อมูลการลงทุนฯ ของประเทศกัมพูชา ประเทศลาว ประเทศเมียนมาร์ ประเทศเวียดนาม และประเทศสิงคโปร์ ให้มีความสมมาตรและการแจกแจงปกติ วิธีการแปลงเลขชี้กำลัง สามารถแปลงข้อมูลการลงทุนฯ ของประเทศกัมพูชา ประเทศลาว และประเทศเมียนมาร์ ให้มีความสมมาตรและการแจกแจงปกติ และวิธีการแปลงของยอ-จอห์นสัน สามารถแปลงข้อมูลการลงทุนฯ ของประเทศกัมพูชา ประเทศลาว ประเทศเมียนมาร์ และประเทศสิงคโปร์ ให้มีความ

สมมาตรและการแจกแจงปกติ การใช้เทคนิคการสะท้อนกลับจะทำให้ข้อมูลเบ้ซ้ายเปลี่ยนเป็นขวา ในกรณีที่ข้อมูลมีค่าบวกและลบผสมกันปรับค่าให้เป็นบวกทั้งหมดแล้วจึงแปลงข้อมูล

คำสำคัญ: การแปลงของบ็อกซ์-ค็อกซ์ การแปลงเลขชี้กำลัง การแปลงของยอ-จอห์นสัน สัมประสิทธิ์ความเบ้ การแจกแจงปกติ

บทนำ

ในการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณโดยอาศัยวิธีการทดสอบทางสถิตินั้น วิธีการทดสอบทางสถิติส่วนใหญ่มีข้อสมมติที่สำคัญข้อหนึ่งว่า “ข้อมูลต้องมีการแจกแจงปกติ” เช่น การประมาณค่าและการทดสอบสมมติฐานค่าเฉลี่ยของประชากร การวิเคราะห์ความแปรปรวน และการวิเคราะห์การถดถอย ดังนั้น หากจะใช้วิธีการทางสถิติในการวิเคราะห์ข้อมูล จึงควรมีการตรวจสอบก่อนว่าข้อมูลมีการแจกแจงปกติหรือไม่ การตรวจสอบสามารถทำได้หลายวิธีทั้งการใช้กราฟ เช่น ฮิสโทแกรม แผนภาพกล่อง การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยมัธยฐานและฐานนิยม หรือการใช้วิธีการทดสอบทางสถิติ เช่น การทดสอบของโคลโมโกรอฟ-สมิรโนฟ การทดสอบของชาปิโร-วิลค์ หากใช้วิธีการวิเคราะห์ทางสถิติกับข้อมูลที่มีการแจกแจงไม่สอดคล้องกับข้อสมมติ อาจทำให้เกิดข้อสรุปและการตัดสินใจที่ผิดพลาด ดังที่ (1) พบว่าข้อมูลลักษณะคุณภาพที่ไม่ได้มีการแจกแจงปกติจะส่งผลกระทบต่อผลการวิเคราะห์ข้อมูลและข้อสรุปโดย (2) แนะนำว่า หากข้อมูลไม่สอดคล้องกับข้อสมมติของวิธีการวิเคราะห์ สามารถดำเนินการได้ 2 วิธี คือ การแปลง

ข้อมูลให้สอดคล้องกับข้อสมมติ หรือ การพัฒนาวิธีการวิเคราะห์ขึ้นมาใหม่ หากเลือกใช้การแปลงอย่างเหมาะสม การแปลงข้อมูลจะง่ายกว่าการพัฒนาวิธีการวิเคราะห์ขึ้นมาใหม่

การที่ข้อมูลไม่ได้มีการแจกแจงปกติแสดงว่าข้อมูลนั้นเบ้ซ้าย หรือ เบ้ขวา การพิจารณาความเบ้ นอกจากจะใช้กราฟแล้วยังสามารถใช้สัมประสิทธิ์ความเบ้ ถ้าค่าสัมประสิทธิ์ความเบ้มีค่าเป็นบวกแสดงว่าข้อมูลเบ้ขวา ถ้าค่าสัมประสิทธิ์ความเบ้มีค่าเป็นลบแสดงว่าข้อมูลเบ้ซ้าย ข้อมูลที่มีความเบ้ส่วนใหญ่เป็นข้อมูลเบ้ขวา เช่น ข้อมูลอายุการใช้งานของเครื่องใช้ไฟฟ้า ข้อมูลราคาบ้าน ข้อมูลรายได้ของประชาชนในประเทศที่กำลังพัฒนา ในขณะที่ข้อมูลเบ้ซ้ายจะพบน้อยกว่า เช่น ข้อมูลอายุของผู้เสียชีวิตในประเทศที่พัฒนาแล้ว ข้อมูลคะแนนสอบของนักเรียนในวิชาที่ข้อสอบง่าย สำหรับข้อมูลที่มีลักษณะเป็นอนุกรมเวลา เช่น ข้อมูลทางการเงินที่มีการรายงานเป็นรายเดือน หรือรายไตรมาส มีทั้งข้อมูลเบ้ซ้าย เบ้ขวา หรือ สมมาตร ตัวอย่างเช่น ข้อมูลรายได้ที่ไม่ใช่ดอกเบี๋ยมีลักษณะเบ้ขวา ข้อมูลค่าใช้จ่ายในการดำเนินงานมีลักษณะเบ้ซ้าย และกำไรจากการดำเนินงานก่อนรายการหนี้สูญ และหนี้สงสัยจะสูญมีลักษณะสมมาตร (3)

สำหรับการเลือกใช้วิธีการแปลงกับข้อมูลที่มีความเบ้ (4) แนะนำว่าในกรณีข้อมูลเบ้ขวา ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์อย่างง่าย เช่น การใช้ลอการิทึม การถอดรากที่สอง จะถูกนำมาใช้ ในกรณีข้อมูลเบ้ซ้าย เทคนิคการสะท้อนกลับจะถูกนำมาใช้ในการสะท้อนข้อมูลเบ้ซ้าย เปลี่ยนเป็นเบ้ขวา โดยการนำค่าที่สูงกว่าค่าสูงสุดของชุดข้อมูลลบค่าแต่ละค่าของข้อมูลชุดนั้น นอกจากนี้ฟังก์ชันการแปลงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่ถูกนำมาใช้ในการแปลงข้อมูล ในอดีตอาจเป็นเรื่องยากในการใช้ฟังก์ชันการแปลงเพราะต้องมีการคำนวณหาค่าพารามิเตอร์การแปลงซึ่งก็คือเลขยกกำลังนั่นเอง โดยปัจจุบันโปรแกรม R (5) มีการแปลงของบ็อกซ์-ค็อกซ์ (6) การแปลงเลขชี้กำลัง (7) และการแปลงของยอ-จอห์นสัน (8) จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้มีการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแปลงข้อมูลโดยมีการระบุ

การแจกแจงของข้อมูลทางสถิติ ตัวอย่างเช่น (9) พบว่าวิธีการแปลงข้อมูลที่มีการแจกแจงปัวซอง $y = \sqrt{x + 3/8}$ จะทำให้ข้อมูลที่แปลงแล้วมีการแจกแจงปกติด้วยความแปรปรวนคงที่ (10) พบว่าวิธีการแปลงของบ็อกซ์-ค็อกซ์เหมาะสมกับข้อมูลที่มีการแจกแจงไวบูลในแง่สัดส่วนของข้อมูลที่แปลงแล้วมีการแจกแจงปกติ (11) พบว่าวิธีการแปลงเลขชี้กำลัง การแปลงของยอ-จอห์นสันและการแปลงของเนลสัน มีประสิทธิภาพไม่แตกต่างกันในแง่ของข้อมูลที่แปลงแล้วมีการแจกแจงปกติและอัตราส่วนสมรรถนะกระบวนการไม่แตกต่างกัน

การวิจัยนี้จะมุ่งเน้นที่ การเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแปลงโดยการใช้ฟังก์ชันคณิตศาสตร์อย่างง่าย รวมทั้งการแปลงของบ็อกซ์-ค็อกซ์ การแปลงเลขชี้กำลัง และการแปลงของยอ-จอห์นสัน โดยการวัดประสิทธิภาพจะพิจารณาจากการสัมประสิทธิ์ความเบ้และการทดสอบการแจกแจงปกติของข้อมูลที่แปลงแล้วโดยข้อมูลที่นำมาใช้ในการวิจัยเป็นข้อมูลการลงทุนโดยตรงจากประเทศอาเซียนที่เข้ามาลงทุนในประเทศไทยในแต่ละเดือนของปี พ.ศ. 2562 การลงทุนโดยตรงจากต่างประเทศ (Foreign Direct Investment: FDI) เป็นธุรกรรมการลงทุนที่ผู้ลงทุนที่มีถิ่นฐานจากต่างประเทศมีต่อธุรกิจที่มีถิ่นฐานในประเทศประกอบด้วยเงินลงทุนในทุนเรือนหุ้น (Equity Capital) ซึ่งหมายถึงการลงทุนด้วยการถือหุ้นที่มีสิทธิ์ร่วมในการบริหารกิจการตั้งแต่ร้อยละ 10 ขึ้นไป การกู้ยืมระหว่างบริษัทในเครือ กำไรที่นำกลับมาลงทุน ตราสารหนี้ และสินเชื่อการค้าที่เป็นธุรกรรมระหว่างบริษัทในเครือด้วยกัน โดยตัวเลขบวก หมายถึง มีการลงทุนเพิ่มสูงกว่าการลดการลงทุน ขณะที่ตัวเลขติดลบ หมายถึง ในช่วงเวลานั้น ๆ มีการเพิ่มการลงทุนต่ำกว่าการลดการลงทุน (12) สำหรับประเทศไทย อุตสาหกรรมที่ได้รับเงินลงทุนจากต่างประเทศมากที่สุดได้แก่ อุตสาหกรรมยานยนต์และชิ้นส่วนยานยนต์ (13) ซึ่งเห็นได้ชัดเจนจากรถยนต์หลายยี่ห้อที่มีนักลงทุนจากหลายประเทศเข้ามาทำธุรกรรม นอกจากนี้ ในประเทศอาเซียน ตัวอย่างเช่น นักธุรกิจของประเทศมาเลเซียเข้ามาร่วมลงทุนทำธุรกิจสายการบินไทย

แอร์เอเชีย นักธุรกิจของประเทศอินโดนีเซียเข้ามาร่วมลงทุนทำธุรกิจสายการบินไทยไลอ้อนแอร์ นักธุรกิจของประเทศสิงคโปร์เข้ามาร่วมลงทุนทำธุรกิจโรงแรมในประเทศไทย โดยข้อมูลการลงทุนโดยตรงของประเทศไทยที่เข้ามาลงทุนในประเทศไทยมีจุดเด่นคือ ข้อมูลบางเดือนมีค่าติดลบ และมีทั้งข้อมูลที่มีความสมมาตร เบ้ขวาและเบ้ซ้าย ดังนั้นในการวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบการแปลงที่เหมาะสมกับข้อมูลการลงทุนโดยตรงจากต่างประเทศที่เข้ามาลงทุนในประเทศไทย กรณีศึกษาประเทศอาเซียน ผลสรุปที่ได้จะนำไปสู่การเลือกใช้วิธีการแปลงให้เหมาะสมกับข้อมูลและใช้วิธีการวิเคราะห์อย่างเหมาะสม ในกรณีข้อมูลที่แปลงแล้วไม่ได้มีการแจกแจงปกติ สถิติไม่อิงพารามิเตอร์จะเป็นทางเลือก

วิธีดำเนินการวิจัย

รูปแบบการวิจัย

การวิจัยนี้เป็นการวิจัยเชิงปริมาณโดยจะทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของวิธีการแปลง 6 วิธี แต่ละวิธีแสดงด้วยฟังก์ชันคณิตศาสตร์ดังนี้

กำหนดให้ x หมายถึง ข้อมูลเดิม

y หมายถึง ข้อมูลที่แปลงแล้ว

λ หมายถึง พารามิเตอร์การแปลง

การใช้ลอการิทึมฐานสิบ

$$y = \log_{10} x \quad (1)$$

การถอดรากที่สอง

$$y = \sqrt{x} \quad (2)$$

การใช้ส่วนกลับ

$$y = \frac{1}{x} \quad (3)$$

การแปลงของบ็อกซ์-ค็อกซ์

$$y = \begin{cases} \frac{x^\lambda - 1}{\lambda}, & \lambda \neq 0 \\ \ln x, & \lambda = 0 \end{cases}, x > 0 \quad (4)$$

การแปลงเลขชี้กำลัง

$$y = \begin{cases} \frac{\exp(\lambda x) - 1}{\lambda}, & \lambda \neq 0 \\ x, & \lambda = 0 \end{cases} \quad (5)$$

และการแปลงของยอ-จอห์นสัน

$$y = \begin{cases} \frac{(x+1)^\lambda - 1}{\lambda}, & x \geq 0, \lambda \neq 0 \\ \ln(x+1), & x \geq 0, \lambda = 0 \\ \frac{-[(-x+1)^{2-\lambda}]-1}{2-\lambda}, & x < 0, \lambda \neq 2 \\ -\ln(-x+1), & x < 0, \lambda = 2 \end{cases} \quad (6)$$

เปรียบเทียบในแง่ความปกติของข้อมูล พิจารณาทั้งสัมประสิทธิ์ความเบ้ (Coefficient of Skewness: C.S.) ด้วยวิธีโมเมนต์ (14)

$$C.S. = \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^3}{\left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \right]^{3/2}} \quad (7)$$

และทดสอบการแจกแจงปกติด้วยการทดสอบของชาปิโร-วิลค์ (15) ค่าสถิติทดสอบคำนวณจาก

$$w = \frac{(\sum_{i=1}^n a_i x_{(i)})^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (8)$$

เมื่อ $x_{(i)}$ หมายถึง สถิติลำดับที่ i

โดย a_i หมายถึง สัมประสิทธิ์ของการทดสอบของชาปิโร-วิลค์

การเก็บรวบรวมข้อมูล

การวิจัยนี้ใช้ข้อมูลระยะสั้นของการลงทุนโดยตรงจากประเทศในกลุ่มอาเซียน ได้แก่ สิงคโปร์ อินโดนีเซีย มาเลเซีย ฟิลิปปินส์ บรูไน เวียดนาม เมียนมาร์ ลาวและกัมพูชา ที่เข้ามาลงทุนในประเทศไทยจากเว็บไซต์ของธนาคารแห่งประเทศไทย (12) ตั้งแต่เดือนมกราคมถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2562 เป็นระยะเวลา 12 เดือนข้อมูลการลงทุนฯ ในบางเดือนมีค่าติดลบ แสดงว่ามีการไหลออกของเงินทุนมูลค่าสูงหน่วยการวัดของข้อมูลการลงทุนฯ คือ ล้านเหรียญสหรัฐอเมริกา

การวิเคราะห์ข้อมูล

การวิจัยนี้ใช้โปรแกรม R ในการวิเคราะห์ข้อมูลและประมวลผลข้อมูล มีขั้นตอนในการวิเคราะห์ข้อมูลดังนี้

1. ตรวจสอบว่าข้อมูลการลงทุนโดยตรงจากแต่ละประเทศในกลุ่มอาเซียนที่เข้ามาลงทุนในประเทศไทยมีการแจกแจงปกติหรือไม่ ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดย

ใช้การทดสอบของซายีโร-วิลค์ เนื่องจากเป็นข้อมูลระยะสั้น ขนาดของข้อมูลน้อยกว่า 50 ค่า และเทียบค่า p กับระดับนัยสำคัญ 0.05 ถ้าค่า p สูงกว่า 0.05 แสดงว่าข้อมูลมีการแจกแจงปกติ

2. ถ้าผลการตรวจสอบสรุปได้ว่าข้อมูลไม่มีการแจกแจงปกติจะพิจารณาความเบี่ยงของข้อมูลว่าเบ้ซ้ายหรือเบ้ขวา โดยการวัดค่าสัมประสิทธิ์ความเบ้ ความหมายของสัมประสิทธิ์ความเบ้ ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ความหมายของสัมประสิทธิ์ความเบ้

สัมประสิทธิ์ความเบ้	ความหมาย
-0.5 ถึง 0.5 หรือใกล้เคียง	สมมาตร (ปกติ)
-1 ถึง -0.5 หรือใกล้เคียง	เบ้ซ้ายปานกลาง
0.5 ถึง 1 หรือใกล้เคียง	เบ้ขวาปานกลาง
-2 ถึง -1 หรือใกล้เคียง	เบ้ซ้ายมาก
1 ถึง 2 หรือใกล้เคียง	เบ้ขวามาก
-3 ถึง -2 หรือใกล้เคียง	เบ้ซ้ายสุดขีด
2 ถึง 3 หรือใกล้เคียง	เบ้ขวาสุดขีด

ที่มา: ดัดแปลงจาก (16)

จากตารางที่ 1 ถ้าข้อมูลชุดหนึ่งมีค่าสัมประสิทธิ์ความเบ้เท่ากับ -0.6 ข้อมูลชุดนั้นน่าจะมีค่าเบ้ซ้ายปาน

กลางแต่ในความเป็นจริงอาจเป็นข้อมูลที่มีการแจกแจงปกติสามารถตรวจสอบโดยการทดสอบการแจกแจงปกติ

3. ทำการแปลงข้อมูลเฉพาะข้อมูลที่มีความเบ้ซ้ายและเบ้ขวา ด้วยวิธีการแปลงทั้ง 6 วิธี โดยกำหนดให้ วิธีที่ 1 หมายถึง ลอการิทึมฐานสิบ วิธีที่ 2 หมายถึง ถอดรากที่สอง วิธีที่ 3 หมายถึง ส่วนกลับ วิธีที่ 4 หมายถึง บล็อก-ค็อกซ์ วิธีที่ 5 หมายถึง เลขชี้กำลัง วิธีที่ 6 หมายถึง ย่อ-จอห์นสัน

4. ตรวจสอบข้อมูลที่แปลงแล้วว่ามีแจกแจงปกติ ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 และความเบ้ลดลงในระดับสมมาตรหรือไม่

5. เปรียบเทียบประสิทธิภาพวิธีการแปลงทั้ง 6 วิธี จำแนกตามลักษณะความเบ้ของข้อมูล

6. นำข้อมูลการลงทุนโดยตรงจากประเทศในกลุ่มอาเซียนที่มีการแปลงค่าให้มีแจกแจงปกติบางประเทศไปสร้างช่วงความเชื่อมั่น 95% ของการประมาณค่าเฉลี่ยการลงทุนโดยตรงจากต่างประเทศในแต่ละเดือน

$$\bar{y} \pm t_{\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}}, d.f. = n - 1$$

เพื่อแสดงการนำไปใช้ประโยชน์ และการแปลงค่ากลับหน่วยการวัดเดิม

ตารางที่ 2 ข้อมูลการลงทุนโดยตรงจากประเทศในกลุ่มอาเซียนที่เข้ามาลงทุนในประเทศไทย ปี พ.ศ. 2562 (หน่วย: ล้านเหรียญสหรัฐอเมริกา)

เดือน	บรูไน	กัมพูชา	อินโดนีเซีย	ลาว	มาเลเซีย	เมียนมาร์	ฟิลิปปินส์	เวียดนาม	สิงคโปร์
มกราคม	0.34	0.22	-24.02	0.52	27.85	-0.15	-3.35	0.21	255.63
กุมภาพันธ์	0.32	0.20	15.09	0.48	2.77	-0.15	2.07	0.09	96.12
มีนาคม	0.34	0.06	32.25	0.52	25.03	-0.15	8.61	0.10	140.23
เมษายน	-0.01	1.03	-2.58	1.14	4.52	0.26	-0.57	0.12	1386.42
พฤษภาคม	-0.07	0.36	1.30	0.30	9.38	0.22	1.82	2.31	479.22
มิถุนายน	-0.07	0.22	-27.77	0.30	2.22	0.21	-2.50	0.03	-109.61
กรกฎาคม	0.11	0.77	0.18	0.23	-24.78	0.11	-5.70	0.05	-39.93
สิงหาคม	0.10	0.73	23.76	0.22	-9.98	0.11	-4.07	0.05	-449.27
กันยายน	0.29	3.50	-2.06	1.18	-3.48	0.12	0.87	0.18	3093.06
ตุลาคม	0.06	1.27	-8.87	0.08	20.50	0.08	6.66	0.02	171.47
พฤศจิกายน	0.03	0.97	-13.29	0.03	-6.67	0.08	1.33	0.02	129.70
ธันวาคม	0.13	2.02	-5.84	0.18	64.14	0.08	-0.73	0.03	197.07

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

จากข้อมูลการลงทุนโดยตรงจากประเทศในกลุ่มอาเซียนที่เข้ามาลงทุนในประเทศไทย เดือนมกราคม ถึง เดือนธันวาคม พ.ศ. 2562 ดังตารางที่ 2 เมื่อตรวจสอบการแจกแจงปกติของข้อมูลการลงทุน พบว่า ข้อมูลการลงทุนของประเทศบรูไน อินโดนีเซีย มาเลเซีย และฟิลิปปินส์ มีการแจกแจงปกติ ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังตารางที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์ความเบ้ของข้อมูลการลงทุน ที่ไม่ได้มีการแจกแจงปกติดังตารางที่ 4 ซึ่งจะเห็นได้ว่า ข้อมูลการลงทุนของประเทศไทยมีแนวโน้มว่าข้อมูลการลงทุนของประเทศไทยมีแนวโน้มว่าข้อมูลการลงทุนของประเทศไทยมีความเบ้ขวา ส่วนสิงคโปร์ และเวียดนามมีความเบ้ขวาสุดขีด

ตารางที่ 3 ค่า p ของการทดสอบการแจกแจงปกติของข้อมูลการลงทุน จำแนกตามประเทศ

ประเทศ	ค่า p
บรูไน	0.1179
กัมพูชา	0.0105
อินโดนีเซีย	0.7176
ลาว	0.0202
มาเลเซีย	0.2280
เมียนมาร์	0.0385
ฟิลิปปินส์	0.6490
เวียดนาม	0.0000
สิงคโปร์	0.0007

ตารางที่ 4 ค่าสัมประสิทธิ์ความเบ้ของข้อมูลการลงทุน ที่ไม่ได้มีการแจกแจงปกติ

ประเทศ	ค่าสัมประสิทธิ์ความเบ้	ลักษณะ
กัมพูชา	1.5892	เบ้ขวา
ลาว	1.1320	เบ้ขวา
เวียดนาม	2.9653	เบ้ขวาสุดขีด
สิงคโปร์	2.0817	เบ้ขวาสุดขีด
เมียนมาร์	-0.5539	เบ้ซ้ายปานกลาง

ข้อมูลการลงทุนที่ไม่ได้มีการแจกแจงปกติจะถูกแปลงด้วยวิธีการแปลงทั้ง 6 วิธี และนำเสนอแยกตารางสำหรับแต่ละประเทศ

ตารางที่ 5 สัมประสิทธิ์ความเบ้ ค่า p ของข้อมูลการลงทุน ที่แปลงค่าแล้ว และค่าพารามิเตอร์การแปลงสำหรับประเทศกัมพูชา

วิธีการแปลง	สัมประสิทธิ์ความเบ้	ค่า p	ค่าพารามิเตอร์การแปลง
วิธีที่ 1	-0.3177	0.8709	-
วิธีที่ 2	0.7199	0.4792	-
วิธีที่ 3	-2.3191	0.0003	-
วิธีที่ 4	-0.1002	0.9482	0.10
วิธีที่ 5	0.3147	0.5586	-0.80
วิธีที่ 6	0.1425	0.7201	-0.97

จากตารางที่ 5 พบว่าการใช้วิธีส่วนกลับในการแปลงข้อมูลการลงทุนโดยตรงของประเทศกัมพูชาที่เข้ามาลงทุนในประเทศไทยไม่ได้ทำให้ข้อมูลที่แปลงค่าแล้วมีการแจกแจงปกติ และถึงแม้ว่าการใช้วิธีการแปลงด้วยรากที่สองของข้อมูลที่แปลงค่าแล้วมีการแจกแจงปกติแต่ระดับความเบ้ที่ลดลงนั้นยังคงมีความเบ้ขวา ในขณะที่การใช้วิธีการแปลงด้วยลอการิทึมฐานสิบการแปลงของบ็อกซ์-ค็อกซ์ การแปลงเลขชี้กำลัง และการแปลงของยอ-จอห์นสัน ทำให้ข้อมูลที่แปลงค่าแล้วมีการแจกแจงปกติ และความเบ้สมมาตร

จากตารางที่ 6 พบว่าการใช้วิธีส่วนกลับในการแปลงข้อมูลการลงทุนโดยตรงของประเทศลาวที่เข้ามาลงทุนในประเทศไทยไม่ได้ทำให้ข้อมูลที่แปลงค่าแล้วมีการแจกแจงปกติ และถึงแม้ว่าการใช้วิธีการแปลงด้วยลอการิทึมฐานสิบข้อมูลที่แปลงค่าแล้วมีการแจกแจงปกติแต่ความเบ้จากเบ้ขวากลายเป็นเบ้ซ้าย ในขณะที่การใช้วิธีการแปลงด้วยรากที่สอง การแปลงของบ็อกซ์-ค็อกซ์ การแปลงเลขชี้กำลัง และการแปลงของยอ-จอห์นสัน ทำให้ข้อมูลที่แปลงค่าแล้วมีการแจกแจงปกติ และความเบ้สมมาตร

ตารางที่ 6 สัมประสิทธิ์ความเบ้ ค่า p ของข้อมูลการลงทุณา ที่แปลงค่าแล้ว และค่าพารามิเตอร์การแปลงสำหรับประเทศลาว

วิธีการแปลง	สัมประสิทธิ์ความเบ้	ค่า p	ค่าพารามิเตอร์การแปลง
วิธีที่ 1	-0.6722	0.4727	-
วิธีที่ 2	0.4445	0.4871	-
วิธีที่ 3	2.4745	0.0000	-
วิธีที่ 4	0.0402	0.7816	0.30
วิธีที่ 5	0.2352	0.6674	-1.78
วิธีที่ 6	0.1296	0.7528	-1.84

ตารางที่ 7 สัมประสิทธิ์ความเบ้ ค่า p ของข้อมูลการลงทุณา ที่แปลงค่าแล้ว และค่าพารามิเตอร์การแปลงสำหรับประเทศเวียดนาม

วิธีการแปลง	สัมประสิทธิ์ความเบ้	ค่า p	ค่าพารามิเตอร์การแปลง
วิธีที่ 1	1.2675	0.0680	-
วิธีที่ 2	2.6066	0.0000	-
วิธีที่ 3	0.6563	0.0919	-
วิธีที่ 4	0.1282	0.7439	-0.40
วิธีที่ 5	1.5438	0.0124	-3.55
วิธีที่ 6	2.9653	0.0000	-5.00

ตารางที่ 8 สัมประสิทธิ์ความเบ้ ค่า p ของข้อมูลการลงทุณา ที่แปลงค่าแล้ว และค่าพารามิเตอร์การแปลงสำหรับประเทศสิงคโปร์

วิธีการแปลง	สัมประสิทธิ์ความเบ้	ค่า p	ค่าพารามิเตอร์การแปลง
วิธีที่ 1	-	-	-
วิธีที่ 2	-	-	-
วิธีที่ 3	-1.7105	0.0109	-
วิธีที่ 4	-	-	-
วิธีที่ 5	-	-	-
วิธีที่ 6	-	-	-

จากตารางที่ 7 พบว่ามีเพียงการใช้วิธีการแปลงของบ็อกซ์-ค็อกซ์ในการแปลงข้อมูลการลงทุณาโดยตรงของประเทศเวียดนามที่เข้ามาลงทุนในประเทศไทยที่ทำให้ข้อมูลที่แปลงค่าแล้วมีการแจกแจงปกติและความเบ้สมมาตร และถึงแม้ว่าการใช้วิธีการแปลงด้วยส่วนกลับและลอการิทึมฐานสิบข้อมูลที่แปลงค่าแล้วมีการแจกแจงปกติ ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 แต่ระดับความเบ้ที่ลดลงนั้นยังคงมีความเบ้ขวาปานกลางสำหรับการแปลงด้วยส่วนกลับและเบ้ขวามากสำหรับการแปลงด้วยลอการิทึมฐานสิบ

จากตารางที่ 8 พบว่าวิธีการแปลงด้วยส่วนกลับเท่านั้นที่สามารถใช้กับข้อมูลการลงทุณา ของประเทศสิงคโปร์ได้ เนื่องจากลักษณะข้อมูลการลงทุณา ของประเทศสิงคโปร์มีทั้งค่าบวกและค่าลบในชุดเดียวกัน แต่ความเบ้ของข้อมูลที่แปลงค่าแล้วเป็นเบ้ซ้าย และข้อมูลที่แปลงค่าแล้วไม่ได้มีการแจกแจงปกติ ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 เพื่อให้สามารถแปลงข้อมูลด้วยวิธีการแปลงอื่น ๆ ได้ จำเป็นต้องมีการปรับค่าด้วยการบวกค่าแต่ละค่าในข้อมูลการลงทุณา ด้วยค่าใด ๆ ที่ทำให้ข้อมูลทั้งชุดมีค่ามากกว่าศูนย์ ในที่นี้นำเสนอการบวกด้วยสองเท่าของค่าเฉลี่ยข้อมูล ซึ่งการปรับค่านี้นี้จะไม่ทำให้สัมประสิทธิ์ความเบ้และค่า p สำหรับการทดสอบการแจกแจงปกติของข้อมูลชุดใหม่เปลี่ยนแปลงไปจากข้อมูลชุดเดิม ดังนั้นข้อมูลการลงทุณาของสิงคโปร์ที่ปรับค่าแล้ว ดังตารางที่ 9

จากตารางที่ 9 สัมประสิทธิ์ความเบ้และค่า p ของข้อมูลการลงทุณา ของสิงคโปร์ที่ปรับค่าแล้ว ยังคงมีค่าเท่าเดิมคือ 2.0817 และ 0.0007 ตามลำดับ

ตารางที่ 9 ข้อมูลการลงทุณา ของประเทศสิงคโปร์ที่ปรับค่าแล้ว (หน่วย: ล้านดอลลาร์สหรัฐอเมริกา)

เดือน	การลงทุน	เดือน	การลงทุน
มกราคม	1088.755	กรกฎาคม	782.075
กุมภาพันธ์	1021.385	สิงหาคม	1370.905
มีนาคม	1063.155	กันยายน	2278.105
เมษายน	3984.745	ตุลาคม	1031.915
พฤษภาคม	442.415	พฤศจิกายน	987.805
มิถุนายน	851.755	ธันวาคม	1147.315

ตารางที่ 10 สัมประสิทธิ์ความเบ้ ค่า p ของข้อมูลการลงทุณา ที่ปรับค่าและแปลงค่าแล้วและค่าพารามิเตอร์การแปลงสำหรับประเทศสิงคโปร์

วิธีการ แปลง	สัมประสิทธิ์ ความเบ้	ค่า p	ค่าพารามิเตอร์ การแปลง
วิธีที่ 1	0.7824	0.1174	-
วิธีที่ 2	1.5637	0.0093	-
วิธีที่ 3	1.2119	0.0439	-
วิธีที่ 4	-0.0126	0.2528	-0.40
วิธีที่ 5	-	-	*
วิธีที่ 6	-0.0515	0.2521	-0.42

* โปรแกรม R ไม่สามารถคำนวณหาค่าพารามิเตอร์การแปลงสำหรับวิธีการแปลงด้วยเลขชี้กำลัง

ตารางที่ 11 ข้อมูลการลงทุนฯ ของประเทศเมียนมาร์ที่ปรับค่าแล้ว (หน่วย: ล้านเหรียญสหรัฐอเมริกา)

เดือน	การลงทุน	เดือน	การลงทุน
มกราคม	0.28	กรกฎาคม	0.15
กุมภาพันธ์	0.28	สิงหาคม	0.14
มีนาคม	0.28	กันยายน	0.10
เมษายน	0.24	ตุลาคม	0.51
พฤษภาคม	0.25	พฤศจิกายน	0.51
มิถุนายน	0.25	ธันวาคม	0.51

จากตารางที่ 10 พบว่าวิธีการแปลงด้วยการแปลงของบ็อกซ์-ค็อกซ์ และการแปลงของยอ-จอห์นสัน ทำให้ข้อมูลที่ปรับและแปลงค่าแล้วมีการแจกแจงปกติ ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 และความเบ้สมมาตร แต่วิธีการแปลงด้วยลอการิทึมฐานสิบ ทำให้ข้อมูลที่ปรับและแปลงค่าแล้วมีการแจกแจงปกติ ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยความเบ้ของข้อมูลที่แปลงค่าแล้วยังคงเบ้ขวา

เนื่องจากลักษณะข้อมูลการลงทุนฯ ของประเทศเมียนมาร์มีทั้งค่าบวกและค่าลบในชุดเดียวกัน และมีความเบ้ซ้าย ดังนั้นจะปรับค่าโดยใช้เทคนิคการสะท้อนกลับดังที่ได้กล่าวไว้ในบทนำ โดยการใช้ค่าที่มากกว่าค่าสูงสุดของข้อมูลลบด้วยค่าของข้อมูลเดิม ใน

ที่นี้จะใช้ 0.36 ลบด้วยค่าแต่ละค่าของข้อมูลชุดเดิม แต่เทคนิคการสะท้อนกลับจะทำให้ความเบ้เป็นเบ้ขวาดังนั้นข้อมูลการลงทุนฯ ของประเทศเมียนมาร์ที่ปรับค่าแล้ว ดังตารางที่ 11

จากตารางที่ 11 ค่า p ของข้อมูลการลงทุนฯ ของประเทศเมียนมาร์ที่ปรับค่าแล้ว ยังคงมีค่าเท่าเดิมคือ 0.0385 ในขณะที่สัมประสิทธิ์ความเบ้เท่ากับ 0.5539

ตารางที่ 12 สัมประสิทธิ์ความเบ้ ค่า p ของข้อมูลการลงทุนฯ ที่แปลงค่าแล้ว และค่าพารามิเตอร์การแปลงสำหรับประเทศเมียนมาร์

วิธีการ แปลง	สัมประสิทธิ์ ความเบ้	ค่า p	ค่าพารามิเตอร์ การแปลง
วิธีที่ 1	-0.2205	0.2050	-
วิธีที่ 2	0.2092	0.1274	-
วิธีที่ 3	1.1164	0.0327	-
วิธีที่ 4	-0.0412	0.1894	0.20
วิธีที่ 5	0.1138	0.1531	-2.37
วิธีที่ 6	0.0774	0.1624	-2.26

จากตารางที่ 12 พบว่าการใช้วิธีส่วนกลับในการแปลงข้อมูลการลงทุนฯ ของประเทศเมียนมาร์ ที่ปรับค่าด้วยเทคนิคการสะท้อนกลับ ไม่ได้ทำให้ข้อมูลที่แปลงค่าแล้วมีการแจกแจงปกติ ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 และ ในขณะที่วิธีการแปลงอื่น ๆ ทำให้ข้อมูลที่แปลงค่าแล้วมีการแจกแจงปกติ ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 และความเบ้สมมาตร

ตัวอย่างการนำไปใช้ประโยชน์

จากตารางที่ 11 ข้อมูลที่ปรับค่าด้วยเทคนิคสะท้อนกลับจะถูกแปลงค่าด้วยวิธีการแปลงลอการิทึมฐานสิบ การแปลงด้วยรากที่สอง การแปลงของบ็อกซ์-ค็อกซ์ การแปลงเลขชี้กำลัง และการแปลงของยอ-จอห์นสัน ข้อมูลที่แปลงค่าแล้วสมมาตรและมีการแจกแจงปกติ ณ ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยหน่วยของข้อมูลที่แปลงค่าแล้วจะเป็นไปตามวิธีการแปลง เช่น วิธีการแปลง

ด้วยรากที่สองหน่วยของข้อมูลจะถูกถอดรากที่สองด้วยข้อมูลที่แปลงค่าแล้วดังตารางที่ 13

ตารางที่ 13 ข้อมูลการลงทุนฯ ของประเทศเมียนมาร์ที่ปรับและแปลงค่าแล้ว

เดือน	วิธีที่ 1	วิธีที่ 2	วิธีที่ 4	วิธีที่ 5	วิธีที่ 6
มกราคม	-1.27	0.53	-1.12	0.20	0.19
กุมภาพันธ์	-1.27	0.53	-1.12	0.20	0.19
มีนาคม	-1.27	0.53	-1.12	0.20	0.19
เมษายน	-1.43	0.49	-1.24	0.18	0.17
พฤษภาคม	-1.39	0.50	-1.21	0.19	0.18
มิถุนายน	-1.39	0.50	-1.21	0.19	0.18
กรกฎาคม	-1.89	0.38	-1.58	0.13	0.12
สิงหาคม	-1.97	0.37	-1.63	0.12	0.11
กันยายน	-2.30	0.32	-1.85	0.09	0.09
ตุลาคม	-0.67	0.71	-0.63	0.29	0.27
พฤศจิกายน	-0.67	0.71	-0.63	0.29	0.27
ธันวาคม	-0.67	0.71	-0.63	0.29	0.27

หมายเหตุ วิธีที่ 3 ไม่สามารถแปลงข้อมูลให้มีการแจกแจงปกติได้จึงไม่แสดงในตาราง

ตารางที่ 14 ช่วงความเชื่อมั่น 95% สำหรับการประมาณค่าเฉลี่ยการลงทุนจากประเทศเมียนมาร์ในแต่ละเดือน จำแนกตามวิธีการแปลงและการไม่ใช้วิธีการแปลงข้อมูล

วิธีการแปลง	ช่วงความเชื่อมั่น 95% สำหรับ FDI
วิธีที่ 1	ระหว่าง 0.26 และ 0.34 ล้านเหรียญสหรัฐอเมริกา
วิธีที่ 2	ระหว่าง 0 และ 0.17 ล้านเหรียญสหรัฐอเมริกา
วิธีที่ 4	ระหว่าง -0.01 และ 0.17 ล้านเหรียญสหรัฐอเมริกา
วิธีที่ 5	ระหว่าง 0.01 และ 0.16 ล้านเหรียญสหรัฐอเมริกา
วิธีที่ 6	ระหว่าง 0 และ 0.18 ล้านเหรียญสหรัฐอเมริกา
ไม่แปลงข้อมูล	ระหว่าง -0.02 และ 0.16 ล้านเหรียญสหรัฐอเมริกา

ข้อมูลที่แปลงค่าแล้วในตารางที่ 13 (ผลลัพธ์จากโปรแกรม R มีทศนิยมมากกว่า 2 ตำแหน่ง) จะถูกนำมาสร้างช่วงความเชื่อมั่น 95% สำหรับการประมาณค่าเฉลี่ยการลงทุนจากต่างประเทศในแต่ละเดือนซึ่งแต่ละวิธีได้ช่วงความเชื่อมั่นภายหลังจากการแปลงค่าและหน่วยของข้อมูลกลับคืน และเปรียบเทียบกับกรณีที่ไม่ใช้วิธีการแปลง ดังตารางที่ 14

สำหรับรายละเอียดการคำนวณ จะยกตัวอย่าง

การแปลงของบ็อกซ์-ค็อกซ์ จากข้อมูลที่ปรับและแปลงค่าแล้วด้วยการแปลงของบ็อกซ์-ค็อกซ์ (วิธีที่ 4) ในตารางที่ 13 ค่าเฉลี่ยเท่ากับ -1.16 ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.40 ขนาดตัวอย่างเท่ากับ 12 และ $t_{0.025,11} = 2.201$

$$\bar{y} \pm t_{\alpha/2} \frac{s}{\sqrt{n}} = (-1.16) \pm \left(2.201 \times \frac{0.40}{\sqrt{12}} \right)$$

ดังนั้นค่าเฉลี่ยของข้อมูลที่ปรับและแปลงค่าแล้วอยู่ระหว่าง -1.41 และ -0.91 โดยค่าพารามิเตอร์การแปลงเท่ากับ 0.2 จากการแปลงของบ็อกซ์-ค็อกซ์

$$y = \frac{x^\lambda - 1}{\lambda}$$

สำหรับค่า -1.41 ; $-1.41 = \frac{x^{0.2} - 1}{0.2}$

$$(-1.41 \times 0.2) + 1 = x^{0.2}$$

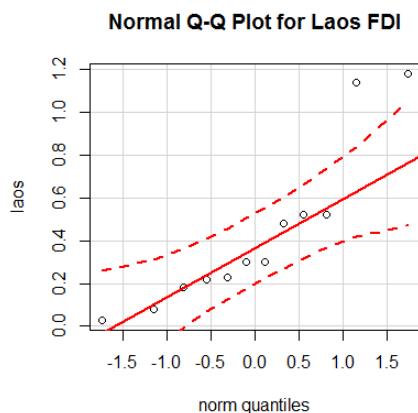
$$x = 0.718^{\frac{1}{0.2}} = 0.19$$

แต่มีการสะท้อนกลับข้อมูล $x = 0.36 - x_{old}$

$$x_{old} = 0.36 - 0.19 = 0.17$$

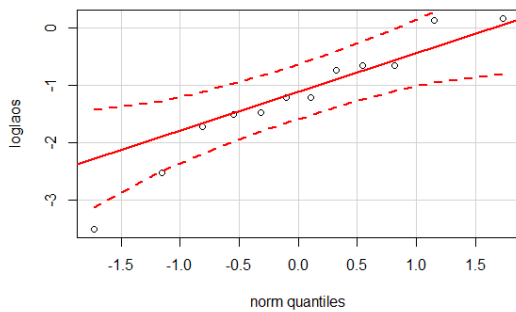
นั่นคือสำหรับค่า -1.41 แปลงค่ากลับได้เท่ากับ 0.17 ในทำนองเดียวกันสำหรับค่า -0.91 แปลงค่ากลับได้ค่าเท่ากับ -0.01

นอกจากนี้ในเปรียบเทียบการแจกแจงของข้อมูลก่อนและหลังการแปลงข้อมูลอาจใช้ Normal Q-Q Plot ซึ่งเป็นกราฟที่ใช้ในการพิจารณาข้อมูลที่มีการแจกแจงปกติหรือไม่ ดังรูปที่ 1- 6 โดยจะใช้ข้อมูลการลงทุนโดยตรงจากประเทศลาวซึ่งมีลักษณะเบ้ขวา



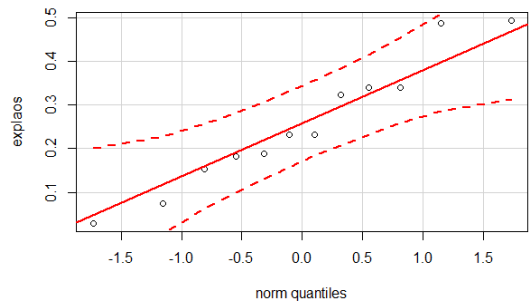
รูปที่ 1 การแจกแจงของข้อมูลการลงทุนโดยตรงของประเทศลาวที่เข้ามาลงทุนในประเทศไทยตั้งแต่เดือนมกราคมถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2562

Normal Q-Q Plot for Log Transformation of Laos FDI



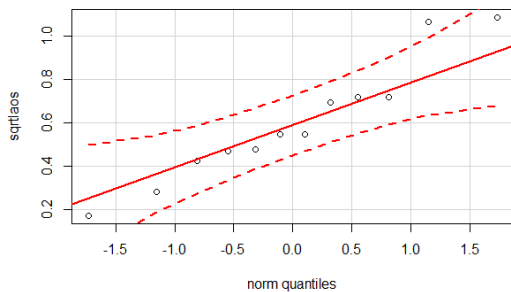
รูปที่ 2 การแจกแจงของข้อมูลการลงทุนโดยตรงของ
ประเทศลาวที่เข้ามาลงทุนในประเทศไทยตั้งแต่
เดือนมกราคมถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2562 ที่
แปลงค่าด้วยการใช้ลอการิทึมฐานสิบ

Normal Q-Q Plot for Exponential Transformation of Laos FDI



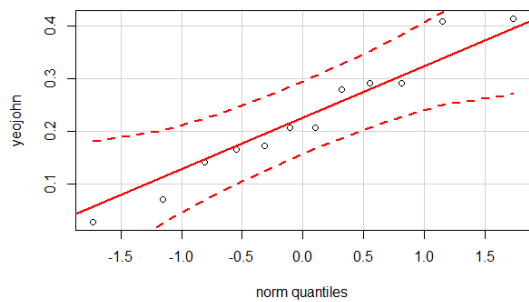
รูปที่ 5 การแจกแจงของข้อมูลการลงทุนโดยตรงของ
ประเทศลาวที่เข้ามาลงทุนในประเทศไทยตั้งแต่
เดือนมกราคมถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2562 ที่
แปลงค่าด้วยการแปลงเลขชี้กำลัง

Normal Q-Q Plot for Square Root Transformation of Laos FDI



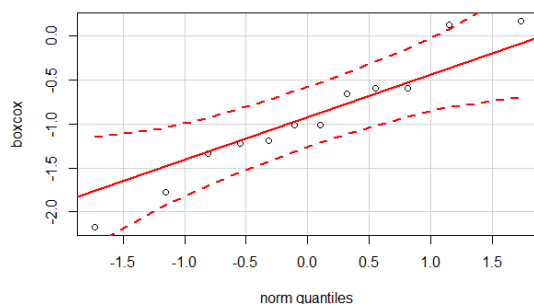
รูปที่ 3 การแจกแจงของข้อมูลการลงทุนโดยตรงของ
ประเทศลาวที่เข้ามาลงทุนในประเทศไทยตั้งแต่
เดือนมกราคมถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2562 ที่
แปลงค่าด้วยการถอดรากที่สอง

Normal Q-Q Plot for Yeo-Johnson Transformation of Laos FDI



รูปที่ 6 การแจกแจงของข้อมูลการลงทุนโดยตรงของ
ประเทศลาวที่เข้ามาลงทุนในประเทศไทยตั้งแต่
เดือนมกราคมถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2562 ที่
แปลงค่าด้วยการแปลงของยอ-จอห์นสัน

Normal Q-Q Plot for Box-Cox Transformation of Laos FDI



รูปที่ 4 การแจกแจงของข้อมูลการลงทุนโดยตรงของ
ประเทศลาวที่เข้ามาลงทุนในประเทศไทยตั้งแต่
เดือนมกราคมถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2562 ที่
แปลงค่าด้วยการแปลงของบ็อกซ์-ค็อกซ์

จากรูปที่ 1 แสดงให้เห็นว่าข้อมูลการลงทุน
โดยตรงของประเทศลาวที่เข้ามาลงทุนในประเทศไทยตั้งแต่
เดือนมกราคมถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2562 มีค่าสังเกต
2 ค่าที่อยู่นอกแนวเส้นการแจกแจงปกติ

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างรูปที่ 1 และรูปที่ 2-6
จะเห็นได้ว่าการแปลงข้อมูลสามารถทำให้ค่าที่แปลงแล้ว
อยู่ในแนวเส้นของการแจกแจงปกติได้มากขึ้น และหาก
พิจารณาเทียบกับตารางที่ 6 จะเห็นได้ว่ารูปที่ 2-6 จะ
สอดคล้องกับค่า p นั่นคือ ถ้าค่า p สูง (แปลงค่าด้วยการ
แปลงของบ็อกซ์-ค็อกซ์ การแปลงเลขชี้กำลัง และการแปลง
ของยอ-จอห์นสัน) ค่าที่แปลงจะอยู่ในแนวเส้นการแจกแจง

ปกติมากกว่าค่า p ต่ำ (แปลงค่าด้วยการใช้ลอการิทึมฐานสิบและการถอดรากที่สอง)

สรุปผล

ในการวิจัยเรื่องนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการแปลงทั้ง 6 วิธี ได้แก่ การถอดรากที่สอง การใช้ลอการิทึมฐานสิบ การใช้ส่วนกลับ การแปลงของบ็อกซ์-ค็อกซ์ การแปลงเลขชี้กำลัง และการแปลงของยอ-จอห์นสัน ในแง่ของข้อมูลที่แปลงแล้วต้องมีการแจกแจงปกติและมีลักษณะสมมาตรหรือใกล้เคียง ผลการวิจัยระดับนัยสำคัญ 0.05 พบว่า วิธีการแปลงโดยการถอดรากที่สองสามารถแปลงข้อมูลการลงทุนฯ ของประเทศลาว และประเทศเมียนมาร์ ให้มีความสมมาตรและการแจกแจงปกติ วิธีการแปลงโดยใช้ลอการิทึมฐานสิบ สามารถแปลงข้อมูลการลงทุนฯ ของประเทศกัมพูชา และเมียนมาร์ ให้มีความสมมาตรและการแจกแจงปกติ วิธีการแปลงโดยใช้ส่วนกลับสามารถแปลงข้อมูลการลงทุนฯ ของประเทศเวียดนาม ให้ใกล้เคียงความสมมาตรและการแจกแจงปกติ วิธีการแปลงของบ็อกซ์-ค็อกซ์ สามารถแปลงข้อมูลการลงทุนฯ ของประเทศกัมพูชา ลาว เมียนมาร์ เวียดนาม และสิงคโปร์ ให้มีความสมมาตรและการแจกแจงปกติ วิธีการแปลงเลขชี้กำลัง สามารถแปลงข้อมูลการลงทุนฯ ของประเทศกัมพูชา ลาว และเมียนมาร์ ให้มีความสมมาตรและการแจกแจงปกติ และวิธีการแปลงของยอ-จอห์นสัน สามารถแปลงข้อมูลการลงทุนฯ ของประเทศกัมพูชา ลาว เมียนมาร์ และสิงคโปร์ ให้มีความสมมาตรและการแจกแจงปกติ การใช้เทคนิคการสะท้อนกลับจะทำให้ข้อมูลเบ้ซ้ายเปลี่ยนเป็นขวา ในกรณีที่ข้อมูลมีค่าบวกและลบผสมกันปรับค่าให้เป็นบวกทั้งหมดแล้วจึงแปลงข้อมูล ซึ่งผลการวิจัยสอดคล้องกับคำแนะนำของ (4) ที่ฟังก์ชันทางคณิตศาสตร์อย่างง่ายสามารถใช้แปลงข้อมูลเบ้ขวาและเบ้ซ้ายที่มีการสะท้อนกลับ แต่ในงานวิจัยจะได้ภายใต้ระดับความเบ้ที่แตกต่างกัน เช่น วิธีการแปลงโดยใช้ส่วนกลับเหมาะสมกับข้อมูลเบ้ขวาสุดขีดมาก เช่น ข้อมูลการลงทุนของประเทศเวียดนาม ในขณะที่วิธีการแปลง

ของบ็อกซ์-ค็อกซ์ สามารถใช้ได้กับความเบ้ทุกระดับแต่ข้อด้อยคือใช้ได้กับข้อมูลที่มีค่ามากกว่าศูนย์เท่านั้น ส่วนวิธีการแปลงเลขชี้กำลังไม่เหมาะสมในการใช้กับข้อมูลที่มีค่ามากเช่น ข้อมูลการลงทุนของประเทศสิงคโปร์ วิธีการแปลงเลขชี้กำลังและวิธีการแปลงของยอ-จอห์นสันไม่เหมาะสมกับข้อมูลเบ้ขวาสุดขีดมาก เช่น ข้อมูลการลงทุนของประเทศเวียดนาม ทั้งนี้หากนำข้อมูลที่แปลงค่าแล้วไปใช้ในการวิเคราะห์ข้อมูลเมื่อสิ้นสุดการวิเคราะห์หากยังมีหน่วยการวัดจะต้องแปลงค่าผลลัพธ์สุดท้ายกลับด้วยถึงแม้ว่าผลลัพธ์ที่ได้จากข้อมูลที่แปลงแล้วเทียบกับข้อมูลจริงไม่แตกต่างกันมาก แต่หากหน่วยการวัดที่มีค่าสูงเช่นการวิจัยนี้ ก็อาจส่งผลกระทบต่อสรุปและตัดสินใจได้ อีกทั้งการแปลงข้อมูลเป็นการดำเนินการที่ทำให้ข้อมูลสอดคล้องกับข้อสมมติของวิธีการวิเคราะห์ทางสถิติ

เอกสารอ้างอิง

1. Pyzdek T. Normal Distributions Aren't [All that Normal]. Qual Eng. 1995;7(4):769-77.
2. Tukey JW. On the Comparative Anatomy of Transformations. Ann Math Stat. 1957;28(3):602-32.
3. Tisco financial group. Financial Summary [Internet]. 2020. [cited 17 Jul 2020]. Availability from: <https://bit.ly/3bUYTFf>
4. Wuensch KL. Transforming to Reduce Negative Skewness [Internet]. 2017. [cited 14 Jan 2020]. Availability from: <http://core.ecu.edu/psyc/wuenschk/StatHelp/NegSkew.pdf>
5. R Core Team. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria [Internet]. 2019. [cited 12 Feb 2020]. Availability from: <https://www.R-project.org/>

6. Box EP, Cox DR. An Analysis of Transformations (with discussion). J R Stat Soc B. 1964;26(2):211-52.
7. Manly BFJ. Exponential Data Transformations. J Roy Stat Soc D-Stat. 1976;25(1):37-42.
8. Yeo I, Johnson NR. A New Family of Power Transformations to Improve Normality or Symmetry. Biometrika. 2000;87(2):954-9.
9. อุไรวรรณ เจริญเกียรติกุล, ลีลี อิงศรีสว่าง. ตัวแบบการแปลงค่าข้อมูลที่ทำให้ความแปรปรวนคงที่โดยประมาณสำหรับข้อมูลปัวซอง. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. 2553;15(1):105-13.
10. Chortirat T, Chomtee B, Sinsomboonthong J. Comparison of Four Data Transformation Methods for Weibull Distributed Data. Kasetsart Journal (Natural Sciences). 2011;45:366-83.
11. Watthanacheewakul L. Calculating the Process Capability Ratio for Weibull Data. Naresuan University Journal: Science and Technology. 2017; 25(1):44-56.
12. Bank of Thailand (Statistical Data) [Internet]. 2020. [cited 5 Jan 2020]. Availability from: https://www.bot.or.th/App/BTWS_STAT/statistics/ReportPage.aspx?reportID=645&language=eng
13. ดวงรัตน์ ประจักษ์ศิลปชัย. การลงทุนโดยตรงจากต่างประเทศ [อินเทอร์เน็ต]. สำนักงานเลขาธิการสภาผู้แทนราษฎร. 2557. [สืบค้นเมื่อวันที่ 16 ม.ค. 2563]. จาก <http://www.parliament.go.th/library>
14. Doane DP, Seward LE. Measuring Skewness: A Forgotten Statistics?. Stat Educ. 2011;19(2):1-18.
15. Shapiro-Wilk test. Wikipedia [Internet]. 2020. [cited 24 Jan 2020]. Availability from: <https://en.m.wikipedia.org>
16. Jain D. Skew and Kurtosis: 2 Important Statistics terms you need to know in Data Science [Internet]. 2018. [cited 5 Jan 2020]. Availability from: <https://codeburst.io/2-important-statistics-terms-you-need-to-know-in-data-science-skewness-and-kurtosis-388fef94eeaa>



การศึกษาเปรียบเทียบการปกปิดร่องรอยหลักฐานดิจิทัล ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกู้คืนข้อมูลของซอฟต์แวร์นิติวิทยาศาสตร์

A Comparative Study of Digital Anti-Forensic Techniques Affecting the Effectiveness of Forensic Data Recovery Software

ทรงวุฒิ นาคศิลป์ และ วรวัช วิชชวานิชย์*

Songwut Naksilp and Woratouch Vichuwanchi*

คณะนิติวิทยาศาสตร์ โรงเรียนนายร้อยตำรวจ อ. สามพราน จ. นครปฐม 73110

Faculty of Forensic Science, Royal Police Cadet Academy, Sam Phran, Nakhon Pathom 73110, THAILAND

*Corresponding author e-mail: woratouch_w@yahoo.com

ARTICLE INFO	ABSTRACT
Article history:	This research aims (1) to examine anti-forensic techniques
Received: 5 June, 2020	affecting data recovery software and (2) to compare each anti-forensic
Revised: 31 July, 2020	technique with impacts on efficiency of forensic data recovery
Accepted: 11 August, 2020	software. The researcher conducted an experiment by utilizing simple
Available online: 20 October, 2020	and common digital anti-forensic techniques including delete, format
DOI: 10.14456/rj-rmutt.2020.23	and overwrite. After that, three forensic data recovery programs:
Keywords: anti-forensic,	EnCase Imager, FTK Imager and ProDiscover, were exercised to
digital evidence, forensic	recover digital evidence and to compare the effectiveness in
software	recovering data of the forensic software from each anti-forensic
	technique on data storage devices containing NTFS file system on
	Windows 7 operating system. The research findings revealed that the
	three forensic programs had similar effectiveness of forensic data
	recovery as follows. (1) The anti-forensic technique with commands
	“Delete” and “Format” without switching modes could recover
	digital evidence with 100% perfect condition because it was a
	technique that corrected or destroyed data in MFT Entry without
	getting involved with raw data in the file. (2) The anti-forensic
	technique with command “Format” and switching modes as Format

Drive: /P: Passes and overwrite could partially recover digital evidence for undestroyed raw data in the file or it was irrecoverable once the raw data in the file was demolished because the raw data in the file was damaged with overwriting. The success of data recovery was accounted for 35%, 50% and 75% from the original file. Therefore, to conclude, success of digital evidence recovery depended on the original raw data in the file.

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ (1) เพื่อศึกษาเทคนิคการปกปิดร่องรอยหลักฐานดิจิทัลที่ส่งผลต่อการกู้คืนข้อมูลของซอฟต์แวร์นิติวิทยาศาสตร์ (2) เพื่อเปรียบเทียบเทคนิคการปกปิดร่องรอยหลักฐานดิจิทัลแต่ละเทคนิคที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกู้คืนข้อมูลของซอฟต์แวร์นิติวิทยาศาสตร์ โดยผู้วิจัยได้ทดลองปกปิดร่องรอยหลักฐานดิจิทัล ด้วยเทคนิคที่ไม่ซับซ้อนแต่เป็นเทคนิคที่พบเห็นได้โดยทั่วไป ได้แก่ Delete, Format และ Overwrite จากนั้นจึงใช้ซอฟต์แวร์นิติวิทยาศาสตร์จำนวน 3 โปรแกรม คือ EnCase Imager, FTK Imager และ ProDiscover กู้คืนข้อมูลหลักฐานดิจิทัล เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกู้คืนข้อมูลของซอฟต์แวร์นิติวิทยาศาสตร์จากเทคนิคการปกปิดร่องรอยหลักฐานดิจิทัลแต่ละเทคนิคบนอุปกรณ์บันทึกข้อมูลที่มีระบบไฟล์แบบ NTFS ภายใต้ระบบปฏิบัติการ Windows 7 ผลจากการวิจัยพบว่า ซอฟต์แวร์นิติวิทยาศาสตร์ทั้ง 3 โปรแกรมมีประสิทธิภาพในการกู้คืนข้อมูลหลักฐานดิจิทัลไม่ต่างกัน คือ (1) การปกปิดร่องรอยหลักฐานด้วยคำสั่ง Delete และคำสั่ง Format แบบไม่ระบุ Switch สามารถกู้คืนข้อมูลหลักฐานดิจิทัลได้ในสภาพที่สมบูรณ์ 100% เนื่องจากเป็นเทคนิคที่แก้ไขหรือทำลายข้อมูลใน MFT Entry โดยไม่ยุ่งเกี่ยวกับเนื้อไฟล์ (2) การปกปิดร่องรอยหลักฐานด้วยคำสั่ง Format แบบระบุ Switch คำสั่งเป็น Format Drive: /P: Passes และการ Overwrite สามารถกู้คืนข้อมูลหลักฐานดิจิทัลได้ในส่วนที่เนื้อไฟล์ไม่ถูกทำลาย หรือไม่สามารถกู้คืนได้หากเนื้อไฟล์ทั้งหมดถูกทำลาย เนื่องจากเป็นเทคนิค

ที่ทำให้เนื้อไฟล์เสียหายด้วยการเขียนข้อมูลอื่นทับความสำเร็จของการกู้คืนข้อมูลคิดเป็นร้อยละจากขนาดไฟล์ต้นฉบับ เช่น 35% 50% และ 75% เป็นต้น จึงสรุปได้ว่าความสำเร็จของการกู้คืนข้อมูลหลักฐานดิจิทัลขึ้นอยู่กับเนื้อไฟล์ต้นฉบับ

คำสำคัญ: การปกปิดร่องรอยหลักฐาน หลักฐานดิจิทัล ซอฟต์แวร์นิติวิทยาศาสตร์

บทนำ

ในอดีตอาชญากรรม จะปรากฏให้เห็นในรูปแบบของอาชญากรรมพื้นฐานหรือที่เรียกว่าอาชญากรรมข้างถนน (Street Crime) ซึ่งเป็นอาชญากรรมที่สามารถพบเห็นได้โดยทั่วไปมีรูปแบบของการก่ออาชญากรรมที่ไม่ซับซ้อน สามารถกระทำได้โดยบุคคลเพียงคนเดียว และถึงแม้จะมีการรวมกลุ่มในการก่ออาชญากรรมก็จะเป็นการรวมกลุ่มกันในจำนวนที่ไม่มากนัก ผู้ที่ก่ออาชญากรรมส่วนใหญ่มักจะเป็นผู้ที่ต้อยโอกาสในสังคม ไม่มีการศึกษา และไม่มีการใช้เทคโนโลยีขั้นสูงในการก่ออาชญากรรม ตัวอย่างของอาชญากรรมในอดีต ได้แก่ ลักทรัพย์ ชิงทรัพย์ วิ่งราว จี้ ปล้น ทำร้ายร่างกาย ข่มขืน ฆาตกรรม เป็นต้น

ปัจจุบันรูปแบบของการก่ออาชญากรรมได้เปลี่ยนแปลงไป การก่ออาชญากรรมมีความซับซ้อนมากขึ้น มีการรวมตัวกันของอาชญากร โดยจัดตั้งขึ้นเป็นกลุ่มในลักษณะองค์กร เรียกว่า องค์กรอาชญากรรม (Organized Crime) ทำให้ปัญหาการก่ออาชญากรรมในปัจจุบันมีแนวโน้มความรุนแรงมากขึ้นกว่าในอดีต

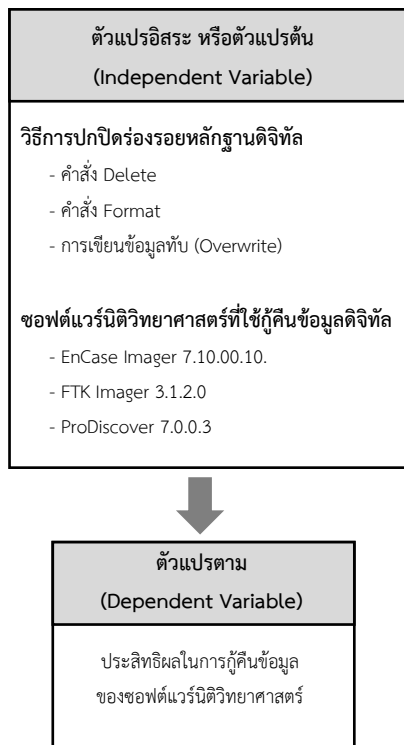
นอกจากนี้ในการก่ออาชญากรรมสมัยใหม่ก็มีการนำเอานวัตกรรมที่อาศัยเทคโนโลยีขั้นสูง (High Technology) มาใช้เป็นเครื่องมือสนับสนุนในการก่ออาชญากรรม ซึ่งเครื่องมือเหล่านั้นก็คืออุปกรณ์ดิจิทัลประเภทต่าง ๆ ได้แก่ คอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (Personal Computer: PC) คอมพิวเตอร์แบบพกพา (Laptop) คอมพิวเตอร์แบบรับข้อมูลด้วยการเขียนบนจอภาพ (Tablet) โทรศัพท์ประเภทสมาร์ทโฟน (Smart Phone) เป็นต้น

ในอนาคตกการสืบสวนเพื่อหาตัวผู้กระทำความผิดที่แท้จริงมาลงโทษตามกฎหมายกระบวนการยุติธรรม จึงมีความจำเป็นที่จะต้องนำเอาความรู้ทางนิติวิทยาศาสตร์ (Forensic Science) มาประยุกต์ใช้ เพื่อพิสูจน์ข้อเท็จจริงแห่งคดีและเพื่อบังคับใช้กฎหมายในการลงโทษทางอาญาแก่ผู้กระทำความผิด แต่เนื่องจากการก่ออาชญากรรมมีการเปลี่ยนแปลงรูปแบบไปจากเดิม ดังนั้น ข้อมูลหรือวัตถุพยานต่าง ๆ ที่ใช้เป็นเบาะแส หรือถูกนำมาใช้เป็นหลักฐานในการสืบสวนหาตัวผู้กระทำความผิด จึงมีความสลับซับซ้อนมากยิ่งขึ้น เช่น การเผยแพร่ภาพลามกอนาจารโดยใช้เทคโนโลยีและอุปกรณ์ดิจิทัลเป็นเครื่องมือในการกระทำความผิด กรณีนี้การติดตามผู้กระทำความผิด จึงจำเป็นจะต้องหาร่องรอยข้อมูลหลักฐานจากอุปกรณ์ดิจิทัลที่ใช้ในการก่ออาชญากรรมทางอินเทอร์เน็ต ดังนั้น พยานหลักฐานดิจิทัล (Digital Evidence) จึงเป็นหลักฐานที่สำคัญมากสำหรับการก่ออาชญากรรมในลักษณะนี้ แต่เนื่องจากพยานหลักฐานดิจิทัลมีลักษณะเฉพาะคือสามารถถูกเปลี่ยนแปลงแก้ไขได้ง่าย และการแก้ไขนั้นอาจไม่เหลือร่องรอยให้ตรวจสอบในภายหลัง ทำให้การดำเนินการกับพยานหลักฐานดิจิทัลจำเป็นต้องมีกระบวนการจัดเก็บ ตรวจค้น วิเคราะห์ และรายงานผลที่ได้มาตรฐาน เพื่อให้พยานหลักฐานดิจิทัลคงไว้ซึ่งความน่าเชื่อถือและสามารถรับฟังได้ในการพิจารณาตัดสินคดีชั้นศาล ถึงแม้ว่าในปัจจุบันศาลไทยจะให้การยอมรับและรับฟังพยานหลักฐานดิจิทัลแล้วก็ตาม แต่เนื่องจากข้อมูลดิจิทัลเป็นสิ่งที่ไม่มีรูปร่างและไม่สามารถจับต้องหรือสัมผัสได้โดยตรง การนำผล

การตรวจพิสูจน์พยานหลักฐานดิจิทัล (Digital Forensics) มาใช้อ้างอิงอาจเกิดข้อโต้แย้งเกี่ยวกับความน่าเชื่อถือของข้อมูลที่ได้มาว่ามีความครบถ้วนสมบูรณ์หรือไม่ ข้อโต้แย้งเกี่ยวกับการถูกเปลี่ยนแปลงข้อมูลดิจิทัลในระหว่างกระบวนการรวบรวมพยานหลักฐานหรือข้อโต้แย้งเรื่องความน่าเชื่อถือของผลการวิเคราะห์และตรวจพิสูจน์พยานหลักฐานดิจิทัล ซึ่งหัวใจสำคัญที่จะทำให้ผลการตรวจพิสูจน์พยานหลักฐานดิจิทัลได้รับการยอมรับในชั้นศาลโดยไม่ถูกโต้แย้งก็คือจะต้องสามารถยืนยันได้ว่าพยานหลักฐานดิจิทัลที่นำมาใช้อ้างอิงนั้นเป็นหลักฐานชิ้นเดียวกับที่เก็บรวบรวมได้จากสถานที่เกิดเหตุจริงและไม่มีมีการเปลี่ยนแปลงข้อมูลใด ๆ ไปจากเดิม ปัจจัยที่สำคัญอีกประการหนึ่งก็คือมีผู้พัฒนาโปรแกรมสำหรับใช้ปกปิดร่องรอยหลักฐาน (Anti-forensic) ที่บันทึกไว้ในคอมพิวเตอร์และอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์เพื่อให้ยากต่อการสืบสวนคดีที่ต้องใช้พยานหลักฐานดิจิทัล โดยมีการนำโปรแกรมเหล่านี้แจกจ่ายให้ใช้โดยไม่มีการเสียค่าตอบแทนแต่อย่างใด (Freeware) บางโปรแกรมสามารถนำไปใช้งาน ศึกษา แก้ไข และเผยแพร่ได้อย่างเสรีปราศจากเงื่อนไขเพิ่มเติม (Open Source License) ตัวอย่างของวิธีการที่ใช้ในการปกปิดร่องรอยพยานหลักฐานดิจิทัล ได้แก่ การเข้ารหัสข้อมูล (Encryption) การเขียนข้อมูลใหม่ทับข้อมูลเก่าเพื่อไม่ให้สามารถกู้คืนได้ (Overwrite) การแก้ไขข้อมูลเมทาดาต้า (Metadata) ของไฟล์ หรือการปลอมแปลงไฟล์ เป็นต้น

จากปัญหาที่กล่าวมาข้างต้นจะเห็นได้ว่าการสืบสวนที่ต้องนำพยานหลักฐานดิจิทัลไปใช้ในการพิสูจน์ข้อเท็จจริง จะต้องคำนึงถึงการรักษาคุณค่าของพยานหลักฐานและการแสดงความน่าเชื่อถือในกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการจัดการพยานหลักฐานอย่างสมเหตุสมผลเนื่องจากพยานหลักฐานดิจิทัลมีความเปราะบางและซับซ้อน โดยมีลักษณะเฉพาะคือสามารถถูกเปลี่ยนแปลงแก้ไขได้ง่าย และเมื่อข้อมูลดิจิทัลถูกเปลี่ยนแปลงแก้ไขแล้วอาจไม่เหลือร่องรอยให้ตรวจสอบได้ในภายหลัง จึงนับว่าเป็นเรื่องที่ยากต่อการตรวจสอบทางนิติวิทยาศาสตร์ หาก

หลักฐานดิจิทัลเหล่านั้นถูกปกปิดร่องรอยหลักฐานด้วยเทคนิคต่าง ๆ ดังนั้น ผู้วิจัยจึงมีความสนใจเกี่ยวกับ “การศึกษาเปรียบเทียบการปกปิดร่องรอยหลักฐานดิจิทัลที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการกู้คืนข้อมูลของซอฟต์แวร์นิติวิทยาศาสตร์” โดยคาดหวังว่าผลการวิจัยครั้งนี้จะสามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลในการพัฒนามาตรฐานการกู้คืนข้อมูลดิจิทัลในงานตรวจพิสูจน์หลักฐานทางนิติวิทยาศาสตร์ต่อไปในอนาคต



รูปที่ 1 กรอบแนวคิดในการวิจัย

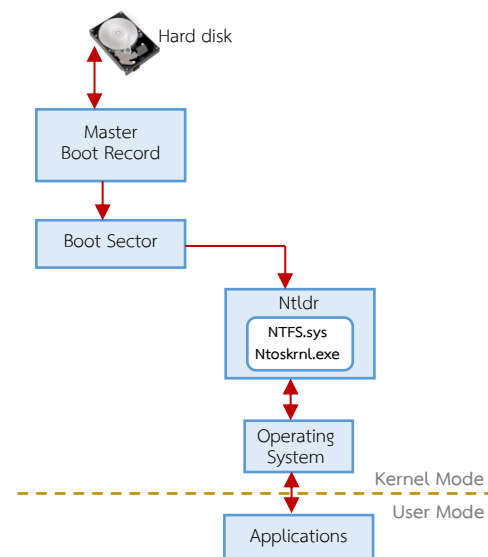
งานวิจัยนี้มีแนวคิดที่ว่าเมื่อข้อมูลดิจิทัลถูกปกปิดร่องรอยหลักฐานด้วยเทคนิคที่ต่างกันย่อมส่งผลต่อการกู้คืนข้อมูลเหล่านั้นด้วย โดยทำการเปรียบเทียบกันระหว่างซอฟต์แวร์นิติวิทยาศาสตร์ที่ได้รับความนิยมใช้เป็นเครื่องมือในการสืบสวน (Investigation Tools) และเป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้ในหน่วยงานที่มีหน้าที่พิสูจน์หลักฐานดิจิทัล การวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยได้เลือกใช้ซอฟต์แวร์นิติวิทยาศาสตร์ในรุ่นที่เปิดให้ผู้สนใจสามารถนำไปทดลองใช้เพื่อการศึกษาโดยไม่มีค่าใช้จ่าย จำนวน 3 โปรแกรมประกอบด้วย

- โปรแกรม EnCase Imager 7.10.00.103

- โปรแกรม FTK Imager 3.1.2.0

- โปรแกรม ProDiscover 7.0.0.3

จากแนวคิดข้างต้น ผู้วิจัยจึงได้ออกแบบการทดลองกู้คืนข้อมูลดิจิทัลโดยพิจารณาคัดเลือกเทคนิคการปกปิดร่องรอยหลักฐานดิจิทัลที่ไม่ซับซ้อนแต่เป็นเทคนิคที่พบเห็นโดยทั่วไป จำนวน 3 เทคนิค ได้แก่ การปกปิดร่องรอยหลักฐานด้วยคำสั่ง Delete การปกปิดร่องรอยหลักฐานด้วยคำสั่ง Format และ การปกปิดร่องรอยหลักฐานด้วยการเขียนทับหรือ Overwrite แสดงดังรูปที่ 1



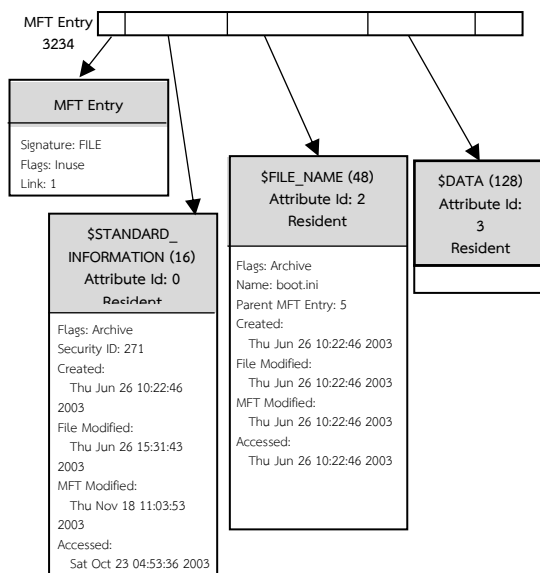
รูปที่ 2 สถาปัตยกรรม NTFS (1)

งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองกับอุปกรณ์บันทึกข้อมูลที่เป็น USB Flash Drive มีระบบไฟล์แบบ NTFS ภายใต้ระบบปฏิบัติการ Windows 7 จึงได้มีการศึกษาค้นคว้าและทบทวนวรรณกรรม ดังนี้

สถาปัตยกรรม NTFS ในระหว่างการสร้างพาร์ติชันให้กับฮาร์ดิสก์ โปรแกรมที่ใช้สร้างพาร์ติชันจะสร้างมาสเตอร์บูตเรคคอร์ด (MBR) ซึ่งภายในบันทึกตารางพาร์ติชัน และโค้ดสำหรับสั่งให้โปรแกรมทำงานที่เรียกว่ามาสเตอร์บูตโค้ดเอาไว้ ดังนั้นเมื่อเปิดเครื่องคอมพิวเตอร์ BIOS จะตรวจสอบการทำงานของอุปกรณ์ที่เชื่อมต่ออยู่บนเมนบอร์ด โดยอ่านค่าจาก MBR และเรียกใช้มาสเตอร์บูตโค้ดภายในตัวมันเอง แล้วส่งต่อการควบคุมไปยังบูตเชกเตอร์ในฮาร์ดิสก์ หลังจากนั้น

ระบบปฏิบัติการจะถูกทำการบูต เพื่อเริ่มใช้งานต่อไป แสดงดังรูปที่ 2

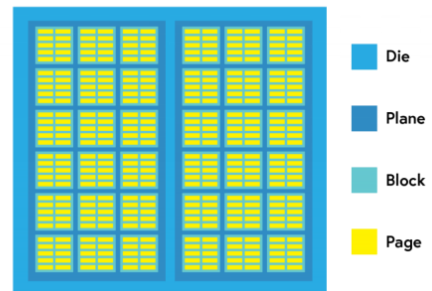
โดยในระบบไฟล์แบบ NTFS ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 4 ส่วน คือ NTFS Boot Sector เป็นส่วนที่เก็บเค้าโครงและโครงสร้างระบบไฟล์ Master File Table (MFT) เป็นส่วนที่เก็บข้อมูลที่ใช้ในการจัดเก็บไฟล์และเข้าถึงไฟล์ของระบบ NTFS ทั้งหมด File System Data เป็นส่วนที่เก็บข้อมูลอื่นที่ไม่มีใน MFT และ Master File Table Copy เป็นส่วนที่ใช้ในการทำสำเนาที่จำเป็นจาก MFT สำหรับกู้คืนระบบไฟล์ในกรณีที่ MFT มีปัญหา ดังนั้น MFT จึงนับว่ามีความสำคัญอย่างยิ่ง เพราะเป็นส่วนที่ใช้ในการจัดเก็บข้อมูลพร้อมทั้งแสดงส่วนของ Header และระบุตำแหน่งของข้อมูลทั้งหมดโดยจะเก็บข้อมูลเป็น Entry โดยข้อมูลภายใน MFT Entry ของไฟล์พื้นฐานทุกไฟล์ Carrier B. (2) อธิบายว่าข้อมูลภายใน MFT Entry ประกอบด้วย MFT Entry Header เป็นส่วนที่มีหน้าที่อธิบายถึงโครงสร้างข้อมูลของแต่ละ MFT Entry มีข้อมูลเริ่มต้นเป็น ASCII String โดย “FILE” เป็นข้อมูลที่เรียกว่า Signature และในส่วนของเนื้อหา (Attribute Content) ประกอบด้วย \$STANDARD_INFORMATION, \$DATA และ \$FILE_NAME แสดงดังรูปที่ 3



รูปที่ 3 ข้อมูลภายใน MFT Entry (2)

อุปกรณ์บันทึกข้อมูลแบบ SSD เป็นเทคโนโลยีที่คาดว่าจะมาแทนที่เทคโนโลยีฮาร์ดดิสก์ไดรฟ์ โดยในปัจจุบัน NAND Flash ถูกนำไปใช้เป็นส่วนประกอบสำคัญของอุปกรณ์บันทึกข้อมูลแบบ SSD เนื่องจาก NOR Flash มีความจุต่ำ และราคาสูง NAND Flash ประกอบด้วยส่วนสำคัญ 4 ส่วน คือ Die Plane Block และ Page โดย Page คือหน่วยที่เล็กที่สุดที่สามารถติดตั้งโปรแกรมหรือเขียนข้อมูลได้ ส่วนการลบข้อมูลสามารถทำได้ในระดับ Block เท่านั้น โครงสร้างของ NAND Flash แสดงดังรูปที่ 4

NAND Flash Die Layout



รูปที่ 4 โครงสร้างของชิป NAND Flash (3)

Shimpi AL. (4) อธิบายถึงลักษณะทางกายวิภาคของ SSD ว่าในปัจจุบันมาตรฐานของ SSD จะมีขนาดของ Page เท่ากับ 4 กิโลไบต์ (KB) โดย Page จะถูกจัดกลุ่มเข้าด้วยกันเป็น Block แต่ละ Block มีจำนวน 128 Page (1 Block มีขนาด 512 กิโลไบต์) Block เป็นโครงสร้างที่เล็กที่สุดในหน่วยความจำ NAND Flash ที่สามารถลบข้อมูลได้ ดังนั้น ในขณะทำการอ่านหรือเขียนข้อมูลบน Page ผู้ใช้งานจะสามารถลบข้อมูลใน Block ได้ครั้งละ 128 Page เท่านั้น

วิธีดำเนินการวิจัย

เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

1. อุปกรณ์บันทึกข้อมูลที่ใช้ในการทดลอง คือ USB Flash Drive ซึ่งเป็นอุปกรณ์บันทึกข้อมูลแบบ SSD (Solid State Drive) เนื่องจากในการทดลองแต่ละครั้งมีความจำเป็นต้องทำสำเนาหลักฐานดิจิทัลเพื่อใช้ในการ

วิเคราะห์ข้อมูล และป้องกันไม่ให้หลักฐานต้นฉบับเกิดความเสียหาย ประกอบกับการทำสำเนาหลักฐานดิจิทัลเป็นการทำสำเนาแบบบิตต่อบิต หรือที่เรียกว่า “Bit-stream Copy” เพื่อให้สำเนาเหมือนกับต้นฉบับทุกประการ จึงต้องใช้เวลาในการทดลองค่อนข้างนาน ดังนั้น ในการทดลองครั้งนี้ผู้วิจัยจึงเลือกใช้ USB Flash Drive ซึ่งมีความจุไม่มากนัก และการเข้าถึงข้อมูลจากอุปกรณ์บันทึกข้อมูลแบบ SSD ใช้เวลาน้อยกว่าอุปกรณ์แบบหัวอ่าน

2. ระบบปฏิบัติการ (Operating System: OS) ที่ใช้คือ Windows 7 เนื่องจากเป็นระบบปฏิบัติการที่นิยมใช้กันอย่างแพร่หลาย จากผลการสำรวจของ NetMarketShare.com (5) ระหว่างมี.ค. 2018 - ก.พ. 2019 พบว่าระบบปฏิบัติการ Windows 7 มีส่วนแบ่งการตลาดของระบบปฏิบัติการคอมพิวเตอร์ส่วนบุคคล (Desktop/Laptop) เป็นอันดับ 1 ของโลก คิดเป็นร้อยละ 40.17 จากยอดการใช้งานทั้งหมด

3. ระบบไฟล์ (File System) ในการติดตั้งอุปกรณ์บันทึกข้อมูลใหม่ลงบนคอมพิวเตอร์ จำเป็นจะต้องจัดระบบโครงสร้างพื้นฐานด้วยการจัดระเบียบข้อมูลโดยการฟอร์แมต ซึ่งระบบไฟล์แบบ NTFS ถูกออกแบบให้มีคุณสมบัติหลายอย่างที่เหมาะสมกับการติดตั้งระบบปฏิบัติการ Windows 7

4. ซอฟต์แวร์ที่ใช้ในการทดลอง แบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ซอฟต์แวร์นิติวิทยาศาสตร์ และซอฟต์แวร์ที่ใช้เป็นเครื่องมือในการปกปิดร่องรอยหลักฐาน

- ซอฟต์แวร์นิติวิทยาศาสตร์ ได้แก่ ซอฟต์แวร์ที่นิยมใช้ในหน่วยงานพิสูจน์หลักฐานคอมพิวเตอร์ เป็นรุ่นที่ให้อำนาจโดยไม่จำเป็นต้องจ่ายเพื่อการศึกษา จำนวน 3 โปรแกรมได้แก่ EnCase Imager 7.10.00.103, FTK Imager 3.1.2.0 และ ProDiscover 7.0.0.3

- ซอฟต์แวร์ที่ใช้เป็นเครื่องมือในการปกปิดร่องรอยหลักฐาน (Anti-forensic Tools) ได้แก่ Sdelete 2.02 และ Eraser 6.2.0.2986

5. ไฟล์ข้อมูลต้นฉบับที่ใช้ในการทดลอง เพื่อให้การทดลองเกิดความหลากหลายผู้วิจัยจึงได้สร้างไฟล์ข้อมูลที่มีส่วนขยายของไฟล์ในรูปแบบต่าง ๆ ประกอบด้วย Adobe Acrobat Document (.pdf), File folder, PNG image (.png), Microsoft Excel Worksheet (.xlsx), JPEG image (.jpg), Microsoft Word Document (.docx) และ GIF image (.gif)

รูปแบบการทดลอง

ผู้วิจัยได้ออกแบบการทดลองกู้คืนข้อมูลที่ถูกปกปิดร่องรอยหลักฐานดิจิทัล ดังนี้

การทดลองที่ 1 กู้คืนข้อมูลที่ถูกปกปิดร่องรอยหลักฐานด้วยคำสั่ง Delete ซึ่งเป็นคำสั่งพื้นฐานของระบบปฏิบัติการ Windows 7 ไม่ต้องติดตั้งเพิ่มเติม เพื่อทดสอบว่าซอฟต์แวร์นิติวิทยาศาสตร์สามารถกู้คืนข้อมูลที่ถูกปกปิดร่องรอยหลักฐานจากการ Delete ได้จริง และเพื่อค้นหาตำแหน่งของข้อมูล (Physical Sector) ที่ถูกลบบนอุปกรณ์บันทึกข้อมูลที่ใช้เป็นหลักฐานดิจิทัล (Digital Evidence) ว่าไม่มีการเปลี่ยนแปลงตำแหน่ง

การทดลองที่ 2 กู้คืนข้อมูลที่ถูกปกปิดร่องรอยหลักฐานด้วยคำสั่ง Format ซึ่งเป็นกระบวนการในการจัดรูปแบบของอุปกรณ์ที่ใช้ในการบันทึกข้อมูล เพื่อให้มีคุณสมบัติเหมาะสมกับระบบปฏิบัติการที่ใช้ โดยการล้างไฟล์ระบบเก่า แล้วสร้างไฟล์ระบบใหม่ขึ้นมา เพื่อทดสอบว่าเมื่อใช้คำสั่ง Format แล้ว สามารถพบร่องรอยของข้อมูลที่ต้องการกู้คืน และเพื่อทดสอบว่าอุปกรณ์บันทึกข้อมูลที่เป็นหลักฐานดิจิทัลเมื่อผ่านกระบวนการในการจัดรูปแบบระบบไฟล์ใหม่แล้วยังสามารถกู้คืนข้อมูลได้โดยจำนวนครั้งในการใช้คำสั่ง Format มีผลต่อการกู้คืนข้อมูล

การทดลองที่ 3 กู้คืนข้อมูลที่ถูกปกปิดร่องรอยหลักฐานด้วยการ Overwrite ซึ่งเป็นวิธีการเขียนข้อมูลอื่น ๆ ทับลงไปบนข้อมูลที่ต้องการปกปิดร่องรอยหลักฐาน ป้องกันไม่ให้นำข้อมูลดังกล่าวกลับไปใช้ได้อีก เพื่อหาความเป็นไปได้ในการลบข้อมูลแบบถาวร และเพื่อทดสอบว่าอุปกรณ์บันทึกข้อมูลที่ใช้เป็นหลักฐานดิจิทัล

เมื่อถูกเขียนข้อมูลอื่น ๆ ทับลงไปตำแหน่งของข้อมูลซึ่งเป็นหลักฐานดิจิทัลแล้ว ไม่สามารถกู้คืนข้อมูลได้

วิธีการทดลอง

ขั้นตอนการกู้คืนข้อมูลหลักฐานดิจิทัลจากการปกปิดร่องรอยหลักฐานด้วยเทคนิคต่าง ๆ ประกอบด้วย

1. ใช้เทคนิคการปกปิดร่องรอยหลักฐานดิจิทัลแต่ละเทคนิคกับไฟล์ข้อมูลดิจิทัลต้นฉบับที่เตรียมไว้ ดังนี้

การทดลองที่ 1 คำสั่ง Delete เป็นคำสั่งพื้นฐานไม่ต้องติดตั้งเพิ่มเติม เรียกใช้คำสั่งได้จาก Command Line หรือ GUI (Graphic-User Interface) ด้วยการกดปุ่ม Shift+Delete หรือกดปุ่ม Shift พร้อมทั้งใช้เมาส์ลากข้อมูลที่ต้องการลบไปที่ Recycle Bin

การทดลองที่ 2 คำสั่ง Format ให้ทำการทดลอง Format จำนวน 1 ครั้ง, 3 ครั้ง, 5 ครั้ง และ 7 ครั้ง ตามลำดับ แบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ

- Format โดยไม่ระบุคำสั่งย่อย (Switch) เรียกใช้คำสั่งได้จาก Command Line โดยมีรูปแบบคำสั่งคือ Format drive: หรือ GUI ด้วยการคลิกขวาไดรฟ์ที่ต้องการ Format แล้วเลือกคำสั่ง Format จาก Context Menu

- Format ระบุ Switch ไม่สามารถเรียกใช้คำสั่งจาก GUI ได้ ต้องเรียกใช้คำสั่งจาก Command Line เท่านั้น โดยมีรูปแบบคำสั่งคือ Format drive: /P:Passes เช่น Format G: /P:5 หมายถึงการสั่งให้ Format ไดรฟ์ G: แล้วเขียน 0 ทับลงในทุกตำแหน่งของไดรฟ์ G: ตามจำนวนครั้งที่กำหนด คือ 5 ครั้ง

การทดลองที่ 3 การ Overwrite เป็นการเขียนข้อมูลอื่นทับลงบนตำแหน่งเดิมของข้อมูลที่ต้องการปกปิดร่องรอยหลักฐาน แบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ

- Overwrite แบบใช้ซอฟต์แวร์ปกปิดร่องรอยหลักฐาน ได้แก่ Sdelete 2.02 และ Eraser 6.2.0.2986 โดยตั้งค่าการเขียนทับตั้งแต่ 1 ครั้ง แล้วเพิ่มขึ้นทีละ 1 จนซอฟต์แวร์นิติวิทยาศาสตร์ทั้ง 3 โปรแกรมไม่สามารถกู้คืนข้อมูลหลักฐานดิจิทัลได้

- Overwrite แบบไม่ใช้ซอฟต์แวร์ โดยทำการลบข้อมูลหลักฐานดิจิทัลทั้งหมดแล้วบันทึกไฟล์ข้อมูลอื่นลงบนอุปกรณ์บันทึกข้อมูลที่ใช้เป็นหลักฐานดิจิทัลทีละไฟล์จนกว่าจะไม่สามารถกู้คืนหลักฐานดิจิทัลได้

2. สร้างสำเนาข้อมูลดิจิทัลแบบ Bit-stream Copy ด้วยซอฟต์แวร์นิติวิทยาศาสตร์ เพื่อให้สำเนาดิจิทัลที่สร้างขึ้นเหมือนกับต้นฉบับทุกประการ

3. นำสำเนาหลักฐานดิจิทัลไปทำการกู้คืนข้อมูลด้วยซอฟต์แวร์นิติวิทยาศาสตร์ ทั้ง 3 โปรแกรม

4. เปรียบเทียบประสิทธิภาพในการกู้คืนข้อมูลของซอฟต์แวร์นิติวิทยาศาสตร์ ทั้ง 3 โปรแกรม

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

การกู้คืนข้อมูลหลักฐานดิจิทัลที่ถูกปกปิดร่องรอยหลักฐาน สามารถอธิบายผลการทดลองได้ ดังนี้

ผลการทดลอง

การทดลองปกปิดร่องรอยหลักฐานดิจิทัลด้วยการ Delete, Format และ Overwrite มีผลการทดลองตามตาราง ดังต่อไปนี้

ตารางที่ 1 การกู้คืนข้อมูลจากคำสั่ง Delete

ชนิดข้อมูล	ผลการกู้คืนข้อมูลจากคำสั่ง Delete		
	EnCase Imager 7.10.00.103	FTK Imager 3.1.2.0	ProDiscover 7.0.0.3
PDF	✓	✓	✓
FILE	✓	✓	✓
FOLDER			
XLSX	✓	✓	✓
PNG	✓	✓	✓
JPG	✓	✓	✓
DOCX	✓	✓	✓
GIF	✓	✓	✓

จากตารางที่ 1 พบว่าซอฟต์แวร์นิติวิทยาศาสตร์ทั้ง 3 โปรแกรม สามารถกู้คืนข้อมูลหลักฐานดิจิทัลได้ในสภาพที่สมบูรณ์ 100%

ตารางที่ 2 การกู้คืนข้อมูลจากคำสั่ง Format

ชนิดข้อมูล	ผลการกู้คืนข้อมูลจากคำสั่ง Format 1, 3, 5, 7 ครั้ง		
	EnCase	FTK	ProDiscover
	Imager	Imager	7.0.0.3
	7.10.00.103	3.1.2.0	
PDF	✓	✓	✓
FILE	✓	✓	✓
FOLDER			
XLSX	✓	✓	✓
PNG	✓	✓	✓
JPG	✓	✓	✓
DOCX	✓	✓	✓
GIF	✓	✓	✓

ตารางที่ 2 (ต่อ)

ชนิดข้อมูล	ผลการกู้คืนข้อมูลจากคำสั่ง Format drive: /P: 1		
	EnCase	FTK	ProDiscover
	Imager	Imager	7.0.0.3
	7.10.00.103	3.1.2.0	
PDF	✗	✗	✗
FILE	✗	✗	✗
FOLDER			
XLSX	✗	✗	✗
PNG	✗	✗	✗
JPG	✗	✗	✗
DOCX	✗	✗	✗
GIF	✗	✗	✗

จากตารางที่ 2 พบว่าเมื่อใช้คำสั่ง Format โดยไม่ระบุคำสั่งย่อย (Switch) จำนวน 1 ครั้ง, 3 ครั้ง, 5 ครั้ง และ 7 ครั้ง ตามลำดับ ซอฟต์แวร์นิติวิทยาศาสตร์ ทั้ง 3 โปรแกรม สามารถกู้คืนข้อมูลหลักฐานดิจิทัลได้ แต่กรณี

ใช้คำสั่ง Format ในรูปแบบ Format drive: /P:1 พบว่าการ Format โดยกำหนดให้ P มีค่าเท่ากับ 1 ไม่สามารถกู้คืนข้อมูลได้ ดังนั้น จึงไม่ได้ทำการทดลองกำหนดให้ค่า P เท่ากับ 3 5 และ 7 ตามที่ได้ออกแบบการทดลองไว้

ตารางที่ 3 การกู้คืนข้อมูลจากการ Overwrite

ชนิดข้อมูล	ใช้ซอฟต์แวร์ในการ Overwrite จำนวน 1 ครั้ง		
	EnCase	FTK	ProDiscover
	Imager	Imager	7.0.0.3
	7.10.00.103	3.1.2.0	
PDF	✗	✗	✗
FILE	✗	✗	✗
FOLDER			
XLSX	✗	✗	✗
PNG	✗	✗	✗
JPG	✗	✗	✗
DOCX	✗	✗	✗
GIF	✗	✗	✗

ตารางที่ 3 (ต่อ)

ชนิดข้อมูล	ผลการกู้คืนข้อมูลจากการ Overwrite โดยใช้ซอฟต์แวร์		
	EnCase	FTK	ProDiscover
	Imager	Imager	7.0.0.3
	7.10.00.103	3.1.2.0	
ลบข้อมูลทั้งหมด ครั้งที่ 1 เขียนข้อมูลทับ 324 MB			
PDF	✓	✓	✓
FILE	✗	✗	✗
FOLDER			
XLSX	✓	✓	✓
PNG	✓	✓	✓
JPG	✓	✓	✓
DOCX	✓	✓	✓
GIF	✓	✓	✓

ชนิดข้อมูล	ผลการกู้คืนข้อมูลจากการ Overwrite โดยไม่ใช้ซอฟต์แวร์		
	EnCase Imager	FTK Imager	ProDiscover 7.0.0.3
	7.10.00.103	3.1.2.0	
ลบข้อมูลทั้งหมด ครั้งที่ 2 เขียนข้อมูลทับเพิ่ม 281 MB			
PDF	✗	✗	✗
FILE	✗	✗	✗
FOLDER			
XLSX	✓	✓	✓
PNG	✓	✓	✓
JPG	✓	✓	✓
DOCX	✓	✓	✓
ลบข้อมูลทั้งหมด ครั้งที่ 3 เขียนข้อมูลทับเพิ่ม 336 MB			
PDF	✗	✗	✗
FILE	✗	✗	✗
FOLDER			
XLSX	✗	✗	✗
PNG	✗	✗	✗
JPG	✗	✗	✗
DOCX	✗	✗	✗

จากตารางที่ 3 พบว่าในกรณีการปิดเครื่องด้วย
หลักฐานด้วยการ Overwrite โดยใช้ซอฟต์แวร์ปิด
เครื่องหลักฐาน 2 โปรแกรม คือ Eraser 6.2.0.2986
และ Sdelete 2.02 และ ซึ่งตั้งค่าให้แต่ละโปรแกรมทำ
การเขียนทับ จำนวน 1 ครั้ง ผลการทดลองพบว่า
ซอฟต์แวร์นิติวิทยาศาสตร์ ทั้ง 3 โปรแกรม ไม่สามารถกู้
คืนข้อมูลหลักฐานดิจิทัลได้ สำหรับกรณี Overwrite
แบบไม่ใช้ซอฟต์แวร์ โดยทำการลบข้อมูลหลักฐานดิจิทัล
ทั้งหมดแล้วบันทึกไฟล์ข้อมูลอื่นลงบนอุปกรณ์บันทึก
ข้อมูลที่ใช้เป็นหลักฐานดิจิทัลที่ละไฟล์ ผลการกู้คืนข้อมูล
หลักฐานดิจิทัลของซอฟต์แวร์นิติวิทยาศาสตร์ ทั้ง 3
โปรแกรม คือ ครั้งที่ 1 เมื่อบันทึกไฟล์ข้อมูลอื่นขนาด
324 MB สามารถกู้คืนข้อมูลหลักฐานดิจิทัลได้ 6 ไฟล์

ครั้งที่ 2 บันทึกไฟล์ข้อมูลอื่นเพิ่มขนาด 281 MB สามารถ
กู้คืนข้อมูลหลักฐานดิจิทัลได้ 5 ไฟล์ ครั้งที่ 3 บันทึก
ไฟล์ข้อมูลอื่นเพิ่มขนาด 336 MB ไม่สามารถกู้คืนข้อมูล
หลักฐานดิจิทัลได้

อภิปรายผล

ผลการวิจัยเรื่อง การศึกษาเปรียบเทียบการ
ปกปิดร่องรอยหลักฐานดิจิทัล ที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการ
กู้คืนข้อมูลของซอฟต์แวร์นิติวิทยาศาสตร์ มีประเด็นที่
สามารถนำมาอภิปรายผลได้ ดังนี้

1. วัตถุประสงค์การวิจัยข้อที่ 1 ที่ว่า “เพื่อ
ศึกษาเทคนิคการปกปิดร่องรอยหลักฐานดิจิทัล ที่ส่งผล
ต่อการกู้คืนข้อมูลของซอฟต์แวร์นิติวิทยาศาสตร์”
สามารถอธิบายได้จากเทคนิคการปกปิดร่องรอยหลักฐาน
ดิจิทัลที่ใช้ในการวิจัยครั้งนี้ จำนวน 3 เทคนิค
ประกอบด้วย

- การปกปิดร่องรอยหลักฐานด้วยคำสั่ง Delete
ผลการวิจัยพบว่า การลบไฟล์บนระบบไฟล์แบบ NTFS นั้น
ระบบปฏิบัติการจะทำการเปลี่ยนค่าใน MFT Header
ของ MFT Entry ให้เป็น “0” ซึ่งหมายถึงไฟล์ถูกลบจาก
ค่าปกติคือ “1” ดังนั้น ข้อมูลไฟล์ที่ถูกลบจึงไม่ได้ถูกลบ
ออกจากไดรฟ์หรืออุปกรณ์บันทึกข้อมูลจริง ๆ ด้วยเหตุผล
ดังกล่าวทำให้สามารถกู้คืนข้อมูลที่ถูกลบโดยร่องรอย
หลักฐานด้วยคำสั่ง Delete ในระบบไฟล์แบบ NTFS
ภายใต้ระบบ ปฏิบัติการ Windows 7 กลับมาได้ในสภาพ
ที่สมบูรณ์ซึ่งผลการวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Lin X
(6) ที่พบว่า การลบไฟล์ในระบบไฟล์แบบ NTFS ถ้าหาก
ข้อมูลเนื้อไฟล์ที่ ถูกลบยังไม่ถูกเขียนทับด้วยไฟล์ข้อมูลอื่น
รายการดัชนีใน MFT Entry ยังสามารถใช้อ้างอิงไฟล์ที่ถูกลบ
ได้ และทราบขนาดของคลัสเตอร์ ย่อมกู้คืนไฟล์ข้อมูล
ได้สำเร็จ โดยมีขั้นตอนในการกู้คืนไฟล์ข้อมูล 2 ขั้นตอน
คือ ขั้นตอนที่ 1 ต้องกู้คืนข้อมูลในส่วนที่เป็นเนื้อหาของ
ไฟล์ โดยทำการสแกนรายการใน MFT ที่ละรายการเพื่อ
รวบรวมรายการของ Entry ที่ถูกทำเครื่องหมายแสดงว่า
ถูกลบ (Deletion Marker) ไว้ (ไบต์ที่ 22-23 ของ MFT

Entry คือ 0x0000) จากนั้นให้วิเคราะห์แอดทรีบิวต์ \$DATA เพื่อตรวจสอบสถานะในการจัดสรรคลัสเตอร์ หากสถานะเป็น 1 หมายความว่ากลุ่มข้อมูลเหล่านั้นถูกเขียนทับด้วยข้อมูลใหม่

- การปกปิดร่องรอยหลักฐานด้วยคำสั่ง Format จากผลการทดลองพบว่าการใช้คำสั่ง Format แบบไม่ระบุคำสั่งย่อยเพื่อปกปิดร่องรอยหลักฐานดิจิทัล จำนวน 1 3 5 และ 7 ครั้ง ตามลำดับ สามารถค้นพบร่องรอยของข้อมูลดิจิทัลที่ถูกปกปิดร่องรอยหลักฐานด้วยคำสั่ง Format จึงกู้คืนข้อมูลหลักฐานดิจิทัลได้ โดยจำนวนครั้งของการใช้คำสั่ง Format ไม่มีผลต่อการกู้คืนข้อมูลแต่อย่างใด ซึ่งผลการวิจัยนี้สอดคล้องกับรายงานของ Blancco Technology Group (7) ที่พบว่าผลการสำรวจข้อมูลของเจ้าหน้าที่ฝ่ายไอทีมากกว่า 400 คน จากประเทศสหรัฐอเมริกา แคนาดา เม็กซิโก สหราชอาณาจักร เยอรมัน ฝรั่งเศส ญี่ปุ่น จีน และอินเดีย เกี่ยวกับแนวทางการทำลายข้อมูลจากไดรฟ์ที่ไม่ได้ใช้งานแล้วมีเจ้าหน้าที่ไอทีร้อยละ 53 ซึ่งเกินกว่าครึ่งหนึ่งของผู้เชี่ยวชาญด้านไอทีจากทั่วโลก ลบข้อมูลคอมพิวเตอร์แล็ปท็อป ไดรฟ์ภายนอก และเซิร์ฟเวอร์ ด้วยวิธีที่สามารถ กู้คืนได้ง่าย โดยร้อยละ 31 ใช้วิธี Delete โดยลากไฟล์ไปที่ Recycle Bin และร้อยละ 22 ใช้วิธี Format ไดรฟ์ทั้งหมด ซึ่งการลบข้อมูลทั้งสองวิธีสามารถกู้คืนข้อมูลได้ สำหรับกรณีใช้คำสั่ง Format ที่ระบุ Switch โดยมีรูปแบบคำสั่งเป็น Format drive: /P:1 เป็นการสั่งให้จัดรูปแบบของอุปกรณ์บันทึกข้อมูลที่เป็นหลักฐานดิจิทัล ให้มีระบบไฟล์ที่เหมาะสมกับระบบปฏิบัติการที่ใช้ พร้อมทั้งเขียน 0 ซึ่งเป็นตัวเลขแสดงสถานะว่าเป็นพื้นที่ว่าง ลงบนทุกตำแหน่งบนอุปกรณ์บันทึกข้อมูลที่ใช้เป็นหลักฐานดิจิทัล ซึ่งคำสั่ง Format drive: /P: 1 มีลักษณะเหมือนกันกับการปกปิดร่องรอยหลักฐานด้วยการ Overwrite ดังนั้น ถึงแม้จะเป็นการเขียนทับเพียงครั้งเดียวแต่ก็ทำให้ทุกตำแหน่งของข้อมูลเนื้อไฟล์เดิมที่ต้องการกู้คืนถูกแทนที่ด้วย 0 จึงไม่สามารถกู้คืนข้อมูลที่เป็นหลักฐานดิจิทัลได้ ซึ่งผลการวิจัย

นี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Wright C, Kleiman D, Sundhar S (8) ที่พบว่า การเขียนทับเพียงครั้งเดียวก็เพียงพอแล้วที่จะลบข้อมูลเพื่อไม่ให้สามารถกู้คืนได้ และอธิบายเพิ่มเติมว่าบ่อยครั้งที่เกิดข้อโต้แย้งกันเกี่ยวกับจำนวนครั้งที่เหมาะสมในการเขียนข้อมูลทับ (Overwriting) ซึ่งขัดแย้งกับผลการวิจัยของ ปีเตอร์ กัทแมนน์ ที่พบว่าต้องทำการเขียนทับมากถึง 35 ครั้ง ข้อมูลจึงจะปลอดภัยจากการเข้าถึงของบุคคลที่ไม่ได้รับอนุญาต โดยอธิบายว่าเมื่อเขียนข้อมูลใหม่ทับข้อมูลเดิมบนไดรฟ์แบบแม่เหล็ก ข้อมูลใหม่ที่ยืนยันไปยังไดรฟ์อาจไม่สามารถเขียนกลับไปยังตำแหน่งที่แน่นอนของข้อมูลต้นฉบับได้ โดยการเปลี่ยนบิตของข้อมูลเดิมจะไม่ได้เปลี่ยนจาก 0 เป็น 1 หรือจาก 1 เป็น 0 พอดี แต่จะมีส่วนที่เหลื่อมกัน เช่น เปลี่ยนจาก 1 เป็น 0.95 หรือ 1.05 เป็นต้น ดังนั้น ถ้าสามารถอ่านข้อมูลดิบที่อยู่บนไดรฟ์ แล้วนำไปวิเคราะห์รูปแบบ (Pattern) การเปลี่ยนค่าบิตของข้อมูลได้ จะทำให้ทราบว่าข้อมูลที่ถูกเขียนทับมีค่าเป็นอะไรมาก่อน โดยสามารถใช้กล้องจุลทรรศน์แรงแม่เหล็ก (MFM: Magnetic Force Microscope) ตรวจสอบค่าการจัดเรียงของสนามแม่เหล็กบนพื้นผิวของไดรฟ์ได้ แต่ในงานวิจัยไม่ได้ยืนยันว่าสามารถกู้คืนข้อมูลได้จริง เพียงแต่บอกว่ามีความเป็นไปได้เท่านั้น นอกจากนี้ Feenberg D (9) ยังได้ศึกษาเกี่ยวกับการอ่านข้อมูลที่ถูกเขียนทับของหน่วยงานข่าวกรอง โดยกล่าวว่างานวิจัยของกัทแมนน์ ถูกใช้อ้างอิงมาหลายสิบปีทำให้เกิดความเชื่อที่ว่าหน่วยงานข่าวกรองของสหรัฐอเมริกามีเครื่องมือที่สามารถกู้คืนข้อมูลที่ถูกเขียนทับได้ แต่จนถึงปัจจุบันก็ยังไม่มียุทธศาสตร์หรือการยืนยันอย่างเป็นทางการว่าสามารถทำได้จริง ประกอบกับในปี 2003 กัทแมนน์ได้ออกมายอมรับว่าในส่วนของเกี่ยวกับการเขียนข้อมูลทับ (Overwritten Sectors) บนไดรฟ์สมัยใหม่ (Modern Drives) ไม่สามารถอ่านค่าโดยใช้เทคนิคที่ระบุไว้ในงานวิจัยของเขาในปี 1996 ได้ แต่เขาไม่ได้ถอนการอ้างสิทธิ์ในงานวิจัยที่เกี่ยวกับไดรฟ์รุ่นเก่า ดังนั้น การกู้ข้อมูลที่ถูกเขียนทับไปแล้วด้วยการส่องดูสนามแม่เหล็กจึงไม่สามารถทำได้บนไดรฟ์สมัยใหม่

ในทางปฏิบัติหากต้องการทำลายข้อมูลเก่า การเขียนข้อมูลทับครั้งเดียวในตำแหน่งที่ถูกต้องก็ทำให้ไม่สามารถกู้คืนข้อมูลได้แล้ว

- การปกปิดร่องรอยหลักฐานด้วยการ Overwrite แบ่งเป็น 2 กรณี คือ ในกรณีใช้ซอฟต์แวร์ปกปิดร่องรอยหลักฐาน พบว่าการตั้งค่าให้ซอฟต์แวร์เขียนข้อมูลทับ 1 ครั้ง ทำให้ไม่สามารถกู้คืนข้อมูลหลักฐานดิจิทัลได้ เนื่องจากเป็นเขียนข้อมูลทับทุกตำแหน่งบนอุปกรณ์บันทึกข้อมูลโดยมีการกำหนดรูปแบบ การเปลี่ยนค่าบิตของข้อมูลในการเขียนทับไว้หลายรูปแบบ ซึ่งผลการวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Yusof NA, Abdullah S, Senan MF, Abidin NZ, Sahri MB, Binti SN (10) ที่พบว่าการทำลายข้อมูลให้ไม่สามารถกู้คืนได้ (Data sanitization) ใช้วิธีการเขียนทับในการทำลายข้อมูล โดยกำหนดรูปแบบการเปลี่ยนค่าบิตของข้อมูล (Logical Data Bit Pattern) ในการเขียนทับไว้หลายรูปแบบ เพื่อให้แน่ใจว่าตำแหน่งของข้อมูลที่ต้องการทำลายทั้งหมดถูกแทนที่ด้วยรูปแบบบิตการเขียนทับข้อมูลที่ใช้ โดยกล่าวว่าทำการลบ 35 ครั้ง แบบกัทแมนน์ใช้เวลาานเกินไป นอกจากนี้ Kissel R, Regenscheid A, Scholl M, Stine K (11) ฝายความปลอดภัยคอมพิวเตอร์ของ NIST ได้จัดทำคู่มือเป็นเอกสารเผยแพร่ NIST 800-88 (Guidelines for Media Sanitization) เพื่อยืนยันว่าการเขียนทับข้อมูลครั้งเดียวเพียงพอต่อการป้องกันข้อมูลที่ถูกลบจากการพยายามกู้คืนข้อมูลใด ๆ สำหรับกรณีการ Overwrite โดยการลบข้อมูลทั้งหมดแล้วเขียนข้อมูลอื่นทับที่ละไฟล์ ผลการทดลองพบว่าเมื่อเขียนข้อมูลอื่นลงบนอุปกรณ์บันทึกข้อมูลจนเกือบเต็มความจุแล้วจะทำให้ไม่สามารถกู้คืนข้อมูลได้ เนื่องจากไฟล์ข้อมูลหลักฐานดิจิทัลถูกเขียนทับด้วยไฟล์อื่นทำให้เนื้อไฟล์เสียหาย จึงสรุปได้ว่าในระบบไฟล์แบบ NTFS เมื่อมีการ ลบไฟล์ข้อมูลแล้วสามารถกู้คืนได้ หากยังไม่มีกระบวนการบันทึกไฟล์ข้อมูลอื่นทับในตำแหน่งของไฟล์ข้อมูลเดิม

2. จากวัตถุประสงค์ของการวิจัยในข้อที่ 2 ที่ว่า “เพื่อเปรียบเทียบเทคนิคการปกปิดร่องรอยหลักฐานดิจิทัลแต่ละเทคนิคที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกู้คืนข้อมูลของซอฟต์แวร์นิติวิทยาศาสตร์” เนื่องจากเป็นงานวิจัยที่ต้องการสังเกตว่าการปกปิดร่องรอยหลักฐานดิจิทัลแต่ละเทคนิคส่งผลต่อการกู้คืนข้อมูลของซอฟต์แวร์นิติวิทยาศาสตร์อย่างไร หรือกล่าวอีกนัยหนึ่งก็คือต้องการทราบถึงผลการกู้คืนข้อมูลหลักฐานดิจิทัลที่ถูกปกปิดร่องรอยหลักฐานด้วยเทคนิคต่าง ๆ เท่านั้น จึงไม่ได้ พิจารณาในด้านประสิทธิภาพของซอฟต์แวร์ ได้แก่

- ด้านความคุ้มค่า เช่น เป็นซอฟต์แวร์ที่มีฟังก์ชันหลากหลายเมื่อเทียบกับราคา

- ด้านคุณภาพ เช่น เป็นซอฟต์แวร์ที่สามารถสแกนหาไฟล์ที่ถูกลบได้อย่างรวดเร็ว ไม่สิ้นเปลืองทรัพยากร (Resource) ของระบบ (ใช้พื้นที่ในการติดตั้งโปรแกรมน้อย ใช้หน่วยความจำน้อย)

- ด้านอื่น ๆ เช่น สร้างระบบป้องกันการเขียนทับข้อมูลแบบซอฟต์แวร์ หรือ Software Write Blocker ได้ วิเคราะห์ระบบอิมเมจไฟล์ได้ รองรับภาษาไทย เป็นต้น

ดังนั้น ประสิทธิภาพในการกู้คืนข้อมูลหลักฐานดิจิทัลของซอฟต์แวร์นิติวิทยาศาสตร์ทั้ง 3 โปรแกรมจึงไม่แตกต่างกัน นั่นคือ ไฟล์ข้อมูลที่ยังไม่ถูกเขียนทับสามารถกู้คืนได้ ส่วนไฟล์ข้อมูลที่ถูกเขียนทับแล้วบางส่วนหรือถูกเขียนทับทั้งหมดไม่สามารถกู้คืนได้ แต่ในความเป็นจริงซอฟต์แวร์นิติวิทยาศาสตร์ยังมีช่องทางสำหรับผู้ใช้งานที่มีความสามารถด้านการเขียนโปรแกรมทำการพัฒนาซอฟต์แวร์ได้ตามความต้องการ เช่น โปรแกรม EnCase รองรับการเขียนโปรแกรมสคริปต์ชื่อว่า EnScript ที่อนุญาตให้ผู้ใช้งานสร้างสคริปต์ด้วยการใช้ภาษา C++ หรือ JavaScript สำหรับใช้ในการตรวจสอบค้นหาไฟล์ที่ต้องการเฉพาะเจาะจงเป็นพิเศษ และมี API ซึ่งบรรจุชุดคำสั่งต่าง ๆ เอาไว้ภายในเพื่อให้ผู้เขียนโปรแกรมสามารถเรียกใช้งานได้ทันที โดยไม่จำเป็นต้องเขียนโปรแกรมในส่วนนั้น ๆ เองทั้งหมด หรือหากใช้ซอฟต์แวร์

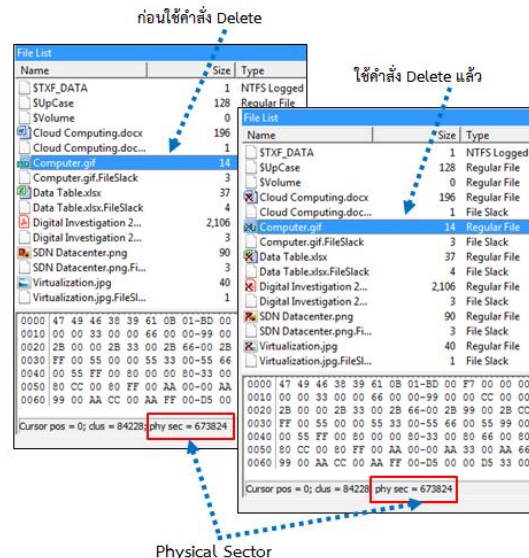
นิติวิทยาศาสตร์ประเภท Commercial Ware จะทำให้กู้คืนข้อมูลเนื้อไฟล์ที่ยังไม่ถูกเขียนทับหรือมีร่องรอยให้กู้คืนได้บางส่วนโดยคิดเป็นร้อยละจากขนาดไฟล์ข้อมูลที่กู้คืนได้ เช่น กู้คืนได้ 35% 50% หรือ 75% เป็นต้น ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ศุภชัย หวันแสง (12) ที่อธิบายไว้ว่าซอฟต์แวร์กู้คืนข้อมูลที่ใช้สำหรับพิสูจน์หลักฐานดิจิทัล (Digital Forensic) เปิดช่องให้ผู้ใช้งานปรับปรุงการใช้งานเพิ่มเติมหรือที่เรียกว่า Plugin ได้โดยจะต้องทำการเขียนโปรแกรมเพิ่มเติมเอง ซึ่งจะสะดวกกว่าการเขียนโปรแกรมตั้งแต่แรก เนื่องจากจะมี Application Programming Interface (API) โดยในส่วนนี้ผู้ที่ใช้งานจำเป็นต้องเข้าใจทั้งในส่วนของ API และกระบวนการทำงานของระบบจัดการไฟล์เพื่อให้สามารถกู้คืนข้อมูลได้อย่างถูกต้อง

สรุปผล

จากผลการศึกษาพบว่า การปกปิดร่องรอยหลักฐานแต่ละเทคนิคส่งผลต่อประสิทธิภาพในการกู้คืนข้อมูลหลักฐานดิจิทัล ดังนี้

1. การปกปิดร่องรอยหลักฐานด้วยคำสั่ง Delete สามารถกู้ข้อมูลคืนได้ในสภาพที่สมบูรณ์ 100% และตำแหน่งของข้อมูล (Physical Sector) ในหลักฐานดิจิทัลที่ถูก Delete ไม่มีการเปลี่ยนแปลง เนื่องจากระบบไฟล์แบบ NTFS ภายใต้ระบบปฏิบัติการ Windows 7 จะสร้าง Master File Table (MFT) ขึ้นมาโดยอัตโนมัติ MFT เป็นส่วนที่ใช้เก็บข้อมูลรายละเอียดของไฟล์และไดเรกทอรีทั้งหมด โดยมีการเก็บข้อมูลเป็น Entry หรือที่เรียกว่า MFT Entry ข้อมูลรายละเอียดของ MFT Entry ถูกเรียกว่าเมตาดาต้า (Metadata) เก็บไว้ในไฟล์ \$MFT ส่วนข้อมูลเนื้อไฟล์เก็บใน \$DATA การลบไฟล์บนระบบไฟล์แบบ NTFS นั้น Huang W, Meisheng Y (13) อธิบายว่าระบบ ปฏิบัติการจะทำการเปลี่ยน Flag ในตำแหน่งไบต์ที่ 16 ใน MFT Header ของ MFT Entry ให้เป็น "0" ซึ่งหมายถึงไฟล์ถูกลบจากค่าปกติคือ "1" ข้อมูลไฟล์ที่ถูกลบจึงไม่ได้ถูกลบออกจากไดรฟ์หรืออุปกรณ์บันทึกข้อมูล

จริง ๆ ทำให้สามารถกู้คืนข้อมูลที่ถูกลบปิดร่องรอยหลักฐานด้วยคำสั่ง Delete กลับมาได้ในสภาพที่สมบูรณ์ 100% Physical Sector หรือตำแหน่งของข้อมูล ก่อนใช้คำสั่ง Delete และหลังจากใช้คำสั่ง Delete คือตำแหน่งเดิมไม่มีการเปลี่ยนแปลง แสดงดังรูปที่ 5



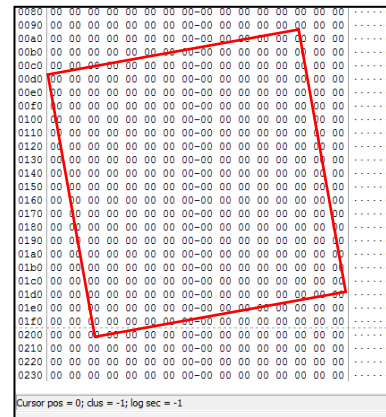
รูปที่ 5 ตำแหน่งของข้อมูลบนหลักฐานดิจิทัล

2. การปกปิดร่องรอยหลักฐานด้วยคำสั่ง Format แบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีใช้คำสั่ง Format แบบไม่ระบุคำสั่งย่อย (Switch) เมื่อทำการ Format จำนวน 1 3 5 และ 7 ครั้ง ตามลำดับ พบว่าสามารถพบร่องรอยของข้อมูล โดยสามารถกู้คืนข้อมูลจากการใช้คำสั่ง Format ได้จริง และจำนวนครั้งในการ Format ไม่มีผลต่อการกู้คืนข้อมูลแต่อย่างใด สำหรับกรณีใช้คำสั่ง Format แบบระบุ Switch โดยกำหนดรูปแบบคำสั่งเป็น Format drive: /P:1 (1 คือจำนวนครั้งในการ Format) พบว่าไม่สามารถกู้คืนข้อมูลหลักฐานดิจิทัลได้ จากผลการทดลองดังกล่าวอธิบายได้ว่าการใช้คำสั่ง Format โดยไม่ระบุคำสั่งย่อยสามารถกู้คืนข้อมูลดิจิทัลได้โดยมีชื่อแตกต่างจากไฟล์ข้อมูลต้นฉบับเนื่องจากทุกครั้งที่ใช้คำสั่ง Format จะมีการสร้างไฟล์ \$MFT ใหม่ ไปแทนไฟล์ \$MFT เดิม ทำให้ข้อมูลภายใน \$MFT เดิมถูกทำลาย ไฟล์ข้อมูลหลักฐานดิจิทัลที่กู้คืนได้จึงมีชื่อแตกต่างกันตาม

ซอฟต์แวร์นิติวิทยาศาสตร์ที่ใช้ในการกู้คืนข้อมูล ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ศุภชัย หวันแสง (12) เกี่ยวกับการกู้คืนข้อมูลจากซอฟต์แวร์คงสภาพฮาร์ดดิสก์ ซึ่งจากผลการวิจัยพบว่า การกู้คืนข้อมูลที่หลงเหลือจากซอฟต์แวร์คงสภาพฮาร์ดดิสก์ เมื่อกู้คืนข้อมูลได้ทั้งในส่วนข้อมูล MFT Entry และข้อมูลเนื้อไฟล์จะทำให้สามารถนำหาความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูล MFT Entry และข้อมูลเนื้อไฟล์ด้วยขนาดและชนิดของไฟล์ ดังนั้น จึงทำให้สามารถทราบได้ว่าเนื้อไฟล์ที่กู้คืนมาได้นั้นมีชื่อไฟล์และรายละเอียดที่เกี่ยวข้องกับไฟล์หรือไม่

สำหรับกรณีการใช้คำสั่ง Format drive: /P:1 เป็นการสั่งให้จัดรูปแบบของอุปกรณ์บันทึกข้อมูลที่ใช้เป็นหลักฐานดิจิทัลให้มีระบบไฟล์ที่เหมาะสมกับระบบปฏิบัติการที่ใช้พร้อมทั้งเขียน 0 ซึ่งเป็นตัวเลขแสดงสถานะว่าเป็นพื้นที่ว่างลงบนทุกตำแหน่งของอุปกรณ์บันทึกข้อมูลที่ใช้เป็นหลักฐานดิจิทัล จำนวน 1 ครั้ง ทำให้ตำแหน่งของข้อมูลเนื้อไฟล์เดิมที่ต้องการกู้คืน ถูกแทนที่ด้วย 0 จึงไม่สามารถกู้คืนข้อมูลที่เป็นหลักฐานดิจิทัลได้แม้จะถูกเขียน 0 ทับเพียง 1 ครั้ง แต่เป็นการเขียนทับทุกตำแหน่งบนอุปกรณ์บันทึกข้อมูล ซึ่งสามารถสังเกตได้จากผลการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยซอฟต์แวร์นิติวิทยาศาสตร์ที่แสดงผลในรูปแบบของค่า Hex (เลขฐานสิบหก) เมื่อใช้คำสั่ง Format drive: /P:1 จะมีชุดตัวเลข 0 ต่อเนื่องกัน จึงเป็นหลักฐานสำคัญที่ทำให้ทราบว่าอุปกรณ์บันทึกข้อมูลที่ใช้เป็นหลักฐานดิจิทัลถูกล้างข้อมูลด้วยซอฟต์แวร์หรือคำสั่งล้างข้อมูล สอดคล้องกับที่ แดนเนील แอลอี (14) อธิบายไว้ และสูนีย์ สกาวรัตน์ ได้นำมาแปลลงในหนังสือการตรวจพิสูจน์หลักฐานดิจิทัลสำหรับผู้ประกอบวิชาชีพกฎหมาย: เข้าใจพยานหลักฐานดิจิทัลจากขั้นตอนหมายถึงห้องพิจารณาคดี ว่าซอฟต์แวร์ลบข้อมูลถูกใช้ในการทำลายข้อมูลเพื่อที่จะทำให้ไม่สามารถกู้คืนได้โดยวิธีการตรวจพิสูจน์พยานหลักฐาน ซึ่งสามารถทำได้โดยการเขียนทับเซกเตอร์ ด้วยเลขหนึ่งหรือเลขศูนย์หรือข้อมูลแบบสุ่ม หากสังเกตเห็นชุดตัวเลขศูนย์ต่อเนื่องแล้วสำหรับผู้พิสูจน์พยานหลักฐาน ย่อมถือได้ว่าเป็นหลักฐาน

ที่ชัดเจนว่าไดรฟ์ได้รับการลบข้อมูลด้วยซอฟต์แวร์ล้างดิสก์ หลักฐานแสดงการล้างข้อมูลในอุปกรณ์บันทึกข้อมูลด้วยคำสั่ง Format drive: /P:1 แสดงดังรูปที่ 6



รูปที่ 6 การล้างข้อมูลด้วยคำสั่ง Format

3. การปกปิดร่องรอยหลักฐานด้วยการ Overwrite จากผลการทดลองพบว่าข้อมูลดิจิทัลที่ถูกปกปิดร่องรอยหลักฐานด้วยการ Overwrite เป็นการลบข้อมูลแบบถาวร และไม่สามารถกู้คืนข้อมูลซึ่งเป็นหลักฐานดิจิทัลได้ โดยแบ่งออกเป็น 2 กรณี คือ กรณีใช้ซอฟต์แวร์ที่มีความสามารถในการ Overwrite เป็นเครื่องมือในการปกปิดร่องรอยหลักฐาน จำนวน 2 โปรแกรม คือ Sdelete 2.02 และ Eraser 6.2.0.2986 พบว่าซอฟต์แวร์นิติวิทยาศาสตร์ทั้ง 3 โปรแกรม ไม่สามารถกู้คืนข้อมูลที่ถูกลบด้วยซอฟต์แวร์ปกปิดร่องรอยหลักฐานด้วยการ Overwrite จำนวน 1 รอบได้ เนื่องจากการปกปิดร่องรอยหลักฐานด้วยการ Overwrite ใช้วิธีการเขียนข้อมูลอื่น ๆ ทับลงไปบนตำแหน่งของข้อมูลเดิมเพื่อป้องกันไม่ให้นำข้อมูลเดิมกลับไปใช้ได้อีก ทำให้ข้อมูลในส่วนของ MFT และข้อมูลเนื้อไฟล์ถูกทำลาย

กรณี Overwrite ด้วยวิธีลบข้อมูลหลักฐานดิจิทัลทั้งหมดแล้วเขียนข้อมูลอื่นทับลงไปทีละไฟล์จนเกือบเต็มความจุของอุปกรณ์บันทึกข้อมูลที่ใช้เป็นหลักฐานดิจิทัล โดยมีขั้นตอนการทดลองคือ นำ USB Flash drive ขนาดความจุ 1 GB ซึ่งใช้เป็นหลักฐานดิจิทัลไปลบข้อมูลทั้งหมด แล้วบันทึกไฟล์ข้อมูลอื่นลงไปทีละไฟล์ จำนวน 3 ครั้ง คือ

- ครั้งที่ 1 NewFile_1.mp4 ขนาด 324 MB
- ครั้งที่ 2 NewFile_2.mp4 ขนาด 281 MB
- ครั้งที่ 3 NewFile_3.mp4 ขนาด 336 MB

พบว่าเมื่อทำการบันทึกไฟล์อื่นลงบนอุปกรณ์บันทึกข้อมูลที่เป็นหลักฐานดิจิทัลครั้งที่ 1 แล้วนำไปกู้คืนข้อมูลด้วยซอฟต์แวร์นิติวิทยาศาสตร์ทั้ง 3 โปรแกรม สามารถกู้คืนข้อมูลหลักฐานดิจิทัลได้ 6 ไฟล์ เมื่อบันทึกไฟล์อื่นเพิ่มลงไปบนอุปกรณ์บันทึกข้อมูลที่เป็นหลักฐานดิจิทัลครั้งที่ 2 แล้วนำไปกู้คืนด้วยซอฟต์แวร์นิติวิทยาศาสตร์ทั้ง 3 โปรแกรม สามารถกู้คืนข้อมูลหลักฐานดิจิทัลได้ 5 ไฟล์ และเมื่อบันทึกไฟล์อื่นเพิ่มลงบนอุปกรณ์บันทึกข้อมูลที่เป็นหลักฐานดิจิทัลครั้งที่ 3 แล้วนำไปกู้คืนด้วยซอฟต์แวร์นิติวิทยาศาสตร์ทั้ง 3 โปรแกรม พบว่าไม่สามารถกู้คืนข้อมูลหลักฐานดิจิทัลได้ เนื่องจากในแต่ละครั้งที่เขียนไฟล์ทับลงไปบนอุปกรณ์บันทึกข้อมูล ตำแหน่งของไฟล์ใหม่ไปทับตำแหน่งของไฟล์ข้อมูลหลักฐานดิจิทัลที่ต้องการกู้คืน ทำให้เนื้อไฟล์ข้อมูลหลักฐานดิจิทัลเกิดความเสียหาย จนไม่สามารถกู้คืนได้

จากการวิจัยครั้งนี้จึงสรุปได้ว่าเทคนิคการปกปิดร่องรอยหลักฐานดิจิทัลบนอุปกรณ์บันทึกข้อมูลที่มีระบบไฟล์แบบ NTFS ภายใต้ระบบปฏิบัติการ Windows 7 การกู้คืนข้อมูลหลักฐานดิจิทัลจะสำเร็จหรือไม่ขึ้นอยู่กับว่าเทคนิคนั้นทำให้เนื้อไฟล์เสียหายหรือไม่ หากเป็นเทคนิคที่แก้ไขเฉพาะในส่วนของเมทาดต้า โดยไม่ทำให้เนื้อไฟล์เสียหายการกู้คืนข้อมูลหลักฐานดิจิทัลย่อมประสบความสำเร็จ แต่ถ้าหากทำให้เนื้อไฟล์เกิดความเสียหายย่อมไม่สามารถกู้คืนข้อมูลดิจิทัลนั้นได้

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะนิติวิทยาศาสตร์ โรงเรียนนายร้อยตำรวจที่สนับสนุนสถานที่ในการวิจัย และขอขอบคุณกรมสรรพสามิตที่สนับสนุนทุนการศึกษา

เอกสารอ้างอิง

1. Microsoft Docs. How NTFS Works [Internet]. Redmond, WA: Microsoft Corporation; 2009 [cited 2019 Sep 17]. Available from: <https://bit.ly/2RmmbBz>
2. Carrier B. File System Forensic Analysis. New Jersey: Addison-Wesley Professional; 2005.
3. Painter Z. Silicon Power Blog [Internet]. Taipei: Silicon Power. 2018 [cited 2020 April 15]. Available from: <https://bit.ly/3jhEP9c>
4. Shimpi AL. The SSD Anthology: Understanding SSDs and New Drive from OCZ [Internet]. 2009 [cited 2020 April 3]. Available from: <https://www.anandtech.com/Show/Index/2738?cPage=4&all=False&sort=0&page=5>
5. NetMarketShare.com [Internet]. Newport Beach, CA: Net Applications; 2017. [updated 2019 Feb 28; cited 2019 Mar 1]. Available from: <https://netmarketshare.com/>
6. Lin X. Introductory Computer Forensics: A hands-on Practical Approach. Basel: Springer Nature Switzerland AG; 2018.
7. Blancco Technology Group. Improper Data Removal & Poor Enforcement of Data Retention Policies Create the 'Perfect Storm' for Data Breaches [Internet]. Austin, TX: Blancco; 2016 [cited 2018 Mar 1]. Available from: <https://bit.ly/3bUe5JT>
8. Wright C, Kleiman D, Sundhar S. Overwriting Hard Drive Data: The Great Wiping Controversy. ICISS. 2008;4:243-57.

9. Feenberg D. Can Intelligence Agencies Read Overwritten Data? [Internet]. Cambridge, MA: National Bureau of Economic Research; 2013 [cited 2020 April 15]. Available from: <https://www.nber.org/sys-admin/overwritten-data-gutmann.html>
10. Yusof NA, Abdullah S, Senan MF, Abidin NZ, Sahri MB, Binti SN. Data Sanitization Framework for Computer Hard Disk Drive: A Case Study in Malaysia. IJACSA. 2019;10:398-406.
11. Kissel R, Regenscheid A, Scholl M, Stine K. Guidelines for Media Sanitization [Internet]. Maryland: National Institute of Standards and Technology; 2014 [cited 2020 April 15]. Available from: <http://dx.doi.org/10.6028/NIST.SP.800-88r1/>.
12. ศุภชัย หวันแสง. การกู้คืนข้อมูลจากซอฟต์แวร์คงสภาพฮาร์ดดิสก์ [วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต]. กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีมหานคร; 2557.
13. Huang W, Meisheng Y. The Quickly Solving Method of File Recovery in Windows Environment. CSSE. 2008;3:859-62.
14. แดนเนี่ยล แอลอี. การตรวจพิสูจน์หลักฐานดิจิทัลสำหรับผู้ประกอบวิชาชีพกฎหมาย: เข้าใจพยานหลักฐานดิจิทัลจากขั้นตอนหมาย ถึงห้องพิจารณาคดี. กรุงเทพฯ: ซีเอ็ดดูเคชั่น; 2559.



ผลของความเข้มข้นสารละลายออสโมติกต่อการถ่ายเทมวลสารและคุณภาพของเมล่อนหลังการออสโมซิส

Effect of Osmotic Solution Concentration on Mass Transfer and Quality of Melon after Osmosis

สุนัน ปานสาคร* จตุรงค์ ลังกาพินธุ์ ศุภณัฐ พรภิบุญจันทร์ และ อาทิพัฒน์ ศรีชุมพล

Sunan Parnsakhorn*, Jaturong Langkapin, Supanut Phriknunchan and Artipat Srichumpol

ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จ.ปทุมธานี 12110

Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thanyaburi, Pathumthani 12110, THAILAND

*Corresponding author e-mail: sunan.p@en.rmUTT.ac.th

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article history:

Received: 8 May, 2020

Revised: 21 August, 2020

Accepted: 3 September, 2020

Available online: 21 October, 2020

DOI: 10.14456/rj-rmUTT.2020.24

Keywords: melon, osmosis, mass transfer, glucose

This research was to study the effect of osmotic solution concentration on mass transfer and quality of melon after osmosis. Melon cubes (2x2x2 cm) were immersed in glucose at the concentration of 40, 50 and 60°Brix for 0-5 hr. After the osmosis process for 5 hr, mass transfer parameters namely, water loss (WL) solid gain (SG) and weight reduction (WR), were evaluated. The result showed that concentrations of glucose affected mass transfer. The use of a 60°Brix glucose solution showed the highest ($p \leq 0.05$) water loss (21.81%), solid gain (5.31%) and weight reduction (16.44%). Thus, this sample had lower moisture content and higher total soluble solid content when compared with a fresh melon. The good qualities of melon were presented for all 3 concentrations solution was 5 hr. Then, the effect of the osmotic solution on the quality of the melon osmosis product was investigated. The melon which was immersed in 60°Brix glucose solution had the highest value in term of hardness as 27.20 N, lightness as 49.63 and total soluble solid as 34.20°Brix ($p \leq 0.05$) but the lower total color difference (ΔE^*) as 12.10, water activity (a_w) as 0.899 and moisture content 76.34%wb than others.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นสารละลายออสโมติกต่อการถ่ายเทมวลสารและคุณภาพของเมล่อนหลังการออสโมซิส โดยนำเมล่อนลูกบาศก์ ($2 \times 2 \times 2$ cm) มาแช่ในสารละลายน้ำตาลกลูโคสที่ระดับความเข้มข้น 40, 50 และ 60°Brix เป็นเวลา 0-5 ชั่วโมง หลังการออสโมซิสเมล่อนเป็นเวลา 5 ชั่วโมง คำนวณค่าการถ่ายเทมวลสาร ได้แก่ ปริมาณน้ำที่สูญเสีย (WL) ปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น (SG) และปริมาณน้ำหนักรีด (WR) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นน้ำตาลกลูโคสมีผลต่อการถ่ายเทมวลสาร การใช้สารละลายกลูโคส 60°Brix ทำให้เมล่อนมีปริมาณน้ำที่สูญเสีย (21.81%) ปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น (5.31%) และปริมาณน้ำหนักรีด (16.44%) มากที่สุด ($p < 0.05$) ส่งผลให้เมล่อนมีปริมาณความชื้นลดลงแต่มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้สูงขึ้นเมื่อเทียบกับเมล่อนสด โดยเวลาที่ส่งผลต่อคุณภาพที่ดีของเมล่อนหลังการหลังการออสโมซิสในสารละลายทั้ง 3 ความเข้มข้นคือ 5 ชั่วโมง จากนั้นศึกษาผลของสารละลายออสโมติกต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์เมล่อนออสโมซิส เมล่อนที่ผ่านการแช่ในสารละลายกลูโคส 60°Brix มีค่าต่างๆ สูงสุดดังนี้ ความแข็ง 27.20 N, ค่าความสว่าง 49.63 และปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ 34.20°Brix ($p \leq 0.05$) แต่มีค่าการเปลี่ยนแปลงของสี (ΔE^*) เท่ากับ 12.10, ค่าวอเตอร์แอคทิวิตี (a_w) 0.899 และความชื้น 76.34%wb ต่ำกว่า ($p \leq 0.05$) ตัวอย่างอื่น

คำสำคัญ: เมล่อน ออสโมซิส การถ่ายเทมวลสาร กลูโคส

บทนำ

เมล่อน (Cucumismelo var. inodorus) เป็นผลไม้ที่อยู่ในตระกูลแตงและมีการบริโภคกันอย่างแพร่หลายทั้งในประเทศและส่งออกไปยังต่างประเทศ เนื่องจากมีรสชาติที่หวาน มีกลิ่นหอม แดงยังมีสีส้มที่สวยงามน่ารับประทาน จึงนิยมนำมาบริโภคสดหรือนำมา

ผ่านกระบวนการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น เมล่อนอบแห้ง เมล่อนแช่อิ่ม ไอศกรีมเมล่อน เป็นต้น เพื่อยืดอายุการเก็บรักษาและเพิ่มความสะดวกในการขนส่ง อีกทั้งในเมล่อนยังมีเอนไซม์ที่มีชื่อว่า Superoxide Dismutase มีสรรพคุณช่วยต้านอนุมูลอิสระและลดกระบวนการทางเคมีภายในร่างกาย มีวิตามินซี วิตามินเอ เบต้าแคโรทีน แคลเซียม และธาตุเหล็ก ซึ่งสารอาหารดังกล่าวล้วนแล้วแต่มีความสำคัญและมีประโยชน์ต่อร่างกาย อีกทั้งเมล่อนนั้นเป็นผลไม้ที่ไม่มีไขมัน คอล레스เตอรอล แคลอรีต่ำ เหมาะสำหรับผู้ที่ดูแลสุขภาพ และผู้ที่กำลังควบคุมน้ำหนักเป็นอย่างยิ่ง (1-3) นอกจากนี้ยังเป็นที่ยอมรับนำไปปลูกในกลุ่มเกษตรกรเนื่องจากเป็นพืชที่ใช้น้ำน้อย ราคาจำหน่ายอยู่ในเกณฑ์ค่อนข้างสูง อย่างไรก็ตามเมล่อนเป็นผลไม้ที่มีองค์ประกอบของน้ำสูง ดังนั้นอายุการเก็บรักษาจึงสั้น ประกอบกับในช่วงฤดูร้อนพบว่าผลผลิตเมล่อนจากเกษตรกรในแต่ละแห่งมีคุณภาพค่อนข้างต่ำกว่าเมล่อนในช่วงฤดูการอื่น ๆ ดังนั้นการนำเมล่อนที่คุณภาพต่ำไม่ได้มาตรฐานเช่น ค่าความหวานต่ำ ขนาดของผลเล็ก มาผ่านกระบวนการแปรรูปเพื่อเป็นการเพิ่มมูลค่าหรือช่วยยืดอายุการเก็บรักษาจึงเป็นเรื่องที่น่าสนใจ หนึ่งในกระบวนการนั้นคือ “การออสโมซิส (Osmosis)” หรือที่รู้จักกันคือ “การแช่อิ่ม” วิธีการนี้เป็นการดึงน้ำออกบางส่วนจากชิ้นผักผลไม้ทำให้น้ำในผลไม้ลดลง โดยไม่จำเป็นต้องใช้ความร้อนสูงจึงเป็นวิธีลดปริมาณน้ำในผักผลไม้ที่ไม่รุนแรงและช่วยลดการเปลี่ยนแปลงลักษณะด้านสี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์ได้ดีขึ้นเมื่อจะนำไปแปรรูปร่วมกับเทคนิคอื่น ๆ เช่น การอบแห้ง การทอด และการแช่เยือกแข็ง เป็นต้น (4-6)

การดึงน้ำออกจากอาหารด้วยวิธีออสโมซิสสามารถทำได้โดยส่วนใหญ่มักดำเนินการกับผักผลไม้ ซึ่งสามารถกำจัดน้ำออกจากอาหารโดยการนำอาหารแช่ในสารละลายที่มีความเข้มข้นสูง หรือมีค่าวอเตอร์แอคทิวิตี (Water activity: a_w) ต่ำกว่าอาหารนั้น สารละลายที่นิยมใช้ ได้แก่ น้ำตาล (กลูโคส, ซูโครส, ฟรุคโตส) หรือเกลือมา

ใช้เตรียมเป็นสารละลายออสโมติกอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีข้อดีหลายประการ เช่น มีความสามารถในการละลายสูง ราคาถูก มีประสิทธิภาพที่ดีในการดึงน้ำออกจากชิ้นอาหารและช่วยปรับปรุงรสชาติของอาหารหลังการออสโมซิส (7, 8) นอกจากนี้ยังมีการนำกระบวนการออสโมซิสมาใช้พัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพในอีกหลายรูปแบบ เช่น ใช้น้ำตาลโอลิโกฟรุคโตสในการออสโมซิสมะเขือเทศ (9) การเติมแร่ธาตุหรือสารต้านอนุมูลอิสระในสารละลายออสโมติกในแอปเปิล (10) และการเสริมสารประกอบฟีนอลิกจากเมล็ดองุ่นในแอปเปิลกล้วย และ มันฝรั่ง (11) เป็นต้น ความแตกต่างระหว่างความดันออสโมติกของสารละลายกับอาหารทำให้เกิดแรงขับ (Driving Force) ซึ่งทำให้เกิดการถ่ายเทมวลสารระหว่างสารละลายและอาหาร โดยน้ำจะเกิดการเคลื่อนที่ออกจากสารละลายที่เจือจางผ่านเยื่อเลือกผ่าน (Semipermeable Membrane) ในที่นี้คือเยื่อหุ้มเซลล์ไปสู่สารละลายที่มีความเข้มข้นมากกว่า ที่ล้อมรอบอยู่ในขณะเดียวกันจะเกิดการแพรของของแข็งจากสารละลายผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ไปยังชิ้นอาหาร (6, 12) ซึ่งการมีความเข้าใจเกี่ยวกับถ่ายเทมวลสารระหว่างสารละลายและอาหารในระหว่างกระบวนการออสโมซิสเป็นสิ่งที่สำคัญสำหรับผู้ปฏิบัติงาน ทั้งนี้มีรายงานวิจัยที่ทำการศึกษการถ่ายเทมวลสารระหว่างการออสโมซิสผลมะกรูด แตงไทย กล้วยไข่ (13-15) แต่ยังไม่มียางานวิจัยชัดเจนในส่วนของการทำการศึกษการถ่ายเทมวลสารระหว่างการออสโมซิสเมล่อน ดังนั้นเพื่อทำความเข้าใจถึงพฤติกรรม การถ่ายเทมวลสารในการออสโมซิสงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ศึกษาผลของความเข้มข้นสารละลายออสโมติกต่อการถ่ายเทมวลสาร ได้แก่ ปริมาณน้ำที่สูญเสีย ปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น และปริมาณน้ำหนักที่ลดลง ในระหว่างการออสโมซิสและคุณภาพของเมล่อนหลังการออสโมซิส

วิธีดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนการเตรียมวัตถุดิบ

จัดซื้อเมล่อน (Cucumismelo var. indorus) พันธุ์กรีนเน็ต ที่มีขนาดสม่ำเสมอไม่มีรอยตำหนิ วัดค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ระหว่าง 11-13°Brix นำมาล้างด้วยน้ำสะอาด ปอกเปลือกผ่าครึ่งตัดส่วนที่เป็นเมล็ดออก จากนั้นตัดเมล่อนเป็นชิ้นรูปลูกบาศก์เมตรขนาด 2x2x2 cm. และนำไปวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมีเบื้องต้น

ขั้นตอนการออสโมซิส

นำเมล่อนที่ได้เตรียมไว้จากขั้นตอนแรกแช่ในสารละลายแคลเซียมคลอไรด์ 1% เป็นเวลา 10 นาที เพื่อช่วยรักษาคุณภาพของชิ้นเมล่อนป้องกันความผิดปกติทางสรีรวิทยา จากนั้นล้างด้วยน้ำสะอาดและทิ้งไว้ให้สะเด็ดน้ำทำการชั่งน้ำหนักและทดสอบปริมาณความชื้นของชิ้นเมล่อนเริ่มต้นและนำเมล่อนไปแช่ในสารละลายกลูโคสที่ได้จัดเตรียมไว้ 3 ระดับความเข้มข้น ได้แก่ 40, 50 และ 60°Brix ในอัตราส่วนระหว่างเมล่อนและสารละลายออสโมติกเป็น 1:10 (โดยน้ำหนัก) ที่อุณหภูมิห้อง โดยระหว่างการแช่เมล่อนในสารละลายกลูโคสทำการวัดการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักชิ้นเมล่อนเป็นเวลา 1, 2, 3, 4, และ 5 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาที่กำหนดนำชิ้นเมล่อนออกจากสารละลายแล้วล้างโดยให้น้ำไหลผ่านชิ้นเมล่อนเป็นเวลา 30 วินาที วางพักบนตะแกรงให้สะเด็ดน้ำเป็นเวลา 2 นาที แล้วชั่งให้แห้งด้วยกระดาษ ชั่งน้ำหนักและหาความชื้นหลังการออสโมซิส (14) จากนั้นคำนวณหาปริมาณการถ่ายเทมวลสารประกอบด้วย ปริมาณน้ำที่สูญเสีย (Water Loss; WL) ปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น (Solid Gain; SG) และปริมาณน้ำหนักที่ลดลง (Weight Reducing; WR) (16)

ปริมาณน้ำที่สูญเสีย (Water Loss; WL) คำนวณได้จากสมการที่ 1

$$WL(\%) = \frac{(W_o M_o - W_t M_t)}{W_o} \times 100 \quad (1)$$

ปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น (Solid Gain; SG)
คำนวณได้จากสมการที่ 2

$$SG(\%) = \frac{[W_t(1-M_t) - W_o(1-M_o)]}{W_o} \times 100 \quad (2)$$

ปริมาณน้ำหนักที่ลดลง (Weight Reducing;
WR) คำนวณได้จากสมการที่ 3

$$WR(\%) = \frac{(W_o - W_t)}{W_o} \times 100 \quad (3)$$

โดยที่

W_o คือ น้ำหนักตัวอย่างเริ่มต้น (g)

W_t คือ น้ำหนักตัวอย่างหลังการออสโมซิสที่เวลาใด ๆ (g)

M_o คือ ปริมาณความชื้นของตัวอย่างเริ่มต้น (g water/
g sample)

M_t คือ ปริมาณความชื้นของตัวอย่างหลังการออสโมซิสที่
เวลาใด ๆ (g water/g sample)

การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพและเคมี

1. ปริมาณความชื้น (Moisture Content)

อ้างอิงวิธีการทดสอบจากมาตรฐาน AOAC
(17) โดยการชั่งน้ำหนักตัวอย่าง 2 g (น้ำหนักก่อนอบ)
อบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน (Binder, Model FD 115,
Germany) ที่อุณหภูมิ 105°C เป็นเวลา 16 hr จากนั้นนำ
ตัวอย่างพร้อมภาชนะใส่ในโถดูดความชื้นทันทีเป็นเวลา
30 min และชั่งน้ำหนักหลังการอบ คำนวณหาค่า
ความชื้นด้วยสมการที่ (4) รายงานผลในหน่วยเปอร์เซ็นต์
มาตรฐานเปียก (%wb)

$$\%wb = \frac{(W_i - W_f)}{W_i} \times 100 \quad (4)$$

โดยที่

W_i คือ น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ (g)

W_f คือ น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ (g)

2. ปริมาณน้ำอิสระ (a_w)

หาปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ด้วยเครื่องวัดปริมาณ
น้ำอิสระ (AquaLab, 3TE, USA)

3. ค่าสี (Color)

วัดค่าสีด้วยเครื่อง Color Difference Meter
(Minolta, Model JC801, Tokyo, Japan) รายงานผล
ในรูปของ L^* , a^* , b^* ซึ่งทั้ง 3 ค่าเป็นการแสดงการวัดค่า

สีเฉพาะเจาะจงโดยที่ค่า L^* คือ ค่าความสว่าง
(Lightness) มีค่าตั้งแต่ 0-100 โดย 0 คือ สีดำ และ 100
คือ สีขาว สำหรับค่า a^* คือค่าความเป็นสีเขียว
(Greenness) เมื่อมีค่าเป็นลบและมีค่าความเป็นสีแดง
(Redness) เมื่อมีค่าเป็นบวก และค่า b^* คือ ค่าความเป็น
สีเหลือง (Yellowness) เมื่อมีค่าเป็นบวกและค่าความ
เป็นสีน้ำเงิน (Blueness) เมื่อมีค่าเป็นลบ ซึ่งก่อนทำการ
วัดค่าสี เครื่องวัดสีจะถูกปรับเทียบความเที่ยงตรงของค่า
สีด้วย Standard Calibration Plate ค่า L^* , a^* และ b^*
เท่ากับ 98.11, -0.11 and -0.08 ตามลำดับ

4. การหาค่าความแตกต่างสีโดยรวม (ΔE^*)

ทำการเก็บข้อมูลค่า L^* , a^* , b^* ที่วัดจาก
เครื่องวัดค่าในแต่ละสภาวะการทดสอบโดยวัดค่าสีเริ่มต้น
และภายหลังการเปลี่ยนแปลงที่เวลาในการแช่สารละลาย
ที่ระดับต่างๆ จากนั้นนำมาคำนวณหาค่าความแตกต่างสี
โดยรวมด้วยสมการที่ 5 (18)

$$\Delta E^* = [(L_o^* - L^*)^2 + (a_o^* - a^*)^2 + (b_o^* - b^*)^2]^{1/2} \quad (5)$$

โดยที่

ΔE^* คือ ค่าความแตกต่างสีโดยรวม

L_o^*, a_o^*, b_o^* คือ ค่าความสว่าง ค่าความเป็นสีแดง และค่า
ความเป็นสีเหลืองของเมล่อนสดที่ไม่ผ่าน
กระบวนการออสโมซิส

L^*, a^*, b^* คือ ค่าความสว่าง ค่าความเป็นสีแดง และค่า
ความเป็นสีเหลืองของเมล่อนที่ผ่าน
กระบวนการออสโมซิส

5. ค่าความแข็ง (Hardness)

ทดสอบวัดค่าโดยใช้แรงเฉือน (Shear force) ด้วย
เครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Instron Universal Tester Machine,
Model LRX Plus, UK) โดยใช้หัวตัด Warner Bratzler
Blade ตัดตัวอย่างให้ขาดด้วยความเร็ว 50 mm/min ตัด
บริเวณด้านกลางของชิ้นเมล่อน และพิจารณาถึงค่าความ
แข็ง (Maximum force) ของตัวอย่างจากการตัดเฉือนใน
หน่วยนิวตัน (N) ทำการทดลอง 3 ซ้ำในแต่ละตัวอย่าง

6. ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ (Total
Soluble Solid, TSS)

คั้นน้ำจากตัวอย่างและวัดค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ด้วยเครื่อง Hand Refractometer (Optika, Model HR-190, Italy) ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส บันทึกค่าจากนั้นทำซ้ำอีก 2 ครั้ง

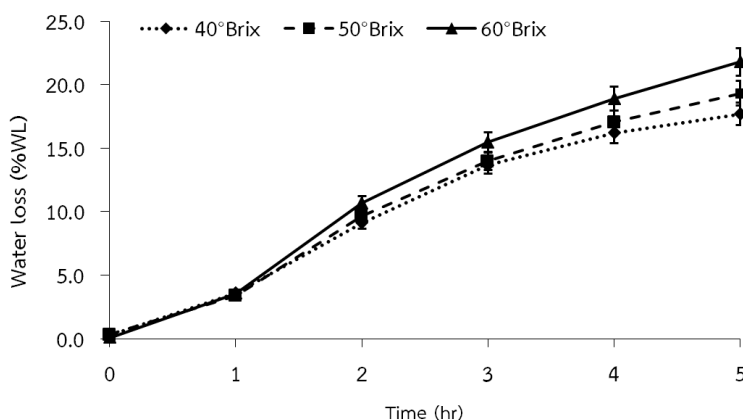
การวิเคราะห์ข้อมูล

ใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อวิเคราะห์ผลการทดลองที่ระดับความแตกต่างทางสถิติ 95% (One-way analysis of variance (ANOVA)) และทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตามวิธีของ Duncan New's Multiple Range Test (DMRT)

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

การดองน้ำออกด้วยวิธีการออสโมซิสเป็นการอาศัยหลักการการเคลื่อนย้ายน้ำบางส่วนออกจากเนื้อเยื่ออาหาร

ซึ่งเกิดจากความแตกต่างของแรงดันออสโมติกระหว่างภายในเซลล์ของอาหารและสารละลายออสโมติกเกิดเป็นแรงขับ (Driving Force) ทำให้มีการถ่ายโอนมวลสารระหว่างเซลล์ของอาหารและสารละลายออสโมติก ในลักษณะสวนทางกันผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ซึ่งทำหน้าที่เป็นเยื่อเลือกผ่าน (Semi-permeable Membrane) (19) ดังนั้นเมื่อนำเมล็ดมาผ่านกระบวนการออสโมซิสหรือที่เรียกว่า “การแช่อิ่ม” เพื่อเป็นการถนอมอาหารโดยนำเมล็ดไปแช่ในสารละลายน้ำตาลกลูโคสที่มีความเข้มข้นสูงพบว่าจะเกิดการถ่ายเทมวลสารด้านปริมาณน้ำที่สูญเสีย (Water Loss; WL) ปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น (Solid Gain; SG) และปริมาณน้ำหนักรวมที่ลดลง (Weight Reducing; WR) ในชั้นเมล็ดแสดงดังรูปที่ 1 ถึง รูปที่ 3

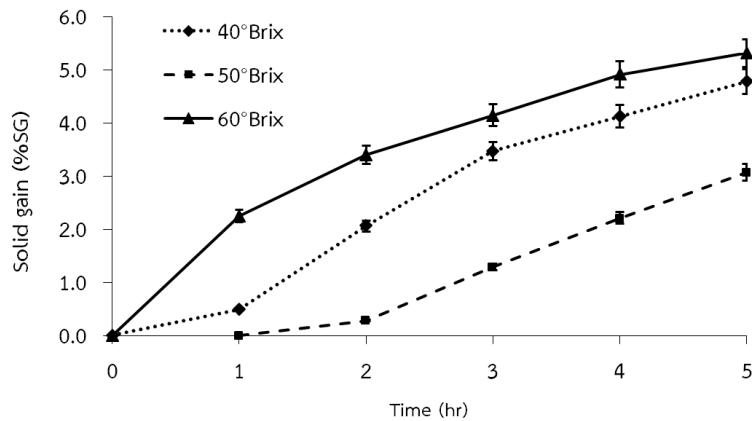


รูปที่ 1 ร้อยละการสูญเสียของเมล็ดระหว่างกระบวนการออสโมซิส 0-5 ชั่วโมง

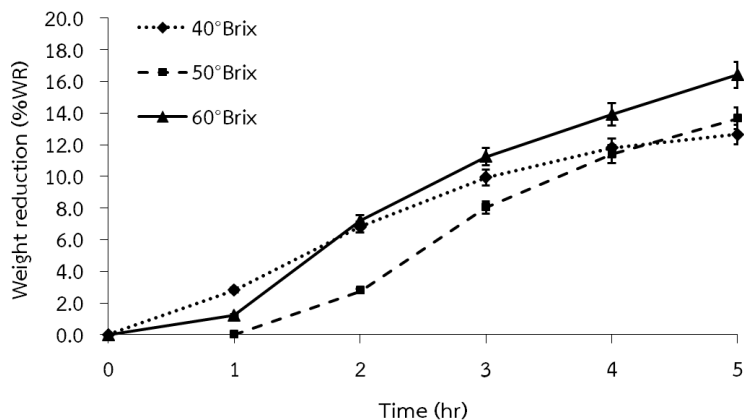
จากการทดสอบผลของความเข้มข้นสารละลายออสโมติกต่อการถ่ายเทมวลสารในชั้นเมล็ดดังรูปที่ 1 พบว่าร้อยละการสูญเสียของเมล็ดเพิ่มขึ้นระหว่างการแช่ในสารละลายกลูโคส 40-60°Brix โดยในช่วง 0-2 ชั่วโมงแรก ที่มีการแช่เมล็ดในสารละลายกลูโคสทั้ง 3 ระดับความเข้มข้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นของร้อยละการสูญเสียอย่างรวดเร็วในลักษณะใกล้เคียงกัน โดยที่ 40, 50 และ 60°Brix ให้ค่าร้อยละการสูญเสียหลังการแช่ในสารละลายกลูโคส 2 ชั่วโมง เท่ากับ 9.13, 9.67 และ 10.67% ตามลำดับ จากนั้นที่การแช่เมล็ด 3-5 ชั่วโมง

พบว่าร้อยละการสูญเสียของเมล็ดทั้ง 3 ระดับความเข้มข้นของน้ำตาลกลูโคสมีแนวโน้มเข้าสู่สภาวะเริ่มคงตัว ทั้งนี้เมื่อพิจารณาถึงระดับความเข้มข้นของสารละลายกลูโคสหลังการแช่เมล็ดเป็นเวลา 5 ชั่วโมง พบว่าที่ 60°Brix ให้ค่าร้อยละการสูญเสียสูงสุดที่ 21.81% และลดหลั่นลงมาที่ 50°Brix และ 40°Brix เท่ากับ 19.32% และ 17.68% ตามลำดับ เนื่องจากน้ำจะเคลื่อนที่ผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ออกจากสารละลายที่เจือจางภายในเซลล์ไปสู่สารละลายน้ำตาลที่มีความเข้มข้นสูงมากกว่าที่ล้อมรอบอยู่ด้านนอก ดังนั้นจากการที่นำเมล็ดไปแช่ในสารละลาย

น้ำตาลเข้มข้นจึงส่งผลให้ร้อยละการสูญเสียน้ำของเมล็ดอ่อนเพิ่มขึ้นหรือความชื้นลดลง (6, 12)



รูปที่ 2 ร้อยละปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นของเมล็ดอ่อนระหว่างกระบวนการออสโมซิส 0-5 ชั่วโมง



รูปที่ 3 ร้อยละปริมาณน้ำหนักที่ลดลงของเมล็ดอ่อนระหว่างกระบวนการออสโมซิส 0-5 ชั่วโมง

จากรูปที่ 2 แสดงการเปลี่ยนแปลงร้อยละปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นของเมล็ดอ่อนระหว่างกระบวนการออสโมซิส 0-5 ชั่วโมง ซึ่งสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของร้อยละการสูญเสียน้ำของเมล็ดอ่อนระหว่างกระบวนการออสโมซิส เนื่องจากการออสโมซิสทำให้เกิดการแพร่ของน้ำออกจากเซลล์เมล็ดอ่อนไปยังสารละลายกลูโคส ขณะเดียวกันตัวถูกละลายจากสารละลายแพร่เข้าสู่เซลล์ของเมล็ดอ่อนทำให้มีปริมาณน้ำลดลงและปริมาณของแข็งเพิ่มขึ้น (20) จากรูปที่ 2 พบว่าระดับความเข้มข้นของสารละลายกลูโคสมีผลต่อปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นโดยการแช่เมล็ดอ่อนในสารละลายกลูโคส 60°Brix ในช่วง

0-2 ชั่วโมงแรก ให้ค่าร้อยละปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และมีค่าสูงกว่าการแช่เมล็ดอ่อนในสารละลายกลูโคส 40°Brix และ 50°Brix ตลอดระยะเวลาของการแช่ อย่างไรก็ตามการแช่เมล็ดอ่อนในสารละลายกลูโคส 50°Brix ให้ค่าร้อยละปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้นตามเวลาของการแช่ แต่กลับพบว่ามีแนวโน้มการเพิ่มขึ้นที่น้อยกว่าการแช่เมล็ดอ่อนในสารละลายกลูโคส 40°Brix และ 60°Brix ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากการเลือกชิ้นส่วนของเมล็ดอ่อนที่นำมาทดสอบเป็นบริเวณที่แตกต่างกันความหนาแน่นของชิ้นเมล็ดอ่อนอาจเกิดความแตกต่างจึงส่งผลต่ออัตราการออสโมซิสและอัตราการเพิ่มขึ้นของปริมาณของแข็ง ซึ่งการเลือกใช้

สารละลายออสโมติกความเข้มข้นสูงทำให้เกิดความแตกต่างของแรงดันออสโมติกมาก สามารถเร่งอัตราการถ่ายเทมวลสารในระหว่างการออสโมซิสได้ (15, 21)

จากรูปที่ 3 โดยภาพรวมของการทดลองพบว่า การใช้น้ำตาลกลูโคสความเข้มข้น 40, 50 และ 60°Brix ส่งผลให้ร้อยละปริมาณน้ำหนักรที่ลดลงของเมล่อนหลังผ่านกระบวนการออสโมซิส 5 ชั่วโมง มีค่าเพิ่มขึ้นที่ 12.65%, 15.95% และ 16.44% ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าการแช่เมล่อนในสารละลายความเข้มข้นสูงทำให้เกิดการถ่ายเทมวลสารที่สูงกว่าการแช่ในสารละลายความเข้มข้นต่ำ อย่างไรก็ตามเวลาในการแช่ก็ส่งผลต่อการถ่ายเทมวลสารเช่นกัน ซึ่งพบว่าการใช้เวลาในการแช่เมล่อนในสารละลายกลูโคสนานมีโอกาสให้ชั้นของเมล่อนสัมผัสกับสารละลาย

มากขึ้น น้ำในเนื้อเยื่อสามารถแพร่ออกมาในอัตราสูง โดยเฉพาะในช่วงแรก ซึ่งแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนในรูปที่ 3 ในช่วง 0-3 ชั่วโมง ของทั้ง 3 ความเข้มข้น แต่อย่างไรก็ตาม เมื่อเวลาผ่านไปช่วงหนึ่งน้ำจะแพร่ออกมาในอัตราที่ลดลง ทั้งนี้เนื่องมาจากในช่วงแรกของการออสโมซิสเกิดความแตกต่างของแรงดันออสโมติกระหว่างเซลล์เมล่อนกับสารละลายกลูโคสมากทำให้เกิดแรงขับสูงที่จะเกิดการถ่ายโอนมวลมากและรวดเร็ว เมื่อเวลาในการออสโมซิสนานขึ้น ความเข้มข้นบริเวณรอบ ๆ ชั้นเมล่อนจะลดลงเนื่องจากน้ำภายในชั้นเมล่อนแพร่ออกมาสู่สารละลายกลูโคสมากขึ้น สารละลายกลูโคสจึงมีความเข้มข้นลดลงกว่าช่วงแรกจึงทำให้แรงดันออสโมติกมีค่าน้อยลงมีผลให้เกิดแรงขับที่จะถ่ายโอนมวลน้อยและช้าลง (9, 19, 22)

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบปริมาณน้ำที่สูญเสีย ปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น และปริมาณน้ำหนักรที่ลดลง หลังการออสโมซิสเมล่อนที่เวลา 5 ชั่วโมง

ความเข้มข้นสารละลาย กลูโคส (°Brix)	ค่าเฉลี่ย±SD		
	ปริมาณน้ำที่สูญเสีย WL (%)	ปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น SG (%)	ปริมาณน้ำหนักรที่ลดลง WR (%)
40	17.68±0.87 ^c	4.77±0.23 ^b	12.65±0.78 ^c
50	19.32±0.76 ^b	3.03±0.11 ^c	15.95±0.56 ^b
60	21.81±0.34 ^a	5.31±0.12 ^a	16.44±0.32 ^a

* ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ (ค่าเฉลี่ย±SD.)

^{ab} อักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบโดย DMRT (mean± SD)

จากตารางที่ 1 แสดงค่าการถ่ายเทมวลสารหลังการออสโมซิสเมล่อนในสารละลายกลูโคสทั้ง 3 ระดับ ความเข้มข้นเป็นเวลา 5 ชั่วโมง ซึ่งให้ค่าปริมาณน้ำที่สูญเสีย ปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น และปริมาณน้ำหนักรที่ลดลง สูงที่สุดเมื่อเทียบกับที่เวลา 0-4 ชั่วโมง ในขณะเดียวกันการแช่เมล่อนในสารละลายกลูโคส 60°Brix ให้ค่าปริมาณน้ำที่สูญเสีย ปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น และปริมาณน้ำหนักรที่ลดลงสูงที่สุดที่ 21.81%, 5.31% และ 16.44% ตามลำดับ และพบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเทียบกันของทั้ง 3 ระดับ

ความเข้มข้นสารละลายกลูโคส (40, 50 และ 60°Brix) ทั้งนี้เนื่องจากที่ระดับดังกล่าวมีความเข้มข้นสูงจึงเกิดแรงดันออสโมติกมาก นอกจากนี้การแช่เมล่อนในสารละลายออสโมติกความเข้มข้นสูงเป็นเวลานานทำให้เกิดปรากฏการณ์พลาสโมไลซิส มีผลทำให้ความแข็งแรงของผนังเซลล์ลดลงส่งผลให้เยื่อหุ้มเซลล์ยอมให้เกิดการถ่ายเทมวลสารได้มาก (23) ในขณะเดียวกันพบว่าที่ระดับความเข้มข้นของสารละลายกลูโคส 40°Brix ให้ค่าปริมาณน้ำที่สูญเสีย และปริมาณน้ำหนักรที่ลดลงที่เวลาการแช่เมล่อน 5 ชั่วโมงต่ำสุดที่ 17.68% และ 12.65% ตามลำดับ

ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Agarry and Owabor (24) ออสโมซิสตำมีผลให้เกิดการถ่ายเทมวลสารได้น้อยถึงแม้
ที่ศึกษาการออสโมซิสในกระเจียบเขียวพบว่าการใช้ จะใช้เวลาในการออสโมซิสนาน
สารละลายความเข้มข้นต่ำทำให้แรงขับในกระบวนการ

ตารางที่ 2 ค่าความสว่าง (L*) ค่าความเป็นสีแดง (a*) ค่าความเป็นสีเหลือง (b*) ค่าการเปลี่ยนแปลงของสี (ΔE^*) ค่าว
เตอร์แอดคิวิตี (a_w) และค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของเมล็ดหลังการออสโมซิส 5 ชั่วโมง เมื่อแปรความเข้มข้น
ของสารละลายกลูโคส

ความเข้มข้นสารละลาย กลูโคส (°Brix)	ค่าสี			ΔE^*	วอเตอร์แอดคิวิตี a_w	ปริมาณของแข็ง ที่ละลายน้ำได้ °Brix
	L*	a*	b*			
เมล็ดสด	60.32±0.56 ^a	-5.60±0.23 ^c	27.81±0.80 ^a	-	0.906±0.005 ^a	11.20±0.98 ^d
40	44.63±1.35 ^c	-2.80±0.53 ^b	26.63±1.01 ^a	15.98±1.75 ^a	0.887±0.003 ^b	21.60±1.08 ^c
50	45.07±1.96 ^c	-2.57±0.98 ^{ab}	25.03±1.68 ^a	15.79±2.85 ^a	0.798±0.001 ^c	26.87±0.95 ^b
60	49.63±1.51 ^b	-1.53±0.02 ^a	23.87±1.56 ^a	12.10±2.06 ^b	0.762±0.006 ^d	34.20±0.99 ^a

* ค่าเฉลี่ยจากการทดลอง 3 ซ้ำ (ค่าเฉลี่ย±SD.)

^{ab} อักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบโดย
DMRT (mean± SD)

จุดมุ่งหมายหลักของการออสโมซิส คือการกำจัด
น้ำบางส่วนออกจากผักผลไม้ แต่อย่างไรก็ตามต้องพิจารณา
ลักษณะคุณภาพของผลิตภัณฑ์หลังการออสโมซิสร่วมด้วย
ดังนั้นจากตารางที่ 2 จึงแสดงค่าความสว่าง (L*) ค่าความ
เป็นสีแดง (a*) ค่าความเป็นสีเหลือง (b*) ค่าการ
เปลี่ยนแปลงของสี (ΔE^*) ค่าวอเตอร์แอดคิวิตี (a_w) และค่า
ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ของเมล็ดหลังการ
ออสโมซิส 5 ชั่วโมง เมื่อแปรความเข้มข้นของสารละลาย
กลูโคส (40, 50 และ 60°Brix) พร้อมทั้งเปรียบเทียบกับเม
ล็ดสด ซึ่งพบว่าเมล็ดสดมีค่าปริมาณของแข็งที่ละลาย
น้ำได้เท่ากับ 11.20°Brix ค่าวอเตอร์แอดคิวิตี 0.906 และมี
ค่าสี L*, a* และ b* เท่ากับ 60.32, -5.60 และ 27.81
ตามลำดับ เมื่อนำเมล็ดสดไปผ่านการแช่ในสารละลาย
กลูโคสที่ความเข้มข้นต่างๆ พบการเปลี่ยนแปลงดังนี้

ปัจจัยแรกในการพิจารณาได้แก่ค่าสี เนื่องจากสี
เป็นสมบัติกายภาพของอาหารที่มีผลต่อคุณภาพและการ
ยอมรับของผู้บริโภค สีของอาหารมักเกิดการเปลี่ยนแปลง
ไปได้ง่าย ในระหว่างกระบวนการแปรรูปอาหาร แต่การ

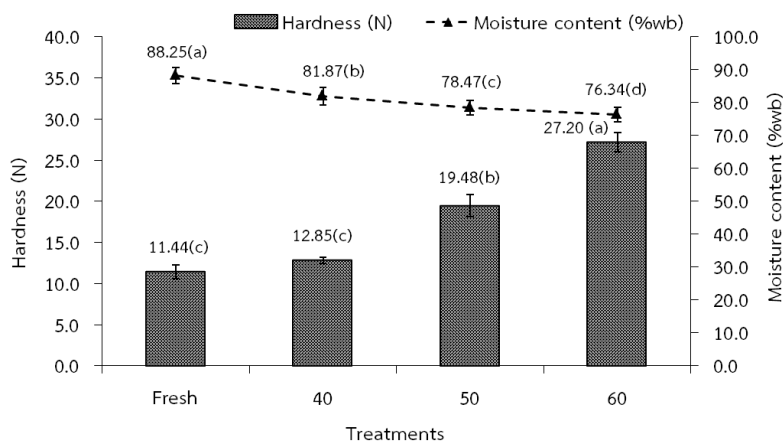
ออสโมซิสเป็นการแปรรูปแบบไม่รุนแรง ซึ่งมีส่วนช่วยใน
การรักษาการเปลี่ยนแปลงสีได้ดีกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับ
การใช้ความร้อน (25) ความเข้มข้นของสารละลาย
ออสโมติกเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีผลต่อคุณภาพด้านสีของชิ้น
ผลไม้หลังการออสโมซิสจากตารางที่ 2 พบว่า ค่าความสว่าง
(L*) และค่าความเป็นสีแดง (a*) มีแนวโน้มลดลงอย่างมี
นัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) หลังการออสโมซิสที่ความ
เข้มข้นทั้ง 3 ระดับ เมื่อเทียบกับเมล็ดสด ในขณะที่มีการ
ลดลงของค่าความเป็นสีเหลือง (b*) เช่นกันแต่ไม่พบความ
แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ทั้งนี้ยังสังเกต
พบว่าหลังการแช่เมล็ดที่ความเข้มข้นของสารละลาย
กลูโคสสูงขึ้นระหว่าง 40 ถึง 60°Brix ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้น
ของค่า L* หรืออาจกล่าวได้ว่าเมล็ดหลังการออสโมซิส
สว่างมากขึ้นไม่คล้ำมีสีเหลืองลดลงและเมื่อพิจารณาค่าการ
เปลี่ยนแปลงของสี (ΔE^*) พบว่ามีแนวโน้มลดลง (15.98-
12.10) โดยไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ
($p > 0.05$) ที่การแช่เมล็ดในสารละลายกลูโคสความเข้มข้น
40°Brix และ 50°Brix ในขณะที่พบการลดลงอย่างมี

นัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ของค่าการเปลี่ยนแปลงของสี (ΔE^*) เท่ากับ 12.10 ในการแช่เมล็ดในสารละลายกลูโคส ความเข้มข้น 60°Brix ดังนั้นจึงกล่าวได้ว่าการออสโมซิสสามารถช่วยลดการเปลี่ยนแปลงสีของผลิตภัณฑ์ได้ เนื่องจากสารละลายกลูโคสที่มีความเข้มข้นสูงโดยน้ำตาลทำหน้าที่เคลือบชั้นเมล็ดไม่ให้สัมผัสกับออกซิเจนในอากาศจึงมีสมบัติในการป้องกันปฏิกิริยาออกซิเดชันทำให้ลดการเกิดสีน้ำตาลที่เกิดขึ้นรอบ ๆ ชั้นเมล็ดได้ (26)

ค่าวอเตอร์แอคทิวิตีของเมล็ดหลังการออสโมซิสมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ระหว่าง 0.906-0.762 ซึ่งสอดคล้องกับการลดลงของปริมาณความชื้นเนื่องจากในการออสโมซิสจะใช้สารละลายออสโมติกที่มีความเข้มข้นสูงกว่าความเข้มข้นภายในชั้นผักผลไม้เพื่อให้เกิดความแตกต่างของแรงดันเกิดเป็นแรงขับให้มีการถ่ายโอนมวลสาร ระดับความเข้มข้นของสารละลายออสโมติกจึงเกี่ยวข้อง

โดยตรงกับประสิทธิภาพการแพร่ของน้ำและตัวถูกละลาย โดยมีแนวโน้มคือเมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสารละลายออสโมติกส่งผลให้อัตราการถ่ายโอนมวลสารของน้ำและตัวถูกละลายมีค่าเพิ่มขึ้นและมีผลทำให้ผลิตภัณฑ์สุดท้ายมีค่าวอเตอร์แอคทิวิตี (a_w) ต่ำลง (27) ดังนั้นจึงพบว่าที่ความเข้มข้นของสารละลายกลูโคส 60°Brix ให้ค่าวอเตอร์แอคทิวิตีต่ำสุด

จากตารางที่ 2 พบแนวโน้มของการเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ของปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้เมื่อเทียบระหว่างเมล็ดสดและหลังการแช่ในสารละลายกลูโคส โดยที่หลังการแช่เมล็ดในสารละลายกลูโคสความเข้มข้น 40, 50 และ 60°Brix มีค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้เท่ากับ 21.60, 26.87 และ 34.20°Brix ตามลำดับ นั่นคือการใช้สารละลายออสโมติกความเข้มข้นสูงมีผลทำให้เมล็ดมีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้สูงหรือกล่าวได้ว่าหวานขึ้นนั่นเอง



รูปที่ 4 ค่าความแข็งและปริมาณความชื้นของเมล็ดหลังการออสโมซิส 5 ชั่วโมง เมื่อแปรความเข้มข้นของสารละลายกลูโคส

^{ab} อักษรที่แตกต่างในแต่ละสภาวะทดสอบมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบโดย DMRT (mean $\pm$ SD)

รูปที่ 4 แสดงค่าความแข็งและปริมาณความชื้นของเมล็ดหลังการออสโมซิส 5 ชั่วโมง เมื่อแปรความเข้มข้นของสารละลายกลูโคส พบว่าเนื้อสัมผัสเป็นอีกหนึ่งในคุณสมบัติที่สำคัญของผลไม้ ดังนั้นค่าความแข็งของเมล็ดสดมีค่า 11.44 N ซึ่งมีค่าต่ำสุดและมีแนวโน้มเพิ่มอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) หลังการแช่

เมล็ดในสารละลายกลูโคสความเข้มข้น 40, 50 และ 60°Brix มีค่าความแข็งเท่ากับ 12.85, 19.48 และ 27.20 N ตามลำดับ ทั้งนี้สอดคล้องกับปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ที่เพิ่มขึ้นหลังการออสโมซิส เนื่องจากโมเลกุลน้ำตาลสามารถแทรกเข้าไปอยู่ในช่องว่างของเซลล์ ซึ่งทำให้เซลล์เมล็ดมีปริมาณของแข็งเพิ่มขึ้นจึงมีส่วนช่วยให้

ขึ้นเมล่อนมีความแน่นเนื้อมากขึ้น นอกจากนี้อาจเป็นไปได้ว่าโมเลกุลของกลูโคสที่แพร่เข้าไปในเซลล์ผลไม้สามารถสร้างพันธะไฮโดรเจนกับโพลีแซ็กคาไรด์ในผนังเซลล์ทำให้ผนังเซลล์มีความแข็งแรงมากขึ้นส่งผลให้เนื้อสัมผัสของเมล่อนหลังการออสโมซิสยังคงมีความแน่นเนื้อดี (15, 28)

ในขณะที่พบการลดลงของความขึ้นเมล่อนหลังการออสโมซิสโดยเมล่อนสดมีค่าความขึ้น 88.25%wb. และลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) หลังการแช่เมล่อนในสารละลายกลูโคสความเข้มข้น 40, 50 และ 60°Brix มีค่าขึ้นเท่ากับ 81.87, 78.47 และ 76.34%wb ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องมาจากการออสโมซิสส่งผลให้น้ำภายในเซลล์ของเมล่อนจะแพร่ออกจากเซลล์สู่สารละลายกลูโคสในขณะที่ตัวถูกละลายหรือน้ำตาลจะแพร่เข้าสู่ภายในเซลล์เมล่อน และสารบางอย่างที่มีอยู่ในเซลล์เมล่อน เช่น กรด อินทรีย์และเกลือแร่ จะแพร่ออกจากเซลล์สู่สารละลายกลูโคส ทั้งนี้การถ่ายโอนมวลสารหลักที่เกิดขึ้นคือการเคลื่อนย้ายของน้ำภายในเซลล์ของเมล่อน จึงทำให้ความขึ้นลดลง (12, 19)

สรุปผล

การแช่เมล่อนขึ้นรูปลูกบาศก์เมตรขนาด 2x2x2 cm ด้วยสารละลายออสโมติกที่เตรียมจากกลูโคสความเข้มข้น 40, 50 และ 60°Brix เป็นเวลา 5 ชั่วโมง มีผลต่อค่าการถ่ายเทมวลสาร โดยที่การแช่เมล่อนในสารละลายกลูโคส 60°Brix ให้ค่าปริมาณน้ำที่สูญเสียปริมาณของแข็งที่เพิ่มขึ้น และปริมาณน้ำหนักรับที่ลดลงสูงที่สุดที่ 21.81%, 5.31% และ 16.44% ตามลำดับ และการออสโมซิสยังส่งผลต่อคุณภาพเมล่อนโดยเมล่อนสดมีค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้เท่ากับ 11.20°Brix และเพิ่มขึ้นเท่ากับ 21.60, 26.87 และ 34.20°Brix หลังการออสโมซิส ค่าวอเตอร์แอคทิวิตีของเมล่อนสดเท่ากับ 0.906 และมีแนวโน้มลดลงระหว่าง 0.906-0.762 หลังการออสโมซิสซึ่งสอดคล้องกับการลดลงของปริมาณความขึ้นเช่นกัน เมล่อนสดมีค่า L^* , a^* และ b^* เท่ากับ

60.32, -5.60 และ 27.81 ตามลำดับ เมื่อนำเมล่อนสดไปผ่านการแช่ในสารละลายกลูโคสที่ความเข้มข้นต่าง ๆ พบว่าค่า L^* , a^* และ b^* มีแนวโน้มลดลงหลังการออสโมซิสที่ความเข้มข้นทั้ง 3 ระดับ ในขณะเดียวกันที่ค่าการเปลี่ยนแปลงของสี (ΔE^*) พบว่ามีค่าลดลง (15.98-12.10) เช่นกัน หลังการแช่เมล่อนในสารละลายกลูโคสความเข้มข้น 40-60°Brix มีผลทำให้เมล่อนมีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้สูงขึ้นซึ่งผลที่ได้เป็นไปในทิศทางเดียวกับค่าความแข็งของเมล่อนสดมีค่า 11.44 N และเพิ่มขึ้นเท่ากับ 12.85, 19.48 และ 27.20 N หลังการแช่เมล่อนในสารละลายกลูโคสความเข้มข้น 40, 50 และ 60°Brix ตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาวิศวกรรมอาหาร ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ ที่สนับสนุนสถานที่ในการทำวิจัย และมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีที่สนับสนุนทุนวิจัยและวัสดุอุปกรณ์

เอกสารอ้างอิง

1. Wolbang CM, Fitos JL, Treeby MT. The effect of high pressure processing on nutritional value and quality attributes of Cucumis melon. *Innov Food Sci Emerg Technol*. 2008;9(2):196-200.
2. Laur LM, Tian L. Provitamin A and vitamin C contents in selected California-grown cantaloupe and honeydew melons and imported melons. *J Food Compos Anal*. 2011; 24(2):194-201.
3. กุณฑล เทพจิตรรา. แหล่งผลิตเมล่อนของดีที่แม่จัน. ใน: พานิชย์ ยศปัญญา. นิตยสารเทคโนโลยีชาวบ้าน. สำนักพิมพ์มติชน; ปีที่ 31 เล่มที่ 702 1 กันยายน 2562. น. 76-77.

4. Torregiani D. Osmotic Dehydration in Fruit and Vegetable Processing. *Food Res Int.* 1993;26:59-69.
5. Ikoko J, Kuri V. Osmotic pre-treatment effect on fat intake reduction and eating quality of deep-fried plantain. *Food Chem.* 2007;102:523-31.
6. อาภัสสร ศิริจริยวัตร. อิทธิพลของการออสโมซิสก่อนการแช่เยือกแข็งต่อคุณภาพเมล่อน. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา.* 2558;20(2):118-30.
7. Sacchetti G, Gianotti A, Dalla RM. Sucrose-salt combined effect on mass transfer kinetics and product acceptability, Study on apple osmotic treatments. *J Food Eng.* 2001;49:163-73.
8. Ferrari CC, Hubinger MD. Evaluation of the mechanical properties and diffusion coefficients of osmodehydrated melon cubes. *Int J Food Sci Tech.* 2008;43(11): 2065-74.
9. Dermesonlouoglou EK, Giannakourou MC, Taoukis PS. Stability of dehydrofrozen tomatoes pretreated with alternative osmotic solutes. *J Food Eng.* 2007;78:272-80.
10. Barrera C, Betoret N, and Fito P. Ca^{2+} and Fe^{2+} influence on the osmotic dehydration kinetics of apple slices (var. Granny Smith). *J Food Eng.* 2004;65:9-14.
11. Rozek A, Garcia-Perez J, Lopez F, Guell C, Ferrando M. Infusion of grape phenolics into fruits and vegetables by osmotic treatment: Phenolic stability during air drying. *J Food Eng.* 2010;99:142-50.
12. Chandra S, Kumari D. Recent development in osmotic dehydration of fruit and vegetables: A Review. *Critical Reviews in Food Science & Nutrition.* 2015;55(4):552-61.
13. สิริมา ชินสาร, อังคณา เป็ลยนศรี, ปิยรัฐ มโนมัย หทัยทิพย์. ผลของสารละลายออสโมติกต่อการถ่ายเทมวลสารและคุณภาพของผลิตภัณฑ์ผลไม้กระป๋อง. *วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร.* 2556;44(2) (พิเศษ):1-4.
14. วรัญญา คำชู, วิษณีย์ ยืนยงพุดทกาล. ผลของการใช้น้ำตาลทรายและเกลือต่อการถ่ายเทมวลสารระหว่างวิธีออสโมซิสแห้งไทย. *วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร.* 2550;38(6)(พิเศษ):91-94.
15. สุภาพรณ คงสมเพ็ชร, วิษณีย์ ยืนยงพุดทกาล. ผลของความเข้มข้นของโพลิฟรุคโตสและซูโครสต่อลักษณะคุณภาพของกล้วยไข่หลังการออสโมซิส. *การประชุมวิชาการระดับชาติ “วิทยาศาสตร์วิจัย” ครั้งที่ 6; วันที่ 20 – 21 มีนาคม พ.ศ. 2557; มหาวิทยาลัยบูรพา; 2557.*
16. El-Aouar AA, Azoubel PM, Barbosa Jr JL, Murr FEX. Influence of the osmotic agent on the osmotic dehydration of papaya (*Carica papaya L.*). *J Food Eng.* 2006;75:267-74.
17. AOAC. Official methods of analysis of the association of official analytical chemists. (18th ed). Gaithersburg, MD: Association of Official Analytical Chemists; 2005.
18. Rhim JW, Nunes RV, Jones VA, Swartzel KR. Kinetics of color change of grape juice generated using linearly increasing temperature. *J Food Sci.* 1889;54(3):776-7.

19. วิษณณิ ยืนยงพุททกาล. ปัจจัยที่มีผลต่อการดิ่งน้ำออกด้วยวิธีออสโมซิสของผักและผลไม้. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. 2556;18(1):226-33.
20. Azoubel PM, Murr FEX. Mass transfer kinetics of osmotic dehydration of cherry tomato. J Food Eng. 2010;61:291-5.
21. Chavan UD. Osmotic dehydration process for preservation of fruit and vegetables. J Food Res. 2012;1(2):202-9.
22. Kowalska H, Lenart A. Mass exchange during osmotic pretreatment of vegetable. J Food Eng. 2001;49:137-40.
23. นวภัทรา หนูนาค, อมรรัตน์ มุขประเสริฐ. จลนศาสตร์การถ่ายเทมวลในระหว่างกระบวนการออสโมติกไซโป๊วหวาน. วิศวกรรมสารมหาวิทยาลัยขอนแก่น. 2554;38(1):53-63.
24. Agarry SE, Owabor CN. Statistical optimization of process variables for osmotic dehydration of Okra (*Abelmoschus esculentus*) in sucrose solution. Niger J Tech. 2012;31(3):370-82.
25. Tortoe C. A review of osmodehydration for food industry. Afr J Food Sci. 2010;4(6):303-24.
26. Khan MR. Osmotic dehydration technique for fruit preservation-A review. Pakistan J Food Sci. 2012;22(2):71-85.
27. Sankat CK, Castaigne F, Maharaj R. The air drying behavior of fresh and osmotically dehydrated banana slices. Int J Food Sci Technol. 1996;31:123-35.
28. งามจิตร โล่วิฑูร. การปรับปรุงคุณภาพของเงาะแช่เยือกแข็งโดยวิธีออสโมติไฮเดรชันด้วยน้ำตาลบางชนิด [วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต] กรุงเทพมหานคร: มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน; 2551.



ระบบสืบค้นฐานความรู้เชิงความหมายเพื่อส่งเสริมวัฒนธรรมและประเพณีชาวเขาเผ่าม้ง
บ้านเข็กน้อย อำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์ โดยใช้เวิร์ดเพรสและออนโทโลยี

The Semantic Knowledge Base Searching System for Promoting Cultural and
Traditional of Mong Tribe, Bankeknoi, Kaokor District, Phetchabun Province
using WordPress and Ontology

ดวงจันทร์ สีหาราช*

Duangjhan Siharad*

สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ จ.เพชรบูรณ์ 67000

Major of Computer Science, Faculty of Science and Technology, Phetchabun Rajabhat University

Muang District, Phetchabun 67000, THAILAND

*Corresponding author e-mail: kinakob@hotmail.com

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article history:

Received: 29 April, 2020

Revised: 5 August, 2020

Accepted: 31 August, 2020

Available online: 21 October, 2020

DOI: 10.14456/rj-rmutt.2020.25

Keywords: semantic

knowledge base, cultural and
traditional of mong tribe,
bankeknoi, wordpress,
ontology

This research aims 1) to study knowledge structure and collect local cultural and traditional knowledge of Mong Tribe Bankeknoi, Kaokor District, Phetchabun Province 2) to develop the semantic knowledge searching system for promoting cultural and traditional local wisdom knowledge of Mong Tribe and 3) to assess performance and user's satisfaction to semantic knowledge searching system. The sample of this research was 8 cultural and traditional academic persons, philosophers and computer and information academic persons of Bankeknoi subdistrict administration organization. The research instruments were in-depth interviews for collecting the local wisdom knowledge and user's satisfaction questionnaire to the system. The research found that semantic knowledge management system consists of function 4 parts 1) showing information in the web frontend 2) controlling contents and rendering format on WordPress 3) Integrating the ontology knowledgebase with data on WordPress and 4) Linking the knowledge contents with social

media. The ontology knowledgebase has totally 16 nodes, classified 3 levels which represented 4 knowledge groups 1) traditional and local wisdom 2) tour destination 3) accommodation and 4) Mong origin's history and language. The result of performance assessment by f measure was 88.9% and user satisfaction to system in overview was at highest ($\bar{x} = 4.61$, $SD = 0.65$).

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์ 1) เพื่อศึกษาโครงสร้างองค์ความรู้ และรวบรวมข้อมูลองค์ความรู้ภูมิปัญญาท้องถิ่นทางวัฒนธรรมและประเพณีชาวเขาเผ่าม้ง บ้านเข็กน้อย อำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์ 2) เพื่อพัฒนาระบบจัดการฐานความรู้เชิงความหมาย เพื่อส่งเสริมวัฒนธรรมและประเพณีชาวเขาเผ่าม้ง บ้านเข็กน้อย อำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์ โดยใช้เว็บบล็อกและออนไลน์ และ 3) เพื่อประเมินประสิทธิภาพการทำงานและความพึงพอใจผู้ใช้ต่อระบบจัดการฐานความรู้เชิงความหมาย เพื่อส่งเสริมวัฒนธรรมและประเพณีชาวเขาเผ่าม้ง บ้านเข็กน้อย อำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์ กลุ่มตัวอย่างที่ใช้รวบรวมข้อมูล คือนักวิชาการด้านวัฒนธรรมและประเพณีชาวเขาเผ่าม้ง ราษฎรชาวบ้าน นักวิชาการคอมพิวเตอร์และสารสนเทศขององค์การบริหารส่วนตำบลเข็กน้อย ซึ่งคัดเลือกแบบเจาะจง จำนวน 8 คน เครื่องมือที่ใช้รวบรวมข้อมูล คือแบบสัมภาษณ์เชิงลึกเพื่อรวบรวมองค์ความรู้ และแบบประเมินความพึงพอใจผู้ใช้ต่อระบบ ผลการวิจัยพบว่าระบบจัดการฐานความรู้เชิงความหมาย ประกอบด้วยฟังก์ชัน การทำงาน 4 ส่วน ได้แก่ 1) การแสดงข้อมูลสารสนเทศในส่วนหน้า 2) การควบคุมเนื้อหาและการแสดงผลบนเว็บบล็อก 3) การเชื่อมประสานฐานความรู้ออนไลน์กับข้อมูลบนเว็บบล็อกและ 4) การเชื่อมโยงเนื้อหาความรู้กับสื่อสังคมออนไลน์ การสร้างฐานความรู้ออนไลน์มีจำนวนทั้งหมด 16 โหนด แบ่งเป็น 3 ระดับชั้น แทนองค์ความรู้ 4 กลุ่ม ได้แก่ 1) ประเพณี

และภูมิปัญญาท้องถิ่น 2) สถานที่ท่องเที่ยว 3) ที่พัก และ 4) ประวัติ และภาษาของชาวม้ง การประเมินประสิทธิภาพการสืบค้นข้อมูล ได้ค่า f measure เท่ากับ 88.9% และผู้ใช้มีความพึงพอใจต่อระบบในภาพรวม อยู่ในระดับมากที่สุด ($\bar{x} = 4.59$, $SD = 0.64$)

คำสำคัญ: ฐานความรู้เชิงความหมาย วัฒนธรรมและประเพณีชาวเขาเผ่าม้ง บ้านเข็กน้อย เว็บบล็อก ออนไลน์

บทนำ

การนำเทคโนโลยีที่ทันสมัยมาช่วยในการจัดการและจัดเก็บองค์ความรู้ในด้านต่าง ๆ ของวิถีชุมชนไม่ให้เกิดการสูญหายไปตามกาลเวลา และสามารถนำไปเผยแพร่ให้คนรุ่นใหม่ได้เรียนรู้ได้ตลอดเวลาเป็นสิ่งจำเป็นอย่างยิ่ง อาทิ องค์ความรู้เกี่ยวกับขนบธรรมเนียมประเพณีที่สืบทอดกันมาจากราษฎรชาวบ้าน หรือผู้เฒ่า ผู้แก่ ในชุมชน ซึ่งเป็นความรู้ที่ควรอนุรักษ์และเก็บรักษาไว้ให้ลูกหลานรุ่นหลังได้สืบทอดต่อไป วัฒนธรรมและประเพณีชาวเขาเผ่าม้ง บ้านเข็กน้อย อำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์ เป็นสิ่งที่จะช่วยดึงดูดใจให้ผู้คนเข้ามาท่องเที่ยวในชุมชน และเชื่อมโยงการเดินทางท่องเที่ยวไปยังสถานที่ต่าง ๆ ในอำเภอเขาค้อ และในพื้นที่ต่าง ๆ ของจังหวัดเพชรบูรณ์ เพิ่มมากยิ่งขึ้น ซึ่งจะช่วยกระตุ้นเศรษฐกิจการท่องเที่ยวของจังหวัดและประเทศในภาพรวมได้ ทั้งนี้หมู่บ้านวัฒนธรรมชาวเขาบ้านเข็กน้อย ซึ่งเป็นพื้นที่เป้าหมายในการวิจัย มีกิจกรรมท่องเที่ยวซึ่งหาได้ยาก เช่น ประเพณีการกินข้าวใหม่ ประเพณีปีใหม่ม้ง มีการผลิตเครื่องมือ หรืออุปกรณ์ที่ใช้ในการดำรงชีวิต จากภูมิปัญญาท้องถิ่นที่สามารถจำหน่ายเป็น

ผลิตภัณฑ์สร้างอาชีพและรายได้แก่ชาวม้ง รวมทั้งมีภาษาสื่อสารประจำถิ่นที่แสดงให้เห็นถึงเอกลักษณ์ที่ควรค่าแก่การอนุรักษ์ และแบ่งปันเรื่องราวแก่สาธารณชน (1) แต่ในปัจจุบันส่วนราชการประจำจังหวัด และองค์การบริหารส่วนตำบลได้ใช้วิธีการเผยแพร่ข้อมูลวัฒนธรรมและประเพณี ชาวเขาเผ่าม้ง ในจังหวัดเพชรบูรณ์ ผ่านเฟซบุ๊กและเว็บไซต์ ซึ่งมีการจัดเก็บข้อมูลกระจายในหลายแหล่ง รวมทั้งเก็บข้อมูล/องค์ความรู้ยังขาดการเชื่อมโยงอย่างเป็นระบบ ไม่สามารถสนับสนุนต่อการตัดสินใจของนักท่องเที่ยวที่มีความต้องการเข้าถึงและสืบค้นข้อมูลตามขอบเขตที่ตนเองสนใจ เพื่อนำมาใช้ประกอบการตัดสินใจจากองค์ประกอบของข้อมูลในหลายแหล่งเพื่อใช้วางแผนเส้นทางการเดินทาง การเลือกที่พัก และการวางแผนการใช้จ่ายในการเดินทางท่องเที่ยวในแต่ละทริป เป็นต้น ซึ่งถ้าหากนักท่องเที่ยวต้องการตัดสินใจอย่างเร่งด่วน อาจทำให้ต้องเสียเวลาในการเข้าถึงข้อมูลจากหลาย ๆ เว็บไซต์ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีเพื่อนำมาใช้สนับสนุนการตัดสินใจ (2) และจาวิต เขียดอฟ และโรม่า อะโดไมเทน (3) ได้กล่าวว่า สถานที่ท่องเที่ยวที่มีคุณลักษณะ เช่น สิ่งดึงดูดใจ สิ่งอำนวยความสะดวก การเข้าถึง รูปภาพ ราคา และทรัพยากรมนุษย์ที่ให้บริการ ทำให้สถานที่เหล่านั้นเหมาะสมและพร้อมให้บริการสำหรับนักท่องเที่ยว ซึ่งปัจจัยดังกล่าว จะสามารถนำมาใช้ในกระบวนการตัดสินใจแก่นักท่องเที่ยวได้ ทั้งนี้การนำออนไลน์มาประยุกต์ใช้จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสืบค้นข้อมูล โดยจะช่วยขยายคำค้นให้เข้าถึงข้อมูลได้อย่างรวดเร็วและได้ผลลัพธ์ตรงตามที่ต้องการมากที่สุด และช่วยขจัดปัญหาความขัดแย้งกันในเชิงความหมายของข้อมูล (4)

การบูรณาการความสามารถของซอฟต์แวร์สำเร็จรูปเว็บไซต์และออนไลน์ในการส่งเสริมวัฒนธรรมและประเพณีชาวเขาเผ่าม้ง บ้านเข็กน้อย อำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์ ในงานวิจัยนี้ จะช่วยให้การสืบค้นและนำเสนอข้อมูลบนเว็บแอปพลิเคชัน ด้านการท่องเที่ยวมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น และสามารถเชื่อมโยงความรู้จากแหล่งออนไลน์ที่อยู่กระจัดกระจายให้รวมศูนย์ ส่งผลให้งาน

ประชาสัมพันธ์ และส่งเสริมการท่องเที่ยวชุมชนมีประสิทธิภาพบนฐานของการประมวลผลที่เป็นอัตโนมัติแทนที่จะใช้การประชาสัมพันธ์โดยมนุษย์เพียงอย่างเดียว โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาโครงสร้างองค์ความรู้ และรวบรวมข้อมูลองค์ความรู้ภูมิปัญญาท้องถิ่นทางวัฒนธรรมและประเพณีชาวเขาเผ่าม้ง บ้านเข็กน้อย อำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์ เพื่อพัฒนาระบบสืบค้นฐานความรู้เชิงความหมาย เพื่อส่งเสริมวัฒนธรรมและประเพณีชาวเขาเผ่าม้ง บ้านเข็กน้อย อำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์ โดยใช้เวิร์ดเฟสและออนโทโลยี และเพื่อประเมินประสิทธิภาพการทำงานและความพึงพอใจผู้ใช้ต่อระบบสืบค้นฐานความรู้เชิงความหมาย เพื่อส่งเสริมวัฒนธรรมและประเพณีชาวเขาเผ่าม้ง บ้านเข็กน้อย อำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ เป็นการวิจัยและพัฒนา แบ่งขั้นตอนการดำเนินงานออกเป็น 3 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การศึกษาโครงสร้างองค์ความรู้ และเก็บรวบรวมข้อมูลองค์ความรู้ภูมิปัญญาท้องถิ่นทางวัฒนธรรมและประเพณีชาวเขาเผ่าม้ง บ้านเข็กน้อย อำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์ ผู้วิจัยทำการสำรวจฟังก์ชันการทำงาน และรูปแบบการนำเสนอข้อมูลของเว็บไซต์เผยแพร่ความรู้ด้าน วัฒนธรรม ประเพณี และภูมิปัญญา และทำการสัมภาษณ์เชิงลึกเพื่อรวบรวมข้อมูล/องค์ความรู้จากนักวิชาการด้านวัฒนธรรมและประเพณีชาวเขาเผ่าม้ง และปราชญ์ชาวบ้าน จำนวน 8 คน โดยทำการคัดเลือกเจาะจงเฉพาะผู้ที่มีความรู้และประสบการณ์ในองค์ความรู้ท้องถิ่น และข้อมูลพื้นฐานด้านการท่องเที่ยวทางวัฒนธรรมของชาวม้ง ไม่ต่ำกว่า 5 ปี ขึ้นไป โดยทำการเก็บรวบรวมข้อมูลองค์ความรู้จากประสบการณ์เกี่ยวกับประเพณี ภูมิปัญญาท้องถิ่น การละเล่น ประวัติ ถิ่นฐาน ภาษาของชาวม้ง และเส้นทางการเดินทาง รวมทั้งแสดงความคิดเห็นต่อการนำเสนอรายการข้อมูลองค์ความรู้และการจัดโครงสร้างของเว็บแอปพลิเคชัน ทั้งนี้จะได้ข้อมูลเพื่อใช้เป็นแนวทางใน

การพัฒนาฐานความรู้ออนโทโลยี และฟังก์ชันการให้บริการผู้ใช้งาน

ขั้นตอนที่ 2 การพัฒนาระบบจัดการฐานความรู้เชิงความหมาย เพื่อส่งเสริมวัฒนธรรมและประเพณีชาวเขาเผ่าม้ง บ้านเข็กน้อย อำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์ โดยใช้เวิร์ดเฟลส และออนโทโลยี ผู้วิจัยทำการออกแบบขั้นตอนการประมวลผลของระบบด้วยแผนภาพ UML (Unified Modeling Language) สร้างฐานความรู้ออนโทโลยี โดยใช้โปรแกรม Protégé และพัฒนาเว็บแอปพลิเคชัน จำแนกออกเป็น 4 ส่วน ได้แก่ 1) การแสดงข้อมูลสารสนเทศในส่วนหน้า 2) การควบคุมเนื้อหาและการแสดงผลบนเวิร์ดเฟลส 3) การเชื่อมประสานฐานความรู้ออนโทโลยีกับข้อมูลบนเวิร์ดเฟลส และ 4) การเชื่อมโยงเนื้อหาความรู้กับสื่อสังคมออนไลน์

ขั้นตอนที่ 3 การประเมินประสิทธิภาพการทำงาน และความพึงพอใจผู้ใช้ต่อระบบจัดการฐานความรู้เชิงความหมาย เพื่อส่งเสริมวัฒนธรรมและประเพณีชาวเขาเผ่าม้ง บ้านเข็กน้อย อำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์ โดยใช้เวิร์ดเฟลสและออนโทโลยี ผู้วิจัยทำการประเมินประสิทธิภาพระบบในการสืบค้นข้อมูลเพื่อการ

แนะนำ โดยการหาค่า precision, recall, F-measure โดยผลการทดสอบการสืบค้นออนโทโลยีจะได้ค่าพารามิเตอร์ คือ ค่า 3A จำนวนข้อมูลที่ต้องตามความสนใจแต่ไม่ถูกสืบค้น (B) จำนวนข้อมูลที่สืบค้นได้แต่ไม่ถูกต้องตามความสนใจ และ (C) จำนวนข้อมูลที่สืบค้นได้แต่ไม่ถูกต้องตามความสนใจ จากนั้นนำมาคำนวณหาค่าดังสมการต่อไปนี้ (5) รวมทั้งแปลผลระดับความพึงพอใจผู้ใช้ต่อระบบ โดยใช้ค่าเฉลี่ย และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

$$\text{Precision} = \frac{A}{A + C} \times 100, \text{Recall} = \frac{A}{A + B} \times 100$$

$$\text{F-measure} = \frac{2 \times \text{Precision} \times \text{Recall}}{\text{Precision} + \text{Recall}}$$

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

1. ผลการศึกษาโครงสร้างองค์ความรู้ และรวบรวมข้อมูลองค์ความรู้ภูมิปัญญาท้องถิ่นทางวัฒนธรรมและประเพณีชาวเขาเผ่าม้ง บ้านเข็กน้อย อำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์ ดังตารางที่ 1 และตารางที่ 2

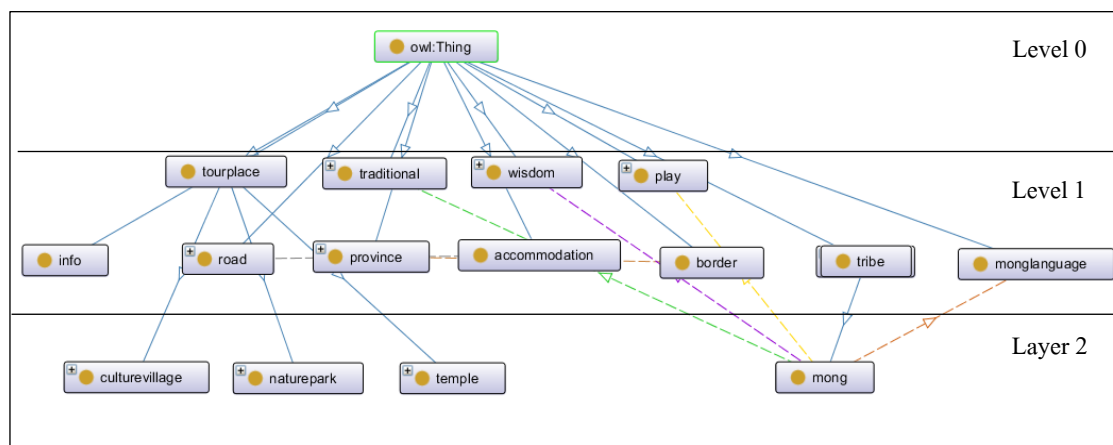
ตารางที่ 1 รูปแบบฟังก์ชันการทำงาน/การให้บริการของเว็บไซต์นำเสนอข้อมูล/องค์ความรู้ด้านวัฒนธรรมและประเพณี

URL	ฟังก์ชันการทำงาน/การให้บริการ					ร้อยละของจำนวนฟังก์ชัน ที่มี
	การสืบค้นข้อมูลแบบปกติ	การรีวิวข้อมูลแบบเปิด	การปรับปรุงข้อมูลแบบเปิด	การเชื่อมต่อ กับเครือข่ายสังคมออนไลน์	การสืบค้นข้อมูลเชิงความหมาย	
https://www.sawadee.co.th/	✓	✗	✗	✗	✗	20%
http://www.prapayneethai.com	✓	✗	✗	✗	✗	20%
https://thailandtourismdirectory.go.th	✓	✓	✗	✗	✗	40%
https://www.touronthai.com/	✓	✗	✗	✗	✗	20%
https://www.thai-tour.com/	✓	✗	✓	✗	✗	40%

URL	ฟังก์ชันการทำงาน/การให้บริการ					ร้อยละของจำนวนฟังก์ชัน ที่มี
	การสืบค้นข้อมูลแบบปกติ	การรีวิว	การปรับปรุงข้อมูลแบบเปิด	การเชื่อมต่อ กับเครือข่าย สังคมออนไลน์	การสืบค้นข้อมูลเชิงความหมาย	
http://www.kheknoi.go.th/	✓	✗	✗	✗	✗	20%
http://www.phetchabunpao.go.th/	✓	✗	✗	✗	✗	20%
http://www.bankeknoi.com/	✓	✗	✗	✗	✗	20%
ร้อยละในภาพรวม	100%	12.5%	12.5%	0%	0%	25%

ตารางที่ 2 รายการข้อมูล/องค์ความรู้ที่ควรนำเสนอบนเว็บแอปพลิเคชันเพื่อส่งเสริมการท่องเที่ยวจากความคิดเห็นของนักวิชาการด้านวัฒนธรรมและประเพณีชาวเขาเผ่าม้ง

ข้อมูล/องค์ความรู้	จำนวนผู้แสดงความคิดเห็น (คน)	คิดเป็นร้อยละ	จัดลำดับ
1.เส้นทางการเดินทาง/ที่ตั้ง	8	24.2	1
2. ที่พัก	6	18.2	2
3. ประมาณการค่าใช้จ่ายในการเดินทาง/ เข้าชมกิจกรรม	3	9.2	3
4. ข้อมูลเกี่ยวกับประเพณี/การละเล่น/ วัฒนธรรม/ภูมิปัญญา	8	24.2	1
5. การรีวิวข้อมูลจากนักท่องเที่ยว	8	24.2	1
รวม	33	100.0	



รูปที่ 1 ฐานความรู้ออนโทโลยีเพื่อส่งเสริมวัฒนธรรมและประเพณีชาวเขาเผ่าม้งบ้านเข็กน้อย

จากตารางที่ 1 เว็บไซต์ด้านการท่องเที่ยวเชิงวัฒนธรรมส่วนใหญ่ให้บริการสืบค้นข้อมูลแบบปกติ คิดเป็น 100% และไม่มีฟังก์ชันการเชื่อมต่อกับเครือข่ายสังคมออนไลน์ และการสืบค้นข้อมูลเชิงความหมาย

จากตารางที่ 2 นักวิชาการด้านวัฒนธรรมและประเพณีชาวเขาเผ่าม้งมีความคิดเห็นว่า รายการข้อมูล/องค์ความรู้ที่ควรนำเสนอบนเว็บแอปพลิเคชันเพื่อส่งเสริมการท่องเที่ยวมากที่สุด คือ เส้นทางเดิน/ที่ตั้งข้อมูลเกี่ยวกับประเพณี/การเล่น/วัฒนธรรม/ภูมิปัญญา และการรีวิวข้อมูลจากนักท่องเที่ยว และน้อยที่สุด คือ ประมาณการค่าใช้จ่ายในการเดินทาง/เข้าชมกิจกรรม

2. ผลการพัฒนากระบวนการฐานความรู้เชิงความหมาย เพื่อส่งเสริมวัฒนธรรมและประเพณีชาวเขาเผ่าม้ง บ้านเข็กน้อย อำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์ โดยใช้เวิร์ดเพลสและออนโทโลยี สามารถอธิบายเทคนิคการพัฒนาตามขั้นตอน ดังนี้

2.1 การสร้างฐานความรู้ออนโทโลยีเพื่อส่งเสริมวัฒนธรรมและประเพณีชาวเขาเผ่าม้ง บ้านเข็กน้อย

จากรูปที่ 1 ฐานความรู้ออนโทโลยีเพื่อส่งเสริมวัฒนธรรมและประเพณีชาวเขาเผ่าม้งบ้านเข็กน้อย แบ่งออกเป็น 3 ชั้นความรู้ จำนวนทั้งหมด 16 โหนด โดยชั้น

ความรู้ที่ 1 นำเสนอโหนดความรู้หลัก ชั้นความรู้ที่ 2 นำเสนอโหนดความรู้ที่จำเป็นต่อการวางแผนและตัดสินใจด้านการท่องเที่ยว 4 กลุ่ม ได้แก่ 1) ประเพณี ภูมิปัญญาท้องถิ่น และการละเล่นของชาวม้ง 2) สถานที่ท่องเที่ยวที่อยู่บนเส้นทางผ่าน/ใกล้เคียง 3) ที่พัก และ 4) ประวัติ ถิ่นฐาน และภาษาของชาวม้ง และชั้นความรู้ที่ 3 นำเสนอโหนดความรู้ประเภทสถานที่ท่องเที่ยว และข้อมูลชนเผ่าม้ง

2.2 การพัฒนาโมดูลการให้บริการความรู้เชิงความหมาย โดยใช้ภาษา Python เวอร์ชัน 3 กับไลบรารี RDFLib และ PHP เวอร์ชัน 7 ในการคิวรีความรู้จากออนโทโลยีด้วยภาษา Sparql และแลกเปลี่ยนข้อมูลข้ามภาษาด้วย Json สามารถนำเสนอผลการพัฒนาระบบ จำแนกเป็น 3 ขั้นตอนย่อย ดังนี้

2.2.1 การแนะนำองค์ความรู้ด้านวัฒนธรรมและประเพณีชาวเขาเผ่าม้ง โดยใช้ภาษา Sparql คิวรีฐานความรู้ออนโทโลยี ดังตารางที่ 3 จากตารางที่ 3 ผู้วิจัยได้นำรายการข้อมูล/องค์ความรู้ที่เกี่ยวข้องชาวม้งด้านการท่องเที่ยวเห็นว่าควรนำเสนอบนเว็บแอปพลิเคชันเพื่อส่งเสริมการท่องเที่ยว มาสร้างคำสั่ง Sparql ในการคิวรีฐานความรู้ออนโทโลยีดังรูปที่ 1 และฝั่งภาษา Sparql ลงในฟังก์ชัน คิวรีออนโทโลยีด้วยภาษา python

ตารางที่ 3 ตัวอย่างคำสั่ง Sparql ในการคิวรีฐานความรู้ออนโทโลยีด้านวัฒนธรรมและประเพณีชาวเขาเผ่าม้ง

ประเด็นความรู้	ชุดคำสั่ง SPARQL
1.ข้อมูลประเพณี ภูมิปัญญาท้องถิ่น และการละเล่นของชาวม้ง	<pre>select ?t ?w ?p ?w1 where {?t rdf:type x:traditional. ?w rdfs:subClassOf x:wisdom. ?w1 rdf:type ?w. ?p rdf:type x:play}</pre>
2. สถานที่ท่องเที่ยวที่อยู่บนเส้นทางผ่าน/ใกล้เคียง โดยเรียงลำดับตามระยะทาง	<pre>select ?t ?d where { ?t x:locatedin x:rout12. ?t x:distance ?d} order by (?d)</pre>
3. ที่พักที่อยู่บนเส้นทางผ่าน/ใกล้เคียง โดยเรียงลำดับตามราคา/ระยะทาง	<pre>select ?a ?c ?p ?d where { ?a x:locatedin x:rout12. ?a rdf:type ?c. ?a x:accom_price ?p. ?a x:distance ?d FILTER(?c = x:accommodation) } order by (?p ?d)</pre>

2.2.2 การพัฒนาฟังก์ชัน การควิรีฐานความรู้บนเว็บเซิร์ฟเวอร์ด้วยภาษา Python และ Sparql เพื่อแบ่งปันข้อมูลมายังซอฟต์แวร์สำเร็จรูปเว็บไซต์ กับเอกซ์เทนชัน Insert PHP Code Snippet ผ่านการสื่อสารข้อมูลด้วย Json ดังรูปที่ 2

จากรูปที่ 2 วิธีการบูรณาการความสามารถของซอฟต์แวร์สำเร็จรูปเว็บไซต์และออนโทโลยีในการส่งเสริมวัฒนธรรมและประเพณีชาวเขาเผ่าม้งบ้านเข็กน้อย อำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์ จะแบ่งการประมวลผลออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ 1) ฟังก์ชัน ควิรีออนโทโลยีด้วยภาษา python ร่วมกับใช้คำสั่ง Sparql ดึงความรู้และเข้ารหัสด้วย Json 2) Code Snippet ในเว็บไซต์ด้วยภาษา PHP เพื่อติดต่อกับ Json ในการถอดรหัสความรู้ และ 3) การสร้างหน้าเว็บไซต์ และเรียกใช้ผลจาก PHP Code Snippet เพื่อนำเสนอองค์ความรู้เชิงความหมาย

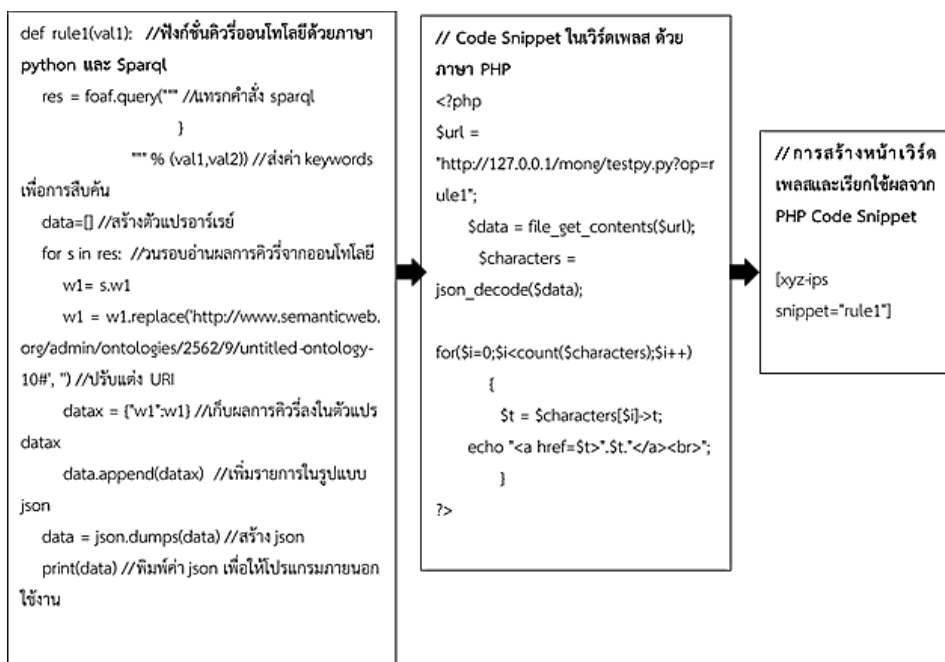
2.2.3 หน้าจอติดต่อผู้ใช้ของระบบจัดการฐานความรู้เชิงความหมาย เพื่อส่งเสริมวัฒนธรรมและประเพณีชาวเขาเผ่าม้ง บ้านเข็กน้อย อำเภอเขาค้อ

จังหวัดเพชรบูรณ์ โดยใช้เว็บไซต์และออนโทโลยี ดังรูปที่ 4

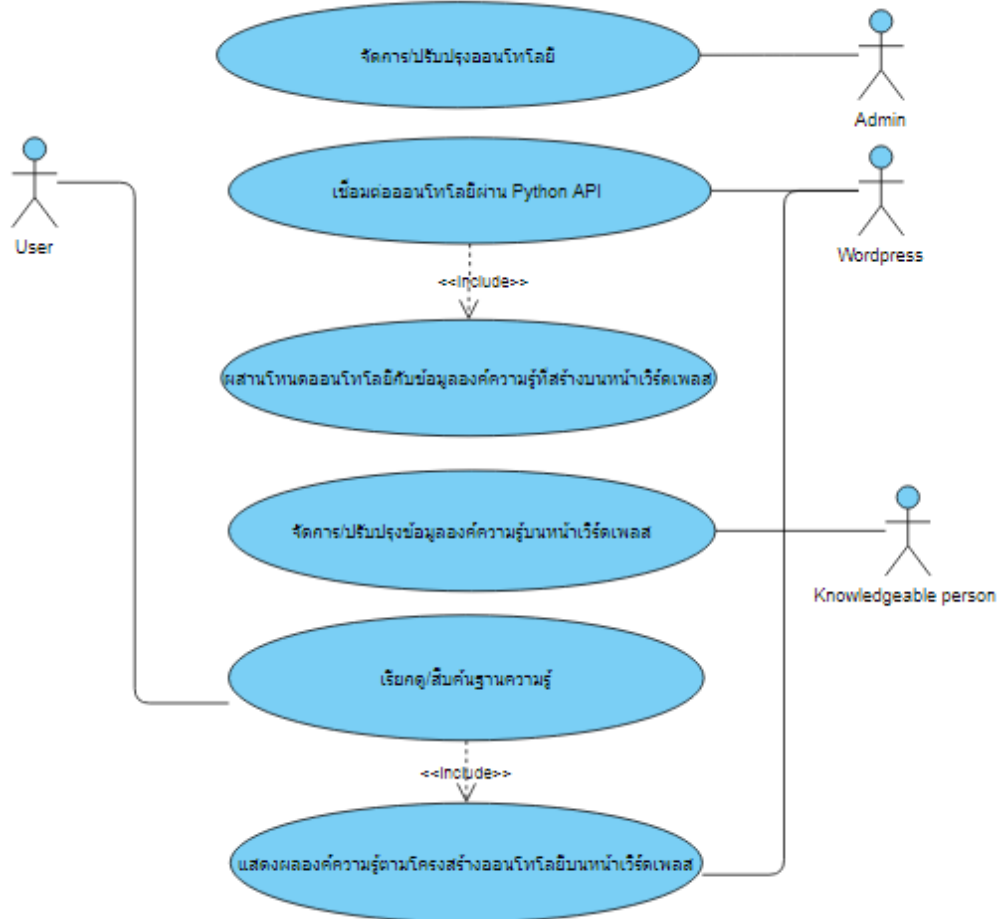
จากรูปที่ 4 ออนโทโลยีจะช่วยจัดหมวดหมู่องค์ความรู้มีปัญญาของชาวม้งให้เป็นระบบเพิ่มขึ้น เช่น มีด และค้อนโบราณ จัดอยู่ในหมวดหมู่เครื่องมือการดำเนินชีวิตของชาวม้ง

จากรูปที่ 5 การบูรณาการออนโทโลยีกับกฎเงื่อนไขในการควิรีข้อมูลเชิงความหมาย จะช่วยแนะนำเส้นทางระหว่างที่พิกกับสถานที่ท่องเที่ยวทางวัฒนธรรมและประเพณีของชาวม้งแต่ละแห่งได้ เพื่อช่วยประกอบการตัดสินใจเข้าพิกของนักท่องเที่ยว และเพื่อการวางแผนการเดินทางของนักท่องเที่ยวสถานที่ใกล้เคียงอื่น ๆ ในอำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์

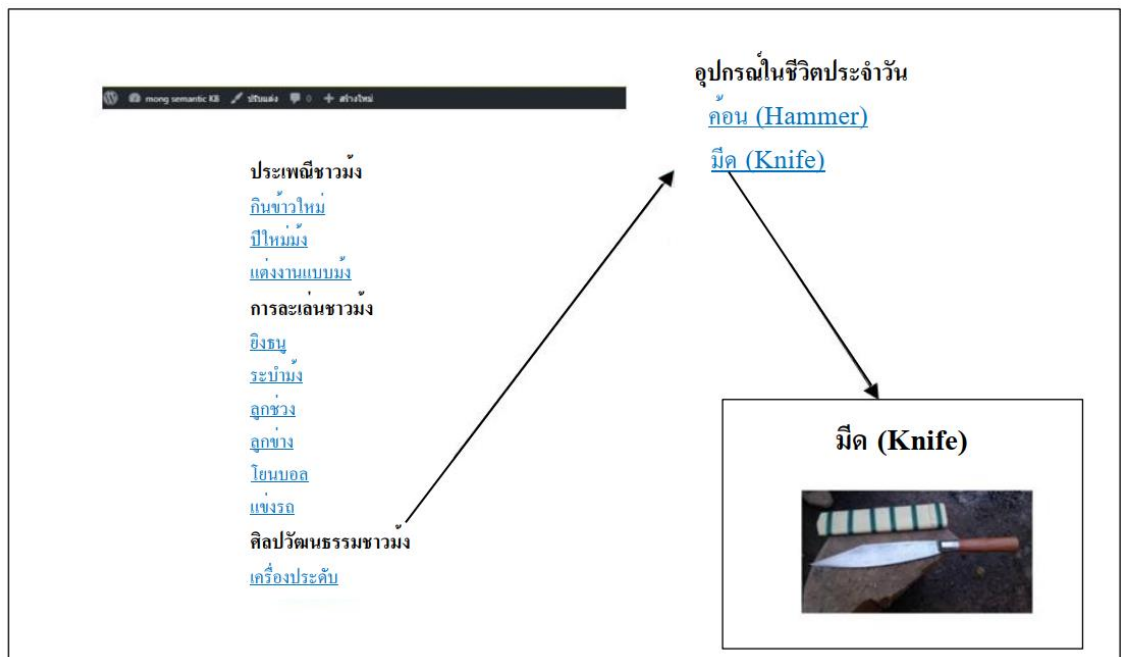
3. ผลการประเมินประสิทธิภาพการทำงานและความพึงพอใจผู้ใช้ต่อระบบจัดการฐานความรู้เชิงความหมาย เพื่อส่งเสริมวัฒนธรรมและประเพณีชาวเขาเผ่าม้ง บ้านเข็กน้อย อำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์โดยใช้เว็บไซต์และออนโทโลยี ดังตารางที่ 4



รูปที่ 2 การพัฒนาฟังก์ชันการควิรีฐานความรู้ออนโทโลยีบนเว็บเซิร์ฟเวอร์ และการทำงานร่วมกับ wordpress



รูปที่ 3 การประมวลผลในภาพรวมระบบสืบค้นฐานความรู้เชิงความหมายเพื่อส่งเสริมวัฒนธรรมและประเพณีชาวเขาเผ่าม้ง



รูปที่ 4 หน้าจอแนะนำเสนอองค์ความรู้ภูมิปัญญาของชาวม้ง จำแนกตามหมวดหมู่

ที่พัก และสถานที่ท่องเที่ยว

[บ้านเข็ญน้อย ถึง สายน้ำตก ธีร์สอร์ท เขาค้อ ระยะทาง 1 กิโลเมตร](#)

[บ้านเข็ญน้อย ถึง Mistory Cafe & Villa ระยะทาง 3 กิโลเมตร](#)

[บ้านเข็ญน้อย ถึง วัดพระธาตุผาซ่อนแก้ว ระยะทาง 15 กิโลเมตร](#)

[บ้านเข็ญน้อย ถึง จุดชมวิวเขาค้อ ระยะทาง 20 กิโลเมตร](#)

จุดชมวิวเขาค้อ

👤 mong 🕒 8 ตุลาคม 2019 💬 Leave a comment ✎ Edit



เขาค้อ เป็นชื่อเขตรวมบริเวณเทือกเขาค้อในอุทยานแห่งชาติเขาค้อ มีจุดท่องเที่ยวที่สวยงามหลายแห่ง ไม่ว่าจะเป็นที่พักร้านอาหารที่มีให้เลือกแบบครบครัน ทำให้เขาค้อ คือ จุดหมายปลายทางหลักในการท่องเที่ยวที่ใครหลายคนสามารถมาเที่ยวได้อย่างง่ายดาย มาเขาค้อต้องมาชมทะเลหมอก ซึ่งถือว่าเป็นจุดชมทะเลหมอกที่งดงามอีกแห่งหนึ่ง สามารถชมได้จากหน้าทิวทิศที่มีโอบล้อมในการชมทะเลหมอกซึ่งส่วนใหญ่มักจะมีผู้ไปกางเต็นท์นอนชม และจากนั้นก็จะมีจุดชมทะเลหมอกอีกหลายจุด มีร้านอาหารและที่พักอีกหลายร้าน มาเขาค้อเราต้องมาชมจุดหลัก และเที่ยวที่โน่นบ้างที่นี่บ้าง

รูปที่ 5 หน้าจอการแนะนำสถานที่ท่องเที่ยวและที่พักที่อยู่ใกล้หมู่บ้านชาวม้ง

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของระบบจัดการฐานความรู้เชิงความหมาย เพื่อส่งเสริมวัฒนธรรมและประเพณีชาวเขาเผ่าม้ง บ้านเข็ญน้อย อำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์ โดยใช้เวิร์ดเพลสและออนโทโลยีโดยผู้เชี่ยวชาญ

รายการทดสอบประสิทธิภาพ	ผลการสืบค้นและให้คำแนะนำ		
	จำนวนข้อมูลที่สืบค้นได้และถูกต้องตามความสนใจ (A)	จำนวนข้อมูลที่ต้องสนใจแต่ไม่ถูกต้องสืบค้น (B)	จำนวนข้อมูลที่สืบค้นได้แต่ไม่ถูกต้องตามความสนใจ (C)
1. ข้อมูลประเพณี ภูมิปัญญาท้องถิ่น และการละเล่นของชาวม้ง	1	0	0
2. สถานที่ท่องเที่ยวที่อยู่บนเส้นทางผ่าน/ใกล้เคียง โดยเรียงลำดับตามระยะทาง	2	0	1
3. ที่พักที่อยู่บนเส้นทางผ่าน/ใกล้เคียง โดยเรียงลำดับตามราคา/ระยะทาง	3	0	0
4. กิจกรรมในสถานที่ท่องเที่ยว และประมาณการค่าใช้จ่ายในการเดินทาง/เข้าชมกิจกรรม	2	1	0
5. ประวัติ และถิ่นฐานของชาวม้ง	1	1	0
Mean	2	0.33	0.17
Precision		92.3%	
Recall		85.7%	
F-measure		88.9%	

จากตารางที่ 4 สรุปได้ว่า ระบบจัดการฐานความรู้เชิงความหมาย เพื่อส่งเสริมวัฒนธรรมและประเพณีชาวเขาเผ่าม้ง บ้านเข็กน้อย อำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์ โดยใช้เวิร์ดเพรสและออนโทโลยีสามารถนำเสนอข้อมูลได้อย่างถูกต้องและครบถ้วนตามความสนใจของผู้ใช้ โดยมีค่า F-measure เท่ากับ 88.9%

ผลการประเมินความพึงพอใจผู้ใช้ต่อระบบจัดการฐานความรู้เชิงความหมาย เพื่อส่งเสริมวัฒนธรรมและประเพณีชาวเขาเผ่าม้ง บ้านเข็กน้อย อำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์ ดังนี้

ตารางที่ 5 ผลการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้งานระบบ

รายการประเมิน	ระดับความพึงพอใจ		แปลผล
	$\bar{x}$	S.D.	
1. ด้านเนื้อหา	4.69	0.68	มากที่สุด
1.1 ข้อมูลองค์ความรู้มีความสมบูรณ์ครบถ้วน	4.71	0.76	มากที่สุด
1.2 ลำดับการนำเสนอองค์ความรู้มีความเหมาะสม	4.59	0.65	มากที่สุด
1.3 เนื้อหาภาพรวมที่นำเสนอในระบบ	4.76	0.62	มากที่สุด
2. ด้านการออกแบบและจัดรูปแบบ	4.49	0.67	มาก
2.1 การจัดวางเมนูใช้งานง่าย	4.65	0.76	มากที่สุด
2.2 การจัดวางองค์ประกอบหน้าจอสวยงาม ได้สัดส่วน	4.45	0.66	มาก
2.3 การตอบสนองของระบบแนะนำ มีความรวดเร็วในการทำงานตามคำสั่งของผู้ใช้	4.54	0.78	มากที่สุด
2.4 รูปแบบตัวอักษรขนาดเหมาะสมและง่ายต่อการอ่าน	4.42	0.56	มาก
2.5 พื้นหลัง และภาพประกอบ มีความชัดเจน	4.38	0.58	มาก

รายการประเมิน	ระดับความพึงพอใจ		แปลผล
	$\bar{x}$	S.D.	
3. ด้านประโยชน์	4.66	0.59	มากที่สุด
3.1 สามารถใช้เป็นแหล่งข้อมูล สำหรับศึกษาหาความรู้ได้	4.68	0.54	มากที่สุด
3.2 เป็นช่องทางที่ดี สำหรับการให้ข้อมูลเกี่ยวกับศิลปวัฒนธรรมและประเพณี	4.56	0.43	มากที่สุด
3.3 ข้อมูลสามารถตอบสนองความต้องการต่อนักท่องเที่ยว	4.65	0.67	มากที่สุด
3.4 ระบบสามารถนำไปใช้งานได้จริง	4.75	0.87	มากที่สุด
เฉลี่ยรวม	4.61	0.65	มากที่สุด

สรุปผล

งานวิจัยนี้ได้บูรณาการแนวทางการสร้างฐานความรู้เชิงความหมายด้วยออนโทโลยี ร่วมกับซอฟต์แวร์สำเร็จรูปเวิร์ดเพรส และเอกซ์เทนชัน Insert PHP Code Snippet เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการองค์ความรู้ทางวัฒนธรรมของชาวม้ง บ้านเข็กน้อย อำเภอเขาค้อ จังหวัดเพชรบูรณ์ ซึ่งเป็นพื้นที่ ๆ มีบทบาทในการขับเคลื่อนการท่องเที่ยวของจังหวัดเพชรบูรณ์ และสามารถเชื่อมโยงสู่แหล่งท่องเที่ยวของภาคเหนือตอนล่างและภาคอีสาน ทั้งนี้การนำออนโทโลยีมาใช้ในการจัดการและเผยแพร่องค์ความรู้ ร่วมกับซอฟต์แวร์สำเร็จรูปที่มีให้บริการฟรี เช่น เวิร์ดเพรส หรือซอฟต์แวร์สำเร็จรูปอื่นๆ เช่น media wiki ซึ่งเป็นซอฟต์แวร์ที่ใช้สร้างสารานุกรมออนไลน์ จะทำให้ผู้พัฒนาเกิดความสะดวกสบายเพิ่มมากขึ้น เช่นเดียวกับปราโมทย์ สิทธิจักร และวิไลวรรณ แสนชนะ (6) ได้ทำการวิจัยเรื่อง การพัฒนาระบบจัดการองค์ความรู้ดนตรีพื้นบ้านม้งกะเลิงในพื้นที่ภาคเหนือตอนล่าง เพื่อการส่งเสริมและเผยแพร่ศิลปวัฒนธรรมไทย โดยใช้ออนโทโลยีและวิกิพีเดียเชิงความหมาย พบว่า ฐานความรู้แนะนำใน 5 ด้าน ได้แก่ ด้านประวัติความเป็นมา ด้าน

เอกลักษณ์เฉพาะตนในการละเล่น ด้านพิธีกรรมการไหว้ครู ด้านคติความเชื่อ และด้านรูปแบบการสร้างเครือข่ายระหว่างวงดนตรี และการประเมินความพึงพอใจของผู้ใช้ที่มีต่อระบบ จากผู้ใช้ จำนวน 100 คน มีความคิดเห็นว่าคุณสมบัติภาพการทำงานของระบบในภาพรวมอยู่ในระดับดี ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบเทคนิคและประสิทธิภาพของระบบที่ได้จากการทำวิจัยครั้งนี้ พบว่า มีการเพิ่มเติมประสิทธิภาพในการกระบวนการวิจัยและพัฒนา จากงานวิจัยที่ได้อ้างอิง ใน 2 ส่วน ได้แก่ 1) การสร้างชุด API เพื่อคิวรีฐานความรู้ออนโทโลยี และแบ่งปันให้เอกซ์เทชันของเวิร์ดเพลส เข้าถึงได้อย่างสะดวกกว่า และ 2) มีการประเมินประสิทธิภาพความถูกต้องของข้อมูลที่สืบค้นได้ด้วยการประเมินโดยผู้เชี่ยวชาญ และนำมาหาค่าเพื่อยืนยันความถูกต้อง ทำให้ได้ผลการประเมินที่มีความลุ่มลึกกว่า การประเมินความพึงพอใจผู้ใช้เพียงอย่างเดียว และการประยุกต์ใช้ออนโทโลยีจะช่วยให้เกิดประสิทธิภาพที่ดีในการสืบค้นข้อมูล เนื่องจากออนโทโลยีเป็นภาษาที่นำมาใช้บรรยายโครงสร้างและความสัมพันธ์ของระบบผ่านโหนดแบบลำดับขั้น และถูกนำมาใช้ในงานหลายด้านโดยเฉพาะด้านปัญญาประดิษฐ์ (7) ออนโทโลยีจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการสืบค้นข้อมูล โดยจะช่วยขยายคำค้นให้เข้าถึงข้อมูลได้อย่างรวดเร็วและได้ผลลัพธ์ตรงตามที่ต้องการมากที่สุด เนื่องจากออนโทโลยีจะช่วยจำแนกหมวดหมู่ สร้างความสัมพันธ์และเงื่อนไข และให้ความหมายในระดับเนื้อหาความรู้ ในรูปแบบกราฟ ซึ่งสามารถใช้ภาษา SPARQL ในการคิวรี เพื่อเข้าถึงความสัมพันธ์ของโหนดความรู้แต่ละโหนด และลงลึกไปในระดับขั้นความรู้ต่าง ๆ ที่อยู่ในขอบเขตความสนใจ ในคำสั่งเดียว และทำให้ได้ข้อมูลสารสนเทศที่ลุ่มลึกและชัดเจนมากยิ่งขึ้นเรื่อย ๆ ซึ่งหากเป็นการคิวรีด้วยภาษา SQL กับระบบฐานข้อมูลเชิงสัมพันธ์ จะได้ข้อมูลสารสนเทศที่มีความสัมพันธ์ระหว่างแฟ้มข้อมูลที่กำหนดไว้โดยตรง และไม่สามารถระบุความหมายให้กับบางรายการข้อมูลในแฟ้ม ที่มีความหมายและเงื่อนไขไม่เหมือนกับรายการข้อมูลอื่น ๆ ได้ ทั้งนี้ นพดล ชลอธรรม และคณะ

(8) ได้อธิบายว่าการใช้รูปแบบภาษาโอดับเบิลยูแอล (Web Ontology Language: OWL) ที่สนับสนุนออนโทโลยีสามารถนำมาเชื่อมโยงข้อมูล และการใช้ข้อมูลร่วมกันได้ดีกว่าระบบฐานข้อมูล และการประยุกต์ใช้ออนโทโลยีจะทำให้เกิดประสิทธิภาพในการการประมวลผลข้อมูลสารสนเทศ การท่องเที่ยวที่เป็นอัตโนมิติแทนที่จะใช้การประชาสัมพันธ์โดยมนุษย์เพียงอย่างเดียว สอดคล้องกับลาสเมดี้ และนุรูล (9) ใช้ออนโทโลยีในการรวบรวมข้อมูลสารสนเทศการท่องเที่ยวในบาหลี ประเทศอินโดนีเซีย เพื่อให้สามารถสื่อความหมายเพิ่มมากขึ้น และรองรับการแบ่งปันข้อมูลและนำกลับมาใช้ใหม่ โดยโปรเจกต์ในการสร้างออนโทโลยี และทำการทดสอบออนโทโลยีจากคำถามที่จำเป็นต่อการท่องเที่ยว โดยใช้ SPARQL คิวรีเพื่อให้ได้ผลลัพธ์ตามคำถามต่าง ๆ ซึ่งช่วยทำให้ข้อมูลสารสนเทศการท่องเที่ยวในบาหลีสื่อความหมายและมีประสิทธิภาพเพิ่มมากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง

1. องค์การบริหารส่วนตำบลเข็กน้อย. ข้อมูลพื้นฐานของหมู่บ้านจังหวัดเพชรบูรณ์. เพชรบูรณ์: องค์การบริหารส่วนตำบลเข็กน้อย; 2558.
2. ฐิณารักษ์ นิธิวิทย์. ระบบแนะนำแหล่งท่องเที่ยวทางธรรมชาติอำเภอเขาค้อด้วยหลักการออนโทโลยี. เพชรบูรณ์: มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์; 2563.
3. Seyidov J, Adomaitiene R. Factors Influencing Local Tourists' Decision-Making on Choosing a Destination: A Case of Azerbaijan. *ekONOMika* 2016;95(3):112-27.
4. งามนิจ อาจอินทร์. เทคโนโลยีเว็บแบบสื่อความหมาย. ขอนแก่น: โรงพิมพ์คลังน่านวิทยา; 2556.
5. Butdisuwan S. Basic issues in digital libraries: The 21st century knowledge centers.

Narayanduda, Hyderabad: Professional Books Pub; 2013.

6. ปราโมทย์ สิริจักร, วิโรวรรณ แสนชนะ. การพัฒนาระบบจัดการองค์ความรู้มั่งคละในพื้นที่ภาคเหนือตอนล่างเพื่อส่งเสริมศิลปวัฒนธรรมไทยโดยใช้ออนโทโลยีและวิกิพีเดียเชิงความหมาย. วารสารวิจัยราชภัฏเชียงใหม่. 2557;15(1):59-72.
7. Kerschberg L, Chowdhury M, Damiano A, Jeong H, Mitchell S, Si J, et al. Knowledge Sifter: Ontology-Driven Search over Heterogeneous Databases. USA: George Mason University, Fairfax, Virginia; 2004.
8. Chalortham N, Buranarach M, Supnithi T, Leesawat P. Ontology Development for Pharmaceutical Tablet Production Expert System. In: Proceedings of ECTI-CON 2008. Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology, 2008. (ECTI-CON 2008) 5th International Conference on 2008; 2008 May 14-17; Krabi, Thailand. IEEE; 2008. p. 213-6.
9. Lasmedi A, Nurul H. Ontology model for tourism information. In: Amin F, Yusril Y, Retno S, Hitoshi H, Jae-Suk C, Uyi S, et al, editor. AIP Conference Proceedings. 1st International Conference on Material Science and Engineering for Sustainable Rural Development; 2018 Nov 14–15; Central Java, Indonesia. 2019.



การควบคุมอุณหภูมิดินเพื่อการเพาะกล้าไม้เบญจมาศ

Temperature Control in Soil for the Growth of Chrysanthemum Sprout

มานพ แยมแพง^{1*} จักรวาล บุญหวาน¹ ศิริชัย เทพา¹ ธนาพล สุขชนะ¹ พิมพ์พรรณ ปรี่องาม¹ รัตนชัย ไพรินทร์² และ มนพร คุปตาสา³

Manop Yamfang^{1*}, Chakkawan Boonwan¹, Sirichai Thepa¹, Thanaphol Sukchana¹, Pimpan Pruengam¹, Rattanachai Pairintra² and Manaporn Guptasa³

¹สายวิชาเทคโนโลยีพลังงาน คณะพลังงานสิ่งแวดล้อมและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

²สายวิชาเทคโนโลยีชีวเคมี คณะทรัพยากรชีวภาพและเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

³สาขาวิชาวิศวกรรมระบบการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

¹Division of Energy Technology, School of Energy, Environment and Materials, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Tung khru, Bangkok 10140, THAILAND

²Division of Biochemical Technology, School of Bioresources and Technology, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Tung khru, Bangkok 10140, THAILAND

³Division of Manufacturing Systems Engineering, Faculty of Engineering, King Mongkut's University of Technology Thonburi, Tung khru, Bangkok 10140, THAILAND

*Corresponding author e-mail: manop.y@en.rmutt.ac.th

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article history:

Received: 17 April, 2020

Revised: 7 August, 2020

Accepted: 31 August, 2020

Available online: 22 December, 2020

DOI: 10.14456/rj-rmutt.2020.26

Keywords: solar water

heating system, solar

radiation panel, soil

temperature,

Chrysanthemum

This research was to study the soil temperature for chrysanthemum sprout cultivation. The size of the solar radiation panel to make hot water was 55×220 cm². The soil container was 1 m². It contained 10 cm tall for seedling soil. The temperature measurement of the first soil layer temperature was attached to the heating plate below. The second layer would be higher than the first 5 cm and the third layer was higher than the heating unit 10 cm. From the experiment, heating the soil was operated by controlling the water temperature in the tank constant 70, 60, 50, and 40°C. It was found that soil layer 1 had an average temperature of 56, 50.7, 48 and 41°C, respectively. Soil layer 2 had an average

temperature of 44, 41.2, 39 and 35.5°C, respectively, and soil layer 3 had an average temperature of 37, 37, 34 and 32.2°C, respectively. In the case of not controlling the water temperature from making hot water during the day, which solar energy was utilized to bring hot water to use at night by changing the water temperature of 60 and 40°C, it was found that the soil layer 1 had an average temperature of 42 and 35°C respectively. Soil layer 2 had an average temperature of 34 and 29°C respectively, and soil layer 3 had a constant average temperature of 28°C. Water temperature 40 - 70°C was used as a heat source transferring heat to the soil where chrysanthemum sprout was cultivated with an area of 1 m², depth 10 cm as required, even if the water temperature was not maintained at night; the water temperature naturally decreased.

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาอุณหภูมิดินเพาะกล้าไม้เบญจมาศ โดยแผงรับรังสีอาทิตย์เพื่อทำน้ำร้อนขนาด 55×220 cm² ภาชนะบรรจุดินมีขนาด 1 m² บรรจุดินเพาะกล้าไม้สูง 10 cm การวัดอุณหภูมิดินชั้นที่หนึ่งซึ่งติดกับแผ่นให้ความร้อนด้านล่าง ดินชั้นที่สองจะสูงกว่าดินชั้นที่หนึ่ง 5 cm และดินชั้นที่สามสูงกว่าชุดให้ความร้อน 10 cm จากการทดลองให้ความร้อนแก่ดินโดยควบคุมอุณหภูมิน้ำในถังคงที่ที่อุณหภูมิ 70 60 50 และ 40°C พบว่า ดินชั้นที่หนึ่งมีอุณหภูมิเฉลี่ย 56 50.7 48 และ 41°C ตามลำดับ ดินชั้นที่สองมีอุณหภูมิเฉลี่ย 44 41.2 39 และ 35.5°C ตามลำดับ และดินชั้นที่สามมีอุณหภูมิเฉลี่ย 37 37 34 และ 32.2°C ตามลำดับ กรณีที่ไม่ควบคุมอุณหภูมิน้ำซึ่งทำน้ำร้อนตอนกลางวันโดยใช้พลังงานรังสีอาทิตย์เพื่อนำน้ำร้อนไปใช้ตอนกลางคืน โดยเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำ 60 และ 40°C พบว่า ดินชั้นที่หนึ่งมีอุณหภูมิเฉลี่ย 42 และ 35°C ตามลำดับ ดินชั้นที่สองมีอุณหภูมิเฉลี่ย 34 และ 29°C ตามลำดับ และดินชั้นที่สามมีอุณหภูมิเฉลี่ยคงที่อยู่ที่ 28°C การใช้น้ำอุณหภูมิ 40-70°C เป็นแหล่งความร้อนเพื่อถ่ายเทความร้อนให้ดินเพาะกล้าไม้เบญจมาศที่มีพื้นที่ 1 m² ระดับความลึก

10 cm ได้ตามที่กล้าไม้เบญจมาศต้องการ ถึงแม้ว่าจะไม่รักษาอุณหภูมิน้ำให้คงที่ในเวลากลางคืนโดยปล่อยให้อุณหภูมิ น้ำลดลงตามธรรมชาติก็ตาม

คำสำคัญ: ระบบทำน้ำร้อนรังสีอาทิตย์ แผงรับรังสีอาทิตย์ อุณหภูมิดิน เบญจมาศ

บทนำ

เบญจมาศเป็นไม้ตัดดอกที่ได้รับความนิยมแพร่หลายทั่วโลกมีปริมาณการผลิตและมูลค่าการจำหน่ายสูง โดยเฉพาะประเทศเนเธอร์แลนด์ซึ่งเป็นทั้งผู้ผลิตและผู้ส่งออกรายใหญ่ของโลก รวมทั้งประเทศในแถบยุโรป อเมริกา ญี่ปุ่น ฯลฯ ประเทศผู้ผลิตเหล่านี้จะมีปัญหาเรื่องสภาพภูมิอากาศที่หนาวเย็น การปลูกไม้ดอกที่มีคุณภาพจำเป็นต้องปลูกในโรงเรือน ดังนั้นทำให้มีต้นทุนการผลิตสูง สภาพภูมิประเทศที่สามารถปลูกเบญจมาศได้ดี และเหมาะสม เช่น ภาคเหนือ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือจะสามารถผลิตเบญจมาศแข่งขันกับตลาดไม้ดอกของโลกได้ สำหรับแนวโน้มของความต้องการดอกเบญจมาศในประเทศไทยพบว่า ยังไม่เพียงพอต่อความต้องการภายในประเทศ จึงต้องมีการนำเข้าจากต่างประเทศโดย

ส่วนใหญ่จะนำเข้าจากประเทศมาเลเซีย ซึ่งราคาในการนำเข้ามีราคาแพงขึ้นจึงได้มีการส่งเสริมเพื่อขยายการเพาะปลูกในประเทศ โดยภูมิประเทศที่เหมาะสมที่จะส่งเสริมให้มีการเพาะปลูกเพื่อการพาณิชย์ได้แก่ จังหวัด เชียงใหม่และเชียงราย เบญจมาศเป็นพืชวันสั้น โดยดอกจะพัฒนาหากช่วงเวลากลางวันสั้นกว่า 13.5 ชั่วโมง โดยสภาพอากาศที่เหมาะสม คืออุณหภูมิอากาศในช่วงเวลากลางคืนอยู่ระหว่าง $17 - 20^{\circ}\text{C}$ พื้นที่เพาะปลูกที่เหมาะสมในเชิงธุรกิจ สำหรับประเทศไทยคือที่จังหวัด เชียงใหม่ และจังหวัดเชียงราย ซึ่งปัจจุบันมีพื้นที่เพาะปลูกทั่วประเทศประมาณ 1,500 ไร่ คิดเป็นมูลค่าประมาณ 460 ล้านบาทต่อปี (1)

การขยายพันธุ์เบญจมาศนั้น อุณหภูมิดินมีความสำคัญเป็นอย่างยิ่งเพราะถ้าไม่เบญจมาศต้องการอุณหภูมิดินที่ประมาณ 20°C เพื่อการออกรากพันกิ่งชำ นอกจากนี้อุณหภูมิดินยังมีความสำคัญต่อการเจริญเติบโตของพืช อีกหลายชนิดซึ่งอุณหภูมิที่เหมาะสมของพืชจะอยู่ระหว่าง 15°C ถึง 35°C ถ้าอุณหภูมิมากกว่า 35°C จะทำให้อัตราการหายใจของรากพืชหายใจเร็วขึ้น (2) ถ้าอุณหภูมิต่ำกว่า 4°C จะทำให้อัตราการเจริญเติบโตของรากพืชช้าลง (3) มีการศึกษาอิทธิพลของความหนาแน่นและความชื้นว่ามีผลต่อความจุความร้อน และค่าการนำความร้อน พบว่าเมื่อความหนาแน่น และความชื้นเพิ่มขึ้นเป็นผลให้ค่าความจุความร้อนและค่าการนำความร้อนของดินมากขึ้น (4) ความเป็นไปได้ในการใช้ดินเป็นตัวดูดซับความร้อนที่ ระบายทิ้งจากคอนเดนเซอร์ของเครื่องปรับอากาศได้ใช้แบบจำลองทางคณิตศาสตร์ ทำนายค่าอุณหภูมิดินโดยสมมุติให้ดินมีคุณสมบัติทางกายภาพคงที่ ซึ่งพบว่า ที่ระดับความลึก 1 เมตร เป็นต้นไปอุณหภูมิของดินค่อนข้างคงที่ในรอบวัน โดยอยู่ที่ 27°C จึงต่ำกว่าอากาศประมาณ $2 - 3^{\circ}\text{C}$ จึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้ดินเป็นสารตัวกลางแทนอากาศ ในการระบายความร้อนให้กับคอนเดนเซอร์ พบว่า ในการใช้ดินแทนพัดลมในคอนเดนเซอร์ มีค่าสัมประสิทธิ์สมรรถนะ (COP) เพิ่มขึ้นจากเดิม 2.8 เป็น 3.1 ในเวลากลางวัน และ

เพิ่มขึ้นจาก 7.1 เป็น 8.1 ในเวลากลางคืน (5) การใช้ความแตกต่างของอุณหภูมิดิน เพื่อประมาณการระเหยของน้ำรายวันด้วยวิธีการใช้อุณหภูมิผิวแทนค่า Sensible Heat Flux และใช้สัมประสิทธิ์ Empirical คำนวณหา Flux ของพลังงานตลอดวันเป็นรายชั่วโมงจากอุณหภูมิเฉลี่ยและความร้อนที่ดินได้รับนำมาหาค่าสัมประสิทธิ์การระเหยตัวของดิน ในการทดลองใช้ดินผสมทราย 96% ความพรุน 0.4 ความหนาแน่นรวม $1,430 \text{ kg/m}^3$ บรรจุในท่อพลาสติกขนาด 30 cm พื้นที่หน้าตัด 706 m^2 ลึก 110 cm ผึ่งอยู่ในดินด้านบนเปิดออกสู่บรรยากาศติดตั้งห่างกัน 5 m ผลที่ได้จะได้อัตราการระเหยในเทอมของรังสีอาทิตย์ และผลต่างอุณหภูมิจากการเปรียบเทียบค่าที่ได้จาก สัมประสิทธิ์การถ่ายเทการระเหยน้ำของดินที่ได้มีค่า 0 ที่ดินเปียกและเท่ากับ 1 ที่ดินแห้ง สำหรับค่าที่วัดได้จาก Lysimeter เป็น 0.2 ในดินเปียก และ 0.8 ในดินแห้ง ซึ่งค่าที่ได้ก็ให้ค่าที่แม่นยำเพียงพอต่อการนำไปใช้ (6) การสร้างแบบจำลองใน 2 มิติ เพื่อทำนายอุณหภูมิและความชื้นในดินที่ถูกให้ความร้อนด้วยอากาศร้อนที่ปล่อยออกมาจากท่อ โดยใช้หลักการของการแพร่ ความชื้นและความร้อนมาใช้สร้างแบบจำลองในแบบสองมิติ พบว่าที่ผิวดินจะแม่นยำมากที่สุด โดยมีความแม่นยำถึง 97% ส่วนการถ่ายเทมวล 92% (7)

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จะศึกษาถึงการควบคุมอุณหภูมิดินให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของกล้าไม้เบญจมาศ โดยใช้พลังงานรังสีอาทิตย์ทำน้ำร้อนเพื่อนำไปทดสอบการให้ความร้อนดินเพาะกล้าไม้เบญจมาศซึ่งส่วนใหญ่จะปลูกในภาคเหนือของประเทศไทยซึ่งมีอุณหภูมิต่ำทำให้กล้าไม้เบญจมาศไม่เจริญเติบโต ดังนั้นจึงสร้างระบบทำน้ำร้อนไปให้ความร้อนแก่ดินเพาะกล้าไม้เบญจมาศจากด้านล่างขึ้นไปด้านบน

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ เป็นการศึกษาการควบคุมอุณหภูมิดินให้เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของกล้าไม้เบญจมาศ

โดยใช้พลังงานรังสีอาทิตย์ ซึ่งมีวิธีการวิจัยดังรายละเอียดต่อไปนี้

การวิเคราะห์สมบัติของดิน

ดินที่ใช้ในการทดลองเป็นดินผสมเพื่อการปลูกไม้ดอก เป็นดินที่บรรจุลงชามขนาดสูงละ 10 kg ในชื่อทางการค้า “ดินลำตวน” ดินตัวอย่างจะถูกบรรจุลงในภาชนะที่มีมิติและถูกส่งไปวิเคราะห์ที่ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ซึ่งผลการวิเคราะห์ดินตัวอย่างมีสมบัติดังนี้

ตารางที่ 1 สมบัติทางฟิสิกส์ของดิน

ส่วนผสม	ดินที่ใช้ทดลอง	ดินทั่วไป*
Bulk density (kg/m ³)	618	1,187
Water Content (%)	63.5	4
Porosity (%)	76.67	55.2
Thermal Conductivity (W/m°C)	0.662	0.817
Heat Capacity (MJ/m ³ °C)	2.02	1.579
Thermal diffusivity (m ² /s)	3.297×10^{-7}	5.174×10^{-7}

*ดินทั่วไป เป็นดินที่เก็บตัวอย่างดินจากบริเวณคณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

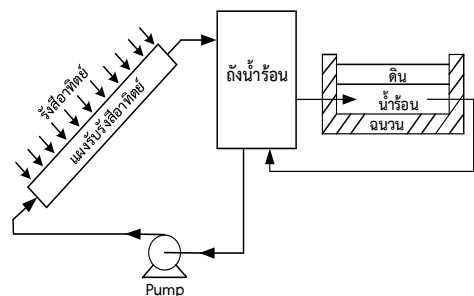
ตารางที่ 2 เปรียบเทียบองค์ประกอบของดิน

ส่วนผสม	ดินที่ใช้ทดลอง	ดินทั่วไป*
Sand (% by vol.)	40	24
Silt (% by vol.)	26	19
Clay (% by vol.)	34	57
Water Content (% by mass)	63.5	4
Organic Matter (% by mass)	17.3	-

*ดินทั่วไป เป็นดินที่เก็บตัวอย่างดินจากบริเวณคณะพลังงานและวัสดุ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

การทดลองการให้ความร้อนดินด้วยแผ่นความร้อน

ในการทดลองให้ความร้อนแก่ดินโดยจ่ายน้ำเข้าสู่แผงรับรังสีอาทิตย์ด้วยอัตราการไหลคงที่ เข้าสู่แผงรับรังสีอาทิตย์ที่ 750 cm³/min วัตุดิบหมุมน้ำเข้า อนุภาคน้ำออกจากแผงรับรังสีอาทิตย์ วัตุดิบหมุมน้ำในถังสะสมความร้อน และวัดค่ารังสีที่ตกกระทบบนแผงรับรังสีอาทิตย์ โดยแผงรับรังสีอาทิตย์ที่ใช้ในการทดลองมีขนาด 55 x 220 cm² วางหันหน้าไปทางทิศใต้ทำมุม 14° กับแนวระดับเพื่อทำน้ำร้อนไปให้ความร้อนแก่ดินเพาะกล้าไม้จากด้านล่างขึ้นไปด้านบนในชุดให้ความร้อนดิน ดังรูปที่ 1



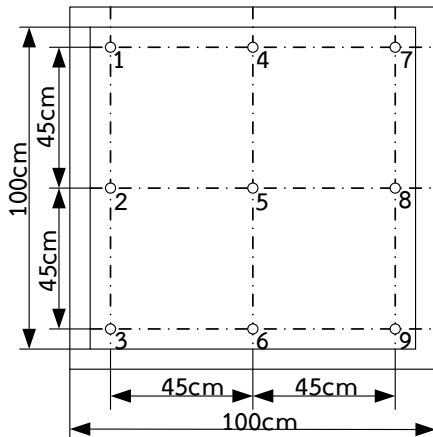
รูปที่ 1 ระบบให้ความร้อนดิน

การศึกษาการกระจายอุณหภูมิในดินเมื่อได้รับความร้อนจากแผ่นความร้อน

การทดลองจะบรรจุดินลงในชุดให้ความร้อนดิน ซึ่งมีขนาดพื้นที่ 1 m² ดินมีความสูง 10 cm ซึ่งในการเลือกระดับความลึกที่ 10 cm เพราะการให้ความร้อนชั้นที่ติดกับแผ่นความร้อนจะมีอุณหภูมิสูงอาจเป็นอันตรายต่อกล้าไม้ได้โดยดินจะรับความร้อนจากด้านล่างขึ้นด้านบนดังรูปที่ 1 การติดตั้งจุดวัดอุณหภูมิดินจะติดตั้งจุดวัดอุณหภูมิโดยแบ่งดินออกเป็น 3 ชั้น คือชั้นที่ 1 เป็นชั้นที่สัมผัสกับแผ่นความร้อน ชั้นที่ 2 คือชั้นดินที่มีความหนา 5 cm ชั้นที่ 3 คือที่ผิวดินและในแต่ละชั้นจะทำการวัดอุณหภูมิ 9 จุด ขณะที่ทำการบรรจุดินลงในชุดให้ความร้อนทำการชั่งน้ำหนักดินเพื่อนำไปคำนวณหาค่าความหนาแน่นรวมของดิน จุดที่วัดอุณหภูมิแสดงในรูปที่ 2



(ก) ด้านหน้า



(ข) ด้านบน

รูปที่ 2 ตำแหน่งการวัดอุณหภูมิในแต่ละชั้น

เมื่อทำการติดตั้งจุดวัดอุณหภูมิเรียบร้อยแล้ว จะทำการศึกษาการกระจายอุณหภูมิในแต่ละจุด โดยเริ่มจากอุณหภูมิของแผ่นร้อน ซึ่งในขั้นตอนนี้จะแยกการทดลองออกเป็น 2 ส่วน คือ

การให้ความร้อนแก่ดินด้วยน้ำร้อนที่รักษาอุณหภูมิในถึง
 สภาวะความร้อนคงที่

ในการทดลองโดยการจ่ายน้ำเข้าสู่ชุดให้ความร้อนดินที่อัตราการไหล 1 litre/min ซึ่งอาจจ่ายน้ำร้อนที่อัตราการไหลต่ำกว่านี้ได้เพราะดินมีการแพร่ความร้อนที่ต่ำ คือ มีค่าประมาณ $3.297 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{s}$ เท่านั้น ดังนั้น การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิที่เข้าและออกจากชุดให้ความร้อนจะไม่เปลี่ยนแปลงมากนัก และการจ่ายน้ำที่อัตราการไหลต่ำๆ จะทำให้อุณหภูมิในถึงสภาวะความร้อนมีการเปลี่ยนแปลงน้อยซึ่งจะเป็นผลดีต่อระบบ โดยใช้น้ำร้อนที่อุณหภูมิ 70 60 50 และ 40°C ตามลำดับ จ่ายเข้าสู่ชุดให้ความร้อนโดยจะรักษาอุณหภูมิในถึงสภาวะความร้อนคงที่

การให้ความร้อนแก่ดินด้วยน้ำร้อนที่รักษาอุณหภูมิในถึง
 สภาวะความร้อนคงที่

การทดลองโดยจ่ายน้ำที่อุณหภูมิเริ่มต้นที่ 40 และ 60°C โดยจะปล่อยให้ในถึงสภาวะความร้อนลดลงตามธรรมชาติของสิ่งแวดล้อม ซึ่งจะศึกษาถึงอัตราการเพิ่มขึ้นและลดลงของอุณหภูมิในเวลากลางคืน

เครื่องมือวัดที่ใช้ในการทดลอง

1. เครื่องมือวัดอุณหภูมิโดยใช้ Data Logger ยี่ห้อ Graphtec รุ่น GL840 เมื่อนำไปใช้กับสาย Thermocouple Type K มีความคลาดเคลื่อน $\pm 0.8^\circ\text{C}$
2. สาย Thermocouple Type K
3. เครื่องมือวัดค่ารังสีอาทิตย์ Pyranometer ยี่ห้อ EKO รุ่น ML-01 มีความคลาดเคลื่อน $< 3\%$

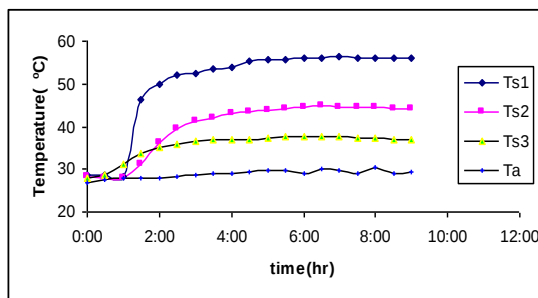
ผลการศึกษาและอภิปรายผล

1. การให้ความร้อนแก่ดินด้วยน้ำร้อนที่รักษาอุณหภูมิในถึง
 สภาวะความร้อนคงที่

1.1 การให้ความร้อนแก่ดินด้วยน้ำร้อนที่รักษาอุณหภูมิ 70°C ในถึงสภาวะความร้อนคงที่

จากรูปที่ 3 เมื่ออุณหภูมิในถึงสภาวะความร้อนอุณหภูมิ 70°C และจ่ายเข้าสู่ชุดให้ความร้อนดินที่อุณหภูมิเฉลี่ย 63.39°C และออกที่ 60.71°C ซึ่งมีความแตกต่าง 2.67°C คิดเป็นปริมาณความร้อนที่จ่ายให้กับชุดให้ความร้อนในอัตรา 186.19 W/m² เป็นผลให้อุณหภูมิที่แผ่นให้ความร้อนมีอุณหภูมิเฉลี่ยที่ 59°C และดินชั้นที่ 1 มีอุณหภูมิเฉลี่ย 56°C ชั้นที่ 2 44°C ชั้นที่ 3 37°C โดยในชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 มีอุณหภูมิแตกต่างกัน 12°C และชั้นที่ 2 และ 3 ต่างกัน 7°C ซึ่งความแตกต่างอุณหภูมิของดินชั้นที่ 1 และ 2 มีความแตกต่างมากกว่าดินชั้นที่ 2 และ 3 เนื่องจากดินชั้นที่ 1 อยู่ติดกับชุดให้ความร้อนทำให้ได้รับอุณหภูมิจากชุดให้ความร้อนได้มากจึงสามารถถ่ายเทความร้อนไปยังดินชั้นที่ 2 ได้สูง และการถ่ายเทความร้อนของดินชั้นที่ 2 ไปยังดินชั้นที่ 3 มีปริมาณลดลง

เนื่องจากอุณหภูมิดินชั้นที่ 2 ไม่สูงจึงเป็นผลให้การถ่ายเทความร้อนไปยังดินชั้นที่ 3 ลดลง อีกทั้งดินมีคุณสมบัติเป็นฉนวนความร้อนและมีรูพรุนสูงจึงส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนลดลง ความร้อนที่ชั้นที่ 2 ได้รับ 87.53 W ชั้นที่ 3 ได้รับ 72.94 W เมื่อพิจารณาในสัดส่วนของความร้อนสุทธิจะพบว่าอัตราใกล้เคียงกัน คือ 54.54% ในชั้นที่ 2 และ 45.54% ในชั้นที่ 3 ด้วยความร้อนสุทธิ 160.47 W ความร้อนที่ดินได้รับในอัตราที่สูงเมื่อเทียบกับความร้อนที่น้ำจ่ายให้ ทำให้ประสิทธิภาพของชุดให้ความร้อนดินมีประสิทธิภาพสูงขึ้นเป็น 86.18%



รูปที่ 3 การกระจายอุณหภูมิในดินที่อุณหภูมิน้ำ 70°C

เมื่อ Ts1 คือ อุณหภูมิดินชั้นที่ 1

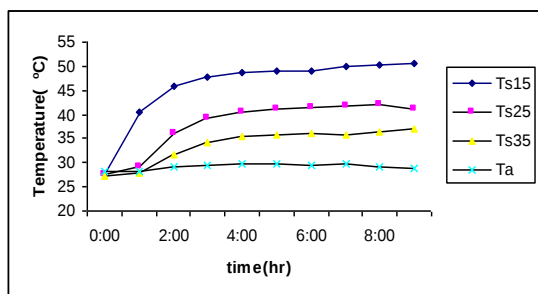
Ts2 คือ อุณหภูมิดินชั้นที่ 2

Ts3 คือ อุณหภูมิดินชั้นที่ 3

Ta คือ อุณหภูมิอากาศแวดล้อม

1.2 การให้ความร้อนแก่ดินด้วยน้ำร้อนที่รักษา

อุณหภูมิ 60°C ในถึงสะสมความร้อนคงที่

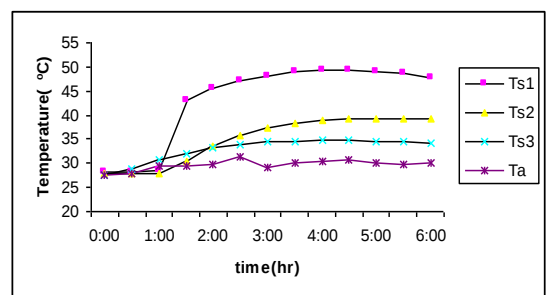


รูปที่ 4 การกระจายอุณหภูมิในดินแต่ละชั้นที่อุณหภูมิน้ำ 60°C

จากรูปที่ 4 เมื่ออุณหภูมิให้คงที่ 60°C จ่ายเข้าสู่ชุดให้ความร้อนดินในอัตรา 1 litre/min จากการทดลอง

พบว่า อุณหภูมิน้ำร้อนที่จ่ายเข้าสู่ชุดให้ความร้อนดินมีอุณหภูมิทางเข้าเฉลี่ย 56.4°C อุณหภูมิเฉลี่ยน้ำออกจากแผงที่ 53.5°C มีอัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิเฉลี่ย 2.9°C คิดเป็นความร้อนที่น้ำจ่ายเข้าสู่ชุดดิน 202.23 W/m² ทำให้อุณหภูมิของดินในชั้นที่ 1 มีอุณหภูมิเพิ่มขึ้นจาก 27.7°C เป็น 50.7°C และอุณหภูมิในชั้นที่ 2 เพิ่มขึ้นจาก 27.5°C เป็น 41.2°C สำหรับอุณหภูมิในชั้นที่ 3 ซึ่งเป็นผิวดินเพิ่มขึ้นจาก 27.3°C เป็น 37°C คิดเป็นปริมาณความร้อนที่ดินได้รับสุทธิเป็น 135.76 W โดยในชั้นที่ 2 ได้รับ 91.88 W คิดเป็น 70.26% ของปริมาณความร้อนที่ดินได้รับและในชั้นที่ 3 ที่ผิวดินได้รับความร้อนในปริมาณ 38.88 W คิดเป็น 29.73% สำหรับความแตกต่างของอุณหภูมิระหว่างดินชั้นที่ 1 และชั้นที่ 2 อยู่ที่ 9.5°C ขณะที่ชั้นที่ 2 และชั้นที่ 3 จะอยู่ที่ 4.2°C ความแตกต่างของอุณหภูมิดินชั้นที่ 1 และ 2 จะสูงกว่าดินชั้นที่ 2 และ 3 เป็นผลมาจากปริมาณความร้อนที่ดินได้รับสูงกว่าและจะลดลงตามระยะห่างจากแหล่งให้ความร้อน ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณความร้อนที่ดินแต่ละชั้นได้รับ ด้วยอุปกรณ์ชุดให้ความร้อนมีประสิทธิภาพ 64.65%

1.3 การให้ความร้อนแก่ดินด้วยน้ำร้อนที่รักษาอุณหภูมิ 50°C ในถึงสะสมความร้อนคงที่

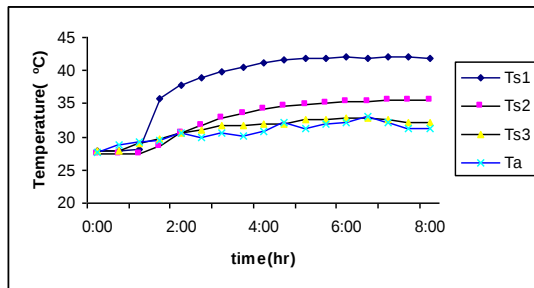


รูปที่ 5 การกระจายอุณหภูมิในดินแต่ละชั้นที่อุณหภูมิน้ำ 50°C

จากรูปที่ 5 เป็นการกระจายอุณหภูมิในดินที่อุณหภูมิน้ำ 50°C อุณหภูมิน้ำเข้าสู่ชุดให้ความร้อนดินที่ 54°C และออกที่ 52°C คิดเป็นความร้อน 139.56 W/m² แผ่นร้อนมีอุณหภูมิ 50°C ดินชั้นที่ 1 มีอุณหภูมิ 48°C อุณหภูมิดินชั้นที่ 2 เป็น 39°C ต่างกัน 9°C อุณหภูมิชั้นที่

3 เป็น 34°C ต่างจากชั้นที่ 2 อยู่ 5°C ความร้อนที่ดินชั้นที่ 2 ได้รับ 93.5 W/m² ชั้นที่ 3 ได้รับ 28.05 W/m² ที่ประสิทธิภาพระบบ 87.09%

1.4 การให้ความร้อนแก่ดินด้วยน้ำร้อนที่รักษาอุณหภูมิ 40°C ในถังสะสมความร้อนคงที่



รูปที่ 6 การกระจายอุณหภูมิในดินแต่ละชั้นที่อุณหภูมิน้ำ 40°C

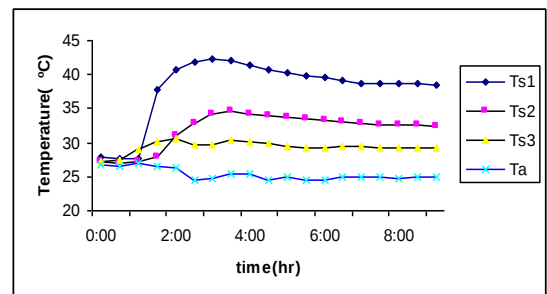
จากรูปที่ 6 เป็นการกระจายอุณหภูมิในชั้นต่าง ๆ เมื่อเวลาเปลี่ยนไปที่อุณหภูมิน้ำ 40°C แต่ความเป็นจริงแล้วอุณหภูมิในถังสะสมความร้อนไม่สามารถควบคุมให้อยู่ที่ 40°C ได้ ทำได้ต่ำสุดที่ 45°C แล้วจ่ายเข้าสู่แผงที่ 44°C ออกที่ 42°C อัตราการให้ความร้อน 139.56 W/m² อุณหภูมิแผ่นร้อน 41°C ซึ่งเท่ากับอุณหภูมิดินในชั้นที่ 1 ส่วนชั้นที่ 2 มีอุณหภูมิ 35.5°C ต่างกัน 5.5°C ชั้นที่ 3 อุณหภูมิ 32.2°C ต่างจากชั้นที่ 2 33°C ด้วยอุณหภูมิของแผ่นร้อนที่ต่ำทำให้การแพร่ความร้อนต่ำจึงทำให้ในแต่ละชั้นมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ต่ำและเวลาที่เข้าสู่สภาวะคงตัวจะน้อย คือจะอยู่ที่ชั่วโมงที่ 4 ความร้อนที่ดินได้รับ 72.09 W โดย ในชั้นที่ 2 ได้รับ 42.64 W และชั้นที่ 3 ได้รับ 29.45 W ประสิทธิภาพของระบบ 51.65%

2. การให้ความร้อนแก่ดินด้วยน้ำร้อนที่ไม่รักษาอุณหภูมิ น้ำให้คงที่

2.1 การกระจายอุณหภูมิในดินที่อุณหภูมิน้ำ 60°C ในเวลากลางคืน

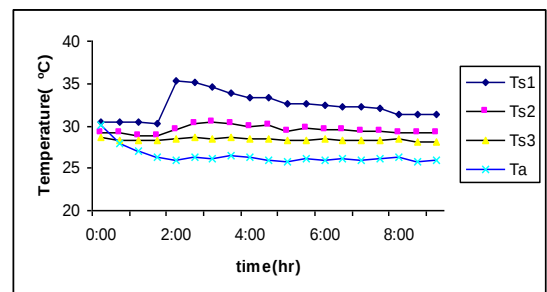
จากรูปที่ 7 เป็นการกระจายอุณหภูมิในดินที่ถูกให้ความร้อนด้วยน้ำอุณหภูมิ 60°C โดยน้ำในถังสะสมความร้อนไม่ได้รับรักษาอุณหภูมิไว้ ทำให้น้ำในถังสะสม

ความร้อนมีอุณหภูมิลดต่ำลงเรื่อย ๆ เป็นผลทำให้อุณหภูมิ น้ำที่เข้าลดลงเช่นเดียวกัน พบว่าที่อุณหภูมิดินในชั้นที่ 1 เพิ่มขึ้นจาก 28°C เป็น 42°C ซึ่งเป็นค่าสูงสุดในชั่วโมงที่ 3 จากนั้นจะลดลงอย่างช้า ๆ จนเป็น 38°C ในชั่วโมงที่ 9 ส่วนในชั้นที่ 2 เพิ่มขึ้นจาก 27°C เป็น 34°C ที่ชั่วโมงที่ 3 เช่นเดียวกัน จากนั้นจะลดลงอย่างต่อเนื่องจนมีอุณหภูมิ 32°C ที่ชั่วโมงที่ 9 คือเพิ่มขึ้น 7°C ในเวลา 3 ชั่วโมง และลดลง 2°C ในเวลา 6 ชั่วโมงในชั้นที่ 3 เพิ่มขึ้น 3°C ใช้เวลา 3 ชั่วโมง อีก 6 ชั่วโมงลดลง 1°C ผลอุณหภูมิดินที่เพิ่มขึ้นของดินแต่ละชั้นจะลดลงเมื่อระยะห่างจากแหล่งให้ความร้อนและระยะเวลาเพิ่มขึ้น เนื่องจากการสูญเสียความร้อนไปยังอากาศสิ่งแวดล้อมเนื่องจากตอนกลางคืนอากาศแวดล้อมมีอุณหภูมิต่ำและไม่ได้รักษาอุณหภูมิในถังจึงส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนลดลง



รูปที่ 7 การกระจายอุณหภูมิในดินที่อุณหภูมิน้ำ 60°C เวลากลางคืน

2.2 การกระจายอุณหภูมิในดินที่อุณหภูมิน้ำ 40°C ในเวลากลางคืน



รูปที่ 8 การกระจายอุณหภูมิในดินที่อุณหภูมิน้ำ 40°C เวลากลางคืน

จากรูปที่ 8 เป็นการกระจายของอุณหภูมิดินในแต่ละชั้นที่อุณหภูมิ 40°C ในเวลากลางคืนที่ถึงสะสมความร้อนไม่ได้รับการรักษาอุณหภูมิจะพบว่าที่อุณหภูมิดินในชั้นที่ 1 เพิ่มขึ้น 5°C ในเวลา 2 ชั่วโมง คือเพิ่มจาก 30°C เป็น 35°C จากนั้นจะลดลงจนมีอุณหภูมิ 31°C ในชั่วโมงที่ 9 คิดเป็นอัตราที่ลดลง 0.4°C ต่อชั่วโมง ด้วยอุณหภูมิชั้นดินที่ต่ำจึงทำให้การแพร่ความร้อนไปสู่ชั้นที่ 2 เป็นไปได้น้อย คือเพิ่มขึ้นเพียง 1°C ในเวลา 2 ชั่วโมง เท่านั้น และลดลง 1°C เป็น 29°C ใน 2 ชั่วโมงเช่นเดียวกัน ส่วนชั้นที่ 3 ไม่ได้รับการแบ่งความร้อนจากชั้นที่ 2 คงอยู่ที่ 28°C ตลอดช่วงเวลาที่ทำการทดลอง การเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิดินในแต่ละชั้นไม่สูงเนื่องจากอุณหภูมิน้ำซึ่งเป็นแหล่งให้ความร้อนมีอุณหภูมิไม่สูงและไม่ได้รับการรักษาอุณหภูมิแหล่งให้ความร้อนให้คงที่จึงส่งผลให้การถ่ายเทความร้อนของดินแต่ละชั้นมีอุณหภูมิไม่สูง ซึ่งผลการทดลองอุณหภูมิดินเพาะกล้าไม้ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับแบบจำลองทางคณิตศาสตร์ (8)

สรุปผล

การให้ความร้อนแก่ดินด้วยน้ำร้อนที่รักษาอุณหภูมิในถังสะสมความร้อนคงที่ โดยเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำ 70 60 50 และ 40°C พบว่า ดินชั้นที่ 1 มีอุณหภูมิเฉลี่ย 56 50.7 48 และ 41°C ตามลำดับ ดินชั้นที่ 2 มีอุณหภูมิเฉลี่ย 44 41.2 39 และ 35.5°C ตามลำดับ และดินชั้นที่ 3 มีอุณหภูมิเฉลี่ย 37 37 34 และ 32.2°C ตามลำดับ ซึ่งการรักษาอุณหภูมิน้ำในถังสะสมความร้อนให้คงที่ที่อุณหภูมิดังกล่าวสามารถนำไปใช้รักษาอุณหภูมิดินเพาะกล้าไม้เบญจมาศได้สูงกว่า 20 °C ตามที่กล้าไม้เบญจมาศต้องการ ส่วนการให้ความร้อนแก่ดินด้วยน้ำร้อนที่ไม่รักษาอุณหภูมิน้ำให้คงที่ โดยเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิน้ำ 60 และ 40°C พบว่า ดินชั้นที่ 1 มีอุณหภูมิเฉลี่ย 42 และ 35°C ตามลำดับ ดินชั้นที่ 2 มีอุณหภูมิเฉลี่ย 34 และ 29°C ตามลำดับ และดินชั้นที่ 3 มีอุณหภูมิเฉลี่ย 28°C เท่ากัน ถึงแม้ว่าจะไม่รักษาอุณหภูมิน้ำและปล่อยให้อุณหภูมิลดลงตามธรรมชาติก็ยังสามารถรักษา

อุณหภูมิดินเพาะกล้าไม้ตามที่กล้าไม้เบญจมาศต้องการ ดังนั้นการทำน้ำร้อนอุณหภูมิ 40-70°C สามารถนำไปเพิ่มอุณหภูมิดินเพาะกล้าไม้เบญจมาศได้ตามที่กล้าไม้ต้องการ

เอกสารอ้างอิง

1. Krasaechai A. Chrysanthemum. 1st ed. Bangkok: Odean Store; 1992.
2. Krutkun T. Sustainable agriculture use of soil fertilizer. Bangkok: Green fence; 1997.
3. Feungchan S. Fruit tree physiology. 1 st ed. Bangkok: Sirakan Offset; 1994.
4. Scott HD. Soil Physics: Agricultural and Environmental Applications. 1st ed. Library of Congress cut a logging Iowa State; 2001.
5. Permchart W. A feasibility study of using soil as a waste cooling agent for air conditioners in Thailand [master's thesis]. Bangkok: King Mongkut's University of Technology Thonburi; 1998.
6. Gua Y, Asher J, Yano T, Momii K. Estimation of Soil Evaporation Using the Differential Temperature method. Soil Sci Soc Am J. 1999;63(6):1608-14.
7. Kurpaskaz S, Slipek L. Mathematical Model of Heat and Mass Exchange in a Garden Subsoil during Warm air heating. Engngres. 1996;65:305-11.
8. Boonwan C, Yamfang M, Thepa S, Sukchana T, Pruengam P, Pairintra R, et al. Development of a Mathematical Model to Predict Soil Temperature for the Growth of Chrysanthemum Sprouts. Research Journal Rajamangala University of Technology Thanyaburi. 2020;19(1):74-85.



ผลของผงชาเขียวต่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียว

Effect of Green Tea Powder on Development of Fresh Milk Egg Thai Custard Dessert Product Supplemented with Green Tea Powder

วัฒนา วิริวฒิกร*

Wattana Wirivutthikorn*

สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
จ. ปทุมธานี 12130

Division of Food Science and Technology, Faculty of Agricultural Technology, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathumthani 12130, THAILAND

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

ARTICLE INFO

ABSTRACT

Article history:

Received: 9 April, 2020

Revised: 8 October, 2020

Accepted: 30 October, 2020

Available online: 22 December, 2020

DOI: 10.14456/rj-rmutt.2020.27

Keywords: Thai custard

dessert, fresh milk, green tea, product

Thai custard dessert is a Thai traditional dessert that is modified by adding green tea powder in order to add varieties to Thai dessert custard products and new options for healthy consumers. Green tea is highly nutritious and contains important substances that are beneficial to the body. The objective of this research was to study the optimum ratios of green tea powder on fresh milk egg Thai custard dessert supplemented with green tea products development. This research consisted in four treatments: Egg Thai custard dessert (a control), green tea powder in various ratios of 25, 50 and 75 (w/v) of fresh milk were obtained, respectively. The physical properties as L^* , a^* , b^* value and texture measurement (hardness, gumminess, chewiness and springiness) were investigated. The chemical composition by proximate analysis of fat, protein, fiber, ash and carbohydrate were determined. The microbiological property was studied by total plate count analysis. In addition, the sensory evaluation was performed by using 9-points hedonic scale. The results from physical properties showed that L^* , a^* , b^* and hardness

were statistically significant ($P < 0.05$). The chemical composition revealed that Treatment 4 had the lowest fat value of 6.05% but gave the highest protein, fiber and ash values of 6.29%, 1.07% and 0.85%, respectively. The microbiological results indicated that total plate count in all treatments were less than 1×10^6 CFU/g within standard criteria. The sensory properties revealed that panelists accepted on treatment 4 which gave the same highest scores on taste, overall acceptability and odor of 7.73 and 7.76, respectively.

บทคัดย่อ

ขนมหม้อแกงเป็นขนมไทยดั้งเดิมมาดัดแปลงโดยนำผงชาเขียวมาเสริมลงไปเพื่อเพิ่มความหลากหลายให้กับผลิตภัณฑ์ขนมหม้อแกงและเป็นการเพิ่มทางเลือกใหม่ให้ผู้บริโภคที่สนใจด้านสุขภาพ เนื่องจากชาเขียวมีคุณค่าทางโภชนาการสูงและมีประโยชน์ต่อร่างกายหลายด้าน จุดประสงค์งานวิจัยนี้เพื่อศึกษาอัตราส่วนผงชาเขียวที่เหมาะสมที่มีต่อการพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียวแบ่งออกเป็น 4 สิ่งทดลอง คือ ขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียว 0 25 50 และ 75 (w/v) ของปริมาณนมสด จากนั้นศึกษาสมบัติทางกายภาพด้านความสว่าง สีเขียว สีเหลือง การวัดค่าเนื้อสัมผัสด้านความแข็ง ความเหนียว แรงที่ใช้ในการเคี้ยว และความยืดหยุ่น สมบัติทางเคมีโดยการวิเคราะห์ไขมัน โปรตีน เส้นใย ไขมัน และคาร์โบไฮเดรต สมบัติทางจุลชีววิทยาโดยวิเคราะห์ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด และทางประสาทสัมผัสวิเคราะห์โดยใช้ 9-points Hedonic Scale ผลการทดลองด้านกายภาพพบว่า ความสว่าง ค่าสีเขียว สีเหลือง ค่าความแข็งยกเว้นค่าความเหนียว แรงที่ใช้ในการเคี้ยว และความยืดหยุ่นมีความแตกต่างทางสถิติ สมบัติทางเคมีพบว่า สิ่งทดลองที่ 4 ให้ค่าไขมันต่ำที่สุดร้อยละ 6.05 แต่ให้ค่าโปรตีน เส้นใยและไขมันสูงสุทธ้อยู่ที่ 6.29 1.07 และ 0.85 ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดพบปริมาณโคโลนีน้อยกว่า 1×10^6 CFU/g ในทุกการทดลองและมีค่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน และผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสพบว่า ผู้ทดสอบชิมยอมรับ

คะแนนด้านรสชาติและความชอบโดยรวมการทดลองที่ 4 เท่ากันและสูงสุดเท่ากับ 7.73 คะแนนยอมรับด้านกลิ่นสูงสุดเท่ากับ 7.76

คำสำคัญ: ขนมหม้อแกง นมสด ชาเขียว ผลิตภัณฑ์

บทนำ

เนื่องจากปัจจุบันคนไทยได้รับวัฒนธรรมด้านอาหารของชาติต่าง ๆ เข้ามาทำให้คนไทยบางส่วนลิ้มขนมไทยไปโดยเฉพาะเด็กวัยรุ่นสมัยนี้ให้ความสนใจขนมของต่างชาติมาก เช่น อาหารจำพวกขนมอบต่าง ๆ และเครื่องดื่ม ซึ่งอาหารเหล่านี้มีรสชาติหลากหลายได้เลือกบริโภคเสริมกลิ่นรส เช่น รสส้ม รสสตอเบอรี่ รสทุเรียน รสชาเขียว และอื่น ๆ อีกมาก ขนมหม้อแกงซึ่งเป็นขนมไทยดั้งเดิมมาตั้งแต่โบราณเป็นขนมที่นิยมบริโภคทำจากไข่เป็ด น้ำตาลปีบ ผีอก และนมสด มีลักษณะนุ่ม ส่วนประกอบของขนมหม้อแกงมี ส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน คือ แป้ง มะพร้าวหรือกะทิ และน้ำตาล (1-3) ในปัจจุบันมีการนำวัตถุดิบหลายชนิด เช่น ข้าวไรซ์เบอร์รี่ ถั่ว ข้าวโพดหวาน แก่นตะวัน ชาเขียว การเสริมนมสดลงในขนมหม้อแกงเพื่อเพิ่มความหลากหลายในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมหม้อแกงเพิ่มมากขึ้น (3) ในส่วนชาเขียวมีคุณประโยชน์มีคุณค่าทางโภชนาการสูงและมีประโยชน์ต่อร่างกาย ช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียมีฤทธิ์ต้านมะเร็ง และสารแคเทชินช่วยการสลายปริมาณของคอเลสเตอรอลในลำไส้ (4-5) นอกจากนี้ชาเขียวช่วย

เผาผลาญพลังงานได้มากเป็นผลทำให้น้ำหนักตัวลดลง โดยไม่มีผลกระทบต่ออัตราการเต้นของหัวใจ รวมถึงสามารถป้องกันมะเร็งผิวหนังได้ด้วย (4-5) ดังนั้นผู้วิจัยจึงเกิดแนวคิดในการนำผงชาเขียวมาเสริมในผลิตภัณฑ์ขนมหม้อแกงนมสดเพื่อพัฒนาขนมหม้อแกงนมสดด้วยการศึกษาปริมาณการใส่ผงชาเขียวในอัตราส่วนที่เหมาะสมผสมนมสดเพื่อให้ขนมหม้อแกงมีความแปลกใหม่มีกลิ่นรสชาติที่ดีขึ้น รวมทั้งเป็นการเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ โดยในงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอัตราส่วนที่เหมาะสมในการเสริมผงชาเขียวในผลิตภัณฑ์ขนมหม้อแกงนมสด ศึกษาองค์ประกอบทางกายภาพทางเคมี ทางจุลชีววิทยา และทางประสาทสัมผัสในขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียวเพื่อดูการยอมรับของผู้ทดสอบชิมที่มีต่อผลิตภัณฑ์ขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียวเพื่อเป็นการเพิ่มความหลากหลายให้กับผลิตภัณฑ์ขนมหม้อแกงเป็นการเพิ่มทางเลือกใหม่ให้ผู้บริโภคที่มีความสนใจในด้านสุขภาพมากขึ้น

วิธีดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนการเตรียมขนมหม้อแกงนมสดเสริมชาเขียว

ขั้นตอนแรกเตรียมนมสดผสมผงชาเขียว ซึ่งผงชาเขียวร้อยละ 16 ต่อปริมาณนมสด นำผงชาเขียวที่ได้มาละลายกับน้ำนมสดอุณหภูมิ 70 - 80 °C เป็นเวลา 5 นาที กรองผงชาเขียวออกตวงน้ำนมผสมผงชาเขียวตามอัตราส่วนที่กำหนด ดังตารางที่ 1 ต่อจากนั้นเข้าสู่ขั้นตอนการเตรียมเปลือกโดยปอกเปลือกเปลือกพร้อมล้างให้สะอาด นำเปลือกที่ได้มาหั่นให้ได้ขนาดประมาณ 1x5 เซนติเมตร นำไปนึ่งในรังถึงนาน 3 นาที บดให้ละเอียด ซึ่งเปลือกให้ได้ 300 กรัม ซึ่งส่วนผสมต่าง ๆ ให้ได้ตามอัตราส่วนที่กำหนด ดังตารางที่ 1 นำไข่เป็ดมาตีให้ขึ้นฟู ใส่น้ำตาลปี๊บ แป้งข้าวเจ้า และแป้งมันสำปะหลัง ผสมจนน้ำตาลละลายหมดนำไปกรองด้วยผ้าขาวบางนำเปลือกหนึ่งบดละเอียดใส่นมสดและนมผสมผงชาเขียวที่เตรียมไว้ผสมให้เข้ากันเทลงในภาชนะ (ภาชนะที่เตรียมไว้จะต้องทาน้ำมันรำข้าวแล้วนำไปอบที่

อุณหภูมิ 180 °C ประมาณ 10 - 15 นาที) ที่เตรียมไว้อบที่อุณหภูมิ 200 °C ประมาณ 30 นาที ตัดแปลงจาก (6-8)

การวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพและทางเคมี

นำตัวอย่างขนมหม้อแกงที่จะทำการวิเคราะห์มาหั่นให้เป็นชิ้นสี่เหลี่ยมขนาด 3x3 เซนติเมตร ทำการวัดค่าสีโดยใช้เครื่องวัดค่าสี (Colorimeter) ยี่ห้อ Minolta รุ่น CR-10 เนื้อสัมผัสด้วย Texture Analyzer LLOYD รุ่น TA.XT plus โดยใช้หัวกดแบบทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 เซนติเมตร ใช้ความเร็ว 20 มิลลิเมตร/นาที โปรตีน (Crude Protein) โดยใช้เครื่องวิเคราะห์โปรตีน ยี่ห้อ FOSS รุ่น Kjeltac TM 8100 ไขมัน (Crude Fat) โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ไขมันยี่ห้อ VELP รุ่น Scientifica Ser 148 เส้นใย (Crude Fiber) ยี่ห้อ FOSS รุ่น FT 122 Fibertec เถ้า (Ash) ยี่ห้อ Carbolite รุ่น Parsons Lane Hope Valley S 33 และคาร์โบไฮเดรต ตามวิธี (9)

การวิเคราะห์คุณภาพทางจุลชีววิทยา

ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด (Total Plate Count, TPA) ตามวิธี (10)

การทดสอบความชอบทางประสาทสัมผัส

งานวิจัยนี้ใช้ผู้ทดสอบชิมจำนวน 30 คนที่ไม่ผ่านการฝึกฝนโดยทดสอบความชอบทางประสาทสัมผัสแบบ 9- points Hedonic scale test ในด้านสี รสชาติ กลิ่น เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ตามวิธี (11)

การบันทึกข้อมูล

วิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพและทางเคมี โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel 2016 วางแผนการทดลองโดยใช้ Completely Randomized Design (CRD) ทดลอง 3 ซ้ำ ส่วนการทดสอบทางประสาทสัมผัสวางแผนการทดลองโดยใช้ Randomized Complete Block Design (RCBD) ทดลอง 3 ซ้ำเช่นเดียวกับการวิเคราะห์ทางกายภาพและทางเคมี วิเคราะห์ความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) (12)

ตารางที่ 1 ส่วนผสมในการทำขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียว

ส่วนประกอบของ ขนมหม้อแกงนมสด (g)	สูตรผงชาเขียว (w/v)	สูตรผงชาเขียว (w/v)	สูตรผงชาเขียว (w/v)	สูตรผงชาเขียว (w/v)
ไข่ขาว	500	500	500	500
ไข่แดง	200	200	200	200
น้ำตาลโตนด	500	500	500	500
แป้งข้าวเจ้า	20	20	20	20
แป้งมันสำปะหลัง	20	20	20	20
เปลือกนึ่งบดละเอียด	300	300	300	300
นมสดผสมผงชาเขียว	ไม่มี	125	250	375
นํ้านมสด	500	375	250	125
ไข่ทั้งฟอง	2	2	2	2

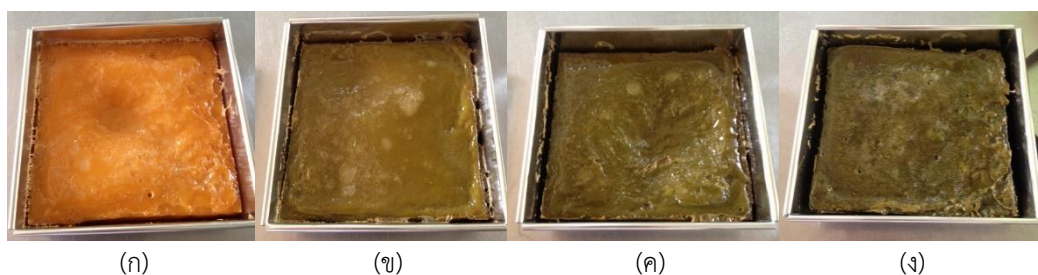
ผลการศึกษาและอภิปรายผล

วิเคราะห์ค่าความสว่าง (L^*) ของผลิตภัณฑ์ขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียวทั้ง 4 สิ่งทดลอง ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 2 พบว่า ค่าความสว่างของผลิตภัณฑ์ขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียวทั้ง 4 สิ่งทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P \leq 0.05$) โดยขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียว 0 (w/v) จะมีค่าความสว่างมากที่สุด คือ 73.17 เมื่อเปรียบเทียบกับขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียว 25 50 และ 75 (w/v) ซึ่งมีค่าความสว่างลดลงเรื่อย ๆ เนื่องมาจากชาเขียวเมื่อได้รับความร้อนในช่วงเกิดปฏิกิริยาทำให้ผงชาเขียวจะทำให้ขนมหม้อแกงมีสีเขียวยิ่งขึ้น (13) ซึ่งสีเขียวยิ่งขึ้นจะส่งผลต่อค่าความสว่างที่ได้ทั้งนี้ยังสอดคล้องกับ (14) ที่ศึกษาการพัฒนาสูตรขนมจีนโดยเพิ่มน้ำชาเขียว ซึ่งเมื่อนำไปวัดค่าสีแล้วพบว่า เส้นของขนมจีนมีค่าความสว่าง (L^*) ลดลง แต่ค่าความเป็นสีเขียว ($-a^*$) และค่าความเป็นสีเหลือง ($+b^*$) เพิ่มขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณของน้ำชาเขียวในสูตรของขนมจีน ค่าสีเขียวยของผลิตภัณฑ์ขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียวทั้ง 4 สิ่งทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (15) โดยขนมหม้อแกงนมสดเสริม

ผงชาเขียว 0 (w/v) จะมีค่าความเป็นสีแดง คือ 57.86 ส่วนขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียว 25, 50 และ 75 (w/v) จะมีค่าความเป็นสีเขียว ดังแสดงในตารางที่ 2 เนื่องจากใบชาได้รับความร้อนทำให้ใบชาจะมีสีเขียวยิ่งขึ้น (16) ทำให้ขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียว 75 (w/v) ที่มีปริมาณของผงชาเขียวมากที่สุดเมื่อวัดค่าสีแล้วจะได้ค่าของสีเขียวยิ่งขึ้นเมื่อเทียบกับขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียว 25 และ 50 (w/v) (รูปที่ 1) ซึ่งค่าที่วัดได้ตามปริมาณผงชาเขียวที่เติมลงไปผลการทดลองที่ได้สอดคล้องกับ (17) ทำการศึกษาคุณภาพของโยเกิร์ตผงรสชาเขียวโดยพบว่า โยเกิร์ตผงรสชาเขียวเมื่อนำไปคั้นรูปมีค่าความสว่างลดลงในขณะที่ค่าความเป็นสีเหลืองมีค่าเพิ่มขึ้น ค่าสีเหลืองของผลิตภัณฑ์ขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียวทั้ง 4 สิ่งทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียว 50 และ 75 (w/v) จะมีค่าความเป็นสีเหลืองมากที่สุด คือ 26.57 และ 28.37 ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเสริมผงชาเขียวจะส่งผลต่อค่าความเป็นสีเหลืองของผลิตภัณฑ์ในทุกตัวอย่าง เนื่องจากใบชาเขียวเมื่อนำมาชงน้ำร้อนแล้วจะได้น้ำชาสีเขียวยิ่งขึ้นหรือสีเหลืองอมเขียว (18) นอกจากสีเหลืองที่ได้จากผงชาเขียวแล้วยังมีในส่วนผสมอื่น คือ น้ำตาลปีบโดยน้ำตาลเมื่อ

ถูกความร้อนจะเปลี่ยนเป็นสีเหลืองนวลขึ้นโดยอาศัยการแทนที่ของอากาศ ซึ่งอากาศประกอบด้วยก๊าซออกซิเจนทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงจนได้น้ำตาลสีเหลืองนวลรับประทาน (19) รวมถึงไข่เป็ด และนมสดที่ใช้ในการผลิตขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียว ลักษณะ

เนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียวด้านค่าความแข็ง ค่าความเหนียว แรงที่ใช้ในการเคี้ยว และค่าความยืดหยุ่น จากตารางที่ 3 จะเห็นได้ว่าขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียว 25 (w/v) มีค่าความแข็งต่ำที่สุดคือ 5.63 นิวตัน



รูปที่ 1 แสดงลักษณะผลิตภัณฑ์ขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียว (w/v) 0 (ก) 25 (ข) 50 (ค) และ 75 (ง) หลังการอบ

ตารางที่ 2 ค่าความสว่างและค่าสีของเนื้อผลิตภัณฑ์ขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียวที่แตกต่างกัน

ขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียว (w/v)	ค่าที่วิเคราะห์ได้*		
	(L*) ^{1/}	(a*) ^{1/}	(b*) ^{1/}
0	73.17±0.91 ^a	57.86±0.61 ^a	12.36±0.27 ^d
25	57.96±1.12 ^b	-2.90±0.45 ^b	14.27±0.87 ^c
50	49.57±0.21 ^c	-17.17±0.65 ^c	26.57±0.19 ^a
70	34.50±0.65 ^d	-24.53±0.54 ^d	28.37±0.54 ^a

a,b,c,d มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

ตารางที่ 3 ลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียวที่แตกต่างกัน

ขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียว (w/v)	ลักษณะเนื้อสัมผัส			
	ค่าความแข็ง ^{a/} (นิวตัน)	ค่าความเหนียว ^{ns/}	แรงที่ใช้ในการเคี้ยว ^{ns/}	ค่าความยืดหยุ่น ^{ns/} (นิวตัน)
0	7.01±0.34 ^a	0.37±0.23	1.81±0.54	0.69±0.73
25	5.63±0.71 ^b	0.32±0.44	1.67±0.31	0.54±0.38
50	7.49±0.76 ^a	0.31±0.15	1.18±0.63	0.61±0.51
75	7.47±0.62 ^a	0.30±0.76	1.59±0.71	0.59±0.43

a,b,c,d มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

^{ns} ที่กำกับเหนือตัวเลขในแนวตั้งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P > 0.05$)

เนื่องจากในงานวิจัยนี้ศึกษาการผลิตขนมหม้อแกงนมสดมีการเสริมปริมาณของผงชาเขียวในปริมาณที่แตกต่างกัน ผลของการเติมปริมาณผงชาเขียวที่ต่างกันทำให้ได้ลักษณะเนื้อสัมผัสที่ดีขึ้นแต่เมื่อเพิ่มปริมาณ

ผงชาเขียวมากเกินไปหรือไม่ได้ใส่ก็จะส่งผลต่อค่าความแข็งที่วัดได้ ทั้งนี้ค่าความแข็งที่เกิดขึ้นอาจเกิดขึ้นจากในขั้นตอนการอบโดยการผลิตขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียวในปริมาณที่แตกต่างกัน การใช้ความร้อน

อุณหภูมิสูงในการอบสูง คือ 200°C (20) ซึ่งอุณหภูมิสูงมีผลต่อการเกิดปฏิกิริยาทางเคมีทำให้ความแข็งที่ได้แตกต่างกัน (19-20) นอกจากนี้ในการผลิตขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียวมีการใช้ไข่เปิดเป็นวัตถุดิบหลักซึ่งเมื่อไข่แดงและไข่ขาวได้รับความร้อนจะทำให้เกิดความแข็งตัวมากขึ้นโดยไข่ขาวจะเริ่มแข็งตัวที่อุณหภูมิ 62 °C และไข่แดงจะเริ่มแข็งตัวที่อุณหภูมิ 65 °C ส่วนค่าความเหนียว แรงที่ใช้ในการเคี้ยว และความยืดหยุ่น

ขนมหม้อแกงนมสดเสริมชาเขียวทั้ง 4 สิ่งทดลองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติทั้งนี้เพราะในการทำขนมหม้อแกงมีการใช้นมสดในปริมาณที่เท่ากันทั้ง 4 สิ่งทดลอง ซึ่งในนมสดจะมีปริมาณของโปรตีนอยู่โดยเมื่อโปรตีนนั้นได้รับความร้อนจะทำให้เปลี่ยนสภาพไปจากธรรมชาติส่งผลต่อปริมาณของอาหารทำให้มีการขยายตัวเพิ่มมากขึ้นทำให้ขนมหม้อแกงมีลักษณะเนื้อสัมผัสที่ดีขึ้น (20-21)

ตารางที่ 4 สมบัติทางเคมีของผลิตภัณฑ์ขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียวที่แตกต่างกัน

ผงชาเขียว (w/v)	ค่าที่วิเคราะห์ได้ (ร้อยละ)				
	ไขมัน ^{ns/}	โปรตีน ^{1/}	เส้นใย ^{1/}	เถ้า ^{ns/}	คาร์โบไฮเดรต ^{1/}
0	6.35±0.27	5.82±0.76 ^b	0.91±0.75 ^b	0.79±0.22	29.84±0.25 ^b
25	6.11±0.76	6.28±0.55 ^a	0.97±0.43 ^{ab}	0.82±0.56	32.34±0.74 ^a
50	6.48±0.18	6.28±0.45 ^a	1.00±0.66 ^{ab}	0.85±0.16	29.85±0.81 ^b
75	6.05±0.49	6.29±0.87 ^a	1.07±0.71 ^a	0.85±0.72	30.59±0.61 ^b

a,b,c,d มีความแตกต่างกันทางสถิติ (P≤0.05)

ns ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ (P>0.05)

จากการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีด้านไขมันของผลิตภัณฑ์ขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียวพบว่าขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียวทั้ง 4 สิ่งทดลองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งเป็นเพราะในชาเขียวที่นำมาใช้จะไม่มีปริมาณของไขมันเป็นส่วนประกอบ (22) ทำให้เมื่อทำการผลิตขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียวจึงไม่มีผลต่อปริมาณไขมันที่ได้ นอกจากปริมาณของผงชาเขียวแล้วในการผลิตขนมหม้อแกงมีการใช้นมสดเป็นวัตถุดิบหลักซึ่งทั้ง 4 สิ่งทดลองมีการใช้ปริมาณของนมสดเท่ากันโดยนํ้านมสดนั้นมีองค์ประกอบของไขมันอยู่ร้อยละ 3.20 (22-23) ทำให้เมื่อทำการผลิตขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียวค่าไขมันที่วิเคราะห์ได้จึงไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โปรตีนของผลิตภัณฑ์ขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียวพบว่าขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียวมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียว 0 (w/v) จะมีโปรตีนต่ำ

ที่สุด คือ ร้อยละ 5.82 เมื่อเปรียบเทียบกับขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียว 25 50 และ 75 (w/v) จะมีปริมาณโปรตีนมากขึ้นซึ่งมีปริมาณของโปรตีนที่สูงกว่าขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียว 0 (w/v) เนื่องมาจากในชาเขียวมีองค์ประกอบของโปรตีนอยู่ร้อยละ 20-30 ของน้ำหนักแห้ง โดยในชาเขียวจะประกอบเป็นด้วยกรดอะมิโน คือ ธีอานีน (22) นอกจากนี้ใบชาเขียวจะสูญเสียไปเกือบหมดถ้าใช้ระยะเวลาในการชงชาเขียวนานจนเกินไป (23) ซึ่งในการผลิตขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียวในขั้นตอนการสกัดชาเขียวนมทั้ง 4 สิ่งทดลองไม่ได้ทำในครั้งเดียวกันอาจทำให้เวลาในการชงคลาดเคลื่อนทำให้โปรตีนในชาบางส่วนสูญเสียไปส่งผลทำให้โปรตีนในขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียว 25 50 และ 75 (w/v) ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เส้นใยอาหารในขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียว 75 (w/v) จะมีเส้นใยมากที่สุด คือ ร้อยละ 1.07 เมื่อเปรียบเทียบกับขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียว 0 25 และ

50 (w/v) ที่มีเส้นใยต่ำกว่าดังแสดงในตารางที่ 4 เนื่องจากในใบชาจะประกอบด้วยเซลลูโลส โยอาหารที่ละลายน้ำได้ และโปรตีนซึ่งมีของแข็งรวมกันได้ร้อยละ 25 โดยปริมาตร (24) ส่งผลทำให้ปริมาณของเส้นใยในผลิตภัณฑ์ขนมหม้อแกงนมสดมีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อมีการเสริมผงชาเขียวในปริมาณที่มากขึ้นทั้งนี้ในการผลิตขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียวในขั้นตอนการสกัดชาเขียวไม่มีการใช้ส่วนของกากชาเขียวซึ่งทำให้เส้นใยในผลิตภัณฑ์ขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียวมีค่าไม่สูงมากนัก ถ้าในผลิตภัณฑ์ขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียวทั้ง 4 สิ่งทดลองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงให้เห็นว่าชาเขียวที่นำมาใช้การผลิตขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียวมีปริมาณของแร่ธาตุต่าง ๆ ต่ำไม่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าที่ได้หรือถ้าเพิ่มขึ้นก็เพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย เพราะปริมาณค่าที่วัดได้จะเป็นตัวแทนของปริมาณแร่ธาตุที่มีอยู่ในอาหาร โดยอาหารที่มีปริมาณแร่ธาตุสูงจะมีปริมาณค่าสูง (24) นอกจากนี้ในการผลิตขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียวยังมีส่วนผสมหลักซึ่งก็คือไข่เปิด (ทั้งฟอง) จะมีค่าร้อยละ 0.9 ต่อน้ำหนักเปียก (24-25) โดยในการผลิตขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียวมีการใช้ปริมาณของไข่เปิดเท่ากันทั้ง 4 สิ่งทดลองทำให้ขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียวไม่มีความแตกต่างกัน คาร์โบไฮเดรตขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียวทั้ง

4 สิ่งทดลองมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียว 25 (w/v) จะมีค่ามากที่สุด คือร้อยละ 32.34 เมื่อเปรียบเทียบกับขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียว 0 50 และ 75 (w/v) ที่มีคาร์โบไฮเดรตต่ำกว่าโดยคาร์โบไฮเดรตที่ได้ในผลิตภัณฑ์ขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียวนั้นมาจากในส่วนของชาเขียวที่นำมาใช้มีคาร์โบไฮเดรตอยู่ร้อยละ 20-25 ของน้ำหนักแห้ง (25-26) และนอกจากคาร์โบไฮเดรตที่ได้จากชาเขียวแล้วในการผลิตขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียวยังมีการใช้เผือกเป็นส่วนประกอบสำคัญซึ่งองค์ประกอบโดยน้ำหนักแห้งของเผือกมีคาร์โบไฮเดรตร้อยละ 83.1 - 91.7 (26-27)

ผลการทดสอบสมบัติทางทางจุลินทรีย์ทั้งหมดที่ปนเปื้อนในผลิตภัณฑ์ขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียวทั้ง 4 สิ่งทดลอง พบว่า ปริมาณจุลินทรีย์ในอาหารในผลิตภัณฑ์ขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียวทั้ง 4 สิ่งทดลองมีปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดน้อยกว่า 250 CFU/g ซึ่งอยู่ในเกณฑ์มาตรฐาน คือ มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนไทยมาตรฐานเลขที่ มผช. 1/2552 มีจุลินทรีย์ทั้งหมดที่ปนเปื้อนในผลิตภัณฑ์ (Total Plate Count: TPC) ไม่เกิน 1×10^6 CFU/g (27) แสดงว่าขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียวทั้ง 4 สิ่งทดลองมีความปลอดภัยสำหรับผู้บริโภค

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียวที่ต่างกัน

ขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียว (w/v)	ค่าที่วิเคราะห์ได้				
	สี ^{ns/}	รสชาติ ^{1/}	กลิ่น ^{1/}	เนื้อสัมผัส ^{1/}	ความชอบโดยรวม ^{1/}
0	7.30±0.23	6.36±0.21 ^c	6.63±0.54 ^b	6.93±0.33 ^b	6.86±0.66 ^b
25	7.03±0.76	7.16±0.78 ^b	7.53±0.43 ^a	7.03±0.98 ^a	7.40±0.51 ^a
50	7.16±0.43	7.40±0.32 ^{ab}	7.56±0.48 ^a	7.56±0.66 ^a	7.43±0.42 ^a
75	7.23±0.26	7.73±0.15 ^a	7.76±0.24 ^a	7.16±0.17 ^b	7.73±0.69 ^a

^{a,b,c,d}มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P \leq 0.05$)

^{ns}ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($P > 0.05$)

ผลการทดสอบความชอบทางประสาทสัมผัสด้านสีขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียวทั้ง 4 สิ่งทดลอง

ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเสริมผงชาเขียวในผลิตภัณฑ์ขนมหม้อแกงนม

สดไม่มีผลต่อคะแนนความชอบถึงแม้ว่าในผลิตภัณฑ์ขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียว 0 (w/v) จะให้สีที่แตกต่างจากขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียว รสชาติขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียว 75 (w/v) จะมีคะแนนความชอบมากที่สุด คือ 7.73 ดังแสดงในตารางที่ 5 เมื่อเปรียบเทียบกับขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียว 0 (w/v) ซึ่งแสดงว่าในการเสริมผงชาเขียวจะช่วยปรับปรุงรสชาติให้เป็นที่ต้องการสำหรับผู้ทดสอบชิม โดยเฉพาะผู้ที่นิยมรับประทานชาเขียวอยู่แล้วซึ่งชาเขียวนับเป็นเครื่องดื่มที่ผู้คนนิยมกันอย่างแพร่หลาย (28) กลิ่นขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียว 25 50 และ 75 (w/v) มีคะแนนความชอบไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่ขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียว 0 (w/v) จะมีคะแนนความชอบด้านกลิ่นน้อยที่สุด ซึ่งเป็นเพราะในชาเขียวจะมีกลิ่นชาเขียวเป็นเอกลักษณ์ และในชาเขียวมีคาเทชิน (Catechin) เป็นสารประกอบฟีนอลิก (Phenolic Compound) ประเภทโพลีฟีนอล (Polyphenol) ในกลุ่มฟลาโวนอยด์ (Flavonoid) ซึ่งปริมาณคาเทชินในใบชามีผลต่อ สี กลิ่น และรสชาติของชาเขียว ยิ่งปริมาณคาเทชินเพิ่มขึ้น ทำให้ชาเขียวมีสีกลิ่นรสมากขึ้น (29) นอกจากนี้กลิ่นที่ได้จากชาเขียวยังช่วยลดกลิ่นคาวของไข่เป็ดที่เป็นส่วนผสมในการผลิตขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียวด้วยส่งผลให้เป็นที่ยอมรับต่อผู้ทดสอบชิม เนื้อสัมผัสขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียว 25 และ 50 (w/v) จะมีคะแนนด้านเนื้อสัมผัสมากที่สุด ทำให้ทราบว่าการใส่ผงชาเขียวควรเลือกใส่ในปริมาณที่เหมาะสม คือการเสริมผงชาเขียว 25 (w/v) หรือ 50 (w/v) เพื่อให้ผลิตภัณฑ์ขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียวเป็นที่ยอมรับสำหรับผู้บริโภคปริมาณที่เติมลงไปอยู่ในช่วงที่เหมาะสมเนื่องจากชาเขียวมีรสควัตถุที่สำคัญคือคลอโรฟิลล์ที่มีสีเขียว ส่วนคาเฟอีนทำให้ชามีรสชาติที่ดีและเพิ่มการทำงานของสารสื่อประสาทโดปามีน (Dopamine) ซึ่งทำให้สมองมีการตื่นตัว และมีคาเทชินมีส่วนช่วยให้ชาเขียวมีสี กลิ่น รสและเนื้อสัมผัสที่ดีทำให้ผู้บริโภครู้สึกพึงพอใจต่อผลิตภัณฑ์มากขึ้น (29-30)

ความชอบโดยรวมขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียว 0 (w/v) จะมีค่าคะแนนความชอบน้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียว 50 และ 75 (w/v) ที่มีค่าคะแนนความชอบโดยรวมมากที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการเสริมผงชาเขียวในผลิตภัณฑ์ขนมหม้อแกงนมสดจะช่วยปรับปรุงรสชาติ กลิ่น เนื้อสัมผัส มีผลทำให้ขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียวเป็นที่ชื่นชอบสำหรับผู้ทดสอบชิม (30)

สรุปผล

ชาเขียวมีคุณประโยชน์มีคุณค่าทางโภชนาการสูงและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่มีประโยชน์ต่อร่างกาย ช่วยยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียมีฤทธิ์ต้านมะเร็ง สามารถนำมาพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมหม้อแกงนมสดโดยการเติมผงชาเขียวลงไป จัดได้ว่าเป็นการพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมหม้อแกงแบบใหม่ให้มีความน่าสนใจในการบริโภคมากขึ้น ปริมาณผงชาเขียวที่ต่างกันมีผลทำให้ค่าความสว่าง ค่าสีเขียว สีเหลือง และค่าความแข็งมีความแตกต่างกัน ขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียว 75 (w/v) ให้ค่าไขมันต่ำที่สุดร้อยละ 6.05 แต่ให้ค่าโปรตีน เส้นใย และเถ้าสูงสุตร้อยละ 6.29 1.07 และ 0.85 ตามลำดับ ส่วนผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสพบว่า ขนมหม้อแกงนมสดที่เสริมผงชาเขียวร้อยละ 75 ผู้ทดสอบชิมให้ค่าคะแนนการยอมรับด้านรสชาติและความชอบโดยรวมเท่ากันและสูงสุดเท่ากับ 7.73 ส่วนคะแนนยอมรับด้านกลิ่นสูงสุดเท่ากับ 7.76

กิตติกรรมประกาศ

การทำวิจัยเรื่อง การพัฒนาขนมหม้อแกงนมสดเสริมผงชาเขียวสำเร็จจุลวงไปด้วยดีผู้วิจัยใคร่ขอขอบคุณ นักศึกษาสาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหารชั้นปีที่ 4 เจ้าหน้าที่ อาจารย์คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรีที่ให้การสนับสนุนการทำวิจัยด้านเงินทุนทำวิจัยและห้องปฏิบัติการจนแล้วเสร็จจุลวงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

1. แต่งต้อย มาลี. ขนมหอมแกง. กรุงเทพฯ: เลิฟแอนด์ลิฟเพรส; 2542.
2. วันชัย อิงปัญจลาภ. ขนมหอม. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ไทยวัฒนาพานิช; 2547.
3. วรณิศ ศิริวงศ์. หนังสือขนมหอม เล่ม 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์ดวงกมล; 2550.
4. Morita O, Kirkpatrick JB, Tamaki Y, Chengelis CP, Beck MJ. Safety assessment of heat-sterilized green tea catechin preparation: A 6-month repeat-dose study in rats. J Food Chem Toxicol. 2009;47:1760-70.
5. Zaveri NT. Green tea and its polyphenolic catechins: Medicinal uses in cancer and non cancer applications. Life Sci. 2006;78:2073-80.
6. ทวีพร เนียมมาลัย, จุฑามาศ ขาญชัย, อรุณี แก้วบริสุทธิ์, สุวิวัฒน์ รื่นเรือง. การพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมหอมแกงนมสดเมืองเพชรบุรี [ปริญญานิพนธ์วิทยาศาสตร์บัณฑิต]. เพชรบุรี: สถาบันราชภัฏเพชรบุรี; 2546.
7. วรรัตน์ สานนท์, ทศนีย์ ลิ้มสุวรรณ, ลีลิ อิงศรีสว่าง. การพัฒนาขนมหอมแกงไขลดพลังงานและปรับปรุงสัดส่วนกรดไขมันด้วยซูโคราโลสและกะทิธัญพืช. ใน: เอกสารประกอบการประชุมทางวิชาการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สาขาอุตสาหกรรมเกษตร ครั้งที่ 47; 20 มี.ค. 2552; มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. น. 16-24.
8. ศรีสมร คงพันธุ์, มณี สุวรรณผ่อง. ขนมหอม 2. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แสงแดด; 2549.
9. AOAC. Official method of analysis. 18th ed. Virginia: The Association of official Analytical Chemists; 2005.
10. AOAC. Official Methods of Analysis. 17th ed. Washington, D.C.: The Association of Official Analytical Chemists; 1995.
11. ไพโรจน์ วิริยจารี. การทดสอบทางประสาทสัมผัส. เชียงใหม่: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่; 2547.
12. อนันต์ชัย เชื้อนธรรม. วิเคราะห์ทางสถิติและการวิเคราะห์ข้อมูล. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์; 2549.
13. สมพล นิลเวศน์. คุณประโยชน์ของชาเขียว. กสิกร. 2543;73(2):163-5.
14. เกียรติพงษ์ เจริญจิตต์. การพัฒนาสูตรขนมหอมผสมน้ำแครอท น้ำชาเขียว และน้ำดอกอัญชัน [ปริญญานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต]. มหาสารคาม: มหาวิทยาลัยมหาสารคาม; 2552.
15. สุนัน ปานสาคร, จตุรงค์ ลังกาพันธุ์, รัตนา ม่วงรัตน์. ผลของการแช่เยือกแข็งต่อความคงตัวของกาบาและแอนโทไซยานินในข้าวกล้องงอกหุงสุกพันธุ์ไรซ์เบอร์รี่. วารสารวิจัย มทร.ธัญบุรี. 2562;18(1):1-13.
16. ประภัสสร สุรวัฒนวรรณ. ชาเขียว [อินเทอร์เน็ต]. 2556 [สืบค้นเมื่อวันที่ 24 ม.ค. 2556]. จาก: www.gpo.or.th/rdi/htmls/greentea.html
17. ลินจง สุขลำภู, ไกรวุฒิ นุชประมูล, นรากร ศรีสุข. การศึกษาคุณภาพของโยเกิร์ตผงรสชาเขียวในระหว่างการเก็บรักษา. ใน: เอกสารประกอบการประชุมทางวิชาการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สาขาอุตสาหกรรมเกษตร ครั้งที่ 44; 30 ม.ค.- 2 ก.พ. 2552; มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. น. 176-83.
18. อีรพงษ์ เทพภรณ์. รายงานการวิจัยฉบับสมบูรณ์ การศึกษาการเปลี่ยนแปลงชนิดและปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ (โพลีฟีนอล) ในระหว่างกระบวนการผลิตชาเขียวและชาอู่หลงของจังหวัดเชียงราย [อินเทอร์เน็ต]. 2556 [สืบค้นเมื่อวันที่ 24 ม.ค. 2556].

- 2556]. จาก: <http://archives.mfu.ac.th/database/items/show/1775>
19. สุคนธา สุคนธ์ธारा. การพัฒนาขนมหม้อแกงเสริมข้าวไรซ์เบอร์รี่เพาะงอกสูตรลดน้ำตาล. วารสารวิทยาศาสตร์ มศว. 2559;32(2):195-209.
 20. อภิญา มานะโรจน์, เจตนิพัทธ์ บุญยสวัสดิ์, จักรวธ ภู่เสม. การพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมหม้อแกงจากข้าวโพดหวาน [อินเทอร์เน็ต]. 2558 [สืบค้นเมื่อวันที่ 17 ธ.ค. 2558]. จาก: <http://newtdc.thailis.or.th/docview.aspx?tdcid=40824>
 21. รัชนี ตันตะพานิชกุล. เคมีอาหาร. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์ชวนพิมพ์; 2535.
 22. โรงงานใบชาสยาม. วิธีการชงชาดื่มที่ง่าย สะดวก และอร่อย [อินเทอร์เน็ต]. 2556 [สืบค้นเมื่อวันที่ 24 ม.ค. 2556]. จาก: www.cha-thai.com
 23. Togari N, Kobayashi A, Aishima T. Relating sensory properties of tea aroma to gas chromatographic data by chemometric calibration methods. Food Res Int. 1995;28(5):485-93.
 24. สายพิณ โชติวิเชียร, วรชาติ ธนนิเวศน์กุล. ชาเขียว ... ไม่ว่าอะไรก็ต้องชาเขียวไว้ก่อน. นนทบุรี: กระทรวงสาธารณสุข, กรมอนามัย, สำนักโภชนาการ; 2549.
 25. จิรายุทธ จูมพลผล้า. การพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมหม้อแกงแค้นตะวันผงเพื่อสุขภาพ [ปริญญานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต]. กรุงเทพฯ: มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร; 2539.
 26. นิธิยา รัตนพานนท์. เคมีอาหาร. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์; 2549.
 27. กระทรวงอุตสาหกรรม. มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนขนมไทย. มาตรฐานเลขที่ มผช. 1/2552. กรุงเทพฯ: สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม; 2552.
 28. Lee J, Chambers DHA. Lexicon for flavor descriptive analysis of green tea. J Sensory Studies. 2007;22:256-72.
 29. Nicolas L, Marquily C, Mahony MO. The 9-point hedonic scale: Are words and numbers compatibles. Food Qual Prefer. 2010;21:1008-15.
 30. กมลวรรณ แจ่มชัด, วิชัย หลัทัยธนาสันต์, เกศรินทร์ มงคลวรรณ, นกสร จุ้ยเจริญ. การพัฒนาขนมหม้อแกงถั่วกึ่งสำเร็จรูป. ใน: เอกสารประกอบการประชุมทางวิชาการมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ สาขาอุตสาหกรรมเกษตร ครั้งที่ 41; 3-7 ก.พ. 2546; มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. น. 175-84.

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

