



JOURNAL OF SCIENCE LADKRABANG
วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง
ISSN 3057-1634 (Online)

ปีที่ 34 ฉบับที่ 1
มกราคม - มิถุนายน 2568

Vol.34 No.1
January - June 2025

เกี่ยวกับวารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง

วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง เกิดขึ้นตั้งแต่ปี พ.ศ. 2532 เป็นต้นมา เป็นวารสารที่เผยแพร่บทความวิจัยและบทความทางวิชาการ ซึ่งได้จัดทำเป็นวารสารอิเล็กทรอนิกส์ (ออนไลน์) ISSN 3057-1634 (Online) ออกเผยแพร่ 2 ฉบับต่อปี (ฉบับที่ 1 ในเดือนมกราคม-มิถุนายน และฉบับที่ 2 ในเดือนกรกฎาคม-ธันวาคม) โดยกำหนดจำนวนบทความที่เผยแพร่ 10 บทความต่อฉบับ (เริ่มต้นในวารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง ปีที่ 31 ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม-มิถุนายน 2565)

วัตถุประสงค์

เพื่อเผยแพร่ความรู้ความก้าวหน้าทางวิชาการและการวิจัยด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สาขาวิชาเคมี สาขาวิชาชีววิทยา สาขาวิชาฟิสิกส์ สาขาวิชาคณิตศาสตร์ สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ และ สาขาวิชาสถิติ

ขอบเขตเนื้อหาบทความวิจัยและบทความทางวิชาการที่ทางวารสารรับเผยแพร่

1. เคมี เคมีประยุกต์ เคมีสิ่งแวดล้อม วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม และเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อม
2. ชีววิทยา เทคโนโลยีชีวภาพ และวิทยาศาสตร์ทางอาหาร
3. ฟิสิกส์ที่เกี่ยวกับวัสดุศาสตร์ ฟิสิกส์ที่เกี่ยวกับนาโนสเกล ฟิสิกส์ไอโอที ฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องกับแสงและโฟโตนิกส์ และ ฟิสิกส์ศึกษา
4. สถิติ การวิจัยดำเนินงาน คณิตศาสตร์บริสุทธิ์และประยุกต์
5. ปัญญาประดิษฐ์ วิทยาการข้อมูล และการประยุกต์ใช้
และสาขาอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง

กระบวนการประเมินบทความ

วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง เป็นวารสารที่มีระบบการพิจารณาของกระบวนการประเมินบทความ Peer Review บทความทุกบทความต้องผ่านการพิจารณาโดยผู้ทรงคุณวุฒิที่เชี่ยวชาญเป็นผู้ประเมินบทความ (Peer Reviewers) ทั้งหมด 3 ท่าน (ต่างกันในสังกัด

หน่วยงาน) โดยที่ผู้ประเมินและผู้แต่งไม่ทราบข้อมูลรายละเอียดชื่อและหน่วยงานกันและกัน (Double-Blind Peer Review) และไม่ได้สังกัดหน่วยงานเดียวกัน

กำหนดการออกเผยแพร่วารสาร

วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง มีกำหนดการออกเผยแพร์ 2 ฉบับต่อปี
ฉบับที่ 1 เดือนมกราคม-มิถุนายน
ฉบับที่ 2 เดือนกรกฎาคม-ธันวาคม

ประเภทบทความที่รับเผยแพร่

- บทความวิจัย (Research Article)
- บทความวิชาการ (Academic Article)

ภาษาในบทความที่รับออกเผยแพร่

ภาษาไทย (บทความย่อเขียนเป็นภาษาไทยและภาษาอังกฤษ)

ค่าใช้จ่ายในการตีพิมพ์

ไม่มีค่าธรรมเนียมการตีพิมพ์บทความ โดยไม่มีการเรียกเก็บค่าธรรมเนียมในการส่งและการตีพิมพ์บทความทางวิชาการบทความทางวิชาการที่เผยแพร่แล้วสามารถดาวน์โหลดจากเว็บไซต์ของวารสารโดยไม่มีค่าธรรมเนียม

ผู้สนับสนุนวารสาร

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

แหล่งสนับสนุนวารสาร

คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ลิขสิทธิ์

ลิขสิทธิ์บทความทั้งหมดเป็นของวารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

กองบรรณาธิการ

ที่ปรึกษาวารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง

รองศาสตราจารย์ ดร.คุณิ ณะบริพัฒน์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประเทศไทย

รองศาสตราจารย์ ดร.สุธี ชูติไพจิตร

คณะบดีคณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประเทศไทย

หัวหน้ากองบรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรางคณา กัมปาน

ภาควิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประเทศไทย

กองบรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง

ศาสตราจารย์กิตติคุณ ดร.เกตุ กรุดพันธ์

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ ประเทศไทย

ศาสตราจารย์ ดร.เจษฎา ธารีบุญ

ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ประเทศไทย

ศาสตราจารย์ พลเรือตรีหญิงยุวดี เปรมวิชัย

วิทยาลัยเซาธ์อีสท์บางกอก

ศาสตราจารย์ ดร.ชิตชนก เหลือสินทรัพย์

ภาควิชาคณิตศาสตร์และวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ประเทศไทย

รองศาสตราจารย์ ดร.ชูวงศ์ เอื้อสุขอารี

ภาควิชาเทคโนโลยีชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล ประเทศไทย

รองศาสตราจารย์ ดร.สีหนาท ประสงค์สุข

ภาควิชาพฤษศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ประเทศไทย

รองศาสตราจารย์ ดร.จักรพงษ์ แก้วขาว

หัวหน้าศูนย์วิจัยแห่งความเป็นเลิศทางเทคโนโลยีแก้วและวัสดุศาสตร์

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครปฐม ประเทศไทย

รองศาสตราจารย์ ดร.วราฤทธิ์ พานิชกิจโกศลกุล

ภาควิชาคณิตศาสตร์และสถิติ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ศูนย์รังสิต ประเทศไทย

รองศาสตราจารย์ ดร.กนกวรรณ สิริธิดากิจเกียรติ

ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ประเทศไทย

รองศาสตราจารย์ ดร.ไกรศักดิ์ เกษร

ภาควิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ คณะวิทยาศาสตร์

มหาวิทยาลัยนเรศวร ประเทศไทย

รองศาสตราจารย์ ดร.ปานไพลิน สีหาราช

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประเทศไทย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กลินสุคนธ์ สุวรรณรัตน์

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประเทศไทย

รองศาสตราจารย์ ดร.สรัญญา พันธุ์ฤกษ์

ภาควิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประเทศไทย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษฎ์ ศรีนวลจันทร์

ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประเทศไทย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิรภัทร์ หยกรัตนศักดิ์

ภาควิชาคณิตศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประเทศไทย

อาจารย์สุจิตรา สุขนธมัต

ภาควิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประเทศไทย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์กฤษฎา บุศรา

ภาควิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประเทศไทย

ผู้ประสานงานวารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง

นายพนพล รุ่งเจริญฤทธิ์กุล

ส่วนสนับสนุนวิชาการ คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง ประเทศไทย

สำนักงานวารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง

งานจัดทำวารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง

ส่วนสนับสนุนวิชาการ อาคารวิทยาศาสตร์ 1 (Sc01) คณะวิทยาศาสตร์

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

เลขที่ 1 ซอยฉลองกรุง 1 แขวงลาดกระบัง เขตลาดกระบัง กรุงเทพฯ 10520

โทรศัพท์ 02-329-8400-11 ต่อ 268

สารบัญ (Table of Contents)

หน้า (Page)

- » การพัฒนาชุดการทดลองสำหรับศึกษากฎการเย็นตัวของนิวตันและสมมูลไฟฟ้าความร้อน
เพื่อหาความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมันพืช (บทความวิจัย)
Development of Experiment Set for Study Newton's Law of Cooling and
Electrical Equivalent of Heat to Determine the Specific Heat Capacity of
Vegetable Oil (Research Article)
รัชนีวรรณ ศิริ กัมปนาท พรรณราย และ วิชชุดา สุขนุ้ย*
Ratchaneewan Siri Khampanart Phannarai and Vitchuda Suknui*1

- » การวิเคราะห์ความรู้สึกจากบทวิจารณ์ภาษาไทยของผู้บริโภคที่มีต่อสมาร์ทโฟนในระดับ
มุมมอง (บทความวิจัย)
Aspect-Based Sentiment Analysis for Thai Language from Consumer
Reviews Towards Smartphone (Research Article)
นิสริวัฒน์ เจนศิริศักดิ์* ดารารัตน์ ทาสาจันทร์ และ ปวีณา วันชัย
Nitthiwat Jensirisak* Dararat Tasachan and Paweena Wanchai.....20

- » การผลิตเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ต่ำจากน้ำส้มโอ (*Citrus maxima* (Burm.) Merr.)
พันธุ์ปลูกชาวแตงกวาโดยใช้เส้นใยเห็ดนางนวล (*Pleurotus flabellatus* (Berk & Br.)
Sacc.) ในการหมัก (บทความวิจัย)
Production of Low-Alcohol Beverages from Pummelo Juice (*Citrus
maxima* (Burm.) Merr.) Cultivated Variety of Khao Taeng Kwa, Fermented
with the Mycelia of Pink Oyster Mushroom (*Pleurotus flabellatus*
(Berk & Br.) Sacc.) (Research Article)
ปุณชรัชต์ ปิลอง รัชพล ศรประเสริฐ* อนงคนธ์ หัมพานนท์ และ กิตติพล กสิภาร
Puncharat Pilog Ratapol Sornprasert* Anong Hambananda and
Kittipon Kasipar.....43

- » การลดผลกระทบของซัลไฟด์และเพิ่มศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียที่มีซัลเฟตสูงด้วยกระบวนการซัลไฟด์ออกซิเดชันและดีไนตริฟิเคชัน (บทความวิจัย)
Reducing Effect of Sulfide and Increasing Potential of Biogas Production from High Sulfate Wastewater by Sulfide Oxidation and Denitrification Process (Research Article)
วิภาญดา ทองเนื้อแข็ง* และ นิรมล จันทรชาติ
Wikanda Thongnueakhaeng* and Niramol Juntarachat.....56
- » แบบจำลองทำนายราคาข้าวโพดโดยใช้การเรียนรู้เชิงลึก (บทความวิจัย)
Corn Price Prediction Model Using Deep Learning (Research Article)
สิรินทรา สามชัยรัตน์ พัทธล ศรีอินทร์ สุกฤษฎ์ ปัญญาสิทธิ์ ปกรณ์ แวสว่างวงศ์ และ กฤตคม ศรีจิรานนท์*
Sirinthra Samchairat, Phattadon Sri-in, Sukit Panyasit, Pakorn Waewsawangwong, Krittakom Srijiranon*71
- » ศึกษาความเป็นไปได้ในการเตรียมแผ่นเส้นใยจากเส้นใยกาบกล้วยและเส้นใยขาน้อยร่วมกับตัวประสานจากแป้งมันสำปะหลังเพื่อประยุกต์ใช้ในการขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหาร (บทความวิจัย)
Feasibility Study on Preparation of Fiber Sheet from Banana Stem Fiber and Bagasse Fiber Combined with Binder from Cassava Flour for Application in Forming Food Packaging (Research Article)
จิตติโสภา เฉลียวศักดิ์* น้าฝน คูเจริญไพศาล สโรชา จงภู และ อิศราภรณ์ ฉายแก้ว
Jitsopa Chaliewsak* Numphon Koocharoenpisal Sarocha Jongpoo and Issaraporn Chay-kaew.....88
- » การเปรียบเทียบประสิทธิภาพแบบจำลองการจำแนกคำบาลีและสันสกฤตในภาษาไทยด้วยเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง (บทความวิจัย)
Efficiency Comparison of Classification Models for Pali and Sanskrit in Thai Languages Using Machine Learning Techniques (Research Article)

ณัฐรฐนนท์ กานต์วีกุลธนา รุ่งทิพย์ โคบาล วาสนา ด้วงเหมือน และ สุภาชี ดวงใส*	
Natratanon Kanraweekultana Rungthip Cobal Wassana Duangmeun and Supasee Duangsai*	108
» การวางแผนตารางเวลาเพื่อเป็นแนวทางตัดสินใจลงทะเบียนเรียนในหลักสูตร (บทความวิจัย)	
Planning a Timetable for Deciding to Registration in Course (Research Article)	
ศุภาพิชญ์ เครือศรี ภัทรวรินทร์ ทองคำตอน มนินสา สุดาวัน และ รวินทร์ ยังน้อย*	
Supapich Kruesri Phatthawarin Thongkamton Manisa Sudawan and Rawin Youngnoi*	128
» ผลของการใช้แป้งข้าวเจ้าทดแทนแป้งข้าวสาลีต่อคุณภาพของเส้นบะหมี่ผสมผงแมงกะพรุนที่เก็บรักษาในสภาวะต่างกัน (บทความวิจัย)	
Effect of Using Rice Flour Substituted Wheat Flour on Quality of Noodle Mixed Jellyfish Powder Stored in Different Conditions (Research Article)	
เบญจวรรณ ธรรมธนารักษ์* นลินนิภา นิวัฒนากุล และ วิไล รังสาดทอง	
Benjawan Thumthanaruk* Nalinnipha Niwatthanakun and Vilai Rungsardthong	148
» การตรวจจับการหกล้มภายในอาคารด้วยการเรียนรู้เชิงลึก (บทความวิจัย)	
Detecting Falls Inside the Building by Deep Learning (Research Article)	
เพชรรัตน์ สุขอุบล ชลธิชา ยาศรี ณัฐโชติ พรหมฤทธิ์ และ สัจจาภรณ์ ไวจรรยา*	
APhetcharat Suk-ubon Chonticha Yasri Nuttachot Promrit and Sajjaporn Waijanya*	176

การพัฒนาชุดการทดลองสำหรับศึกษากฎการเย็นตัวของนิวตัน
และสมมูลไฟฟ้าความร้อนเพื่อหาความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมันพืช
Development of Experiment Set for Study Newton's Law
of Cooling and Electrical Equivalent of Heat to Determine
the Specific Heat Capacity of Vegetable Oil

รัชนิวรรณ สิริ กัมปนาท พรรณราย และ วิชชุดา สุขนุ้ย*

Ratchaneewan Siri Khampanart Phannarai and Vitchuda Suknui*

สาขาวิทยาศาสตร์กายภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ จ.สงขลา ประเทศไทย

Division of Physical Science, Faculty of Science, Prince of Songkla University, Songkhla, Thailand

วันที่ส่งบทความ : 31 ตุลาคม 2567 วันที่แก้ไขบทความ : 16 พฤษภาคม 2568 วันที่ตอบรับบทความ : 19 พฤษภาคม 2568

Received: 31 October 2024, Revised: 16 May 2025, Accepted: 19 May 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาชุดการทดลองสำหรับการศึกษากฎการเย็นตัวของนิวตันและสมมูลไฟฟ้าความร้อนในการหาค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมันพืช โดยคำนึงถึงการประหยัดเวลาและงบประมาณในการจัดซื้ออุปกรณ์ ผู้วิจัยจึงเลือกใช้วัสดุที่หาง่ายมีราคาประหยัดแทนการสั่งซื้ออุปกรณ์สำเร็จรูปและใช้น้ำมัน เนื่องจากมีคุณสมบัติไม่ทำปฏิกิริยากับอุปกรณ์ มีความเสถียรและปลอดภัย อีกทั้งยังเอื้อต่อการควบคุมสภาพแวดล้อมในกระบวนการทดลองได้อย่างมีประสิทธิภาพ การทดลองนี้ดำเนินการด้วยการศึกษาการเย็นตัวของน้ำและน้ำมันพืชที่มีปริมาตรเท่ากันในบีกเกอร์ขนาดเดียวกัน พร้อมใช้ค่าความจุความร้อนจำเพาะมาตรฐานของน้ำและบีกเกอร์ที่ทราบค่าในการคำนวณ นอกจากนี้ผู้วิจัยยังใช้วิธีสมมูลไฟฟ้าความร้อนโดยการให้ความร้อนแก่น้ำมันพืชผ่านตัวต้านทานที่เชื่อมต่อกับแหล่งจ่ายไฟฟ้าและเปรียบเทียบค่าที่ได้จากทั้งสองวิธี ผู้วิจัยได้นำชุดการทดลองมาใช้ในการศึกษาปฏิบัติการฟิสิกส์ชั้นสูงหลักสูตรฟิสิกส์ สาขาวิทยาศาสตร์กายภาพ คณะวิทยาศาสตร์ ผลการวิจัยพบว่า ชุดการทดลองที่พัฒนาขึ้นสามารถหาค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมันพืชได้อย่างแม่นยำ ค่าที่ได้จากกฎการเย็นตัวของนิวตันมีค่าเท่ากับ $3.156 \text{ J/g}\cdot\text{K}$ และจากวิธีสมมูลไฟฟ้าความร้อนมีค่าเท่ากับ $3.119 \text{ J/g}\cdot\text{K}$ โดยค่าที่ได้จากทั้งสองวิธีมีความแตกต่างกันเพียง 1.2% ซึ่งสอดคล้องกับกฎการเย็นตัวของนิวตันและสมมูลไฟฟ้าความร้อน อีกทั้งผลของการนำชุดการทดลองใช้ในรายวิชาปฏิบัติการฟิสิกส์ชั้นสูงพบว่า ประสิทธิภาพของวิธีทั้งสองแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05

คำสำคัญ : กฎการเย็นตัวของนิวตัน สมมูลไฟฟ้าความร้อน ความจุความร้อนจำเพาะ

*ที่อยู่ติดต่อ E-mail address: vitchuda.s@psu.ac.th

<https://doi.org/10.55003/scikmitl.2025.265190>

Abstract

This research aims to develop an experimental setup for studying Newton's law of cooling and the electrical equivalent of heat in determining the specific heat capacity of vegetable oil. To save time and reduce equipment procurement costs, the researcher used easily accessible and low-cost materials instead of purchasing a preassembled experimental kit. Vegetable oil was selected due to its non-reactivity with equipment, high stability and safety, and suitability for maintaining controlled experimental conditions effectively. The experiment was conducted by studying the cooling of equal volumes of water and vegetable oil in beakers of the same size, using known specific heat capacities of water and the beaker as references for calculation. In addition, the researcher employed the electrical equivalent of heat method by heating the vegetable oil using a resistor connected to a power supply and compared the results obtained from both methods. The developed experimental setup was applied in the Advanced Physics Laboratory course within the Physics program, Division of Physical Science, Faculty of Science. The research findings indicate that the developed setup can accurately determine the specific heat capacity of vegetable oil. The value obtained using Newton's law of cooling was $3.156 \text{ J/g}\cdot\text{K}$, while that obtained using the electrical equivalent of heat method was $3.119 \text{ J/g}\cdot\text{K}$. The difference between the two values was only 1.2% , which aligns with the principles of Newton's law of cooling and the electrical equivalent of heat. Moreover, the results from implementing the experimental setup in the advanced laboratory course showed that the effectiveness of the two methods differed significantly at the 0.05 statistical level.

Keywords: Newton's law of cooling, Electrical equivalent of heat, Specific heat capacity

1. บทนำ

การหาค่าความจุความร้อนจำเพาะของสสารมีหลายวิธี วิธีที่นิยมใช้ในห้องปฏิบัติการ คือ การหาความจุความร้อนจำเพาะโดยใช้แคลอรีมิเตอร์ ในงานวิจัยของ Atat et al. (2024) ศึกษาความจุความร้อนจำเพาะของของเหลวบางชนิดจากสินค้าอุปโภคบริโภคด้วยแคลอรีมิเตอร์ การหาความจุความร้อนจำเพาะโดยใช้กฎการเย็นตัวของนิวตัน ในงานวิจัยของ Nuangnun et al. (2017) ศึกษาการหาค่าความจุความร้อนจำเพาะอย่างง่ายของเหล็ก ตะปู ทองแดง และอลูมิเนียม ซึ่งใช้วัสดุที่หาได้ง่ายและมีราคาถูกแทนการใช้แคลอรีมิเตอร์ โดยการใส่ตัวอย่างที่ต้องการศึกษาลงในอุปกรณ์ที่ออกแบบ เพื่อหาค่าความจุความร้อนจำเพาะจนกระทั่งอุณหภูมิของน้ำและตัวอย่างที่ทดลองมีค่าเท่ากัน ตามกฎการเย็นตัวของนิวตัน (Newton's law of cooling) ผลการวิจัยพบว่า ค่าความจุความร้อนจำเพาะที่ได้จากการทดลองมีความ

ใกล้เคียงกับค่าความจุความร้อนจำเพาะมาตรฐาน จึงกล่าวได้ว่าสามารถใช้กฎการเย็นตัวของนิวตันหาค่าความจุความร้อนจำเพาะของของแข็งแทนการใช้แคลอริมิเตอร์ได้

กฎการเย็นตัวของนิวตันและสมมูลไฟฟ้าความร้อน (Electrical equivalent of heat) หัวข้อนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับนักศึกษาที่เรียนฟิสิกส์ที่เกี่ยวข้องกับความร้อน การถ่ายเทความร้อน และความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนกับงาน กฎการเย็นตัวของนิวตันมีประโยชน์ในหลายด้าน ทั้งในด้านวิทยาศาสตร์และวิศวกรรมศาสตร์ เช่น การกำหนดเวลาที่ใช้ในการคายประจุของตัวเก็บประจุ การวัดความจุความร้อนของระบบแคลอริมิเตอร์ในการกำหนดการสูญเสียความร้อนของสิ่งแวดล้อมในระหว่างการทำทดลอง การสลายตัวของสารกัมมันตรังสี (Sakore et al., 2019) การใช้กฎนี้ในการประมาณเวลาที่กาแฟร้อนจะเย็นตัวลงจนถึงอุณหภูมิที่ปลอดภัยสำหรับการดื่ม เพื่อหลีกเลี่ยงการทำให้ลวกลิ้น นอกจากนี้ กฎการเย็นตัวของนิวตันยังถูกนำมาใช้ในการคำนวณอุณหภูมิของกระป๋องหรือขวดโซดาที่เก็บไว้ในตู้เย็นเป็นระยะเวลาหนึ่ง อีกทั้งมีการนำไปใช้ในด้านการศึกษาอาชญากรรม กฎนี้สามารถช่วยประเมินเวลาที่ผู้เสียชีวิตได้จากการพิจารณาความแตกต่างระหว่างอุณหภูมิของร่างกายในเวลาเสียชีวิตและอุณหภูมิในปัจจุบัน เพื่อให้ทราบเวลาที่เกิดการเสียชีวิตอย่างแม่นยำ (Unacademy, 2024) กฎนี้ช่วยให้สามารถทำนายและควบคุมการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิในสถานการณ์ต่าง ๆ ได้ ทำให้มีความสำคัญอย่างมากในงานวิจัย การออกแบบ และการปฏิบัติงานในหลายสาขา

สมมูลไฟฟ้าความร้อนหรือความร้อนแบบจูลตั้งชื่อตามนักฟิสิกส์ชาวอังกฤษชื่อเจมส์ จูล (James P. Joule มีชีวิตอยู่ระหว่างปี ค.ศ. 1818-1889) มีผลงานการวิจัยด้านความร้อนและความสัมพันธ์ระหว่างความร้อนกับงานซึ่งเป็นพื้นฐานที่สำคัญมากในวิชาอุณหพลศาสตร์ ความร้อนแบบจูลนั้นหมายถึงกระบวนการที่เกิดขึ้นเมื่อมีกระแสไฟฟ้าไหลผ่านตัวนำไฟฟ้าสร้างให้เกิดความร้อนและแสงสว่าง (Chotisrisuparat, 2020) สมมูลไฟฟ้าความร้อนมีประโยชน์ในหลายด้าน ได้แก่ 1) การคำนวณพลังงาน 2) การควบคุมอุณหภูมิ 3) การอนุรักษ์พลังงาน และ 4) การวิจัยและพัฒนา เป็นต้น ในงานวิจัยของ Hemsuree et al. (2013) ได้สร้างชุดการทดลองแคลอริมิเตอร์จากวัสดุเหลือใช้ เพื่อทดลองหาค่าสมมูลไฟฟ้าความร้อน โดยใช้หลักการป้อนพลังงานไฟฟ้าให้แก่หลอดไฟฟ้าที่จุ่มในน้ำ ผลการทดลองพบว่า ค่าสมมูลไฟฟ้าความร้อนมีค่า 4.14 จูลต่อแคลอรี ซึ่งใกล้เคียงกับค่ามาตรฐาน โดยกฎการเย็นตัวของนิวตันเน้นที่อัตราการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ ในขณะที่สมมูลไฟฟ้าความร้อนนำเสนอกระบวนการที่มีการถ่ายโอนพลังงาน

การดำเนินการเกี่ยวกับกระบวนการจัดการเรียนการสอน เพื่อบรรลุเป้าหมายให้ผู้เรียนได้เกิดความรู้ความเข้าใจในทฤษฎีและหลักการรวมถึงทักษะการปฏิบัติการทางฟิสิกส์ในหัวข้อเรื่อง กฎการเย็นตัวของนิวตันและสมมูลไฟฟ้าความร้อน กิจกรรมการทดลองนับว่าเป็นวิธีการที่สำคัญและมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องจัดให้มีการปฏิบัติการทดลองควบคู่ไปกับการเรียนทฤษฎีและหลักการ เพื่อให้ผู้เรียนได้เกิดความรู้ความเข้าใจในทฤษฎีและหลักการรวมถึงทักษะการปฏิบัติการทางฟิสิกส์ การใช้ชุดการทดลองถือเป็นตัวเลือกหนึ่งในการเพิ่มผลการเรียนรู้ในการเรียนฟิสิกส์ (Institute for the Promotion of Teaching Science and Technology, 2009)

หลักสูตรฟิสิกส์ สาขาวิทยาศาสตร์กายภาพ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ มีการจัดการเรียนการสอนรายวิชาปฏิบัติการฟิสิกส์ขั้นสูง สำหรับนักศึกษาชั้นปีที่ 2 ในภาคเรียนที่ 1 ปีการศึกษา

2567 ทางรายวิชาฯ ได้เพิ่มหัวข้อปฏิบัติการเรื่องกฎการเย็นตัวของนิวตัน ตามผลการเรียนรู้ที่คาดหวังของหัวข้อฟิสิกส์ความร้อน โดยมีวัตถุประสงค์ให้นักศึกษา ศึกษาและทดสอบกฎการเย็นตัวของนิวตันและการหาค่าความจุความร้อนจำเพาะด้วยกฎการเย็นตัวของนิวตันและสมมูลทางไฟฟ้าความร้อน ในการที่จะศึกษาการเย็นตัวของวัตถุอันเป็นผลมาจากการส่งผ่านความร้อนออกจากวัตถุ เมื่อวัตถุมีอุณหภูมิสูงกว่าสิ่งแวดล้อมรอบตัว ในชีวิตประจำวันมักจะเห็นการเย็นตัวของของเหลวกันบ่อย เช่น การเย็นตัวของอาหารประเภทแกงและเครื่องดื่มประเภทร้อนชนิดต่าง ๆ การที่ให้นักศึกษามีความเข้าใจการหาค่าความจุความร้อนจำเพาะด้วยกฎการเย็นตัวของนิวตันและสมมูลไฟฟ้าความร้อน และทำให้การจัดการเรียนการสอนบรรลุวัตถุประสงค์นั้น จำเป็นต้องมีสื่อการเรียนการสอนที่ให้นักศึกษาได้เรียนรู้ เข้าใจทฤษฎี หลักการ และมีทักษะกระบวนการปฏิบัติการฟิสิกส์ที่ดีขึ้น การใช้ชุดการทดลองถือเป็นตัวเลือกหนึ่งในการเพิ่มผลการเรียนรู้ในการเรียนฟิสิกส์

ทางหลักสูตรฯ ไม่มีชุดการทดลองในหัวข้อฟิสิกส์ความร้อนและแคลอริมิเตอร์ จึงจำเป็นต้องออกแบบและสร้างชุดการทดลอง ซึ่งปัจจัยสำคัญในการสร้างชุดการทดลอง ได้แก่ ระยะเวลาการจัดหาจัดซื้อและงบประมาณ ผู้วิจัยคำนึงถึงการนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการเพื่อประหยัดค่าใช้จ่าย การนำอุปกรณ์ที่ไม่ได้ใช้งานมาใช้ให้เกิดประโยชน์และประหยัดระยะเวลาการจัดหาจัดซื้อ จึงมีความคิดในการสร้างชุดการทดลองสำหรับใช้ในการเรียนการสอน เพื่อให้นักศึกษาใช้ในการเรียนได้อย่างมีประสิทธิภาพ ชุดการทดลองยังมีบทบาทและประโยชน์อย่างมากต่อการพัฒนาการเรียนรู้และใช้เป็นสื่อกลางให้ผู้สอนสามารถส่งเสริมหรือถ่ายทอดไปยังผู้เรียนอย่างมีประสิทธิภาพ

งานวิจัยนี้นำเสนอชุดการทดลองสำหรับศึกษาและทดสอบกฎการเย็นตัวของนิวตันในน้ำและน้ำมันพืช การหาค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมันพืช ผู้วิจัยเลือกใช้น้ำและน้ำมันพืชในการทดลองเนื่องจากไม่ทำปฏิกิริยากับอุปกรณ์ ความเสถียรและความปลอดภัย สภาพแวดล้อมที่ควบคุมได้ง่ายในการทดลอง หาได้ง่ายและมีราคาถูก ในการทดลองผู้วิจัยมีแนวคิดสร้างชุดการทดลองเพื่อหาค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมันพืช 2 วิธี คือ ใช้กฎการเย็นตัวของนิวตันและสมมูลไฟฟ้าความร้อนเพื่อหาเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างจากทั้งสองวิธี เนื่องจากน้ำมันพืชที่ใช้ในการทดลองไม่มีค่าความจุความร้อนจำเพาะมาตรฐานสำหรับเปรียบเทียบ ชุดการทดลองที่จัดเตรียมในการหาค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมันพืชด้วยสมมูลไฟฟ้าความร้อน ในการให้พลังงานความร้อนแก่ของเหลวอาจทำได้หลายวิธี แต่วิธีที่ผู้วิจัยใช้ในการทดลอง คือ การให้ความร้อนด้วยตัวต้านทานที่ต่ออยู่กับแหล่งจ่ายไฟฟ้า พลังงานที่สูญเสียไปจะอยู่ในรูปความร้อนที่แผ่ออกมาจากตัวต้านทาน หากเรานำตัวต้านทานจุ่มในของเหลว พลังงานความร้อนที่ตัวต้านทานถ่ายเทให้กับของเหลวมีค่าเท่ากับพลังงานความร้อนที่ทำให้ของเหลวมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งอาศัยกระบวนการให้ความร้อนและสมการความสัมพันธ์ สามารถหาค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมันพืชได้ ชุดการทดลองที่จัดเตรียมขึ้นและมีการทดลองว่ามีความสอดคล้องกับทฤษฎี จากนั้นนำไปใช้ในการเรียนการสอนรายวิชาปฏิบัติการฟิสิกส์ขั้นสูง เพื่อทดสอบความถูกต้องแม่นยำของระบบ

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 กฎการเย็นตัวของนิวตัน

การส่งผ่านความร้อน (Heat transfer) ระหว่างวัตถุทั้งหลายกับสิ่งแวดล้อมรอบตัวเป็นกระบวนการที่เกิดขึ้นอยู่ตลอดเวลา โดยการส่งผ่านความร้อนสามารถจำแนกได้ 3 แบบ คือ การนำความร้อน (Conduction) การพาความร้อน (Convection) และการแผ่รังสี (Radiation) การส่งผ่านความร้อนทั้งสามแบบมักจะเกิดควบคู่กันด้วยบทบาทที่ต่างกันไปตามลักษณะเฉพาะของวัตถุกับสิ่งแวดล้อม สำหรับระบบที่สูญเสียความร้อนด้วยการนำหรือการพา การเย็นตัวของวัตถุจะเป็นไปตามกฎการเย็นตัวของนิวตันกล่าวว่า “อัตราการสูญเสียความร้อนของวัตถุ จะแปรผันตรงกับผลต่างระหว่างอุณหภูมิของวัตถุกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม” แต่นอกจากผลต่างระหว่างอุณหภูมิ อัตราการสูญเสียความร้อนยังแปรตามพื้นที่ผิวของวัตถุ (Sarunyanith, 2002) และสามารถเขียนสมการกฎการเย็นตัวได้ตามสมการที่ (1)

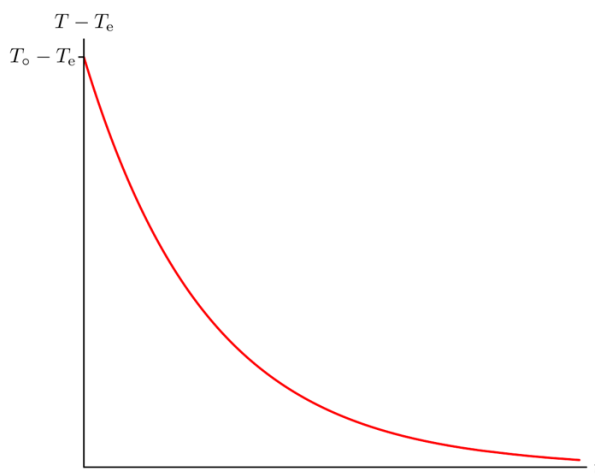
$$\frac{dQ}{dt} = hA(T - T_e) \quad (1)$$

เมื่อ $\frac{dQ}{dt}$	คือ ปริมาณความร้อนที่ถ่ายโอน
$\frac{dQ}{dt}$	คือ การเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิ
$\frac{dQ}{dt}$	คือ อัตราการสูญเสียความร้อน
h	คือ สัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อน
A	คือ พื้นที่ผิวของวัตถุ
$T - T_e$	คือ ผลต่างระหว่างอุณหภูมิของวัตถุกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อม

กฎการเย็นตัวของนิวตันใช้ได้กับกรณีที่ผลต่างระหว่างอุณหภูมิมีค่าน้อย และสัมประสิทธิ์การส่งผ่านความร้อนมีค่าประมาณคงตัวหรือไม่ขึ้นกับอุณหภูมิ และในกรณีที่ไม่มีงานเกิดขึ้น อัตราการสูญเสียความร้อนจะมีค่าเท่ากับค่าลบของอัตราการเปลี่ยนแปลงพลังงานภายใน (dU/dt) ของวัตถุ dU คือ การเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยของพลังงานภายในของระบบ ซึ่งมีความสัมพันธ์กับมวลของวัตถุ (m) และ c เป็นค่าความจุความร้อนจำเพาะ (Specific heat capacity) เมื่อจัดรูปใหม่ให้มีค่าคงตัวในหน่วยของเวลา ($\tau = mc/hA$) สามารถหาความสัมพันธ์ตามกฎการเย็นตัวได้ดังสมการที่ (2) แสดงดังรูปที่ 1

$$T - T_e = (T_0 - T_e)e^{-t/\tau} \quad (2)$$

เมื่อ t	คือ เวลา
T, T_e และ T_0	คือ อุณหภูมิวัตถุ อุณหภูมิสิ่งแวดล้อม และอุณหภูมิที่เวลาเริ่มต้น



รูปที่ 1. กราฟการเย็นตัวของวัตถุตามกฎการเย็นตัวของนิวตัน

2.2 การหาความจุความร้อนจำเพาะด้วยกฎการเย็นตัวของนิวตัน

ความจุความร้อนจำเพาะ หมายถึง ปริมาณของพลังงานที่จำเป็นในการทำให้หนึ่งหน่วยของมวลสารเพิ่มขึ้นหนึ่งองศาเซลเซียส ซึ่งหมายถึงความจุของสารโดยเฉพาะอย่างยิ่งการเก็บความร้อน ความจุความร้อนของวัสดุมากจะมีความสามารถในการเก็บความร้อนได้ดี (Sa-thai, 2020) และกฎการเย็นตัวของนิวตันสามารถนำมาประยุกต์ใช้เพื่อหาค่าความจุความร้อนจำเพาะของวัตถุที่อยู่ในสิ่งแวดล้อมเดียวกันและมีปริมาตรเท่ากันได้ ซึ่งในช่วงการลดลงของอุณหภูมิ $T - T_e$ ที่เท่ากัน วัตถุสองชนิดที่มีปริมาตรเท่ากันและอยู่ในสิ่งแวดล้อมที่มีอุณหภูมิ T_e ค่าเดียวกัน จะมีอัตราการสูญเสียความร้อนที่เท่ากัน โดยความสัมพันธ์ของอัตราการสูญเสียความร้อนของระบบทั้งสองมีค่าเท่ากันที่อุณหภูมิเดียวกันดังสมการที่ (3) ในงานวิจัยนี้จะศึกษาการเย็นตัวของน้ำและน้ำมันพืชที่มีปริมาตรเท่ากันและใส่ในบีกเกอร์ขนาดเดียวกัน

$$\frac{(m_w c_w + m_b c_b)}{\tau_w} = \frac{(m_o c_o + m_b c_b)}{\tau_o} \quad (3)$$

เมื่อ m_w m_b และ m_o คือ มวลของน้ำ บีกเกอร์และน้ำมันพืช

c_w c_b และ c_o คือ ความจุความร้อนจำเพาะของน้ำ บีกเกอร์และน้ำมันพืช

τ_w และ τ_o คือ ค่าคงตัวในหน่วยเวลาของน้ำและน้ำมันพืช

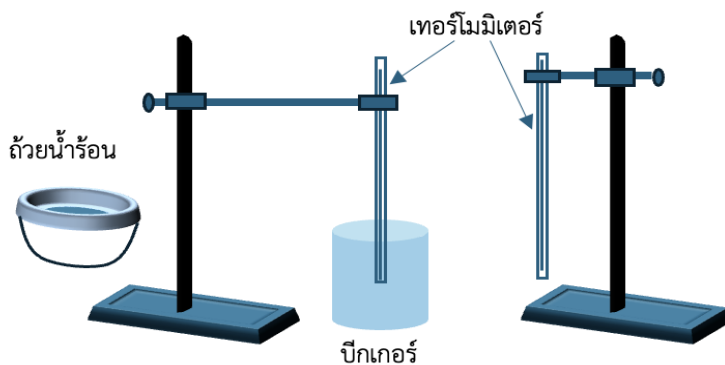
2.3 การหาความจุความร้อนจำเพาะด้วยสมมูลไฟฟ้าความร้อน

การหาความจุความร้อนจำเพาะสามารถหาได้หลายวิธี ทางผู้วิจัยจึงใช้วิธีการหาค่าความจุความร้อนจำเพาะด้วยสมมูลไฟฟ้าความร้อนเพื่อมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากวิธีของกฎการเย็นตัวของนิวตัน โดยวิธีสมมูลไฟฟ้าความร้อน เริ่มจากการให้ความร้อนแก่ของเหลวด้วยแหล่งกำเนิดความร้อนที่สามารถวัดค่า

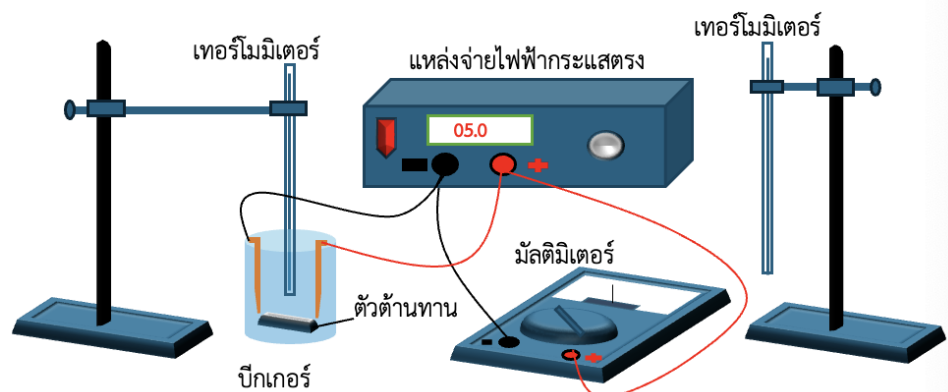
พลังงานความร้อน Q อุณหภูมิ ΔT ที่เพิ่มขึ้นของของเหลว มีความสัมพันธ์กับพลังงานความร้อน Q ที่ของเหลวได้รับ ซึ่งการให้ความร้อนด้วยตัวต้านทานที่ต่ออยู่กับแหล่งจ่ายไฟที่มีศักย์ไฟฟ้าตกคร่อม มีอัตราการสูญเสียพลังงานไฟฟ้า (กำลังไฟฟ้า) ($P = V^2/R$) พลังงานไฟฟ้าที่สูญเสียไปจะอยู่ในรูปความร้อนที่แผ่ออกมาจากตัวต้านทาน และตัวต้านทานที่จุ่มลงในของเหลวเป็นเวลา Δt พลังงานความร้อน E ที่ตัวต้านทานถ่ายเทให้กับของเหลว หากสมมติว่าไม่คิดการสูญเสียพลังงาน พลังงานความร้อน E มีค่าเท่ากับพลังงานความร้อน Q ที่ทำให้ของเหลวมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น (ΔT) กระบวนการให้ความร้อนนี้เรียกว่า กระบวนการให้ความร้อนจูล (Joule heating) หรือสมมูลไฟฟ้าความร้อน และความจุความร้อนจำเพาะ (Serway & Jewett, 2015) สามารถหาได้จากสมการที่ (4)

$$c = \frac{P}{m \left(\frac{\Delta T}{\Delta t} \right)} \quad (4)$$

ในการทดลองผู้วิจัยได้กำหนดขอบเขตเนื้อหาในการเรียนการสอนเรื่องกฎการเย็นตัวของนิวตัน เพื่อหาความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมันพืช โดยใช้น้ำมันพืชตราโบ๊ส เป็นน้ำมันพืชที่สกัดจากผลปาล์มน้ำมันซึ่งทนความร้อนสูงและมีความเสถียรสูงไม่เหม็นหืนง่ายเมื่อเทียบกับน้ำมันพืชชนิดอื่น โดยมีการทดลอง 2 ตอน คือ กฎการเย็นตัวของนิวตันและการหาความจุความร้อนจำเพาะด้วยสมมูลไฟฟ้าความร้อน ผู้วิจัยออกแบบชุดการทดลองดังรูปที่ 2 และ 3



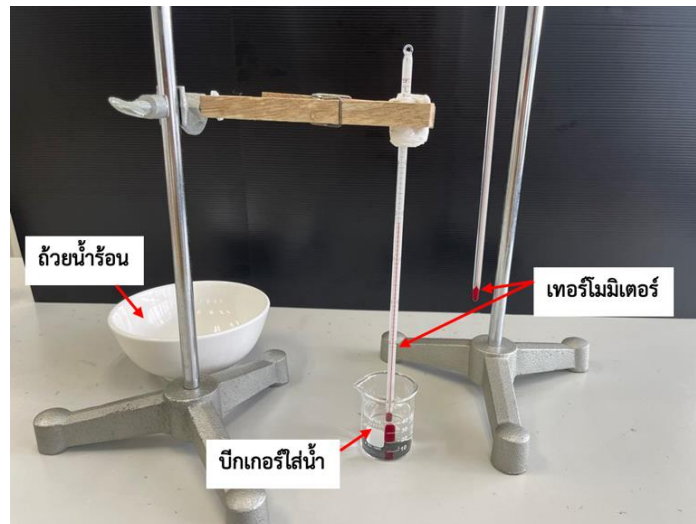
รูปที่ 2. แบบการจัดวางชุดการทดลองกฎการเย็นตัวของนิวตัน



รูปที่ 3. แบบการจัดวางชุดการทดลองสมมูลไฟฟ้าความร้อน

การทดลองตอนที่ 1 กฎการเย็นตัวของนิวตัน ศึกษาการเย็นตัวของน้ำและน้ำมันพืชที่มีปริมาตรเท่ากัน มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

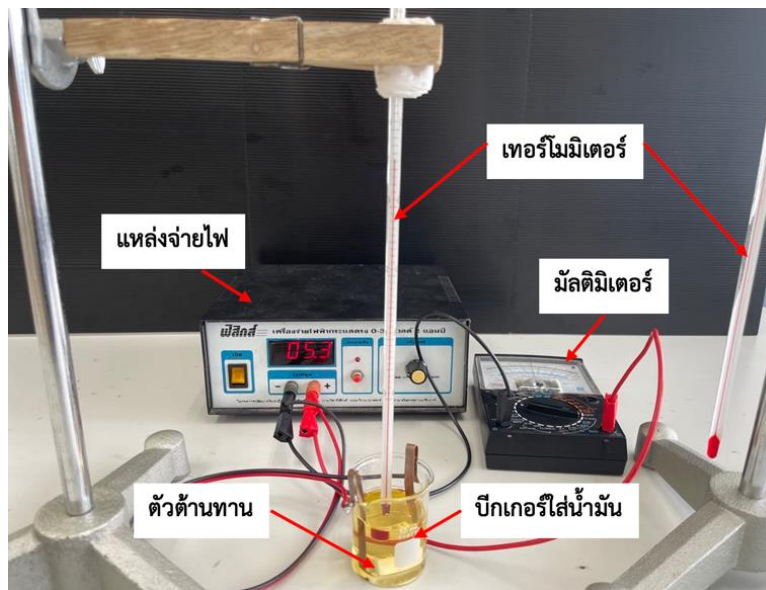
- 1) ชั่งหามวลปิกเกอร์ (m_b)
- 2) ตวงน้ำ 40 ลูกบาศก์เซนติเมตร ลงในปิกเกอร์ แล้วนำไปชั่งเพื่อหามวลของน้ำ (m_w)
- 3) นำปิกเกอร์จุ่มลงในถ้วยน้ำร้อน พร้อมกับคนน้ำในปิกเกอร์ตลอดเวลา จนน้ำในปิกเกอร์มีอุณหภูมิประมาณ 47 องศาเซลเซียส
- 4) นำปิกเกอร์ออกจากน้ำร้อนและจัดชุดการทดลอง ดังรูปที่ 4
- 5) เริ่มบันทึกเวลาเมื่ออุณหภูมิของน้ำมีค่าเท่ากับ 45 องศาเซลเซียส และบันทึกเวลาต่อเนื่องทุก 1 องศาเซลเซียส จนอุณหภูมิของน้ำมีค่าเท่ากับ 30 องศาเซลเซียส พร้อมทั้งบันทึกอุณหภูมิห้องควบคู่ไปด้วย
- 6) ทำการทดลองซ้ำโดยเปลี่ยนของเหลวเป็นน้ำมันพืช
- 7) วิเคราะห์ผลการทดลองและเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างอุณหภูมิกับเวลา เพื่อหาค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมันพืช ด้วยสมการที่ (3)



รูปที่ 4. ชุดการทดลองสำหรับศึกษาการเย็นตัวของน้ำและน้ำมันพืช

การทดลองตอนที่ 2 การหาความจุความร้อนจำเพาะด้วยสมมูลไฟฟ้าความร้อน ในการทดลองตอนที่ 2 หาความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมันพืชเพื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากตอนที่ 1 โดยใช้สมมูลไฟฟ้าความร้อน มีขั้นตอนการทดลองดังนี้

- 1) ตวงน้ำมันพืช 40 ลูกบาศก์เซนติเมตร ลงในบีกเกอร์ แล้วชั่งหามวลเหมือนตอนที่ 1
- 2) ต่อตัวต้านทานขนาด 5.2 โอห์ม เข้ากับแหล่งจ่ายไฟ แล้วนำมัลติมิเตอร์ย่าน 10 DCV มาต่อคร่อมเพื่อวัดความต่างศักย์
- 3) นำตัวต้านทานที่ต่อสายเข้ากับแหล่งจ่ายไฟ มาจุ่มลงในน้ำมันพืช โดยเว้นระยะห่างระหว่างตัวต้านทานและเทอร์โมมิเตอร์ราว 1 เซนติเมตร และให้เทอร์โมมิเตอร์อยู่เยื้องจากตัวต้านทาน จัดชุดการทดลอง ดังรูปที่ 5
- 4) เปิดแหล่งจ่ายไฟแล้วปรับแรงดันไฟฟ้าให้ได้ประมาณ 5 โวลต์ โดยอ่านจากหน้าปัดของมัลติมิเตอร์พร้อมกับเริ่มจับเวลา
- 5) บันทึกเวลาทุก ๆ ค่าอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น 0.5 องศาเซลเซียส จนน้ำมันมีอุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส ในระหว่างการทดลองคนน้ำมันพืชตลอดเวลา
- 6) เมื่อทำการทดลองเสร็จ ปิดแหล่งจ่ายไฟ
- 7) วิเคราะห์ผลการทดลองและเขียนกราฟความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำมันพืชกับเวลา เพื่อหาค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมันพืช ด้วยสมการที่ (4)



รูปที่ 5. ชุดทดลองสำหรับหาความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมันพืช

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 ผลการศึกษาและทดสอบกฎการเย็นตัวของนิวตันในน้ำและน้ำมันพืช

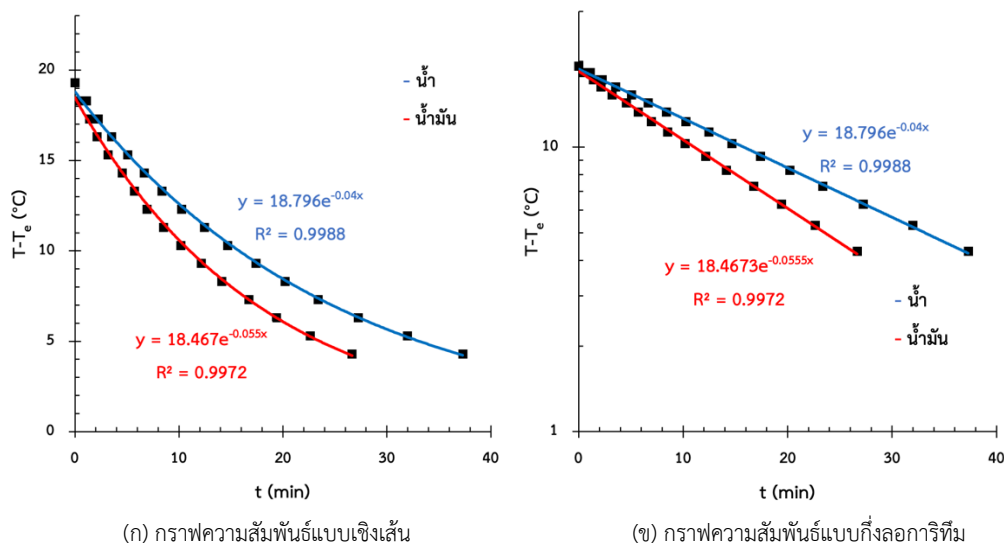
ในการทดสอบว่าชุดการทดลองที่สร้างขึ้นสามารถนำมาใช้เพื่อหาค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำและน้ำมันพืช โดยผู้วิจัยใช้ค่าความจุความร้อนจำเพาะมาตรฐานของน้ำเท่ากับ $4.180 \text{ J/g}\cdot\text{K}$ (Phetcharat et al., 2023) และบีกเกอร์เท่ากับ $0.830 \text{ J/g}\cdot\text{K}$ (MatWeb, n.d.) มาคำนวณหาค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมันพืช ผู้วิจัยศึกษาการเย็นตัวของน้ำและน้ำมันพืชที่มีปริมาตรเท่ากันและใช้บีกเกอร์ขนาดเดียวกัน ซึ่งอัตราสูญเสียความร้อนของระบบทั้งสองมีค่าเท่ากันในช่วงอุณหภูมิเดียวกัน แสดงความสัมพันธ์ดังสมการที่ (3) ได้มีการทดลองหาความสัมพันธ์ผลต่างอุณหภูมิของวัตถุกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมกับเวลาเขียนกราฟเพื่อนำความสัมพันธ์จากกราฟไปวิเคราะห์หาความจุความร้อนจำเพาะของน้ำและน้ำมันพืชได้ผลการทดลองดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1. ผลการทดลองแสดงเวลาที่อุณหภูมิต่าง ๆ ของน้ำและน้ำมันพืช

T±0.5 (°C)	การเย็นตัวของน้ำ					การเย็นตัวของน้ำมันพืช					T-T _{eav} (°C)	ln(T-T _{eav})
	เวลาบนนาฬิกา			t (min)	T _e (°C)	เวลาบนนาฬิกา			t (min)	T _e (°C)		
	ชั่วโมง	นาที	วินาที			ชั่วโมง	นาที	วินาที				
45.0	9	0	26	0.00	26.5	9	51	21	0.00	25.5	19.3	3.0
44.0	9	1	32	1.10	26.5	9	51	50	0.48	25.5	18.3	2.9
43.0	9	2	40	2.23	26.5	9	52	44	1.38	25.5	17.3	2.9
42.0	9	3	58	3.53	26.5	9	53	29	2.13	25.5	16.3	2.8
41.0	9	5	29	5.05	26.5	9	54	32	3.18	25.5	15.3	2.7
40.0	9	7	05	6.65	26.5	9	55	54	4.55	25.5	14.3	2.7
39.0	9	8	48	8.37	26.5	9	57	03	5.70	25.5	13.3	2.6
38.0	9	10	41	10.25	26.5	9	58	17	6.93	25.5	12.3	2.5
37.0	9	12	53	12.45	26.0	9	59	51	8.50	25.0	11.3	2.4
36.0	9	15	06	14.67	26.0	10	1	32	10.18	25.0	10.3	2.3
35.0	9	17	49	17.38	26.0	10	3	30	12.15	25.0	9.3	2.2
34.0	9	20	38	20.20	26.0	10	5	28	14.12	25.0	8.3	2.1
33.0	9	23	48	23.37	25.5	10	8	05	16.73	25.0	7.3	2.0
32.0	9	27	40	27.23	25.5	10	10	44	19.38	25.0	6.3	1.8
31.0	9	32	24	31.97	25.5	10	13	58	22.62	25.0	5.3	1.7
30.0	9	37	43	37.28	25.5	10	18	00	26.65	25.0	4.3	1.5

จากตารางที่ 1 ในการทดลองทดสอบกฎการเย็นตัวของนิวตันในน้ำและน้ำมันพืช มีการวัดอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเมื่อน้ำและน้ำมันพืชมีอุณหภูมิลดลงทุก ๆ 1 องศา และหาค่าอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมเฉลี่ย ($T_{eav} = 25.7^{\circ}\text{C}$) มาใช้ในการวิเคราะห์ผลการทดลอง เนื่องจากการใช้กฎการเย็นตัวของนิวตันเพื่อหาค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมันพืช น้ำและน้ำมันพืชต้องอยู่ในสิ่งแวดล้อมที่อุณหภูมิค่าเดียวกัน

กราฟความสัมพันธ์ระหว่างผลต่างอุณหภูมิของวัตถุกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมกับเวลา ดังรูปที่ 6(ก) จะเป็นแบบเอกซ์โพเนนเชียล ซึ่งเป็นตามกฎการเย็นตัวของนิวตันดังสมการที่ (2) เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้กราฟความสัมพันธ์แบบกึ่งลอการิทึม (Semi-logarithm) ดังรูปที่ 6(ข) จะได้ความสัมพันธ์เชิงเส้น จากนั้น ใช้ฟังก์ชัน linest เพื่อวิเคราะห์ความถูกต้องของเส้นแนวโน้ม พิจารณา Standard Error Y Estimate มีค่าน้อยบ่งบอกว่าความคลาดเคลื่อนของข้อมูลต่ำ เส้นแนวโน้มเหมาะสำหรับวิเคราะห์ข้อมูล พิจารณา Standard Error Slope มีค่าความผิดพลาดต่ำแสดงให้เห็นว่าค่าความชันที่ได้มีความน่าเชื่อถือ และข้อมูลกระจายตัวต่ำ นำค่าความชัน (Slope) จากสมการเส้นตรง ซึ่งเท่ากับส่วนกลับค่าคงตัวในหน่วย



LINEST (Water)		
Slope	-0.0400	2.9337
Standard Error Slope	0.0003	0.0054
R ²	0.9992	0.0134
LINEST (Oil)		
Slope	-0.0555	2.9160
Standard Error Slope	0.0006	0.0073
R ²	0.9985	0.0186

รูปที่ 6. ความสัมพันธ์ผลต่างอุณหภูมิของวัตถุกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมกับเวลา

ของเวลา ($slope = -\frac{1}{\tau}$) สามารถคำนวณหาค่าคงตัวในหน่วยของเวลาของน้ำ (τ_w) มีค่าเท่ากับ 25.00 นาที และค่าคงตัวในหน่วยของเวลาของน้ำมัน (τ_o) มีค่าเท่ากับ 18.02 นาที นำค่า τ_w , τ_o และ $m_w = 39.96 \pm 0.01$ g, $m_b = 30.63 \pm 0.01$ g และ $m_o = 35.89 \pm 0.01$ g แทนค่าในสมการที่ (3) สามารถหาค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมันพืชได้เท่ากับ 3.156 J/g·K ดังนั้นผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้กฎการเย็นตัวของนิวตันในน้ำและน้ำมันพืชที่มีปริมาตรเท่ากัน บีกเกอร์ขนาดเดียวกัน โดยใช้ค่าความจุความร้อนจำเพาะมาตรฐานของน้ำที่ทราบค่า ($c_w = 4.180$ J/g·K) และค่าคงตัวในหน่วยของเวลาของน้ำและน้ำมันพืช สามารถใช้ทดลองหาค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมันพืชได้ ปัจจัยที่มีผลต่อความคลาดเคลื่อนของผลการทดลอง ได้แก่ การอ่านค่าอุณหภูมิจากเทอร์โมมิเตอร์ ผู้ทดลองควรอ่านค่าอุณหภูมิในระดับสายตาเพื่อให้ได้ค่าที่แม่นยำมากที่สุด นอกจากนี้ในระหว่างการทดลอง ผู้ทดลองควรคนน้ำและน้ำมันพืชอย่างต่อเนื่องเพื่อให้ความร้อนกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ

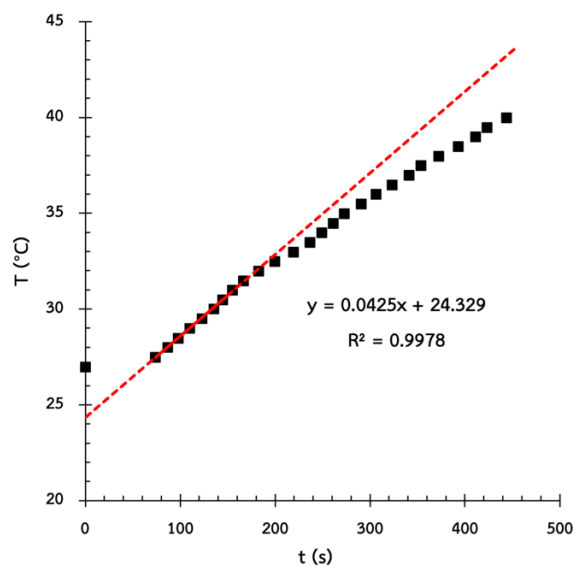
3.2 ผลการทดลองการหาความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมันพืชด้วยสมมูลไฟฟ้าความร้อน

เนื่องจากน้ำมันพืชที่ใช้ในการทดลอง ไม่มีค่าความจุความร้อนจำเพาะมาตรฐานสำหรับเปรียบเทียบ จึงต้องทำการทดลองวัดค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมันพืชด้วยวิธีอื่น และนำมาเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากวิธีของกฎการเย็นตัวของนิวตัน ผู้วิจัยเลือกใช้สมมูลไฟฟ้าความร้อน ในการทดลองนี้ให้ความร้อนด้วยตัวต้านทานที่ต่ออยู่กับแหล่งจ่ายไฟ พลังงานที่สูญเสียไปจะอยู่ในรูปของความร้อนที่แผ่ออกมาจากตัวต้านทาน เขียนกราฟเพื่อนำความสัมพันธ์ไปวิเคราะห์หาค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมันพืชโดยใช้สมการที่ (4) พิจารณาข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำมันพืชที่เพิ่มขึ้นกับเวลาในช่วงแรกที่มีลักษณะเป็นเชิงเส้น เนื่องจากในช่วงเริ่มต้นของการให้ความร้อน น้ำมันจะมีอัตราการเพิ่มขึ้นของอุณหภูมิที่ค่อนข้างสม่ำเสมอ โดยสามารถอธิบายได้ว่า พลังงานความร้อน E ที่ตัวต้านทานถ่ายเทให้ของเหลว ($E = P\Delta t$) มีค่าเท่ากับพลังงานความร้อน ($Q = mc\Delta T$) ที่ทำให้ของเหลวมีอุณหภูมิเพิ่มขึ้น ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างอุณหภูมิและเวลา ตามกระบวนการให้ความร้อนจุลหรือสมมูลไฟฟ้าความร้อน อย่างไรก็ตาม เมื่ออุณหภูมิของน้ำมันเพิ่มขึ้นถึงจุดที่มีการเปลี่ยนแปลงสถานะ ความสัมพันธ์นี้อาจไม่เป็นเชิงเส้นอีกต่อไป เนื่องจากจะมีการใช้พลังงานในการเปลี่ยนสถานะเป็นพลังงานแฝงแทนการเพิ่มอุณหภูมิ ทำให้กราฟในช่วงหลังแสดงลักษณะที่ไม่เป็นเชิงเส้นและมีการเปลี่ยนแปลงที่ชัดเจนขึ้น ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 2

ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำมันพืชที่เพิ่มขึ้นกับเวลา นำมาหาสมการเส้นตรงโดยใช้ฟังก์ชัน linest เมื่อได้ค่าความชันจากสมการเส้นตรงมีค่าเท่ากับ $0.0425\text{ }^{\circ}\text{C/s}$ ค่ากำลังไฟฟ้า (P) มีค่าเท่ากับ 4.81 W และ $m_o = 36.23 \pm 0.01\text{ g}$ นำไปแทนค่าในสมการที่ (4) สามารถคำนวณความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมันพืชได้เท่ากับ $3.119\text{ J/g}\cdot\text{K}$ ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างจากวิธีกฎการเย็นตัวของนิวตัน 1.2% ดังนั้นผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า การใช้สมมูลไฟฟ้าความร้อนโดยให้ความร้อนด้วยตัวต้านทานที่ต่ออยู่กับแหล่งจ่ายไฟ พลังงานที่สูญเสียไปจะอยู่ในรูปของความร้อนที่แผ่ออกมาจากตัวต้านทาน และศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำมันพืชที่เพิ่มขึ้นกับเวลา สามารถใช้ทดลองหาค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมันพืชได้ ปัจจัยที่มีผลต่อความคลาดเคลื่อนของผลการทดลอง ได้แก่ การอ่านค่าอุณหภูมิจากเทอร์มิสเตอร์ ระยะห่างระหว่างเทอร์มิเตอร์และตัวต้านทาน ในระหว่างการทดลองควรคนน้ำมันพืชอย่างต่อเนื่องเพื่อให้ความร้อนกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ และการเลือกพิตข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำมันพืชที่เพิ่มขึ้นกับเวลาในช่วงแรกที่มีลักษณะเป็นเชิงเส้น

ตารางที่ 2. ข้อมูลอุณหภูมิของน้ำมันพืชที่เพิ่มขึ้นกับเวลา

T ± 0.5 ($^{\circ}\text{C}$)	เวลา		t (s)
	นาที	วินาที	
27.0	0	00.00	0.00
27.5	1	13.63	73.63
28.0	1	26.62	86.62
28.5	1	37.57	97.57
29.0	1	49.79	109.79
29.5	2	02.82	122.82
30.0	2	15.58	135.58
30.5	2	24.73	144.73
31.0	2	34.70	154.70
31.5	2	46.59	166.59
32.0	3	02.51	182.51
32.5	3	19.42	199.42
33.0	3	38.97	218.97
33.5	3	56.75	236.75
34.0	4	09.26	249.26
34.5	4	21.08	261.08
35.0	4	32.81	272.81
35.5	4	50.51	290.51
36.0	5	06.11	306.11
36.5	5	22.98	322.98
37.0	5	40.89	340.89
37.5	5	53.33	353.33
38.0	6	12.10	372.10
38.5	6	32.96	392.96
39.0	6	51.16	411.16
39.5	7	03.25	423.25
40.0	7	23.75	443.75



LINEST		
Slope	0.0425	24.3386
Standard Error Slope	0.0008	0.0959
R^2	0.9978	0.0614

รูปที่ 7. ความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำมันพืชที่เพิ่มขึ้นกับเวลา

3.3 ผลการนำชุดการทดลองใช้ในรายวิชาปฏิบัติการฟิสิกส์ขั้นสูง

ผู้วิจัยนำชุดการทดลองไปใช้ในการเรียนการสอนรายวิชาปฏิบัติการฟิสิกส์ขั้นสูง แสดงผลการทดลองจำนวน 7 กลุ่ม แสดงดังตารางที่ 3 และ 4 เพื่อนำมาวิเคราะห์ประสิทธิภาพชุดการทดลองและความถูกต้อง

ผลการศึกษาและทดสอบกฎการเย็นตัวของนิวตันในน้ำและน้ำมันพืช ดังผลการทดลองในตารางที่ 3 เมื่อหาความสัมพันธ์ผลต่างอุณหภูมิของวัตถุกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมกับเวลา นำมาหาสมการเส้นตรงโดยใช้ฟังก์ชัน linest นำค่าความชัน จากสมการเส้นตรงซึ่งเท่ากับส่วนกลับค่าคงตัวในหน่วยของเวลา สามารถคำนวณหาค่าคงตัวในหน่วยของเวลาของน้ำ กลุ่มที่ 1 ถึง 7 มีค่าเท่ากับ 20.94, 21.53, 23.41, 17.20, 16.85, 17.50 และ 23.07 นาที ตามลำดับ และค่าคงตัวในหน่วยเวลาของน้ำมันพืช กลุ่มที่ 1 ถึง 7 มีค่าเท่ากับ 14.80, 17.29, 17.97, 14.80, 14.63, 12.00 และ 15.34 นาที และคำนวณค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมันพืชได้ กลุ่มที่ 1 ถึง 7 มีค่าเท่ากับ 2.980, 3.183, 3.241, 3.767, 3.705, 2.968 และ 2.634 $\text{J/g}\cdot\text{K}$ ตามลำดับ สาเหตุที่ทำให้ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมันพืชแต่ละกลุ่มมีค่าต่างกันทั้งที่ใช้ น้ำมันพืชชนิดเดียวกัน เนื่องจากความคลาดเคลื่อนจากการอ่านค่าอุณหภูมิจากเทอร์โมมิเตอร์และผู้ทดลองไม่คนน้ำและน้ำมันพืชอย่างต่อเนื่องในการทดลอง ซึ่งค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมันพืชทั้ง 7

กลุ่มสอดคล้องกับค่าจากการทดลองตอนที่ 1 ดังนั้นสามารถสรุปได้ว่า ชุดการทดลองที่ทำขึ้นนี้มีประสิทธิภาพและมีความถูกต้องน่าเชื่อถือ

ตารางที่ 3. ผลการศึกษาและทดสอบกฎการเย็นตัวของนิวตันในน้ำและน้ำมันพืช

กลุ่มที่	สมการเส้นตรงจากฟังก์ชัน linest				ค่าคงตัวในหน่วย ของเวลา (min)		ความจุความร้อนจำเพาะ น้ำมันพืช (J/g*K)
	Slope		Intercept				
	Standard Error Slope		Standard Error intercept				
	R ²		Standard Error Y Estimate				
	น้ำ		น้ำมันพืช		น้ำ	น้ำมันพืช	
1	-0.0478	3.0166	-0.0676	2.9912	20.94	14.80	2.980
	0.0004	0.0047	0.0011	0.0097			
	0.9992	0.0115	0.9964	0.0244			
2	-0.0464	2.9142	-0.0580	2.9240	21.53	17.29	3.183
	0.0009	0.0118	0.0001	0.0120			
	0.9956	0.0305	0.9960	0.0300			
3	-0.0427	2.9821	-0.0556	2.9635	23.41	17.97	3.241
	0.0003	0.0046	0.0008	0.0095			
	0.9993	0.0115	0.9969	0.0239			
4	-0.0581	2.9657	-0.0676	2.9544	17.20	14.80	3.767
	0.0006	0.0066	0.0050	0.0054			
	0.9987	0.0162	0.9910	0.0135			
5	-0.0593	2.9806	-0.0684	2.9880	16.85	14.63	3.705
	0.0002	0.0023	0.0009	0.0089			
	0.9998	0.0056	0.9978	0.0212			
6	-0.0573	3.0701	-0.0830	3.0254	17.50	12.00	2.968
	0.0012	0.0152	0.0007	0.0058			
	0.9938	0.0336	0.9989	0.0137			
7	-0.0433	2.9773	-0.0652	2.9604	23.07	15.34	2.634
	0.0003	0.0055	0.0009	0.0086			
	0.9991	0.0135	0.9977	0.0213			

ตารางที่ 4. ผลการทดลองการหาความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมันพืชด้วยสมมูลไฟฟ้าความร้อน

กลุ่มที่	สมการเส้นตรงจากฟังก์ชัน linest		ความจุความร้อน จำเพาะน้ำมันพืช (J/g·K)	เปอร์เซ็นต์ความแตกต่าง จากวิธีการเยนตัวของ นิวตัน
	Slope	Intercept		
	Standard Error Slope	Standard Error Intercept		
	R ²	Standard Error Y Estimate		
1	0.0393	24.6969	2.961	0.64
	0.0013	0.1414		
	0.9968	0.0512		
2	0.0377	27.2708	3.375	5.86
	0.0008	0.1090		
	0.9975	0.0596		
3	0.0355	24.8807	3.246	0.15
	0.0007	0.0878		
	0.9971	0.0704		
4	0.0392	26.4117	3.573	5.29
	0.0015	0.1262		
	0.9924	0.1025		
5	0.0339	25.3988	3.953	6.48
	0.0006	0.1540		
	0.9919	0.3638		
6	0.0489	25.5166	2.730	8.35
	0.0019	0.0811		
	0.9952	0.0630		
7	0.0518	22.6343	2.823	6.93
	0.0049	0.4716		
	0.9731	0.1496		

ผลการทดลองการหาความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมันพืชด้วยสมมูลไฟฟ้าความร้อน หาความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำมันพืชที่เพิ่มขึ้นกับเวลา ดังแสดงผลการทดลองในตารางที่ 4 นำมาหาสมการเส้นตรงโดยใช้ฟังก์ชัน linest เมื่อได้ค่าความชันจากสมการเส้นตรง กลุ่มที่ 1 ถึง 7 มีค่าเท่ากับ 0.0393, 0.0377, 0.0355, 0.0392, 0.0339, 0.0489 และ 0.0518 °C/s ตามลำดับ นำไปแทนค่าในสมการที่ (4) สามารถคำนวณความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมันพืช กลุ่มที่ 1 ถึง 7 มีค่าเท่ากับ 2.961, 3.375, 3.246, 3.573, 3.953, 2.730 และ 2.823 J/g·K ตามลำดับ สาเหตุที่ทำให้ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมันพืช แต่ละกลุ่มมีค่าต่างกันทั้งที่ใช้ น้ำมันพืชชนิดเดียวกัน เนื่องจากความคลาดเคลื่อนของการเลือกข้อมูลช่วงแรกที่มีลักษณะเป็นเชิงเส้นของความสัมพันธ์ระหว่างอุณหภูมิของน้ำมันพืชที่เพิ่มขึ้นกับเวลา ค่าที่คำนวณได้ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างจากวิธีการเยนตัวของนิวตัน กลุ่มที่ 1 ถึง 7 ซึ่งมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างจากวิธีการเยนตัวของนิวตัน เท่ากับ 0.64, 5.86, 0.15, 5.29, 6.48, 8.35 และ 6.93 ตามลำดับ

ดังนั้นแสดงให้เห็นว่า ชุดการทดลองที่ทำขึ้นมีประสิทธิภาพ มีความถูกต้อง และสามารถนำไปใช้ศึกษาการหาความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมันพืชด้วยสมมูลไฟฟ้าความร้อนได้ เมื่อนำค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมันพืชที่หาด้วยวิธีการเย้นตัวของนิวัตน์และด้วยวิธีสมมูลไฟฟ้าความร้อน หาประสิทธิภาพของวิธีการทดลองมีความแตกต่างกันหรือไม่ โดยเปรียบเทียบผลการทดลองจากวิธีการทดลองที่สัมพันธ์กัน ใช้สถิติทดสอบที่แบบ Paired Sample t-test พบว่า ค่าสถิติทดสอบที่มีค่าเท่ากับ 4.08 มากกว่าค่าวิกฤตซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.94 หมายความว่า ประสิทธิภาพของวิธีการทดลองทั้งสองวิธีแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 สามารถนำไปใช้ศึกษาการหาความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมันพืชได้

4. สรุปผลการวิจัย

จากผลการทดลองและข้อมูลที่ได้จากกราฟความสัมพันธ์ การคำนวณและวิเคราะห์กราฟ คำนวณค่าคงตัวในหน่วยของเวลา ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำและน้ำมันพืช งานวิจัยนี้สำเร็จตามวัตถุประสงค์ของการวิจัย สรุปผลการวิจัยได้ดังนี้

1) ชุดการทดลองที่ทำขึ้นสามารถใช้ในการศึกษาและทดสอบกฎการเย้นตัวของนิวัตน์ในน้ำและน้ำมันพืชได้ พิจารณาจากกราฟความสัมพันธ์ผลต่างอุณหภูมิของวัตถุกับอุณหภูมิสิ่งแวดล้อมกับเวลาที่ได้จากการทดลอง มีความสัมพันธ์แบบเอกซ์โพเนนเชียลซึ่งเป็นตามกฎการเย้นตัวของนิวัตน์ และสามารถหาค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมันพืชด้วยวิธีการเย้นตัวของนิวัตน์และสมมูลไฟฟ้าความร้อนได้ โดยใช้วัสดุที่หาง่าย ราคาประหยัด และนำอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ที่มีอยู่ในห้องปฏิบัติการ นำมาประยุกต์ใช้แทนการจัดหาจัดซื้อชุดอุปกรณ์ทดลองสำเร็จรูป

2) ผลการเปรียบเทียบค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมันพืช ซึ่งใช้วิธีการเย้นตัวของนิวัตน์และสมมูลไฟฟ้าความร้อนจากการทดลอง และนำชุดการทดลองที่ทำขึ้นไปใช้ในการเรียนการสอนรายวิชาปฏิบัติการฟิสิกส์ขั้นสูงพบว่า แต่ละกลุ่มมีเปอร์เซ็นต์ความแตกต่างไม่เกิน 10% ค่าความจุความร้อนจำเพาะของน้ำมันพืชในแต่ละกลุ่มมีค่าใกล้เคียงกัน และประสิทธิภาพของวิธีการทดลองทั้งสองวิธีมีความแตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ดังนั้นแสดงให้เห็นว่าชุดการทดลองที่ทำขึ้นมีความถูกต้องและสามารถนำไปใช้ในการเรียนการสอนได้

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยในครั้งนี้ ขอขอบคุณ ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษฎดา รวิวิศว์พัฒนา ที่ให้คำแนะนำ ข้อเสนอแนะ และคอยสนับสนุนในงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง (References)

Atat, J. G., Umoren, E. B., Ekpo, S. S., & Umoette, U. A. (2024). Determination of specific heat capacities of liquids from some consumable items. *Journal of Advance Research in Medical and Health Science*, 10(4), 47-56. <https://doi.org/10.61841/e1sv7p88>

- Chotisrisuparat, N. (2020). *The use of a thermal imaging camera for learning and studying electrical circuits*. Thai Physics Society. <http://www.thaiphysoc.org/article/215> (in Thai)
- Hemsuree, H., Kopoonpat, S., & Phansuke, P. (2013). *Electrical equivalent of heat apparatus* [Research report]. Prince of Songkla University. (in Thai)
- Institute for the Promotion of Teaching Science and Technology. (2009). *Guide for learning in science for grade 10*. Ministry of Education. (in Thai)
- MatWeb. (n.d.). *Schott BOROFLOAT® borosilicate float glass*. <https://shorturl.asia/TBOIPh>
- Nuangnun, C., Thassana, C., Keaw Nai Hin, S., & Khumphuangdee, S. (2017). A low-cost method for measuring the specific heat of iron nail, copper, and aluminium by using Newton's law of cooling and its comparison. *Rajabhat Rambhai Barni Research Journal*, 11(2), 42-50. (in Thai)
- Phetcharat, S., Buntan, R., & Budcha, P. (2023). Development of water circulating wall system to reduce heat accumulation inside the building. *Journal of Research Unit on Science, Technology and Environment for Learning*, 14(1), 120-130. (in Thai)
- Sakore, A., Mathur, A., Zanjurne, D., & Aland, P. (2019). A study of Newton's law of cooling and its application. *Journal of Emerging Technologies and Innovative Research*, 6(5), 188-192.
- Sarunyanith, S. (2002). *Heat transfer* (1st ed.). Technology Promotion Association (Thailand-Japan). (in Thai)
- Sa-thai. (2020). *What is specific heat?*. Sa-thai. <https://shorturl.at/bJCHN>. (in Thai)
- Serway, R. A., & Jewett, J. W., Jr. (2015). *Physics for scientists and engineers I* [Physics for scientists and engineers with modern physics (9th ed.)] (P. Buranasiri et al., Trans.). Cengage Learning Indo-China. (Original work published 2014). (in Thai)
- Unacademy. (2024). *Newton's law of cooling*. <https://shorturl.asia/b5Mgm>

การวิเคราะห์ความรู้สึกจากบทวิจารณ์ภาษาไทยของผู้บริโภคที่มีต่อสมาร์ทโฟน ในระดับมุมมอง

Aspect-Based Sentiment Analysis for Thai Language from Consumer Reviews Towards Smartphone

นิสริวัฒน์ เจนศิริศักดิ์* ดารารัตน์ ทาสจันทร์ และ ปวีณา วันชัย

Nitthiwat Jensirisak* Dararat Tasachan and Paweena Wanchai

สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์ วิทยาลัยการคอมพิวเตอร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น จ.ขอนแก่น ประเทศไทย

Department of Computer Science, College of Computing, Khon Kaen University, Khon Kaen, Thailand

วันที่ส่งบทความ : 29 กุมภาพันธ์ 2567 วันที่แก้ไขบทความ : 22 พฤษภาคม 2568 วันที่ตอบรับบทความ : 25 พฤษภาคม 2568

Received: 29 February 2024, Revised: 22 May 2025, Accepted: 25 May 2025

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองการวิเคราะห์ความรู้สึกจากบทวิจารณ์ภาษาไทยของผู้บริโภคที่มีต่อสมาร์ทโฟนระดับมุมมอง ประกอบด้วย มุมมองกล้อง มุมมองแบตเตอรี่ มุมมองหน้าจอ มุมมองการประมวลผล และมุมมองราคา รวบรวมข้อมูลจากยูทูบ จำนวน 6 ยี่ห้อ ได้แก่ Apple, Samsung, Xiaomi, Vivo, Oppo และ Huawei จำนวน 67,907 ความคิดเห็น ขั้นตอนการดำเนินงานประกอบไปด้วย 1) การเก็บรวบรวมข้อมูล 2) การจัดเตรียมข้อมูล 3) การวิเคราะห์ความรู้สึกระดับมุมมอง และ 4) การประเมินประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้ได้ใช้แบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine learning) และการเรียนรู้เชิงลึก (Deep learning) การเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการจำแนกความคิดเห็น และประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง จากค่าความแม่นยำ (Precision) ค่าความระลึก (Recall) ค่าความถ่วงดุล (F-Measure) และค่าความถูกต้อง (Accuracy) จากการทดลองพบว่า แบบจำลอง WangchanBERTa ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุดในการจำแนกความคิดเห็น

คำสำคัญ : การวิเคราะห์ความรู้สึกระดับมุมมอง การเรียนรู้ของเครื่อง การเรียนรู้เชิงลึก BERT WangchanBERTa

Abstract

The purpose of this research is to develop a model for aspect-based sentiment analysis for Thai language from consumer reviews towards smartphone which consists of the camera, battery, screen, performance, and price aspects that collected from YouTube with number of 67,907 comments including 6 brands: Apple, Samsung, Xiaomi, Vivo, Oppo, and Huawei. The process consists of: 1) Data collection 2) Data preprocessing 3) Aspect-based sentiment analysis, and 4) Model performance evaluation. This research used machine learning model and deep learning model to compare performance sentiment classification and performance evaluation from precision, recall, F-measure, and accuracy metric. The result suggests WangchanBERTa model is the most reliable method for sentiment classification.

Keywords: Aspect-based sentiment analysis, Machine learning, Deep learning, BERT, WangchanBERTa

1. บทนำ

ในยุคที่สมาร์ทโฟนกลายเป็นเครื่องมือที่สำคัญในการดำเนินชีวิตที่ไม่สามารถหลีกเลี่ยงได้ เช่น เป็นเครื่องมือสำหรับการสื่อสาร การทำงาน การเรียนรู้ และการบันเทิงในชีวิตประจำวัน เป็นต้น โดยสถิติผู้ใช้โทรศัพท์มือถือ 57.5 ล้านคน คิดเป็น 87.9% ของประชาชนทั้งหมด (Marketeer team, 2022) ซึ่งยิ่งทำให้สมาร์ทโฟนในตลาดในขณะนี้หลากหลายยี่ห้อและรุ่นที่ให้คุณสมบัติ (Specification) ที่แตกต่างกันอย่างมาก อีกทั้งยังมีข้อมูลความคิดเห็นของผู้บริโภคที่มีต่อสมาร์ทโฟนเป็นจำนวนมาก จึงทำให้ผู้บริโภคที่ต้องการตัดสินใจซื้อสมาร์ทโฟนเครื่องใหม่อาจทำให้การตัดสินใจเป็นเรื่องที่ยาก เนื่องจากไม่มีตัวช่วยในการวิเคราะห์ความคิดเห็นเหล่านั้นให้เห็นภาพรวมของผู้บริโภคส่วนใหญ่ว่ามีความรู้สึกอย่างไรกับสมาร์ทโฟนยี่ห้อนั้น

งานวิจัยนี้ได้ทำการพัฒนาตัวแบบเพื่อวิเคราะห์ความรู้สึกของผู้บริโภคผ่านบทวิจารณ์ภาษาไทยที่มีต่อสินค้าสมาร์ทโฟนยี่ห้อต่าง ๆ ซึ่งมีการนำข้อมูลมาจากความคิดเห็นบนยูทูบที่มีการวิจารณ์สมาร์ทโฟน โดยทำการวิเคราะห์ในระดับมุมมอง ซึ่งเป็นการวิเคราะห์คุณสมบัติของสมาร์ทโฟน เช่น กล้อง หน้าจอ และแบตเตอรี่ เป็นต้น เพื่อแสดงให้เห็นถึงความพึงพอใจหรือความไม่พึงพอใจของผู้บริโภคที่มีต่อคุณสมบัติของสมาร์ทโฟนได้อย่างละเอียด มากกว่าการวิเคราะห์ความรู้สึกในระดับประโยคที่วิเคราะห์ภาพรวมของประโยค เนื่องจากความคิดเห็นหนึ่งความคิดเห็นอาจมีการแสดงความรู้สึกมากกว่าหนึ่งความรู้สึก เช่น กล้องดีมากแต่แบตเตอรี่เร็ว เป็นต้น การวิเคราะห์ความรู้สึกจะแบ่งข้อความรู้สึกออกเป็น ความรู้สึกเชิงบวก

(Positive) ความรู้สึกกลาง (Neutral) และความรู้สึกเชิงลบ (Negative) ที่ผู้บริโภคมีย่ต่อคุณสมบัติแต่ละคุณสมบัติ จากนั้นทำการวัดประสิทธิภาพของแต่ละเทคนิคเพื่อหาแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุด

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 ทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 การประมวลผลภาษาธรรมชาติ (Natural Language Processing: NLP)

การประมวลผลภาษาธรรมชาติ (SAS, 2022) เป็นการใช้เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ในการช่วยคอมพิวเตอร์เข้าใจภาษาธรรมชาติที่มนุษย์ใช้สื่อสารกันได้ โดยใช้หลักการด้านวิทยาการคอมพิวเตอร์และภาษาศาสตร์เชิงคำนวณ เพื่อให้คอมพิวเตอร์และมนุษย์สื่อสารกันได้อย่างเข้าใจ ซึ่งเทคโนโลยีนี้สามารถทำความเข้าใจและตีความคำพูดของมนุษย์ได้ นอกจากนี้ยังสามารถวัดอารมณ์ และความรู้สึกที่แฝงอยู่ในข้อความ เช่น การวิเคราะห์ความรู้สึก และจับใจความสำคัญของข้อความ

2.1.2 การวิเคราะห์ความรู้สึก (Sentiment analysis)

การวิเคราะห์ความรู้สึกแสดงออกผ่านทางภาษา (Soponwattana, 2019; Thamrongattanarit, 2017) ซึ่งจะทำให้ข้อมูลด้านความคิดเห็นต่าง ๆ สามารถแปลงค่าเป็นความรู้สึกเชิงลึก (Insight) เพื่อประกอบและขึ้นำการตัดสินใจให้กับผู้ใช้ โดยการวิเคราะห์ความรู้สึกจะวิเคราะห์ความรู้สึกของผู้คนโดยแบ่งเป็นความรู้สึกในเชิงบวก ความรู้สึกในเชิงลบ และความรู้สึกที่เป็นกลางหรือไม่แสดงความรู้สึก

การวิเคราะห์ความรู้สึกโดยทั่วไปมี 3 ระดับ ดังนี้

1) การวิเคราะห์ความคิดเห็นในระดับเอกสาร (Document level) การวิเคราะห์ความคิดเห็นในระดับนี้มุ่งเน้นไปที่ความคิดเห็นโดยรวมของเอกสารทั้งหมด หรือข้อความบางส่วน เช่น บทความหรือบทวิจารณ์ผลิตภัณฑ์

2) การวิเคราะห์ความรู้สึกระดับประโยค (Sentence level) การวิเคราะห์ความรู้สึกในระดับนี้มุ่งเน้นไปที่ความรู้สึกของแต่ละบุคคลของประโยคภายในเอกสารหรือข้อความ

3) การวิเคราะห์ความคิดเห็นในระดับแง่มุม (Aspect/Features level) การวิเคราะห์ความคิดเห็นในระดับนี้มีความละเอียดมากขึ้น และมุ่งเน้นไปที่การระบุความรู้สึกของแง่มุมหรือคุณสมบัติเฉพาะภายในเอกสารหรือข้อความ เช่น ความรู้สึกต่ออายุการใช้งานแบตเตอรี่ของผลิตภัณฑ์ในการรีวิวผลิตภัณฑ์

2.1.3 การเรียนรู้ของเครื่อง (Machine learning)

การเรียนรู้ของเครื่อง (Nessessence, 2018) คือ ระบบที่สามารถเรียนรู้ได้จากตัวอย่างโดยปราศจากการป้อนคำสั่ง เครื่องคอมพิวเตอร์สามารถที่จะเรียนรู้จากข้อมูลเพื่อที่จะหาผลลัพธ์ที่แม่นยำรูปแบบการฝึกแบ่งเป็น 2 รูปแบบ ได้แก่

1) การเรียนรู้ของเครื่องแบบมีผู้สอน (Supervised learning) คือ การให้คอมพิวเตอร์วิเคราะห์ โดยสอนหรือนำเข้าข้อมูลเป็นชุดข้อมูลตัวอย่าง เช่น การแยกความรู้สึจากบทวิจารณ์ เป็นต้น

2) การเรียนรู้ของเครื่องแบบไม่มีผู้สอน (Unsupervised learning) เป็นการให้เครื่องคอมพิวเตอร์เรียนรู้ได้ด้วยตนเองโดยไม่มีชุดข้อมูลมาสอน และคอมพิวเตอร์ต้องหาความสัมพันธ์ของข้อมูลเอง โดยไม่มีผลเฉลยกำหนดไว้ล่วงหน้า

ตัวอย่างเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องมีดังนี้

a) ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (Support Vector Machines: SVM) ใช้หลักการหาสมบัติของสมการเพื่อสร้างเส้นแบ่งแยกข้อมูลเป็นกลุ่มหรือคลาสต่าง ๆ ในพื้นที่ข้อมูล (Input space) โดยมุ่งเน้นที่จะค้นหาไฮเปอร์เพลน (Hyperplane) ที่มีระยะห่าง (Margin) ระหว่างข้อมูลแต่ละคลาสมากที่สุด เพื่อให้มีการแบ่งข้อมูลที่แม่นยำและมีประสิทธิภาพในการทำนาย หลักการ SVM สามารถใช้ได้ทั้งในกรณีข้อมูลที่เป็นเส้นตรงและข้อมูลที่ไม่เป็นเส้นตรงด้วยการใช้เทคนิค Kernel ซึ่งงานวิจัยจะใช้กรณีข้อมูลเป็นเส้นตรงดังสมการที่ (1)

$$k(x, y) = x \cdot y \quad (1)$$

เมื่อ k คือ Kernel Function ที่ใช้ในการคำนวณระยะห่างระหว่างข้อมูล
 x และ y คือ เวกเตอร์
 $x \cdot y$ คือ การคูณของสมาชิกที่ตำแหน่งเดียวกันของเวกเตอร์ x และ y

b) นาอิว-เบย์ส (Naïve Bayes) ใช้หลักการคำนวณความน่าจะเป็นของแต่ละสมมติฐาน เพื่อหาว่าสมมติฐานใดที่น่าจะถูกต้องมากที่สุด ซึ่งใช้การคำนวณความน่าจะเป็นแบบมีเงื่อนไขที่เรียกว่า Conditional Probability แสดงได้ดังสมการที่ (2)

$$P(B|A) = \frac{P(A|B) \times P(B)}{P(A)} \quad (2)$$

เมื่อ $P(B|A)$ คือ ค่าความน่าจะเป็นที่เหตุการณ์ B จะเกิดขึ้นเมื่อมีเหตุการณ์ A เกิดขึ้น
 $P(A|B)$ คือ ค่าความน่าจะเป็นที่เหตุการณ์ A จะเกิดขึ้นเมื่อมีเหตุการณ์ B เกิดขึ้น
 $P(A)$ คือ ค่าความน่าจะเป็นที่เหตุการณ์ A จะเกิดขึ้น
 $P(B)$ คือ ค่าความน่าจะเป็นที่เหตุการณ์ B จะเกิดขึ้น

หากมีตัวแปรต้นหรือข้อมูลที่ต้องพิจารณามากกว่า 1 ค่า ความน่าจะเป็นของเหตุการณ์สามารถคำนวณดังสมการที่ (3)

$$P(B|A) = P(A_1|B) \times P(A_2|B) \times \cdots \times P(A_n|B) \times P(B) \quad (3)$$

c) การวิเคราะห์การถดถอยโลจิสติก (Logistic regression) ใช้หลักการ Maximum Likelihood Estimation (MLE) ในการปรับค่าพารามิเตอร์ในแบบจำลอง เพื่อให้แบบจำลองสามารถจำแนกและทำนายผลของข้อมูลได้ดีที่สุด โดย MLE จะหาค่าของพารามิเตอร์ที่ทำให้แบบจำลองทำนายผลของข้อมูลได้ตรงกับความเป็นจริงที่สุด โดยสามารถคำนวณได้ดังสมการที่ (4)

$$P_y = \frac{e^{b_0 + b_1 + b_2 + \cdots + b_n}}{1 + e^{b_0 + b_1 + b_2 + \cdots + b_n}} \quad (4)$$

เมื่อ P_y คือ ความน่าจะเป็นของการเกิดเหตุการณ์ที่สนใจ

$b_0 + b_1 + b_2 + \cdots + b_n$ คือ พารามิเตอร์หรือค่าคงที่ในการปรับแต่งของ Logistic regression

e คือ ค่าของเลขยกกำลังฐาน

2.1.4 การเรียนรู้เชิงลึก (Deep learning)

การเรียนรู้เชิงลึก (Holdsworth & Scapicchio, 2024) เป็นสาขาหนึ่งของการเรียนรู้ของเครื่อง ซึ่งใช้โครงข่ายประสาทเทียม (Neural networks) ที่มีชั้นซ้อนกันหลายชั้น เพื่อการประมวลผลข้อมูลและการเรียนรู้จากข้อมูลปริมาณมาก โครงข่ายประสาทเทียมเหล่านี้ถูกออกแบบให้สามารถเรียนรู้และทำการตัดสินใจได้ด้วยตนเอง โดยไม่ต้องพึ่งพาคำสั่งที่เขียนมาให้ล่วงหน้า ซึ่งการเรียนรู้เชิงลึกได้มีการนำมาประยุกต์ใช้กับการประมวลผลภาษาธรรมชาติเพื่อใช้ในการแปลภาษา การสรุปข้อความ หรือการตอบคำถาม ซึ่งแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพสูงในการประมวลผลภาษาธรรมชาติ ได้แก่ แบบจำลอง Transformer เป็นต้น

ตัวอย่างของแบบจำลอง Transformer มีดังนี้

a) Bidirectional Encoder Representations from Transformers (BERT) เป็นแบบจำลองที่พัฒนาขึ้นเพื่อฝึกการแสดงผลภาษาแบบสองทิศทางจากข้อความที่ไม่มีป้ายกำกับ โดยพิจารณาบริบททั้งด้านซ้ายและขวาในทุกเลเยอร์ แบบจำลอง BERT ที่ได้รับการฝึกฝนมาแล้วสามารถนำไปปรับใช้กับงานต่าง ๆ เช่น การตอบคำถามและการอนุมานภาษา ด้วยการเพิ่มเลเยอร์เอาต์พุตเพียงเลเยอร์เดียว โดยไม่ต้องปรับเปลี่ยนสถาปัตยกรรมของแบบจำลองมากนัก

b) Robustly Optimized BERT Approach (RoBERTa) เป็นแบบจำลองที่เกิดจากการปรับปรุง BERT ที่พัฒนาโดย Facebook โดยมีการเพิ่มประสิทธิภาพการ Pretrain แบบ Masked Language Modeling (MLM) ซึ่งใช้ในการเรียนรู้บริบทของคำในประโยค โดยการทำนายคำที่ขาดหายไปและขยายชุดข้อมูลสำหรับการฝึกอบรมให้ใหญ่ขึ้นถึง 1,000% RoBERTa ตัดการทำงานของ Next sentence prediction ออก และใช้เทคนิคการมาส์กแบบไดนามิกที่เปลี่ยนแปลงโทเค็นที่ถูกมาส์กระหว่างการฝึกอบรม

c) Wangchan Bidirectional Encoder Representations from Transformers Approach (WangchanBERTa) เป็นแบบจำลองภาษาที่พัฒนาโดยทีมวิจัยจากประเทศไทย โดยใช้สถาปัตยกรรม RoBERTa ที่ถูกปรับให้เหมาะสมกับภาษาไทยโดยเฉพาะ เนื่องจากภาษาไทยเป็นภาษาที่ค่อนข้างซับซ้อนจึงจำเป็นต้องสร้างโมเดลเฉพาะของภาษาไทยขึ้นมาเอง

2.2 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

Park & Kwak (2020) ได้วิจัยเกี่ยวกับการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงแบบไดนามิกของความคิดเห็นของลูกค้าโดยใช้การวิเคราะห์ความคิดเห็นระดับประโยค ประกอบไปด้วยความรู้สึกเชิงบวกและเชิงลบ และใช้ข้อมูลสมาร์ตโฟนยี่ห้อ Samsung Galaxy S5 ตั้งแต่ พ.ศ. 2557 ถึง พ.ศ. 2561 ประกอบไปด้วย 3 มุมมอง คือ มุมมองของกล้อง มุมมองของแบตเตอรี่ และมุมมองของหน้าจอ โดยใช้เทคนิคการสร้างคลังพจนานุกรม (Lexicon creation) ในการจำแนกข้อมูลของแต่ละมุมมอง จากผลการทดลองพบว่า มุมมองของกล้องมีค่าความถูกต้อง 92% มุมมองของแบตเตอรี่มีค่าความถูกต้อง 84% และมุมมองของหน้าจอมีค่าความถูกต้อง 86%

Aung & Kyaw (2018) ได้วิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์ความรู้สึกจากบทวิจารณ์สมาร์ตโฟน ประกอบไปด้วยความรู้สึกเชิงบวกและเชิงลบ ข้อมูลที่นำมาใช้ประกอบไปด้วยสมาร์ตโฟน 5 ยี่ห้อ ได้แก่ Apple Samsung LG HTC และ Sony โดยใช้ข้อมูล พ.ศ. 2559 ซึ่งการวิจัยใช้การเรียนรู้ข้อมูลเทคนิคพื้นฐานพจนานุกรม (Dictionary-based) และเทคนิค Naïve Bayes จากผลการทดลองของเทคนิคพื้นฐานพจนานุกรมมีค่าความแม่นยำ 92.66% ค่าความระลึกลับ 97.14% ค่าความถ่วงดุล 76.31% และค่าความถูกต้อง 92.00% ในขณะที่ เทคนิค Naïve Bayes มีค่าความแม่นยำ 92.66% ค่าความระลึกลับ 98.31% ค่าความถ่วงดุล 97.77% และค่าความถูกต้อง 96.53%

Akram et al. (2020) ได้วิจัยเกี่ยวกับระบบแนะนำสมาร์ตโฟนและการวิเคราะห์ความรู้สึกจากบทวิจารณ์ของสมาร์ตโฟนระดับมุมมอง ประกอบไปด้วยความรู้สึกเชิงบวก ความรู้สึกเชิงกลาง และความรู้สึกเชิงลบ โดยข้อมูลประกอบไปด้วย Samsung Galaxy S7, Apple iPhone 6, LG G5 และ Nokia 9 ซึ่งมีการใช้เทคนิค Dependency parsing ในการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ของคำในประโยค และใช้เทคนิค

SVM ในการเรียนรู้ชุดข้อมูล ประกอบไปด้วย 5 มุมมอง ได้แก่ RAM, Storage, Battery, Heating และ Camera และแสดงผลมุมมองต่าง ๆ ที่มีต่อยี่ห้อสมาร์ทโฟนในรูปแบบร้อยละความรู้สึกของแต่ละมุมมอง จากผลการทดลอง มีค่า T-Test ของ Samsung Galaxy S7 = 74% ค่า T-Test ของ Apple iPhone 6 = 86% ค่า T-Test ของ LG G5 = 39% และค่า T-Test ของ Nokia 9 = 32%

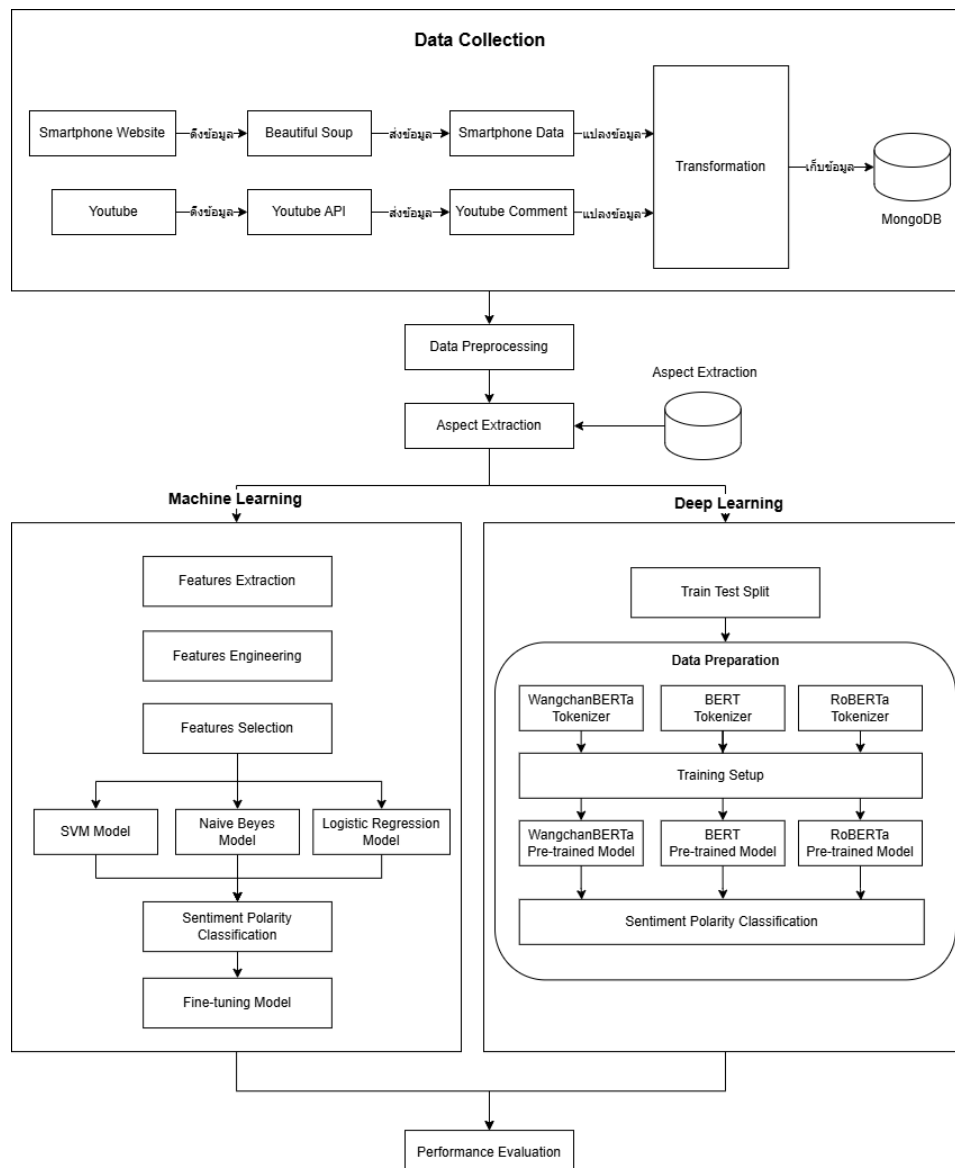
ริสุตา เทศเมือง และ นิเวศ จิระวิชิตชัย (Thetmuang & Jirawichitchai, 2017) ได้วิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์ความคิดเห็นภาษาไทยในการรีวิวสินค้าออนไลน์โดยใช้ขั้นตอนวิธี SVM ซึ่งประกอบไปด้วย ความรู้สึกเชิงบวกและเชิงลบ โดยในงานวิจัยได้นำวิธีการสกัดคุณลักษณะ TF-IDF ผสมผสานกับการเลือกคุณลักษณะการทดสอบค่าไครสแควร์ (Chi-Square test) ในการเลือกคุณลักษณะและนำไปฝึกฝนแบบจำลอง 4 เทคนิค ประกอบไปด้วยเทคนิค SVM เทคนิค Naïve Bayes เทคนิค Decision Tree และเทคนิค K-Nearest Neighbor เพื่อหาแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุด จากผลการทดลองพบว่า เทคนิค SVM มีประสิทธิภาพในการจำแนกคุณลักษณะที่ดีที่สุดที่ 1,000 คุณลักษณะ มีค่าความแม่นยำ 83.83% อันดับรองลงมาคือ เทคนิค Naïve Bayes ที่ 500 คุณลักษณะ มีค่าความแม่นยำ 83.31%

Joshy & Sundar (2022) ได้วิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์ความคิดเห็นในรีวิวภาพยนตร์และทวีตเกี่ยวกับโควิด-19 โดยใช้แบบจำลอง BERT DistilBERT และ RoBERTa ข้อมูลที่ใช้ในการวิจัยมาจากสองแหล่งคือชุดข้อมูล Sentiment 140 และชุดข้อมูล Coronavirus Tweets NLP จากงานวิจัยมีการนำเสนอการใช้แบบจำลอง BERT แบบจำลอง DistilBERT ซึ่งเป็นเวอร์ชันที่เล็กกว่าและเร็วกว่า BERT และ RoBERTa ที่มีการปรับปรุงเพิ่มเติมจาก BERT โดยใช้การแมสก์แบบไดนามิกและฝึกฝนนานกว่า จากผลการทดลองพบว่า แบบจำลอง BERT มีค่าความแม่นยำสูงสุดที่ 93.13% บนชุดข้อมูล Sentiment 140 และ 90.43% บนชุดข้อมูล Coronavirus Tweets NLP แบบจำลอง DistilBERT และ RoBERTa มีความแม่นยำน้อยกว่า โดย DistilBERT มีความแม่นยำ 77.10% และ RoBERTa มีความแม่นยำ 78.20% บนชุดข้อมูล Sentiment 140

Nguyen et al. (2020) ได้วิจัยเกี่ยวกับการวิเคราะห์ความคิดเห็นภาษาเวียดนามเกี่ยวกับการรีวิวสินค้าออนไลน์ โดยใช้แบบจำลอง BERT ซึ่งประกอบไปด้วยความรู้สึกเชิงบวกและเชิงลบ ในงานวิจัยนี้มีการนำเสนอการปรับปรุงแบบจำลอง BERT ด้วยสองวิธีคือ การใช้เฉพาะ [CLS] token เป็นอินพุตสำหรับเครือข่ายนิเวศแบบ Feed-forward และการใช้เวกเตอร์ผลลัพธ์ทั้งหมดของ BERT เป็นอินพุตสำหรับการจำแนกประเภท จากผลการทดลองพบว่า แบบจำลอง BERT ที่ใช้วิธีการปรับปรุงทั้งสองวิธีนี้มีประสิทธิภาพดีกว่าแบบจำลองอื่น ๆ ที่ใช้ GloVe และ FastText นอกจากนี้งานวิจัยยังได้ทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลอง BERT ที่ผสานกับแบบจำลองอื่น ๆ พบว่า แบบจำลอง BERT-RCNN มีความแม่นยำสูงสุดที่ 85.12% รองลงมาคือ BERT-TextCNN ที่มีความแม่นยำ 84.15% และ BERT-LSTM ที่มีความแม่นยำ 83.78% ส่วนแบบจำลอง BERT-base มีความแม่นยำ 83.45%

2.3 วิธีการทดลอง

จากการศึกษาทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ผู้วิจัยได้นำเสนอขั้นตอนการดำเนินงานวิจัยซึ่งประกอบไปด้วย 1) การเก็บรวบรวมข้อมูล (Data collection) 2) การจัดเตรียมและรวบรวมข้อมูล (Data preprocessing) 3) กระบวนการวิเคราะห์ความรู้สึกระดับมุมมอง (Aspect-based sentiment analysis) และ 4) การประเมินประสิทธิภาพ (Performance evaluation) ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1. กรอบแนวคิดงานวิจัย

1) การเก็บรวบรวมข้อมูล

ขั้นตอนที่ 1 เก็บข้อมูลรุ่นของสมาร์ทโฟนแต่ละยี่ห้อ และคุณสมบัติที่เกี่ยวข้องกับรุ่นนั้น ๆ โดยใช้ไลบรารี requests และ BeautifulSoup ซึ่งเป็นภาษาไพธอน (Python) เพื่อทำการสกัดข้อมูลจากเว็บไซต์ที่รวบรวมข้อมูลสมาร์ทโฟนไว้หลากหลายยี่ห้อ การเก็บรวบรวมนั้นจะเก็บข้อมูล ชื่อยี่ห้อ ชื่อรุ่น ปีที่วางขาย และลิงก์คุณสมบัติของแต่ละรุ่น ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2564 ถึง พ.ศ. 2566 จากนั้นนำลิงก์ที่เก็บรวบรวมได้ไปเก็บข้อมูลคุณสมบัติของรุ่นนั้น ๆ โดยข้อมูลที่เก็บรวบรวมนั้นประกอบด้วย ลิงก์คุณสมบัติของรุ่น หน้าจอ กล้อง ซีพียู ระบบปฏิบัติการ หน่วยความจำ และแบตเตอรี่ เมื่อเก็บรวบรวมข้อมูลชื่อรุ่นต่าง ๆ ของแต่ละยี่ห้อ และข้อมูลคุณสมบัติของรุ่นนั้นแล้ว จะทำการนำข้อมูลทั้งสองส่วนมารวมกันในรูปแบบ JSON โดยใช้ลิงก์คุณสมบัติการรวมข้อมูล จากนั้นนำข้อมูลที่รวมแล้วทั้งหมดเก็บไว้ใน MongoDB

ขั้นตอนที่ 2 เก็บข้อมูลความคิดเห็นบนยูทูบ วิธีการเก็บรวบรวมข้อมูลจะนำชื่อรุ่นของแต่ละยี่ห้อที่วางจำหน่ายในปี พ.ศ. 2564 ถึง พ.ศ. 2566 จำนวน 238 รุ่น จาก MongoDB มาใช้เป็นคีย์เวิร์ด (Keyword) ในการค้นหา โดยใช้ Google API เพื่อค้นหาวิดีโอที่เกี่ยวข้อง และทำการเก็บข้อมูลความคิดเห็นจากวิดีโอ นั้น ซึ่งข้อมูลความคิดเห็นที่เก็บรวบรวมได้มีทั้งหมด 67,907 ความคิดเห็น ข้อมูลความคิดเห็นประกอบไปด้วย รหัสความคิดเห็น ข้อความความคิดเห็น ชื่อผู้แสดงความคิดเห็น รหัสผู้แสดงความคิดเห็น จำนวนคนที่ถูกใจข้อความความคิดเห็น วันที่เผยแพร่ข้อความความคิดเห็น ลิงก์ของวิดีโอ คีย์เวิร์ดที่ใช้ในการค้นหาวิดีโอ นั้น คีย์เวิร์ดที่ค้นหาจะเป็นชื่อรุ่นของสมาร์ทโฟนยี่ห้อต่าง ๆ ยี่ห้อสมาร์ทโฟน และประเภทของข้อความความคิดเห็น โดยจะแยกเป็น ข้อความความคิดเห็นที่เป็นความคิดเห็นและความคิดเห็นที่ตอบกลับ จากนั้นทำการเก็บข้อมูลที่ได้ลงใน MongoDB ซึ่งตัวอย่างความคิดเห็นดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1. ตัวอย่างความคิดเห็นบนยูทูบ

ชื่อข้อมูล	ตัวอย่างข้อมูล
รหัสความคิดเห็น	Ugy_UJTOTHmYnvd8SkB4AaABAq
ข้อความความคิดเห็น	ชอบกล้อง กับ ตัดต่อวิดีโอแค่นั้นแหละถ้าจะซื้อไอโฟนมาใช้
ชื่อผู้แสดงความคิดเห็น	พีเลิกระบะนะ
รหัสผู้แสดงความคิดเห็น	UCMJ8iDZpoo0d8fGXDWVZEew
จำนวนถูกใจ	0
วันที่เผยแพร่	2023-06-24
เวลาที่เผยแพร่	20:09:33
ลิงก์วิดีโอ	https://www.youtube.com/watch?v=97bV_hvnUng
คีย์เวิร์ด	iPhone 14
ยี่ห้อสมาร์ทโฟน	Apple
ประเภทความคิดเห็น	Comment

2) การจัดเตรียมและรวบรวมข้อมูล

ขั้นตอนการจัดเตรียมข้อมูล โดยจัดเตรียมข้อมูลที่ไม่เกี่ยวข้องในการฝึกฝนแบบจำลองออก เพื่อให้ข้อมูลพร้อมสำหรับการฝึกฝนแบบจำลองและมีประสิทธิภาพสูงที่สุด ซึ่งมีขั้นตอนวิธีการจัดเตรียมข้อมูลดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การตัดประโยค (Sentence tokenization) การตัดประโยคที่เป็นประโยคยาวออกมาให้เป็นประโยคที่สั้นลงหลายประโยค ซึ่งจะใช้ฟังก์ชัน `sent_tokenize` ของ PyThaiNLP ในการตัดประโยค

ขั้นตอนที่ 2 การวิเคราะห์หาจุดประสงค์ (Social sensing) การหาจุดประสงค์ของประโยคว่าเป็นประโยคร้องขอ (Request) ประโยคความรู้สึก (Sentiment) ประโยคคำถาม (Question) และประโยคโฆษณา (Announcement) ซึ่งจะใช้ `Ssense` ของ AiForThai API ในการวิเคราะห์หาจุดประสงค์ของประโยค เพื่อลดจำนวนประโยคที่ไม่เกี่ยวข้องกับการแสดงความรู้สึกที่มีต่อสมาร์ตโฟน

ขั้นตอนที่ 3 การลบอีโมจิ (Remove emoji) การลบอีโมจิโดยตรวจสอบจาก Regular expression pattern

ขั้นตอนที่ 4 การลบเครื่องหมายวรรคตอน (Remove punctuation) ลบเครื่องหมายวรรคตอนที่ไม่เกี่ยวข้องกับการสร้างแบบจำลอง

ขั้นตอนที่ 5 การลบคำที่ซ้ำซ้อน (Remove repetitions words) วิธีการลบคำที่ซ้ำซ้อนที่มีตัวสะกดที่ซ้ำ 2 ตัวขึ้นไป

ขั้นตอนที่ 6 การลบลิงก์ URL (Remove URL) ลบลิงก์ URL ที่ไม่เกี่ยวข้องกับการฝึกฝนของแบบจำลอง

ขั้นตอนที่ 7 การตัดคำ (Word tokenize) ตัดคำในประโยคให้เป็นคำ ซึ่งจะใช้ฟังก์ชัน `word_tokenize` ของ PyThaiNLP ในการตัดคำและมีการเพิ่มคำที่ฟังก์ชัน `word_tokenize` ตัดคำผิด โดยใช้ `custom_dict` ในการเพิ่มคำเพื่อระบุให้การตัดคำมีการตัดคำ ๆ นั้นให้ถูกต้อง

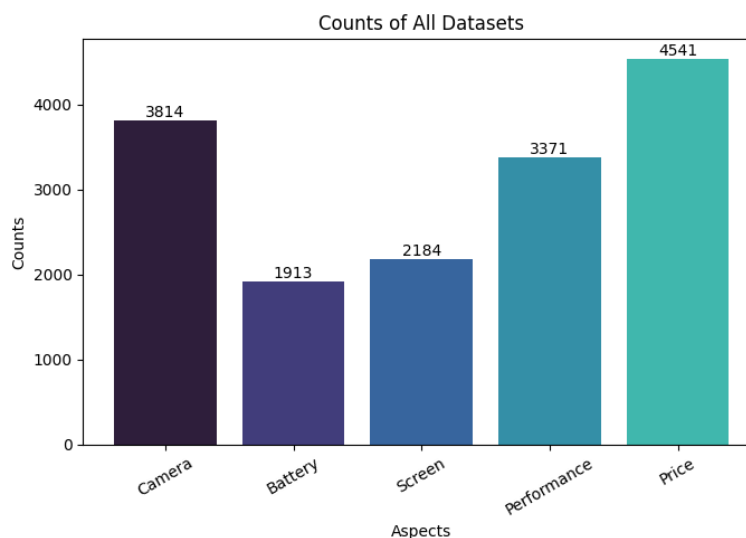
ขั้นตอนที่ 8 การกำกับคำ (Part of speech tagging) การกำกับหน้าที่ของคำ เพื่อนำไปสร้างคลังคำศัพท์ที่เกี่ยวข้องกับมุมมองแต่ละมุมมอง โดยจะคัดเลือกจากหน้าที่ของคำนั้น ๆ ในประโยคที่เป็นคำนามและคำกริยา เพื่อนำไปใช้ในการจัดกลุ่มประโยคว่าประโยคนั้นอยู่ในมุมมองใด รวมถึงมีการนำ TF-IDF เข้ามาช่วยในการให้ความสำคัญของคำในประโยค ซึ่งช่วยให้สามารถคัดเลือกคำศัพท์ที่เกี่ยวข้องได้ง่ายมากยิ่งขึ้น คลังคำศัพท์ที่เกี่ยวข้องของแต่ละมุมมองมีดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2. คลังคำศัพท์ที่เกี่ยวข้องของแต่ละมุมมอง

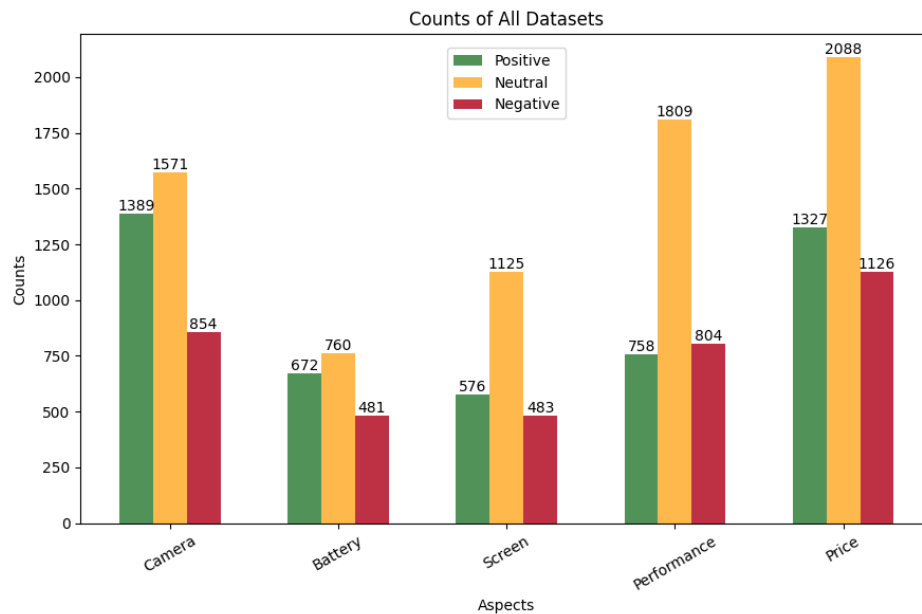
มุมมอง	คำที่เกี่ยวข้อง
กล้อง	กล้อง กล้องหน้า กล้องหลัง กล้องอัลตราไวด์ ถ่าย ถ่ายภาพ ถ่ายรูป ถ่ายคลิป ถ่าย วิดีโอ ถ่ายวิดีโอ ถ่ายหนัง รูปถ่าย เล่นกล้อง เลนส์กล้อง การถ่ายภาพ กล้องถ่ายภาพ hypersmooth ชุม ระยะโฟกัส super steady เซลฟี กันสั่น แฟลช เลนส์ autofocus focus high dynamic range hdr ชัตเตอร์ งานวิดีโอ งานวิดีโอ lidar white balance ไวท์บาลานซ์
แบตเตอรี่	แบตเตอรี่ แบต แบตสำรอง การชาร์จ ชาร์จ ชาง ชาร์ต สายชาร์จ แบตเตอรี่ battery charge
หน้าจอ	จอ จอภาพ หน้าจอ screen สกรีน ทัช lcd amoled fhd fullhd hd display oled รีเฟรชเรท refresh rate dynamic island ไดนามิค ไอซ์แลนด์
การประมวลผล	ชิป ชิพ ชิพ chip chipset ความแรง ความร้อน cpu ระบบ ระบบปฏิบัติการ ระบบความปลอดภัย ประสิทธิภาพ ความเสถียร เสถียร ความลื่น rom รมม รม ram เล่นเกม เกม เล่นเกมส์ สายเกม
ราคา	ราคา ราคาแพง ความแพง แพง ราคาถูก ความถูก ถูก งบ งบประมาณ เงิน ตัง คุ่ม คุ่มค่า ความคุ้ม เรทราคา

3) กระบวนการวิเคราะห์ความรู้สึกระดับมุมมอง

ข้อมูลที่เก็บรวบรวมและผ่านกระบวนการเตรียมข้อมูลประกอบไปด้วย ข้อมูล 5 ชุดข้อมูล ได้แก่ ชุดข้อมูลของมุมมองกล้อง มุมมองแบตเตอรี่ มุมมองหน้าจอ มุมมองการประมวลผล และมุมมองราคา จำนวนข้อมูลและจำนวนข้อมูลของความรู้สึกบวก กลาง และความรู้สึกลบของแต่ละชุดข้อมูล ดังรูปที่ 2 และ 3 ตามลำดับ



รูปที่ 2. จำนวนข้อมูลของแต่ละชุดข้อมูล



รูปที่ 3. จำนวนข้อมูลของความรู้สึกบวก กลาง และความรู้สึกลบของแต่ละมุมมอง

การติดป้ายกำกับความรู้สึก (Sentiment labeling) มีผู้ติดป้ายกำกับจำนวน 3 คน โดยผู้ติดป้ายกำกับจะถูกอบรมเพื่อให้เข้าใจแนวคิดและวิธีการติดป้ายกำกับที่สอดคล้องกัน เนื่องจากชุดข้อมูลประกอบไปด้วยหลายมุมมอง และผู้ติดป้ายกำกับทุกคนจะไม่ทราบผลการติดป้ายกำกับของผู้อื่นมาก่อน ซึ่งผู้วิจัยเลือกป้ายกำกับโดยอาศัยเสียงข้างมาก (2 คนขึ้นไป) ในการฝึกฝนแบบจำลอง การสกัดมุมมอง (Aspect extraction) การสกัดมุมมองหรือการจัดกลุ่มประโยคว่าประโยคอยู่ในมุมมองใด ๆ ซึ่งจะใช้เทคนิค Aspect-Lexicon creation ในการสกัดมุมมองของประโยค โดยการตรวจสอบจากคลังข้อมูลคำที่เกี่ยวข้องกับมุมมอง

a) แบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine learning model)

ขั้นตอนที่ 1 การสกัดคุณลักษณะ (Features extraction) การแปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบที่สามารถนำไปฝึกฝนแบบจำลองได้ โดยผู้วิจัยได้เลือก 2 เทคนิคในการทดลองเปรียบเทียบระหว่าง 2 เทคนิคเพื่อหาเทคนิคที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด ได้แก่ Bag of Words การนับจำนวนความถี่ของคำในประโยคและ Term Frequency-Inverse Document Frequency (TF-IDF) การระบุค่าความสำคัญของคำจากทุก Document

ขั้นตอนที่ 2 วิศวกรรมคุณลักษณะ (Features engineering) กระบวนการในการสร้างคุณลักษณะใหม่หรือปรับปรุงคุณลักษณะที่มีอยู่ในชุดของข้อมูล เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพให้กับแบบจำลองและช่วยให้แบบจำลองเข้าใจความสัมพันธ์ของข้อมูลที่มีอยู่ได้ดียิ่งขึ้น โดยผู้วิจัยได้มีการเพิ่มคุณลักษณะ 2 คุณลักษณะ

คือจำนวนคำที่มีความรู้สึกเป็นบวกและจำนวนคำที่มีความรู้สึกเป็นลบ เพื่อให้แบบจำลองมีประสิทธิภาพในการเรียนรู้ที่ดียิ่งขึ้น และมีการระบุ N-Gram ในการกำหนดคุณลักษณะในการเรียนรู้ของแบบจำลอง ซึ่ง N-Gram คือการนำคำในประโยคมารวมกันเพื่อให้แบบจำลองเข้าใจประโยคได้มากยิ่งขึ้น โดยกำหนด N-Gram เท่ากับ (1,2) หมายถึงกำหนดพีเจอร์ที่ใช้เรียนรู้ของแบบจำลองเป็น 1 คำ และคำที่นำมารวมกันจำนวน 2 คำ เช่น กล้องดี หรือแบตเตอรี่แย่ เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 3 การคัดเลือกคุณลักษณะ (Features selection) กระบวนการในการเลือกคุณลักษณะที่สำคัญในการเรียนรู้ให้กับแบบจำลอง โดยประสิทธิภาพของแบบจำลองยังคงมีประสิทธิภาพที่ไม่ลดลง ช่วยลดจำนวนคุณลักษณะและช่วยเพิ่มความเร็วในการเรียนรู้ของแบบจำลอง ซึ่งจะใช้ Random Forest Classifier ในการหาคุณลักษณะที่สำคัญ (Features importance) โดยจะเลือกคุณลักษณะที่สำคัญจำนวน 500 คุณลักษณะ และจำนวน 1,000 คุณลักษณะในการทดลองเพื่อหาแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด

ขั้นตอนที่ 4 การวิเคราะห์ความรู้สึก (Sentiment polarity classification) กระบวนการนำข้อมูลที่พร้อมสำหรับการฝึกฝนแบบจำลองมาฝึกฝนแบบจำลอง เพื่อหาแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด ซึ่งประกอบไปด้วย 3 แบบจำลอง ได้แก่ แบบจำลองเทคนิค SVM แบบจำลองเทคนิค Naïve Bayes และแบบจำลองเทคนิค Logistic Regression ในการวิเคราะห์ความรู้สึก

ขั้นตอนที่ 5 การปรับแต่งโมเดล (Fine-tuning model) การปรับค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลอง ซึ่งจะใช้ GridSearchCV ของ Scikit-learn ในการหาค่าพารามิเตอร์ที่ดีที่สุดของแบบจำลอง โดยกำหนดช่วงของค่าพารามิเตอร์ที่ต้องการและหาแบบจำลองที่ดีที่สุดในการเรียนรู้ของแบบจำลองของทั้งสามแบบจำลอง เพื่อหาแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด

b) แบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึก (Deep learning model)

ขั้นตอนที่ 1 การแบ่งจำนวนข้อมูลชุดฝึกฝนและข้อมูลชุดทดสอบ (Train test split) เพื่อนำไปฝึกฝนแบบจำลองและประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง

ขั้นตอนที่ 2 การเตรียมข้อมูลในการฝึกฝนแบบจำลอง (Data preparation) การใช้ Tokenizer ของแบบจำลองนั้น ๆ ซึ่งจะประกอบไปด้วยแบบจำลอง WangchanBERTa แบบจำลอง BERT_{multilingual} และแบบจำลอง RoBERTa ในการแปลงข้อมูล Input data ให้อยู่ในรูปแบบของเวกเตอร์ (Encoder) สำหรับการฝึกฝนแบบจำลอง ซึ่งจะได้เป็น Input IDs, Attention Masks, Token Type IDs (ใช้เฉพาะใน BERT) BERT_{multilingual} จะใช้แบบจำลองเรียนรู้ความสัมพันธ์ระหว่างสองประโยค (Next Sentence Prediction: NSP) อย่างไรก็ตาม RoBERTa และ WangchanBERTa ได้ตัดขั้นตอนนี้เพื่อเน้นที่การเรียนรู้ ซึ่งเป็นขั้นตอนที่ช่วยให้แบบจำลองสามารถเรียนรู้ความสัมพันธ์ระหว่างสองประโยคได้ (เรียกว่า Next

Sentence Prediction: NSP) แต่ใน RoBERTa และ WangchanBERTa ได้มีการตัดขั้นตอนนี้ออกจากกระบวนการฝึกแบบจำลอง (Liu et al., 2019; One Man Company, 2023)

ขั้นตอนที่ 3 การกำหนดการเรียนรู้ข้อมูลของแบบจำลอง (Training setup) การกำหนดอาร์กิวเมนต์ (Training argument) ที่สำคัญในการระบุค่าพารามิเตอร์การเรียนรู้ให้กับข้อมูล ซึ่งประกอบไปด้วย Batch size จำนวน Epoch Learning rate และ Weight decay ในการฝึกฝนข้อมูล (Gatchalee et al., 2023)

ขั้นตอนที่ 4 การวิเคราะห์ความรู้สึก กระบวนการนำข้อมูลที่พร้อมสำหรับการฝึกฝนแบบจำลองมาฝึกฝนแบบจำลอง เพื่อหาแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด ซึ่งประกอบไปด้วย 3 แบบจำลอง ได้แก่ แบบจำลอง BERT_{multilingual} แบบจำลอง RoBERTa และแบบจำลอง WangchanBERTa ในการวิเคราะห์ความรู้สึก

4) การประเมินประสิทธิภาพ

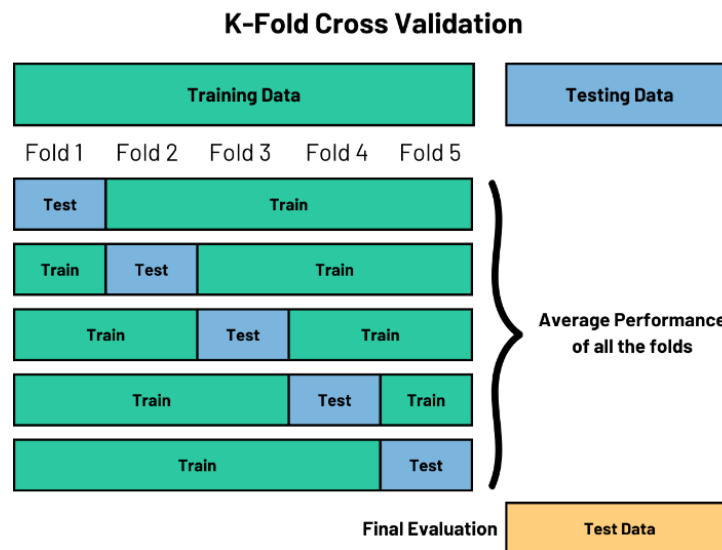
ในงานวิจัยนี้มีการแบ่งชุดข้อมูลฝึกฝนและชุดข้อมูลทดสอบ รวมถึงวัดประสิทธิภาพการทำงานของแบบจำลอง โดยใช้เทคนิค Train test split และ K-fold cross validation ในการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง ซึ่งเทคนิค K-fold cross validation คือการแบ่งข้อมูลเป็นจำนวน K ส่วนเพื่อนำไปสร้างและทดสอบข้อมูลจำนวน K รอบ เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่น่าเชื่อถือมากกว่าการประเมินประสิทธิภาพ Train Test split และช่วยลดปัญหาการ Overfitting ของข้อมูล ซึ่งจะแบ่งข้อมูลชุดฝึกฝนเป็น K-1 ของข้อมูลทั้งหมดในการฝึกฝนและส่วนที่เหลือเป็นข้อมูลชุดทดสอบ และผลลัพธ์ของประสิทธิภาพของแบบจำลองหาจากการหาค่าเฉลี่ยของการฝึกฝนแบบจำลองจำนวน K รอบ มีหลักการแบ่งข้อมูลและการทำงานของ K-fold cross validation ดังรูปที่ 4 โดยค่าที่ใช้วัดประสิทธิภาพของแบบจำลอง ได้แก่ ค่าความแม่นยำ (Precision) ค่าความระลึก (Recall) ค่าความถูกต้อง (Accuracy) และค่าความถ่วงดุล (F-Measure) โดยจะได้ Confusion Metrix Class ดังรูปที่ 5 และสามารถทดสอบประสิทธิภาพของแบบจำลองได้จากสมการที่ (5) - (8) ตามลำดับ

$$Precision = \frac{\left(\frac{TP}{Pre(P)}\right) + \left(\frac{TNR}{Pre(NR)}\right) + \left(\frac{TN}{Pre(N)}\right)}{3} \times 100\% \quad (5)$$

$$Recall = \frac{\left(\frac{TP}{Rec(P)}\right) + \left(\frac{TNR}{Rec(NR)}\right) + \left(\frac{TN}{Rec(N)}\right)}{3} \times 100\% \quad (6)$$

$$Accuracy = \frac{TP+TNR+TN}{TP+FP+TNR+FNR+TN+FN} \times 100\% \quad (7)$$

$$F - measure = 2 \times \frac{\left(\frac{Precision \times Recall}{Precision + Recall}\right)^{P,NR,N}}{3} \times 100\% \quad (8)$$



รูปที่ 4. หลักการทำงานของ K-fold cross validation

Actual	Prediction			
	Positive	Neutral	Negative	
Positive	True Positive (TP)	False Positive (FP)	False Positive (FP)	Rec (P) →
Neutral	False Neutral (FNR)	True Neutral (TNR)	False Neutral (FNR)	Rec (NR) →
Negative	False Negative (FN)	False Negative (FN)	True Negative (TN)	Rec (N) →

Pre (P) ↓ Pre (NR) ↓ Pre (N) ↓

รูปที่ 5. Confusion Matrix Class

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ผู้วิจัยได้ทำการทดลองการฝึกฝนของแบบจำลองของทั้ง 6 แบบจำลอง คือแบบจำลอง SVM แบบจำลอง Naïve Bayes แบบจำลอง Logistic regression แบบจำลอง BERT_{multilingual} แบบจำลอง RoBERTa และแบบจำลอง WangchanBERTa ซึ่งจะแบ่งออกเป็น Machine learning และ Deep learning

การทดลองการฝึกฝนแบบจำลอง ผู้วิจัยได้เปลี่ยนการจัดการข้อมูลโมจิโดยการลบโมจิออกเนื่องจากในสื่อสังคมออนไลน์นั้น มีการใช้โมจิในทิศทางการประชดประชันและตัดขั้นตอนการตัดคำที่ไม่สื่อความหมายออกไป เนื่องจากทำให้ประสิทธิภาพของแบบจำลองลดลงเป็นอย่างมาก

การทดลองการฝึกฝนแบบจำลอง Machine learning มีการเพิ่มคุณลักษณะหรือฟีเจอร์ (Features) ที่นับจำนวนความถี่ของคำที่เป็นความรู้สึกรบกวนและความรู้สึกลบ ซึ่งผลลัพธ์จากการทดสอบประสิทธิภาพโดยเปรียบเทียบเทคนิค Bag of Words และ TF-IDF และการฝึกฝนแบบจำลองทั้ง 3 เทคนิค ได้แก่ แบบจำลอง SVM แบบจำลอง Naïve Bayes แบบจำลอง Logistic regression โดยแบ่ง K-fold cross validation ออกเป็น 5 ส่วน และ 10 ส่วน และมีการเลือกคุณลักษณะจำนวน 500 คุณลักษณะ และจำนวน 1,000 คุณลักษณะ ในการฝึกฝนแบบจำลองพบว่า การแบ่ง K-fold cross validation เป็น 10 ส่วน และเลือกคุณลักษณะจำนวน 500 คุณลักษณะให้ผลลัพธ์ของแบบจำลองดีที่สุด ซึ่งผลลัพธ์ของการประเมินประสิทธิภาพการเปรียบเทียบค่าความถูกต้องของแบบจำลอง Machine Learning ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3. ผลลัพธ์ของการประเมินประสิทธิภาพการเปรียบเทียบค่าความถูกต้องของแบบจำลอง Machine Learning

Aspects		Support Vector Machine				
		TF-IDF	TF-IDF + Features selection		TF-IDF + Features selection + Fine-tuning model	
			500 Features	1,000 Features	500 Features	1,000 Features
5 Fold	Camera	81.46	81.31	81.91	84.71	83.38
	Battery	79.87	80.66	80.45	83.32	82.38
	Screen	81.96	83.33	82.46	85.81	86.03
	Performance	82.56	82.88	83.24	83.57	83.89
	Price	88.39	88.81	89.03	89.50	89.65
10 Fold	Camera	81.46	81.88	82.12	84.77	83.61
	Battery	80.35	80.82	80.71	83.69	82.70
	Screen	82.60	83.84	83.42	86.90	85.53
	Performance	82.85	83.06	83.30	84.19	84.16
	Price	88.66	89.32	89.12	89.89	89.83

การทดลองการฝึกฝนแบบจำลอง Deep learning โดยการทดลองจะมีการแบ่งข้อมูลชุดฝึกฝนเป็นร้อยละ 70 และข้อมูลชุดทดสอบเป็นร้อยละ 30 การทดลองมีการเพิ่มคุณลักษณะที่นับจำนวนความถี่ของคำที่เป็นความรู้สึกรบกวนและความรู้สึกลบ และการทดลองที่ไม่ได้เพิ่มคุณลักษณะ รวมถึงมีการปรับค่าพารามิเตอร์ในการฝึกฝน เพื่อหาแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด จากการทดลองของทุก

แบบจำลองพบว่า แบบจำลอง RoBERTa ที่นำ BERT มาปรับปรุง รวมถึงเพิ่ม Pretrained dataset ให้ใหญ่กว่าเดิม ทำให้มีประสิทธิภาพในการเรียนรู้ที่เหนือกว่า BERT แต่หากประสิทธิภาพของแบบจำลอง RoBERTa ยังมีประสิทธิภาพที่น้อยกว่าแบบจำลอง WangchanBERTa เนื่องจาก RoBERTa เป็นแบบจำลองภาษาแบบหลายภาษา (Multilingual language model) ที่รวมชุดข้อมูลในภาษาอื่น ๆ กว่า 100 ภาษาพร้อมกัน ทำให้ไม่สามารถเจาะจงรูปแบบของการใช้ภาษาไทยโดยเฉพาะได้ ทางสถาบันวิจัยปัญญาประดิษฐ์ประเทศไทย อันเกิดจากความร่วมมือระหว่างสถาบันวิทยสิริเมธี (VISTEC) และสำนักงานส่งเสริมเศรษฐกิจดิจิทัล (Depa) จึงได้นำแบบจำลอง RoBERTa มาเทรนแบบจำลองแบบภาษาเดียว (Monolingual language model) คือภาษาไทย (Chauhan et al., 2023; Gatchalee et al., 2023; Vistec-depa Thailand AI Research Institute, 2021; Wang et al., 2021) ทำให้แบบจำลองสามารถเรียนรู้เจาะจงรูปแบบของการใช้ภาษาไทยโดยเฉพาะได้ จึงทำให้แบบจำลอง WangchanBERTa เป็นแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด ซึ่งผลลัพธ์ของการประเมินประสิทธิภาพการเปรียบเทียบค่าความถูกต้อง ของแบบจำลอง Deep learning แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4. ผลลัพธ์ของการประเมินประสิทธิภาพการเปรียบเทียบค่าความถูกต้องของแบบจำลอง Deep learning

Aspect	Model					
	BERT	BERT + Features	Roberta	RoBERTa + Features	WangchanBERTa	WangchanBERTa + Features
Camera	76.86	79.56	82.79	80.79	85.59	81.48
Battery	78.92	77.35	81.01	82.06	84.84	82.58
Screen	79.57	75.61	80.49	78.96	84.30	80.79
Performance	79.35	81.82	84.09	85.87	86.46	83.89
Price	86.35	87.82	89.66	89.58	92.37	89.36

* Features หมายถึง การเพิ่มคุณลักษณะการจำนวนคำที่มีความรู้สึกเป็นบวกและคำที่มีความรู้สึกเป็นลบ (Count positive word และ Count negative word)

4. สรุปผลการวิจัย

การทดลองการฝึกฝนแบบจำลอง Machine learning พบว่า ขั้นตอนการเตรียมข้อมูลการตัดคำที่ไม่เกี่ยวข้อง (Stopwords) ส่งผลให้ประสิทธิภาพของแบบจำลองลดลง ขั้นตอนการสกัดคุณลักษณะเทคนิค TF-IDF ให้ผลลัพธ์ประสิทธิภาพของแบบจำลองมากกว่าเทคนิค Bag of Words และจากการประเมินประสิทธิภาพการฝึกฝนของแบบจำลองพบว่า แบบจำลองที่ใช้เทคนิค SVM ที่แบ่ง K-fold cross validation เป็น 10 ส่วน และการเลือกคุณลักษณะ จำนวน 500 คุณลักษณะ ให้ผลลัพธ์ดีที่สุดในการ

จำแนกความคิดเห็นแบบจำลอง Machine Learning แบบจำลองรองลงมาคือเทคนิค Logistic regression ซึ่งมีประสิทธิภาพที่น้อยกว่าเทคนิค SVM เพียงเล็กน้อย

การทดลองการฝึกฝนแบบจำลอง Deep learning พบว่า การเพิ่มคุณลักษณะการนับจำนวนความถี่ของคำที่เป็นความรู้สึกบวก และความรู้สึกลบอาจไม่ได้จำเป็นในการฝึกฝนแบบจำลอง Deep learning เนื่องจากแบบจำลอง Deep learning นั้นสามารถเรียนรู้ข้อมูลที่ซับซ้อนได้ดี ซึ่งจะขัดแย้งกับแบบจำลอง Machine learning ที่การเรียนรู้ของแบบจำลองนั้นจะขึ้นอยู่กับคำศัพท์ความคิดเห็น (An opinion term collection) (Chauhan et al., 2023) Emotional words, Degree adverbs, Positive and negative words และ Domain words (Wang et al., 2021) ที่จะมีผลต่อการเรียนรู้และประสิทธิภาพของแบบจำลอง ซึ่งจากผลการทดลองพบว่า แบบจำลอง WangChanBERTa มีประสิทธิภาพมากที่สุด เนื่องจากทางสถาบันวิจัยปัญญาประดิษฐ์ประเทศไทย อันเกิดจากความร่วมมือระหว่างสถาบันวิทยสิริเมธี และสำนักงานส่งเสริมเศรษฐกิจดิจิทัล ได้นำแบบจำลอง RoBERTa มาพัฒนาแบบจำลองแบบภาษาเดียว คือ ภาษาไทย จึงทำให้แบบจำลองมีประสิทธิภาพมากกว่าแบบจำลอง RoBERTa ที่รองรับภาษาที่หลากหลาย ซึ่งการรองรับภาษาที่หลากหลาย จะส่งผลให้แบบจำลองมีประสิทธิภาพได้ไม่เต็มที่เท่ากับแบบจำลองที่พัฒนาเพื่อภาษานั้น ๆ โดยเฉพาะอย่างกับแบบจำลอง WangChanBERTa

จากการวิจัยการวิเคราะห์ความรู้สึกระดับมุมมองจากบทวิจารณ์ของสมาร์ทโฟนทั้ง 5 มุมมอง ได้แก่ มุมมองกล้อง มุมมองของแบตเตอรี่ มุมมองของหน้าจอ มุมมองของการประมวลผล และมุมมองของราคา พบว่า แบบจำลอง Deep learning มีประสิทธิภาพมากกว่าแบบจำลอง Machine learning เนื่องจากแบบจำลองแบบดั้งเดิมนั้นต้องอาศัยคำศัพท์ความคิดเห็น (Emotional dictionary) อีกทั้งยังจำเป็นต้องมีการอัปเดตคำศัพท์ความคิดเห็นอยู่ตลอดเวลาเพื่อให้แบบจำลองมีประสิทธิภาพที่ดียิ่งขึ้น และแบบจำลองแบบดั้งเดิมไม่ได้มีการเรียนรู้และเข้าใจถึงบริบทของประโยค ซึ่งเมื่อพบกับประโยคใหม่ ประโยคที่ซับซ้อน สำนวนหรือคำแสลง หรือคำที่มีคุณสมบัติในการเปลี่ยนความหมายในเชิงปฏิเสธ (Negation) เข้ามาอยู่ในประโยคร่วมด้วย จึงทำให้แบบจำลองเกิดความสับสน และนำไปสู่แบบจำลองที่ไม่มีประสิทธิภาพ (Nakwijit, 2020) ซึ่งแบบจำลอง Deep learning ถูกฝึกฝนจากข้อมูลขนาดใหญ่ สามารถเรียนรู้และเข้าใจบริบทของประโยคที่ซับซ้อนได้ดี ซึ่งหมายถึงแบบจำลองสามารถเรียนรู้และเข้าใจบริบทของรูปแบบประโยคใหม่ ๆ หรือประโยคที่ไม่เคยพบมาก่อนได้ดีเช่นกัน ทำให้แบบจำลอง Deep learning มีประสิทธิภาพในการเรียนรู้ที่ดีมากกว่าแบบจำลองแบบดั้งเดิม ผลลัพธ์ของการประเมินประสิทธิภาพการเปรียบเทียบค่าความถูกต้องของทุกแบบจำลองดังตารางที่ 5 และผลลัพธ์ของการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองที่ดีที่สุด ดังตารางที่ 6

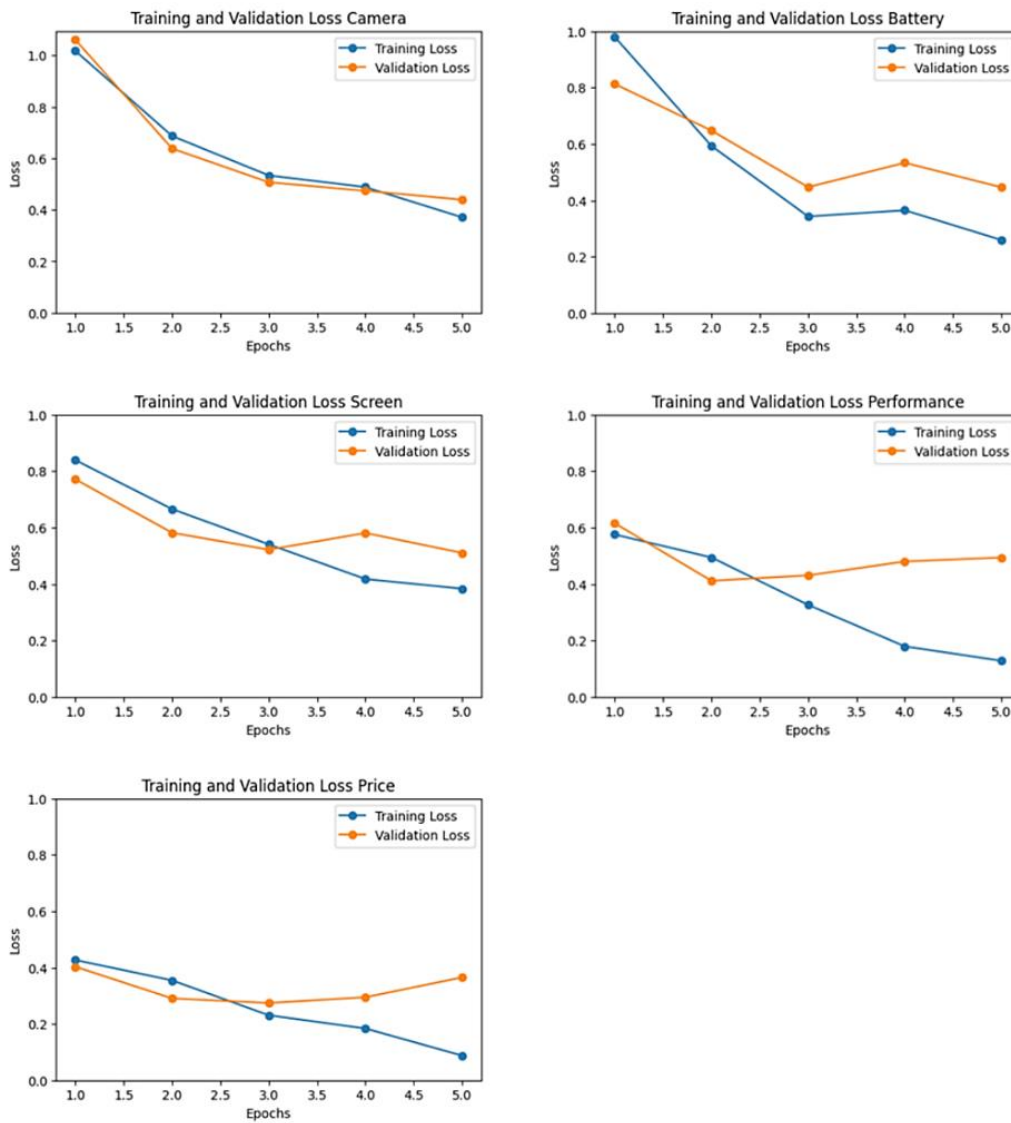
ตารางที่ 5. ผลลัพธ์ของการประเมินประสิทธิภาพการเปรียบเทียบค่าความถูกต้อง ของทุกแบบจำลอง

Models	Aspects				
	Camera	Battery	Screen	Performance	Price
SVM	84.77	83.69	85.53	84.19	89.89
Naïve Bayes	79.73	79.04	81.59	80.57	84.98
Logistic Regression	83.95	83.17	84.71	84.25	89.69
BERT	76.86	78.92	79.57	79.35	86.35
RoBERTa	82.79	81.01	80.49	84.09	89.66
WangchanBERTa	85.59	84.84	84.30	86.46	92.37

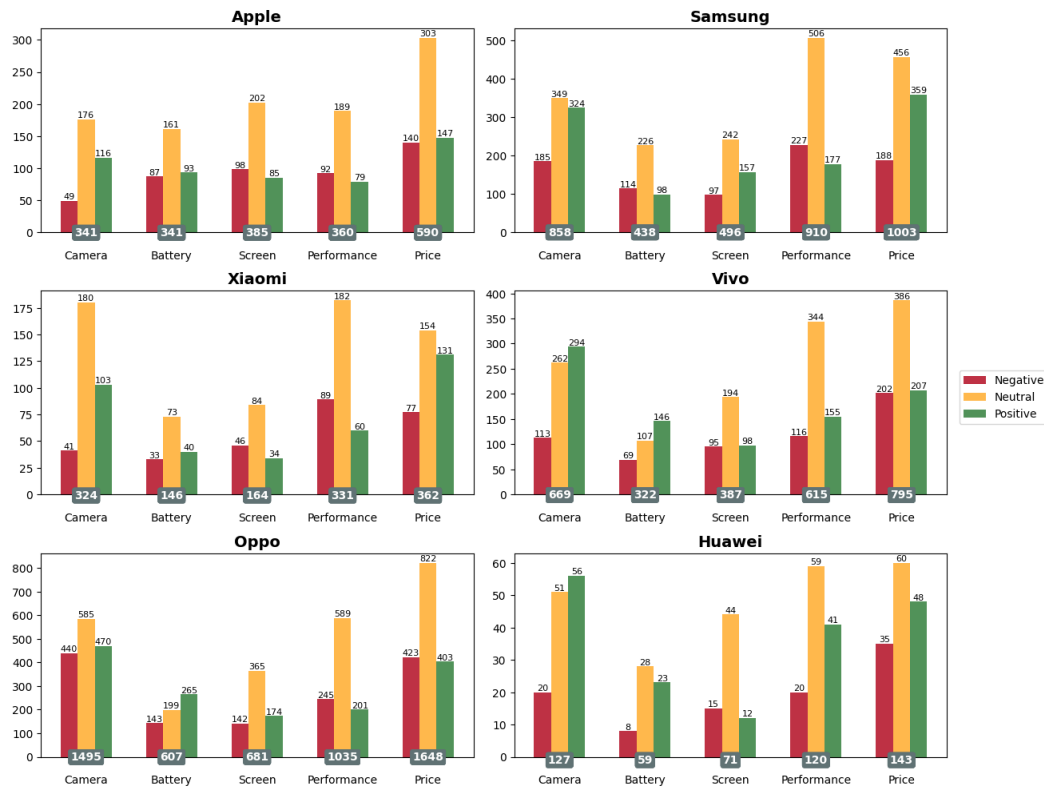
ตารางที่ 6. ผลลัพธ์ของการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองที่ดีที่สุด

Aspect	WangchanBERTa			
	Precision	Recall	F-Measure	Accuracy
Camera	0.853	0.865	0.858	85.59%
Battery	0.854	0.843	0.848	84.84%
Screen	0.831	0.847	0.838	84.30%
Performance	0.858	0.855	0.856	86.46%
Price	0.923	0.927	0.925	92.37%

ซึ่งการวัดประสิทธิภาพของแบบจำลองว่าสามารถเรียนรู้กับข้อมูลใหม่ ๆ ได้ดีนั้นสามารถดูได้จาก Loss graphs ที่ประกอบไปด้วยเส้นกราฟของ Training loss และ Validation ซึ่งกราฟจะต้องแสดงผล Training loss และ Validation loss ไปในทิศทางเดียวกัน จึงจะทำให้แบบจำลองสามารถเรียนรู้กับข้อมูลใหม่ได้ดี ซึ่งผลลัพธ์ของ Loss graph ของแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดของแต่ละมุมมองแสดงดังรูปที่ 6 ผลลัพธ์จำนวนความรู้สึกของแบบจำลองที่ดีที่สุดของทั้ง 6 ยี่ห้อสมาร์ทโฟนแสดงดังรูปที่ 7



รูปที่ 6. ผลลัพธ์ของ Loss graph ของแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดของแต่ละมุมมอง



รูปที่ 7. ผลลัพธ์จำนวนความรู้สึกของแบบจำลองที่ดีที่สุดของทั้ง 6 ยี่ห้อสมาร์ทโฟน

ในอนาคตผู้วิจัยจะมีการพัฒนาระบบต่อไป โดยการพัฒนาเว็บแอปพลิเคชันวิเคราะห์ความรู้สึกจากบทวิจารณ์สมาร์ทโฟน ซึ่งจะสามารถเป็นตัวช่วยในการเลือกซื้อสมาร์ทโฟนของผู้ใช้และเพิ่มจำนวนมุมมองและความคิดเห็น รวมถึงการอัปเดตข้อมูลสมาร์ทโฟน เพื่อพัฒนาประสิทธิภาพของแบบจำลองให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

เอกสารอ้างอิง (References)

- Akram, S., Hussain, S., Toure, I. K., Yang, S., & Jalal, H. (2020). A web-based recommendation system for mobile phone products. *Journal of Internet Technology*, 21(4), 1003-1011.
- Aung, T. T. M., & Kyaw, A. A. (2018). Sentiment analysis of the smartphone product reviews. *International Journal of Electrical, Electronics and Data Communication*, 6(9), 56-60.

-
- Chauhan, G. S., Nahta, R., Meena, Y. K., & Gopalani, D. (2023). Aspect-based sentiment analysis using deep learning approaches: A survey. *Computer Science Review*, 49, 101152. <https://doi.org/10.1016/j.cosrev.2023.101152>
- Gatchalee, P., Waijanya, S., & Promrit, N. (2023). Thai text classification experiment using CNN and transformer models for timely-timeless content marketing. *ICIC Express Letters*, 17(1), 91-101. <https://doi.org/10.24507/icicel.17.01.91>
- Holdsworth, J., & Scapicchio, M. (2024). *What is deep learning?*. IBM. <https://www.ibm.com/topics/deep-learning>
- Josh, A., & Sundar, S. (2022). Analyzing the performance of sentiment analysis using BERT, DistilBERT, and RoBERTa. *Proceedings of 2022 IEEE International Power and Renewable Energy Conference (IPRECON)* (pp. 1-6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/IPRECON55716.2022.9872605>
- Liu, Y., Myle, O., Naman, G., Jingfei, D., Mandar, J., Danqi, C., Omer, L., Mike, L., Luke, Z., & Veselin, S. (2019). *RoBERTa: A robustly optimized BERT pretraining approach*. arXiv. <https://arxiv.org/abs/1907.11692>
- Marketeer team. (2022). *Thailand in 2022: Nearly the entire population has access to computers and smartphones*. Marketeer Online. <https://marketeeronline.co/archives/266656> (in Thai)
- Nakwiji, P. (2020). *Understanding BERT*. Medium. <https://shorturl.asia/1Flel> (in Thai)
- Nessessence. (2018). *What is machine learning? (Beginner's guide)*. Thai Programmer. <https://shorturl.asia/qHE5m> (in Thai)
- Nguyen, Q. T., Nguyen, T. L., Luong, N. H., & Ngo, Q. H. (2020). Fine-tuning BERT for sentiment analysis of Vietnamese reviews. *Proceedings of 2020 7th NAFOSTED Conference on Information and Computer Science (NICS)* (pp. 302-307). IEEE. <https://doi.org/10.1109/NICS51282.2020.9336188>
- One Man Company. (2023). *BERT, RoBERTa, DistilBERT, XLNet: Which one to use?*. One Man Company. <http://oneman.company/2023/03/10/bert-roberta-distilbert-xlnet-which-one-to-use/>

-
- Park, G., & Kwak, M. (2020). The life cycle of online smartphone reviews: Investigating dynamic change in customer opinion using sentiment analysis. *ICIC Express Letters Part B: Applications*, 11(5), 509-516.
- SAS. (2022). *Natural language processing (NLP)*. SAS. https://www.sas.com/th_th/insights/analytics/what-is-natural-language-processing-nlp.html (in Thai)
- Soponwattana, N. (2019). *What is sentiment analysis?* Medium. <https://shorturl.asia/4joS6> (in Thai)
- Thamrongrattanarit, A. (2017). *Theory and practice of sentiment analysis using machine learning*. GitHub Pages. https://attapol.github.io/compling/sentiment_analysis.html (in Thai)
- Thetmuang, R., & Jirawichitchai, N. (2017). *Thai sentiment analysis of product review online using support vector machine*. *Engineer Journal of Siam University*, 18(34), 1-12. (in Thai)
- Vistec-depa Thailand AI Research Institute. (2021). *WangchanBERTa: Pre-trained Thai language model*. Vistec-depa Thailand AI Research Institute. <https://airesearch.in.th/releases/wangchanberta-pre-trained-thai-language-model/>
- Wang, J., Xu, B., & Zu, Y. (2021). Deep learning for aspect-based sentiment analysis. *Proceedings of 2021 International Conference on Machine Learning and Intelligent Systems Engineering (MLISE)* (pp. 267-271). IEEE. <https://doi.org/10.1109/MLISE54096.2021.00060>

การผลิตเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ต่ำจากน้ำส้มโอ (*Citrus maxima* (Burm.) Merr.)
พันธุ์ปลุกขาวแดงกวาโดยใช้เส้นใยเห็ดนางนวล
(*Pleurotus flabellatus* (Berk & Br.) Sacc.) ในการหมัก
Production of Low-Alcohol Beverages from Pummelo Juice
(*Citrus maxima* (Burm.) Merr.) Cultivated Variety of Khao Taeng Kwa,
Fermented with the Mycelia of Pink Oyster Mushroom
(*Pleurotus flabellatus* (Berk & Br.) Sacc.)

ปณชรัตน์ ปิลอง¹ รัฐพล ศรประเสริฐ^{2*} อนงค์ หัมพานนท์² และ กิตติพล กลิภาร์²

Puncharat Pilog¹ Ratapol Sornprasert^{2*} Anong Hambananda² and Kittipon Kasipar²

¹เมืองนวัตกรรมอาหาร สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ จ.ปทุมธานี ประเทศไทย

²สาขาวิชาชีววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏจันทรเกษม กรุงเทพฯ ประเทศไทย

¹Food Innopolis, National Science and Technology Development Agency, Pathum Thani, Thailand

²Program of Biology, Faculty of Science, Chandrakasem Rajabhat University, Bangkok, Thailand

วันที่ส่งบทความ : 17 กรกฎาคม 2567 วันที่แก้ไขบทความ : 26 พฤษภาคม 2568 วันที่ตอบรับบทความ : 28 พฤษภาคม 2568

Received: 17 July 2024, Revised: 26 May 2025, Accepted: 28 May 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ ศึกษาการผลิตเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ต่ำจากน้ำส้มโอ (*Citrus maxima* (Burm.) Merr.) พันธุ์ปลุกขาวแดงกวาโดยใช้เส้นใยเห็ดนางนวล (*Pleurotus flabellatus* (Berk & Br.) Sacc.) ในการหมัก เพื่อใช้เป็นผลิตภัณฑ์ทางเลือกของเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความเข้มข้นของน้ำส้มโอและปริมาณกล้าเชื้อเส้นใยเห็ดที่เหมาะสมต่อการผลิตผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มแอลกอฮอล์ต่ำ จากน้ำส้มโอพันธุ์ปลุกขาวแดงกวาเมื่อใช้เส้นใยเห็ดในการหมัก และศึกษาปริมาณของแข็งที่ละลายได้ที่เหมาะสมต่อผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มแอลกอฮอล์ต่ำ จากการศึกษาพบว่า เส้นใยเห็ดมีศักยภาพในการหมักน้ำส้มโอความเข้มข้นร้อยละ 100 ปริมาณกล้าเชื้อเส้นใยเห็ดที่เหมาะสม คือ 15 ชิ้น ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.7 เซนติเมตร และปริมาณของแข็งที่ละลายได้เท่ากับ 22 องศาบริกซ์ เมื่อหมักในสภาวะที่เหมาะสมเป็นเวลา 12-21 วัน ผลิตภัณฑ์ที่ได้จะมีปริมาณแอลกอฮอล์ร้อยละ 1.00-1.04 ซึ่งสามารถใช้เป็นผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มแอลกอฮอล์ต่ำได้

คำสำคัญ : เครื่องดื่มแอลกอฮอล์ต่ำ ส้มโอ เห็ดนางนวล

*ที่อยู่ติดต่อ E-mail address: sornprasert_r@hotmail.com

<https://doi.org/10.55003/scikmitl.2025.264051>

Abstract

Low-alcohol beverage was produced from the juice of pummelo (*Citrus maxima* (Burm.) Merr.), Khao Taeng Kwa cultivated variety, fermented with pink oyster mushroom (*Pleurotus flabellatus*) mycelia, as a potential alternative alcohol product. The study aimed to determine the optimal pummelo juice concentration, amount of mycelial starter, and the soluble solid content in the pummelo juice for low-alcohol beverage production. Results demonstrated that *P. flabellatus* mycelia effectively fermented 100% pummelo juice. The optimal fermentation conditions included 15 mycelial starter pieces, each 0.7 cm in diameter, and a soluble solids content of 22 °Brix. After 12–21 days of fermentation, the final product contained 1.00–1.04% alcohol, highlighting its potential as a promising low-alcohol alternative.

Keywords: Low-alcohol beverage, Pummelo, Pink oyster mushroom

1. บทนำ

ผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มแอลกอฮอล์ต่ำเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณแอลกอฮอล์ 1.2 ดีกรี (Degree) หรือต่ำกว่า โดยผลิตภัณฑ์ประเภทนี้เติบโตขึ้นมากในทศวรรษที่ผ่านมา ในปี พ.ศ. 2564 ผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มแอลกอฮอล์ต่ำเติบโตขึ้นมากกว่าร้อยละ 6 ในตลาดระดับโลก ได้แก่ แคนาดา ญี่ปุ่น บราซิล ฝรั่งเศส เยอรมนี สเปน สหรัฐอเมริกา สหราชอาณาจักร ออสเตรเลีย และแอฟริกาใต้ ซึ่งคิดเป็นร้อยละ 3.5 ของส่วนแบ่งการตลาดทั่วโลกสำหรับเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ คาดว่าผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มแอลกอฮอล์ต่ำจะเติบโตร้อยละ 8 ระหว่างปี พ.ศ. 2564-2568 ในขณะเดียวกันคาดว่าผลิตภัณฑ์แอลกอฮอล์ต่ำจะไปเติบโตร้อยละ 0.7 (Corfe et al., 2022; World Health Organization, 2023) ผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มแอลกอฮอล์ต่ำได้รับการสนับสนุนจากผู้บริโภคที่ชื่นชอบในการใส่ใจสุขภาพ การดื่มที่ไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานหรือกิจกรรมอื่น ๆ ในชีวิตประจำวัน และเพื่อตอบสนองของคนที่ชื่นชอบในรสชาติของแอลกอฮอล์ ซึ่งสอดคล้องกับแนวโน้ม (Trend) การใช้ชีวิตประจำวันที่ไม่ต้องการปริมาณแอลกอฮอล์มากจนถึงขั้นมึนเมา นอกจากนี้ เครื่องดื่มแอลกอฮอล์ต่ำยังดึงดูดกลุ่มลูกค้าที่ดื่มแอลกอฮอล์ในปริมาณน้อยเพื่อเข้าร่วมกิจกรรมสังคม นักวิจัยจึงมีความพยายามที่จะค้นคว้าและพัฒนาเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ต่ำ โดยนำเทคโนโลยีหรือนวัตกรรมทางวิทยาศาสตร์เข้ามามีส่วนร่วมกับผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มที่มีแอลกอฮอล์ต่ำ หรือมีปริมาณแอลกอฮอล์น้อย ได้แก่ เทเบิลไวน์ (Table wine) ที่มีปริมาณแอลกอฮอล์ไม่ต่ำกว่า 7 ดีกรี และไม่สูงกว่า 15 ดีกรี สปาร์กลิงไวน์ (Sparkling wine) ที่มีปริมาณแอลกอฮอล์ไม่ต่ำกว่า 9 ดีกรี และไม่สูงกว่า 15 ดีกรี ฟอर्टิไฟด์ไวน์ (Fortified wine) ที่มีปริมาณแอลกอฮอล์สูงกว่า 15 ดีกรี แต่ไม่สูงกว่า 23 ดีกรี เฟลเวอร์ไดไวน์ (Flavored wine) ที่มีปริมาณแอลกอฮอล์ไม่เกิน 23 ดีกรี (Thai Industrial Standards Institute, 2001) มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนกำหนดว่า ไวน์ผลไม้ (Fruit wine) และไวน์สมุนไพร (Herbal wine) มีปริมาณแอลกอฮอล์ไม่เกิน 15 ดีกรี จากการหมักผลไม้ น้ำผลไม้ และหรือสมุนไพรด้วยยีสต์ *Saccharomyces* เพื่อเปลี่ยนน้ำตาลเป็นแอลกอฮอล์ (Thai Industrial Standards Institute, 2024a,b)

ส้มโอ (*Citrus maxima* (Burm.) Merr.) เป็นไม้ต้นขนาดเล็ก จัดอยู่ในวงศ์ Rutaceae มีชื่อท้องถิ่นว่า โก้ยตะลอง มะขุน มะโอ ลิมาบาลี และสังอุ (Office of the Forest Herbarium, 2014) จังหวัดชัยนาทเป็นแหล่งปลูกส้มโอแหล่งหนึ่งในภาคกลาง มีพันธุ์ปลูก (Cultivated variety) ที่ได้รับความนิยมคือพันธุ์ขาวแตงกวา ซึ่งเป็นพันธุ์ที่มีความสำคัญเชิงการค้า รสชาติดี (Department of Agricultural Extension, 2007) และมีคุณค่าทางโภชนาการ โดยเฉพาะมีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่สำคัญ ได้แก่ วิตามินซี แคโรทีนอยด์ (Carotenoid) ฟลาโวนอยด์ (Flavonoid) และฟีนอลิก (Phenolic) (Theppakorn & Chaiwong, 2011) ส้มโอพันธุ์ปลูกขาวแตงกวาได้รับการรับรองให้เป็นสิ่งบ่งชี้ทางภูมิศาสตร์หนึ่งของไทย (Thai Geographical Indication) (Office of Provincial Commercial Affairs Chainat, 2007)

เห็ด (Mushroom) เป็นเชื้อราที่มีคุณค่าทางโภชนาการและมีสารสำคัญที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพในการรักษาโรคต่าง ๆ เช่น เบต้ากลูแคน (β -D-glucan) ต้านมะเร็ง เอริตาดีนิน (Eritadenine) รักษาโรคเส้นเลือดตีบ และเห็ดบางชนิดสามารถผลิตเอนไซม์เอตีเอช (Alcohol dehydrogenase) ที่เร่งปฏิกิริยาการเปลี่ยนสารอะซีตัลดีไฮด์ (Acetaldehyde) เป็นเอทานอล (Ethanol) เห็ดที่มีความสำคัญ เช่น เห็ดกระดุม (*Agaricus blazei* Murrill) เห็ดเข็มทอง (*Flammulina velutipes* P. Karst.) เห็ดตีนแรด (*Tricholoma crassum* (Berk.) Sacc.) เห็ดนางนวล (*Pleurotus flabellatus* (Berk & Br.) Sacc.) เห็ดนางรม (*Pleurotus ostreatus* Fries) และเห็ดหมื่นปี (*Ganoderma lucidum* (Curtis) P. Karst.) เป็นต้น (Chaijumrus, 1993; Okamura et al., 2001; Poomkaedum, 2003) มีรายงานการนำเห็ดนางนวลมาใช้ในการหมักน้ำตาลแทนยีสต์ คาดว่าจะได้ผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มที่มีแอลกอฮอล์ต่ำมีประโยชน์ต่อสุขภาพเนื่องจากมีสารสำคัญทางเภสัชกรรม เห็ดนางนวลเป็นเห็ดที่ช่วยต้านอนุมูลอิสระ ช่วยป้องกันแสงจากรังสียูวีเอ (Ultraviolet A) (Rahman et al., 2021) และต้านมะเร็งลำไส้ (Klaus et al., 2021; Malathi & Murugesan, 2023) อย่างไรก็ตาม ในอนาคตคาดว่าจะมีผู้บริโภคหันมาสนใจดื่มผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มที่ผลิตจากเห็ดที่ช่วยเสริมสุขภาพมากขึ้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ 1) เพื่อศึกษาความเข้มข้นของน้ำส้มโอที่เหมาะสมต่อผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มแอลกอฮอล์ต่ำจากน้ำส้มโอพันธุ์ปลูกขาวแตงกวา เมื่อใช้เส้นใยเห็ดในการหมัก 2) เพื่อศึกษาปริมาณกลีโคไซด์เส้นใยเห็ดต่อผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มแอลกอฮอล์ต่ำจากน้ำส้มโอพันธุ์ปลูกขาวแตงกวา และ 3) เพื่อศึกษาปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มแอลกอฮอล์ต่ำ จากน้ำส้มโอพันธุ์ปลูกขาวแตงกวา เมื่อใช้เส้นใยเห็ดในการหมัก

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 ศึกษาความเข้มข้นของน้ำส้มโอที่เหมาะสมต่อผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มแอลกอฮอล์ทำจากน้ำส้มโอพันธุ์ปลูกชาวแตงกวา เมื่อใช้เส้นใยเห็ดในการหมัก

1) การเตรียมกล้าเชื้อเส้นใยเห็ดนางนวล

เชื้อเห็ดได้รับความอนุเคราะห์จากศูนย์รวบรวมเชื้อพันธุ์เห็ดแห่งประเทศไทย กลุ่มวิจัยและพัฒนาเห็ด สำนักวิจัยพัฒนาเทคโนโลยีชีวภาพ กรมวิชาการเกษตร โดยถ่ายเชื้อเห็ดลงในจานเพาะเชื้อที่มีอาหาร Potato Dextrose Agar (PDA) บ่มจานเพาะเชื้อที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน ดังรูปที่ 1(ก)-1(ข) จากนั้น ใช้ Cork borer เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.7 เซนติเมตร ตัดเส้นใยบริเวณรอบนอกสุดของโคโลนี ซึ่งจะได้ชิ้นวุ้นที่มีเส้นใยเห็ดเจริญอยู่ไปใช้หมักต่อไป

2) การเตรียมน้ำส้มโอ

เนื้อผลส้มโอพันธุ์ปลูกชาวแตงกวา ได้มาจากตำบลเขาท่าพระ อำเภอเมือง จังหวัดชัยนาท ดังรูปที่ 1(ค)-1(ง) มาปั่นด้วยเครื่องปั่นละเอียด นำมารองจะได้น้ำส้มโอ จากนั้นนำน้ำส้มโอมาผสมกับน้ำ ให้ได้ความเข้มข้น 3 ระดับ คือ ร้อยละ 60 80 และ 100 หลังจากนั้น ใช้น้ำตาลซูโครส (Sucrose) ปริมาณของแข็งที่ละลายได้เท่ากับ 20 องศาบริกซ์ ($^{\circ}$ Brix) ด้วยเครื่องวัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้ (Hand refractometer) แล้วผสมแอมโมเนียมซัลเฟต (Ammonium sulfate) 1 กรัมต่อน้ำส้มโอ 1,000 มิลลิลิตร ปรับค่าความเป็นกรด-เบส (pH) ด้วยกรดซิตริก (Citric acid) ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ ให้มีค่าเท่ากับ 5.5 ด้วยเครื่องวัดกรด-เบส (pH meter)



รูปที่ 1. ลักษณะเห็ดนางนวล (*Pleurotus flabellatus* (Berk & Br.) Sacc.) เส้นใยเห็ดบนอาหาร PDA เมื่ออายุ 7 วัน และส้มโอ (*Citrus maxima* (Burm.) Mer.)

3) ศึกษาความเข้มข้นของน้ำส้มโอที่เหมาะสมต่อการเจริญของเส้นใยเห็ดนางนวลบนอาหาร Pummelo Sucrose Agar (PuSA)

เติมน้ำผง 15 กรัม ในน้ำส้มโอปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร นำไปนึ่งฆ่าเชื้อด้วยหม้อนึ่งอัดไอ (Autoclave) ที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 15 นาที จากนั้น เทลงในจานเพาะเชื้อและนำกล้าเชื้อเส้นใยเห็ด จำนวน 1 ชิ้น วางลงบนผิวหน้าอาหาร PuSA บ่มที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 27 วัน วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของโคโลนีเส้นใยเห็ดทุก 3 วัน

4) ศึกษาความเข้มข้นของน้ำส้มโอที่เหมาะสมต่อการหมักด้วยกล้าเชื้อเส้นใยเห็ดนางนวล

นำน้ำส้มโอปริมาตร 100 มิลลิลิตร ใส่ลงในขวดแก้วที่มีปริมาตร 300 มิลลิลิตร นำขวดไปนึ่งฆ่าเชื้อที่อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นเติมกล้ำเชื้อเส้นใยเห็ด จำนวน 10 ชิ้นต่อขวด บ่มที่อุณหภูมิห้อง หมักเป็นเวลา 21 วัน เก็บตัวอย่างน้ำหมักทุก 3 วัน นำไปวิเคราะห์ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ ด้วยเครื่องวัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้ วิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ (Reducing sugar) ตามวิธีการของโซโมยี (Somogyi) (Somogyi, 1952) และวิเคราะห์ปริมาณแอลกอฮอล์ด้วยอีบูลลิโอมิเตอร์ (Ebulliometer) วิเคราะห์ข้อมูลโดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design; CRD) 3 ชุดทดลอง ทดลองซ้ำชุดละ 3 ครั้ง เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วย Duncan's Multiple Range Test (DMRT)

2.2 ศึกษาปริมาณกล้ำเชื้อเส้นใยเห็ดที่เหมาะสมต่อผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มแอลกอฮอล์ต่ำจากน้ำส้มโอพันธุ์ปลูกชาวแตงกวา

นำน้ำส้มโอความเข้มข้นที่เหมาะสมจากข้อ 2.1 มาเพาะเลี้ยงเส้นใยเห็ด โดยแปรผันปริมาณกล้ำเชื้อเส้นใยเห็ด 3 ระดับ คือ 5, 10 และ 15 ชิ้นต่อน้ำส้มโอ 100 มิลลิลิตร (กล้ำเชื้อมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.7 เซนติเมตร) หมักเป็นเวลา 21 วัน วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ 3 ชุดทดลอง ทดลองซ้ำชุดละ 3 ครั้ง เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วย DMRT

2.3 ศึกษาปริมาณของแข็งละลายได้ที่เหมาะสมต่อผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มแอลกอฮอล์ต่ำจากน้ำส้มโอพันธุ์ปลูกชาวแตงกวา เมื่อใช้เส้นใยเห็ดในการหมัก

เตรียมน้ำส้มโอความเข้มข้นที่เหมาะสมจากข้อ 2.1 และปริมาณกล้ำเชื้อเส้นใยเห็ดที่เหมาะสมจากข้อ 2.2 มาปรับปริมาณของแข็งที่ละลายได้ 3 ระดับ คือ 18, 20 และ 22 องศาบริกซ์ หมักเป็นเวลา 21 วัน วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ 3 ชุดทดลอง ทดลองซ้ำชุดละ 3 ครั้ง เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วย DMRT

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 ความเข้มข้นของน้ำส้มโอที่เหมาะสมต่อผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มแอลกอฮอล์ต่ำจากน้ำส้มโอพันธุ์ปลูกชาวแตงกวา เมื่อใช้เส้นใยเห็ดในการหมัก

จากการศึกษาการเจริญของเส้นใยเห็ดนางวลบนอาหาร PuSA ที่มีความเข้มข้นของน้ำส้มโอร้อยละ 60, 80 และ 100 เมื่ออายุ 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18, 21, 24 และ 27 วัน พบว่า เส้นใยเห็ดนางวลมีเส้นผ่านศูนย์กลางโคโลนีเพิ่มขึ้น เมื่อเพาะเลี้ยงในอาหารที่มีความเข้มข้นของน้ำส้มโอเพิ่มขึ้น ผลกระทบนี้อาจเกิดจากส่วนผสมของน้ำส้มโอที่มีปริมาณแตกต่างกัน เนื่องจากในน้ำส้มโอพันธุ์ปลูกชาวแตงกวามีส่วนประกอบของโปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต โซเดียม โพแทสเซียม แมกนีเซียม แคลเซียม ฟอสฟอรัส เหล็ก สังกะสี และวิตามินซี (Ministry of Public Health, 2010) ซึ่งส่วนประกอบดังกล่าวเป็นองค์ประกอบที่เห็ดต้องการใช้ในการเจริญเติบโต โดยเฉพาะน้ำตาลกลูโคส (Glucose) ที่จำเป็นต่อการเจริญเติบโตของเส้นใยเห็ด อย่างไรก็ตามพบว่า อายุ (วัน) ในการหมักเดียวกับการเจริญของเส้นผ่านศูนย์กลางโคโลนีที่ความเข้มข้นของน้ำส้มโอร้อยละ 60, 80 และ 100 จากตารางที่ 1 ในแนวนอนเดียวกันไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความ

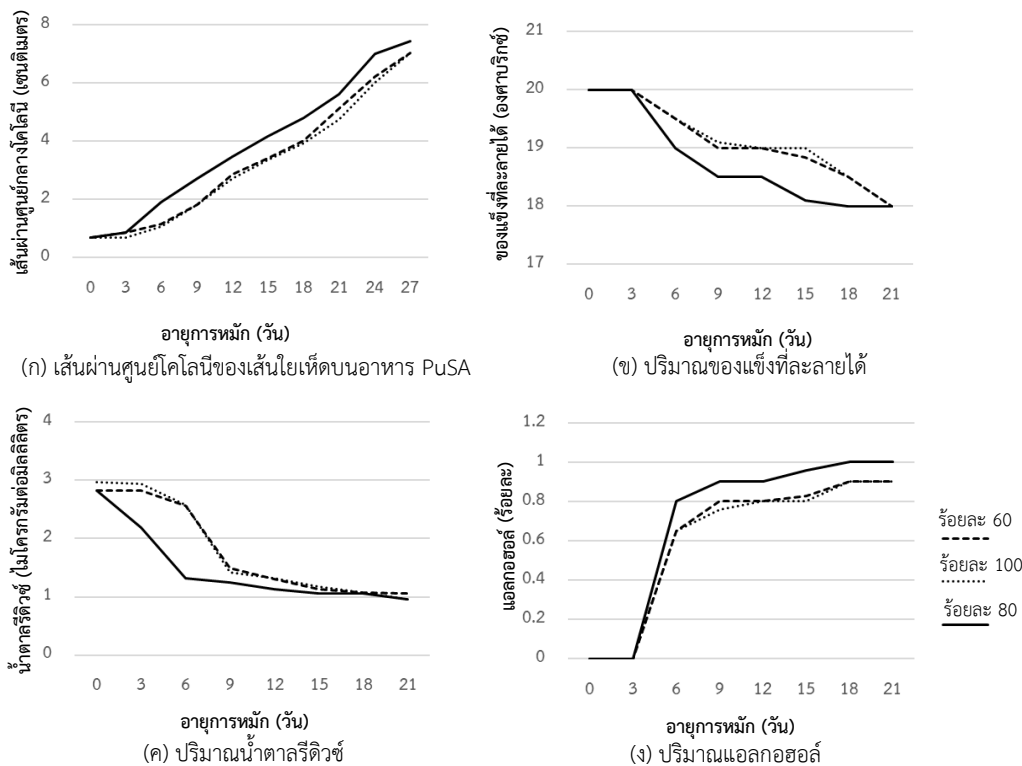
เชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยพบว่า เชื้อเจริญเติบโตได้ดีที่สุดและมีเส้นผ่านศูนย์กลางโคโลนีสูงสุดเท่ากับ 7.43 ± 0.15 เซนติเมตร ที่ความเข้มข้นของน้ำส้มโอร้อยละ 100 และหมักเป็นเวลา 27 วัน ดังตารางที่ 1 และรูปที่ 2

นอกจากนี้ เมื่อนำน้ำส้มโอที่ความเข้มข้นร้อยละ 60, 80 และ 100 มาเติมกล้าเชื้อเส้นใยเห็ด 10 ชิ้นต่อ น้ำส้มโอ 100 มิลลิลิตร หมักเป็นเวลา 21 วัน พบว่า เมื่อระยะเวลาการหมักเพิ่มขึ้น ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ และปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ลดลง แต่ปริมาณแอลกอฮอล์เพิ่มขึ้น ซึ่งแอลกอฮอล์ที่เกิดขึ้นเกิดจากกระบวนการหมัก น้ำตาลของเส้นใยเห็ดนางวล โดยจะใช้น้ำตาลเพื่อการเจริญเติบโตและผลิตเอนไซม์เอติเอช เพื่อใช้ในการ เปลี่ยนสารอะซีตัลดีไฮด์ไปเป็นเอทานอล (Okamura et al., 2001) จากการทดลองพบว่า ได้ปริมาณ แอลกอฮอล์สูงสุด คือร้อยละ 1.00 ± 0.00 ที่ความเข้มข้นของน้ำส้มโอร้อยละ 100 ดังตารางที่ 2 และรูปที่ 2 ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้เลือกน้ำส้มโอที่ความเข้มข้นร้อยละ 100 มาทดสอบต่อไป เนื่องจากที่ระดับความเข้มข้น ดังกล่าวมีแนวโน้มส่งเสริมการเจริญเติบโตของเส้นใยเห็ดดีที่สุด รวมถึงให้ปริมาณแอลกอฮอล์ที่สูงกว่าเมื่อ เปรียบเทียบกับความเข้มข้นอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ตารางที่ 1. เส้นผ่านศูนย์กลางของโคโลนีเส้นใยเห็ดนางวลที่เจริญบนอาหาร PuSA ที่ความเข้มข้นของน้ำส้มโอ 3 ระดับ

อายุ (วัน)	ค่าเฉลี่ยเส้นผ่านศูนย์กลางโคโลนี (เซนติเมตร)		
	ความเข้มข้นของน้ำส้มโอ (ร้อยละ)		
	60	80	100
0	$0.70 \pm 0.00^{i \text{ } \eta}$	$0.70 \pm 0.00^{i \text{ } \eta}$	$0.70 \pm 0.00^{i \text{ } \eta}$
3	$0.86 \pm 0.05^{i \text{ } \eta}$	$0.70 \pm 0.00^{i \text{ } \eta}$	$0.86 \pm 0.05^{i \text{ } \eta}$
6	$1.16 \pm 0.05^{h \text{ } \psi}$	$1.06 \pm 0.11^{h \text{ } \psi}$	$1.90 \pm 0.10^{h \text{ } \eta}$
9	$1.83 \pm 0.05^{g \text{ } \eta}$	$1.83 \pm 0.20^{g \text{ } \eta}$	$2.73 \pm 0.11^{g \text{ } \eta}$
12	$2.86 \pm 0.05^{f \text{ } \eta \psi}$	$2.73 \pm 0.30^{f \text{ } \psi}$	$3.46 \pm 0.15^{f \text{ } \eta}$
15	$3.40 \pm 0.15^{e \text{ } \psi}$	$3.36 \pm 0.25^{e \text{ } \psi}$	$4.16 \pm 0.15^{e \text{ } \eta}$
18	$4.03 \pm 0.23^{d \text{ } \psi}$	$3.93 \pm 0.15^{d \text{ } \psi}$	$4.80 \pm 0.10^{d \text{ } \eta}$
21	$5.13 \pm 0.40^{c \text{ } \eta \psi}$	$4.73 \pm 0.11^{c \text{ } \psi}$	$5.60 \pm 0.20^{c \text{ } \eta}$
24	$6.23 \pm 0.66^{b \text{ } \eta \psi}$	$6.00 \pm 0.20^{b \text{ } \psi}$	$7.00 \pm 0.10^{b \text{ } \eta}$
27	$7.03 \pm 0.05^{a \text{ } \eta}$	$7.03 \pm 0.05^{a \text{ } \eta}$	$7.43 \pm 0.15^{a \text{ } \eta}$

หมายเหตุ: *ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานหนึ่งค่าที่ได้จากการทำซ้ำสามครั้ง *ตัวอักษรภาษาอังกฤษเหมือนกันในแนวตั้ง เดียวกัน บ่งชี้ถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 *ตัวอักษรภาษาไทยเหมือนกันใน แนวอนเดียวกัน บ่งชี้ถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95



รูปที่ 2. เส้นผ่านศูนย์กลางโคโรนารีของเส้นใยเห็ดบนอาหาร PuSA ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และปริมาณแอลกอฮอล์ เมื่อใช้ความเข้มข้นของน้ำส้มโอ 3 ระดับ และใช้ปริมาณกล้าเชื้อเส้นใยเห็ด 10 ขึ้น หมักเป็นเวลา 21 วัน

ตารางที่ 2. ปริมาณแอลกอฮอล์ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหมักกล้าเชื้อเส้นใยเห็ด 3 ระดับ ในความเข้มข้นของน้ำส้มโอ 3 ระดับ ที่ความเข้มข้นน้ำส้มโอร้อยละ 100 โดยหมักเป็นเวลา 21 วัน

อายุ การหมัก (วัน)	แอลกอฮอล์ (ร้อยละ)					
	ความเข้มข้นของน้ำส้มโอ (ร้อยละ)			กล้าเชื้อเส้นใยเห็ด (ขึ้น)		
	60	80	100	5	10	15
0	0.00±0.00 ^d ^ก	0.00±0.00 ^d ^ก	0.00±0.00 ^d ^ก	0.00±0.00 ^f ^ก	0.00±0.00 ^e ^ก	0.00±0.00 ^d ^ก
3	0.00±0.00 ^d ^ก	0.00±0.00 ^d ^ก	0.00±0.00 ^d ^ก	0.00±0.00 ^f ^ก	0.00±0.00 ^e ^ก	0.00±0.00 ^d ^ก
6	0.65±0.00 ^c ^ก	0.65±0.00 ^c ^ก	0.80±0.00 ^c ^ก	0.63±0.02 ^e ^ก	0.80±0.00 ^d ^ก	0.81±0.02 ^c ^ก
9	0.80±0.00 ^b ^ก	0.76±0.05 ^b ^ก	0.90±0.00 ^b ^ก	0.66±0.02 ^{de} ^ข	0.88±0.02 ^c ^ก	0.95±0.00 ^b ^ก
12	0.80±0.00 ^b ^ก	0.80±0.00 ^b ^ก	0.90±0.00 ^b ^ก	0.70±0.00 ^{ed} ^ก	0.90±0.00 ^{bc} ^ก	0.96±0.02 ^b ^ก
15	0.83±0.05 ^b ^ก	0.80±0.00 ^b ^ก	0.96±0.05 ^a ^ก	0.73±0.05 ^{bc} ^ก	0.91±0.02 ^b ^ก	1.00±0.00 ^a ^ก
18	0.90±0.00 ^a ^ก	0.90±0.00 ^a ^ก	1.00±0.00 ^a ^ก	0.76±0.05 ^{ab} ^ก	1.00±0.00 ^a ^ก	1.00±0.00 ^a ^ก
21	0.90±0.00 ^a ^ก	0.90±0.00 ^a ^ก	1.00±0.00 ^a ^ก	0.80±0.00 ^a ^ก	1.00±0.00 ^a ^ก	1.00±0.00 ^a ^ก

หมายเหตุ: *ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานหนึ่งค่าที่ได้จากการทำซ้ำสามครั้ง *ตัวอักษรภาษาอังกฤษเหมือนกันในแนวตั้งเดียวกัน บ่งชี้ถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 *ตัวอักษรภาษาไทยเหมือนกันในแนวนอนเดียวกัน บ่งชี้ถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

3.2 ปริมาณกล้าเชื้อเส้นใยเห็ดที่เหมาะสมต่อผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มแอลกอฮอล์ทำจากน้ำส้มโอพันธุ์ปลูกชาวแตงกวา

จากการนำความเข้มข้นของน้ำส้มโอร้อยละ 100 ซึ่งเป็นสิ่งที่ได้จากการทดลองในข้อ 3.1 มาเติมเชื้อเส้นใยเห็ดที่มีการแปรผันปริมาณกล้าเชื้อ 3 ระดับ ได้แก่ 5, 10 และ 15 ขึ้นต่อน้ำส้มโอ 100 มิลลิลิตร หมักเป็นเวลา 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18 และ 21 วัน พบว่า เมื่อเวลาการหมักเพิ่มขึ้น ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ลดลงจาก 20 เป็น 19 องศาบริกซ์ ที่ปริมาณกล้าเชื้อเส้นใยเห็ด 5 ขึ้น ในขณะที่ปริมาณกล้าเชื้อเส้นใยเห็ด 10 และ 15 ขึ้น ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ลดลงจาก 20 เป็น 18 องศาบริกซ์ สำหรับผลการศึกษาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์พบว่า เมื่อเวลาการหมักเพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ลดลงจาก 3.12 เป็น 1.21 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ที่ปริมาณกล้าเชื้อเส้นใยเห็ด 5 ขึ้น ในขณะที่ปริมาณกล้าเชื้อเส้นใยเห็ด 10 ขึ้น ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ลดลงจาก 3.03 เป็น 1.35 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร และถ้าปริมาณกล้าเชื้อเส้นใยเห็ด 15 ขึ้น ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ลดลงจาก 3.14 เป็น 0.97 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ส่วนผลการศึกษาปริมาณแอลกอฮอล์พบว่า เมื่อเวลาการหมักเพิ่มขึ้น ปริมาณแอลกอฮอล์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0 ± 0.00 เป็น 0.80 ± 0.00 ที่ปริมาณกล้าเชื้อเส้นใยเห็ด 5 ขึ้น ในขณะที่ปริมาณกล้าเชื้อเส้นใยเห็ด 10 และ 15 ขึ้น ปริมาณแอลกอฮอล์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0 ± 0.00 เป็น 1.00 ± 0.00 ดังตารางที่ 2 และรูปที่ 3 จากการทดลองแสดงให้เห็นว่า เส้นใยเห็ดนางรมสามารถใช้เป็นเชื้อในการหมักได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ วัณณา อัจฉริยะโพธา (Ascharyhaphotha, 2004) ที่ศึกษาการหมักน้ำผลไม้โดยใช้ปริมาณกล้าเชื้อเส้นใยเห็ด ตินแรด เห็ดนางฟ้า เห็ดนางรม และเห็ดหมื่นปี ที่ 5, 10 และ 15 เพลลิต (Pellet) ต่อน้ำผลไม้ 30 มิลลิลิตร พบว่า เมื่อใช้ปริมาณกล้าเชื้อเส้นใยเห็ดเพิ่มขึ้น จะทำให้ปริมาณแอลกอฮอล์เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ มีรายงานพบว่า เมื่อใช้ปริมาณกล้าเชื้อเส้นใยเห็ดแครง (*Schizophyllum commune* Fr.) ที่ 5, 10 และ 15 ขึ้น ในการหมัก น้ำส้มโอเป็นระยะเวลานานขึ้น ปริมาณของแข็งที่ละลายได้และน้ำตาลรีดิวซ์ลดลง แต่ปริมาณแอลกอฮอล์เพิ่มขึ้น (Somprasert & Pangnoi, 2015) อย่างไรก็ตามพบว่า ปริมาณแอลกอฮอล์ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหมักน้ำส้มโอความเข้มข้นร้อยละ 100 ของกล้าเชื้อเส้นใยเห็ดทั้ง 3 ระดับ ที่อายุ (วัน) ในการหมักเดียวกัน ไม่แตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังตารางที่ 2 ในแนวนอน

3.3 ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ที่เหมาะสมต่อผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มแอลกอฮอล์ทำจากน้ำส้มโอพันธุ์ปลูกชาวแตงกวา เมื่อใช้เส้นใยเห็ดในการหมัก

จากผลการทดลองในข้อ 3.1 และ 3.2 คัดเลือกความเข้มข้นน้ำส้มโอร้อยละ 100 และปริมาณกล้าเชื้อเส้นใยเห็ด 15 ขึ้นต่อน้ำส้มโอ 100 มิลลิลิตร นำมาแปรผันปริมาณของแข็งที่ละลายได้ 3 ระดับ ได้แก่ 18, 20 และ 22 องศาบริกซ์ หมักเป็นเวลา 0, 3, 6, 9, 12, 15, 18 และ 21 วัน พบว่า เมื่อระยะเวลาการหมักเพิ่มขึ้น ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ลดลง โดยลดลงจาก 18.00 เป็น 15.30 องศาบริกซ์ ลดลงจาก 20 เป็น 18 องศาบริกซ์ และลดลงจาก 22 เป็น 19.60 องศาบริกซ์ สำหรับผลการศึกษาปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์พบว่า เมื่อระยะเวลาการหมักเพิ่มขึ้น ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ลดลงจาก 2.97 เป็น 1.00 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ที่ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ 18 องศาบริกซ์ ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ลดลงจาก 3.13 เป็น 1.46 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ที่ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ 20 องศาบริกซ์ และปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ลดลงจาก 3.40 เป็น 1.52 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ที่ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ 22 องศาบริกซ์ ส่วนผลการศึกษาปริมาณแอลกอฮอล์พบว่า เมื่อระยะเวลาการหมักเพิ่มขึ้น ปริมาณแอลกอฮอล์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0.00 เป็น

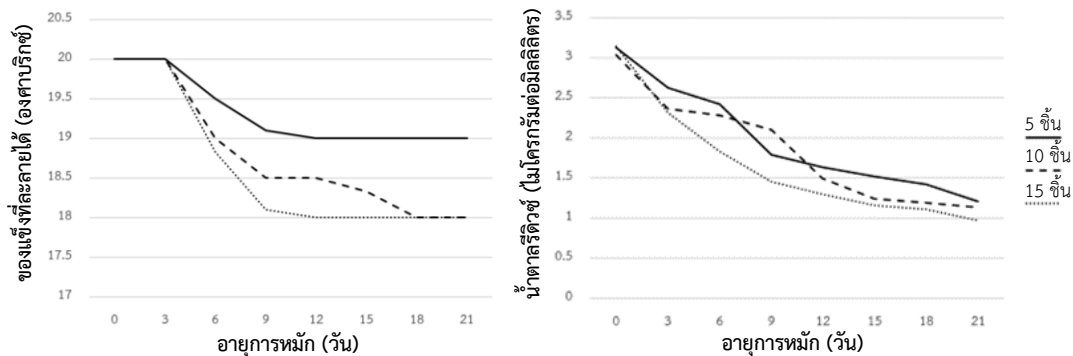
0.88±0.07 ที่ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ 18 องศาบริกซ์ ปริมาณแอลกอฮอล์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0.00 เป็น 1.05±0.00 ที่ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ 20 องศาบริกซ์ และปริมาณแอลกอฮอล์เพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0.00 เป็น 1.04±0.00 ที่ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ 22 องศาบริกซ์ ดังตารางที่ 3 และรูปที่ 4-5 ผลการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของอรอุมา นรราช (Norrarach, 2007) ที่รายงานการผลิตแอลกอฮอล์จากการหมักน้ำองุ่นโดยใช้เส้นใยเห็ดต่างผ่น (*Lentinus giganteus* Berk.) เห็ดตีนแรด เห็ดหูหนู (*Auricularia auricular* (Hook.) Underw.) และเห็ดหัวลิง (*Hericium erinaceus* (Bull.) Persoon) ในการหมักที่ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ 22 องศาบริกซ์ พบว่า ภายหลังจากการหมักปริมาณของแข็งที่ละลายได้ลดลง แต่มีปริมาณแอลกอฮอล์เพิ่มขึ้น นอกจากนี้รัฐพล ศรประเสริฐ และเสาวรส แพนงน้อย (Somprasert & Pangnoi, 2015) ได้ศึกษาการทำไวน์จากน้ำส้มโอโดยใช้เส้นใยเห็ดแครงในการหมักพบว่า ปริมาณของแข็งที่ละลายได้และน้ำตาลรีดิวซ์ลดลง แต่ปริมาณแอลกอฮอล์เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามพบว่า ปริมาณแอลกอฮอล์ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหมักน้ำส้มโอความเข้มข้นร้อยละ 100 ของกล้าเชื้อเส้นใยเห็ด 15 ขึ้น ที่มีปริมาณของแข็งที่ละลายได้ 18, 20 และ 22 องศาบริกซ์ ที่อายุ (วัน) ในการหมักเดียวกัน ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ดังตารางที่ 3 ในแนวนอน

จากผลการทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า เส้นใยเห็ดนางวลสามารถหมักน้ำส้มโอพันธุ์ปลูกชาวแตงกวาเพื่อผลิตเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ต่ำ โดยสามารถผลิตแอลกอฮอล์ได้ร้อยละ 1.00-1.04 ดังรูปที่ 5 เมื่อใช้ความเข้มข้นของน้ำส้มโอร้อยละ 100 ใช้ปริมาณกล้าเชื้อเส้นใยเห็ด 15 ขึ้น ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.7 เซนติเมตร และใช้ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ 22 องศาบริกซ์ เมื่อหมักเป็นเวลา 12-21 วัน อย่างไรก็ตาม หากต้องการผลิตภัณฑ์ที่มีปริมาณแอลกอฮอล์เพิ่มขึ้น อาจต้องใช้ปริมาณกล้าเชื้อที่มากขึ้นหรือใช้เวลาในการหมักที่นานขึ้น

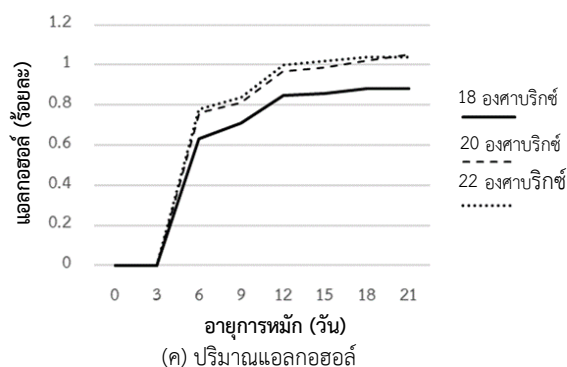
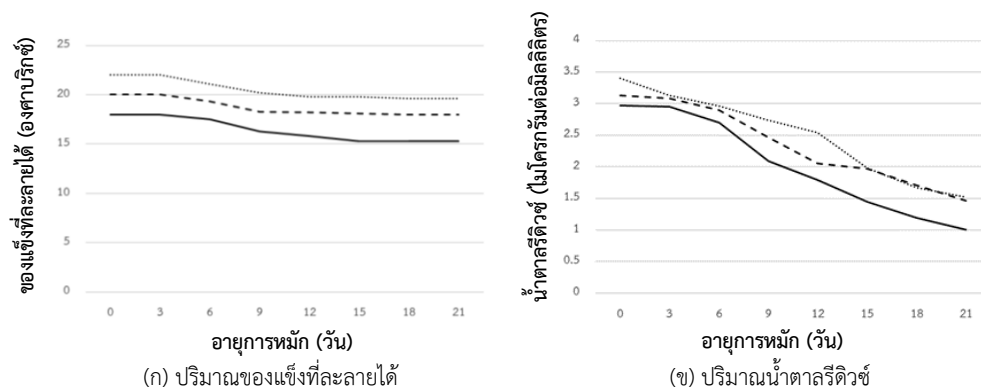
ตารางที่ 3. ปริมาณแอลกอฮอล์ของผลิตภัณฑ์ที่ได้จากการหมักกล้าเชื้อเส้นใยเห็ด 15 ขึ้น ในความเข้มข้นของน้ำส้มโอร้อยละ 100 และแปรผันของแข็งที่ละลายได้ 3 ระดับ โดยหมักเป็นเวลา 21 วัน

อายุการหมัก (วัน)	แอลกอฮอล์ (ร้อยละ)		
	ของแข็งที่ละลายได้ (องศาบริกซ์)		
	18	20	22
0	0.00±0.00 ^c ^η	0.00±0.00 ^d ^η	0.00±0.00 ^d ^η
3	0.00±0.00 ^c ^η	0.00±0.00 ^d ^η	0.00±0.00 ^d ^η
6	0.63±0.02 ^b ^η	0.76±0.02 ^c ^η	0.78±0.02 ^c ^η
9	0.71±0.02 ^b ^η	0.81±0.02 ^b ^η	0.84±0.04 ^b ^η
12	0.85±0.05 ^a ^η	0.97±0.05 ^a ^η	1.00±0.02 ^a ^η
15	0.86±0.05 ^a ^η	0.99±0.04 ^a ^η	1.02±0.00 ^a ^η
18	0.88±0.07 ^a ^η	1.02±0.00 ^a ^η	1.04±0.00 ^a ^η
21	0.88±0.07 ^a ^η	1.05±0.00 ^a ^η	1.04±0.00 ^a ^η

หมายเหตุ: *ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานหนึ่งค่าที่ได้จากการทำซ้ำสามครั้ง *ตัวอักษรภาษาอังกฤษเหมือนกันในแนวตั้งเดียวกัน บ่งชี้ถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 *ตัวอักษรภาษาไทยเหมือนกันในแนวนอนเดียวกัน บ่งชี้ถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95



รูปที่ 3. ปริมาณของแข็งที่ละลายได้และปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ เมื่อแปรผันปริมาณกล้ำเชื้อเส้นใยเห็ด 3 ระดับ ที่ความเข้มข้นน้ำของส้มโอร้อยละ 100 หมักเป็นเวลา 21 วัน



รูปที่ 4. ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ ปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ และปริมาณแอลกอฮอล์ เมื่อใช้ความเข้มข้นของน้ำส้มโอ ร้อยละ 100 ปริมาณกล้ำเชื้อเส้นใยเห็ด 15 ppt และแปรผันของแข็งที่ละลายได้ 3 ระดับ หมักเป็นเวลา 21 วัน



รูปที่ 5. ผลผลิตเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ต่ำที่เตรียมจากความเข้มข้นของน้ำส้มโอพันธุ์ปลูกชาวแตงกวาร้อยละ 100 ปริมาณกล้าเชื้อเส้นใยเห็ด 15 ขึ้น และปริมาณของแข็งที่ละลายได้ 22 องศาบริกซ์ หมักเป็นเวลา 21 วัน

4. สรุปผลการวิจัย

เส้นใยเห็ดนางนวลสามารถเจริญเติบโตได้บนอาหาร PuSA ที่ความเข้มข้นของน้ำส้มโอร้อยละ 60, 80 และ 100 เมื่อนำน้ำส้มโอที่ความเข้มข้นทั้ง 3 ระดับ มาทดสอบด้วยการเติมกล้าเชื้อเส้นใยเห็ด 10 ขึ้น หมักเป็นเวลา 21 วัน พบว่า เมื่อเวลาการหมักเพิ่มขึ้น ปริมาณของแข็งที่ละลายได้และปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ลดลง ในขณะที่ปริมาณแอลกอฮอล์เพิ่มขึ้นสูงสุดร้อยละ 1.00 ที่ความเข้มข้นร้อยละ 100 จากนั้น เมื่อนำความเข้มข้นน้ำส้มโอร้อยละ 100 และแปรผันปริมาณกล้าเชื้อเส้นใยเห็ด 3 ระดับ พบว่า เมื่อเวลาการหมักเพิ่มขึ้น ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ และปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ลดลง ส่วนปริมาณแอลกอฮอล์เพิ่มขึ้นสูงสุดร้อยละ 1.00 ที่ปริมาณกล้าเชื้อ 10 และ 15 ขึ้น สำหรับการทดสอบปริมาณของแข็งที่ละลายได้ 3 ระดับ ที่ความเข้มข้นของน้ำส้มโอร้อยละ 100 กล้าเชื้อเส้นใยเห็ด 15 ขึ้น พบว่า เมื่อระยะเวลาการหมักเพิ่มขึ้น ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ และปริมาณน้ำตาลรีดิวซ์ลดลง ส่วนปริมาณแอลกอฮอล์เพิ่มขึ้นสูงสุดร้อยละ 1.05 ที่ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ 20 องศาบริกซ์ จากผลการทดลองแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของเส้นใยเห็ดนางนวลซึ่งสามารถใช้แทนยีสต์ในการหมักจนได้ผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มแอลกอฮอล์ต่ำ รวมถึงประสิทธิภาพของน้ำส้มโอโดยการใช้เส้นใยเห็ดในการหมักน่าจะทำให้เกิดสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในผลิตภัณฑ์ ซึ่งจะส่งผลดีต่อสุขภาพของผู้ดื่ม

เอกสารอ้างอิง (References)

Ascharyhaphotha, W. (2004). *Development of wine product by mushroom fermentation* [Master's thesis, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang]. King Mongkut's

- Institute of Technology Ladkrabang Repository. <https://opac.lib.kmitl.ac.th/catalog/BibItem.aspx?BibID=b00167740> (in Thai)
- Chaijumrus, S. (1993). *Partial purification and characterization of antitumor activities of the polysaccharides isolated from fruiting body and the mycelium of Ganoderma lucidum* [Master's thesis, Chulalongkorn University]. Chulalongkorn University Repository. <https://cuir.car.chula.ac.th/handle/123456789/62771> (in Thai)
- Corfe, S., Hyde, R., & Sheperd, J. (2022). *Alcohol-free and low-strength drinks: Understanding their role in reducing alcohol-related harms*. Social Market Foundation. <https://coilink.org/20.500.12592/0pmdhg>
- Department of Agricultural Extension. (2007). *Thailand's international trade statistics*. Information Development and Services Group, Bangkok. (in Thai)
- Klaus, A., Wan-Mohtar, W. A. A. Q. I., Nikolić, B., Cvetković, S., & Vunduk, J. (2021). Pink oyster mushroom *Pleurotus flabellatus* mycelium produced by an airlift bioreactor: The evidence of potent in vitro biological activities. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 37(1), 17-30. <https://doi.org/10.1007/s11274-020-02980-6>
- Malathi, G., & Murugesan, A. K. (2023). Bioconversion, nutritional analysis, radical scavenging and characterization of substrates of *Pleurotus flabellatus* (Berk. and Br.) Sacc. *South African Journal of Botany*, 157, 423-437. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2023.04.025>
- Ministry of Public Health. (2010). *Nutritional value in fruits*. Agricultural Co-operative Federation of Thailand, Bangkok. (in Thai)
- Norrarach, O. (2007). *Study on wine production by mushroom mycelium fermentation* [Master's thesis, Mahasarakham University]. Mahasarakham University Repository. <https://opac.msu.ac.th/bibitem?bibid=b00231392> (in Thai)
- Office of Provincial Commercial Affairs Chainat. (2007). *Report on application for registration of geographical indications*. Department of Intellectual Property, Chai Nat Province. (in Thai)
- Office of the Forest Herbarium. (2014). *Tem Smitinand's Thai plant names*. Department of National Parks, Wildlife and Plant Conservation, Bangkok. (in Thai)
- Okamura, T., Ogata, T., Minamoto, N., Takeno, T., Noda, H., Fukuda, S., & Ohsugi, M. (2001). Characteristics of wine produced by mushroom fermentation. *Bioscience, Biotechnology, and Biochemistry*, 65(7), 1596-1600. <https://doi.org/10.1271/bbb.65.1596>
- Poomkaedum, P. (2003). *Studies on genetic variation of Tricholoma crassum isolates by isozyme techniques* [Master's thesis, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang]. King

- Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Repository. <https://opac.lib.kmitl.ac.th/catalog/BiblItem.aspx?BibID=b00164948> (in Thai)
- Rahman, N. S. A., Hassan, M., Hamid, N. I., Mohamad, S. A., Mohamad, N., Mahadi, M., Zailan, N. F. Z., & Rozila, I. (2021). Antioxidative and photoprotective effects of *Pleurotus flabellatus* (pink oyster mushroom) polysaccharides against UVA radiation-induced cytotoxicity in human dermal fibroblast (HS-27) cell line. *Malaysian Journal of Medicine and Health Sciences*, 17(3), 185-191.
- Somogyi, M. (1952). Notes on sugar determination. *Journal of Biological Chemistry*, 195(3), 19-23. [https://doi.org/10.1016/S0021-9258\(19\)50870-5](https://doi.org/10.1016/S0021-9258(19)50870-5)
- Sornprasert, R., & Pangnoi, S. (2015). The imitation wine from the juice of pomelo (*Citrus maxima* (Burm.f.) Merr.), Khao Taeng Kwa variety, fermented with the mycelium of Hed Krang (*Schizophyllum commune* Fr.). *Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok*, 25(3), 449-457. <http://dx.doi.org/10.14416/j.kmutnb.2015.06.001> (in Thai)
- Thai Industrial Standards Institute. (2001). *Wine industry product standard (TISI. 2089-2001)*. Ministry of Industry. (in Thai)
- Thai Industrial Standards Institute. (2024a). *Thai community product standard: Fruit wine (TCPS.2/2024)*. Ministry of Industry. (in Thai)
- Thai Industrial Standards Institute. (2024b). *Thai community product standard: Herbal wine (TCPS.31/2024)*. Ministry of Industry. (in Thai)
- Theppakorn, T., & Chaiwong, S. (2011). Bioactive compounds in pummelo and grapefruit. *King Mongkut's Agricultural Journal*, 29(2), 90-99. (in Thai)
- World Health Organization. (2023). *A public health perspective on zero- and low alcohol beverages*. World Health Organization. <https://www.who.int/publications/i/item/9789240072152>

การลดผลกระทบของซัลไฟด์และเพิ่มศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจาก น้ำเสียที่มีซัลเฟตสูงด้วยกระบวนการซัลไฟด์ออกซิเดชันและดีไนตริฟิเคชัน

Reducing Effect of Sulfide and Increasing Potential of Biogas Production from High Sulfate Wastewater by Sulfide Oxidation and Denitrification Process

วิภาณดา ทองเนื้อแข็ง* และ นิรมล จันทรชาติ

Wikanda Thongnueakhaeng* and Niramol Juntarachat

คณะวิทยาศาสตร์และนวัตกรรมดิจิทัล มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง จ.พัทลุง ประเทศไทย

Faculty of Science and Digital Innovation, Thaksin University, Phatthalung, Thailand

วันที่ส่งบทความ : 6 มิถุนายน 2567 วันที่แก้ไขบทความ : 28 พฤษภาคม 2568 วันที่ตอบรับบทความ : 30 พฤษภาคม 2568

Received: 6 June 2024, Revised: 28 May 2025, Accepted: 30 May 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการลดผลกระทบของซัลไฟด์ต่อจุลินทรีย์ผลิตมีเทนในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียที่มีซัลเฟตสูง โดยควบคุมสภาวะที่เหมาะสมภายในระบบเพื่อให้เกิดการกำจัดทั้งสารอินทรีย์ ซัลเฟต และซัลไฟด์ ภายในสภาวะไร้อากาศ โดยทำการทดลองทั้งในระดับห้องปฏิบัติการและในสถานประกอบการผลิตยางแผ่น ซึ่งในระดับห้องปฏิบัติการมีการเติมไนเตรทในน้ำเสียก่อนเข้าระบบ โดยควบคุมอัตราส่วน Sulfate/Nitrate (S/N) ที่ 2.0 ศึกษาที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำเสีย 10, 20 และ 30 วัน สำหรับการทดลองในสถานประกอบการ มีการใช้ไนเตรทจากระบบไนตริฟิเคชันของน้ำเสียจากสถานประกอบการเอง โดยไม่มีการเติมสารเคมีไนเตรท ผลการศึกษาพบว่า การเดินระบบที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำเสีย 10, 20 และ 30 วัน มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีเฉลี่ยร้อยละ 61.18 ± 1.52 , 82.99 ± 2.24 และ 84.68 ± 2.32 ตามลำดับ โดยที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำเสีย 30 วัน เกิดก๊าซชีวภาพสูงสุด คือ 0.35 ± 0.04 L-CH₄/gCOD_{removed} มีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนร้อยละ 71.2 ± 0.4 และจากการทดลองในสถานประกอบการพบว่า ระบบทำงานได้ใกล้เคียงกับการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี เฉลี่ยร้อยละ 80.56 ± 1.05 และอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเฉลี่ย 0.30 ± 0.09 L-CH₄/gCOD_{removed} ระบบในการศึกษาครั้งนี้สามารถลดผลกระทบของซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นในระบบต่อจุลินทรีย์สร้างมีเทน ทำให้กิจกรรมของจุลินทรีย์สร้างมีเทนมีค่าเพิ่มขึ้นจากระบบเดิมของสถานประกอบการ ที่มีค่าเฉลี่ย 0.035 ± 0.001 gCH₄/gVSS/d เพิ่มขึ้นเป็น 0.060 ± 0.001 gCH₄/gVSS/d

คำสำคัญ : ก๊าซชีวภาพ จุลินทรีย์ผลิตมีเทน การกำจัดซัลไฟด์ น้ำเสียซัลเฟตสูง น้ำเสียผลิตยางแผ่น

*ที่อยู่ติดต่อ E-mail address: vikanda@tsu.ac.th

<https://doi.org/10.55003/scikmitl.2025.263609>

Abstract

This research focuses on mitigating the impact of sulfide on methane-producing bacteria in biogas production system to enhance the efficiency of biogas production from high-sulfate wastewater by controlling the appropriate conditions within the system to facilitate the removal of organic substances, sulfate, and sulfide under anaerobic conditions. Experimental runs were conducted both in laboratory and rubber sheet establishment. At the laboratory scale, nitrate is added to the wastewater before it enters the system, with the Sulfate/Nitrate (S/N) ratio controlled at 2.0. The study examined Hydraulic Retention Times (HRT) of 10, 20, and 30 days. In the establishment, nitrate was sourced from nitrification system of wastewater from establishment without chemical addition. Results showed that operation at HRT of 10, 20, and 30 days provided organic removal efficiencies in form of COD (Chemical Oxygen Demand) at 61.18 ± 1.52 , 82.99 ± 2.24 , and $84.68 \pm 2.32\%$, respectively. At HRT of 30 days, the maximum biogas production rate was found to be $0.35 \pm 0.4\%$ L-CH₄/gCOD_{removed}, with methane content comprising $71.2 \pm 0.4\%$ of the gas. The experiment in establishment was found to work similarly to laboratory experiments, with average COD removal efficiency of $80.56 \pm 1.05\%$ and average biogas production rate of 0.30 ± 0.09 L-CH₄/gCOD_{removed}. The system in this study was able to reduce the effects of sulfides occurring in the system on methane-producing microorganisms. This has led to an increase in the activity of methane-producing microorganisms from the existing system of the establishment from average of 0.035 ± 0.001 gCH₄/gVSS/d increased to 0.060 ± 0.001 gCH₄/gVSS/d.

Keywords: Biogas, Methanogens, Sulfide removal, High sulfate wastewater, Rubber sheet wastewater

1. บทนำ

โรงงานอุตสาหกรรมหลายประเภทก่อให้เกิดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของสารอินทรีย์สูง เช่น โรงงานแปรรูปยางพารา โรงงานผลิตน้ำมันปาล์ม โรงงานแปรงไม้สำหรับล้าง และโรงงานผลิตน้ำตาล เป็นต้น ระบบบำบัดน้ำเสียที่เหมาะสมในการบำบัดน้ำเสียที่มีความเข้มข้นของสารอินทรีย์สูงที่ได้รับความนิยมในปัจจุบันคือ ระบบไร้อากาศ (Anaerobic wastewater treatment) เนื่องจากเป็นระบบที่ต้องการพลังงานในการเดินระบบต่ำ ซึ่งนอกจากจะสามารถบำบัดน้ำเสียให้มีคุณภาพดีขึ้นแล้ว ยังสามารถเปลี่ยนสารอินทรีย์เป็นก๊าซชีวภาพ (Achinas et al., 2020; Charcosset, 2014) ซึ่งประกอบด้วย คาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) มีเทน (CH₄) และไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H₂S) เป็นต้น โดยองค์ประกอบส่วนใหญ่ร้อยละ 50-75 เป็นก๊าซมีเทน (Sangeetha et al., 2020) ซึ่งเป็นก๊าซเรือนกระจกที่มีความรุนแรงในการก่อให้เกิดภาวะโลกร้อนมากกว่า CO₂ ถึง 27.9 เท่า (Mar et al., 2022) แต่ด้วยก๊าซมีเทนมีคุณสมบัติเป็นเชื้อเพลิงให้ความร้อน การบำบัด

น้ำเสียด้วยระบบไร้อากาศ จึงมุ่งพัฒนาให้มีศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพที่มีก๊าซมีเทนสูง เพื่อนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทน ทั้งเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ให้ความร้อนโดยตรงหรือนำไปผลิตกระแสไฟฟ้า (Wen et al., 2011) อย่างไรก็ตามน้ำเสียจากหลายอุตสาหกรรมที่มีการปนเปื้อนซัลเฟตสูง เช่น โรงงานแปรรูปยางพารา และโรงงานแปรรูปอาหารทะเล เป็นต้น จุลินทรีย์ที่ทำการย่อยสลายซัลเฟตในระบบไร้อากาศ (Sulfate Reducing Bacteria: SRB) จะทำการผลิตซัลไฟด์ ซึ่งเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ผลิตมีเทน (Methanogens) (Yekta et al., 2023) ก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้จึงมีองค์ประกอบของมีเทนลดลง อีกทั้งเกิดการปนเปื้อนของไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพ จึงเกิดปัญหากลิ่นเหม็นที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ อีกทั้งส่งผลให้เครื่องจักรและอุปกรณ์ต่าง ๆ เกิดปัญหาผุกร่อนเสียหาย (Lin et al., 2013) ทำให้ไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทน โรงงานจึงระบายก๊าซชีวภาพที่ผลิตได้ทั้งแบบโดยตรงและเผาทั้งก่อนปล่อยออกสู่บรรยากาศ ซึ่งเป็นต้นเหตุของภาวะเรือนกระจกและวิกฤตโลกร้อน

การแปรรูปยางพาราก่อให้เกิดน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของสารมลพิษในระดับสูง โดยมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในรูปซีโอดี 3,129-12,450 mg-COD/L ซัลเฟต 1,075-4,210 mg-SO₄²⁻/L ไนโตรเจน 303-2,290 mg-TKN/L และมีค่า pH 3.1-5.2 (Boonsawang et al., 2008; Ho et al., 2023; Saritpongteeraka & Chaiprapat, 2008) ระบบบำบัดน้ำเสียที่เกษตรกรและสถานประกอบการมีการประยุกต์ใช้ในการจัดการน้ำเสียจากการแปรรูปยางพาราในปัจจุบัน คือระบบบ่อหมักไร้อากาศแบบเปิด เนื่องจากเป็นระบบที่มีต้นทุนต่ำ แต่ด้วยองค์ประกอบของน้ำเสียจากการแปรรูปยางพาราซึ่งมีความเข้มข้นของสารอินทรีย์และซัลเฟตสูงมาก เมื่อเกิดการย่อยสลายจึงทำให้เกิดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจกสู่ชั้นบรรยากาศ อีกทั้งเกิดปัญหากลิ่นเหม็นรุนแรงที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพของผู้ปฏิบัติงานในสถานประกอบการและคนในชุมชนใกล้เคียง ปัญหาน้ำเสียที่เกิดจากการแปรรูปยางพาราจึงเป็นปัญหาที่สำคัญต้องมีการแก้ไขอย่างจริงจังและเร่งด่วน

จากปัญหาดังกล่าวข้างต้น จะเห็นได้ว่าซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นในระบบและการปนเปื้อนของก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพ เป็นปัญหาสำคัญในการประยุกต์ใช้ระบบผลิตก๊าซชีวภาพของน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนซัลเฟตสูง การแก้ปัญหาดังกล่าวสามารถพัฒนาระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียประเภทนี้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ และเนื่องจากน้ำเสียจากการแปรรูปยางพารายังมีการปนเปื้อนของไนโตรเจนสูง งานวิจัยนี้จึงทำการศึกษาการกำจัดซัลไฟด์ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพ ด้วยกระบวนการ Sulfide oxidation ร่วมกับ Denitrification โดยใช้ไนเตรทไนโตรเจนในการออกซิไดซ์ซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นในระบบหมักไร้อากาศให้เป็นตะกอนซัลเฟอร์ เพื่อลดผลกระทบของซัลไฟด์ต่อการผลิตมีเทน อีกทั้งยังเป็นการเพิ่มศักยภาพของระบบในการบำบัดน้ำเสียและผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งเป็นการลดการปนเปื้อนของไฮโดรเจนซัลไฟด์ในก๊าซชีวภาพ

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 การวางแผนการทดลอง

ในการศึกษาครั้งนี้ แบ่งการทดลองออกเป็น 2 แบบ คือ 1) การทดลองระดับห้องปฏิบัติการ และ 2) การทดลองในสถานประกอบการ ซึ่งมีรายละเอียดดังนี้

1) การทดลองระดับห้องปฏิบัติการ

ทำการทดลองแบบไร้อากาศในชุดทดลองถังหมักแบบปิดขนาด 200 ลิตร และถังเก็บก๊าซแบบระบบฝาคือรอบลอยขนาด 150 ลิตร ดังแสดงในรูปที่ 1 ทำการทดลองซ้ำจำนวน 3 ครั้ง ในการทดลองทำการเดินระบบด้วยตะกอนเชื้อจุลินทรีย์จากระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากฟาร์มหมู เติมโพแทสเซียมไนเตรท (KNO_3) (AR.grade ยี่ห้อ KemAus. Australia) ในน้ำเสียจากการผลิตยางแผ่นก่อนป้อนเข้าสู่ระบบ เพื่อใช้ไนเตรทเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในการกำจัดซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นในระบบหมักไร้อากาศ โดยทำการควบคุม Sulfate/Nitrogen (S/N) ที่สัดส่วน 2.0 (Xue et al., 2022) ศึกษาเปรียบเทียบการเดินระบบที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำเสีย 10, 20 และ 30 วัน ตรวจวัดอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพด้วยวิธีการแทนที่น้ำและเก็บตัวอย่างก๊าซ เพื่อวิเคราะห์หาองค์ประกอบก๊าซต่าง ๆ ทุกวัน เก็บตัวอย่างและวิเคราะห์ตัวอย่างน้ำเสียก่อนบำบัดและหลังผ่านการบำบัด โดยนำตัวอย่างตะกอนจุลินทรีย์จากชุดทดลองไปหาค่ากิจกรรมจุลินทรีย์ที่ผ่านการเดินระบบที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียต่าง ๆ

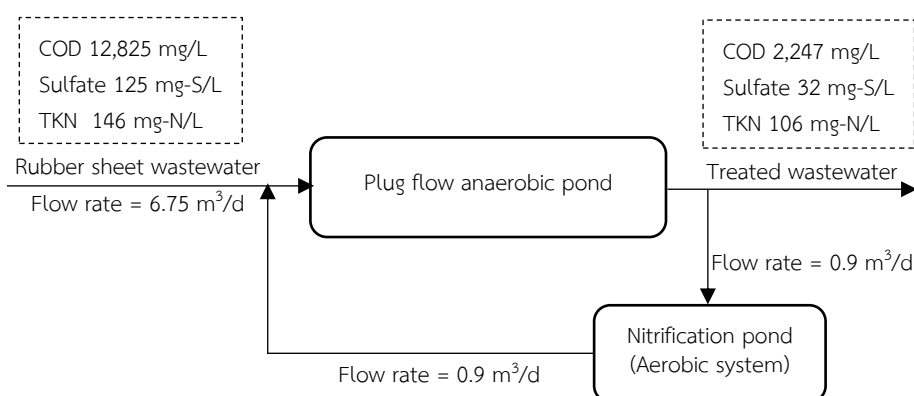


รูปที่ 1. ชุดการทดลองแบบไร้อากาศในห้องปฏิบัติการ

2) การทดลองในสถานประกอบการ

ศึกษาทดลองในโรงงานผลิตยางแผ่นรมควัน จังหวัดนครศรีธรรมราช ทำการปรับปรุงระบบบำบัดน้ำเสียแบบไร้อากาศที่มีอยู่เดิมของโรงงาน น้ำเสียเข้าระบบมีค่าซีโอดี (COD) 12,825 mg/L ซัลเฟต 125 mg-S/L และไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็น (Total Kjeldahl Nitrogen: TKN) 146 mg-N/L โดยระบบหลังการปรับปรุงประกอบด้วย บ่อหมักไร้อากาศแบบปิด (Plug flow anaerobic pond) ซึ่งทำหน้าที่กำจัดสารอินทรีย์และซัลเฟตในน้ำเสีย โดยจุลินทรีย์ในระบบไร้อากาศจะย่อยสลายสารอินทรีย์โมเลกุลใหญ่ไปเป็นกรดอะซิติก จากนั้นจุลินทรีย์สร้างมีเทนจะเปลี่ยนกรดอะซิติกไปเป็นก๊าซมีเทน และจุลินทรีย์กำจัดซัลเฟตจะย่อยสลายซัลเฟตและสารอินทรีย์ในน้ำเสียให้ผลผลิตหลักเป็นซัลไฟด์ โดยน้ำที่ผ่านการบำบัดจากระบบบ่อหมักไร้อากาศแบบปิดส่วนหนึ่งถูกสูบเข้าสู่ระบบไนตริฟิเคชัน (Nitrification) เพื่อเปลี่ยนแอมโมเนียไนโตรเจนที่มีอยู่มากในน้ำเสียเป็นไนเตรทและไนไตรท์ จากนั้นน้ำเสียที่มีองค์ประกอบของไนเตรท-ไนไตรท์ถูกป้อนกลับเข้าสู่บ่อหมักไร้อากาศแบบปิด เพื่อใช้ในไนเตรท-ไนไตรท์เป็นตัวรับอิเล็กตรอนในการกำจัดซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นในระบบด้วยกระบวนการชีวเคมี Sulfide oxidation และ Denitrification โดยควบคุมอัตราส่วน

ของ S/N ในระบบให้มีค่าเท่ากับ 2.0 (Xue et al., 2022) และระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียที่เหมาะสมที่ได้จากการทดลองในห้องปฏิบัติการ โดยแผนผังการทำงานของระบบการทดลองในสถานประกอบการแสดงดังรูปที่ 2



รูปที่ 2. ระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียที่มีซัลเฟตสูงด้วยกระบวนการซัลไฟด์ออกซิเดชันและดีไนตริฟิเคชัน (สถานประกอบการผลิตยางแผ่น)

2.2 การเก็บและวิเคราะห์ข้อมูล

ศึกษาประสิทธิภาพของระบบทั้งในระดับห้องปฏิบัติการและในสถานประกอบการ โดยวิเคราะห์พีเอช (pH) สารแขวนลอย สารอินทรีย์ในรูปซีไอดี ซัลเฟต ซัลไฟด์ ไนโตรท์ ไนเตรท และไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นในน้ำเสียก่อนเข้าระบบและน้ำ หลังการบำบัดทุก ๆ 5 วัน ทำการวิเคราะห์ทั้งหมด 3 ครั้ง โดยใช้วิธีการตามมาตรฐานการวิเคราะห์น้ำและน้ำเสีย (American Public Health Association et al., 2005) และตรวจวัดอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพจากระบบด้วยชุดตรวจวัดแบบแทนที่น้ำ และวิเคราะห์องค์ประกอบก๊าซต่าง ๆ ในก๊าซชีวภาพ ตัวอย่างละ 3 ครั้ง ก๊าซที่ทำการวิเคราะห์ ได้แก่ มีเทน (CH_4) ไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) คาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และไนโตรเจน (N_2) ด้วย Gas Chromatography (GC Shimadzu 14B (Japan) with a Thermal Conductivity Detector (TCD), Molecular sieve, 50°C , He 25 mL/min)

ศึกษากิจกรรมของตะกอนจุลินทรีย์ (Microbial activity) ในระบบทั้งในระดับห้องปฏิบัติการและในสถานประกอบการ เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของระยะเวลาการเก็บกักน้ำเสียต่อจุลินทรีย์ในระบบ และผลจากการเดินระบบด้วยน้ำเสียผลิตยางแผ่นในสถานที่จริงต่อจุลินทรีย์ในระบบ โดยนำตัวอย่างตะกอนจุลินทรีย์จากระบบในแต่ละการทดลองมาหาค่ากิจกรรมของจุลินทรีย์ที่สำคัญในระบบ ได้แก่ Sulfate Reducing Bacteria (SRB), Sulfide Oxidizing Bacteria (SOB), Autotrophic Denitrifying Bacteria (ADB) และ Methanogens (Me) การหาค่ากิจกรรมจุลินทรีย์ทำการทดลองด้วยระบบแบบกะ (Batch) จำนวน 3 ครั้ง ด้วยขวดทดลองขนาด 120 mL ภายในบรรจุสารละลายซึ่งเป็นสารอาหารหลักและสารอาหารรองของจุลินทรีย์แต่ละชนิดปริมาณ 100 mL เติมตะกอนเชื้อจุลินทรีย์ในขวดทดลองปริมาณ 2 g-VSS/L ทำการบ่มที่อุณหภูมิ $30 \pm 2^\circ\text{C}$ สารละลายสำหรับการหาค่ากิจกรรมจุลินทรีย์ SRB ประกอบด้วย $270 \text{ KH}_2\text{PO}_4$,

350 K₂HPO₄, 530 NH₄Cl, 100 MgCl₂·6H₂O, 75 CaCl₂·2H₂O และ 1,200 NaHCO₃ ในหน่วย mg/L (Xu et al., 2014) องค์ประกอบของสารละลายสำหรับการหาค่ากิจกรรมจุลินทรีย์ของ SOB, ADB และ Me อ้างอิงตาม Rattanapan et al. (2010) ชุดควบคุมประกอบด้วยสารละลายทั้งหมดดังกล่าวข้างต้น แต่ไม่มีการเติมตะกอนจุลินทรีย์ ตัวอย่างการคำนวณหากิจกรรมจุลินทรีย์แสดงดังสมการที่ (1)

$$\text{SRB activity } \left(\frac{\text{gSO}_4^{2-}\text{-S}}{\text{gVSS.d}} \right) = \frac{\text{Sulfate}_{\text{removed}} \left(\frac{\text{gSO}_4^{2-}\text{-S}}{\text{L.d}} \right)}{\text{Biomass}_{\text{concentration}} \left(\frac{\text{gVSS}}{\text{L}} \right)} \quad (1)$$

โดย

SRB activity คือ กิจกรรมของจุลินทรีย์ ในหน่วย กรัมซัลเฟต ต่อกรัมสารแขวนลอย
ระเหยง่ายต่อวัน
Sulfate_{removed} คือ ซัลเฟตที่ถูกกำจัด ในหน่วย กรัมซัลเฟต ต่อลิตร ต่อวัน
Biomass_{concentration} คือ ความเข้มข้นของตะกอนจุลินทรีย์ ในหน่วย กรัมสารแขวนลอยระเหย
ง่ายต่อลิตร

2.3 วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

เปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของระบบด้วยระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียต่าง ๆ ในรูปของค่าเฉลี่ย (Mean) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation: SD) และวิเคราะห์ข้อมูลและเปรียบเทียบข้อมูลที่ได้จากการศึกษาด้วยโปรแกรม SPSS เวอร์ชัน 28 ด้วยเทคนิค One-Way ANOVA Post-hoc analysis แบบ Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 (p < 0.05)

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 ผลการทดลองระดับห้องปฏิบัติการ

การหาสภาวะที่เหมาะสมในการเดินระบบเพื่อนำไปประยุกต์ใช้ในสถานประกอบการ มีการศึกษาการเดินระบบด้วยระยะเวลาเก็บกักน้ำเสีย (Hydraulic Retention Time: HRT) ที่แตกต่างกัน โดยใช้น้ำเสียจากการผลิตยางแผ่นและเติมไนเตรทในน้ำเสียเพื่อควบคุมสัดส่วน S/N ที่ 2.0 และใช้ในเตรทไนโตรเจนเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในกระบวนการกำจัดซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นในระบบ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การเดินระบบที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียเพิ่มขึ้น ทำให้ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียมากขึ้น ดังแสดงในตารางที่ 1 ซึ่งพบว่า การเดินระบบที่ระยะเวลากักเก็บน้ำเสีย 10, 20 และ 30 วัน มีประสิทธิภาพในการบำบัดซัลไฟด์ เฉลี่ยร้อยละ 61.18, 82.99 และ 84.68 ตามลำดับ โดยการเดินระบบที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำเสีย 10 วัน พบการสะสมของไนเตรทในน้ำผ่านการบำบัด 14.24 mg/L เมื่อเดินระบบที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำเสีย 20 และ 30 วัน ไม่พบการสะสมของไนเตรทในน้ำผ่านการบำบัด และพบปริมาณซัลไฟด์น้อยลงมาก ดังแสดงในตารางที่ 2 ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Cai et al. (2019) ซึ่งรายงานว่า ระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียที่

เพิ่มขึ้น มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของประสิทธิภาพในการบำบัดสารมลพิษต่าง ๆ ในน้ำเสีย เมื่อพิจารณาค่าพีเอช (pH) ของน้ำหลังการบำบัดที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียต่าง ๆ จะเห็นได้ว่า ที่ระยะเวลากักเก็บน้ำเสีย 10 วัน น้ำหลังการบำบัดมีความเป็นกรด คือ มีค่าพีเอชเท่ากับ 6.0 และเมื่อเพิ่มระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียเป็น 20 และ 30 วัน พบว่า น้ำหลังการบำบัดมีความเป็นกลาง โดยมีค่าพีเอชเพิ่มขึ้นเป็น 7.4 และ 7.5 ตามลำดับ สอดคล้องกับรายงานของ Pramanik et al. (2020) ที่รายงานว่า เมื่อระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียของระบบผลิตก๊าซชีวภาพมีค่าลดลงพบว่า ค่าพีเอชและอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพลดลง เนื่องจากเมื่อระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียลดลง ระบบจะได้รับการบรรเทาทุกสารอินทรีย์ที่เพิ่มขึ้น จึงเกิดการสะสมของกรดไขมันระเหยง่ายที่เกิดจากการย่อยสลายของสารอินทรีย์ในระบบ ส่งผลให้ค่าพีเอชในระบบลดต่ำลง

ตารางที่ 1. ประสิทธิภาพในการบำบัดของระบบที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียต่าง ๆ

ระยะเวลาเก็บกักน้ำเสีย (วัน)	ประสิทธิภาพในการบำบัด (%)			
	ซีโอดี	ซัลเฟต	ทีเคเอ็น	สารแขวนลอย
10	61.18±1.52 ^a	40.17±0.56 ^a	2.26±0.32 ^a	58.11±1.22 ^a
20	82.99±2.24 ^b	91.88±1.46 ^b	2.56±0.38 ^a	80.26±1.25 ^b
30	84.68±2.32 ^b	93.27±1.85 ^b	2.62±0.25 ^a	82.19±1.34 ^c

หมายเหตุ : a b และ c ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 2. ความเข้มข้นของซัลไฟด์ ไทโอซัลเฟต ไนเตรท ไนไตรท์ และค่าพีเอช ในน้ำหลังการบำบัด

ระยะเวลาเก็บกักน้ำเสีย (วัน)	น้ำเสียหลังการบำบัด				
	ซัลไฟด์ (mg-S/L)	ไทโอซัลเฟต (mg-S/L)	ไนเตรท (mg-N/L)	ไนไตรท์ (mg-N/L)	พีเอช -
10	32.24±1.25 ^b	2.22±0.21 ^a	14.12±0.45	ND	6.0±0.20 ^a
20	15.13±0.62 ^a	2.32±0.15 ^a	ND	ND	7.4±0.20 ^b
30	16.32±0.54 ^a	2.45±0.23 ^a	ND	ND	7.5±0.10 ^b

หมายเหตุ : a b และ c ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

Not Detected (ND) หมายถึง ตรวจไม่พบ

เมื่อพิจารณาอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพพบว่า การเดินระบบที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำเสีย 10 วัน มีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพเพียง 4.22 L/day และคิดเป็นอัตราการเกิดก๊าซมีเทนต่อสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัดในรูปซีโอดี ($\text{COD}_{\text{removed}}$) เท่ากับ 0.11 L-CH₄/gCOD_{removed} ซึ่งมีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนและไฮโดรเจนซัลไฟด์ 60.60% และ 9.20 ppm ตามลำดับ เมื่อระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียเพิ่มขึ้นเป็น 20 และ 30 วัน อัตราการเกิดก๊าซชีวภาพเพิ่มขึ้นมาก โดยที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำเสีย 30 วัน มีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพสูงสุด คือ 18.5 L/day หรือ 0.35 L-CH₄/gCOD_{removed} มีองค์ประกอบของก๊าซมีเทนและไฮโดรเจนซัลไฟด์ 71.20% และ 8.00 ppm ตามลำดับ ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3. ค่าเฉลี่ยอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพและองค์ประกอบก๊าซชีวภาพที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียต่าง ๆ

ระยะเวลา กักเก็บน้ำ เสีย (วัน)	อัตราการเกิดก๊าซ ชีวภาพ (L/day)	อัตราเกิดก๊าซชีวภาพ (L-CH ₄ /gCOD _{removed})	องค์ประกอบของก๊าซชีวภาพ			
			CH ₄ (%)	CO ₂ (%)	N ₂ (%)	H ₂ S (ppm)
10	4.22±0.12 ^a	0.11±0.01 ^a	60.6±0.50 ^a	32.5±0.20 ^b	5.2±0.10 ^a	9.2±0.20 ^b
20	16.5±0.16 ^b	0.32±0.04 ^b	69.2±0.60 ^b	22.6±0.40 ^a	6.2±0.20 ^b	8.0±0.00 ^a
30	18.5±0.18 ^c	0.35±0.04 ^b	71.2±0.40 ^c	21.6±0.30 ^a	6.4±0.10 ^b	8.0±0.00 ^a

หมายเหตุ : a b c ตัวอักษรที่ต่างกันในกลุ่มเดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

พบว่าระบบในการทดลองครั้งนี้ มีศักยภาพในการบำบัดน้ำเสียและผลิตก๊าซชีวภาพได้ดีกว่าระบบผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียแปรรูปยางพาราที่ไม่มีกระบวนการกำจัดซัลไฟด์ โดยผลการศึกษาของ อภิสิธรา วงศ์กิตติวิมล (Wongkittivimon, 2000) ซึ่งบำบัดน้ำเสียและผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียแปรรูปยางแผ่นด้วยระบบ Hybrid Anaerobic Reactor พบว่า ประสิทธิภาพในการกำจัดซีโอดีของระบบมีค่าเฉลี่ยร้อยละ 80.8 และมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเท่ากับ 0.164 L-CH₄/g-COD_{removed} ยังมีผลการศึกษาของ Jawjit & Liengcharernsit (2010) ได้ศึกษาการผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียแปรรูปยางพาราที่ไม่ผ่านการกำจัดซัลเฟตและซัลไฟด์พบว่า ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดี เฉลี่ยร้อยละ 82 และสามารถผลิตก๊าซมีเทนได้ 0.116 L-CH₄/g-COD_{removed} ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าเฉลี่ยตามทฤษฎีที่รายงานไว้ที่ 0.35 L-CH₄/g-COD_{removed} เนื่องจากในกระบวนการหมักแบบไร้อากาศของน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนซัลเฟต จะเกิดปฏิกิริยา Sulfate reduction ซึ่งจุลินทรีย์ทำการเปลี่ยนซัลเฟตเป็นสารละลายซัลไฟด์ ซึ่งมีความเป็นพิษต่อจุลินทรีย์ในระบบ โดยเฉพาะจุลินทรีย์สร้างมีเทน (Yekta et al., 2023) ส่งผลให้ประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียและผลิตก๊าซชีวภาพของระบบลดลง

ในการศึกษาครั้งนี้ใช้ไนเตรทเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในการออกซิไดซ์ซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นในระบบให้เป็นตะกอนซัลเฟอร์ (S⁰) ซึ่งไม่เป็นพิษต่อจุลินทรีย์ (Brito et al., 2018; Cortés et al., 2021; Wang et al., 2023) ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ที่ระยะเวลากักเก็บน้ำเสีย 20 และ 30 วัน ทำให้ระบบมีศักยภาพในการผลิตก๊าซชีวภาพสูงกว่าระบบที่ไม่มีกระบวนการกำจัดซัลไฟด์ อีกทั้งทำให้มีอัตราการเกิดก๊าซชีวภาพใกล้เคียงและเท่ากับค่าเฉลี่ยตามทฤษฎี จะเห็นได้ว่าสารอินทรีย์ที่ถูกกำจัดในรูปซีโอดี (COD_{removed}) ถูกนำไปใช้ในการผลิตก๊าซมีเทนได้มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาของ Saritpongteeraka & Chaiprapat (2008) ศึกษาการบำบัดน้ำเสียและผลิตก๊าซชีวภาพจากน้ำเสียกระบวนการผลิตน้ำยางข้นด้วยระบบ Anaerobic baffled reactor ซึ่งออกแบบให้ ซัลเฟตถูกกำจัดในส่วนต้นของระบบพบว่า ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดซัลเฟตและซีโอดี เฉลี่ยร้อยละ 96.60 และ 82.71 ตามลำดับ และสามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ 0.30 L-CH₄/g-COD_{removed}

ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า การเดินระบบที่ระยะเวลากักเก็บน้ำเสีย 30 วัน สามารถผลิตก๊าซชีวภาพได้ดีที่สุด และมีซัลไฟด์ตกค้างในระบบน้อยมาก อีกทั้งไม่พบการตกค้างของไนเตรทในระบบ เมื่อระยะเวลากักเก็บน้ำเสียลดลงเป็น 20 วัน พบประสิทธิภาพของระบบในการกำจัด COD และอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพลดลงเล็กน้อย มีซัลไฟด์ตกค้างในระบบน้อยมาก และไม่พบการสะสมของไนเตรทในระบบ แต่

เมื่อระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียลดลงเป็น 10 วัน พบว่า ประสิทธิภาพของระบบในการกำจัด COD และอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพลดลงอย่างมาก และมีซัลไฟด์ตกค้างในระบบสูง อีกทั้งพบการสะสมของไนเตรทในระบบ ประสิทธิภาพการทำงานของระบบที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียต่าง ๆ สอดคล้องกับผลการศึกษากิจกรรมของจุลินทรีย์ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4. กิจกรรมของจุลินทรีย์ที่ผ่านการเดินระบบที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียต่าง ๆ

ระยะเวลา กักเก็บน้ำเสีย (วัน)	การศึกษากิจกรรมจุลินทรีย์ในระบบ (Microbial activity)			
	SRB (g SO ₄ ²⁻ /g VSS/d)	SOB (g S ⁻ /g VSS/d)	ADB (g S ⁻ /g VSS/d)	Me (gCH ₄ /gVSS/d)
10	0.282±0.025 ^a	0.484±0.012 ^a	0.402±0.015 ^a	0.0564±0.0021 ^a
20	0.328±0.022 ^b	0.514±0.023 ^b	0.440±0.012 ^b	0.0632±0.0023 ^b
30	0.332±0.018 ^b	0.518±0.024 ^b	0.481±0.016 ^c	0.0650±0.0018 ^b

หมายเหตุ : a b และ c ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

พบว่าเมื่อระยะเวลาเก็บกักน้ำเสียเพิ่มขึ้น มีผลให้กิจกรรมของจุลินทรีย์ทั้ง 4 กลุ่มมีค่าเพิ่มขึ้น ได้แก่ SRB, SOB, ADB และ Me โดยพบกิจกรรมของจุลินทรีย์มีค่าสูงสุดที่ระยะเวลากักเก็บน้ำเสีย 30 วัน โดยกิจกรรมของจุลินทรีย์ SRB, SOB, ADB และ Me มีค่าเฉลี่ย 0.332 gSO₄²⁻/gVSS/d, 0.518 gS⁻/gVSS/d, 0.481 gS⁻/gVSS/d และ 0.0650 gCH₄/gVSS/d ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าจุลินทรีย์กำจัดซัลไฟด์ (SOB) และจุลินทรีย์ผลิตมีเทน (Me) ในระบบทำงานได้เป็นอย่างดี จึงพบกิจกรรมของ SOB และ Me สูง เมื่อเทียบกับผลการศึกษาก่อนของ Thongnueakhaeng & Chaiprasert (2015) ซึ่งรายงานว่ากิจกรรมของจุลินทรีย์ SOB ในระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบ Upflow Anaerobic Sludge Blanket (UASB) มีค่าเฉลี่ย 0.202 g-S/g-VSS/d และกิจกรรมของจุลินทรีย์ผลิตมีเทนในระบบบ่อหมักไร้อากาศแบบเปิดของน้ำเสียจากฟาร์มหมู มีค่าเฉลี่ย 0.020 g-CH₄/g-VSS/d การศึกษาค้นครั้งนี้ยังแสดงให้เห็นว่า เมื่อเดินระบบที่ระยะเวลากักเก็บน้ำเสียลดลงพบว่า กิจกรรมของจุลินทรีย์ทั้ง 4 กลุ่มมีค่าลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลการศึกษาก่อนของ Pramanik et al. (2020) ที่มีการรายงานว่า เมื่อเดินระบบที่ระยะเวลากักเก็บน้ำเสียลดลงพบว่า ความหลากหลายและกิจกรรมของจุลินทรีย์ในระบบมีแนวโน้มที่ลดลงด้วย อย่างไรก็ตามในการศึกษาค้นครั้งนี้ การเดินระบบที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำเสีย 20 วัน พบว่า กิจกรรมของจุลินทรีย์ในระบบมีค่าลดลง โดยไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 จากระยะเวลากักเก็บน้ำเสีย 30 วัน ซึ่งสอดคล้องกับผลการตรวจวัดประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียและอัตราในการผลิตก๊าซชีวภาพ ซึ่งมีค่าลดลงอย่างไม่มีนัยสำคัญเช่นกัน

3.2 ผลการทดลองในสถานประกอบการ

จากการทดลองในระดับห้องปฏิบัติการแสดงให้เห็นว่า การเดินระบบที่ระยะเวลาเก็บกักน้ำเสีย 20 และ 30 วัน มีประสิทธิภาพสูงในการบำบัดสารอินทรีย์ในรูปซีโอดีและในการผลิตก๊าซมีเทน อีกทั้งให้ค่าที่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 การทดลองในสถานประกอบการผลิตยางแผ่นรมควันจึงทำการเดินระบบที่ระยะเวลากักเก็บน้ำเสีย 20 วัน โดยใช้ไนเตรทจาก

ระบบไนตริฟิเคชันของน้ำเสียจากสถานประกอบการ แทนการเติมสารเคมีไนเตรทเพื่อกำจัดซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นในระบบ เนื่องจากน้ำเสียหลังการบำบัดด้วยระบบไร้อากาศของโรงงานผลิตยางแผ่น ยังคงมีความเข้มข้นของไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็นสูงถึง 117.22 mg-N/L ซึ่งยังไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทิ้งจากโรงงานอุตสาหกรรม จึงนำน้ำเสียหลังการบำบัดด้วยระบบไร้อากาศส่วนหนึ่งเข้าสู่กระบวนการไนตริฟิเคชันด้วยระบบเติมอากาศ ซึ่งจุลินทรีย์ Nitrifier ทำหน้าที่เปลี่ยนแอมโมเนียไนโตรเจนเป็นไนไตรท์และไนเตรท (Ruiz et al., 2006) จากนั้นจึงหมุนเวียนน้ำเสียที่มีไนไตรท์และไนเตรทจากระบบนี้เข้าสู่ระบบหมักไร้อากาศอีกครั้ง เพื่อเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในการกำจัดซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นในระบบ โดยควบคุมอัตราส่วน S/N ในระบบที่ 2.0

ผลการศึกษาพบว่า ระบบบำบัดน้ำเสียเดิมของสถานประกอบการ ซึ่งเป็นบ่อหมักไร้อากาศแบบเปิดมีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี ซัลเฟต ไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็น และสารแขวนลอย เฉลี่ยร้อยละ 55.36 65.83 4.70 และ 76.79 ตามลำดับ เมื่อทำการปรับปรุงระบบในการศึกษาครั้งนี้พบว่า ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดดีขึ้นในทุกพารามิเตอร์ โดยมีประสิทธิภาพในการบำบัดซีโอดี ซัลเฟต ไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็น และสารแขวนลอย เฉลี่ยร้อยละ 80.56 71.78 23.66 และ 80.11 ตามลำดับ ดังผลการศึกษาที่แสดงในตารางที่ 5 และยังพบว่า ระบบมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพเฉลี่ย 0.30 L-CH₄/gCOD_{removed} โดยมีองค์ประกอบของก๊าซมีเทน 69.1% และก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ 8.1 ppm ซึ่งระบบที่ทดลองในสถานประกอบการมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียและผลิตก๊าซชีวภาพใกล้เคียงกับระบบทดลองในห้องปฏิบัติการ

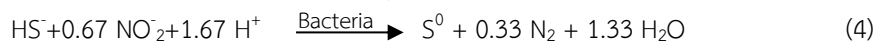
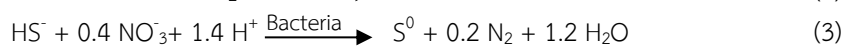
ตารางที่ 5. ลักษณะน้ำเสียก่อนและหลังบำบัดและประสิทธิภาพการบำบัดของระบบที่ระยะเวลาเก็บน้ำเสีย 20 วัน

พารามิเตอร์	น้ำก่อนบำบัด	น้ำหลังการบำบัด	ประสิทธิภาพในการบำบัด (%)
ซีโอดี (mg/L)	12,798.22±12.25	2,487.85±5.36	80.56±1.05
ซัลเฟต (mg-S/L)	135.15±2.22	38.14±1.05	71.78±0.85
ซัลไฟด์ (mg-S/L)	ND	13.82±0.55	-
ไทโอซัลเฟต (mg-S/L)	ND	2.58±0.42	-
ทีเคเอ็น (mg-N/L)	153.54±2.12	117.22±1.86	23.66±0.75
ไนเตรท (mg-N/L)	ND	8.68±0.25	-
ไนไตรท์ (mg-N/L)	ND	ND	-
สารแขวนลอย (mg/L)	161.45±6.24	32.12±3.24	80.11±1.06
พีเอช (pH)	5.6±0.2	7.1±0.3	-

หมายเหตุ : Not Detected (ND) หมายถึง ตรวจไม่พบ

เมื่อทำการศึกษากิจกรรมของจุลินทรีย์ชนิดต่าง ๆ ในระบบพบว่า จุลินทรีย์ SRB, SOB, ADB และ Me จากระบบบำบัดน้ำเสียในการทดลองครั้งนี้เจริญเติบโตและทำงานได้ดีกว่าระบบเดิมของโรงงาน ซึ่งเป็นระบบบ่อหมักไร้อากาศแบบเปิด ดังแสดงในตารางที่ 6 เนื่องจาก SRB, ADB และ Me เป็นจุลินทรีย์ที่เจริญเติบโตได้ดีในสภาวะไร้อากาศ (Cirne et al., 2008) การจัดทำระบบบ่อหมักไร้อากาศแบบปิด จึงทำให้สภาวะในระบบเหมาะสมต่อจุลินทรีย์เหล่านี้ ดังจะเห็นได้จากค่ากิจกรรมจุลินทรีย์ที่สูงขึ้นเมื่อเทียบกับ

บ่อหมักไร้อากาศแบบเปิดซึ่งเป็นระบบเดิมของโรงงาน ในส่วนของ SOB ทำงานได้ดีในสภาวะ Micro oxygen เพื่อออกซิไดซ์ซัลไฟด์เป็นตะกอนซัลเฟต ดังแสดงในสมการที่ (2) (Xu et al., 2012) แต่เนื่องจากระบบในการวิจัยครั้งนี้ จุลินทรีย์ SOB ในระบบ สามารถใช้ออกซิเจนอิสระจากไนเตรทและไนไตรท์จากระบบไนตริฟิเคชันในการเจริญเติบโตและเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในการออกซิไดซ์ซัลไฟด์ ดังปฏิกิริยา Sulfide oxidation-Denitrification process ในสมการที่ (3) และ (4) (Cirne et al., 2008) และมีการควบคุมอัตราส่วน S/N ที่เหมาะสม คือ 2.0 (Xue et al., 2022) จึงพบว่า ค่ากิจกรรมของจุลินทรีย์ SOB ของระบบในการวิจัยครั้งนี้จึงมีค่าสูงกว่าระบบเดิมของโรงงาน



ตารางที่ 6. กิจกรรมของจุลินทรีย์ในตะกอนจุลินทรีย์ที่ผ่านการเดินระบบของระบบบำบัดน้ำเสียเดิมของโรงงานและระบบในการทดลองครั้งนี้

ชุดทดลอง	กิจกรรมของจุลินทรีย์			
	SRB (g SO ₄ ²⁻ /g VSS/d)	SOB (g S ⁻ /g VSS/d)	ADB (g S ⁻ /g VSS/d)	Me (g CH ₄ /g VSS/d)
ระบบเดิมของโรงงาน	0.297±0.022 ^a	0.324±0.025 ^a	0.411±0.017 ^a	0.035±0.0010 ^a
ระบบในการวิจัย	0.302±0.016 ^b	0.498±0.028 ^b	0.472±0.026 ^b	0.060±0.0011 ^b

หมายเหตุ : a b และ c ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันแสดงถึงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ

จากตารางที่ 6 ยังแสดงให้เห็นว่า ระบบเดิมของสถานประกอบการ ซึ่งเป็นระบบบ่อหมักไร้อากาศแบบเปิด พบมีกิจกรรมของจุลินทรีย์กำจัดซัลไฟด์ (SOB) เฉลี่ย 0.324±0.025 g S⁻/g VSS/d มีค่าสูงกว่าระบบหมักไร้อากาศแบบปิด ซึ่ง Thongnueakhaeng & Chaiprasert (2015) ได้ศึกษาไว้ โดยได้รายงานว่าพบกิจกรรมของ SOB จากระบบผลิตก๊าซชีวภาพแบบ UASB มีค่าเฉลี่ย 0.202 g S/g VSS/d ซึ่งสอดคล้องกับหลักทฤษฎี เนื่องจาก SOB ทำงานได้ดีในสภาวะ Micro oxygen (Cirne et al., 2008) ในระบบไร้อากาศแบบเปิดของสถานประกอบการจึงพบกิจกรรมของจุลินทรีย์ SOB สูงกว่าระบบไร้อากาศแบบปิด อย่างไรก็ตามในการผลิตก๊าซชีวภาพต้องจัดทำระบบหมักไร้อากาศแบบปิด ซึ่งจะเห็นได้ว่า ระบบในการศึกษาครั้งนี้ซึ่งเป็นระบบปิดเพื่อผลิตก๊าซชีวภาพ พบกิจกรรมของจุลินทรีย์ SOB สูงถึง 0.498±0.028 g S⁻/g VSS/d เนื่องจากจุลินทรีย์ SOB สามารถใช้ออกซิเจนอิสระจากไนเตรทและไนไตรท์ในการเจริญเติบโตและเป็นตัวรับอิเล็กตรอนในการออกซิไดซ์ซัลไฟด์ (Cirne et al., 2008) ระบบที่ศึกษาในสถานประกอบการครั้งนี้ จึงมีศักยภาพสูงทั้งในการกำจัดสารอินทรีย์ และซัลเฟต-ซัลไฟด์ สามารถลดผลกระทบของซัลไฟด์ต่อจุลินทรีย์ผลิตมีเทน ทำให้ระบบมีอัตราการผลิตก๊าซชีวภาพได้ใกล้เคียงกับค่าทฤษฎีซึ่งมีรายงานไว้ที่ 0.35 L-CH₄/g-COD_{removed} (Jawjit & Liengcharernsit, 2010)

4. สรุปผลการวิจัย

การศึกษาค้นคว้าครั้งนี้แสดงให้เห็นว่า น้ำเสียที่มีการปนเปื้อนสารอินทรีย์และซัลเฟตสูง สามารถบำบัดด้วยระบบผลิตก๊าซชีวภาพได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยสามารถลดผลกระทบของซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นจากกระบวนการหมักไร้อากาศ ด้วยปฏิกิริยา Sulfide oxidation-Denitrification โดยใช้ในเตาหมักเป็นตัวรีดิวซ์คาร์บอนในการกำจัดซัลไฟด์ การเดินระบบโดยควบคุมอัตราส่วน S/N ที่ 2.0 ที่ระยะเวลาเก็บน้ำเสีย 20 และ 30 วัน พบว่า อัตราการผลิตก๊าซชีวภาพและองค์ประกอบของก๊าซมีเทนในก๊าซชีวภาพมีค่าที่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ อีกทั้งมีค่าเทียบเท่ากับหลักทฤษฎีของการผลิตก๊าซชีวภาพจากของเสียทั่วไปที่ไม่มีการปนเปื้อนซัลเฟตสูง ในด้านการทดลองในสถานประกอบการผลิตยางแผ่นรมควัน การใช้ในเตาหมักจากกระบวนการไนตริฟิเคชันของน้ำเสียผลิตยางแผ่นหลังผ่านการบำบัดด้วยระบบไร้อากาศหมุนเวียนกลับเข้าสู่ระบบโดยควบคุมอัตราส่วน S/N ในน้ำเสียก่อนเข้าระบบเท่ากับ 2.0 เติมน้ำเสียที่ระยะเวลาเก็บน้ำเสีย 20 วัน พบว่า ระบบมีประสิทธิภาพในการบำบัดน้ำเสียและผลิตก๊าซชีวภาพได้ดี และมีค่าใกล้เคียงกับชุดทดลองในห้องปฏิบัติการ ซึ่งสามารถลดผลกระทบของซัลไฟด์ต่อจุลินทรีย์ในระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้ระบบในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้มีประสิทธิภาพในการบำบัด COD เฉลี่ยร้อยละ 80.56 ซึ่งมีค่าสูงกว่าระบบเดิมของโรงงานที่มีประสิทธิภาพในการบำบัด COD เฉลี่ยร้อยละ 55.36 ผลการศึกษากิจกรรมของจุลินทรีย์จากระบบ ยังแสดงให้เห็นว่าระบบในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้สามารถลดผลกระทบของซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นในระบบต่อจุลินทรีย์สร้างมีเทน โดยพบค่ากิจกรรมของจุลินทรีย์ผลิตมีเทนของระบบเดิมมีค่าเฉลี่ย 0.035 g CH₄/g VSS/d และมีค่าเพิ่มขึ้นเป็น 0.060 g CH₄/g VSS/d เมื่อปรับปรุงเป็นระบบในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ซึ่งเพิ่มขึ้นถึงร้อยละ 71.43

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณมหาวิทยาลัยทักษิณ สำหรับสถานที่และวัสดุอุปกรณ์ในการศึกษาวิจัย และขอขอบคุณทุนอุดหนุนการวิจัยจากสำนักงานนโยบายและแผนพลังงาน กระทรวงพลังงาน

เอกสารอ้างอิง (References)

- Achinas, S., Achinas, V., & Euverink, G. J. W. (2020). Microbiology and biochemistry of anaerobic digesters: An overview. In L. Singh, A. Yousuf, & D. M. Mahapatra (Eds.), *Bioreactors* (pp. 17-26). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821264-6.00002-4>
- American Public Health Association, American Water Works Association, & Water Environment Federation. (2005). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (21st ed.). American Public Health Association.
- Boonsawang, P., Laeh, S., & Intrasukkha, N. (2008). Enhancement of sludge granulation in anaerobic treatment of concentrated latex wastewater. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*, 30(Suppl.1), 111-119.
- Brito, J., Valle, A., Almenglo, F., Ramirez, M., & Cantero, D. (2018). Progressive change from nitrate to nitrite as the electron acceptor for the oxidation of H₂S under feedback

- control in an anoxic biotrickling filter. *Biochemical Engineering Journal*, 139, 154-161. <https://doi.org/10.1016/j.bej.2018.08.017>
- Cai, Y., Li, X., Zaidi, A. A., Shi, Y., Zhang, K., Feng, R., Lin, A., & Liu, C. (2019). Effect of hydraulic retention time on pollutants removal from real ship sewage treatment via a pilot-scale air-lift multilevel circulation membrane bioreactor. *Chemosphere*, 236, Article 124338. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.07.069>
- Charcosset, C. (2014). Combining membrane processes with renewable energy technologies: Perspectives on membrane desalination, biofuels and biogas production, and microbial fuel cells. In A. Gugliuzza & A. Basile (Eds.), *Membranes for clean and renewable power applications* (pp. 44-62). Woodhead Publishing. <https://doi.org/10.1533/9780857098658.1.44>
- Cirne, D. G., van der Zee, F. P., Fernandez-Polanco, M., & Fernandez-Polanco, F. (2008). Control of sulphide during anaerobic treatment of S-containing wastewaters by adding limited amounts of oxygen or nitrate. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 7(2), 93-105. <https://hdl.handle.net/1822/7867>
- Cortés, M. F., Trevilla, J. P., López, F. M. C., Buitrón, G., & Quijano, G. (2021). H₂S oxidation coupled to nitrate reduction in a two-stage bioreactor: targeting H₂S-rich biogas desulfurization. *Waste Management*, 120, 76-84. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2020.11.024>
- Ho, K. C., Chan, M. K., Chen, Y. M., & Subhramaniyun, P. (2023). Treatment of rubber industry wastewater review: Recent advances and future prospects. *Journal of Water Process Engineering*, 52, Article 103559. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2023.103559>
- Jawjit, S., & Liengcharernsit, W. (2010). Anaerobic treatment of concentrated latex processing wastewater in two-stage upflow anaerobic sludge blanket. *Canadian Journal of Civil Engineering*, 37(5), 805-813. <https://doi.org/10.1139/L10-029>
- Lin, W. C., Chen, Y. P., & Tseng, C. P. (2013). Pilot-scale chemical-biological system for efficient H₂S removal from biogas. *Bioresource Technology*, 135, 283-291. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.10.040>
- Mar, K. A., Unger, C., Walderdorff, L., & Butler, T. (2022). Beyond CO₂ equivalence: The impacts of methane on climate, ecosystems, and health. *Environmental Science & Policy*, 134, 127-136. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2022.03.027>
- Pramanik, S. K., Suja, F. B., & Pramanik, B. K. (2020). Effects of hydraulic retention time on the process performance and microbial community structure of an anaerobic single-stage semi-pilot scale reactor for the treatment of food waste. *International*

- Biodeterioration & Biodegradation*, 152, Article 104999. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2020.104999>
- Rattanapan, C., Kantachote, D., Yan, R., & Boonsawang, P. (2010). Hydrogen sulfide removal using granular activated carbon biofiltration inoculated with *Alcaligenes faecalis* T307 isolated from concentrated latex wastewater. *International Biodeterioration & Biodegradation*, 64, 383-387. <https://doi.org/10.1016/j.ibiod.2010.04.005>
- Ruiz, G., Jeison, D., Rubilar, O., Ciudad, G., & Chamy, R. (2006). Nitrification–denitrification via nitrite accumulation for nitrogen removal from wastewaters. *Bioresource Technology*, 97(2), 330-335. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2005.02.018>
- Sangeetha, T., Rajneesh, C. P., & Yan, W. M. (2020). Integration of microbial electrolysis cells with anaerobic digestion to treat beer industry wastewater. In R. Abbassi, A. K. Yadav, F. Khan, & V. Garaniya (Eds.), *Integrated microbial fuel cells for wastewater treatment* (pp. 313-346). Butterworth-Heinemann. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-817493-7.00015-1>
- Saritpongteeraka, K., & Chaiprapat, S. (2008). Effects of pH adjustment by parawood ash and effluent recycle ratio on the performance of anaerobic baffled reactors treating high sulfate wastewater. *Bioresource Technology*, 99(18), 8987-8994. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2008.05.012>
- Thongnueakhaeng, W., & Chaiprasert, P. (2015). Inoculum seed for simultaneous biological removal of sulfate and nitrogen-rich wastewater. *Journal of Sustainable Energy & Environment*, 6, 81-85.
- Wang, Y., Jie, M., Zhang, H., Yang, J., & Xu, M. (2023). High-efficiency mixotrophic denitrification for nitrate removal in high-sulfate wastewater using UASB reactor. *Water*, 15(15), Article 2819. <https://doi.org/10.3390/w15152819>
- Wen, Z., Liu, J., & Chen, F. (2011). *Comprehensive biotechnology* (2nd ed.). Elsevier.
- Wongkittivimon, A. (2000). *Treatment of latex processing wastewater by a hybrid anaerobic reactor* [Master's thesis, King Mongkut's University of Technology Thonburi]. King Mongkut's University of Technology Thonburi Repository. <https://opac.lib.kmutt.ac.th/vufind/Record/1100088> (in Thai)
- Xu, X. J., Chen, C., Wang, A. J., Fang, N., Yuan, Y., Ren, N. Q., & Lee, D. J. (2012). Enhanced elementary sulfur recovery in integrated sulfate-reducing, sulfur-producing reactor under micro-aerobic condition. *Bioresource Technology*, 116, 517-521. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2012.03.095>
- Xu, X., Yang, F., Liu, S., Xu, Y., & Wang, Y. (2014). Simultaneous removal of sulfide, nitrate and acetate under denitrifying sulfide removal condition: Modeling and experimental

validation. *Journal of Hazardous Materials*, 264, 16-24. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.10.056>

Xue, M., Nie, Y., Cao, X., & Zhou, X. (2022). Deciphering the influence of S/N ratio in a sulfite-driven autotrophic denitrification reactor. *Science of The Total Environment*, 836, Article 155612. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155612>

Yekta, S. S., Svensson, B. H., Skyllberg, U., & Schnürer, A. (2023). Sulfide in engineered methanogenic systems-Friend or foe?. *Biotechnology Advances*, 69, Article 108249. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2023.108249>

แบบจำลองทำนายราคาข้าวโพดโดยใช้การเรียนรู้เชิงลึก Corn Price Prediction Model Using Deep Learning

สิรินทรา สามชัยรัตน์¹ พัทธล ศรีอินทร์¹ สุกฤษฎ์ ปัญญาสิทธิ์¹ ปกรณ์ แวส่วงวงศ์² และ กฤตคม ศรีจิรานนท์^{1*}
Sirintra Samchairat¹ Phattadon Sri-in¹ Sukit Panyasit¹ Pakorn Waewsawangwong²
and Krittakom Srijiranon^{1*}

¹หน่วยวิจัยด้านนวัตกรรมข้อมูลและปัญญาประดิษฐ์แห่งมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ สาขาวิทยาการคอมพิวเตอร์
คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จ.ปทุมธานี ประเทศไทย

²สาขาวิทยาการคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จ.ปทุมธานี ประเทศไทย
¹Thammasat University Research Unit in Data Innovation and Artificial Intelligence, Department of
Computer Science, Faculty of Science and Technology, Thammasat University, Pathum Thani, Thailand

²Department of Computer Science, Faculty of Science and Technology, Thammasat University,
Pathum Thani, Thailand

วันที่ส่งบทความ : 30 มีนาคม 2567 วันที่แก้ไขบทความ : 28 พฤษภาคม 2568 วันที่ตอบรับบทความ : 30 พฤษภาคม 2568
Received: 30 March 2024, Revised: 28 May 2025, Accepted: 30 May 2025

บทคัดย่อ

ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เป็นสินค้าการเกษตรที่มีความต้องการสูงในหลายอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตาม ราคาของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มีการเปลี่ยนแปลงอย่างไม่แน่นอนในแต่ละปี ส่งผลให้เกษตรกรประสบความยากลำบากในการวางแผนเพาะปลูก การคาดการณ์ราคาข้าวโพดล่วงหน้าจึงมีความสำคัญเพื่อให้เกษตรกรสามารถวางแผนได้อย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้นำเสนอการพัฒนาแบบจำลองทำนายราคาข้าวโพด โดยใช้ทั้งข้อมูลราคาข้าวโพดในอดีตและคุณลักษณะสำคัญอื่น ๆ งานวิจัยได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลอง 4 ประเภท ได้แก่ ARIMA, ARIMAX, LSTM และ GRU โดยใช้ข้อมูลระหว่างปี พ.ศ. 2558 ถึง พ.ศ. 2564 เพื่อทำนายราคาข้าวโพดในปี พ.ศ. 2563 และ พ.ศ. 2564 ผลการเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลองที่ใช้ข้อมูลราคาข้าวโพดเพียงอย่างเดียวในการสร้าง และแบบจำลองที่ใช้ข้อมูลราคาข้าวโพดร่วมกับคุณลักษณะอื่นพบว่า แบบจำลอง GRU ที่ใช้ข้อมูลราคาข้าวโพดย้อนหลังร่วมกับคุณลักษณะอื่นได้แก่ ปริมาณส่งออกข้าวโพดทั้งหมด ราคาข้าวโพดส่งออก ราคาซื้อขายล่วงหน้าตลาดชิคาโก และมูลค่าส่งออกข้าวโพดทั้งหมด มีประสิทธิภาพดีที่สุด โดยมีค่า RMSE เท่ากับ 0.0780 และค่า MAE เท่ากับ 0.0662 การคาดการณ์ราคาที่แม่นยำมีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับเกษตรกรและผู้ที่เกี่ยวข้องในอุตสาหกรรมข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ เนื่องจากช่วยให้การวางแผนและการบริหารจัดการทรัพยากรสามารถทำได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น

คำสำคัญ : ราคาข้าวโพด จีอาร์ยู การเรียนรู้เชิงลึก แบบจำลองการทำนาย

*ที่อยู่ติดต่อ E-mail address: krittakom_s@sci.tu.ac.th

<https://doi.org/10.55003/scikmitl.2025.262715>

Abstract

Animal feed corn is a highly demanded agricultural commodity across various industries. However, its prices fluctuate unpredictably each year, causing difficulties for farmers in planning their crops. Therefore, accurate price forecasting is crucial for helping farmers plan effectively. This research presents the development of a corn price prediction model using both historical price data and other important features. The study compares the performance of four models: ARIMA, ARIMAX, LSTM, and GRU, using data from 2015 to 2021 to predict corn prices for 2020 and 2021. The comparison between models that use only historical price data and those that incorporate additional features shows that the GRU model, utilizing both historical price data and features such as total corn exports, export prices, Chicago Board of Trade futures prices, and total export value, performs the best. The GRU model achieves an RMSE of 0.0780 and an MAE of 0.0662, demonstrating the highest accuracy in the test datasets. Accurate price forecasting is crucial for farmers and stakeholders in the corn industry, as it enables more efficient planning and resource management.

Keywords: Corn price, GRU, Deep learning, Prediction model

1. บทนำ

ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เป็นพืชเศรษฐกิจที่สามารถนำไปแปรรูปเป็นอาหารมนุษย์และสัตว์ได้ ทั้งนี้ทั่วโลกมีความต้องการใช้ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์จำนวนหลายล้านตัน ในปี พ.ศ. 2561 ประเทศไทยมีการนำเข้าข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ปริมาณรวม 154,000 ตัน มูลค่ารวม 900.93 ล้านบาท และมีการส่งออกปริมาณรวม 83,000 ตัน มูลค่ารวมกว่า 685 ล้านบาท ซึ่งแสดงให้เห็นว่าประเทศไทยมีปริมาณการนำเข้าข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มากกว่าการส่งออก เนื่องจากอุตสาหกรรมต่าง ๆ มีความต้องการใช้ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เป็นวัตถุดิบหลักในการแปรรูป โดยเฉพาะการแปรรูปเป็นอาหารสัตว์ซึ่งข้าวโพดเลี้ยงสัตว์นั้นมีความต้องการใช้มากขึ้นเรื่อย ๆ จนถึงปัจจุบัน สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรรายงานว่าในช่วงปี พ.ศ. 2560 - 2561 พื้นที่ปลูกมากที่สุดอยู่ในภาคเหนือร้อยละ 67.70 รองลงมาได้แก่ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือร้อยละ 21.46 และในภาคกลางและภาคตะวันตกร้อยละ 10.87 (Office of Agricultural Research and Development Region 5, Department of Agriculture, Ministry of Agriculture and Cooperatives, 2019)

ข้าวโพดเลี้ยงสัตว์เป็นพืชที่มีตลาดรองรับ เพราะผลผลิตยังไม่เพียงพอต่อความต้องการใช้ภายในประเทศ (Office of Agricultural Economics Region 1, Chiang Mai, 2023) ปัญหาของเกษตรกรที่พบเจอในการปลูกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์คือ ก่อนทำการเกษตร เกษตรกรไม่ทราบแนวโน้มราคาขายของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ที่จะเปลี่ยนแปลงในอนาคต ทำให้การวางแผนในการทำการเกษตรไม่มีประสิทธิภาพ การทำนายแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงราคาของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์จะช่วยให้เกษตรกรได้วางแผนในการทำ

การเกษตรที่เหมาะสม โดยการทำนายดังกล่าวจำเป็นต้องมีการนำวิทยาการข้อมูล (Data science) เข้ามาใช้ในการจัดการและทำนายด้วยวิธีที่มีประสิทธิภาพ สำหรับการทำนายราคาข้าวโพดเลี้ยงสัตว์นั้นเป็นกระบวนการที่มีความซับซ้อนเนื่องจากเป็นข้อมูลอนุกรมเวลา (Time series) และยังมีปัจจัยต่าง ๆ ทั้งภายในและภายนอก เช่น ตลาดสินค้าเกษตรกรรมมีความผันผวนสูงและยังมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงของราคาข้าวโพดเลี้ยงสัตว์อีกด้วย ดังนั้นแบบจำลองที่ได้รับการปรับปรุงอย่างมีประสิทธิภาพจะช่วยให้การทำนายราคาข้าวโพดเลี้ยงสัตว์มีความแม่นยำมากขึ้น

งานวิจัยในช่วง พ.ศ. 2561 - 2566 ที่เกี่ยวข้องกับการทำนายราคาผลิตภัณฑ์ทางการเกษตรมีหลายงานวิจัย ในงานวิจัยนี้จึงเลือกงานวิจัยที่มีความเกี่ยวข้องมาเป็นแนวทางในการทำวิจัยจำนวน 9 งานวิจัย งานวิจัยแรกเป็นของ Ge & Wu (2019) ได้วิเคราะห์แนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของราคาข้าวโพดในประเทศจีนโดยใช้ข้อมูลราคาข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2548 - 2559 และใช้แบบจำลองการถดถอยไม่เชิงเส้นตัวแปรเดียว (Univariate nonlinear) และการถดถอยเชิงเส้นหลายตัวแปร (Multivariate Linear Regression) ในการทำนายราคาข้าวโพดในปี พ.ศ. 2560 จากนั้นใช้ข้อมูลจากการวิเคราะห์ที่ได้ มาวิเคราะห์ร่วมกับข้อมูลการบริโภคข้าวโพดในประเทศจีน การผลิตข้าวโพด และปริมาณการนำเข้า-ส่งออกข้าวโพด ผลการวิเคราะห์พบว่าการรวมข้อมูลเหล่านี้ทำให้การพยากรณ์แม่นยำมากขึ้น และจากงานวิจัยของ Jantankaew & Soonthornphisaj (2023) ได้ใช้แบบจำลองการถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (Multiple Linear Regression: MLR) แบบจำลองการถดถอยแบบริดจ์ (Ridge Regression) และแบบจำลองการถดถอยแบบลาสโซ (Lasso Regression) ในการพยากรณ์ราคาข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ในประเทศ โดยใช้ข้อมูลรูปแบบรายเดือนของราคาข้าวโพดเลี้ยงสัตว์และมันสำปะหลังโรงงาน ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2545 - 2562 ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าราคาขายข้าวโพดล่วงหน้าในตลาดชิคาโกและราคาขายมันสำปะหลัง มีความสัมพันธ์ในทิศทางเดียวกันกับราคาข้าวโพดในประเทศ

Silva et al. (2021) ทำนายราคาข้าวโพดและน้ำตาลรายวันในประเทศบราซิล โดยใช้ข้อมูลรายวันประกอบด้วยราคาน้ำตาล ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2547 - 2562 และราคาข้าวโพด ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2546 - 2562 มาวิเคราะห์โดยใช้แบบจำลองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่รวมแบบถดถอยอัตโนมัติหรืออาร์มา (Autoregressive Integrated Moving Average: ARIMA) ค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่รวมอัตโนมัติแบบถดถอยตามฤดูกาล (Seasonal Autoregressive Integrated Moving Average: SARIMA) ซัพพอร์ตเวกเตอร์แบบถดถอย (Support Vector Regression: SVR) การเพิ่มประสิทธิภาพแบบปรับตัว (Adaptive Boosting) หรือเรียกว่า AdaBoost และแบบจำลองหน่วยความจำระยะสั้นระยะยาวหรือแอลเอสทีเอ็ม (Long Short-Term Memory: LSTM) พบว่า SVR ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด รองลงมาคือ LSTM และจากงานวิจัยของ Guo et al. (2022) ได้ทำนายราคาข้าวโพดในมณฑลเสฉวนของประเทศจีน โดยใช้อัลกอริทึมอาพริออริ (Apriori algorithm) เพื่อค้นหาปัจจัยที่มีอิทธิพลต่อการเปลี่ยนแปลงของราคา และใช้แบบจำลองหน่วยความจำระยะสั้นระยะยาวตามความสนใจ (Attention-based LSTM: AttLSTM) ร่วมกับ ARIMA และแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมแบบการแพร่ย้อนกลับหรือพีพีเอเอ็นเอ็น (Backpropagation Artificial Neural Networks: BPANN) พบว่าแบบจำลอง AttLSTM-ARIMA-BPANN ให้ผลการคาดการณ์ที่ดีที่สุด

งานวิจัยของ Yin et al. (2020) ทำนายราคาผัก 5 ชนิดแบบรายเดือนในประเทศเกาหลี โดยใช้ข้อมูลราคาเฉลี่ยรายเดือน ข้อมูลสภาพอากาศ ข้อมูลทางอุตุนิยมวิทยาและอื่น ๆ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2555 -

2562 งานวิจัยนี้ใช้แบบจำลอง STL-AttLSTM เปรียบเทียบกับ LSTM และ AttLSTM พบว่าแบบจำลอง STL-AttLSTM ให้ผลลัพธ์ที่ดีที่สุด โดยมีค่าโดยมีค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (Root Mean Square Error: RMSE) และค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนเปอร์เซ็นต์สัมบูรณ์เฉลี่ย (Mean Absolute Percentage Error: MAPE) ที่ต่ำที่สุด และงานวิจัยของ Zhu et al. (2022) ได้ทำนายราคาสุกรโดยใช้แบบจำลอง STL-based Hybrid โดยผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าแบบจำลองที่นำเสนอมีประสิทธิภาพสูงสุดในการทำนายราคาสุกร และจากงานวิจัยของ Sabu et al. (2020) ได้ทำนายราคาผลหมากทางการเกษตรของอินเดียในรัฐเกรละ โดยใช้ข้อมูลราคาขายผลหมากแบบรายเดือน ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2550 - 2559 ทำนายโดยใช้แบบจำลอง SARIMA แบบจำลองโฮลท์-วินเทอร์ซีซันนัล (Holt-winter's Seasonal) และแบบจำลอง LSTM จากการเปรียบเทียบผลลัพธ์ของแต่ละแบบจำลองพบว่าแบบจำลอง LSTM มีประสิทธิภาพในการทำนายมากที่สุด

จากงานวิจัยของ Kraisornukhor et al. (2023) ได้ทำนายราคายางแผ่นรมควันชั้นสามล่างหน้าหนึ่งสัปดาห์โดยใช้แบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึกพร้อมปัจจัยภายนอก ซึ่งใช้ข้อมูลราคาขายรายวันจากการยางแห่งประเทศไทย ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2544 - 2566 โดยแบ่งข้อมูล 80% เป็นชุดข้อมูลฝึกสอน และ 20% เป็นชุดข้อมูลทดสอบ โดยงานวิจัยนี้ทำการเปรียบเทียบเพื่อหาแบบจำลองการทำนายที่ดีที่สุดระหว่างแบบจำลองโครงข่ายประตูกลับ (Gated Recurrent Units: GRU) แบบจำลอง LSTM แบบจำลอง GRU แบบสองทิศทาง (Bidirectional-GRU) และแบบจำลอง LSTM แบบสองทิศทาง (Bidirectional-LSTM) จากผลการทดลองพบว่า แบบจำลอง GRU มีประสิทธิภาพในการทำนายที่ดีที่สุด

จากงานวิจัยของ Nayak et al. (2024) ได้ทำนายราคาสินค้าเกษตรในประเทศอินเดีย โดยใช้ราคาสินค้าเกษตรร่วมกับปัจจัยภายนอกและข้อมูลสภาพอากาศ ข้อมูลพืชยอดนิมรายสัปดาห์ของมะเขือเทศ หัวหอม และมันฝรั่ง จากรัฐบาลอินเดีย โดยแบ่งข้อมูล 90% เป็นชุดข้อมูลฝึกสอน และ 10% เป็นชุดข้อมูลทดสอบ งานวิจัยนี้ได้ทำการทดลองเชิงเปรียบเทียบที่ครอบคลุมทั้งแบบจำลองทางสถิติ เช่น แบบจำลองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่รวมแบบถดถอยอัตโนมัติพร้อมตัวแปรภายนอกหรืออาร์แม็กซ์ (Autoregressive Integrated Moving Average with Exogenous Variables: ARIMAX) แบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine learning) และแบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึก (Deep learning) ผลการวิจัยพบว่าแบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึกที่ใช้ตัวแปรภายนอกให้ประสิทธิภาพในการทำนายที่ดีที่สุด

งานวิจัยนี้จึงได้เสนอการเปรียบเทียบประสิทธิภาพแบบจำลองสำหรับการทำนายราคาข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ โดยนำแบบจำลองทางสถิติและแบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึกที่ได้รับความนิยมจากการทบทวนวรรณกรรมข้างต้นมาทำการศึกษาทั้งหมด 4 แบบจำลอง ได้แก่ LSTM, GRU, ARIMA และ ARIMAX เพื่อค้นหาแบบจำลองที่สามารถทำนายราคาข้าวโพดได้อย่างมีประสิทธิภาพ งานวิจัยนี้จะช่วยให้เกษตรกรสามารถทราบแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงราคาของข้าวโพดเลี้ยงสัตว์และสามารถวางแผนการเพาะปลูกในอนาคตได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 ชุดข้อมูล

ข้อมูลดิบที่ใช้ในงานวิจัยนี้เก็บรวบรวมมาจากสองแหล่งข้อมูล คือ สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร (Office of Agricultural Economics, 2023) และกระทรวงพาณิชย์ (Ministry of Commerce, 2023) โดยประกอบไปด้วยข้อมูล 6 รายการ รายการแรกคือ ราคาข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ความชื้น 14.5% ที่เกษตรกรขายได้ (บาทต่อกิโลกรัม) ซึ่งต่อไปนี้จะเรียกว่า ราคาข้าวโพด และเป็นข้อมูลหลักที่ใช้ทำนาย สำหรับอีก 5 รายการที่เหลือจะเป็นคุณลักษณะอื่นที่ใช้ประกอบการทำนาย โดยงานวิจัยนี้ใช้รายงานของภาวะเศรษฐกิจการเกษตรปี พ.ศ. 2566 และแนวโน้มปี พ.ศ. 2567 (Fernando, 2024) ในการเลือกคุณลักษณะที่เกี่ยวข้องซึ่งประกอบไปด้วย จำนวนพื้นที่เพาะปลูกข้าวโพดรวมทั้งประเทศ (ไร่) ปริมาณผลผลิตข้าวโพดของเกษตรกรรวมทั่วประเทศ (ตัน) ปริมาณการนำเข้าและส่งออกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ของประเทศไทยที่ประเทศไทยนำเข้าหรือส่งออกสินค้าได้ (ตัน) มูลค่าของการนำเข้าและส่งออกข้าวโพดเลี้ยงสัตว์ของประเทศไทย (ล้านบาท) และราคาซื้อขายล่วงหน้าตลาดชิคาโก (บาทต่อกิโลกรัม)

ข้อมูลทุกข้อมูลยกเว้นข้อมูลราคาซื้อขายล่วงหน้าตลาดชิคาโกได้นำมาจากสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรและข้อมูลทั้งหมดอยู่ในรูปแบบข้อมูลรายเดือน งานวิจัยเลือกใช้ข้อมูลตั้งแต่ปี พ.ศ. 2558 - 2564 เนื่องจากเมื่อตรวจสอบข้อมูลทั้งหมดแล้วพบว่า ข้อมูลย้อนหลังก่อนปี พ.ศ. 2558 มีข้อมูลสูญหายจำนวนมากใน 1 ปี

2.2 ขั้นตอนการวิจัย

งานวิจัยนี้ใช้ภาษาไพทอน (Python) ในการทำวิจัย โดยมีขั้นตอนการวิจัยทั้งหมด 6 ขั้นตอนดังต่อไปนี้

1) รวบรวมข้อมูลที่อยู่ในรูปแบบแตกต่างกันซึ่งประกอบไปด้วยข้อมูลบนเว็บไซต์และไฟล์พีดีเอฟ ให้อยู่ในไฟล์ไมโครซอฟท์เอกซ์เซล (Microsoft excel)

2) สร้างคุณลักษณะใหม่จำนวน 2 คุณลักษณะที่คาดว่าจะมีความเกี่ยวข้องกับราคาของข้าวโพดในประเทศไทย จากข้อมูลประกอบไปด้วย ราคานำเข้าข้าวโพดเฉลี่ย ซึ่งเกิดจากการนำมูลค่าของการนำเข้าหารด้วยปริมาณการนำเข้าได้ข้อมูลในหน่วยบาทต่อกิโลกรัม และราคาส่งออกข้าวโพดเฉลี่ย ซึ่งเกิดจากการนำมูลค่าของการส่งออกหารด้วยปริมาณการส่งออกได้ข้อมูลในหน่วยบาทต่อกิโลกรัม

3) ตรวจสอบและแก้ไขข้อมูลที่เป็นค่าว่าง (Null value) และข้อมูลที่มีค่าผิดปกติ (Noisy data) โดยการแทนข้อมูลเหล่านี้ด้วยค่าเฉลี่ยของข้อมูลตำแหน่งถัดไปและก่อนหน้าที่ใกล้ที่สุด จากนั้นจัดเตรียมข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบไฟล์ซีเอสวี (CSV) เพื่อนำไปใช้ต่อไป

4) การสร้างแบบจำลองมีคุณลักษณะที่เกี่ยวข้องจำนวนมากและมีจำนวนคุณลักษณะแตกต่างกันออกไปในแต่ละชุดข้อมูล อย่างไรก็ตาม คุณลักษณะบางอันอาจไม่ส่งผลต่อประสิทธิภาพของแบบจำลองหรืออาจลดประสิทธิภาพของแบบจำลอง ดังนั้นก่อนการสร้างแบบจำลองจึงต้องตรวจสอบว่ามีเฉพาะคุณสมบัติที่จำเป็นถูกเลือกเพื่อไปสร้างแบบจำลองเท่านั้น สัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Correlation coefficient) เป็นหนึ่งในการเลือกคุณลักษณะที่ได้รับความนิยม ซึ่งเป็นหลักการทางสถิติที่ใช้หาความสัมพันธ์ระหว่างตัวแปร 2 ตัวแปร (Soontranon, 2023) กำหนดให้ค่า r แทนค่าสัมประสิทธิ์

สหสัมพันธ์ซึ่งจะมีค่าอยู่ระหว่าง -1 ถึง 1 จะสามารถตีความค่า r ได้ 3 กรณีคือ กรณีแรกค่า r เข้าใกล้ -1 หมายถึงตัวแปรทั้งสองตัวมีความสัมพันธ์กันในเชิงตรงกันข้าม กรณีที่ 2 ค่า r เข้าใกล้ 1 หมายความว่าตัวแปรทั้งสองตัวมีความสัมพันธ์ไปในทิศทางเดียวกันและกรณีสุดท้ายค่า $|r|$ มีค่าเข้าใกล้ 0 จะหมายความว่าตัวแปรทั้งสองมีความสัมพันธ์กันน้อยหรือไม่มีความสัมพันธ์กัน

5) ช่วงของข้อมูลในแต่ละคุณลักษณะมีความแตกต่างกัน ทำให้จำเป็นต้องปรับขนาดช่วงของข้อมูลเพื่อให้ข้อมูลเป็นมาตรฐานก่อน ซึ่งจะทำให้แบบจำลองทำงานได้ดีและให้ผลลัพธ์ที่มีความแม่นยำมากขึ้นสำหรับการปรับช่วงของข้อมูล งานวิจัยนี้ได้เลือกการปรับช่วงข้อมูลด้วยค่าต่ำสุด-สูงสุด (Min-Max normalization) (Ministry of Commerce, 2023) โดยการปรับแต่ละคุณลักษณะทุกคุณลักษณะรวมทั้งราคาข้าวโพดให้อยู่ในช่วง 0 ถึง 1 จากนั้นแบ่งข้อมูลออกเป็นชุดข้อมูลฝึกสอน (Training dataset) และชุดข้อมูลทดสอบ (Testing dataset) เนื่องจากมีจำนวนข้อมูลทั้งหมด 7 ปี งานวิจัยนี้จึงแบ่งการทดสอบออกเป็น 2 รูปแบบคือ ใช้ข้อมูลปี พ.ศ. 2558 - 2562 เป็นชุดข้อมูลฝึกสอน และใช้ข้อมูลปี พ.ศ. 2563 เป็นชุดข้อมูลทดสอบ และใช้ข้อมูลปี พ.ศ. 2559 - 2563 เป็นชุดข้อมูลฝึกสอน และใช้ข้อมูลปี พ.ศ. 2564 เป็นชุดข้อมูลทดสอบ โดยการสร้างแบบจำลองจะแยกสร้างแบบจำลองสำหรับชุดข้อมูลฝึกสอนแต่ละชุด และรายงานประสิทธิภาพแบบจำลองเฉลี่ยจากชุดข้อมูลทดสอบทั้ง 2 ชุด

6) งานวิจัยนี้จะนำชุดข้อมูลฝึกสอนมาสร้างแบบจำลองทั้งหมดสี่แบบจำลอง แบ่งออกเป็นแบบจำลองทางสถิติ 2 แบบจำลอง และแบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึก 2 แบบจำลอง ดังนี้

แบบจำลองทางสถิติแบบจำลองแรก คือ ARIMA เป็นแบบจำลองที่ประกอบไปด้วย 3 ส่วน คือ การถดถอยอัตโนมัติ (Autoregressive: AR) ใช้ตัวแปร p แทน ซึ่งคือจำนวนพจน์ที่บ่งบอกถึงส่วนที่เป็นค่าการถดถอยอัตโนมัติ อินทิเกรต (Integrated) ใช้ตัวแปร d แทน ซึ่งคือจำนวนค่าที่ทำให้ข้อมูลคงที่เพื่อทำให้ข้อมูลมีลักษณะนิ่ง (Stationary) และค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Moving average) หรือเรียกว่า MA ใช้ตัวแปร q แทน ซึ่งคือพารามิเตอร์ที่บ่งบอกถึงจำนวนของค่าที่ถูกใช้ในแบบจำลองค่าเฉลี่ยเคลื่อนที่ (Boonmana & Kulvanich, 2017; Bora, 2021) แบบจำลองทางสถิติแบบจำลองที่สอง คือ แบบจำลอง ARIMAX เป็นแบบจำลองที่นำแบบจำลอง ARIMA มาเพิ่มตัวแปรภายนอก (Exogenous) เข้าไปในแบบจำลอง ซึ่งตัวแปรภายนอกนี้จะเป็คุณลักษณะที่มีความเกี่ยวข้องกับตัวแปรที่ต้องการทำนาย (Mehandzhiyski, 2023)

อย่างไรก็ตาม เนื่องจากข้อมูลอนุกรมเวลาส่วนใหญ่อาจมีลักษณะไม่นิ่ง (Non-stationary) ทำให้จำเป็นต้องตรวจสอบก่อนว่าข้อมูลที่เลือกมานั้นมีลักษณะนิ่งหรือไม่ ไม่เช่นนั้นจะทำให้เกิดความผิดพลาดหลังการสร้างแบบจำลองได้ สำหรับการทดสอบความนิ่งของข้อมูลทำได้โดยใช้วิธีการทดสอบแบบเอ็ดเอฟ (Augmented Dickey-Fuller Test: ADF Test) หรือเรียกว่า ซึ่งเป็นการทดสอบประเภทการทดสอบรากหน่วย (Unit root test) ที่มีความเกี่ยวข้องกับความไม่นิ่งของอนุกรมเวลา โดยงานวิจัยนี้กำหนดระดับนัยสำคัญที่ 0.05 ดังนั้นหากผลลัพธ์ของ ADF Test มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับระดับนัยสำคัญที่กำหนดจะหมายความว่าข้อมูลมีลักษณะนิ่ง และหากผลลัพธ์ของ ADF Test มีค่ามากกว่าระดับนัยสำคัญที่กำหนดจะหมายความว่าข้อมูลมีลักษณะไม่นิ่ง สำหรับการกำหนดค่า Integrated ของแบบจำลอง ARIMA และ ARIMAX จะกำหนดจากการ ADF Test ที่ทำให้ข้อมูลมีลักษณะนิ่ง (ALGOADDICT, 2019; Santra, 2023)

เพื่อช่วยกำหนดค่าอินทิเกรตสำหรับ ARIMA และ ARIMAX โดยการใช้วิธีทดสอบสมมติฐาน ซึ่งกำหนดให้สมมติฐานหลัก (H_0) แทนข้อมูลมีลักษณะไม่นิ่ง ซึ่งจะยอมรับสมมติฐานหลักเมื่อค่าที่คำนวณได้มี

ค่ามากกว่าค่าวิกฤต (Critical values) ณ ระดับนัยสำคัญที่กำหนด และสมมติฐานรอง (H1) แทนข้อมูลมีลักษณะหนึ่ง ซึ่งจะยอมรับสมมติฐานรองเมื่อค่าที่คำนวณได้มีค่าน้อยกว่าหรือเท่ากับค่าวิกฤต ณ ระดับนัยสำคัญที่กำหนด (Tejwin, 2022)

แบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึกแบบจำลองแรก คือ แบบจำลอง LSTM เป็นโครงข่ายประสาทเทียมแบบวนกลับ (Recurrent Neural Networks: RNN) ถูกเสนอโดย Hochreiter & Schmidhuber (1997) แบบจำลอง LSTM ถูกออกแบบมาเพื่อจัดการกับข้อมูลในระยะยาว ทำให้สามารถประมวลผลลำดับข้อมูลและทำนายผลข้อมูลในรูปแบบตามลำดับได้ เมื่อมีการป้อนข้อมูลลงในเซลล์แบบจำลอง LSTM จะเรียนรู้ข้อมูลที่ป้อนลงในเซลล์ จากนั้นจะส่งข้อมูลจากการประมวลผลเวลาปัจจุบันไปประมวลผลเวลาถัดไป เกต (Gates) ของแบบจำลองจะทำหน้าที่ควบคุมการไหลของข้อมูลเข้าและออกจากเซลล์หน่วยความจำ โดยแบบจำลอง LSTM มีเกตทั้งหมด 3 แบบ ได้แก่ 1) เกตที่ถูกลืม (Forget gate) ซึ่งมีฟังก์ชันกระตุ้นทำหน้าที่ปรับช่วงของข้อมูลตามต้องการ สำหรับตัดสินใจว่าควรจดจำข้อมูลใดและควรลืมข้อมูลใด ทำให้แต่ละเซลล์มีระดับความสำคัญที่แตกต่างกัน 2) เกตทางเข้า (Input gate) จะกำหนดว่าต้องเพิ่มค่าโหนด (Node) ของข้อมูลที่จะจดจำ และ 3) เกตทางออก (Output gate) กำหนดว่าเซลล์หน่วยความจำใดควรมีอิทธิพลต่อผลลัพธ์ที่มีอยู่ ทั้งนี้แต่ละเซลล์จะมีชั้นซ่อนอยู่เรียกว่าหน่วยความจำระยะสั้น (Short term memory) และมีสถานะเซลล์เรียกว่าหน่วยความจำระยะยาว (Long term memory) แบบจำลอง LSTM สามารถสร้างจากคุณลักษณะเดียวและหรือจากหลายคุณลักษณะได้ (Hull, 2022)

แบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึกแบบจำลองที่สอง คือ แบบจำลอง GRU เสนอโดย Cho et al. (2014) โดยมีจุดมุ่งหมายเพื่อแก้ปัญหาความลาดชันที่หายไป (Vanishing gradient problem) ของ RNN นอกจากนี้ GRU ยังเป็นโครงข่ายประสาทเทียมแบบวนกลับประเภทหนึ่งที่คล้ายกับแบบจำลอง LSTM แต่ใช้หน่วยความจำน้อยกว่าและทำงานเร็วกว่า อย่างไรก็ตามความแตกต่างระหว่าง GRU และ LSTM คือแบบจำลอง GRU จะเปลี่ยนสถานะโดยใช้เกต 2 เกต ได้แก่ อัปเดตเกต (Update gate) จะกำหนดว่าจะรวมเวกเตอร์เข้าในสถานะที่ซ่อน (Hidden state) มากน้อยเพียงใด และรีเซ็ตเกต (Reset gate) จะกำหนดว่าควรลืมสถานะที่ซ่อนไว้ก่อนหน้านี้มากแค่ไหน ซึ่งเกตทั้งสองนี้ทำหน้าที่กำหนดข้อมูลที่สามารถผ่านไปยังทางออก (Output) ทำให้สามารถฝึกแบบจำลองได้โดยไม่ต้องลบข้อมูลที่ไม่เกี่ยวข้องกับการทำนาย (Chaiyadecha, 2022)

สำหรับการสร้างแบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึกในงานวิจัยนี้ จะทำการค้นหาอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับค่าถ่วงน้ำหนัก (Weight optimization algorithm) และฟังก์ชันกระตุ้น (Activation function) ที่เหมาะสม

สำหรับอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับค่าถ่วงน้ำหนักจะทำการปรับค่าถ่วงน้ำหนักในการสอนแบบจำลองแต่ละรอบ งานวิจัยนี้เลือกทดสอบอัลกอริทึมการหาค่าที่เหมาะสมที่สุดจำนวน 3 อัลกอริทึมประกอบไปด้วย 1) อัดัม (Adaptive Moment Estimation: ADAM) 2) อาร์เอ็มเอสพรอป (Root Mean Square Propagation: RMSProp) และ 3) เอสจีดี (Stochastic Gradient Descent: SGD)

สำหรับฟังก์ชันกระตุ้นจะทำหน้าที่ในการรวมและแปลงข้อมูลเข้าจำนวนมากให้เป็นข้อมูลออกเพียงหนึ่งค่า (Chaiyadecha, 2022) โดยในงานวิจัยนี้เลือกทดสอบทั้งหมด 3 ฟังก์ชัน ประกอบไปด้วย 1) รีลู (Rectified Linear Unit: ReLU) 2) ซิกมอยด์ (Sigmoid) และ 3) ไฮเพอร์โบลิคแทงกเจนท์ (Hyperbolic

Ttangent Function: Tanh) โดยฟังก์ชันกระตุ้นทั้ง 3 สามารถแปลงข้อมูลด้วยสมการที่ (1) สำหรับฟังก์ชัน ReLU โดยมีผลลัพธ์อยู่ในช่วง $[0, \infty]$ สมการที่ (2) สำหรับฟังก์ชัน Sigmoid โดยมีผลลัพธ์อยู่ในช่วง $(0, 1)$ และสมการที่ (3) สำหรับฟังก์ชัน Tanh โดยมีผลลัพธ์อยู่ในช่วง $(-1, 1)$ เมื่อ x แทนผลรวมค่าของข้อมูลกับค่าถ่วงน้ำหนัก

$$f(x) = \begin{cases} 0; & x < 0 \\ x; & x \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

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

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

งานวิจัยนี้กำหนดพารามิเตอร์สำหรับฝึกสอนแบบจำลอง LSTM และ GRU ด้วยค่าเริ่มต้นดังแสดงดังตารางที่ 1 อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้มีการกำหนดจำนวน Epochs โดยพิจารณาจากกราฟระหว่างการสร้างแบบจำลอง เมื่อค่าความผิดพลาดของแบบจำลองเริ่มคงที่จะหยุดการฝึกสอนแบบจำลอง

ตารางที่ 1. การกำหนดพารามิเตอร์สำหรับแบบจำลอง LSTM และ GRU

พารามิเตอร์	ค่าที่กำหนด
Units	200
Time Step	12
Kernel Regularizer	l2(0.01)
Loss Function	MSE

2.3 การวัดประสิทธิภาพแบบจำลอง

ในงานวิจัยนี้เลือกวัดประสิทธิภาพของแบบจำลองทางสถิติและแบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึกด้วยวิธีการทางสถิติ 2 วิธี คือ *RMSE* และ *MAE* ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการที่ (4) และสมการที่ (5)

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2}{N}} \quad (4)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |y_i - \hat{y}_i|}{N} \quad (5)$$

เมื่อ $\hat{y}_i$ แทนค่าที่ได้จากแบบจำลอง ณ เวลา i

y_i แทนค่าจริง ณ เวลา i

N แทนจำนวนข้อมูลทดสอบทั้งหมด

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 การทดลองการเลือกคุณลักษณะ

การทดลองนี้จะค้นหาคุณลักษณะที่มีความสัมพันธ์กับราคาข้าวโพดที่ต้องการทำนายโดยการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ ซึ่งผลลัพธ์ที่ได้แสดงดังตารางที่ 2 โดยเห็นได้ว่าคุณลักษณะที่เกี่ยวข้องกับราคาข้าวโพด 4 คุณลักษณะ ประกอบไปด้วย ปริมาณส่งออกข้าวโพดทั้งหมด ราคาข้าวโพดส่งออก ราคาซื้อขายล่วงหน้าตลาดชิคาโก และมูลค่าส่งออกข้าวโพดทั้งหมด จะมีค่าสัมบูรณ์ของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ที่มีค่าสูงซึ่งแตกต่างจากคุณลักษณะอื่น งานวิจัยนี้จึงเลือกใช้คุณลักษณะ 4 คุณลักษณะดังกล่าวเพื่อไปทำการทดสอบกับทั้งแบบจำลองทางสถิติและแบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึกในการทดลองถัดไป

ตารางที่ 2. ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างราคาข้าวโพดและคุณลักษณะอื่น

คุณลักษณะ	ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์	ค่าสัมบูรณ์ของค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์
ปริมาณส่งออกข้าวโพดทั้งหมด	-0.3200	0.3200
ราคาข้าวโพดส่งออก	0.3102	0.3102
ราคาซื้อขายล่วงหน้าตลาดชิคาโก	0.2786	0.2786
มูลค่าส่งออกข้าวโพดทั้งหมด	-0.2741	0.2741
ปริมาณนำเข้าข้าวโพดทั้งหมด	0.2293	0.2293
ปริมาณผลผลิตข้าวโพดในประเทศ	-0.1784	0.1784
มูลค่านำเข้าข้าวโพดทั้งหมด	0.1449	0.1449
พื้นที่เพาะปลูกข้าวโพด	0.1046	0.1046
ราคาข้าวโพดนำเข้า	0.0298	0.0298

3.2 การทดลองการทดสอบความนิ่งของข้อมูล

จากการทดสอบความนิ่งของข้อมูลด้วย ADF Test พบว่า ผลจาก ADF Test ได้ค่า 0.0434 ซึ่งมีค่าน้อยกว่าค่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 สามารถสรุปได้ว่า ข้อมูลมีลักษณะนิ่ง เมื่อมีการใช้ค่า Integrated เป็น 1 ทำให้สามารถกำหนดค่า d เป็น 1 สำหรับแบบจำลองทางสถิติทั้ง ARIMA และ ARIMAX

3.3 การทดลองการทำนายราคาข้าวโพดด้วยแบบจำลองทางสถิติ

สำหรับแบบจำลองทางสถิติทั้ง 2 แบบจำลอง คือ ARIMA และ ARIMAX จะมีการพิจารณาตัวแปรที่เกี่ยวข้องจำนวน 3 ตัว คือ p , d และ q อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ได้กำหนดค่า d เป็น 1 ตาม ADF Test จากหัวข้อ 3.1 การทดลองนี้จะทำการหาค่า p และ q ที่เหมาะสมสำหรับทั้ง 2 แบบจำลอง โดยทำการทดลองค่าตั้งแต่ 0 ถึง 5 โดยในการสร้างแบบจำลอง ARIMA ใช้ข้อมูลราคาข้าวโพดเพียงอย่างเดียว และ ARIMAX ใช้ข้อมูลราคาข้าวโพดและคุณลักษณะอื่นอีก 4 คุณลักษณะที่ถูกเลือกจากขั้นตอนที่ 3.1

ผลการทำนายของทั้ง 2 แบบจำลองแสดงดังตารางที่ 3 และ 4 โดยเป็นการแสดงค่าเฉลี่ยของชุดข้อมูลทดสอบ 2 ชุด จากตารางที่ 3 พบว่า แบบจำลอง ARIMA มีผลการทำนายที่ไม่แตกต่างกันในแต่ละแบบจำลอง โดย ARIMA (1,1,2) ได้ประสิทธิภาพในการทำนายดีที่สุด โดยมีค่า RMSE และ MAE อยู่ที่ 0.3213 และ 0.2496 ตามลำดับ จากตารางที่ 4 พบว่า แบบจำลอง ARIMAX มีผลการทำนายที่ไม่แตกต่าง

กันในแต่ละแบบจำลองโดย ARIMAX (4,1,4) มีค่า MAE น้อยที่สุดอยู่ที่ 0.0941 และ ARIMAX (5,1,4) มีค่า RMSE น้อยที่สุดอยู่ที่ 0.1145 ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเลือกแบบจำลอง ARIMA (1,1,2) ARIMAX (4,1,4) และ ARIMAX (5,1,4) เพื่อนำไปเปรียบเทียบกับแบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึกต่อไป

ตารางที่ 3. ประสิทธิภาพของแบบจำลอง ARIMA เฉลี่ยของชุดข้อมูลทดสอบ

แบบจำลอง	วิธีการทางสถิติ		แบบจำลอง	วิธีการทางสถิติ	
	RMSE	MAE		RMSE	RMSE
ARIMA (1,1,1)	0.1099	0.0881	ARIMA (3,1,4)	0.1190	0.0966
ARIMA (1,1,2)	0.0937	0.0728	ARIMA (3,1,5)	0.1474	0.1255
ARIMA (1,1,3)	0.1445	0.1166	ARIMA (4,1,1)	0.1116	0.0895
ARIMA (1,1,4)	0.1280	0.1055	ARIMA (4,1,2)	0.1192	0.0951
ARIMA (1,1,5)	0.1362	0.1139	ARIMA (4,1,3)	0.1239	0.1009
ARIMA (2,1,1)	0.0992	0.0778	ARIMA (4,1,4)	0.1226	0.0995
ARIMA (2,1,2)	0.1034	0.0823	ARIMA (4,1,5)	0.1187	0.0970
ARIMA (2,1,3)	0.1135	0.0913	ARIMA (5,1,1)	0.1153	0.0937
ARIMA (2,1,4)	0.1446	0.1228	ARIMA (5,1,2)	0.1236	0.0995
ARIMA (2,1,5)	0.1473	0.1258	ARIMA (5,1,3)	0.1393	0.1157
ARIMA (3,1,1)	0.1109	0.0879	ARIMA (5,1,4)	0.1101	0.0869
ARIMA (3,1,2)	0.1098	0.0871	ARIMA (5,1,5)	0.1489	0.1284
ARIMA (3,1,3)	0.1442	0.1074	-	-	-

ตารางที่ 4. ประสิทธิภาพของแบบจำลอง ARIMAX เฉลี่ยของชุดข้อมูลทดสอบ

แบบจำลอง	ปี พ.ศ. 2563		แบบจำลอง	ปี พ.ศ. 2564	
	RMSE	MAE		RMSE	MAE
ARIMAX (1,1,1)	0.1401	0.1131	ARIMAX (3,1,4)	0.2157	0.2003
ARIMAX (1,1,2)	0.1656	0.1403	ARIMAX (3,1,5)	0.2467	0.2316
ARIMAX (1,1,3)	0.1697	0.1438	ARIMAX (4,1,1)	0.1490	0.1297
ARIMAX (1,1,4)	0.1950	0.1771	ARIMAX (4,1,2)	0.1448	0.1247
ARIMAX (1,1,5)	0.1977	0.1795	ARIMAX (4,1,3)	0.1576	0.1379
ARIMAX (2,1,1)	0.1610	0.1413	ARIMAX (4,1,4)	0.1176	0.0941
ARIMAX (2,1,2)	0.1907	0.1747	ARIMAX (4,1,5)	0.1747	0.1574
ARIMAX (2,1,3)	0.1633	0.1442	ARIMAX (5,1,1)	0.1447	0.1245
ARIMAX (2,1,4)	0.1815	0.1620	ARIMAX (5,1,2)	0.1466	0.1250
ARIMAX (2,1,5)	0.1950	0.1764	ARIMAX (5,1,3)	0.1286	0.1047
ARIMAX (3,1,1)	0.1560	0.1360	ARIMAX (5,1,4)	0.1145	0.0955
ARIMAX (3,1,2)	0.1594	0.1397	ARIMAX (5,1,5)	0.2142	0.2006
ARIMAX (3,1,3)	0.1612	0.1417	-	-	-

3.4 การทดลองการทำนายราคาข้าวโพดด้วยแบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึก

สำหรับแบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึกทั้งสองแบบจำลอง คือ LSTM และ GRU โดยแต่ละแบบจำลองจะทดลองกับอัลกอริทึมการหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับค่าถ่วงน้ำหนักจำนวน 3 อัลกอริทึมคือ ADAM, RMSProp และ SGD และฟังก์ชันกระตุ้น 3 ฟังก์ชันคือ ReLU, Sigmoid และ Tanh เพื่อหาว่าอัลกอริทึมการหาค่าเหมาะที่สุด สำหรับค่าถ่วงน้ำหนักและฟังก์ชันกระตุ้นที่เหมาะสมที่สุด นอกจากนี้ในการทดลองนี้จะแบ่งข้อมูลที่ใช้ฝึกสอนออกเป็น 2 รูปแบบคือ รูปแบบที่ 1 ใช้เฉพาะข้อมูลราคาข้าวโพดเพื่อสร้างแบบจำลอง และรูปแบบที่ 2 ใช้ข้อมูลราคาข้าวโพดและคุณลักษณะอื่นอีก 4 คุณลักษณะที่ถูกเลือกจากขั้นตอนที่ 3.1 เพื่อสร้างแบบจำลอง สำหรับส่วนนี้จะแบ่งผลการทดลองออกเป็น 2 หัวข้อย่อยตามแบบจำลองที่ใช้คือ LSTM และ GRU

3.4.1 ผลการทดลองสำหรับแบบจำลอง LSTM

ในการทดลองของแบบจำลอง LSTM มีการสร้างจากชุดข้อมูล 2 รูปแบบ คือ LSTM ที่สร้างจากข้อมูลราคาข้าวโพดเท่านั้นเรียกว่า LSTM รูปแบบที่ 1 และ LSTM ที่สร้างจากข้อมูลราคาข้าวโพดร่วมกับคุณลักษณะอื่นเรียกว่า LSTM รูปแบบที่ 2 สำหรับผลการใช้แบบจำลอง LSTM รูปแบบที่ 1 และ 2 ไปทำนายชุดข้อมูลทดสอบแสดงตามตารางที่ 5 และ 6 ตามลำดับ

ตารางที่ 5. ประสิทธิภาพของแบบจำลอง LSTM รูปแบบที่ 1 เฉลี่ยของชุดข้อมูลทดสอบ

อัลกอริทึมการหาค่าเหมาะที่สุด สำหรับค่าถ่วงน้ำหนัก	ฟังก์ชันกระตุ้น	วิธีการทางสถิติ	
		RMSE	MAE
ADAM	ReLU	0.1671	0.1498
ADAM	Sigmoid	0.1844	0.1622
ADAM	Tanh	0.1021	0.0903
RMSProp	ReLU	0.1243	0.1044
RMSProp	Sigmoid	0.1865	0.1638
RMSProp	Tanh	0.1125	0.0965
SGD	ReLU	0.3738	0.3635
SGD	Sigmoid	0.1976	0.1760
SGD	Tanh	0.2542	0.2385

จากตารางที่ 5 ผลการทดลองแบบจำลอง LSTM ที่สร้างจากข้อมูลราคาข้าวโพดพบว่า อัลกอริทึมการหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับค่าถ่วงน้ำหนัก ADAM และฟังก์ชันกระตุ้น Tanh ให้ผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด โดยมีค่า RMSE คือ 0.1021 และมีค่า MAE คือ 0.0903 สำหรับการเปรียบเทียบระหว่างอัลกอริทึมการหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับค่าถ่วงน้ำหนักพบว่า SGD จะให้ผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพต่ำที่สุด และสำหรับการเปรียบเทียบระหว่างฟังก์ชันกระตุ้นพบว่า Sigmoid จะให้ผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพต่ำที่สุด เมื่อใช้งานร่วมกับ ADAM หรือ RMSProp

ตารางที่ 6. ประสิทธิภาพของแบบจำลอง LSTM รูปแบบที่ 2 เฉลี่ยของชุดข้อมูลทดสอบ

อัลกอริทึมการหาค่าเหมาะที่สุด สำหรับค่าถ่วงน้ำหนัก	ฟังก์ชันกระตุ้น	วิธีการทางสถิติ	
		RMSE	MAE
ADAM	ReLU	0.3034	0.2590
ADAM	Sigmoid	0.1703	0.1463
ADAM	Tanh	0.3648	0.3248
RMSProp	ReLU	0.1637	0.1492
RMSProp	Sigmoid	0.1599	0.1358
RMSProp	Tanh	0.3003	0.2757
SGD	ReLU	0.3417	0.3309
SGD	Sigmoid	0.2055	0.1841
SGD	Tanh	0.2088	0.1926

จากตารางที่ 6 ผลการทดลองแบบจำลอง LSTM ที่สร้างจากข้อมูลราคาข้าวโพดร่วมกับคุณลักษณะอื่นพบว่า อัลกอริทึมการหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับค่าถ่วงน้ำหนัก RMSProp และฟังก์ชันกระตุ้น Sigmoid ให้ผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดโดยมีค่า RMSE คือ 0.1599 และมีค่า MAE คือ 0.1358 สำหรับการเปรียบเทียบระหว่างอัลกอริทึมการหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับค่าถ่วงน้ำหนักพบว่า ADAM และ SGD จะให้ผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพต่ำกว่า RMSProp ในภาพรวม และสำหรับการเปรียบเทียบระหว่างฟังก์ชันกระตุ้นพบว่า Sigmoid จะให้ผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด

3.4.2 ผลการทดลองสำหรับแบบจำลอง GRU

ในการทดลองของแบบจำลอง GRU มีการสร้างจากชุดข้อมูล 2 รูปแบบคือ GRU ที่สร้างจากข้อมูลราคาข้าวโพดเท่านั้นเรียกว่า GRU รูปแบบที่ 1 และ GRU ที่สร้างจากข้อมูลราคาข้าวโพดร่วมกับคุณลักษณะอื่นเรียกว่า GRU รูปแบบที่ 2 สำหรับผลการใช้แบบจำลอง GRU รูปแบบที่ 1 และ 2 ไปทำนายชุดข้อมูลทดสอบแสดงตามตารางที่ 7 และ 8 ตามลำดับ

ตารางที่ 7. ประสิทธิภาพของแบบจำลอง GRU รูปแบบที่ 1 เฉลี่ยของชุดข้อมูลทดสอบ

อัลกอริทึมการหาค่าเหมาะที่สุด สำหรับค่าถ่วงน้ำหนัก	ฟังก์ชันกระตุ้น	วิธีการทางสถิติ	
		RMSE	MAE
ADAM	ReLU	0.0905	0.0765
ADAM	Sigmoid	0.1134	0.0981
ADAM	Tanh	0.0965	0.0821
RMSProp	ReLU	0.0789	0.0644
RMSProp	Sigmoid	0.0814	0.0668
RMSProp	Tanh	0.0930	0.0666
SGD	ReLU	0.1582	0.1324
SGD	Sigmoid	0.1853	0.1627
SGD	Tanh	0.1700	0.1451

จากตารางที่ 7 ผลการทดลองแบบจำลอง GRU ที่สร้างจากข้อมูลราคาข้าวโพดพบว่า อัลกอริทึมการหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับค่าถ่วงน้ำหนัก RMSProp และฟังก์ชันกระตุ้น ReLU ให้ผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดโดยมีค่า RMSE คือ 0.0789 และมีค่า MAE คือ 0.0644 สำหรับการเปรียบเทียบระหว่างอัลกอริทึมการหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับค่าถ่วงน้ำหนักพบว่า SGD จะให้ผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพต่ำที่สุด ส่วน ADAM และ RMSProp ให้ผลลัพธ์ใกล้เคียงกัน และสำหรับการเปรียบเทียบระหว่างฟังก์ชันกระตุ้นพบว่า Sigmoid ให้ผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพต่ำที่สุด

ตารางที่ 8. ประสิทธิภาพของแบบจำลอง GRU รูปแบบที่ 2 เฉลี่ยของชุดข้อมูลทดสอบ

อัลกอริทึมการหาค่าเหมาะที่สุด สำหรับค่าถ่วงน้ำหนัก	ฟังก์ชันกระตุ้น	วิธีการทางสถิติ	
		RMSE	MAE
ADAM	ReLU	0.0780	0.0662
ADAM	Sigmoid	0.0996	0.0808
ADAM	Tanh	0.1046	0.0826
RMSProp	ReLU	0.0864	0.0721
RMSProp	Sigmoid	0.0943	0.0812
RMSProp	Tanh	0.1286	0.1060
SGD	ReLU	0.1180	0.0951
SGD	Sigmoid	0.1934	0.1683
SGD	Tanh	0.1447	0.1296

จากตารางที่ 8 ผลการทดลองแบบจำลอง GRU ที่สร้างจากข้อมูลราคาข้าวโพดร่วมกับคุณลักษณะอื่นพบว่า อัลกอริทึมการหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับค่าถ่วงน้ำหนัก ADAM และฟังก์ชันกระตุ้น ReLU ให้ผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดโดยมีค่า RMSE คือ 0.0780 และมีค่า MAE คือ 0.0662 สำหรับการเปรียบเทียบระหว่างอัลกอริทึมการหาค่าเหมาะที่สุดสำหรับค่าถ่วงน้ำหนักพบว่า SGD จะให้ผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพต่ำที่สุด และสำหรับการเปรียบเทียบระหว่างฟังก์ชันกระตุ้นพบว่า Tanh ให้ผลลัพธ์ที่มีประสิทธิภาพต่ำที่สุด

3.5 การเปรียบเทียบแบบจำลองทั้งหมด

ในส่วนนี้จะทำการเปรียบเทียบผลการทดลองทั้งหมดโดยผลลัพธ์ที่ได้แสดงตามตารางที่ 9 โดยพบว่าแบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึกที่ใช้ข้อมูลราคาข้าวโพดและคุณลักษณะอื่นอีก 4 คุณลักษณะเพื่อสร้างแบบจำลองมีประสิทธิภาพในการทำนายที่ดีกว่าแบบจำลองทางสถิติ อย่างไรก็ตาม แบบจำลอง ARIMA ซึ่งใช้เฉพาะข้อมูลราคาข้าวโพดเพื่อสร้างแบบจำลองกลับมามีประสิทธิภาพในการทำนายที่ดีกว่า LSTM เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างการใช้เฉพาะข้อมูลราคาข้าวโพดเพื่อสร้างแบบจำลอง และการใช้ข้อมูลราคาข้าวโพดและคุณลักษณะอื่นอีก 4 คุณลักษณะเพื่อสร้างแบบจำลองพบว่า การใช้เฉพาะข้อมูลราคาข้าวโพดเพื่อสร้างแบบจำลองจะให้ประสิทธิภาพในการทำนายที่สูงกว่า ยกเว้นแบบจำลอง GRU ที่ให้ประสิทธิภาพการทำนายใกล้เคียงกัน และเมื่อพิจารณาผลลัพธ์รายปีของแบบจำลอง GRU ตามตารางที่ 10 พบว่าแบบจำลอง GRU รูปแบบที่ 1 จะมีประสิทธิภาพการทำนายที่ดีกว่าในการทำนายปี พ.ศ. 2563 แต่

แบบจำลอง GRU รูปแบบที่ 2 จะมีประสิทธิภาพการทำนายที่ดีกว่าในการทำนายปี พ.ศ. 2564 อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพการทำนายของ GRU รูปแบบที่ 1 มีการกระจายตัวมากกว่า ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือก GRU รูปแบบที่ 2 เป็นแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพมากที่สุด

ตารางที่ 9. ประสิทธิภาพการทำนายเฉลี่ยสองปีของแบบจำลองแบบต่าง ๆ

แบบจำลอง	วิธีการทางสถิติ	
	RMSE	MAE
ARIMA (1,1,2)	0.0937	0.0728
ARIMAX (4,1,4)	0.1176	0.0941
ARIMAX (5,1,4)	0.1145	0.0955
LSTM รูปแบบที่ 1	0.1021	0.0903
LSTM รูปแบบที่ 2	0.1599	0.1358
GRU รูปแบบที่ 1	0.0789	0.0644
GRU รูปแบบที่ 2	0.0780	0.0662

ตารางที่ 10. การเปรียบเทียบวิธีการทางสถิติแบบจำลอง GRU แยกรายปี

แบบจำลอง	พ.ศ. 2563		พ.ศ. 2564	
	RMSE	MAE	RMSE	MAE
GRU รูปแบบที่ 1	0.0739	0.0591	0.0840	0.0698
GRU รูปแบบที่ 2	0.0787	0.0685	0.0774	0.0639

4. สรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ค้นหาแบบจำลองที่เหมาะสมสำหรับการทำนายราคาข้าวโพดในประเทศไทย ชุดข้อมูลประกอบไปด้วยข้อมูลราคาข้าวโพดย้อนหลัง 7 ปี และข้อมูลคุณลักษณะอื่นที่เกี่ยวข้องอีก 9 คุณลักษณะ แบบจำลองที่เลือกประกอบไปด้วย ARIMA ARIMAX LSTM และ GRU จากการทดลองต่าง ๆ พบว่า ข้อมูลคุณลักษณะอื่นที่เลือกมา 4 คุณลักษณะที่เกี่ยวข้องกับราคาข้าวโพดมากที่สุดประกอบไปด้วย ปริมาณส่งออกข้าวโพดทั้งหมด ราคาข้าวโพดส่งออก ราคาซื้อขายล่วงหน้าตลาดชิคาโก และมูลค่าส่งออกข้าวโพดทั้งหมด สำหรับผลการทำนายพบว่า แบบจำลอง GRU ที่ใช้ข้อมูลราคาข้าวโพดและคุณลักษณะอื่นอีก 4 คุณลักษณะเพื่อสร้างแบบจำลองมีประสิทธิภาพในการทำนายที่ดีที่สุด การพัฒนาต่อยอดในอนาคตสามารถปรับปรุงแบบจำลอง GRU ในส่วนการปรับพารามิเตอร์อื่น ๆ เพิ่มเติม หรือการทำแบบจำลอง GRU ไปรวมกับแบบจำลองอื่นเป็นแบบจำลองแบบผสมผสานที่จะเพิ่มประสิทธิภาพในการทำนายต่อไป

เอกสารอ้างอิง (References)

- ALGOADDICT. (2019, June 22). *How ARIMA works in time series forecasting*. <https://shorturl.at/bKpnM> (in Thai)
- Boonmana, C., & Kulvanich, N. (2017). A comparative prediction accuracy of hybrid time series models. *Journal of Science and Technology*, 25(2), 177-190. (in Thai)

- Bora, N. (2021, November 9). *Understanding ARIMA models for machine learning*. Capital One. <https://www.capitalone.com/tech/machine-learning/understanding-arma-models/>
- Chaiyadecha, S. (2022, April 27). *Time series and stationary test using Python with time series data*. Medium. <https://lengyi.medium.com/time-series-stationary-python-adf-929ea3c64887> (in Thai)
- Cho, K., Merrienboer, B. V., Gulcehre, C., Bahdanau, D., Bougares, F., Schwenk, H., & Bengio, Y. (2014). *Learning phrase representations using RNN encoder-decoder for statistical machine translation*. arXiv. <https://arxiv.org/abs/1406.1078>
- Fernando, J. (2024). *The correlation coefficient: What it is and what it tells investors*. Investopedia. <https://www.investopedia.com/terms/c/correlationcoefficient.asp>
- Ge, Y., & Wu, H. (2019). Prediction of corn price fluctuation based on multiple linear regression analysis model under big data. *Neural Computing and Applications*, 32(22), 16843-16855. <https://doi.org/10.1007/s00521-018-03970-4>
- Guo, Y., Tang, D., Tang, W., Yang, S., Tang, Q., Feng, Y., & Zhang, F. (2022). Agricultural price prediction based on combined forecasting model under spatial-temporal influencing factors. *Sustainability*, 14(17), Article 10483. <https://doi.org/10.3390/su141710483>
- Hochreiter, S., & Schmidhuber, J. (1997). Long short-term memory. *Neural Computation*, 9(8), 1735-1780. <https://doi.org/10.1162/neco.1997.9.8.1735>
- Hull, G. (2022, December 19). *Building a neural network zoo from scratch: The long short-term memory network*. Medium. <https://medium.com/@CallMeTwitch/building-a-neural-network-zoo-from-scratch-the-long-short-term-memory-network-1cec5cf31b7>
- Jantankaew, P., & Soonthornphisaj, N. (2023). Data analytics for maize price prediction using regression algorithms. *KKU Research Journal (Graduate Studies)*, 23(2), 92-106. (in Thai)
- Kraisornukhor, P., Wongchaisuwat, P., Paoprasert, N., & Mungwattana, A. (2023). Multi-step rubber price prediction using deep learning models with external factors. *Proceedings of 2023 IEEE 11th Joint International Information Technology and Artificial Intelligence Conference (ITAIC)* (Vol. 11, pp. 1125-1129). IEEE. <https://doi.org/10.1109/ITAIC58329.2023.10408839>
- Mehandzhiyski, V. (2023). *What is an ARIMAX model?*. 365 Data Science. <https://365datascience.com/tutorials/python-tutorials/arimax/>
- Ministry of Commerce. (2023, November 14). *Historical prices: Maize (feed) – Chicago futures market price (THB/kg)*. Ministry of Commerce. <https://mex.moc.go.th/page/dit/checkpricedetail/type/W/catid/7/itemid/W16037> (in Thai)

- Nayak, G. H. H., Alam, M. W., Singh, K. N., Avinash, G., Kumar, R. R., Ray, M., & Deb, C. K. (2024). Exogenous variable driven deep learning models for improved price forecasting of TOP crops in India. *Scientific Reports*, 14(1), Article 17203. <https://doi.org/10.1038/s41598-024-68040-3>
- Office of Agricultural Economics Region 1, Chiang Mai. (2023, October 5). *This year, livestock corn production in 6 provinces of Northern Thailand totals 880,000 tons; Chiang Mai is the major production area, and farmers are preparing for harvest*. <https://shorturl.at/3FGul> (in Thai)
- Office of Agricultural Economics. (2023, November 14). *Agricultural economic data*. Office of Agricultural Economics, Ministry of Agriculture and Cooperatives. <https://shorturl.at/U0uW1> (in Thai)
- Office of Agricultural Research and Development Region 5, Department of Agriculture, Ministry of Agriculture and Cooperatives. (2019). *Knowledge management of post-rice corn production technology in the central region*. <https://www.doa.go.th/oard5/wp-content/uploads/2019/09/km62.pdf> (in Thai)
- Sabu, K. M., & Kumar, T. K. M. (2020). Predictive analytics in agriculture: Forecasting prices of arecanuts in Kerala. *Procedia Computer Science*, 171, 699-708. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2020.04.076>
- Santra, R. (2023, May 12). *Tests for stationarity in time series — Dickey Fuller Test & Augmented Dickey Fuller (ADF) Test*. Medium. <https://medium.com/@ritusantra/tests-for-stationarity-in-time-series-dickey-fuller-test-augmented-dickey-fuller-adf-test-d2e92e214360>
- Silva, R. F., Barreira, B. L., & Cugnasca, C. E. (2021). Prediction of corn and sugar prices using machine learning, econometrics, and ensemble models. *Engineering Proceedings*, 9(1), Article 31. <https://doi.org/10.3390/engproc2021009031>
- Soontranon, N. (2023). *The difference between normalization and standardization*. https://www.nerd-data.com/normalization_standardization (in Thai)
- Tejwin. (2022, January 4). *ARIMA-GARCH model (Part 1)*. <https://www.tejwin.com/en/insight/arima-garch-modelpart-1/>
- Yin, H., Jin, D., Gu, Y. H., Park, C. J., Han, S. K., & Yoo, S. J. (2020). STL-ATTLSTM: Vegetable price forecasting using STL and attention mechanism-based LSTM. *Agriculture*, 10(12), Article 612. <https://doi.org/10.3390/agriculture10120612>

Zhu, H., Xu, R., & Deng, H. (2022). A novel STL-based hybrid model for forecasting hog price in China. *Computers and Electronics in Agriculture*, 198, Article 107068. <https://doi.org/10.1016/j.compag.2022.107068>

ศึกษาความเป็นไปได้ในการเตรียมแผ่นเส้นใยจากเส้นใยกากกล้วยและ
เส้นใยชานอ้อยร่วมกับตัวประสานจากแป้งมันสำปะหลัง
เพื่อประยุกต์ใช้ในการขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหาร
Feasibility Study on Preparation of Fiber Sheet from Banana Stem
Fiber and Bagasse Fiber Combined with Binder from Cassava Flour
for Application in Forming Food Packaging

จิตติโสภา เฉลียวศักดิ์* นัฒน คูเจริญไพศาล สโรชา จงภู และ อิศราภรณ์ ฉายแก้ว

Jitsopa Chaliewsak* Numphon Koocharoenpisal Sarocha Jongpoo and Issaraporn Chay-kaew

ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ กรุงเทพฯ ประเทศไทย

Department of General Science, Faculty of Science, Srinakharinwirot University, Bangkok, Thailand

วันที่ส่งบทความ : 1 พฤษภาคม 2566 วันที่แก้ไขบทความ : 4 มิถุนายน 2568 วันที่ตอบรับบทความ : 9 มิถุนายน 2568

Received: 1 May 2023, Revised: 4 June 2025, Accepted: 9 June 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเตรียมแผ่นเส้นใยจากเส้นใยกากกล้วย เส้นใยชานอ้อย และตัวประสานที่อัตราส่วนผสมต่างกัน วิเคราะห์ผลของเส้นใยและตัวประสานต่อคุณสมบัติทางกายภาพของแผ่นเส้นใย และขึ้นรูปตัวอย่างภาชนะบรรจุอาหารจากแผ่นเส้นใย โดยสกัดเส้นใยกากกล้วยและเส้นใยชานอ้อยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที จากนั้นนำเส้นใยที่ได้มาขึ้นรูปแผ่นเส้นใยร่วมกับตัวประสานจากแป้งมันสำปะหลังที่อัตราส่วนผสมต่างกัน นำแผ่นเส้นใยที่ได้ไปวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ โครงสร้างทางเคมี การดูดซึมน้ำ การดูดซึมน้ำมัน และสมบัติเชิงกล จากนั้นขึ้นรูปตัวอย่างภาชนะบรรจุอาหารจากแผ่นเส้นใยด้วยวิธีการขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบอัดพบว่า แผ่นเส้นใยที่ได้มีลักษณะทางกายภาพแตกต่างกันตามชนิดเส้นใย ปริมาณเส้นใย และปริมาณตัวประสานที่ใช้ แผ่นเส้นใยที่ได้มีเส้นใยที่ใส่ตัวประสานมีพื้นผิวเรียบ ไม่มีขุยเส้นใย เนื่องจากมีตัวประสานช่วยยึดติดเส้นใย และมีสีต่างกันตามชนิดและปริมาณเส้นใย แต่การจัดเรียงเส้นใยไม่สม่ำเสมอ แผ่นเส้นใยทุกสูตรมีค่าการดูดซึมน้ำที่สูงมาก (3.4-5.7 เท่า) และมีค่าการดูดซึมน้ำมันสูง (1.6-3.7 เท่า) แผ่นเส้นใยทุกสูตรสามารถขึ้นรูปเป็นภาชนะบรรจุอาหารได้ แต่ไม่เหมาะสมสำหรับบรรจุอาหารประเภทน้ำและอาหารทอด แผ่นเส้นใย BN30BG30 มีคุณสมบัติเหมาะสมในการนำไปขึ้นรูปภาชนะ เพื่อนำไปศึกษาและพัฒนาต่อยอดในอนาคต

คำสำคัญ : เส้นใยกากกล้วย เส้นใยชานอ้อย แผ่นเส้นใย ตัวประสาน ภาชนะบรรจุอาหาร

*ที่อยู่ติดต่อ E-mail address: jitsopa@g.swu.ac.th

<https://doi.org/10.55003/scikmitl.2025.258788>

Abstract

The aims of this research were to prepare fiber sheets with various amounts of banana stem fiber, bagasse fiber, and binder, to analyze the effect of fibers and binder on the physical properties of fiber sheets, and to cast food packaging samples from the fiber sheets. Banana stem fiber and bagasse fiber were extracted with a 5% w/w sodium hydroxide solution at 90°C for 120 min. Then, fiber sheets were formed with various amounts of fiber and binder from cassava flour. The fiber sheets were analyzed for physical appearance, chemical structure, water absorption, oil absorption, and mechanical properties. Then, food packaging samples were cast from the fiber sheets by the compression molding process. The results showed that the physical appearance of the fiber sheets depended on the type and amount of fiber and the amount of binder. The fiber sheets with binder presented a smooth surface, no fluff of fiber, but unparalleled fiber formation because the binder seized fiber into the sheets, and the color of the fiber sheet depended on type and amount of fiber. All of the fiber sheets presented very high water absorption (3.4–5.7 times) and high oil absorption (1.6–3.7 times). All of the fiber sheets could be cast into food packaging samples, but the food packaging samples are not suitable for soups and fried foods. The fiber sheet BN30BG30 was suitable for further study and developing food packaging.

Keywords: Banana stem fiber, Bagasse fiber, Fiber sheets, Binder, Food packaging

1. บทนำ

ประเทศไทยเป็นประเทศเกษตรกรรมที่มีพืชเศรษฐกิจที่หลากหลาย อ้อยเป็นหนึ่งในพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศ มีการปลูกอ้อยเป็นจำนวนมากเพื่อการบริโภคภายในประเทศและการส่งออก (Centre for Agricultural Information, Office of Agricultural Economics, Ministry of Agriculture and Cooperatives, 2022; Office of Agricultural Economics, 2022) ในอุตสาหกรรมการผลิตน้ำตาลหลังกระบวนการผลิตจะเกิดขยะชานอ้อยขึ้นเป็นจำนวนมาก ชานอ้อยจึงเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่มีปริมาณมาก และควรนำมาพัฒนาต่อยอดให้เกิดประโยชน์แทนการกำจัดทิ้งอย่างไม่ถูกวิธี เช่น การเผา หรือการฝังกลบ เป็นต้น ซึ่งทำให้เกิดปัญหาต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม ชานอ้อยมีลักษณะเส้นใยสั้นมาก ความแข็งแรงต่ำ ความยืดหยุ่นต่ำ และมีความหยาบกระด้าง แต่มีน้ำหนักเบาและขนาดเส้นใยสม่ำเสมอ จึงเหมาะต่อการใช้เป็นวัสดุเสริมแรงและการอัดขึ้นรูปเป็นกระดาษหรือผลิตภัณฑ์ (Li et al., 2020; Ramlee et al., 2019) นอกจากชานอ้อยแล้วยังมีขยะวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรอีกชนิดที่น่าสนใจ คือ กากกล้วย เนื่องจากกล้วยเป็นพืชที่มีการเพาะปลูกมากในประเทศไทย (Centre for Information and Communication Technology, Department of Agricultural Extension, 2017) เมื่อดันกล้วยแก่เล็กน้อยให้ผลผลิตจะมีกาก

กล้วยเป็นขยะวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรปริมาณมากและหาได้ง่าย โดยทั่วไปนิยมใช้งานในรูปแบบเส้นใย ากกล้วย เนื่องจากเป็นเส้นใยที่มีความมันเงา แข็งแรง เหนียว และทนทาน สามารถนำไปแปรรูปผสมกับเส้น ใย อื่น ๆ ด้านสิ่งทอได้ นอกจากนี้ยังมีการพัฒนาเป็นภาชนะย่อยสลายได้ทางชีวภาพ กระดาษ และวัสดุ เสริมแรงในวัสดุคอมโพสิตต่าง ๆ (Kenned et al., 2020; Subagyo & Chafidz, 2018) การนำเส้นใยจาก กล้วยและเส้นใยชานอ้อยมาใช้งาน ต้องผ่านการสกัดแยกเส้นใยด้วยตัวทำละลายที่อุณหภูมิและเวลาที่ เหมาะสม นอกจากนี้ Guimarães et al. (2009) ได้ศึกษาลักษณะเฉพาะของเส้นใยจากกล้วย เส้นใยชาน อ้อย และเส้นใยบวบพันธุ์พื้นเมืองของบราซิล โดยใช้ภาวะที่เหมาะสมในการสกัดเส้นใยด้วยสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง จากนั้นวิเคราะห์ลักษณะเฉพาะของเส้นใยพบว่า เส้นใยทั้ง 3 ชนิด มีองค์ประกอบทางเคมีแตกต่างจาก แหล่งอื่น เนื่องจากพื้นที่เพาะปลูกและสายพันธุ์ เส้นใยชานอ้อยประกอบด้วยเซลลูโลสร้อยละ 54.87 เฮมิ เซลลูโลสร้อยละ 16.52 ลิกนินร้อยละ 23.33 และความชื้นร้อยละ 9.21 ในขณะที่เส้นใยจากกล้วย ประกอบด้วยเซลลูโลสร้อยละ 50.15 เฮมิเซลลูโลสร้อยละ 0.77 ลิกนินร้อยละ 17.44 ความชื้นร้อยละ 8.57 เส้นใยจากกล้วยมีความทนต่อแรงดึง (Tensile strength) 700-800 เมกะปาสคาล ยังมอดูลัส (Young's modulus) 27-32 จิกะปาสคาล ร้อยละการยืด (Elongation) 2.5-3.7 และเส้นใยชานอ้อยมีความทนต่อ แรงดึง 222 เมกะปาสคาล ยังมอดูลัส 27.1 จิกะปาสคาล ร้อยละการยืด 1.1 นอกจากนี้ Wisansakkul & Oupathumpanont (2021) ได้ศึกษาปริมาณไมโครเร็กซ์ที่เหมาะสมในการเคลือบเชือกกล้วย โดยนำเส้น ใยจากกล้วยมาทำจัดไขมันด้วยสารละลายผสมระหว่างโซเดียมไฮดรอกไซด์ 1 กรัมต่อลิตร และโซเดียม คาร์บอเนต 1 กรัมต่อลิตร ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 20-30 นาที แล้วนำไปพอกขาวด้วย คลอรีน ได้เส้นใยจากกล้วยที่มีสีเหลืองอ่อนช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับได้ดีขึ้น

ปัจจุบันมีการนำเส้นใยจากกล้วยและเส้นใยชานอ้อยมาประยุกต์ใช้งานหลากหลายรูปแบบ โดยเฉพาะการใช้งานเป็นวัสดุเสริมแรงในวัสดุคอมโพสิต ในขณะที่ Kenned et al. (2020) ได้ศึกษาการ เตรียมวัสดุคอมโพสิตเสริมแรงด้วยแผ่นเส้นใยกล้วยที่มีการขึ้นรูปด้วยวิธีการใช้เข็มปัก (Needle punched) ในเมทริกซ์พอลิเอสเตอร์ไม่อิ่มตัว (Unsaturated Polyester: UPE) พบว่า การใช้ปริมาณแผ่นเส้นใยร้อยละ 40 ทำให้วัสดุคอมโพสิตทนแรงดึงและแรงดัดงอเพิ่มขึ้น จากนั้น Bartos et al. (2021) ได้ศึกษาการ เตรียมวัสดุคอมโพสิตพอลิแลคติกแอซิด (Poly (Lactic Acid): PLA) เสริมแรงด้วยเส้นใยชานอ้อยด้วยการ ฉีดขึ้นรูปพบว่า เส้นใยชานอ้อยสามารถเพิ่มความต้านทานแรงกระแทกของ PLA และเพิ่มความแข็งแรงของ PLA ให้มีค่ามากขึ้น ปัจจุบันการประยุกต์ใช้งานด้านภาชนะและบรรจุภัณฑ์เป็นอีกทางเลือกหนึ่งในการใช้ ประโยชน์จากเส้นใยจากกล้วย เส้นใยชานอ้อย และเส้นใยธรรมชาติ นอกจากนี้ Liwthaisong (2013) ได้ ศึกษาการผลิตภาชนะย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากเส้นใยจากกล้วยพบว่า การเพิ่มขึ้นของปริมาณเส้นใย ส่งผลต่อค่าความแข็งแรงดัดโค้ง ค่ามอดูลัสยังแรงดัดโค้ง ค่าความแข็งแรงดึง มอดูลัสยังยืดหยุ่น และค่าร้อยละการยืดมีค่าลดลง และช่วยปรับปรุงความสามารถในการรับแรงกระแทกให้ดีขึ้น ต่อมา Ramdhonee & Jeetah (2017) ได้ศึกษาการผลิตกระดาษห่อบรรจุภัณฑ์จากเส้นใยกล้วยผสมเส้นใยชานอ้อยและเส้นใย กล้วยผสมกระดาษเหลือทิ้ง (Wastepaper) โดยมีอัตราส่วนผสมระหว่างเส้นใยกล้วยกับเส้นใยชานอ้อยหรือ กระดาษเหลือทิ้งเท่ากับ 20:80 40:60 60:40 และ 80:20 พบว่า กระดาษเส้นใยกล้วยร้อยละ 100 และ กระดาษเส้นใยชานอ้อยร้อยละ 100 มีคุณสมบัติการดูดซับน้ำใกล้เคียงกัน และมีค่าการดูดซึมน้ำมากกว่า

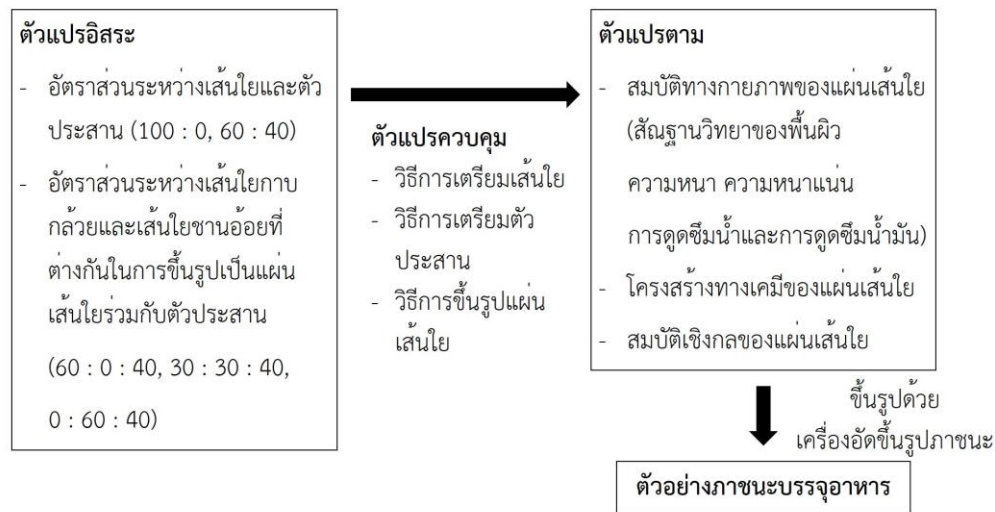
กระดาษเหลือทิ้ง 2.25 เท่า กระดาษเส้นใยกล้วยผสมกระดาษเหลือทิ้งที่อัตราส่วน 80:20 มีความทนแรงดึงมากที่สุด และมีความทนแรงดันทะลุมากที่สุด กระดาษเส้นใยกล้วยร้อยละ 100 มีความทนต่อแรงขีดถูมากที่สุด รองลงมา คือ กระดาษเส้นใยกล้วยผสมเส้นใยชานอ้อยที่อัตราส่วน 80:20 และอัตราส่วนผสมของการผลิตกระดาษห่อบรรจุภัณฑ์ที่เหมาะสม คือ เส้นใยกล้วยผสมกระดาษเหลือทิ้งที่อัตราส่วนผสมกระดาษเหลือทิ้งร้อยละ 20-40 และเส้นใยกล้วยผสมชานอ้อยที่อัตราส่วนผสมเส้นใยชานอ้อยร้อยละ 10-30 เนื่องจากสูญเสียน้ำหนักหลังขึ้นรูปน้อยที่สุด ต่อมา lewkittayakorn et al. (2020) ได้ศึกษาการผลิตจานย่อยสลายได้ทางชีวภาพจากเยื่อใบสับปะรดเคลือบด้วยสารเคลือบชีวภาพเพื่อเพิ่มคุณสมบัติการกันน้ำ จากนั้น Vanitha & Kavitha (2021) ได้ศึกษาการเตรียมฟิล์มบรรจุอาหารจากวัสดุคอมโพสิต PLA เสริมแรงจากเส้นใยหน่อปาล์มด้วยวิธีการหล่อขึ้นรูป ฟิล์มที่ได้มีสมบัติทนสารเคมีได้ดี มีคุณสมบัติเชิงกลและการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นเมื่อมีปริมาณเส้นใยเพิ่มขึ้น และสามารถใช้บรรจุอาหารได้ดี

จากเหตุผลดังกล่าว คณะผู้วิจัยจึงมีวัตถุประสงค์ในการเตรียมแผ่นเส้นใยจากกล้วย เส้นใยชานอ้อย และตัวประสาน เพื่อศึกษาลักษณะและสมบัติของแผ่นเส้นใยจากเส้นใย 2 ชนิดที่มีลักษณะทางกายภาพและสมบัติแตกต่างกัน ศึกษาการเสริมกันของลักษณะและสมบัติของแผ่นเส้นใยจากเส้นใยผสม และการเตรียมภาชนะบรรจุอาหารจากเส้นใยจากกล้วยและชานอ้อยด้วยกระบวนการอย่างง่ายและมีประสิทธิภาพ เพื่อเป็นแนวทางในการจัดการวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร และเป็นการเพิ่มมูลค่าวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่มีปริมาณมากและหาได้ง่ายเพื่อนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์ นอกจากนี้ยังเป็นการสนับสนุนนโยบายการลดการใช้ภาชนะบรรจุอาหารจากวัสดุที่ย่อยสลายยากและเป็นมลพิษต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 ขอบเขตการวิจัยและกรอบการวิจัย

การวิจัยนี้มีขอบเขตการวิจัยดังนี้ การเตรียมเส้นใย 2 ชนิด คือ เส้นใยจากกล้วยและเส้นใยชานอ้อย ด้วยวิธีการสกัดแยกเส้นใยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที และการเตรียมตัวประสาน คือ แป้งเปียก โดยใช้แป้งมันสำปะหลังละลายในน้ำที่อัตราส่วน 1:6 แล้วนำเส้นใยทั้ง 2 ชนิด และตัวประสานมาขึ้นรูปแผ่นเส้นใยผสมระหว่างเส้นใยจากกล้วยและเส้นใยชานอ้อยที่แตกต่างกันร่วมกับตัวประสาน โดยใช้อัตราส่วนระหว่างเส้นใยต่อตัวประสานเท่ากับ 60:40 จากนั้นวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ คือ สัณฐานวิทยาของพื้นผิว ความหนา ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำและการดูดซึมน้ำมัน โครงสร้างทางเคมี และสมบัติเชิงกลของแผ่นเส้นใยที่ผลิตได้ และนำแผ่นเส้นใยที่ได้มาอัดขึ้นรูปด้วยเครื่องอัดแรงดัน เพื่อศึกษาการประยุกต์ใช้ในการขึ้นรูปภาชนะ โดยมีกรอบการวิจัยดังรูปที่ 1



รูปที่ 1. กรอบวิจัยในการเตรียมแผ่นเส้นใยผสมระหว่างเส้นใยกากกล้วยและเส้นใยชานอ้อยที่แตกต่างกันร่วมกับตัวประสาน เพื่อประยุกต์ใช้ในการขึ้นรูปภาชนะ

2.2 วัสดุและสารเคมีที่ใช้ในการวิจัย

กากกล้วยที่ใช้ในงานวิจัยนี้เป็นบริเวณลำต้นส่วนนอกของกล้วยน้ำว้า จากตำบลโพธิ์ไก่ตัน อำเภอมืองลพบุรี จังหวัดลพบุรี ประเทศไทย ชานอ้อยที่ใช้เป็นส่วนของลำต้นอ้อยที่ผ่านการปอกเปลือกและคั้นเอาน้ำอ้อยหรือน้ำตาลออกแล้ว จากตำบลดอนโพธิ์ อำเภอมืองลพบุรี จังหวัดลพบุรี ประเทศไทย โซเดียมไฮดรอกไซด์ที่ใช้ในการสกัดเป็นเกรดคุณภาพเชิงวิเคราะห์ จากบริษัท Fisher Chemical และแป้งมันสำปะหลังที่ใช้เตรียมตัวประสานเป็นเกรดประกอบอาหาร ตราปลาไทย 5 ดาว จากบริษัท อี.ที.ซี. เอียบตงจัน จำกัด

2.3 การเตรียมเส้นใยกากกล้วยและเส้นใยชานอ้อย

นำกากกล้วยสดและชานอ้อยมาล้างทำความสะอาดแล้วหั่นให้มีความยาวประมาณ 5 เซนติเมตร จากนั้นอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำกากกล้วยและชานอ้อยที่เตรียมไว้มาสกัดแยกเส้นใยเซลลูโลสด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนักที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที (ดัดแปลงจากงานวิจัยของ Guimarães et al. (2009)) อัตราส่วนของกากกล้วยหรือชานอ้อยต่อปริมาณตัวทำละลายเท่ากับ 1:40 จากนั้นกรองแยกเส้นใยที่ได้แล้วนำเส้นใยไปล้างน้ำเปล่าจนผิวสัมผัสเส้นใยไม่ลื่น และวัดค่า pH ของน้ำล้างเส้นใยให้มีค่าเท่ากับน้ำก่อนล้าง (ค่า pH ประมาณ 7) นำเส้นใยที่ได้ไปตากแดดจนเส้นใยแห้งสนิท เก็บเส้นใยที่ได้ในถุงกันความชื้นเพื่อเตรียมสำหรับการนำไปขึ้นรูปแผ่นเส้นใยกากกล้วยและเส้นใยชานอ้อย

2.4 การขึ้นรูปแผ่นเส้นใยจากกล้วยและเส้นใยชานอ้อย

การเตรียมตัวประสานแป้งเปียกเพื่อใช้เป็นตัวประสานในการขึ้นรูปแผ่นเส้นใยให้คงตัวคงรูปร่างได้ โดยใช้แป้งมันสำปะหลังในการทำแป้งเปียก ผสมอัตราส่วนแป้งมันสำปะหลังต่อน้ำ 1:6 จากนั้น คนผสมให้เข้ากันจนเป็นเนื้อเดียวกัน นำมาให้ความร้อนและกวนให้เป็นเนื้อเดียวกันที่อุณหภูมิ 65 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 10 นาที จนได้แป้งเปียกที่มีลักษณะใส เหนียวหนืด (ดัดแปลงจากงานวิจัยของ Liwthaisong (2013))

อัตราส่วนผสมของเส้นใยจากกล้วย (BN) เส้นใยชานอ้อย (BG) และตัวประสาน (B) ในการขึ้นรูปแผ่นเส้นใยแสดงดังตารางที่ 1 เพื่อศึกษาผลของการใช้ปริมาณเส้นใยที่แตกต่างกัน ผลของการใช้เส้นใยผสมกัน และผลของการใช้ตัวประสาน ในการขึ้นรูปแผ่นเส้นใยจากกล้วยและเส้นใยชานอ้อย

การขึ้นรูปแผ่นเส้นใยจากกล้วยและเส้นใยชานอ้อย โดยการนำเส้นใยแห้งมาชั่งน้ำหนักตามอัตราส่วนที่กำหนด แล้วนำเส้นใยแห้งมากระจายตัวในน้ำให้เส้นใยอ่อนตัวเพื่อให้ง่ายต่อการขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 85-90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที นำเส้นใยเปียกมาผสมกับตัวประสาน ตามสูตรการผสมที่กำหนดดังตารางที่ 1 จากนั้นนำของผสมที่ได้ไปขึ้นรูปแผ่นใยด้วยกรอบไม้ซึ่งผ้าตาข่ายขนาด $20.5 \times 25.5 \times 5.0$ เซนติเมตร โดยการกระจายของผสมเส้นใยเปียกและตัวประสานลงบนกรอบไม้แล้วเกลี่ยให้เส้นใยกระจายตัวสม่ำเสมอทั่วทั้งกรอบไม้ นำไปตากแดดจนแห้งสนิท จากนั้นแกะแผ่นเส้นใยออกจากกรอบไม้ เก็บในถุงกันความชื้นเพื่อนำไปทดสอบสมบัติและเตรียมขึ้นรูปภาชนะ แผ่นเส้นใยที่เตรียมได้ ดังรูปที่ 2(ก) - 2(จ)

ตารางที่ 1. อัตราส่วนผสมของเส้นใยจากกล้วย (BN) เส้นใยชานอ้อย (BG) และตัวประสาน (B) ในการขึ้นรูปแผ่นเส้นใย

สัญลักษณ์อัตราส่วนผสม	เส้นใยจากกล้วย (BN) (ร้อยละของน้ำหนัก ทั้งหมด, wt%)	เส้นใยชานอ้อย (BG) (ร้อยละของน้ำหนัก ทั้งหมด, wt%)	ตัวประสาน (B) (ร้อยละของ น้ำหนักทั้งหมด, wt%)
แผ่นเส้นใยจากกล้วย(BN100)	100	-	-
แผ่นเส้นใยชานอ้อย (BG100)	-	100	-
แผ่นเส้นใยจากกล้วยร้อยละ 60 และตัวประสาน 40 (BN60)	60	-	40
แผ่นเส้นใยจากกล้วยร้อยละ 30 แผ่นเส้นใยชานอ้อยร้อยละ 30 และตัวประสาน 40 (BN30BG30)	30	30	40
แผ่นเส้นใยชานอ้อยร้อยละ 60 และตัวประสาน 40 (BG60)	-	60	40



(ก) BN60

(ข) BG60

(ค) BN30BG30

(ง) BN100

(จ) BG100

รูปที่ 2. แผ่นเส้นใยที่ขึ้นรูปได้

2.5 การวิเคราะห์และการทดสอบสมบัติ

1) การหาปริมาณร้อยละที่ได้ของเส้นใยและแผ่นเส้นใยด้วยวิธีการหาน้ำหนักแห้ง ปริมาณร้อยละที่ได้ (%yield) ของเส้นใยและแผ่นเส้นใยด้วยวิธีการหาน้ำหนักแห้ง คำนวณปริมาณ ร้อยละที่ได้จากสมการที่ (1)

$$\%yield = \frac{W_1}{W_0} \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ $\%yield$ = ร้อยละที่ได้
 W_0 = น้ำหนักแห้งก่อนการสกัดเส้นใยหรือการขึ้นรูปแผ่นเส้นใย (กรัม)
 W_1 = น้ำหนักแห้งหลังการสกัดเส้นใยหรือการขึ้นรูปแผ่นเส้นใย (กรัม)

2) การวิเคราะห์สัณฐานวิทยาของแผ่นเส้นใย

การวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของแผ่นเส้นใยด้วยกล้องจุลทรรศน์ใช้แสง (Optical Microscope: OM) ที่กำลังขยาย 40x และกล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงแบบสเตอริโอ (Stereo Microscope) ที่กำลังขยาย 55x

3) การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมี

การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของเส้นใยและแผ่นเส้นใยด้วยเครื่องฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรมิเตอร์ของ Perkin Elmer Spectrum One ใช้โหมด Attenuated Total Reflectance (ATR) ในช่วงเลขคลื่น 4,000-400 ต่อเซนติเมตร

4) การทดสอบการดูดซึมน้ำของแผ่นเส้นใย

การทดสอบการดูดซึมน้ำของแผ่นเส้นใยในงานวิจัยนี้ เป็นการทดสอบประสิทธิภาพของแผ่นเส้นใย ในการดูดซึมน้ำ ดัดแปลงการทดสอบจากมาตรฐาน ABNT NBR NM ISO 535: 1999 เพื่อใช้ในประเมินรูปแบบการใช้งานของภาชนะจากเส้นใยในการใช้บรรจุอาหารประเภทน้ำ โดยเตรียมชิ้นทดสอบแผ่นเส้นใย ขนาด 2x5 เซนติเมตร ชั่งน้ำหนักขึ้นทดสอบก่อนการทดสอบ จากนั้นนำขึ้นทดสอบแช่ในน้ำกลั่นปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 นาที แล้วนำขึ้นทดสอบมาชั่งน้ำหนักหลังทดสอบ ทำการทดสอบซ้ำ

3 ครั้ง คำนวณร้อยละการดูดซึมน้ำได้จากสมการที่ (2) หาค่าเฉลี่ยของความสามารถในการดูดซึมน้ำจะได้ความสามารถในการดูดซึมน้ำของแผ่นเส้นใย

$$W = \frac{(W_1 - W_0)}{W_0} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ W = ร้อยละการดูดซึมน้ำ
 W_0 = น้ำหนักชิ้นทดสอบก่อนแช่น้ำ (กรัม)
 W_1 = น้ำหนักชิ้นทดสอบหลังแช่น้ำ (กรัม)

5) การทดสอบการดูดซึมน้ำมันของแผ่นเส้นใย

การทดสอบการดูดซึมน้ำมันของแผ่นเส้นใยในงานวิจัยนี้ เป็นการทดสอบประสิทธิภาพของแผ่นเส้นใยในการดูดซึมน้ำมัน ดัดแปลงการทดสอบจากมาตรฐาน ABNT NBR NM ISO 535: 1999 เพื่อใช้ในประเมินรูปแบบการใช้งานของภาชนะจากเส้นใยในการใช้บรรจุอาหารประเภททอด โดยเตรียมชิ้นทดสอบแผ่นเส้นใยขนาด 2x5 เซนติเมตร ชั่งน้ำหนักชิ้นทดสอบก่อนการทดสอบ จากนั้นนำชิ้นทดสอบแช่ในน้ำมันปาล์มปริมาตร 50 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 นาที แล้วนำชิ้นทดสอบมาชั่งน้ำหนักหลังทดสอบ ทำการทดสอบซ้ำ 3 ครั้ง คำนวณความสามารถในการดูดซึมน้ำมันได้จากสมการที่ (3) หาค่าเฉลี่ยของความสามารถในการดูดซึมน้ำมันจะได้ความสามารถในการดูดซึมน้ำมันของแผ่นเส้นใย

$$W = \frac{(W_1 - W_0)}{W_0} \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ W = ร้อยละการดูดซึมน้ำมัน
 W_0 = น้ำหนักชิ้นทดสอบก่อนแช่น้ำมัน (กรัม)
 W_1 = น้ำหนักชิ้นทดสอบหลังแช่น้ำมัน (กรัม)

6) การทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นเส้นใย

การทดสอบสมบัติเชิงกลของแผ่นเส้นใยในงานวิจัยนี้ เป็นการทดสอบความทนแรงดึงและการยืดของแผ่นเส้นใยด้วยเครื่อง Universal Testing Machine (UTM) (H10 KM) ตามมาตรฐาน ASTM D 882 โดยเตรียมตัวอย่างทดสอบขนาดกว้าง 1.5 เซนติเมตร ยาว 10 เซนติเมตร วัดความหนาของตัวอย่างทดสอบ แล้วนำไปทดสอบความทนแรงดึง ทำการทดสอบซ้ำ 5 ครั้ง หาค่าเฉลี่ยของความทนแรงดึงจะได้ความทนแรงดึงของแผ่นเส้นใย

2.6 การขึ้นรูปตัวอย่างภาชนะบรรจุอาหาร

การขึ้นรูปตัวอย่างภาชนะบรรจุอาหารด้วยวิธีการขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบอัด (Compression molding) โดยการนำแผ่นเส้นใยมาฉีดยาเพื่อให้แผ่นเส้นใยอ่อนตัวลง ไม่ฉีกขาดขณะอัดขึ้นรูป นำแผ่นเส้นใยมาประกบด้วยใบตองทั้งด้านบนและล่าง เพื่อป้องกันการติดแม่พิมพ์ จากนั้นนำแผ่นเส้นใยที่เตรียมไว้มา

อัดขึ้นรูปโดยใช้แม่พิมพ์แบบอัดด้วยเครื่องอัดขึ้นรูปภาชนะ แม่พิมพ์ทรงถาดสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาดปากภาชนะ กว้าง 15.5 เซนติเมตร ยาว 21.5 เซนติเมตร สูง 2 เซนติเมตร และมีขนาดก้นภาชนะ กว้าง 11 เซนติเมตร ยาว 17 เซนติเมตร ที่แรงดัน 115 - 120 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที การอัดขึ้นรูปภาชนะและภาชนะจากแผ่นเส้นใย ดังรูปที่ 3(ก) และ 3(ข)



(ก) การขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหารด้วยเครื่องอัดขึ้นรูป



(ข) ภาชนะบรรจุอาหารจากแผ่นเส้นใยที่เตรียมได้

รูปที่ 3. การขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหารและภาชนะบรรจุอาหารจากแผ่นเส้นใยที่เตรียมได้

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

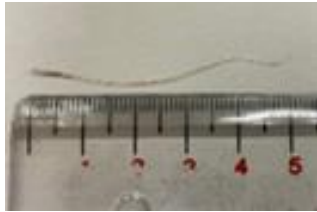
3.1 ปริมาณร้อยละที่ได้และสมบัติทางกายภาพของเส้นใยและแผ่นเส้นใย

เส้นใยจากกล้วยที่ได้จากการสกัดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที มีปริมาณร้อยละที่ได้ (%yield) 17.67 ± 1.44 มีความยาวประมาณ 5 เซนติเมตร และมีลักษณะเป็นเส้นเล็ก เหนียวนุ่ม และมีสีน้ำตาล สันฐานวิทยาของเส้นใยจากกล้วย กลุ่มเส้นใยมีการแตกออกเป็นเส้นใยขนาดเล็กและแยกออกจากกลุ่มเส้นใย เส้นใยที่ได้จึงมีขนาดเล็ก จากความยาวเส้นใยจากกล้วยที่ได้มีความยาวใกล้เคียงกับความยาวจากกล้วยก่อนเริ่มการสกัดแยกเส้นใย และลักษณะสันฐานวิทยาของเส้นใยที่มีการแตกออกจากกลุ่มเส้นใยเป็นเส้นใยขนาดเล็กสื่อถึงลักษณะของเส้นใยจากกล้วยเมื่อผ่านการสกัดด้วยตัวทำละลาย เส้นใยจะถูกแยกออกจากกลุ่มเส้นใยตามความยาวเส้นใยโดยไม่มีการทำลายเส้นใย ในขณะที่เส้นใยขนาดเล็กที่ได้จากการการสกัดมีปริมาณร้อยละที่ได้ 35.38 ± 3.10 มีความยาวประมาณ 4 เซนติเมตร และมีลักษณะเป็นเส้นหนา หยิบกระด้าง และมีสีเหลือง สันฐานวิทยาของเส้นใยขนาดเล็ก กลุ่มเส้นใยมีการแตกออกเป็นเส้นใยขนาดเล็กลง มีการแยกออกจากกลุ่มเส้นใยบางส่วน ยังมีการเกาะกลุ่มกันของเส้นใย เส้นใยที่ได้จึงมีขนาดใหญ่และหนา จากความยาวเส้นใยขนาดเล็กที่ได้มีความยาวน้อยกว่ากับความยาวขนาดเล็กก่อนเริ่มการสกัดแยกเส้นใย และลักษณะสันฐานวิทยาของเส้นใยที่มีการแตกออกจากกลุ่มเส้นใยบางส่วน และมีการเกาะกลุ่มกันของเส้นใยบางส่วน บ่งบอกถึงลักษณะของเส้นใยขนาดเล็กเมื่อผ่านการสกัดด้วยตัวทำละลาย เส้นใยจะถูกแยกออกจากกลุ่มเส้นใยตามความยาวเส้นใยได้เพียงบางส่วน และมีส่วนปลายของเส้นใยถูกทำลายด้วยกระบวนการสกัดประมาณร้อยละ 20 ซึ่งอาจเกิดจากลักษณะของเส้นใยที่มีความเหนียวและยืดหยุ่นต่ำ

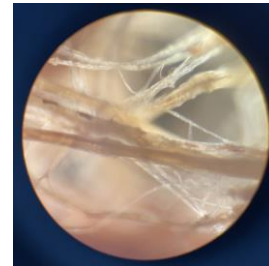
ทำให้เกิดการแตกหักในกระบวนการสกัด ลักษณะทางกายภาพของเส้นใยจากกล้วยและเส้นใยขานอ้อย
ดังรูปที่ 4(ก) – 4(ฉ)



(ก) เส้นใยจากกล้วย (BN) ที่เตรียมได้



(ข) ลักษณะเส้นใยจากกล้วย



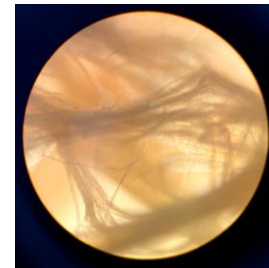
(ค) สัณฐานวิทยาเส้นใยจากกล้วย (40x)



(ง) เส้นใยขานอ้อย (BG) ที่เตรียมได้



(จ) ลักษณะเส้นใยขานอ้อย



(ฉ) สัณฐานวิทยาเส้นใยขานอ้อย (40x)

รูปที่ 4. ลักษณะทางกายภาพของเส้นใยที่เตรียมได้

ปริมาณร้อยละที่ได้และสมบัติทางกายภาพของแผ่นเส้นใยที่เตรียมได้ จากตารางที่ 2 พบว่า การเตรียมแผ่นเส้นใยจากเส้นใยที่แตกต่างกัน 2 ชนิด คือ เส้นใยจากกล้วยและเส้นใยขานอ้อยที่มีปริมาณเส้นใยแตกต่างกัน และมีปริมาณการใส่ตัวประสานที่แตกต่างกัน จะให้ปริมาณร้อยละที่ได้และสมบัติทางกายภาพของแผ่นเส้นใยที่แตกต่างกัน แผ่นเส้นใยจากกล้วย (BN100) และแผ่นเส้นใยขานอ้อย (BG100) ที่ไม่ได้ใส่ตัวประสานมีปริมาณร้อยละที่ได้มากที่สุด เนื่องจากเป็นน้ำหนักของเส้นใย (ร้อยละ 100) โดยไม่มีน้ำหนักของตัวประสาน ในขณะที่แผ่นเส้นใยที่มีการใส่ตัวประสานมีปริมาณร้อยละที่ได้ใกล้เคียงกับอัตราส่วนของเส้นใยในสูตรส่วนผสม (ร้อยละ 60) เนื่องจากเมื่อแผ่นเส้นใยแห้งน้ำหนักน้ำในตัวประสานระเหยไป (ประมาณร้อยละ 85) จึงเหลือเพียงน้ำหนักแห้งของตัวประสาน ความหนาของแผ่นเส้นใยที่เตรียมได้ ดังรูปที่ 5(ก) – 5(จ) และจากตารางที่ 2 พบว่า ความหนาของแผ่นเส้นใยที่ไม่ได้ใส่ตัวประสาน (BN100 และ BG100) มีความหนากว่าแผ่นเส้นใยที่ใส่ตัวประสาน เนื่องจากมีปริมาณเส้นใยมากกว่า และไม่มีตัวประสานช่วยยึดเกาะเส้นใยให้ยึดติดกันจึงมีช่องว่างระหว่างเส้นใยในแผ่นเส้นใยมากกว่า แผ่นเส้นใยขานอ้อย (BG100) มีความหนามากที่สุด เนื่องจากเส้นใยมีความหนาและหยาบกระด้าง ทำให้เส้นใยเรียงตัวชิดกันได้ยาก และมีช่องว่างระหว่างเส้นใยมาก ส่วนแผ่นเส้นใย BG60 มีความหนามากกว่าแผ่นเส้นใย BN60 เนื่องจากลักษณะทางกายภาพของเส้นใย ขานอ้อยที่มีความหยาบ ทำให้มีช่องว่างระหว่างเส้นใยมากกว่า และแผ่นเส้นใย BN30BG30 มีความหนาน้อยที่สุด เนื่องจากมีการผสมกันของเส้นใย 2 ชนิด ซึ่งมีลักษณะ

ทางกายภาพแตกต่างกัน คือ เส้นใยจากกล้วยมีลักษณะเส้นใยเล็ก เหนียวนุ่ม และเส้นใยชานอ้อยมีลักษณะเส้นใยหนา หยาดกระด้าง เมื่อผสมกันทำให้เกิดการจัดเรียงตัวของเส้นใยชิดกันได้มากขึ้น จึงมีช่องว่างระหว่างเส้นใยน้อยกว่าเส้นใยชนิดเดียว ความหนาแน่นของแผ่นเส้นใย BG100 น้อยที่สุด เนื่องจากแผ่นเส้นใย BG100 เป็นแผ่นเส้นใยจากเส้นใยชานอ้อยที่ความหนาและหยาดกระด้าง และไม่ได้ใส่ตัวประสานเพื่อช่วยยึดเส้นใย ทำให้มีความหนาและปริมาตรมากนำไปสู่ความหนาแน่นที่น้อย ส่วนแผ่นเส้นใยสูตรอื่น ๆ มีความหนาแน่นสอดคล้องกับความหนาเช่นกัน

ตารางที่ 2. ปริมาณร้อยละที่ได้ (%yield) และสมบัติทางกายภาพของแผ่นเส้นใย

แผ่นเส้นใย	ปริมาณร้อยละที่ได้ (%yield)	ความหนา (mm.)	ความหนาแน่น (g/cm ³)
BN100	96.93	6.36±0.64	0.22
BG100	97.63	8.75±0.34	0.16
BN60	62.95	3.44±0.16	0.26
BN30BG30	62.34	3.59±0.46	0.25
BG60	61.29	3.73±0.42	0.23



(ก) BN100

(ข) BG100

(ค) BN60

(ง) BN30BG30

(จ) BG60

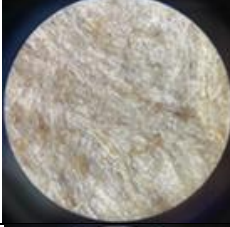
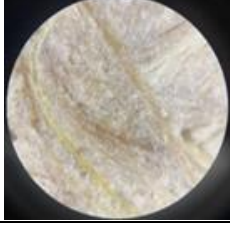
รูปที่ 5. เปรียบเทียบความหนาและลักษณะทางกายภาพของแผ่นเส้นใยที่เตรียมได้

3.2 ผลของชนิดเส้นใย ปริมาณเส้นใย และตัวประสานต่อลักษณะทางกายภาพและสัณฐานวิทยาของแผ่นเส้นใย

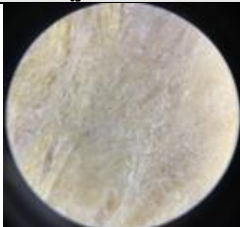
ลักษณะทางกายภาพและสัณฐานวิทยาของแผ่นเส้นใย จากตารางที่ 3 พบว่า ลักษณะทางกายภาพของแผ่นเส้นใยแตกต่างกันตามชนิดเส้นใย ปริมาณเส้นใย และปริมาณตัวประสาน แผ่นเส้นใยที่ไม่ใส่ตัวประสาน คือ แผ่นเส้นใย BN100 และ BG100 มีสีน้ำตาลเข้มจากสีของเส้นใยจากกล้วยและสีเหลืองจากสีของเส้นใยชานอ้อย ตามลำดับ มีพื้นผิวไม่เรียบ การจัดเรียงเส้นใยไม่สม่ำเสมอ มีขุยเส้นใย และมีความหนาแน่น เนื่องจากไม่มีตัวประสานช่วยยึดติดเส้นใย ในขณะที่แผ่นเส้นใยที่ใส่ตัวประสาน คือ แผ่นเส้นใย BN60 BG60 และ BN30BG30 มีสีน้ำตาล สีเหลือง และสีน้ำตาลอ่อน จากสีของเส้นใยจากกล้วย เส้นใย

ชานอ้อย และเส้นใยผสม ตามลำดับ มีพื้นผิวเรียบแต่การจัดเรียงเส้นใยไม่สม่ำเสมอ และไม่มีขุยเส้นใย เนื่องจากมีตัวประสานช่วยยึดติดเส้นใย ส่วนสัณฐานวิทยาพื้นผิวของแผ่นเส้นใยมีลักษณะแตกต่างกันตาม ปริมาณตัวประสานในแผ่นเส้นใย แผ่นเส้นใยที่ใส่ตัวประสาน คือ แผ่นเส้นใย BN60 BG60 และ BN30BG30 มีลักษณะผิวหน้าที่ค่อนข้างเรียบ พบช่องว่างระหว่างเส้นใยเพียงเล็กน้อย ในขณะที่แผ่นเส้นใยที่ไม่ใส่ตัว ประสาน คือ BN100 และ BG100 มีลักษณะผิวหน้าที่ไม่เรียบ พบช่องว่างระหว่างเส้นใยเป็นช่องว่างขนาดใหญ่

ตารางที่ 3. ลักษณะทางกายภาพและสัณฐานวิทยาของแผ่นเส้นใย

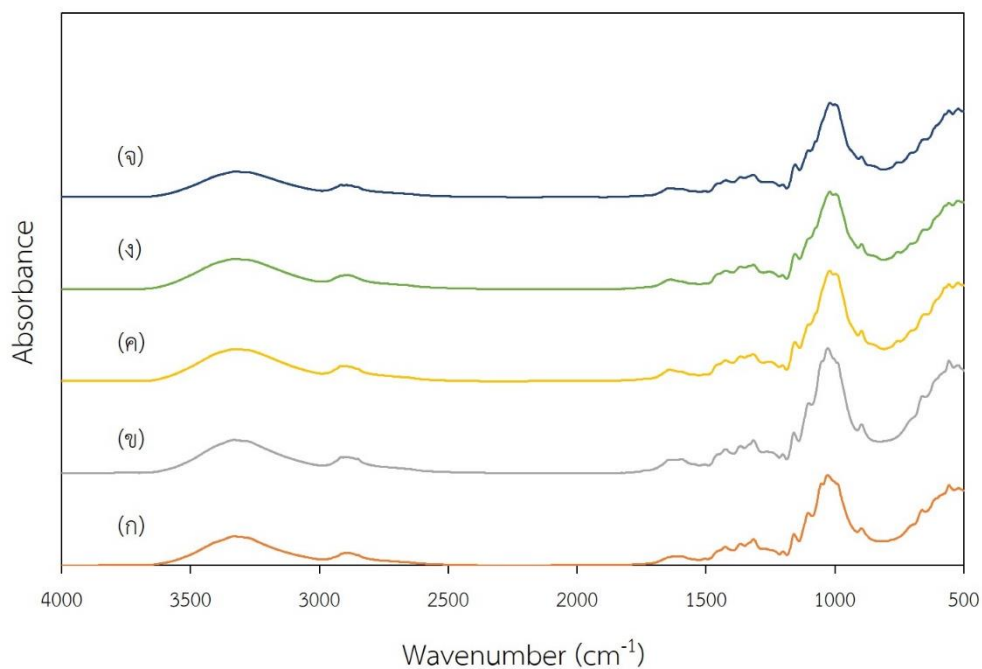
แผ่นเส้นใย	ทางกายภาพ			สัณฐานวิทยา(55x)	
BN100					
BG100					
BN60					
BN30BG30					

ตารางที่ 3. (ต่อ) ลักษณะทางกายภาพและสัณฐานวิทยาของแผ่นเส้นใย

แผ่นเส้นใย	ทางกายภาพ	สัณฐานวิทยา(55x)
BG60		

3.3 ผลของชนิดเส้นใย ปริมาณเส้นใย และตัวประสานต่อโครงสร้างทางเคมีของแผ่นเส้นใย

การวิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของแผ่นเส้นใยที่มีส่วนผสมแตกต่างกัน ดังรูปที่ 6 พบว่า แผ่นเส้นใยที่เตรียมจากสูตรส่วนผสมที่ต่างกันทุกสูตร มีความเข้มพีคของหมู่ฟังก์ชันที่บ่งชี้ลักษณะทางเคมีของเซลลูโลส คือ $-OH$ ($3400-3200\text{ cm}^{-1}$) $-CH_n$ ($2970-2860\text{ cm}^{-1}$) $C-H$ ($1431-1315\text{ cm}^{-1}$) $C-O-C$ (1160 cm^{-1}) และ $C-O$ (1060 cm^{-1}) ซึ่งสอดคล้องกับความเข้มพีคที่ชี้ให้เห็นหมู่ฟังก์ชันของเซลลูโลสในงานวิจัยของ Guimarães et al. (2009) และ Yang et al. (2007) สืบถึงการเตรียมแผ่นเส้นใยทุกสูตรไม่มีการสร้างพันธะเคมี และไม่มีการทำลายโครงสร้างทางเคมีของเซลลูโลส เนื่องจากสามารถระบุหมู่ฟังก์ชันที่บ่งชี้ลักษณะเฉพาะของเซลลูโลสได้ชัดเจน และไม่มีหมู่ฟังก์ชันปรากฏที่ตำแหน่งใหม่



รูปที่ 6. สเปกตรัมการดูดกลืนจากเทคนิค FTIR ของแผ่นเส้นใยที่เตรียมได้ ก) BN100 ข) BN60 ค) BG100 ง) BG60 และ จ) BN30BG30

3.4 ผลของชนิดเส้นใย ปริมาณเส้นใย และตัวประสานต่อการดูดซึมน้ำและการดูดซึมน้ำมันของแผ่นเส้นใย

การดูดซึมน้ำและการดูดซึมน้ำมันของแผ่นเส้นใย จากตารางที่ 4 พบว่า แผ่นเส้นใยทุกสูตรมีค่าการดูดซึมน้ำประมาณร้อยละ 335-568 (สามารถดูดซึมน้ำได้ 3.35-5.68 เท่า) สู่ถึงการดูดซึมน้ำมันของแผ่นเส้นใยที่สูงมาก แผ่นเส้นใยมีความชอบน้ำมาก (Hydrophilic) เนื่องจากตัวประสานจากแป้งมันสำปะหลังสามารถละลายน้ำได้ จึงทำให้ตัวประสานที่เคลือบและยึดเส้นใยหลุดออกมาขณะทดสอบการดูดซึมน้ำ ทำให้แผ่นเส้นใยที่ใส่ตัวประสานปรากฏลักษณะของเส้นใยเซลลูโลสได้ตามชนิดและปริมาณของเส้นใยที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่นเส้นใย โดยเซลลูโลสมีหมู่ไฮดรอกซิลในโครงสร้างเป็นจำนวนมากจึงสามารถดูดซึมน้ำได้ดี (Kongtud et al., 2016) แผ่นเส้นใยชานอ้อย BG100 มีค่าการดูดซึมน้ำมากกว่าแผ่นเส้นใยกาบกล้วย BN100 ประมาณร้อยละ 120 (ประมาณ 1.2 เท่า) บ่งบอกถึงเส้นใยชานอ้อยสามารถดูดซึมน้ำได้ดีกว่าเส้นใยกาบกล้วย สอดคล้องกับงานวิจัยของ Guimarães et al. (2009) ที่ได้ศึกษาสมบัติทางกายภาพของเส้นใยกาบกล้วยและเส้นใยชานอ้อยพบว่า เส้นใยชานอ้อยมีความชื้นในเส้นใยมากกว่าเส้นใยกาบกล้วย ชี้ให้เห็นถึงความสามารถในการดูดซึมน้ำของเส้นใยชานอ้อยมากกว่าเส้นใยกาบกล้วย แผ่นเส้นใยที่มีการใส่ตัวประสานมีค่าการดูดซึมน้ำน้อยกว่าแผ่นเส้นใยชนิดเดียวกันที่ไม่ใส่ตัวประสาน โดยแผ่นเส้นใย BN60 และ BG60 มีค่าการดูดซึมน้ำลดลงร้อยละ 8.39 และ 25.73 ตามลำดับ เมื่อเทียบกับแผ่นเส้นใยชนิดเดียวกันที่ไม่ใส่ตัวประสาน เนื่องจากตัวประสานจากแป้งมันสำปะหลังสามารถละลายน้ำได้ ทำให้แผ่นเส้นใยที่ใส่ตัวประสานปรากฏลักษณะของเส้นใยเซลลูโลสได้ตามชนิดและปริมาณของเส้นใยที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่นเส้นใย ปริมาณเส้นใยที่ใช้ในการขึ้นรูปน้อยกว่าแผ่นเส้นใยที่ไม่ใส่ตัวประสาน จึงมีค่าการดูดซึมน้ำลดลง เส้นใยชานอ้อยเมื่อใส่ตัวประสานมีการลดลงของค่าการดูดซึมน้ำมากกว่าเส้นใยกาบกล้วย เนื่องจากตัวประสานบางส่วนบริเวณผิวหน้าได้ละลายน้ำไป แต่ตัวประสานบางส่วนภายในแผ่นเส้นใยช่วยในการจัดเรียงตัวของเส้นใยให้มีช่องว่างระหว่างเส้นใยน้อยลง เมื่อเส้นใยมีช่องว่างระหว่างเส้นใยน้อยลงทำให้เซลลูโลสแสดงความชอบน้ำของหมู่ไฮดรอกซิลได้น้อยลง ในขณะที่เส้นใยกาบกล้วยเส้นใยมีขนาดเล็กและอ่อนนุ่ม สามารถจัดเรียงตัวชิดกันได้โดยไม่ต้องใช้ตัวประสานช่วย การใส่ตัวประสานจึงมีผลต่อการจัดเรียงตัวของเส้นใยน้อย แผ่นเส้นใยผสม BN30BG30 มีค่าการดูดซึมน้ำน้อยที่สุด คือ ร้อยละ 335 (ประมาณ 3.4 เท่า) เนื่องจากการใช้เส้นใย 2 ชนิดผสมกัน เส้นใยแต่ละชนิดใช้ปริมาณลดลง ร่วมกับการใส่ตัวประสาน ทำให้ภายในแผ่นเส้นใยเกิดการจัดเรียงตัวของเส้นใยชิดกันได้มากขึ้น จึงมีช่องว่างระหว่างเส้นใยน้อยกว่าเส้นใยชนิดเดียว สอดคล้องกับความหนาของแผ่นเส้นใยที่มีค่าน้อยที่สุด

ตารางที่ 4. การดูดซึมน้ำและการดูดซึมน้ำมันของแผ่นเส้นใย

แผ่นเส้นใย	การดูดซึมน้ำ (%)	การดูดซึมน้ำมัน (%)
BN100	448.05±4.08	290.16±8.58
BG100	568.23±7.65	368.24±9.89
BN60	410.45±8.27	219.52±8.50
BN30BG30	334.93±9.78	164.33±1.53
BG60	422.05±8.64	255.09±9.82

แผ่นเส้นใยทุกสูตรมีค่าการดูดซึมน้ำมันน้อยกว่าค่าการดูดซึมน้ำ โดยมีค่าการดูดซึมน้ำมันประมาณร้อยละ 164-368 (สามารถดูดซึมน้ำมันได้ 1.6-3.7 เท่า) ซึ่งจัดเป็นค่าการดูดซึมน้ำมันที่มีค่าสูง แผ่นเส้นใยทุกสูตรสามารถดูดซึมน้ำมันได้ เนื่องจากการสกัดเส้นใยเซลลูโลสด้วยตัวทำละลายทำให้พื้นผิวของเส้นใยมีรูพรุน และการจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบของเส้นใยทำให้มีช่องว่างระหว่างเส้นใย ทำให้น้ำมันสามารถถูกดูดซึมผ่านรูพรุนและช่องว่างระหว่างเส้นใยได้ด้วยปรากฏการณ์การซึมตามรูเล็ก (Capillary effect) (Chaliewsak, 2021; Wisetrat et al., 2012) แนวโน้มการดูดซึมน้ำมันเป็นไปในทิศทางเดียวกับการดูดซึมน้ำ โดยมีค่าการดูดซึมน้ำมันน้อยกว่าค่าการดูดซึมน้ำประมาณร้อยละ 35.20-50.94 เทียบกับค่าการดูดซึมน้ำของแผ่นเส้นใยสูตรเดียวกัน

3.5 ผลของชนิดเส้นใย ปริมาณเส้นใย และตัวประสานต่อสมบัติเชิงกลของแผ่นเส้นใย

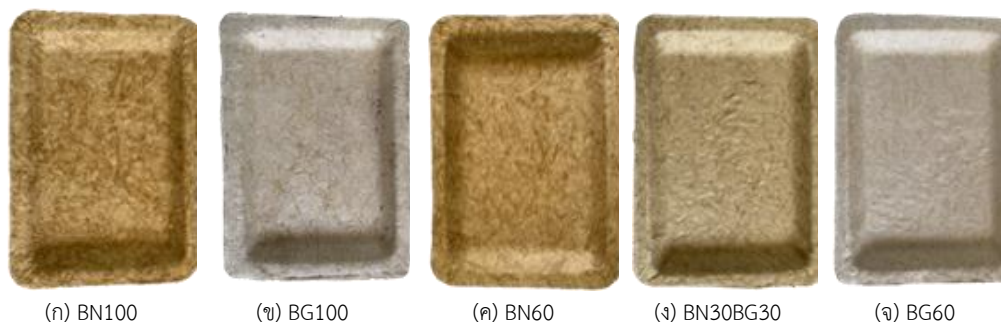
สมบัติเชิงกลด้านความทนแรงดึงของแผ่นเส้นใยที่เตรียมได้ จากตารางที่ 5 พบว่า แผ่นเส้นใยผสมระหว่างเส้นใยกากกล้วยและเส้นใยขานอ้อยร่วมกับตัวประสาน BN30BG30 มีความทนแรงดึงที่จุดขาด 10.11 ± 7.09 เมกะปาสคาล ร้อยละการยืดที่จุดขาด (Elongation at break) ร้อยละ 3.89 ± 3.28 และยังมีมอดูลัส 277.98 ± 62.52 เมกะปาสคาล เป็นแผ่นเส้นใยที่มีความแข็งแรงมากที่สุด มีความทนแรงดึงมากที่สุด และมีความแข็งแรงมากที่สุด เนื่องจากมีการใช้เส้นใย 2 ชนิดที่มีลักษณะแตกต่างกันทำให้มีการเสริมกันของเส้นใยแต่ละชนิดทำให้มีความแข็งแรงมากกว่าการใช้เส้นใยเพียงชนิดเดียว และมีการใช้ตัวประสานช่วยยึดเส้นใยเข้าด้วยกัน แผ่นเส้นใยจึงมีความแข็งแรงและแข็งแรงมาก ซึ่งแผ่นเส้นใย BN30BG30 มีความแข็งแรงใกล้เคียงกับพลาสติกชีวภาพที่ทำจากแป้ง (Starch bioplastic) สำหรับใช้ขึ้นรูปเป็นภาชนะบรรจุอาหาร มีความทนแรงดึงประมาณ 15-20 เมกะปาสคาล (Semple et al., 2022) แผ่นเส้นใยชนิดเดียวร่วมกับตัวประสาน BN60 และ BG60 มีความทนแรงดึงที่จุดขาด 5.57 ± 4.35 เมกะปาสคาล และ 4.93 ± 2.45 เมกะปาสคาล ตามลำดับ และยังมีมอดูลัส 115.38 ± 74.18 เมกะปาสคาล และ 225.78 ± 91.17 เมกะปาสคาล ซึ่งมีความแข็งแรงใกล้เคียงกับเยื่อกระดาษ (Paper-pulp) สำหรับใช้ขึ้นรูปเป็นภาชนะบรรจุอาหาร มีความทนแรงดึง 4.42 เมกะปาสคาล (Gurav et al., 2003) ส่วนแผ่นเส้นใยชนิดเดียวที่ไม่ได้ใส่ตัวประสาน BN100 และ BG100 มีความแข็งแรงใกล้เคียงกัน แต่ต่ำกว่าแผ่นเส้นใยที่ใส่ตัวประสาน และมีความแข็งแรงต่ำกว่าวัสดุที่ใช้ขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหารจากเยื่อกระดาษและพลาสติกชีวภาพที่ทำจากแป้ง แผ่นเส้นใยกากกล้วย BN100 มีร้อยละการยืดสูงกว่าแผ่นเส้นใยขานอ้อย และมีค่ามอดูลัสต่ำกว่าชี้ให้เห็นถึงความยืดหยุ่นที่มากกว่าของแผ่นเส้นใยกากกล้วยซึ่งเป็นผลจากลักษณะทางกายภาพของเส้นใยกากกล้วยที่มีความยืดหยุ่นและแข็งแรงมากกว่าเส้นใยขานอ้อย สอดคล้องกับงานของ Guimarães et al. (2009) ที่ได้ศึกษาความแข็งแรงของเส้นใยกากกล้วยและเส้นใยขานอ้อยพบว่า เส้นใยกากกล้วยมีความทนต่อแรงดึง 700-800 เมกะปาสคาล และร้อยละการยืด 2.5-3.7 ซึ่งมีค่ามากกว่าเส้นใยขานอ้อยที่มีความทนต่อแรงดึง 222 เมกะปาสคาล และร้อยละการยืด 1.1

ตารางที่ 5. ความทนแรงดึงของแผ่นเส้นใย

แผ่นเส้นใย	ความทนแรงดึงที่จุดขาด (เมกะปาสคาล)	ร้อยละการยืดที่จุดขาด (ร้อยละ)	ยังมอดูลัส (เมกะปาสคาล)
BN100	2.23±1.69	5.18±2.01	39.19±22.66
BG100	2.79±1.68	3.24±1.25	85.06±33.85
BN60	5.57±4.35	4.48±0.78	115.38±74.18
BN30BG30	10.11±7.09	3.89±3.28	277.98±62.52
BG60	4.93±2.45	2.24±0.90	225.78±91.17

3.6 ผลของชนิดเส้นใย ปริมาณเส้นใย และตัวประสานต่อลักษณะทางกายภาพของภาชนะบรรจุอาหารจากแผ่นเส้นใย

ลักษณะทางกายภาพของภาชนะบรรจุอาหารจากแผ่นเส้นใย ดังรูปที่ 7(ก) – 7(จ) พบว่า แผ่นเส้นใยทุกสูตรสามารถใช้เป็นวัสดุในการขึ้นรูปภาชนะได้ แต่ภาชนะที่ได้มีลักษณะคงรูปและมีความแข็งแรงแตกต่างกันตามชนิดของแผ่นเส้นใย โดยภาชนะจากแผ่นเส้นใยที่ไม่ใส่ตัวประสาน คือ BN100 และ BG100 มีลักษณะคงรูป แข็งแรงปานกลาง มีสีตามสีของแผ่นเส้นใย มีความหนามาก ผิวสัมผัสไม่เรียบ มีขุยเส้นใยหลุดออกมา เนื่องจากไม่มีการใช้ตัวประสานเป็นตัวยึดเส้นใยให้ยึดติดกัน และมีการใช้ปริมาณเส้นใยมากในการเตรียมแผ่นเส้นใยจึงมีความคงรูปบิดงอได้ยากและมีความหนามาก ส่วนภาชนะจากแผ่นเส้นใยที่ใส่ตัวประสาน คือ BN60 BN30BG30 และ BG60 มีลักษณะคงรูป แข็งแรง มีสีตามสีของแผ่นเส้นใย ผิวสัมผัสเรียบ ไม่มีขุยเส้นใย เนื่องจากมีการใช้ตัวประสานเป็นตัวยึดเส้นใย และมีการใช้ปริมาณเส้นใยน้อยลงจึงมีความแข็งแรงและมีความหนาน้อยลง ภาชนะ BN60 จากเส้นใยกากกล้วยมีผิวสัมผัสเรียบเนียน แต่ภาชนะ BG60 จากเส้นใยขานอ้อยมีผิวสัมผัสค่อนข้างเรียบแต่เป็นลูกคลื่นบางจุด เนื่องจากเส้นใยขานอ้อยมีความหนา หยาบ และมีความยืดหยุ่นต่ำ ทำให้มีการจัดเรียงตัวของเส้นใยสม่ำเสมอต่ำกว่า และมีความสามารถในการยึดตัวไปตามแม่พิมพ์ภาชนะได้ต่ำกว่าเส้นใยกากกล้วยซึ่งมีเส้นเล็ก อ่อนนุ่ม และมีความยืดหยุ่นมากกว่า เมื่อนำมาอัดขึ้นรูปภาชนะ BG60 จึงมีความสม่ำเสมอของพื้นผิวต่ำกว่า และภาชนะ BN30BG30 จากเส้นใยผสมมีผิวสัมผัสค่อนข้างเรียบ แต่มีลักษณะเป็นลูกคลื่นบางจุด เนื่องจากมีการใช้เส้นใย 2 ชนิดที่มีลักษณะแตกต่างกันมาใช้ในการขึ้นรูป เส้นใยทั้ง 2 ชนิดยังมีการผสมกันไม่สม่ำเสมอ จึงมีจัดเรียงตัวได้ไม่ดี จึงปรากฏลักษณะของความไม่สม่ำเสมอของเส้นใยในบางส่วนของภาชนะ



รูปที่ 7. ลักษณะทางกายภาพของภาชนะบรรจุอาหารจากแผ่นเส้นใยที่เตรียมได้

จากการทดสอบความแข็งแรงของแผ่นเส้นใยพบว่า แผ่นเส้นใยผสมร่วมกับตัวประสาน BN30BG30 มีความแข็งแรงมากที่สุด และมีความแข็งแรงใกล้เคียงกับพลาสติกชีวภาพที่ทำจากแป้งสำหรับใช้ขึ้นรูปเป็นภาชนะบรรจุอาหาร และมีความแข็งแรงมากกว่าเยื่อกระดาษสำหรับใช้ขึ้นรูปเป็นภาชนะบรรจุอาหาร การทดสอบการดูดซึมน้ำและการดูดซึมน้ำมันของแผ่นเส้นใยก่อนการขึ้นรูปภาชนะพบว่า แผ่นเส้นใยทุกสูตรสามารถดูดซึมน้ำได้ดีมากและสามารถดูดซึมน้ำมันได้ดี โดยภาชนะจากเส้นใยผสมร่วมกับตัวประสาน BN30BG30 มีค่าการดูดซึมน้ำและค่าการดูดซึมน้ำมันน้อยที่สุด (การดูดซึมน้ำร้อยละ 334.93 ± 9.78 การดูดซึมน้ำมันร้อยละ 164.33 ± 1.53) แต่ยังเป็นค่าการดูดซึมน้ำและน้ำมันที่ไม่เหมาะสมในการใช้เป็นภาชนะบรรจุอาหารประเภทน้ำและอาหารทอด เนื่องจากสามารถดูดซึมน้ำและน้ำมันจากอาหารเข้าไปยังภาชนะได้ ทำให้ภาชนะเสียรูป เกิดการบวมตัวจากการดูดซึมน้ำและน้ำมันทำให้ความแข็งแรงของภาชนะลดลงจากการที่น้ำและน้ำมันถูกเส้นใยดูดซึมไว้ นอกจากนี้สามารถทำให้เกิดการปนเปื้อนของเส้นใยจากภาชนะสู่ผู้บริโภคได้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ Wongpoo & Jewpanya (2021) ได้ศึกษาการขึ้นรูปภาชนะจากใบบัวพบว่า ภาชนะจากใบบัวสามารถดูดซึมน้ำได้ร้อยละ 69.27 จึงไม่เหมาะสำหรับใช้เป็นภาชนะบรรจุอาหารที่มีน้ำ เหมาะสำหรับบรรจุอาหารแห้งทดแทนการใช้ภาชนะจากโฟม และเมื่อพิจารณาลักษณะทางกายภาพของภาชนะจากแผ่นเส้นใยแต่ละสูตรพบว่า ภาชนะจากเส้นใยผสมร่วมกับตัวประสาน BN30BG30 แสดงลักษณะทางกายภาพของแผ่นเส้นใยในด้านต่าง ๆ ที่เหมาะสมในการนำไปขึ้นรูปเป็นภาชนะ เช่น แผ่นเส้นใยมีผิวหน้าที่ค่อนข้างเรียบ มีช่องว่างระหว่างเส้นใยเพียงเล็กน้อย การจัดเรียงเส้นใยค่อนข้างสม่ำเสมอ สีของแผ่นเส้นใยเป็นสีน้ำตาลอ่อน

4. สรุปผลการวิจัย

ภาวะที่ใช้ในการสกัดเส้นใยจากกล้วยและเส้นใยชานอ้อยในงานวิจัยนี้ คือ การสกัดด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้นร้อยละ 5 โดยน้ำหนัก ที่อุณหภูมิ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที ได้เส้นใยจากกล้วยปริมาณร้อยละที่ได้ 17.67 ± 1.44 มีลักษณะเป็นเส้นเล็ก เหนียวนุ่ม สีน้ำตาล และได้เส้นใยชานอ้อยปริมาณร้อยละที่ได้ 35.38 ± 3.10 มีลักษณะเป็นเส้นหนา หยาดกระด้าง สีเหลือง เมื่อนำเส้นใยทั้ง 2 ชนิดมาเตรียมแผ่นเส้นใยร่วมกับตัวประสานในอัตราส่วนผสมที่แตกต่างกัน แผ่นเส้นใยที่ได้มีลักษณะทางกายภาพแตกต่างกันตามชนิดเส้นใย ปริมาณเส้นใย และปริมาณตัวประสานที่ใช้ แผ่นเส้นใยที่ใส่ตัวประสาน คือ แผ่นเส้นใย BN60 BG60 และ BN30BG30 มีพื้นผิวเรียบแต่การจัดเรียงเส้นใยไม่สม่ำเสมอ และไม่มีขุยเส้นใย เนื่องจากมีตัวประสานช่วยยึดติดเส้นใย และมีสีต่างกันตามชนิดและปริมาณเส้นใย

แผ่นเส้นใยทุกสูตรมีค่าการดูดซึมน้ำที่สูงมาก (3.4-5.7 เท่า) เนื่องจากตัวประสานจากแป้งมันสำปะหลังสามารถละลายน้ำได้ ทำให้แผ่นเส้นใยที่ใส่ตัวประสานถ่ายทอดลักษณะของเส้นใยเซลลูโลสได้ตามชนิดและปริมาณของเส้นใยที่ใช้ในการขึ้นรูปแผ่นเส้นใย และแผ่นเส้นใยทุกสูตรมีค่าการดูดซึมน้ำมันน้อยกว่าค่าการดูดซึมน้ำ แต่ยังจัดเป็นค่าการดูดซึมน้ำมันที่มีค่าสูง (1.6-3.7 เท่า) เนื่องจากการสกัดเส้นใยเซลลูโลสด้วยตัวทำละลายทำให้พื้นผิวของเส้นใยมีรูพรุน และการจัดเรียงตัวอย่างไม่เป็นระเบียบของเส้นใยทำให้มีช่องว่างระหว่างเส้นใย ทำให้น้ำมันสามารถถูกดูดซึมผ่านรูพรุนและช่องว่างระหว่างเส้นใยได้ โดยแผ่นเส้นใยผสม BN30BG30 มีค่าการดูดซึมน้ำและค่าการดูดซึมน้ำมันน้อยที่สุด แผ่นเส้นใยผสม

BN30BG30 มีความแข็งแรงมากที่สุด และมีความแข็งแรงใกล้เคียงกับพลาสติกชีวภาพที่ทำจากแป้งสำหรับใช้ขึ้นรูปเป็นภาชนะบรรจุอาหาร และมีความแข็งแรงมากกว่าเยื่อกระดาษสำหรับใช้ขึ้นรูปเป็นภาชนะบรรจุอาหาร ส่วนแผ่นเส้นใย BN60 และ BG60 มีความแข็งแรงใกล้เคียงกับเยื่อกระดาษสำหรับใช้ขึ้นรูปเป็นภาชนะบรรจุอาหาร

แผ่นเส้นใยที่ได้ตัวประสานสามารถขึ้นรูปเป็นภาชนะบรรจุอาหารได้ และจากการประเมินสมบัติการดูดน้ำและการดูดน้ำมัน ร่วมกับลักษณะทางกายภาพของแผ่นเส้นใยพบว่า แผ่นเส้นใยสูตรที่เหมาะสมในการนำไปขึ้นรูปภาชนะ เพื่อนำไปศึกษาและพัฒนาต่อยอดเป็นภาชนะใส่อาหารแห้งในอนาคต คือแผ่นเส้นใย BN30BG30 ที่มีอัตราส่วนของเส้นใยกากกล้วย : เส้นใยชานอ้อย : ตัวประสาน เท่ากับ 30:30:40 เนื่องจากมีค่าการดูดซึมน้ำและค่าการดูดซึมน้ำมันน้อยที่สุด มีความแข็งแรงใกล้เคียงกับวัสดุที่ใช้ขึ้นรูปภาชนะบรรจุอาหาร และมีลักษณะทางกายภาพเหมาะสมสำหรับใช้ขึ้นรูปเป็นภาชนะ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณเงินรายได้มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ (เงินรายได้คณะวิทยาศาสตร์ ประจำปีงบประมาณ 2564) ตามเลขที่สัญญา 110/2564

เอกสารอ้างอิง (References)

- Bartos, A., Nagy, K., Anggono, J., Antoni, A., Purwaningsih, H., Móczó, J., & Pukánszky, B. (2021). Biobased PLA/sugarcane bagasse fiber composites: Effect of fiber characteristics and interfacial adhesion on properties. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 143, Article 106273. <https://doi.org/10.1016/j.compositesa.2021.106273>
- Centre for Agricultural Information, Office of Agricultural Economics & Ministry of Agriculture and Cooperatives. (2022). *Thailand foreign agricultural trade statistics 2021*. Ministry of Agriculture and Cooperatives. (in Thai)
- Centre for Information and Communication Technology & Department of Agricultural Extension. (2017, April 28). *Namwa banana in 2016*. <http://www.agriinfo.doae.go.th/year60/plant/rortor/fruit1/banana3.pdf>
- Chaliewsak, J. (2021). Fried oil absorption property of nonwoven from rice straw cellulose fiber. *RMUTP Research Journal Science and Technology*, 15(1), 77-90. (in Thai)
- Guimarães, J. L., Frollini, E., da Silva, C. G., Wypych, F., & Satyanarayana, K. G. (2009). Characterization of banana, sugarcane bagasse and sponge gourd fibers of Brazil. *Industrial Crops and Products*, 30, 407-415. <https://doi.org/10.1016/j.indcrop.2009.07.013>

- Gurav, S. P., Bereznitski, A., Heidweiller, A., & Kandachar, P. V. (2003). Mechanical properties of paper-pulp packaging. *Composites Science and Technology*, 63(9), 1325-1334. [https://doi.org/10.1016/S0266-3538\(03\)00104-0](https://doi.org/10.1016/S0266-3538(03)00104-0)
- Iewkittayakorn, J., Khunthongkaew, P., Wongnoipla, Y., Kaewtatip, K., Suybangdum, P., & Sopajarn, A. (2020). Biodegradable plates made of pineapple leaf pulp with biocoatings to improve water resistance. *Journal of Materials Research and Technology*, 9(3), 5056-5066. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2020.03.023>
- Kenned, J. J., Sankaranarayanamy, K., Binoj, J. S., & Chelliah, S. K. (2020). Thermo-mechanical and morphological characterization of needle punched non-woven banana fiber reinforced polymer composites. *Composites Science and Technology*, 185, Article 107890. <https://doi.org/10.1016/j.compscitech.2019.107890>
- Kongtud, W., Witayakran, S., Smitthipong, W., Ngamrojrm, C., Boonyarit, J., & Chollakup, R. (2016). The potential of cellulose fibers usage as reinforcement for composite materials. *Proceedings of the 54th Kasetsart University Annual Conference* (pp. 773-780). Kasetsart University. (in Thai)
- Li, Z., Zhang, X., Fa, C., Zhang, Y., Xiong, J., & Chen, H. (2020). Investigation on characteristics and properties of bagasse fibers: performances of asphalt mixtures with bagasse fibers. *Construction and Building Materials*, 248, Article 118648. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118648>
- Liwthaisong, M. (2013). *Production of biodegradable food packaging from banana sheath* [Master's thesis, Suranaree University of Technology]. Suranaree University of Technology Repository. <https://clrem-opac.sut.ac.th/opac2/BibDetail.aspx?bibno=154529> (in Thai)
- Office of Agricultural Economics. (2022). *Agricultural statistics of Thailand 2021*. Ministry of Agriculture and Cooperatives. (in Thai)
- Ramdhonee, A., & Jeetah, P. (2017). Production of wrapping paper from banana fibres. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 5(5), 4298-4306. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2017.08.011>
- Ramlee, N. A., Jawaid, M., Zainudin, E. S., & Yamani, S. A. K. (2019). Tensile, physical and morphological properties of oil palm empty fruit bunch/sugarcane bagasse fibre reinforced phenolic hybrid composites. *Journal of Materials Research and Technology*, 8(4), 3466-3474. <https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2019.06.016>
- Semple, K. E., Zhou, C., Rojas, O. J., Nkeuwa, W. N., & Dai, C. (2022). Moulded pulp fibers for disposable food packaging: A state-of-the-art review. *Food Packaging and Shelf Life*, 33, Article 100908. <https://doi.org/10.1016/j.fpsl.2022.100908>

- Subagyo, A., & Chafidz, A. (2018). Banana pseudo-stem fiber: Preparation, characteristics, and applications. In A. I. O. Jideani & T. A. Anyasi (Eds.), *Banana nutrition – Function and processing kinetics*. IntechOpen. <http://dx.doi.org/10.5772/intechopen.82204>
- Vanitha, R., & Kavitha, C. (2021). Development of natural cellulose fiber and its food packaging application. *Materials Today: Proceedings*, 36(4), 903-906. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2020.07.029>
- Wisansakkul, S., & Oupathumpanont, O. (2021). Study of the suitable micro wax for coating banana rope for craft products. *RMUTSV Research Journal*, 13(3), 647-658. (in Thai)
- Wisetrat, O., Ngamsombat, R., Saueprasearsit, P., & Prasara-A, J. (2012). Adsorption of suspended oil using bagasse and modified bagasse. *Journal of Science and Technology Mahasarakham University*, 31(4), 354-362. (in Thai)
- Wongpoo, K., & Jewpanya, P. (2021). The design and development of lotus leaves forming machine. *RMUTL Engineering Journal*, 6(1), 19-27. (in Thai)
- Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D. H., & Zheng, C. (2007). Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*, 86(12-13), 1781-1788. <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2006.12.013>

การเปรียบเทียบประสิทธิภาพแบบจำลองการจำแนกคำบาลีและสันสกฤต ในภาษาไทยด้วยเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง Efficiency Comparison of Classification Models for Pali and Sanskrit in Thai Languages Using Machine Learning Techniques

ณัฐรณันท์ กานต์วีกุลธนา รุ่งทิพย์ โคบาล วาสนา ดั่งเหมือน และ สุภษี ดวงใส*

Natratanon Kanraweekultana Rungthip Cobal Wassana Duangmeun and Supasee Duangsai*

สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศและธุรกิจดิจิทัล คณะบริหารธุรกิจ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ

กรุงเทพฯ ประเทศไทย

Department of Information Technology and Digital Business Program, Faculty of Business Administration,

Rajamangala University of Technology Krungthep, Bangkok, Thailand

วันที่ส่งบทความ : 12 พฤศจิกายน 2567 วันที่แก้ไขบทความ : 12 มิถุนายน 2568 วันที่ตอบรับบทความ : 14 มิถุนายน 2568

Received: 12 November 2024, Revised: 12 June 2025, Accepted: 14 June 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อทดสอบและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองการจำแนกคำบาลีและสันสกฤตในภาษาไทยโดยใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง เน้นการพัฒนาความแม่นยำในการแยกแยะคำศัพท์ที่มาจากสองภาษานี้ ซึ่งมีความใกล้เคียงกันในด้านการออกเสียงและการเขียน ในการวิจัยใช้แบบจำลอง 5 ชนิด ได้แก่ แบบจำลองป่าไม้สุ่ม แบบจำลองต้นไม้ตัดสินใจ แบบจำลองการคำนวณเพื่อนบ้านใกล้สุด แบบจำลองนาอ็ฟเบย์ และแบบจำลองซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน ผ่านกระบวนการตรวจสอบ 10-fold cross-validation เพื่อวัดประสิทธิภาพของแต่ละแบบจำลอง ผลการวิจัยพบว่า แบบจำลองซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน มีความสามารถสูงสุดในการจำแนกคำบาลีและสันสกฤตในภาษาไทย โดยมีค่าความแม่นยำสูงถึงร้อยละ 95.75 และค่าความถูกต้องร้อยละ 90.90 รองลงมา คือ แบบจำลองการคำนวณเพื่อนบ้านใกล้สุดมีค่าความแม่นยำร้อยละ 92.86 และแบบจำลองนาอ็ฟเบย์ที่มีค่าความแม่นยำร้อยละ 81.29 ขณะที่แบบจำลองแบบจำลองป่าไม้สุ่มมีประสิทธิภาพต่ำที่สุด โดยมีค่าความแม่นยำเพียงร้อยละ 55.27 ข้อค้นพบเหล่านี้แสดงให้เห็นถึงความเหมาะสมของการใช้แบบจำลองซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน ในการแยกแยะภาษาบาลีและสันสกฤตได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถนำผลลัพธ์ไปประยุกต์ใช้ในงานด้านการจำแนกภาษา การแปลภาษา รวมถึงการพัฒนาเครื่องมือด้านการเรียนการสอนภาษาในอนาคต

คำสำคัญ : ประสิทธิภาพแบบจำลอง การจำแนกภาษา บาลี สันสกฤต การเรียนรู้ของเครื่อง

*ที่อยู่ติดต่อ E-mail address: supasee.d@mail.rmutk.ac.th

<https://doi.org/10.55003/scikmitl.2025.265286>

Abstract

This research aims to test and compare the performance of classification models for Pali and Sanskrit in Thai language using Machine learning techniques. The study focuses on improving the accuracy in distinguishing between words from these two languages, which often exhibit similarities in pronunciation and spelling. Five models were tested: Random Forest, Decision Tree, K-Nearest Neighbors (K-NN), Naive Bayes, and Support Vector Machine (SVM). The evaluation process employed 10-fold cross-validation to assess model performance. The results indicate that the SVM model is the most efficient, with an accuracy of 95.75% and a precision of 90.90%. K-NN follows closely with an accuracy of 92.86%, while Naive Bayes achieves 81.29%. The Random Forest model, however, shows the lowest performance with an accuracy of only 55.27%. These findings highlight the SVM model's effectiveness in accurately classifying Pali and Sanskrit words in Thai language. The results can be applied to further developments in language classification, translation, and educational technology tools for language learning.

Keywords: Model efficiency, Languages classification, Pali, Sanskrit, Machine learning

1. บทนำ

ภาษาบาลีและสันสกฤตเป็นรากฐานสำคัญของคำศัพท์ในภาษาไทย โดยเฉพาะคำที่เกี่ยวข้องกับศาสนา วัฒนธรรม และการศึกษา การที่มีคำยืมจากทั้งสองภาษาในจำนวนมาก ทำให้เกิดความซับซ้อนในการแยกแยะว่าแต่ละคำมาจากภาษาใด แม้จะมีการสอนภาษาบาลีและสันสกฤตในระบบการศึกษาไทย แต่เนื้อหาที่สอนอาจไม่ครอบคลุมหรือไม่ละเอียดเพียงพอ ทำให้นักเรียนหรือบุคคลทั่วไปขาดความสามารถในการจำแนกคำที่มาจากสองภาษานี้อย่างถูกต้อง อีกทั้งภาษาไทยมีการพัฒนาและปรับเปลี่ยนอย่างต่อเนื่อง ทำให้บางคำจากภาษาบาลีและสันสกฤตอาจถูกนำมาใช้ในบริบทใหม่ ๆ ซึ่งอาจไม่ตรงกับความหมายดั้งเดิม นำไปสู่ความสับสนและการใช้คำที่ไม่ถูกต้อง โดยหลายคำจากภาษาบาลีและสันสกฤตมีเสียงและการเขียนที่คล้ายกัน ผู้ใช้ภาษาอาจสับสนในการแยกแยะ ซึ่งเกิดจากบางคำอาจถูกแปลงเสียงหรือเขียนผิดเพี้ยนไปจากรากศัพท์เดิม ค้นหาในพจนานุกรมไม่เจอซึ่งพจนานุกรมส่วนใหญ่แยกบาลีและสันสกฤตออกจากกันไม่ชัดเจน ทำให้เกิดความสับสนในการอ้างอิง ถึงแม้จะมีการนำกฎไวยากรณ์แบบ Rule-based อาจไม่แม่นยำ เนื่องจากคำบาลีและสันสกฤตมีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงที่ซับซ้อน (Tammanam et al., 2021) เช่น การเปลี่ยนรูปเมื่ออยู่ในบริบทต่าง ๆ ตามบริบทของภาษาไทยที่มักนำคำบาลีและสันสกฤตมาใช้โดยมีการดัดแปลง เช่น การเติมสระหรือพยัญชนะบางตัวเพื่อให้สอดคล้องกับระบบเสียงของไทย ทำให้ไม่มีชุดกฎที่แน่นอนตายตัว เพราะมีข้อยกเว้นและการใช้ที่หลากหลาย ทำให้เกิดข้อจำกัดในการใช้ Rule-based approach (Zhong et al., 2024) นอกจากนี้ ปัญหาการจำแนกคำบาลีและสันสกฤตในภาษาไทยเป็นเรื่องที่ซับซ้อน เนื่องจากสองภาษานี้มีความใกล้เคียงกันมาก และมักจะใช้ปะปนกันในภาษาไทย โดยเฉพาะใน

ศัพท์ที่เกี่ยวข้องกับศาสนา วรรณกรรม และวิชาการ ปัญหาหลักคือภาษาบาลีและสันสกฤตเป็นภาษากลุ่มอินโด-อารยัน ซึ่งมีคำที่มีรากศัพท์เดียวกันหรือคล้ายกันมาก ทำให้แยกแยะได้ยาก เช่น คำว่า ธรรม (ธรรมะ) มีทั้งในบาลี (Dhamma) และสันสกฤต (Dharma) อีกทั้งคำหลายคำในภาษาไทยเป็นคำผสมระหว่างบาลีและสันสกฤต เช่น วิทยาศาสตร์ (วิทยา = สันสกฤต และ ศาสตร์ = บาลี) ทำให้ไม่สามารถระบุได้ว่าเป็นของภาษาใดเพียงภาษาเดียว และยังมีการเปลี่ยนแปลงในระดับของเสียงและการเขียนเมื่อคำถูกนำมาใช้ในภาษาไทย แต่อย่างไรภาษาบาลีและสันสกฤตยังมีความสำคัญต่อทั้งในด้านศาสนา วัฒนธรรม และการศึกษา หรือแม้แต่ในชีวิตประจำวันยังต้องมีความเข้าใจ แยกแยะ และการจำแนกคำที่มาจากภาษาบาลีและสันสกฤตอย่างถูกต้องตามรากศัพท์และการใช้ภาษาได้อย่างถูกต้อง (Li, 2024) ต้องอาศัยความรู้ความเข้าใจในเรื่องดังกล่าวเพื่อช่วยในการสื่อสารและการเขียนที่ถูกต้องและแม่นยำ ซึ่งการจำแนกแยกแยะต้องอาศัยทักษะและประสบการณ์ของนักวิชาการ ครู อาจารย์ หรือนักภาษาศาสตร์ผ่านเครื่องมือทั้งรูปแบบดั้งเดิม คือ การใช้พจนานุกรม และรูปแบบสมัยใหม่ คือ การใช้เว็บไซต์สืบค้นหรือการใช้แหล่งข้อมูลออนไลน์จากหน่วยงานที่รับผิดชอบด้านภาษา เช่น สำนักงานราชบัณฑิตยสภา ซึ่งความแตกต่างระหว่าง 2 ภาษานี้ คือ ที่มาของคำศัพท์ การใช้ในภาษาไทย และโครงสร้างทางไวยากรณ์ ทั้งสองภาษานี้มีบทบาทสำคัญในการพัฒนาภาษาไทยและวัฒนธรรมไทยอย่างมาก สามารถแบ่งออกเป็น 5 ด้าน ได้แก่

1) ด้านแหล่งที่มา ภาษาบาลีมาจากแถบอินเดียตอนเหนือและเป็นภาษาของคัมภีร์พุทธศาสนาในฝ่ายเถรวาท ซึ่งมีอิทธิพลต่อไทยมาก เนื่องจากไทยเป็นประเทศที่นับถือศาสนาพุทธแบบเถรวาท ในขณะที่ภาษาสันสกฤตเป็นภาษาที่เก่าแก่และมีความซับซ้อนมากกว่าภาษาบาลี มาจากแถบอินเดียเช่นกัน แต่มักเกี่ยวข้องกับศาสนาฮินดูและวรรณกรรมคลาสสิก เช่น มหาภารตะและรามายณะ เป็นต้น

2) การใช้ในภาษาไทย ภาษาบาลีในภาษาไทยมักเป็นคำที่เกี่ยวข้องกับศาสนาและวัฒนธรรมทางพระพุทธศาสนา เช่น พระ ศีล บริจาค และบุญ เป็นต้น ในขณะที่ภาษาสันสกฤตในภาษาไทยมักใช้ในคำที่เป็นทางการหรือลึกลับ เช่น กษัตริย์ ประชาธิปไตย องค์ และปรัชญา เป็นต้น

3) ลักษณะของคำศัพท์ ในภาษาบาลี คำบาลีมักสั้นและง่ายต่อการออกเสียงในภาษาไทย เป็นภาษาที่ไม่มีวรรณยุกต์ ส่วนใหญ่เป็นคำพยางค์เปิด (Open syllable) คือ ลงท้ายด้วยสระ เช่น พุท-ธะ สง-ฆะ และ วิ-หา-ระ เป็นต้น ไม่เน้นเสียงควบกล้ำและพยัญชนะสะกด เช่น ศีล (Pali: sīla) และธรรม (Pali: dhamma) เป็นต้น ในขณะที่ภาษาสันสกฤต คำสันสกฤตมักยาวและซับซ้อนกว่า เป็นภาษาที่มีการใช้วรรณยุกต์และพยัญชนะควบกล้ำ ภาษาคำผัน (Inflectional language) มีการเปลี่ยนรูปของรากศัพท์ตามหน้าที่ในประโยค และมีคำที่เป็นพยางค์ปิดมากกว่าบาลี คือ ลงท้ายด้วยพยัญชนะสะกด เช่น โลก พรหม วรรค และกรรม เป็นต้น (Duraismamy, 2024) เช่น ประชาธิปไตย (Sanskrit: prajādhīpatya) และปฐมฤกษ์ (Sanskrit: prathama-rikṣa) เป็นต้น

4) โครงสร้างทางไวยากรณ์ ในภาษาบาลีมีโครงสร้างทางไวยากรณ์ที่ชัดเจนและเป็นระบบ โดยมีการผันคำนาม คำสรรพนามหรือคำคุณศัพท์ (Declension) และการผันคำกริยา (Conjugation) แต่เข้าใจและจดจำได้ง่าย โดยมีรูปแบบการประสมคำแบบสมาส (การรวมคำโดยไม่มีการเปลี่ยนแปลงคำเดิม) เช่น พุทธศาสนา = พุทธ (พระพุทธเจ้า) + ศาสนา (คำสอน) และ อริยสัจ = อริยะ (ประเสริฐ) + สัจ (ความจริง) เป็นต้น ในขณะที่ภาษาสันสกฤตมีโครงสร้างทางไวยากรณ์ที่ซับซ้อนและเป็นระบบมาก ซึ่งเป็นหนึ่งในเอกลักษณ์สำคัญของภาษาโบราณ โดยคำที่ถูกยืมมาใช้มักถูกดัดแปลงให้เข้ากับเสียงของภาษาไทย ซึ่งเป็นรูปแบบการ

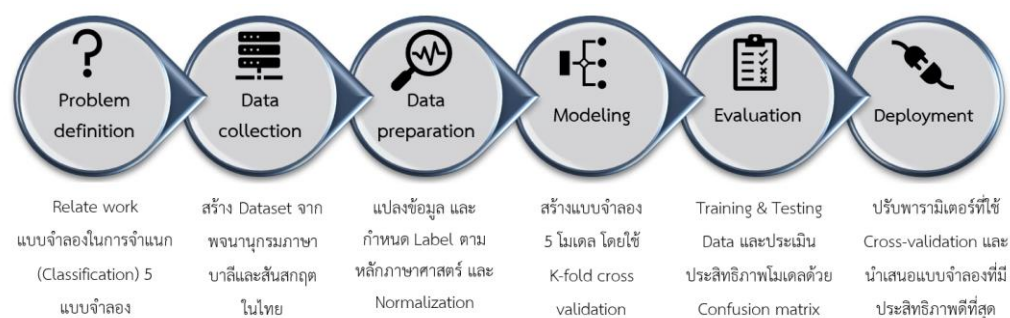
ประสมคำแบบตัดทอน (การเติมปัจจัยขยายความ) และสมาส เช่น วรณคดี = วรณะ (สี) + คดี (เรื่องราว) หมายถึงวรรณกรรม และนฤมิต = นฤ (ไม่มี) + มิต (ชอบเขต) หมายถึงการสร้างสรรค์ เป็นต้น (Saechan & Ruangjaroon, 2024)

5) การออกเสียง ในภาษาบาลี การออกเสียงของคำบาลีในภาษาไทยมักจะคล้ายกับเสียงในภาษาไทย ทำให้ง่ายต่อการออกเสียง ในขณะที่ ภาษาสันสกฤตการออกเสียงของคำสันสกฤตในภาษาไทย อาจมีความซับซ้อนมากขึ้น เนื่องจากมีเสียงที่ไม่คุ้นเคยในภาษาไทย (Bradley, 2024)

ดังนั้น ด้วยความซับซ้อนของภาษาจึงมีการประยุกต์เทคนิค และเครื่องมือทางด้านเทคโนโลยีมาประยุกต์ใช้ในการจำแนกภาษาบาลีและสันสกฤตด้วยการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine learning) และการเรียนรู้เชิงลึก (Deep learning) เพื่อช่วยให้การจำแนกภาษาเกิดความแม่นยำ และตรงตามหลักภาษาผ่านการผสานการเรียนรู้ของเครื่อง และการประมวลผลภาษาธรรมชาติ (Natural Language Processing: NLP) ในภาษาบาลีสันสกฤต (Gudadhe et al., 2024) เพื่อค้นหาและดึงข้อมูลจากวรรณกรรม แยกความแตกต่างระหว่างความหมายของคำบาลี โดยใช้เครื่องมือและเทคโนโลยีการประมวลผลภาษาธรรมชาติที่ทำงานร่วมกันระหว่างศาสตร์ด้านภาษาและศาสตร์ด้านวิทยาการคอมพิวเตอร์ เพื่อถอดรหัสโครงสร้างภาษาบาลีและวิธทางไวยากรณ์ เพื่อสร้างแบบจำลองที่สามารถทำความเข้าใจ แยกย่อย และแยกรายละเอียดสำคัญได้อย่างเป็นระบบ จึงนำมาสู่วัตถุประสงค์การวิจัยเพื่อทดสอบ และเปรียบเทียบประสิทธิภาพแบบจำลองการจำแนกภาษาบาลีและสันสกฤตในภาษาไทยด้วยเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง

2. วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาครั้งนี้ใช้แนวทางการวิจัยเชิงทดลองผ่านการวิเคราะห์ข้อมูล เพื่อทดสอบพร้อมทั้งเปรียบเทียบประสิทธิภาพแบบจำลองการจำแนกภาษาบาลีและสันสกฤตในภาษาไทยด้วยเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง โดยมีขั้นตอนในการวิจัยตามหลักวงจรชีวิตของการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine learning life cycle) ดังรูปที่ 1



รูปที่ 1. กรอบแนวคิดในการดำเนินการวิจัย

2.1 การกำหนดปัญหา (Problem definition)

เนื่องด้วยภาษาบาลีและสันสกฤตเป็นคำที่เกี่ยวข้องกับศาสนา วัฒนธรรม และการศึกษา อีกทั้งภาษาไทยยังยืมคำมาจากทั้งสองภาษาโดยใช้ในจำนวนมาก ทำให้เกิดความซับซ้อนในการแยกแยะว่าคำใดมาจากภาษาใด ส่งผลให้ในการจำแนกคำบาลีและสันสกฤตต้องอาศัยทักษะและความเชี่ยวชาญ จึงนำมาสู่แนวคิดในการนำเครื่องมือทางด้านการเรียนรู้ของเครื่องมาประยุกต์ใช้ในการจำแนก (Classification) โดยมีคำถามการวิจัยว่า อะไรคือแบบจำลองในการจำแนกภาษาบาลีและสันสกฤตในภาษาไทยโดยใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องที่มีประสิทธิภาพดีที่สุด การวิจัยเริ่มต้นจากการศึกษาจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องในด้านการจำแนกภาษาต่าง ๆ โดยการประยุกต์ใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Zhang et al. (2024) ที่ได้ประยุกต์นำเอาเทคนิคทางเทคโนโลยีมาใช้กับงานด้านภาษาศาสตร์และการเขียนเชิงวิชาการ โดยเปรียบเทียบระหว่างการเรียนรู้ของเครื่องและการเรียนรู้เชิงลึกด้วยแบบจำลองทางภาษาที่ผ่านการฝึกอบรมล่วงหน้า ได้แก่ Bidirectional Encoder Representations from Transformers (BERT) Robustly optimized BERT approach (RoBERTa) BigBird และ Long Document Transformer (Longformer) ผลการศึกษาบ่งชี้ว่า แบบจำลอง BigBird และ Longformer มีประสิทธิภาพเหนือกว่า BERT และ RoBERTa อย่างมีนัยสำคัญ

เช่นเดียวกับ Wang et al. (2024) ที่ได้ศึกษาและวิจัยเกี่ยวกับระบบอัจฉริยะโดยใช้แบบจำลองทางภาษาขนาดใหญ่สำหรับจำแนกข้อความ ประยุกต์ใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง โดยใช้แบบจำลองป่าไม้สุ่ม (Random forest) แบบจำลองต้นไม้ตัดสินใจ (Decision tree) แบบจำลองเพื่อนบ้านใกล้สุด (K-Nearest Neighbors: KNN) แบบจำลองนาอิวเบย์ (Naive Bayes) และแบบจำลองการถดถอยโลจิสติกส์ (Logistic Regression) เพื่อนำมาเปรียบเทียบประสิทธิภาพแบบจำลองการจำแนกที่ดีที่สุด ซึ่งเป็นไปในทิศทางเดียวกับงานวิจัยของ Brena et al. (2021) ที่ได้นำเอากระบวนการประเมินประสิทธิภาพการพูดภาษาต่างประเทศโดยใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง ซึ่งเปรียบเทียบคลาสของการจำแนกตามการฝึก (Training) เพื่อให้เกิดความแม่นยำของแบบจำลอง ประกอบด้วยค่าความแม่นยำ (Accuracy) และความเที่ยงตรง (Precision) เป็นหลัก โดยทดสอบและเปรียบเทียบประสิทธิภาพแบบจำลองป่าไม้สุ่ม แบบจำลองซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (Support Vector Machine: SVM) และแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียม (Neural Network: NN) เช่นเดียวกับ Kashif et al. (2024) ที่ได้ศึกษาแบบจำลองการจำแนกหลายประเภทเพื่อใช้ในการระบุสำเนียงต่างประเทศโดยใช้แบบจำลองซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน และแบบจำลองโครงข่ายประสาทเทียมในภาษาญี่ปุ่นที่มีความซับซ้อนทั้งนี้ได้ดำเนินการลดมิติของพีเจอร์เพื่อคัดเลือกลักษณะสำคัญ เพื่อประเมินประสิทธิภาพในการจำแนกข้อมูล

อีกทั้ง Joshi et al. (2024) ได้นำไปประยุกต์ใช้ในบริบทของภาษาถิ่นด้วยเทคนิคการประมวลผลภาษาธรรมชาติ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าเครื่องมือทางเทคโนโลยีสามารถนำไปใช้กับงานด้านภาษาที่มีความซับซ้อน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย Saputra et al. (2024) ได้ศึกษาในครั้งนี้นุ่งเน้นการจำแนกปัจจัยที่ส่งผลต่อการพัฒนาความสามารถทางภาษาต่างประเทศในบริบทสังคม โดยใช้แบบจำลองต้นไม้การตัดสินใจในการวิเคราะห์ข้อมูล โดยมีตัวแปรอิสระ ได้แก่ ปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม แรงจูงใจ การใช้เทคโนโลยี และการปฏิบัติ ข้อมูลถูกรวบรวมผ่านแบบสอบถามที่ใช้มาตราส่วนลิเคิร์ตสเกล และวิเคราะห์ด้วยซอฟต์แวร์ RapidMiner เพื่อระบุปัจจัยที่มีอิทธิพลสูงสุดต่อการพัฒนาทักษะภาษาต่างประเทศ

ยังมีงานวิจัยของ Mousa et al. (2024) ที่ได้นำเอาแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องสำหรับการตรวจจับภาษาอาหรับที่ไม่เหมาะสมในโซเชียลมีเดีย โดยผลการทดสอบประสิทธิภาพแบบจำลองสูงสุดคือ KNN หรือแม้แต่งานวิจัยในภาคธุรกิจ Makayasa et al. (2024) ได้นำเทคนิคการประมวลผลภาษาธรรมชาติมาจำแนกรูปแบบของภาษาในการบันทึกธุรกรรมทางการเงินทางบัญชี โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพของอัลกอริทึมการจำแนกประเภท 3 แบบ ได้แก่ แบบจำลองซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน แบบจำลองเพื่อนบ้านใกล้สุด และแบบจำลองป่าไม้สุ่ม โดยผลการวิจัยพบว่า แบบจำลองซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน มีค่า Accuracy เท่ากับ 92.5% ค่า Precision เท่ากับ 92.5% ค่า Recall เท่ากับ 93.33% และค่า F1-score เท่ากับ 92% ซึ่งเป็นแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการจำแนกภาษาในงานการเงินทางบัญชี

ในภาคการศึกษาได้มีการวิจัยของ Wei (2024) ได้นำเอาเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องมาประยุกต์ใช้ในการจำแนกข้อความภาษาจีนและภาษาอังกฤษได้อย่างน่าเชื่อถือ โดยใช้แบบจำลองซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน แบบจำลองเพื่อนบ้านใกล้สุด และแบบจำลองนาอิวเบย์ ซึ่งแสดงให้เห็นว่า เทคนิคดังกล่าวมีความเหมาะสมกับภาษาต่างชาติ หรือภาษาที่มีลักษณะโครงสร้างที่มีความแตกต่างกัน เช่นเดียวกับงานวิจัย Alzoubi et al. (2023) ที่ได้ศึกษาเปรียบเทียบการจำแนกข้อความในภาษาตุรกี โดยอิงตามการเรียนรู้ของเครื่องโดยใช้แบบจำลองซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน แบบจำลองนาอิวเบย์ โครงข่ายประสาทเทียมแบบ Long Term-Short Memory (LSTM) แบบจำลองป่าไม้สุ่ม และแบบจำลองการถดถอยโลจิสติกส์ ในการจำแนกประเภทข้อมูลประเภทภาษาได้ และมีงานวิจัย Khairy et al. (2024) ได้ศึกษาการตรวจจับภาษาที่ไม่เหมาะสมทางอินเทอร์เน็ตในภาษาอาหรับโดยนำเอาการเรียนรู้ของเครื่องมาทดสอบ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการจำแนกโดยใช้แบบจำลองป่าไม้สุ่ม แบบจำลองต้นไม้ตัดสินใจ แบบจำลองเพื่อนบ้านใกล้สุด และแบบจำลองซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน

อีกทั้ง Kaewpanitch & Tongngam (2020) ได้ศึกษาคุณลักษณะสำคัญที่ส่งผลต่อประสิทธิภาพการเรียนรู้ภาษาอังกฤษในหมู่นักศึกษาปริญญาตรี โดยใช้เทคนิคเหมืองข้อมูลและอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่อง เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพ ความแม่นยำ และความถูกต้องของอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่องผ่านแบบจำลองต้นไม้ตัดสินใจและแบบจำลองป่าไม้สุ่ม โดยแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุดคือแบบจำลองป่าไม้สุ่ม มีค่าความแม่นยำเท่ากับ 85.14% ซึ่งเป็นไปในทางเดียวกับ Maqsood et al. (2022) ที่ใช้การเรียนรู้ของเครื่องในการจำแนกความสามารถในการอ่านประโยคภาษาอังกฤษ โดยทดสอบประสิทธิภาพแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่อง 5 วิธี คือ แบบจำลองเพื่อนบ้านใกล้สุด แบบจำลองซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน แบบจำลองต้นไม้ตัดสินใจ แบบจำลองการถดถอยโลจิสติกส์ และแบบจำลองนาอิวเบย์ ซึ่งเมื่อศึกษาในบริบทที่แตกต่างกันพบว่า งานวิจัย Kanraweekultana et al. (2024) ได้ศึกษาและวิจัยในด้านจิตวิทยา โดยนำเอาเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องมาประยุกต์ใช้ในการจำแนกข้อมูลที่เป็นตัวอักษรที่เกิดขึ้นจากพฤติกรรมมนุษย์ที่มีความซับซ้อน และมีรูปแบบข้อมูลที่มีความคล้ายคลึงกัน โดยใช้แบบจำลองต้นไม้ตัดสินใจ แบบจำลองซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน แบบจำลองนาอิวเบย์ และแบบจำลองเพื่อนบ้านใกล้สุด โดยวิธีที่ดีที่สุด คือ แบบจำลองต้นไม้ตัดสินใจให้ค่าความแม่นยำเท่ากับ 84.62%

รวมไปถึงภาษาต่างชาติที่ได้รับอิทธิพลเช่นเดียวกับภาษาไทย คือ ภาษาเขมร (Khmer language) งานวิจัย Phann et al. (2023) ได้ศึกษาเกี่ยวกับการจำแนกข้อความหลายคลาสในข่าวเขมรผ่านวิธีการ

เรียนรู้ของเครื่องเป็นตัวจำแนกกับงานด้านภาษา โดยใช้แบบจำลองการถดถอยโลจิสติกส์ แบบจำลองนาอิวเบย์ แบบจำลองเพื่อนบ้านใกล้สุด แบบจำลองซัพพอร์ทเวกเตอร์แมชชีน แบบจำลองต้นไม้ตัดสินใจ และแบบจำลองป่าไม้สุ่ม ดังนั้น จากการทบทวนวรรณกรรมและงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับงานวิจัยด้านการประสิทธิภาพแบบจำลองการจำแนกภาษาบาลีและสันสกฤตในภาษาไทย มักนำเอาเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องมาประยุกต์ใช้ในการจำแนกงานด้านภาษาที่มีความคล้ายคลึงและซับซ้อน สามารถสรุปแบบจำลองที่มีความเหมาะสมในการจำแนก ได้แก่ แบบจำลองป่าไม้สุ่ม แบบจำลองต้นไม้ตัดสินใจ แบบจำลองการคำนวณเพื่อนบ้านใกล้สุด แบบจำลองนาอิวเบย์ และแบบจำลองซัพพอร์ทเวกเตอร์แมชชีน ดังรายละเอียดตารางที่ 1

ตารางที่ 1. สรุปผลการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับ Machine Learning Classification Models

Research	Year	Algorithms						
		Random forest	Decision tree	K-Nearest Neighbors	Naive Bayes	SVM	Logistic Regression	Neural Network
Wang et al. (2024)	2024	✓	✓	✓	✓		✓	
Brena et al. (2021)	2021	✓				✓		✓
Kashif et al. (2024)	2024			✓		✓		✓
Joshi et al. (2024)	2024	✓				✓		✓
Saputra et al. (2024)	2024		✓					
Mousa et al. (2024)	2024			✓	✓	✓		
Makayasa et al. (2024)	2024	✓		✓		✓		
Wei (2024)	2024			✓	✓	✓		
Alzoubi et al. (2023)	2023	✓			✓	✓	✓	
Khairy et al. (2024)	2024	✓	✓	✓		✓		
Kaewpanitch & Tongngam (2020)	2020	✓	✓					
Maqsood et al. (2022)	2022		✓	✓	✓	✓	✓	
Kanraweekultana et al. (2024)	2024		✓		✓	✓		✓
Phann et al. (2023)	2023	✓	✓	✓	✓	✓	✓	
Result		8	7	8	7	11	4	4

2.2 การรวบรวมข้อมูล (Data collection)

ขั้นตอนการรวบรวมข้อมูลโดยสร้าง Dataset จากพจนานุกรมภาษาบาลีและสันสกฤตในภาษาไทย และเว็บไซต์พจนานุกรมภาษาไทยฉบับราชบัณฑิตยสถาน ทั้งรูปแบบออนไลน์และออฟไลน์ โดยการรวบรวมชุดข้อมูลซึ่งเป็นการเก็บรวบรวมโดยใช้วิธีการสืบค้นข้อมูลด้วยคีย์เวิร์ดทั้งหมด 3 เล่ม ผ่านการเก็บรวบรวมด้วยคีย์เวิร์ดได้ข้อมูลจำนวนทั้งสิ้น 21,664 records ด้วยการแบ่งข้อมูลแบบ Cross Validation (CV) ใช้

ชุดทดสอบ (Test Set) จำนวน 1 ชุดในการทดสอบประสิทธิภาพโดยแบ่งข้อมูลออกเป็นหลายชุดแล้วใช้ทุกชุดทั้งในการฝึก (Training) และทดสอบ (Testing) แบบจำลองในรอบที่แตกต่างกัน โดยมีข้อมูลทั้งหมด 3 Attribute ประกอบด้วย 1) คำศัพท์ (Vocabulary) 2) ประเภทของคำ (Part of speech) และ 3) ชนิดของคำภาษา (Language) โดยการทำความเข้าใจข้อมูล (Data understanding) ข้อมูลที่จะนำไปสร้างแบบจำลองด้วยเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง เนื่องจากปัจจุบันยังไม่มีการพัฒนาคลังข้อมูล (Corpus) ขนาดใหญ่ที่รวบรวมคำบาลีและสันสกฤตที่ปรากฏในภาษาไทยอย่างเป็นระบบ ดังนั้นเทคนิคดังกล่าวจึงมีความเหมาะสม สามารถฝึกจากตัวอย่างคำที่มีการระบุชนิดของคำและที่มาไว้แล้ว และนำไปคาดการณ์กับคำใหม่ได้ คำบาลีและสันสกฤตที่ใช้ในภาษาไทยอาจมีการแปลงเสียงหรือเปลี่ยนรูป เช่น “ปัญญา” (บาลี) แปลงเป็น “ปัญญา” (สำเนียงไทย) โดยการเรียนรู้ของเครื่องจะสามารถเรียนรู้ลักษณะการเปลี่ยนแปลงเสียงหรือรูปได้ ดังนั้น คำศัพท์ภาษาบาลีและสันสกฤตในภาษาไทยจะมีหลักการจำแนกโดยอาศัยประเภทของคำที่แบ่งตามชนิดของคำที่เป็นตัวจำแนก มีรายละเอียดข้อมูลสำหรับการวิจัยดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2. รายละเอียดข้อมูล

ลำดับ	Attribute	ประเภทของข้อมูล	รายละเอียด
1.	Vocabulary	TEXT	คำศัพท์ภาษาบาลีและสันสกฤตในภาษาไทย
2.	Part of speech	TEXT	ประเภทของคำต่าง ๆ ภาษาบาลีและสันสกฤตในภาษาไทย
3.	Language (Label)	TEXT	ชนิดของคำ (4 Class) 1) คำบาลี เช่น ลิขร วิริย ยุทธภูมิ มธุ พาหุ ปิติ ทูรชาติ เป็นต้น 2) คำสันสกฤต เช่น ศาป วิถี ปิณฑ กษัย โศก ไทย ตูริ ทศ เป็นต้น 3) คำใช้ร่วมกัน เช่น เกศปาศ จมร นิเวศ ปรม มานส เป็นต้น 4) คำพ้องรูป เช่น เกศย ชิมุ ทฤณ นลิน ศุนก อาภา เป็นต้น

2.3 การเตรียมข้อมูล (Data preparation)

จัดการข้อมูลและการเลือกใช้ข้อมูลเพื่อนำมาสู่วิธีการสร้างแบบจำลอง (Train model) จึงต้องจัดเตรียมชุดข้อมูลในรูปแบบของตาราง (Table) ไฟล์ .CSV โดยโครงสร้างข้อมูลแบบพื้นฐาน (Primitive data structure) อยู่ในรูปแบบตัวอักษร (Character) ที่เป็นไปตามลักษณะของข้อมูลเชิงโครงสร้าง (Structured data) และการแปลงข้อมูลเชิงตัวเลข (Numerical transformation) เมื่อเข้าสู่ขั้นตอน Modeling เพื่อนำข้อมูลไปแปลงเป็น Matrix แล้ว Train Model จำเป็นต้องมี 3 คุณสมบัติ 1) คำศัพท์ 2) ประเภทของคำ 3) ชนิดของคำ เป็น Feature Vector ในการวิเคราะห์ภาษาธรรมชาติ (NLP) เพื่อช่วยให้โมเดลเข้าใจโครงสร้างภาษาและความหมายของคำในบริบทที่ดีขึ้น โดยใช้วิธีการแทนค่าด้วย One-hot Encoding แต่ละประเภทของคำ ตัวอย่างเช่น Noun Verb Adjective เมื่อถูกเข้ารหัสเป็นเวกเตอร์ที่มีค่า 1 ในตำแหน่งที่แทนชนิดคำนั้น และค่า 0 ที่เหลือ ถ้ามี Part of Speech เมื่อเป็นเวกเตอร์จะแปลงค่าเป็น [0,1,0,0] โดยที่ข้อมูลทั้งหมดต้องไม่มีค่า Null ส่วนการคัดกรองข้อมูล (Filter data) ใช้วิธีการกรองร่วมกัน (Collaborative filtering) ที่เป็นเทคนิคแนะนำข้อมูลตามความคล้ายคลึงของภาษาสามารถสรุปได้ดังนี้ 1) ข้อมูลของแต่ละคำจะต้องประกอบด้วยตัวอักษรภาษาไทยทั้งหมด 2) พื้นที่ข้อมูลคุณสมบัติของแต่ละคำ

ต้องไม่มีคำว่าว่าง หรือค่าที่ไม่ตรงกับที่กำหนดไว้ หลังจากนั้นจะเข้าสู่ขั้นตอนการแปลงข้อมูล (Data transformation) โดยแบ่งเป็น 2 ขั้นตอน ดังนี้

1) การรวมข้อมูล (Data aggregation) จากพจนานุกรมภาษาบาลีและสันสกฤตในภาษาไทย และเว็บไซต์พจนานุกรมภาษาไทยฉบับราชบัณฑิตยสถาน ทั้งในรูปแบบออนไลน์และออฟไลน์ โดยประกอบด้วย คำบาลี เช่น จิต - จิตใจ (Citta - Mind) ธรรม - หลักความจริง คำสอน (Dhamma - Truth, Teaching) กรุณา - ความสงสาร (Karuṇā - Compassion) ปัญญา - ความรู้ (Paññā - Wisdom) เป็นต้น ในขณะที่ ภาษาสันสกฤต เช่น กรรม - การกระทำ (Karma - Action) ราชา - กษัตริย์ (Rāja - King) ศิลป์ - งาน ศิลปะ (Śilpa - Art) ภาษา - การพูด (Bhāṣā - Language) เป็นต้น แต่เนื่องจากคำในภาษาบาลีและภาษาสันสกฤต จะมีบางคำที่เป็นคำใช้ร่วมกัน ซึ่งหากมีข้อมูลคำที่ซ้ำกันแต่มี Class ที่ต่างกัน จะทำให้เกิดการชนกันของข้อมูล (Data collision) โดยการจะทำการขั้นตอนการรวมข้อมูลนั้น ต้องรวมคำภาษาบาลีและภาษาสันสกฤตที่ใช้ร่วมกัน และมีส่วนของคำพูด เหมือนกันให้กลายเป็น Class “ใช้ร่วมกัน” และคำภาษาบาลีและภาษาสันสกฤตที่ใช้ร่วมกัน เช่น กรูณิ ขมา ครอบ ฆราวาส จันทร เป็นต้น และมีส่วนของคำพูด ต่างกันให้กลายเป็น Class “คำพ้องรูป” เมื่อไม่มีการชนกันของข้อมูล เช่น เกต เศาฑฤ ครุฑ ปภท ปกาลโก เป็นต้น โดยการขอความเห็นจากนักภาษาศาสตร์ นักวิชาการ ครู และอาจารย์ภาษาไทยที่เกี่ยวข้อง เพื่อช่วยให้ความผิดพลาดในการจัดการ Label โดยข้อมูลมีความถูกต้องตามหลักภาษาศาสตร์ อีกทั้งช่วยให้การจำแนกข้อมูลจะมีความแม่นยำมากขึ้น

2) การสร้างแผนผังข้อมูล (Data mapping) ในการจำแนกภาษาด้วยการเรียนรู้ของเครื่อง ด้วยการแปลงคำหมวดหมู่ให้เป็นตัวเลข (Integer) การปรับโครงสร้างข้อมูลโดยการแปลงข้อมูลเชิงตัวเลข โดยการปรับเปลี่ยนค่าของข้อมูลเชิงตัวเลขให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมกับการวิเคราะห์หรือการสร้างโมเดลทางสถิติ และการเรียนรู้ของเครื่องผ่านการปรับแต่ง Features (Feature engineering) ในชุดข้อมูล เพื่อให้แบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องสามารถจัดการค่าที่หายไป (Missing Values) และลบหรือแทนค่าผิดปกติ (Outliers) จากนั้นการแปลงข้อมูล (Feature transformation) ประเภทข้อความให้เป็นตัวเลข จากนั้นสร้าง Feature ใหม่ (Feature Creation) ด้วยวิธีการแปลงค่าตัวเลขให้ค่าของข้อมูลอยู่ในช่วงที่กำหนด เช่น [0,1] หรือ [-1,1] ที่เป็นไปตามรูปแบบการปรับขนาดข้อมูล (Normalization) โดยวิธีการแปลงข้อมูลให้เป็นระดับคำ (word level) เพื่อให้โมเดลสามารถเรียนรู้จากหน่วยข้อมูลที่เป็นคำสำหรับแปลงข้อมูลเป็นระดับ subword เพื่อรับมือกับคำที่ไม่รู้จักในภาษา สำหรับการเชื่อมโยงกับ Part of Speech ที่เป็นตัวช่วยจำแนกข้อมูลภายใต้สัญลักษณ์ทางภาษาบางประการที่จะช่วยให้แบบจำลองสามารถอ่าน และประมวลผลแบบจำลองทั้งหมดผ่านการทำ Normalization เพื่อปรับค่าข้อมูลให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสม เพื่อให้การวิเคราะห์หรือการนำไปใช้แบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องมีประสิทธิภาพมากขึ้น ลดผลกระทบจากขนาดของข้อมูลที่แตกต่างกันของคำบาลี คำสันสกฤต คำใช้ร่วมกัน และคำพ้องรูป ที่สามารถช่วยให้โมเดลเรียนรู้ได้ดีขึ้น

2.4 การสร้างแบบจำลอง (Modeling)

การออกแบบจำลองตามการจำแนกประเภทข้อมูล มาวิเคราะห์โดยใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องผ่านเครื่องมือ RapidMiner Studio ประกอบด้วย 5 แบบจำลอง คือ แบบจำลองป่าไม้สุ่ม แบบจำลอง

ต้นไม้ตัดสินใจ แบบจำลองการคำนวณเพื่อนบ้านใกล้สุด แบบจำลองนาอ็พเบย์ และแบบจำลองซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน ซึ่งก่อนการวิเคราะห์ได้ปรับโครงสร้างข้อมูลให้มีความเหมาะสม และสามารถใช้งานร่วมกันกับทั้ง 5 แบบจำลองตามขั้นตอนวิธีการในการปรับสร้างแผนผังข้อมูล และใช้การวิเคราะห์ความเที่ยงตรงของแบบจำลอง (K-fold cross validation) ในการตรวจสอบไขว้ (Cross validation) เป็นวิธีการตรวจสอบความผิดพลาด ในการคาดการณ์ของแบบจำลอง โดยลักษณะวิธี การตรวจสอบไขว้กันด้วยวิธีการ 10-fold Cross-validation ซึ่งจะแบ่งข้อมูลเป็น 10 ชุดเท่ากัน แล้วให้ 1 ชุดเป็นกลุ่มทดสอบ (Test set) และอีก 9 ชุดเป็นกลุ่มฝึกฝน (Train set) สำหรับการวัดประสิทธิภาพแบบจำลองของการจำแนกข้อมูล สำหรับเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลอง โดยมีรายละเอียดดังนี้

1) แบบจำลองป่าไม้สุ่ม เป็นแบบจำลองที่สร้างขึ้นจากการรวมกันของต้นไม้ตัดสินใจ หลายๆ ต้น โดยใช้หลักการ Ensemble Learning แบบ Bagging (Bootstrap Aggregating) โดยการทำงานจะ Bootstrap Sampling สำหรับต้นไม้แต่ละต้น t ใน T ต้น ผ่านการวิเคราะห์นี้มีการกำหนดพารามิเตอร์ของแบบจำลอง Number of tree = 100 เพื่อให้แบบจำลองสมดุลระหว่างความแม่นยำและเวลาในการคำนวณโดยไม่ Overfitting และ Criterion depth = gini_index เพื่อวัดความไม่บริสุทธิ์ของข้อมูลในแต่ละโหนดของต้นไม้การตัดสินใจ อีกทั้งเพื่อป้องกันการเกิด Overfitting โดยจำกัดความซับซ้อนของแบบจำลองให้ไม่เกิน 10 ระดับกำหนด Maximum depth = 10 และ Voting strategy = Majority vote ช่วยให้แบบจำลองป่าไม้สุ่ม มีความแม่นยำสูงขึ้น (Kanraweekultana et al., 2024) โดยมีกระบวนการดังสมการที่ (1) ถึงสมการที่ (6)

$$\text{Gini Impurity} \quad G(S) = 1 - \sum_{i=1}^c p_i^2 \quad (1)$$

$$\text{Reduction in Gini Impurity} \quad \Delta G = G(S) - \sum_{j=1}^k \frac{|S_j|}{|S|} G(S_j) \quad (2)$$

$$\text{Leaf Node Classification} \quad \hat{y} = \arg \max_i |S_i| \quad (3)$$

$$\text{Stopping Criteria} \quad G(S) = 0 \quad (4)$$

$$\text{Complexity Pruning} \quad C(T) = \sum_{t \in T_L} [|S_t| \cdot \text{Impurity}(S_t)] + \alpha |T_L| \quad (5)$$

$$\text{Majority voting} \quad \hat{y} = \arg \max_{C_j \in \{C_1, C_2, \dots, C_n\}} \sum_{i=1}^k I(y_i = C_j) \quad (6)$$

2) แบบจำลองต้นไม้ตัดสินใจ เป็นหนึ่งในอัลกอริทึมที่ใช้งานง่ายและแปลผลได้ชัดเจน ในแต่ละโหนดต้นไม้จะเลือกคุณลักษณะ (Feature) และค่าที่เหมาะสมที่สุดเพื่อแบ่งข้อมูล โดยใช้ตัววัดความบริสุทธิ์ (Purity measures) การวิเคราะห์นี้ได้กำหนดค่าพารามิเตอร์ของโมเดลเป็น Criterion = gini_index เพื่อวัดความไม่แน่นอนหรือความหลากหลายในชุดข้อมูล (Impurity) และใช้ max-depth = 10 เป็นการเริ่มต้น

ที่ปลอดภัย ซึ่งช่วยให้โมเดลมีประสิทธิภาพในการเรียนรู้ข้อมูลที่ไม่ซับซ้อนเกินไป อีกทั้งเป็นการป้องกันปัญหา Overfitting หรือ Underfitting กำหนดให้ Confidence = 0.1 เป็นค่าสมมูลที่ช่วยให้ต้นไม้ไม่ซับซ้อนเกินไป แต่ยังคงรักษาความแม่นยำ (Modhugu & Ponnusamy, 2024) โดยมีกระบวนการดังสมการที่ (7) – (9)

$$\text{Gini Impurity} \quad Gini(t) = 1 - \sum_{i=1}^c p_i^2 \quad (7)$$

$$\text{Entropy} \quad Entropy(S) = - \sum_{i=1}^c p_i \log_2(p_i) \quad (8)$$

$$\text{Information Gain} \quad IG(S, A) = Entropy(S) - \sum_{v \in \text{Values}(A)} \frac{|S_v|}{|S|} \cdot Entropy(S_v) \quad (9)$$

3) แบบจำลองการคำนวณเพื่อนบ้านใกล้สุด เป็นอัลกอริทึมแบบ Instance-based learning หรือ Lazy learning โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ของแบบจำลองเป็น $k = 5$ โดยเลือกจุดข้อมูล 5 จุดที่อยู่ใกล้กับ x มากที่สุด (จากการคำนวณระยะทาง) และใช้เป็นเกณฑ์ในการตัดสินใจว่าคลาสใดปรากฏมากที่สุด (Majority voting) กำหนด Measure types = MixedMeasures เนื่องจากจำเป็นต้องรวมคุณลักษณะทุกประเภทเข้าด้วยกันตามลักษณะของข้อมูลที่มีตัวแปร (Perroni et al., 2024) โดยมีกระบวนการดังสมการที่ (10) และสมการที่ (11)

$$\text{Distance Calculation} \quad d(x, x_i) = \sqrt{\sum_{j=1}^m (x_j - x_{ij})^2} \quad (10)$$

$$\text{Majority Voting} \quad \text{Class}(x) = \underset{C}{\operatorname{argmax}} \sum_{i=1}^k I(C_i = C) \quad (11)$$

4) แบบจำลองนาอิวเบย์ การวิเคราะห์หั่นกำหนดพารามิเตอร์ของแบบจำลองเป็น Laplace correlation = Smoothing เพื่อปรับค่าความน่าจะเป็นในการคำนวณความน่าจะเป็นของแต่ละฟีเจอร์ภายใต้คลาส โดยใช้ทฤษฎีเบย์ในการคำนวณความน่าจะเป็นของคลาสเป้าหมาย (y) เมื่อกำหนดชุดคุณลักษณะ $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ (Hemal et al., 2024) โดยมีกระบวนการดังสมการที่ (12)

$$\text{Naïve Bayes classification} \quad P(C_k|X) = \frac{P(C_k) \prod_{i=1}^n P(x_i|C_k)}{P(X)} \quad (12)$$

5) แบบจำลองซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน พารามิเตอร์ของแบบจำลองถูกตั้งค่า Kernel type = dot สำหรับการวิเคราะห์เคอร์เนลเชิงเส้น Kernel cache = 200 เพื่อกำหนดขนาดหน่วยความจำที่ใช้เก็บค่า kernel สำหรับการวิเคราะห์ SVM convergence epsilon = 0.001 การฝึกหยุดเมื่อความแตกต่างระหว่างค่าในการวนซ้ำปัจจุบัน และการวนซ้ำก่อนหน้านี้น้อยกว่าหรือเท่ากับ 0.001 และ Max iterations = 10,000 แบบจำลองจะฝึกซ้ำสูงสุด 10,000 ครั้ง ก่อนหยุดการฝึก (Dinesh et al., 2024) โดยมีกระบวนการดังสมการที่ (13) – (15)

$$\text{Decision Function} \quad f(x) = w^T x + b \quad (13)$$

$$\text{Optimization} \quad \min_{w,b} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - (w^T x_i + b))^2 \quad (14)$$

$$\text{Polynomial Kernel} \quad K(x, z) = (x^T z + c)^d \quad (15)$$

2.5 การวัดประสิทธิภาพของแบบจำลอง (Evaluation)

การวัดประสิทธิภาพแบบจำลอง เพื่อวัดว่าแบบจำลองมีประสิทธิภาพเพียงพอต่อการนำไปใช้งานหรือไม่ โดยนำชุดข้อมูลที่ใช้ในการฝึกฝนข้อมูล (Training data) กับแบบจำลองของการเรียนรู้ของเครื่อง เพื่อให้แบบจำลองสามารถเรียนรู้รูปแบบและความสัมพันธ์ในข้อมูล หลังจากการฝึกฝนข้อมูล แล้วแบบจำลองจะต้องถูกทดสอบข้อมูล (Testing data) เพื่อนำมาประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองในการจำแนกภาษาบาลีและสันสกฤตในภาษาไทย ประกอบด้วย

1) ค่าความถูกต้อง (Accuracy) การหาค่าความถูกต้องของแบบจำลอง ซึ่งจะพิจารณารวมทุก Class ที่เกี่ยวข้องมีสมการที่ (16)

$$\text{Accuracy} = \frac{\text{True Positive} + \text{True Negative}}{\text{True Positive} + \text{False Positive} + \text{True Negative} + \text{False Negative}} \quad (16)$$

2) ค่าความแม่นยำ (Precision) การหาค่าความแม่นยำของแบบจำลอง โดยพิจารณาแยกเป็นราย Class มีสมการที่ (17)

$$\text{Precision} = \frac{\text{True Positive}}{\text{True Positive} + \text{False Positive}} \quad (17)$$

3) ค่าความระลึก (Recall) การวัดค่าความถูกต้องของแบบจำลอง โดยพิจารณาแยกเป็นราย Class มีสมการที่ (18)

$$\text{Recall} = \frac{\text{True Positive}}{\text{True Positive} + \text{False Negative}} \quad (18)$$

4) ค่าความถ่วงดุล (F1-Score) การวัดค่า Precision และ Recall พร้อมกันของแบบจำลอง โดยพิจารณาแยกเป็นราย Class มีสมการที่ (19)

$$F1 - Score = \frac{2 \times Precision \times Recall}{Precision + Recall} \quad (19)$$

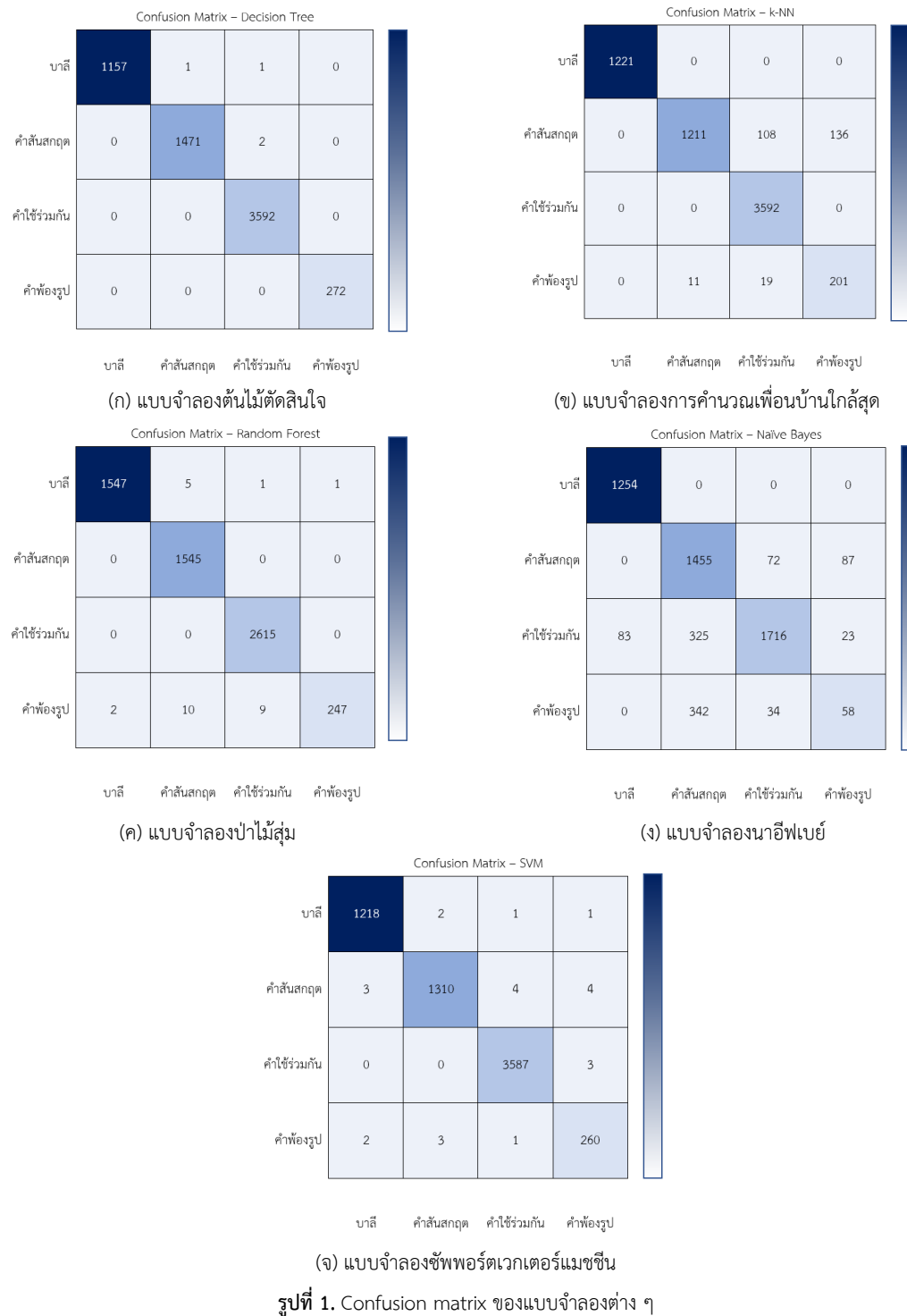
2.6 การนำแบบจำลองไปใช้งานจริง (Deployment)

การนำแบบจำลองไปใช้กับข้อมูลชุดทดสอบเพื่อประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลอง และปรับแต่งพารามิเตอร์ (Parameter optimization) โดยการปรับปรุงแบบจำลองผ่านการ Parameter tuning ด้วยวิธีการปรับพารามิเตอร์ที่ใช้ Cross-validation ช่วยในการทดสอบความแม่นยำของแบบจำลองในจำนวน K-fold ที่แตกต่างกันในแต่ละรอบ เพื่อป้องกันการ Overfitting โดยกำหนดให้ k=10 เพื่อสร้างความสมดุลระหว่าง Bias และ Variance เนื่องจาก Dataset มีขนาดของข้อมูลไม่สมดุล จึงปรับให้เหมาะสมด้วยการทดสอบหลายค่า และประสิทธิภาพการทำนายหรือผลลัพธ์ที่ดีที่สุด ก่อนนำแบบจำลองที่ฝึกเสร็จไปใช้งานจริงด้วยการนำเสนอแบบจำลองที่มีความแม่นยำที่ดีที่สุด และเหมาะสมสำหรับการจำแนกภาษาบาลีและสันสกฤตในภาษาไทยต่อไป

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพแบบจำลองการจำแนกภาษาบาลีและสันสกฤตในภาษาไทยด้วยเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง ประกอบด้วยแบบจำลองป่าไม้สุ่ม แบบจำลองต้นไม้ตัดสินใจ แบบจำลองการคำนวณเพื่อนบ้านใกล้สุด แบบจำลองนาอีฟเบย์ และแบบจำลองซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน ด้วยวิธีการ 10-fold cross validation และการวิเคราะห์หาประสิทธิภาพด้วยการหาค่า Accuracy ค่า Precision ค่า Recall และค่า F1-Score เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลอง ผลการวิเคราะห์พบว่าแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดคือ 1) แบบจำลองซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน มีค่า Accuracy เท่ากับร้อยละ 95.75 ค่า Precision เท่ากับร้อยละ 90.90 ค่า Recall เท่ากับร้อยละ 91.81 และค่า F1-Score เท่ากับร้อยละ 90.90 ตามผล Confusion matrix ดังรูปที่ 1(จ)

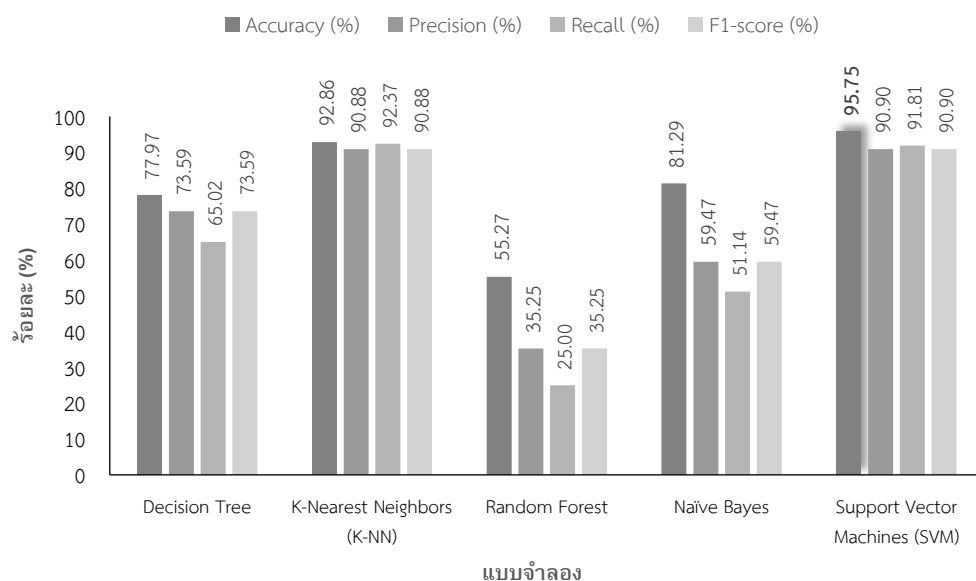
รองลงมาคือ 2) แบบจำลองการคำนวณเพื่อนบ้านใกล้สุด มีค่า Accuracy เท่ากับร้อยละ 92.86 ค่า Precision เท่ากับร้อยละ 90.88 ค่า Recall เท่ากับร้อยละ 92.37 และค่า F1-Score เท่ากับร้อยละ 90.88 ตามผล Confusion matrix ดังรูปที่ 1(ข) ถัดมาคือ 3) แบบจำลองนาอีฟเบย์ มีค่า Accuracy เท่ากับร้อยละ 81.29 ค่า Precision เท่ากับร้อยละ 59.47 ค่า Recall เท่ากับร้อยละ 51.14 และค่า F1-Score เท่ากับร้อยละ 59.47 ตามรูปที่ 1(ง) ถัดมาคือ 4) แบบจำลองต้นไม้ตัดสินใจ มีค่า Accuracy เท่ากับร้อยละ 77.97 ค่า Precision เท่ากับร้อยละ 73.59 ค่า Recall เท่ากับร้อยละ 65.02 และค่า F1-Score เท่ากับร้อยละ 73.59 ตามผล Confusion matrix ดังรูปที่ 1(ก) และสุดท้ายคือ 5) แบบจำลองป่าไม้สุ่ม มีค่า Accuracy เท่ากับร้อยละ 55.27 ค่า Precision เท่ากับร้อยละ 35.25 ค่า Recall เท่ากับร้อยละ 25.00 และค่า F1-Score เท่ากับร้อยละ 35.25 ตามผล Confusion matrix ดังรูปที่ 1(ค) ตามผลการเปรียบเทียบดังในตารางที่ 3



ตารางที่ 3. ผลการทดสอบประสิทธิภาพแบบจำลอง

Model	Accuracy (%)	Precision (%)	Recall (%)	F1-Score (%)
แบบจำลองต้นไม้ตัดสินใจ	77.97	73.59	65.02	73.59
แบบจำลองการคำนวณเพื่อนบ้านใกล้สุด	92.86	90.88	92.37	90.88
แบบจำลองป่าไม้สุ่ม	55.27	35.25	25.00	35.25
แบบจำลองนาอิวเบย์	81.29	59.47	51.14	59.47
แบบจำลองซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน	95.75	90.90	91.81	90.90

จากผลการทดลองข้อมูลที่ได้จากการวิเคราะห์สามารถสะท้อนถึงความเฉพาะตัว และความซับซ้อนของภาษาบาลีและสันสกฤตในภาษาไทย ซึ่งความแตกต่างระหว่าง 2 ภาษา คือ ที่มาของคำศัพท์ การใช้ในภาษาไทย และโครงสร้างทางไวยากรณ์ ทั้ง 2 ภาษานี้มีบทบาทสำคัญในการพัฒนาภาษาไทยและวัฒนธรรมไทยอย่างมาก ผลลัพธ์ดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า แบบจำลองซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนมีความสามารถในการจำแนกภาษาบาลีและสันสกฤตในภาษาไทยได้อย่างมีประสิทธิภาพมากที่สุด มีค่า Accuracy เท่ากับร้อยละ 95.75 ค่า Precision เท่ากับร้อยละ 90.90 ค่า Recall เท่ากับร้อยละ 91.81 และค่า F1-Score เท่ากับร้อยละ 90.90 เมื่อเทียบกับแบบจำลองอื่น ๆ ที่ใช้ในการทดลอง โดยแบบจำลองซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนมีความแม่นยำสูงและยังคงรักษาสมาดุลระหว่างค่าความแม่นยำ และความระลึก ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงความสามารถของแบบจำลองในการระบุข้อความที่เป็นภาษาที่ถูกต้องได้ โดยไม่เกิดการทำนายที่ผิดพลาด และได้การปรับปรุงแบบจำลองผ่านการ Parameter tuning โดยใช้ Cross-validation โดยใช้เทคนิค 10-fold cross-validation ในการประเมินผลช่วยลดปัญหาการ Overfitting และเพิ่มความน่าเชื่อถือของผลลัพธ์สำหรับการจัดการกับปัญหาที่มีลักษณะของข้อมูลเชิงภาษา (linguistic data) และการจำแนกประเภทของภาษาที่ใกล้เคียงกัน โดยผลลัพธ์นี้สามารถนำไปพัฒนาและประยุกต์ใช้ในการจำแนกภาษาอื่น ๆ หรืองานที่มีลักษณะคล้ายคลึงกันต่อไป ดังผลการเปรียบเทียบตามรูปที่ 2



รูปที่ 2. แผนภาพเปรียบเทียบประสิทธิภาพแบบจำลองการจำแนก

4. สรุปผลการวิจัย

การศึกษานี้มีจุดมุ่งหมายในการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองที่ใช้ในการจำแนกคำบาลีและสันสกฤตในภาษาไทย ด้วยเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง โดยเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองทั้ง 5 แบบ ได้แก่ แบบจำลองต้นไม้ตัดสินใจ แบบจำลองป่าไม้สุ่ม แบบจำลองเพื่อนบ้านใกล้เคียงที่สุด แบบจำลองนาอิวเบย์ และแบบจำลองซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน ผ่านกระบวนการตรวจสอบด้วยวิธี 10-fold cross-validation เพื่อประเมินความสามารถในการจำแนกคำของแต่ละแบบจำลอง

ผลการทดลองชี้ว่าแบบจำลองซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีนมีความสามารถสูงที่สุด โดยมีค่าความถูกต้องอยู่ที่ 95.75% และค่าความแม่นยำสูงสุดที่ 90.9% ขณะที่แบบจำลองป่าไม้สุ่มเป็นแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพต่ำที่สุด แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน มีศักยภาพในการจัดการกับความใกล้เคียงกันของภาษาบาลีและสันสกฤตในภาษาไทยได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งภาษาทั้งสองมีคำที่ใช้ร่วมกันจำนวนมากและอาจทำให้เกิดความสับสน การใช้เทคโนโลยีเข้ามาช่วยจำแนกจึงสามารถลดความคลาดเคลื่อนและเพิ่มความแม่นยำได้อย่างชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ ผลลัพธ์ของงานนี้สอดคล้องกับงานของ Brena et al. (2021) ที่ประยุกต์ใช้แบบจำลองซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน ในการจำแนกภาษาต่างประเทศ รวมทั้งงานของ Saputra et al. (2024) ซึ่งศึกษาการพัฒนาทักษะภาษาต่างประเทศผ่านการวิเคราะห์ด้วยโปรแกรม RapidMiner เช่นเดียวกับในงานนี้ นอกจากนี้ยังมีงานที่ใช้แบบจำลองซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน ในการวิเคราะห์ข้อมูลภาษาธรรมชาติที่มีความเฉพาะ เช่น การจำแนกข้อความในบันทึกบัญชีการเงิน อีกทั้งผลลัพธ์จากงานวิจัยนี้ยังตรงกับการศึกษาของ Wei (2024) ที่ใช้ SVM จำแนกข้อความระหว่างภาษาจีนและอังกฤษ ซึ่งยืนยันว่าแบบจำลองซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน

เหมาะสมกับภาษาโครงสร้างซับซ้อน เช่นเดียวกับงานของ Alzoubi et al. (2023) ที่นำมาใช้กับภาษาในตุรกี และ Maqsood et al. (2022) ที่ใช้ในการวิเคราะห์ความสามารถในการอ่านภาษาอังกฤษ นอกจากนี้แบบจำลองซัพพอร์ทเวกเตอร์แมชชีนยังถูกนำไปประยุกต์ใช้ในการวิเคราะห์พฤติกรรมมนุษย์ในมิติทางจิตวิทยา ผ่านการจำแนกข้อมูลอักษรที่มีรูปแบบคล้ายคลึงกันอีกด้วย ท้ายที่สุด งานของ Phann et al. (2023) ที่นำแบบจำลองซัพพอร์ทเวกเตอร์แมชชีนมาใช้กับภาษาเขมร ซึ่งได้รับอิทธิพลจากภาษาไทยก็สะท้อนให้เห็นถึงศักยภาพของแบบจำลองนี้ในการจำแนกภาษาต่างชาติ หรือภาษาที่มีความซับซ้อนสูงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้น ความสามารถของแบบจำลองซัพพอร์ทเวกเตอร์แมชชีนในการรักษาสมดุลระหว่างความแม่นยำและความครอบคลุมในการจำแนกจึงส่งผลให้เกิดผลลัพธ์ที่น่าเชื่อถือ ลดข้อผิดพลาดจากการทำนาย และเหมาะสมกับงานด้านภาษาศาสตร์

อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ยังพบข้อจำกัดบางประการ เช่น ประสิทธิภาพที่ต่ำกว่าของแบบจำลองป่าไม้สุ่ม ซึ่งอาจมาจากการจัดการกับข้อมูลภาษาศาสตร์ที่ซับซ้อนได้ไม่ดีพอ อีกทั้งการเลือกใช้พารามิเตอร์และข้อมูลยังมีความสำคัญต่อผลลัพธ์ แม้การทำ Cross-validation จะช่วยลดความเสี่ยงของ Overfitting ได้ในระดับหนึ่งก็ตาม ดังนั้นการใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องในงานวิจัยภาษาศาสตร์ลักษณะนี้จึงมีความเหมาะสมกับข้อมูลขนาดไม่ใหญ่และไม่ซับซ้อนมาก ทำให้สามารถอธิบายผลลัพธ์ได้อย่างชัดเจน ทั้งนี้ในอนาคตสามารถขยายการวิจัยไปยังข้อมูลที่มีขนาดใหญ่ขึ้น หรือประยุกต์ใช้การเรียนรู้เชิงลึก เพื่อศึกษาความสามารถเปรียบเทียบของเทคนิคประมวลผลภาษาธรรมชาติให้แม่นยำยิ่งขึ้น รวมถึงนำข้อมูลที่ได้ไปพัฒนาเครื่องมือด้านการสอนภาษา การแปลภาษา และขยายผลไปสู่การศึกษาภาษาต่างประเทศอื่น ๆ ซึ่งจะช่วยส่งเสริมการวิจัยทั้งในด้านภาษาศาสตร์ และเทคโนโลยีการเรียนรู้ของเครื่องอย่างมีประสิทธิภาพตลอดจนสร้างคลังข้อมูลคำบาลีและสันสกฤตในภาษาไทยสำหรับใช้งานในอนาคตต่อไป

เอกสารอ้างอิง (References)

- Alzoubi, Y. I., Topcu, A. E., & Erkaya, A. E. (2023). Machine learning-based text classification comparison: Turkish language context. *Applied Sciences*, 13(16), Article 9428. <https://doi.org/10.3390/app13169428>
- Bradley, D. (2024). Sociolinguistics in Mainland Southeast Asia. In M. J. Ball, R. Mesthrie & C. Meluzzi (Eds.), *The Routledge handbook of sociolinguistics around the world* (2nd ed., pp. 227-237). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9781003198345-21>
- Brena, R. F., Zuvirie, E., Preciado, A., Valdiviezo, A., Gonzalez-Mendoza, M., & Zozaya-Gorostiza, C. (2021). Automated evaluation of foreign language speaking performance with machine learning. *International Journal on Interactive Design and Manufacturing (IJDeM)*, 15(2), 317-331. <https://doi.org/10.1007/s12008-021-00759-z>
- Dinesh, P., Vickram, A. S., & Kalyanasundaram, P. (2024). Medical image prediction for diagnosis of breast cancer disease comparing the machine learning algorithms: SVM,

- KNN, logistic regression, random forest and decision tree to measure accuracy. *AIP Conference Proceedings*, 2853(1). Article 020140. <https://doi.org/10.1063/5.0203746>
- Duraiswamy, D. (2024). Cultural and trade links between India and Siam: Their impact on the Maritime Silk Road. *Acta Via Serica*, 9(1), 67-90.
<https://doi.org/10.22679/avs.2024.9.1.003>
- Gudadhe, S. R., Bardekar, A. A., & Ranit, A. B. (2024). Integrating machine learning and NLP: Efficient retrieval of characters in Pali script preservation. *Juni Khyat Journal (जूनी ख्यात)*, 14(4), 94-103.
- Hemal, S. H., Khan, M. A. R., Ahammad, I., Rahman, M., Khan, M. A. S. D., & Ejaz, S. (2024). Predicting the impact of internet usage on students' academic performance using machine learning techniques in Bangladesh perspective. *Social Network Analysis & Mining*, 14(1), Article 66. <https://doi.org/10.1007/s13278-024-01234-9>
- Joshi, A., Dabre, R., Kanojia, D., Li, Z., Zhan, H., Haffari, G., & Dippold, D. (2024). *Natural language processing for dialects of a language: A survey*. arXiv.
<https://doi.org/10.48550/arXiv.2401.05632>
- Kaewpanitch, C., & Tongngam, S. (2020). Analysis of key features affecting the effectiveness of English language learning among undergraduate students utilizing the data mining techniques. *NIDA Development Journal*, 60(1-2), 1-29. (in Thai)
- Kanraweekultana, N., Waijanya, S., Promrit, N., Nopnapaporn, U., Korsanan, A., & Poolphol, S. (2024). Comparison of capability of data classification models to predict consistent results for depression analysis based on user-behaviour tracking and facial expression recognition during PHQ-9 assessment. *Engineering and Applied Science Research*, 51(1), 11-21. <https://doi.org/10.14456/easr.2024.2>
- Kashif, K., Alwan, A., Wu, Y., De Nardis, L., & Di Benedetto, M. G. (2024). MKELM based multi-classification model for foreign accent identification. *Heliyon*, 10(16), Article e36460. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2024.e36460>
- Khairy, M., Mahmoud, T. M., Omar, A., & Abd El-Hafeez, T. (2024). Comparative performance of ensemble machine learning for Arabic cyberbullying and offensive language detection. *Language Resources and Evaluation*, 58(2), 695-712.
<https://doi.org/10.1007/s10579-023-09683-y>
- Li, A. (2024). Nominalizations and its grammaticalization in Standard Thai. *Folia Linguistica*, 58(2), 449-481. <https://doi.org/10.1515/flin-2024-2006>
- Makayasa, B. A., Siregar, M. U., Sugiantoro, B., & Fatwanto, A. (2024). Comparison of classification algorithm and language model in accounting financial transaction record: A natural language processing approach. *International Journal on Advanced*

- Science, Engineering & Information Technology*, 14(3), 1044-1052.
<https://doi.org/10.18517/ijaseit.14.3.19179>
- Maqsood, S., Shahid, A., Afzal, M. T., Roman, M., Khan, Z., Nawaz, Z., & Aziz, M. H. (2022). Assessing English language sentences readability using machine learning models. *PeerJ Computer Science*, 8, Article e818. <https://doi.org/10.7717/peerj-cs.818>
- Modhugu, V. R., & Ponnusamy, S. (2024). Comparative analysis of machine learning algorithms for liver disease prediction: SVM, logistic regression, and decision tree. *Asian Journal of Research in Computer Science*, 17(6), 188-201.
<https://doi.org/10.9734/ajrcos/2024/v17i6467>
- Mousa, A., Shahin, I., Nassif, A. B., & Elnagar, A. (2024). Detection of Arabic offensive language in social media using machine learning models. *Intelligent Systems with Applications*, 22, Article 200376. <https://doi.org/10.1016/j.iswa.2024.200376>
- Perroni, M. G., Veiga, C. P. D., Forteski, E., Marconatto, D. A. B., da Silva, W. V., Senff, C. O., & Su, Z. (2024). Integrating relative efficiency models with machine learning algorithms for performance prediction. *SAGE Open*, 14(2), Article 21582440241257800. <https://doi.org/10.1177/21582440241257800>
- Phann, R., Soomlek, C., & Seresangtakul, P. (2023). Multi-class text classification on Khmer news using ensemble method in machine learning algorithms. *Acta Informatica Pragensia*, 12(2), 243-259. <https://doi.org/10.18267/j.aip.210>
- Saechan, A., & Ruangjaroon, S. (2024). *The influences of orthographic forms, stress placement and consonantal manners on syllabification and acoustic durations of intervocalic consonants with geminate graphemes by Thai L2 speakers of English* [Doctoral dissertation, Srinakharinwirot University]. Srinakharinwirot University. <http://ir-ithesis.swu.ac.th/dspace/handle/123456789/2717>
- Saputra, N., Antoni, R., Widodo, A., Solissa, E. M., & Arief, I. (2024). Improving foreign language proficiency in society by decision tree classification. *AIP Conference Proceedings*, 3001(1), Article 070006. <https://doi.org/10.1063/5.0183888>
- Tammanam, K., Promrit, N., & Waijanya, S. (2021). A hybrid approach to Pali Sandhi segmentation using BiLSTM and rule-based analysis. *Engineering and Applied Science Research*, 48(5), 614-626. <https://doi.org/10.14456/easr.2021.63>
- Wang, Z., Pang, Y., & Lin, Y. (2024). *Smart expert system: Large language models as text classifiers*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2405.10523>
- Wei, Y. (2024). Chinese and English text classification techniques incorporating CHI feature selection for ELT cloud classroom. *Open Computer Science*, 14(1), Article 20240007. <https://doi.org/10.1515/comp-2024-0007>

- Zhang, C., Hofmann, F., Plößl, L., & Gläser-Zikuda, M. (2024). Classification of reflective writing: A comparative analysis with shallow machine learning and pre-trained language models. *Education and Information Technologies*, 29, 21593-21619. <https://doi.org/10.1007/s10639-024-12720-0>
- Zhong, X., Jin, C., An, M., & Cambria, E. (2024). XTime: A general rule-based method for time expression recognition and normalization. *Knowledge-Based Systems*, 297, Article 111921. <https://doi.org/10.1016/j.knosys.2024.111921>

การวางแผนตารางเวลาเพื่อเป็นแนวทางตัดสินใจ ลงทะเบียนเรียนในหลักสูตร Planning a Timetable for Deciding to Registration in Course

ศุภาพิชญ์ เครือศรี ภัทรวรินทร์ ทองคำตอน มณิส สุดาวัน และ รวินทร์ ยังน้อย*

Supapich Kruesri Phatthawarin Thongkamton Manisa Sudawan and Rawin Youngnoi*

สาขาวิชาคณิตศาสตร์และสถิติ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ จ.ปทุมธานี ประเทศไทย

Department of Mathematics and Statistics, Faculty of Science and Technology,

Thammasat University, Pathum Thani, Thailand

วันที่ส่งบทความ : 18 กุมภาพันธ์ 2568 วันที่แก้ไขบทความ : 12 มิถุนายน 2568 วันที่ตอบรับบทความ : 14 มิถุนายน 2568

Received: 18 February 2025, Revised: 12 June 2025, Accepted: 14 June 2025

บทคัดย่อ

การวางแผนตารางเรียนด้วยตนเองเป็นกระบวนการที่ซับซ้อนและยุ่งยาก เนื่องจากในแต่ละหลักสูตรมีข้อบังคับในการลงทะเบียนที่แตกต่างกัน งานวิจัยนี้ศึกษาและแก้ไขปัญหการจัดตารางเรียนในมหาวิทยาลัย (University Course Timetabling Problem: UCTP) โดยประยุกต์ใช้ปัญหาคำหนดการเชิงจำนวนเต็ม (Integer Programming Problem: IP) ในการสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์ เพื่อแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุด (Optimization problem) และจัดการกับข้อจำกัดที่ซับซ้อน วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือการเสนอแนวทางการลงทะเบียน และสร้างตารางเรียนที่ทำให้ผู้เรียนสามารถสำเร็จการศึกษาตามหลักสูตรได้ในเวลาที่สั้นที่สุด ผลการศึกษารูปได้ว่าการวางแผนตารางเรียนจากงานวิจัยนี้ทำให้ตารางเรียนที่ได้ช่วยให้ผู้เรียนสามารถศึกษาครบตามหลักสูตรได้ในระยะเวลาสั้นที่สุด ซึ่งจากการศึกษาดังกล่าวเป็นเพียงการเสนอแนวทางการลงทะเบียนเพียงเท่านั้น อย่างไรก็ตามการจัดตารางเรียนยังต้องมีการคำนึงถึงปัจจัยด้านอื่น ๆ ด้วย เพื่อเป็นองค์ประกอบในการตัดสินใจที่เหมาะสมสำหรับแต่ละบุคคล

คำสำคัญ : ปัญหาการจัดตารางในมหาวิทยาลัย ปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุด ปัญหาการกำหนดการเชิงจำนวนเต็ม

Abstract

The manual scheduling of university courses is a complex and challenging process due to the diverse registration requirements across academic programs. This research investigates the University Course Timetabling Problem (UCTP) by applying Integer Programming Problem (IP) models to construct mathematical formulations for solving

*ที่อยู่ติดต่อ E-mail address: yrawin@tu.ac.th

<https://doi.org/10.55003/scikmitl.2025.266381>

optimization problems and managing intricate constraints. The primary objective is to propose a systematic course registration methodology and develop timetables that enable students to complete their academic programs in the shortest possible duration. The findings reveal that the proposed timetable planning approach effectively reduces scheduling complexity and facilitates students' timely completion of their courses. This study provides a guideline for course registration. However, class scheduling should also consider additional factors to ensure appropriate and individualized decision-making.

Keywords: University Course Timetabling Problem, Optimization problem, Integer Programming Problem

1. บทนำ

การจัดตารางเรียนตารางสอน คือ การจัดการทรัพยากรภายในข้อจำกัด เช่น ระยะเวลาในการจัดตารางเรียน ช่วงระยะเวลาการเปิดสอนของแต่ละรายวิชา จำนวนห้องเรียน จำนวนอาจารย์ผู้สอน ตลอดจนเงื่อนไขต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องตามข้อกำหนดของมหาวิทยาลัย (Yaemcharone, 2017) เพื่อไม่ให้เกิดการจัดตารางซ้ำในระยะเวลาเดียวกัน ปัญหาการจัดตารางสอนมีความซับซ้อนอย่างมาก ทำให้การจัดตารางด้วยคนต้องใช้เวลาและอาจเกิดเหตุผิดพลาด (Maneengam et al., 2022) ซึ่งงานวิจัยส่วนใหญ่พบว่า มีเทคนิคหลากหลายที่นำมาใช้เพื่อแก้ปัญหาการจัดตาราง โดยเฉพาะการเลือกใช้ปัญหากำหนดการเชิงจำนวนเต็ม (Integer Programming Problem: IP) มาเป็นเครื่องมือในการช่วยแก้ปัญหา โดยกำหนดฟังก์ชันจุดประสงค์ (Objective function) และข้อจำกัด (Constraints) ที่มีผลเฉลยเป็นจำนวนเต็มทั้งหมดสำหรับนำไปแก้ปัญหาเพื่อหาคำตอบที่ดีที่สุดภายใต้ข้อจำกัดและลักษณะเฉพาะของปัญหา

มีงานวิจัยจำนวนมากได้ศึกษากำหนดการเชิงจำนวนเต็มเพื่อนำมาแก้ปัญหาในมหาวิทยาลัย โดย Anwar & Bahaj (2003) นำเสนอการใช้กำหนดการเชิงจำนวนเต็มในการจัดสรรโครงการให้นักศึกษา โดยต้องการใช้จำนวนของอาจารย์ที่ปรึกษาโครงการให้น้อยที่สุด ในขณะที่นักศึกษาได้หัวข้อโครงการที่ต้องการให้มากที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของกำหนดการเชิงจำนวนเต็มในการจัดการกับข้อจำกัดและเป้าหมายที่หลากหลาย ต่อมา Daskalaki et al. (2004) ได้นำกำหนดการเชิงจำนวนเต็มมาช่วยจัดตารางเวลาในมหาวิทยาลัย และในปีต่อมา Daskalaki & Birbas (2005) ได้นำเสนอวิธีการแก้ปัญหาที่มีประสิทธิภาพสำหรับการจัดตารางเวลาในมหาวิทยาลัยโดยใช้กำหนดการเชิงจำนวนเต็ม

ต่อมา MirHassani (2006) ได้นำเสนอวิธีการคำนวณเพื่อปรับปรุงการจัดตารางเวลาหลักสูตรโดยใช้กำหนดการเชิงจำนวนเต็ม เพื่อไม่ให้แต่ละวิชาเรียนมีเวลาที่ซ้อนทับกัน และไม่ใช้ห้องเรียนชนกับวิชาเรียนอื่น ในขณะที่ Vendla (2012) ได้ใช้กำหนดการเชิงจำนวนเต็มทวิภาค (Mixed integer linear programming) เพื่อศึกษาการจัดตารางเวลาการใช้ทรัพยากรในการสอนและชั้นเรียน เช่น ห้องเรียน ครูผู้สอน รวมถึงสิ่งอื่น ๆ ที่ต้องใช้ในการเรียนการสอน เป็นต้น

Borges et al. (2014) ได้นำเสนอแบบจำลองกำหนดการเชิงจำนวนเต็มสำหรับการจัดตารางเวลาหลักสูตรในมหาวิทยาลัย โดยใช้กรณีศึกษาการจัดรายวิชาและเวลาให้ตรงกับความต้องการของผู้สอน ในปีต่อมา Beros & Meter (2015) ได้พัฒนาแบบจำลองโดยใช้กำหนดการเชิงจำนวนเต็ม เพื่อจัดวิชาเลือก

ให้กับนักศึกษาตามความต้องการของนักศึกษา โดยจะพยายามจัดเพื่อทำให้ความพึงพอใจรวมของนักศึกษามากที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการนำกำหนดการเชิงจำนวนเต็มมาแก้ปัญหาการเลือกวิชาของนักศึกษา

จากนั้น Feng et al. (2017) ได้กำหนดการเชิงจำนวนเต็มทวิภาคและระเบียบวิธีพันธุกรรมแบบผสม (Hybrid genetic algorithm) เพื่อแก้ปัญหาการจัดตารางเวลาสำหรับวิชาเรียนที่มีหลายห้อง ซึ่งเป็นรูปแบบการเรียนที่พบได้ในมหาวิทยาลัยในเอเชียตะวันออก จากการทดสอบพบว่า การผสมผสานวิธีการเชิงคณิตศาสตร์และวิธีการเชิงฮิวริสติก (Heuristic) เพื่อให้ได้ผลลัพธ์ที่ดีขึ้น นอกจากนี้ Colajanni (2019) ได้นำเสนอการกำหนดรูปแบบโปรแกรมจำนวนเต็มสำหรับการจัดตารางเวลาหลักสูตรในมหาวิทยาลัย โดยเน้นที่การจัดการกับข้อจำกัดที่หลากหลายและซับซ้อนของระบบการศึกษา

Urbán Rivero et al. (2020) ได้นำเสนอแบบจำลองสำหรับปัญหาการจัดสรรห้องเรียนในปี ค.ศ. 2020 และ Yuan (2023) ได้นำเสนอแบบจำลองสำหรับปัญหาการจัดตารางเวลาหลักสูตรในมหาวิทยาลัย ซึ่งต้องการทำให้ผู้สอนมีความพึงพอใจในช่วงเวลาสอนมากที่สุด ในขณะที่ลดช่วงเวลาที่จะทำให้เกิดการใช้ห้องเรียนไม่ได้ ในปีต่อมา Majdoub et al. (2024) ได้นำเสนอแบบจำลองสำหรับการคัดเลือกนักศึกษาในสถาบันอุดมศึกษาในปี ค.ศ. 2024 โดยใช้ชั้นเรียนเตรียมวิศวกรรมเป็นกรณีศึกษา โดยคำนึงถึงคุณสมบัติทางการศึกษาของผู้สมัคร ทักษะที่จำเป็น และความต้องการของผู้สมัคร

นอกจากนี้ระบบแนะนำวิชาเรียน (Course recommendation systems) เป็นอีกหัวข้อหนึ่งที่กำลังได้รับความสนใจ โดย Nguyen et al. (2021) ได้อาศัยเหมืองข้อมูลและเทคนิคของระบบวิเคราะห์สไลด์การเรียนรู้เฉพาะบุคคล (Learning analytics techniques) นำเสนอระบบแนะนำวิชาเรียนในภาคการศึกษาถัดไปโดยอิงจากผลการเรียนของผู้เรียน และ Van Deventer et al. (2024) ได้ใช้โมเดลภาษาขนาดใหญ่ (Large Language Model: LLM) สำหรับการแนะนำหลักสูตรแก่ผู้เรียน โดยพยายามเลือกหลักสูตรที่มีรายละเอียดที่ตรงกับสิ่งที่ผู้เรียนค้นหาให้มากที่สุด

แต่ถึงแม้จะมีเทคนิคและเครื่องมือที่หลากหลายให้เลือกใช้ในการจัดสรรทรัพยากร แต่ด้วยข้อจำกัดในด้านเวลา บางสถาบันจึงใช้คนในการจัดการทำให้เสียเวลาและขาดประสิทธิภาพ โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับตารางเรียนของนักศึกษานั้น หากผู้เรียนลงทะเบียนเรียนตามแผนการศึกษาที่ทางหลักสูตรกำหนดไว้ และสามารถผ่านทุกรายวิชาตามลำดับ ก็จะไม่พบปัญหามากในการจัดตารางเรียน แต่หากมีการเพิกถอนรายวิชาออกหรือผู้เรียนไม่สามารถเรียนวิชานั้นผ่าน ผู้เรียนจะต้องปรับแผนการเรียนใหม่ด้วยตัวเอง โดยแผนการเรียนนั้นต้องสอดคล้องกับโครงสร้างของหลักสูตร ซึ่งต้องมีการตรวจสอบเงื่อนไขของแต่ละรายวิชาเพื่อให้สอดคล้องกับผลการศึกษาที่ผ่านมา เช่น สาขาวิชาคณิตศาสตร์ประยุกต์ หลักสูตรปรับปรุง 2561 (Department of Mathematics and Statistics, Thammasat University, n.d.) หากผู้เรียนต้องการลงทะเบียนวิชา AM201 และ AM311 จะต้องผ่านวิชา AM102 ก่อน หากเกิดการเพิกถอนรายวิชา AM102 ส่งผลให้ผู้เรียนไม่สามารถลงทะเบียนเรียนในวิชาต่อเนื่องเหล่านี้ได้ นอกจากนี้ อาจมีกรณีที่บางวิชาเปิดสอนเพียงหนึ่งภาคการศึกษาเท่านั้น เมื่อถอนรายวิชานั้นแล้วจะกระทบกับแผนการศึกษาเดิมทั้งหมด ซึ่งส่งผลให้ต้องปรับแผนการเรียนใหม่ทั้งหมด ทำให้การจัดตารางเรียนด้วยตนเองมีความซับซ้อนและเสี่ยงที่จะเกิดข้อผิดพลาดได้ง่าย

ด้วยเหตุนี้ คณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะเป็นส่วนหนึ่งในการเสนอแนะทางการจัดตารางเรียนสำหรับผู้เรียน โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอตัวแบบทางคณิตศาสตร์เพื่อจำลองโครงสร้างของหลักสูตร

คณิตศาสตร์ประยุกต์ ภาควิชาคณิตศาสตร์และสถิติ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ หรือหลักสูตรอื่น ๆ ที่มีโครงสร้างเช่นเดียวกัน เช่น วิชาบังคับ วิชาเลือก วิชาที่ต้องเรียนก่อน วิชาที่ต้องเรียนควบคู่กัน และระบุจำนวนหน่วยกิตที่สามารถลงทะเบียนได้ในแต่ละภาคการศึกษา เป็นต้น โดยตัวแบบทางคณิตศาสตร์นี้เป็นการเสนอแนวทางการลงทะเบียนเรียนในมหาวิทยาลัย ซึ่งนำเสนอตารางเรียนที่ช่วยให้ผู้เรียนนั้นสามารถสำเร็จการศึกษาตามหลักสูตรได้ในเวลาที่สั้นที่สุด

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 ขั้นตอนการทำงาน

งานวิจัยนี้แบ่งการดำเนินงานออกเป็น 4 ขั้นตอน โดยนำการจัดการข้อมูลความสัมพันธ์ของรายวิชาทั้งหมดตามหลักสูตรและหลักการทางคณิตศาสตร์มาปรับใช้ เพื่อวิเคราะห์และสร้างตัวแบบที่สอดคล้องกับปัญหาหรือข้อบังคับที่ต้องการ รวมถึงนำโปรแกรม MATLAB มาประยุกต์ใช้เพื่อคำนวณและประมวลผลข้อมูล ทำให้สามารถจัดรูปแบบการแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุด โดยการดำเนินงานแต่ละขั้นตอนจะอธิบายรายละเอียด ดังต่อไปนี้

ขั้นตอนที่ 1 : การเก็บข้อมูล

การเก็บรวบรวมข้อมูลในหลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาคณิตศาสตร์ประยุกต์ (หลักสูตรปรับปรุง พ.ศ. 2561) (Department of Mathematics and Statistics, Thammasat University, n.d.) ประกอบด้วย ชื่อรายวิชา จำนวนหน่วยกิตแต่ละวิชา ความสัมพันธ์ระหว่างวิชา และช่วงเวลาของแต่ละวิชาเปิดให้ลงทะเบียนเรียน โดยเก็บข้อมูลจากเว็บไซต์ของสำนักทะเบียนนักศึกษา มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (Office of the Registrar, Thammasat University, n.d.) และข้อมูลถูกจัดเก็บในรูปแบบที่สามารถนำไปประมวลผลได้ง่าย เพื่อให้พร้อมสำหรับการนำเข้าสู่ข้อมูลสู่โปรแกรม

ขั้นตอนที่ 2 : การสร้างตัวแบบทางคณิตศาสตร์

การวิเคราะห์และจัดการข้อบังคับของหลักสูตรให้อยู่ในรูปของตัวแบบทางคณิตศาสตร์ การสร้างตัวแบบ ประกอบด้วย 1) ฟังก์ชันจุดประสงค์ คือ การลงทะเบียนจำนวนหน่วยกิตให้มากที่สุดต่อภาคการศึกษา หรือลดจำนวนหน่วยกิตที่ต้องลงทะเบียนให้เหลือน้อยที่สุด และ 2) ข้อจำกัด คือ เงื่อนไขในการลงทะเบียนของทางมหาวิทยาลัย และเงื่อนไขตามแต่ละหลักสูตรเพื่อสำเร็จการศึกษา ทั้งข้อบังคับสำหรับแต่ละรายวิชา วิชาที่ถูกบังคับให้ลงทะเบียนเรียนตามหลักสูตร เป็นต้น

ขั้นตอนที่ 3 : การหาผลเฉลย

ทางคณะผู้วิจัยใช้ MATLAB เป็นเครื่องมือหลักสำหรับการประมวลผล โดยใช้ข้อมูลที่จัดเตรียมไว้ในรูปแบบไฟล์บน Google Sheets และนำเข้า MATLAB เพื่อใช้แก้ปัญหาทางคณิตศาสตร์ในรูปแบบปัญหาการหาค่าเหมาะสมที่สุด ซึ่ง MATLAB มี Optimization toolbox เพื่อใช้สำหรับแก้เพื่อแก้ปัญหาที่เหมาะสมที่สุดได้อย่างมีประสิทธิภาพ

ขั้นตอนที่ 4 : การวิเคราะห์ผลลัพธ์และสรุปผล

ผลลัพธ์ออกมาในรูปของตารางเรียนที่เป็นไปตามฟังก์ชันจุดประสงค์และข้อจำกัดที่กำหนดไว้ โดยพิจารณาว่าตารางเรียนที่สร้างขึ้นตรงตามข้อกำหนดของหลักสูตรและช่วยให้การลงทะเบียนของผู้เรียนมี

ประสิทธิภาพมากขึ้น นอกจากนี้ยังพิจารณาความเป็นไปได้ในการนำไปใช้งานจริง เพื่อให้มั่นใจว่าตารางเรียนที่ได้สามารถช่วยลดความซับซ้อนของกระบวนการลงทะเบียนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

2.2 ข้อมูลหลักสูตร

ข้อมูลการลงทะเบียนเรียนในมหาวิทยาลัย ผู้เรียนต้องลงทะเบียนในแต่ละภาคการศึกษาขั้นต่ำ 9 หน่วยกิต และไม่เกิน 22 หน่วยกิต หน่วยกิตรวมตลอดหลักสูตร 133 หน่วยกิต ประกอบด้วย

1) วิชาเฉพาะ	97 หน่วยกิต
2) วิชาแกน	49 หน่วยกิต
3) วิชาเฉพาะด้าน	48 หน่วยกิต
4) วิชาบังคับ	33 หน่วยกิต
5) วิชาโทในสาขา	15 หน่วยกิต
6) ศึกษาทั่วไป	30 หน่วยกิต
7) วิชาเลือกเสรี	6 หน่วยกิต

2.3 ความสัมพันธ์ของรายวิชา

ความสัมพันธ์ของวิชาในหลักสูตรคณิตศาสตร์ประยุกต์ หลักสูตรปรับปรุง 2561 มีทั้งหมด 3 กรณี ได้แก่

- 1) กรณีสอบได้ คือ รายวิชาที่ศึกษาแล้วได้เกรด D ขึ้นไป
- 2) กรณีเคยศึกษา คือ รายวิชาที่ศึกษาแต่ได้เกรด F

3) กรณีศึกษาพร้อม คือ รายวิชาที่ศึกษาพร้อมกัน 2 วิชา หรือสามารถลงเรียนวิชาที่ทางหลักสูตรกำหนดก่อนหน้าเพียง 1 วิชาก่อนได้

2.4 ตัวอย่างการใช้ข้อมูลรูปแบบเมทริกซ์

ตัวอย่างการเก็บข้อมูลความสัมพันธ์ของแต่ละรายวิชาในหลักสูตรถูกจัดเก็บในรูปแบบของตารางหรือเมทริกซ์ โดยการแสดงรูปแบบและการอ่านความหมายของความสัมพันธ์เมทริกซ์ อธิบายได้ดังนี้

กรณีสอบได้ : การจัดเก็บข้อมูลในรูปแบบของเมทริกซ์สอบได้ แสดงตัวอย่างดังตารางที่ 1 โดยที่ค่าในตารางมีความหมายดังนี้ 1 หมายถึง จะต้องสอบได้วิชาในหลักนั้นเพื่อจะลงทะเบียนวิชาในแถวนั้น และ 0 หมายถึง ไม่จำเป็นต้องสอบได้วิชาในหลักนั้นเพื่อจะลงทะเบียนวิชาในแถวนั้น ยกตัวอย่างเช่น หากต้องการลงทะเบียนเรียนวิชา AM451 จะต้องสอบได้วิชา AM200 ก่อน และหากต้องการลงทะเบียนเรียนวิชา AM331 จะต้องสอบได้วิชา AM201 ก่อน

ตารางที่ 1. เมทริกซ์ความสัมพันธ์สอบได้

วิชาที่ลงทะเบียน	วิชาบังคับ			
	AM100	AM200	AM201	AM241
AM331	0	0	1	0
AM341	0	0	0	0
AM360	0	0	0	0
AM451	0	1	0	0

กรณีศึกษา : การจัดเก็บข้อมูลในรูปแบบของเมทริกซ์การศึกษา แสดงตัวอย่างดังตารางที่ 2 โดยที่ค่าในตารางมีความหมายดังนี้ 1 หมายถึง จะต้องศึกษาวิชาในหลักนั้นเพื่อจะลงทะเบียนวิชาในแถวนั้น และ 0 หมายถึง ไม่จำเป็นต้องศึกษาวิชาในหลักนั้นเพื่อจะลงทะเบียนวิชาในแถวนั้น ยกตัวอย่างเช่น หากผู้เรียนต้องการลงทะเบียนเรียนวิชา SC173 จะต้องศึกษาวิชา SC123 และหากผู้เรียนต้องการลงทะเบียนเรียนวิชา ST226 จะต้องศึกษาวิชา AM102

ตารางที่ 2. เมทริกซ์ความสัมพันธ์การศึกษา

วิชาที่ลงทะเบียน	วิชาบังคับ			
	AM102	SC123	SC173	ST226
AM102	0	0	0	0
SC123	0	0	0	0
SC173	0	1	0	0
ST226	1	0	0	0

กรณีศึกษาพร้อม : การจัดเก็บข้อมูลในรูปแบบของเมทริกซ์ศึกษาพร้อม แสดงตัวอย่างดังตารางที่ 3 โดยที่ค่าในตารางมีความหมายดังนี้ 1 หมายถึง จะต้องลงทะเบียนวิชาในหลักนั้นเพื่อจะลงทะเบียนวิชาในแถวนั้น และ 0 หมายถึง ไม่จำเป็นต้องลงทะเบียนวิชาในหลักนั้นเพื่อจะลงทะเบียนวิชาในแถวนั้น ยกตัวอย่างเช่น หากผู้เรียนต้องการลงทะเบียนวิชา SC165 จะต้องลงทะเบียนพร้อมกับวิชา SC115 หรือสามารถลงทะเบียนวิชา SC115 เพียงตัวเดียวได้ และหากผู้เรียนต้องการลงทะเบียนวิชา MA381 จะต้องลงทะเบียนพร้อมกับวิชา MA351 หรือสามารถลงทะเบียนวิชา MA351 เพียงตัวเดียวได้

ตารางที่ 3. เมทริกซ์ความสัมพันธ์ศึกษาพร้อม

วิชาที่ลงทะเบียน	วิชาบังคับ			
	SC115	SC165	MA351	MA381
SC115	0	0	0	0
SC165	1	0	0	0
MA351	0	0	0	0
MA381	0	0	1	0

2.5 กำหนดช่วงระยะเวลา

ในการสร้างตัวแบบและการประมวลผลสมมติตารางเวลาเพื่อความสะดวกในการประมวลผลและใช้งาน ซึ่งมีการกำหนดเวลาดังนี้ T_1, T_2, T_3, T_4, T_5 และ T_6 แทน ระยะเวลา 08:00-09:30 น. 09:30-11:00 น. 11:00-12:30 น. 12:30-13:30 น. 13:30-15:00 น. และ 15:00-16:30 น. ตามลำดับ โดยกำหนดตัวเลขแทนตารางเวลาแต่ละช่วงเวลา ซึ่งแสดงดังตารางที่ 4 สามารถอธิบายความหมายตามตารางตัวอย่างบางช่วงเวลาได้ว่า ช่วงเวลาที่ 1 คือ คาบเรียนวันจันทร์ เวลา 08:00-09:30 น. และช่วงเวลาที่ 2 คือ คาบเรียนวันจันทร์ เวลา 09:30-11:00 น. เป็นต้น

ตารางที่ 4. ตารางเวลาแต่ละช่วงเวลา

วัน	เวลา					
	T_1	T_2	T_3	T_4	T_5	T_6
จันทร์	1	2	3	4	5	6
อังคาร	7	8	9	10	11	12
พุธ	13	14	15	16	17	18
พฤหัสบดี	19	20	21	22	23	24
ศุกร์	25	26	27	28	29	30
เสาร์	31	32	33	34	35	36

2.6 ช่วงเวลาที่เปิดสอน

ข้อมูลในส่วนนี้แสดงช่วงเวลาการเปิดสอนของแต่ละวิชาในแต่ละภาคการศึกษา พร้อมระบุหน่วยกิตของแต่ละวิชาอย่างชัดเจน โดยมีตัวอย่างข้อมูลแสดงดังตารางที่ 5 ซึ่งประกอบไปด้วยลำดับวิชา รหัสวิชา หน่วยกิต และช่วงเวลา (ซึ่งได้กำหนดไว้ในหัวข้อที่ 2.5) ที่เปิดสอนในภาคการศึกษา 1 และภาคการศึกษา 2

ตารางที่ 5. ข้อมูลชื่อวิชา หน่วยกิตและช่วงเวลา

ลำดับ	รหัสวิชา	หน่วยกิต	ภาคการศึกษา	
			1	2
1	AM101	3	8, 20	13, 25
2	ST211	3	15, 27	15, 27
3	CS103	3	14, 26	-
4	SC123	3	13, 25	13, 25
5	SC173	1	2, 3	2, 3

2.7 สมมติฐานและข้อกำหนดของตัวแบบทางคณิตศาสตร์

2.7.1 สมมติฐานสำหรับตัวแบบทางคณิตศาสตร์

- 1) วิชาเฉพาะในหลักสูตรทุกวิชาเปิดเพียง 1 เซกชัน

2) ไม่มีการกำหนดระยะเวลาการศึกษา คือ ผู้เรียนสามารถขึ้นทะเบียนเป็นนักศึกษาสำหรับภาคการศึกษาปกติจำนวนเท่าใดก็ได้

3) วิชาปฏิบัติการถูกแนะนำให้ลงพร้อมกับวิชาทฤษฎี

4) วิชาที่สามารถศึกษาพร้อมกันได้ มีเพียง 2 วิชาเท่านั้น

5) จำนวนวิชาบังคับสำหรับวิชาที่มีความสัมพันธ์เคยศึกษา จะมีได้เพียง 1 วิชา เท่านั้น

6) วิชาที่สามารถลงทะเบียนเรียนได้ เมื่อศึกษาผ่านมาแล้ว 2 ปีการศึกษาหรือเทียบเท่า 5 ภาคการศึกษา

7) ช่วงเวลาที่เปิดสอนในแต่ละภาคการศึกษา (ภาคการศึกษา 1 และ 2) ต้องไม่มีการเปลี่ยนแปลงในทุกปีการศึกษา

2.7.2 ข้อบังคับของหลักสูตร

1) ถ้าผู้เรียนศึกษาแล้วได้เกรด D หรือผ่านเกณฑ์ที่กำหนด ถือว่าผู้เรียนสอบได้

2) ถ้าหากผู้เรียนศึกษาแต่ได้เกรด F หรือต่ำกว่าที่เกณฑ์กำหนด ถือว่าผู้เรียนเคยศึกษา

3) วิชาโครงการสามารถลงทะเบียนเรียนได้ เมื่อศึกษาผ่านมาแล้ว 2 ปีการศึกษา หรือเทียบเท่า 4 ภาคการศึกษา

2.8 ตัวแบบทางคณิตศาสตร์

2.8.1 พารามิเตอร์และตัวแปรตัดสินใจ

กำหนดให้ N_l แทน เซตของจำนวนนับที่มีค่าไม่เกิน l เมื่อ l เป็นจำนวนเต็มบวก พารามิเตอร์และตัวแปรต่าง ๆ สามารถแบ่งออกได้เป็น 3 กลุ่ม ดังนี้

1) พารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับหลักสูตร

k	แทน	จำนวนรายวิชา
t	แทน	จำนวนช่วงเวลา
$term$	แทน	ภาคการศึกษาต่อปี โดยที่ $term = 1$ และ 2
$T_{i, term} \subseteq N_t$	แทน	ช่วงระยะเวลาเรียนของวิชาที่ i ภาคการศึกษาที่ $term$
m	แทน	หมวดของวิชาโท 5 ประเภท โดยที่ $m = 0$ คือ ไม่เลือกวิชาโท $m = 1$ คือ วิชาโททั่วไป $m = 2$ คือ วิชาโทคณิตศาสตร์การจัดการ $m = 3$ คือ วิชาโทการจำลองแบบ $m = 4$ คือ วิชาโทคณิตศาสตร์คอมพิวเตอร์

$M_m \subseteq N_k$ แทน เซตของหมวดวิชาโทที่ m โดยที่ $m = 0, 1, 2, 3$ และ 4

CR_i แทน จำนวนหน่วยกิตของรายวิชาที่ i

CR_{total} แทน จำนวนหน่วยกิตทั้งหมด

CR_{max} แทน จำนวนหน่วยกิตอย่างมากที่สามารถลงทะเบียนต่อภาคการศึกษา

CR_{min} แทน จำนวนหน่วยกิตอย่างน้อยที่สามารถลงทะเบียนต่อภาคการศึกษา

$D_i \subseteq \mathbb{N}_k$	แทน	เซตของวิชาบังคับในวิชาที่ i
n_i	แทน	จำนวนวิชาบังคับทั้งหมดของวิชาที่ i
$G \subseteq \mathbb{N}_k$	แทน	เซตของวิชาหมวดวิชาศึกษาทั่วไป
$P \subseteq \mathbb{N}_k$	แทน	เซตของวิชาโครงการ
$F \subseteq \mathbb{N}_k$	แทน	เซตของวิชาเสรี
$Open_{i,term}$	แทน	การเปิดวิชาที่ i ในภาคการศึกษาที่ $term$ โดย $Open_{i,term}$ มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อวิชาที่ i เปิดในภาคการศึกษาที่ $term$ นอกนั้นมีค่าเป็น 0
C	แทน	เมทริกซ์ขนาด $k \times k$ โดยที่ C_{ij} แสดงความสัมพันธ์ศึกษาพร้อมเมื่อผู้เรียนลงวิชาที่ i สามารถลงเรียนวิชาที่ j ได้ด้วย หรือลงวิชาที่ j อย่างเดียวก็ได้
E	แทน	เมทริกซ์ขนาด $k \times k$ โดยที่ E_{ij} แสดงความสัมพันธ์เคยศึกษาเมื่อผู้เรียนเคยศึกษาวิชาที่ i สามารถลงเรียนวิชาที่ j ได้
$TU \subseteq \mathbb{N}_k^2$	แทน	เซตของคู่วิชาจากหมวดศึกษาทั่วไป
2) พารามิเตอร์ที่เกี่ยวกับผู้เรียน		
S	แทน	จำนวนภาคการศึกษาที่ศึกษาแล้ว
x_j	แทน	การสอบได้ในวิชาที่ j โดย x_j มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อสอบได้ในวิชาที่ j นอกนั้นมีค่าเป็น 0
z_j	แทน	การเคยศึกษาในวิชาที่ j โดย z_j มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อสอบได้ในวิชาที่ j นอกนั้นมีค่าเป็น 0

3) ตัวแปรตัดสินใจ (Decision Variables)

y_i	แทน	การแนะนำให้ลงทะเบียนในวิชาที่ i โดย y_i มีค่าเท่ากับ 1 เมื่อแนะนำให้ลงทะเบียนในวิชาที่ i นอกนั้นมีค่าเป็น 0
-------	-----	---

ในงานวิจัยนี้ ทางคณะผู้วิจัยได้ใช้ข้อมูลของมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ภาควิชาคณิตศาสตร์และสถิติ หลักสูตรคณิตศาสตร์ประยุกต์ ปรับปรุง ปี 2561 เพื่อเป็นค่าเริ่มต้นสำหรับตัวแปรต่าง ๆ ข้างต้น

2.8.2 ฟังก์ชันจุดประสงค์

เพื่อนำเสนอปัญหาการลงทะเบียนเรียนในรูปแบบปัญหาค่าเหมาะสมที่สุด ฟังก์ชันจุดประสงค์ถูกออกแบบมาเพื่อให้ผู้เรียนสำเร็จการศึกษาได้เร็วที่สุด โดยลดจำนวนหน่วยกิตที่ผู้เรียนยังต้องลงทะเบียนเรียนตลอดหลักสูตรให้ได้มากที่สุดในแต่ละภาคการศึกษา คำนวณได้จากหน่วยกิตที่ต้องลงทะเบียนตลอดหลักสูตร หักลบด้วยวิชาที่แนะนำให้ลงทะเบียนในภาคการศึกษาปัจจุบัน และวิชาที่สอบได้จากภาค

การศึกษาก่อนหน้า สำหรับให้ผู้เรียนสามารถสำเร็จการศึกษาได้ภายในระยะเวลาที่กำหนด ตามข้อกำหนดของมหาวิทยาลัยและหลักสูตร สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (1)

$$\text{Minimize } CR_{total} - \left(\sum_{i=1}^k y_i CR_i + \sum_{j=1}^k x_j CR_j \right) \quad (1)$$

2.8.3 ข้อจำกัดสำหรับปัญหา มีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1) การลงทะเบียนเรียนวิชาที่มีวิชาบังคับมาก่อน ผู้เรียนต้องสอบผ่านวิชาบังคับนั้นก่อน จึงสามารถลงทะเบียนวิชาถัดไปได้ สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (2)

$$\sum_{j \in D_i} x_j - n_i y_i \geq 0, \quad \forall i \in \mathbb{N}_k \quad (2)$$

2) การแนะนำการลงทะเบียนเรียนในแต่ละภาคการศึกษา ต้องอยู่ในช่วงหน่วยกิตที่กำหนด โดยไม่เกินหน่วยกิตสูงสุดและไม่น้อยกว่าหน่วยกิตขั้นต่ำ สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (3)

$$CR_{min} \leq \sum_{i=1}^k y_i CR_i \leq CR_{max} \quad (3)$$

3) หากแนะนำให้ลงทะเบียนเรียนวิชาที่ i แต่ตามตารางไม่เปิดสอนในภาคการศึกษาที่ $term$ จะไม่สามารถลงทะเบียนเรียนได้ สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (4)

$$y_i - Open_{i,term} \leq 0, \quad \forall i \in \mathbb{N}_k \quad (4)$$

4) หากศึกษาและสอบได้วิชาที่ j แล้ว จะไม่แนะนำให้ลงทะเบียนเรียนวิชาที่ j อีก สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (5)

$$x_j + y_j \leq 1, \quad \forall j \in \mathbb{N}_k \quad (5)$$

5) หากช่วงเวลาของวิชาที่ i ภาคการศึกษาที่ $term$ ($T_{i,term}$) และช่วงเวลาของวิชาที่ j ภาคการศึกษาที่ $term$ ($T_{j,term}$) ทับซ้อนกัน ($T_{i,term} \cap T_{j,term} \neq \emptyset$) ต้องมีเพียงวิชาเดียวที่สามารถเลือกได้ สำหรับทุกคู่วิชาที่มีเวลาทับซ้อนกัน โดยที่วิชาที่ i และวิชาที่ j ต้องไม่เป็นวิชาเดียวกัน ($i \neq j$) สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (6)

$$T_{i,term} \cap T_{j,term} \neq \emptyset \rightarrow y_i + y_j \leq 1, \forall i < j \quad (6)$$

6) หากต้องลงทะเบียนวิชาที่จะต้องมีการศึกษาพร้อมกัน เช่น วิชาบรรยายและวิชาปฏิบัติการ นั่นคือ $C_{ij} = 1$ แสดงว่า วิชาที่ i และวิชาที่ j จำเป็นต้องลงทะเบียนพร้อมกัน แต่หากวิชาใดศึกษาไม่ผ่าน จะแนะนำให้ลงทะเบียนเรียนอีกครั้งเพียงวิชาที่ไม่ผ่านเท่านั้น สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (7)

$$C_{ij} = 1 \rightarrow (y_j - y_i) + (x_j - x_i) = 0, \forall i, j \in N_k \quad (7)$$

7) หากต้องการลงทะเบียนวิชาที่มีความสัมพันธ์เคยศึกษา ($E_{ij} = 1$) จะแนะนำให้ลงทะเบียนเรียนวิชาที่ i ได้ เมื่อสอบได้หรือเคยศึกษาวิชาที่ j ($z_j = 1$) สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (8)

$$E_{ij} = 1 \rightarrow (x_j + z_j) - y_i \geq 0, \forall i, j \in N_k \quad (8)$$

8) เมื่อผู้เรียนเริ่มภาคการศึกษา 6 ขึ้นไป ($S > 5$) การลงทะเบียนเรียนในวิชาโท กำหนดจำนวนวิชาที่ผู้เรียนลงทะเบียนวิชาโทได้ไม่เกิน 5 วิชาตลอดหลักสูตร และต้องไม่น้อยกว่าจำนวนวิชาขั้นต่ำ สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (8)

$$0 \leq \sum_{i \in M_m} (y_i + x_i) \leq 5 \text{ เมื่อ } m = 1, 2, 3, 4 \quad (9)$$

9) การลงทะเบียนเรียนของผู้เรียน สามารถเลือกลงทะเบียนเรียนได้เพียง 1 วิชาต่อวิชาในกลุ่มวิชาศึกษาทั่วไป เพื่อป้องกันการลงทะเบียนซ้ำซ้อนในวิชาที่สามารถทดแทนกันได้ สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (10)

$$(x_i + y_i) + (x_j + y_j) \leq 1, \forall (i, j) \in TU \quad (10)$$

10) การลงทะเบียนเรียนของผู้เรียนสำหรับหมวดวิชาศึกษาทั่วไปในเขต G มีข้อจำกัดว่า ให้เลือกลงทะเบียนได้ไม่เกิน 2 วิชาจากเซตนี้ตลอดหลักสูตร สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (11)

$$0 \leq \sum_{i \in G} (y_i + x_i) \leq 2 \quad (11)$$

11) เมื่อเริ่มภาคการศึกษา 6 ขึ้นไป ($S > 5$) หากผู้เรียนได้ลงทะเบียนเรียนวิชาโทในกลุ่มที่ m แล้ว ไม่สามารถลงทะเบียนเรียนวิชาโทในกลุ่มวิชาอื่นได้ โดยบังคับให้ลงทะเบียนเรียนเฉพาะหมวดวิชาในกลุ่มที่ m สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (12)

$$y_i = 0, \quad \forall i \in M_{m'} \quad \text{เมื่อ } m' = 0, 2, 3, 4 \text{ และ } m' \neq m \text{ โดยที่ } S > 5 \quad (12)$$

12) จะไม่แนะนำให้ผู้เรียนลงทะเบียนเรียนในวิชาโครงการ จนกว่าผู้เรียนจะมีการศึกษาตั้งแต่ 4 ภาคการศึกษาขึ้นไป สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (13)

$$\sum_{i \in P} y_i = 0 \quad \text{โดยที่ } S < 4 \quad (13)$$

13) ไม่แนะนำให้ลงทะเบียนรายวิชาเสรีจนกว่าผู้เรียนจะมีการศึกษาตั้งแต่ 6 ภาคการศึกษาขึ้นไป หรือเทียบเท่า 3 ปีการศึกษาแล้ว สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (14)

$$\sum_{i \in F} y_i = 0 \quad \text{โดยที่ } S < 6 \quad (14)$$

14) กำหนดค่าให้กับตัวแปรตัดสินใจมีค่าเป็น 0 และ 1 สามารถเขียนได้ดังสมการที่ (15)

$$0 \leq y_i \leq 1, \quad \forall i \in N_k \quad (15)$$

หมายเหตุ ในการพัฒนาโปรแกรมสำหรับข้อจำกัดที่ 6) และ 7) จะทำการตรวจสอบเมทริกซ์ C และ E ตามลำดับ โดยเป็นการค้นหาตำแหน่งทั้งหมดในเมทริกซ์ดังกล่าวที่มีค่าเป็น 1 โดยเมื่อพบแล้วสามารถเพิ่มสมการที่เป็นข้อจำกัดลงไปในตัวแบบ เช่น หากพบกว่า $C_{32} = 1$ โปรแกรมสามารถเพิ่มสมการ $(y_2 - y_1) + (x_2 - x_1) = 0$ เข้าไปในตัวแบบ ดังนั้น สมการที่ (7) และสมการที่ (8) ในข้อจำกัดที่ 6) และ 7) ตามลำดับ จึงทำให้แบบจำลองในงานวิจัยนี้เป็นกำหนดการเชิงเส้นจำนวนเต็ม

สำหรับการหาผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุดนั้น หากใช้วิธีการแก้ปัญหาโดยตรงไปตรงมา (Brute-force algorithm) ซึ่งมีรูปแบบของคำตอบที่เป็นไปได้ถึง 2^k รูปแบบ เมื่อ k คือ จำนวนรายวิชาทั้งหมดที่สามารถลงทะเบียนเรียนได้ จำนวนรูปแบบของคำตอบเพิ่มขึ้นแบบเลขยกกำลัง ทำให้ต้องเสียเวลาอย่างมากในการค้นหาผลเฉลยที่เหมาะสมที่สุด และเนื่องจากแบบจำลองในงานวิจัยนี้เป็นแบบจำลองที่ถูกเขียนให้อยู่ในรูปแบบของปัญหากำหนดการเชิงจำนวนเต็มแบบเชิงเส้น ทางคณะผู้จัดทำจึงเรียกใช้ฟังก์ชัน `intlinprog` ใน Optimization toolbox ของ MATLAB โดยไม่ได้กำหนดค่าของพารามิเตอร์ Options เพิ่มเติม

ฟังก์ชัน `intlinprog` เป็นฟังก์ชันสำหรับหาค่าต่ำสุดของปัญหากำหนดการเชิงจำนวนเต็มทวิภาคและครอบคลุมถึงกำหนดการเชิงจำนวนเต็ม โดยฟังก์ชัน `intlinprog` จะใช้เทคนิค เช่น การผ่อนปรนเชิงเส้น (Linear programming relaxation) การแตกกิ่งและจำกัดเขต (Branch-and-bound) เพื่อลดจำนวนรูปแบบของผลเฉลยที่ต้องพิจารณา ซึ่งวิธีนี้สามารถลดเวลาในการหาผลเฉลยที่ดีที่สุดของปัญหาได้อย่างมากเมื่อเทียบกับวิธีการแก้ปัญหาโดยตรงไปตรงมา โดยปัจจัยที่ส่งผลต่อระยะเวลาการประมวลผล ได้แก่ ขนาดของปัญหา ความซับซ้อนของข้อจำกัด และประสิทธิภาพของเครื่องคอมพิวเตอร์ ทั้งนี้ หากปัญหามีขนาดใหญ่อาจต้องใช้เวลามากมายจนถึงหลายชั่วโมง

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

จากการดำเนินงานข้างต้น ในการประมวลผลลัพธ์ต้องมีการกำหนดข้อมูลนำเข้า ซึ่งในการทดลองนี้ ใช้ข้อมูลของหลักสูตรคณิตศาสตร์ประยุกต์ ภาควิชาคณิตศาสตร์และสถิติ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (Department of Mathematics and Statistics, Thammasat University, n.d.; Office of the Registrar, Thammasat University, n.d.) ซึ่งมีวิชาให้เลือกเรียนทั้งหมด 73 วิชา ($k = 73$) และในแต่ละสัปดาห์มีทั้งหมด 36 ช่วงเวลาเรียน ($t = 36$) โดยสำเร็จการศึกษาได้นั้นต้องมีจำนวนหน่วยกิตอย่างน้อย 133 หน่วยกิต ($CR_{total} = 133$) โดยในแต่ละภาคการศึกษาลงทะเบียนเรียนได้อย่างมาก 22 หน่วยกิต ($CR_{max} = 22$) และอย่างน้อย 9 หน่วยกิต ($CR_{min} = 9$) นอกจากนี้ จากข้อมูลของหลักสูตรได้มีการกำหนดค่าให้เซตวิชาหมวดวิชาศึกษาทั่วไป (G) เซตของคูวิชาจากหมวดศึกษาทั่วไป (TU) เซตของวิชาโครงงาน (P) เซตของวิชาเสรี (F) และเซตของวิชาโทประเภทต่างๆ (M_m เมื่อ $m = 1, 2, 3$ และ 4)

จากนั้นผู้ใช้ต้องกรอกวิชาที่ได้เรียนไปแล้ว รวมถึงเกรดของวิชานั้น ๆ จำนวนภาคการศึกษาที่ผู้เรียนได้ศึกษาผ่านมาและวิชาโทที่เลือก ในกรณีที่ผู้เรียนถึงเกณฑ์ที่สามารถเลือกวิชาโทและภาคการศึกษาที่ต้องการวางแผนตารางเวลา จากนั้นประมวลผลการใช้คำสั่ง `intlinprog` เพื่อค้นหาผลเฉลยที่ดีที่สุด ซึ่งจากการทดลองใช้ระยะเวลาในการประมวลผลอยู่ที่ 6 ถึง 9 วินาที สำหรับการประมวลผลในแต่ละครั้ง

ผลลัพธ์ที่ได้จากการดำเนินงานแสดงเป็นตารางเรียน โดยแต่ละตารางเรียนถูกตรวจสอบจำนวนหน่วยกิตในภาคการศึกษานั้นว่าอยู่ในช่วงที่สามารถลงทะเบียนได้ แต่ละรายวิชามีช่วงเวลาที่ซ้อนทับกันหรือไม่ และผ่านเงื่อนไขของการลงทะเบียนเรียนหรือไม่ (สอบได้/เคยศึกษา/ศึกษาพร้อม) ซึ่งหากพบตารางเรียนที่ดีที่สุดหลายรูปแบบ ทางผู้วิจัยเลือกตารางเรียนแบบแรกมาแสดงเป็นตัวอย่างของผลลัพธ์

หมายเหตุ สำหรับการนำไปใช้จริงนั้น หากพบผลลัพธ์ที่ดีที่สุดมากกว่า 1 ผลลัพธ์ ผู้เรียนควรพิจารณาเลือกตารางเรียนตามความสนใจของเนื้อหาวิชา หรือตามวิชาที่คาดว่าจะสามารถเรียนได้ดี นอกจากนี้ ผู้เรียนอาจพิจารณาเลือกวิชาที่ส่งผลต่อความต่อเนื่องของแผนการเรียน หรือวิชาที่มีความจำเป็นในการสำเร็จการศึกษาเป็นลำดับแรก ซึ่งยังเป็นข้อจำกัดสำหรับงานวิจัยนี้

สำหรับการทดลองนี้แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ การวางแผนการเรียนแบบรายภาคการศึกษา และการวางแผนการเรียนแบบตลอดทั้งการศึกษา ดังนี้

1) การวางแผนการเรียนแบบรายภาคการศึกษา

การวางแผนแบบรายภาคการศึกษา ข้อมูลประกอบด้วยวิชาที่ผู้เรียนได้เรียนไปแล้วและผลการเรียนที่ได้ แสดงดังตารางที่ 6 และผู้เรียนระบุจำนวนภาคการศึกษาที่เรียนมาแล้ว คือ 2 ภาคการศึกษา ซึ่งภาคการศึกษาถัดไปที่ต้องการวางแผนตารางเรียน คือภาคการศึกษาที่ 1 และผู้เรียนยังไม่สามารถเลือกหมวดวิชาโทได้ เนื่องจากยังไม่ถึงเกณฑ์ในการเลือกวิชาโท

ตารางที่ 6. ข้อมูลการเรียนรู้ที่ระบุชื่อวิชาและผลการเรียน

ลำดับ	ชื่อวิชา	เกรด
1	CS103	D+
2	TU104	B+
3	TU106	A
4	TU101	B+
5	AM100	S
6	SC123	C+
7	SC173	C+
8	AM101	D+
9	TU105	B
10	SC115	C
11	SC165	C+
12	ST211	C
13	TU050	S

เมื่อนำข้อมูลจากตารางที่ 6 เข้าสู่ขั้นตอนการประมวลผล เพื่อค้นหาผลเฉลี่ยที่ดีที่สุด แนะนำให้ลงทะเบียนเรียนในเทอมถัดไป ได้แก่ วิชา TU154 AM102 AM200 AM241 MA221 SC135 SC185 และ EL295 ซึ่งมีเวลาเรียนดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7. ตารางเรียนที่แนะนำให้เรียนในภาคการศึกษาถัดไป

วิชา	วัน	เวลา
AM102	อังคาร, พุธ, ศุกร์	08:00 – 09:30
MA221	พุธ, ศุกร์	08:00 – 09:30
AM200	อังคาร, พุธ, ศุกร์	09:30 – 11:00
AM241	พุธ, ศุกร์	09:30 – 11:00
TU154	อังคาร, พุธ, ศุกร์	11:00 – 12:30
SC135	พุธ, ศุกร์	11:00 – 12:30
EL295	อังคาร	13:30 – 16:30
SC185	พุธ, ศุกร์	13:30 – 16:30

จากผลเฉลยดังตารางที่ 7 และข้อมูลของหลักสูตรเห็นว่าจำนวนหน่วยกิตรวมในภาคการศึกษานี้ เท่ากับ 22 หน่วยกิต ซึ่งเป็นไปตามระเบียบของทางมหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ (Office of the Registrar, Thammasat University, n.d.) นอกจากนั้นแล้วแต่ละรายวิชาจะมีเวลาที่ไม่ซ้อนทับกัน และทุกรายวิชาสามารถลงทะเบียนได้เพราะผ่านเงื่อนไขที่จำเป็นแล้ว เช่น วิชา AM102 ซึ่งจะต้องสอบได้วิชา AM101 เป็นต้น

2) การวางแผนการเรียนแบบตลอดทั้งการศึกษา

การวางแผนการเรียนแบบตลอดทั้งการศึกษา จะแบ่งกรณีสำหรับผู้เรียนที่ต้องการเรียนวิชาโทที่แตกต่างกัน โดยในตลอด 5 ภาคการศึกษาแรก ได้แก่ ปี 1 ภาคการศึกษา 1 ปี 1 ภาคการศึกษา 2 ปี 2 ภาคการศึกษา 1 ปี 2 ภาคการศึกษา 2 และ ปี 3 ภาคการศึกษา 1 จะเห็นว่ามีผลลัพธ์ที่ได้สอดคล้องกันในทุกภาคการศึกษา โดยแสดงดังตารางที่ 8 - 12 ซึ่งหมายความว่าใน 5 ภาคการศึกษาแรกผู้เรียนในแต่ละหมวดวิชาโท จะมีตารางเรียนที่ตรงกัน เมื่อผู้เรียนเลือกวิชาโทในหมวดใดก็ตาม ผลลัพธ์ในภาคการศึกษาถัดไปแสดงแยกกันตามหมวดวิชาโทตามที่คุณเรียนได้เลือก ได้แก่ ปี 3 ภาคการศึกษา 2 และ ปี 4 ภาคการศึกษา 1 แสดงดังตารางที่ 13 และ 14

ตารางที่ 8. ตารางเรียนที่แนะนำให้เรียนใน ปี 1 ภาคการศึกษา 1

วิชา	วัน	เวลา
SC173	จันทร์	09:30 – 12:30 น.
TU154	อังคาร, พฤหัสบดี	11:00 – 12:30 น.
SC123	พุธ, ศุกร์	08:00 – 09:30 น.
CS103	พุธ, ศุกร์	09:30 – 11:00 น.
ST211	พุธ, ศุกร์	11:00 – 12:30 น.
TU105	พุธ	13:30 – 16:30 น.
TU101	พฤหัสบดี	13:30 – 16:30 น.
TU104	ศุกร์	13:30 – 16:30 น.

ตารางที่ 9. ตารางเรียนที่แนะนำให้เรียนใน ปี 1 ภาคการศึกษา 2

วิชา	วัน	เวลา
SC165	จันทร์	09:30 – 12:30 น.
AM200	อังคาร, พฤหัสบดี	08:00 – 09:30 น.
MA332	อังคาร, พฤหัสบดี	11:00 – 12:30 น.
TU102	อังคาร	13:30 – 16:30 น.
AM101	พุธ, ศุกร์	08:00 – 09:30 น.
SC115	พุธ, ศุกร์	11:00 – 12:30 น.
TU106	ศุกร์	13:30 – 16:30 น.
TU100	เสาร์	09:30 – 12:30 น.

ตารางที่ 10. ตารางเรียนที่แนะนำให้เรียนใน ปี 2 ภาคการศึกษา 1

วิชา	วัน	เวลา
BA291	จันทร์	13:30 – 16:30 น.
AM102	อังคาร, พฤหัสบดี	08:00 – 09:30 น.
EL295	อังคาร	13:30 – 16:30 น.
MA221	พุธ, ศุกร์	08:00 – 09:30 น.
AM241	พุธ, ศุกร์	09:30 – 11:00 น.

ตารางที่ 10. (ต่อ) ตารางเรียนที่แนะนำให้เรียนใน ปี 2 ภาคการศึกษา 1

วิชา	วัน	เวลา
SC135	พุธ, ศุกร์	11:00 – 12:30 น.
AM451	พุธ, ศุกร์	13:30 – 15:00 น.
SC185	เสาร์	13:30 – 16:30 น.

ตารางที่ 11. ตารางเรียนที่แนะนำให้เรียนใน ปี 2 ภาคการศึกษา 2

วิชา	วัน	เวลา
MA381	จันทร์	09:30 – 12:30 น.
TU122	จันทร์	13:30 – 16:30 น.
MA351	อังคาร, พฤหัสบดี	08:00 – 09:30 น.
AM311	อังคาร, พฤหัสบดี	09:30 – 11:00 น.
ST212	พุธ, ศุกร์	11:00 – 12:30 น.
AM321	พุธ, ศุกร์	13:30 – 15:00 น.
ST226	พุธ, ศุกร์	15:00 – 16:30 น.
EL395	พฤหัสบดี	13:30 – 16:30 น.

ตารางที่ 12. ตารางเรียนที่แนะนำให้เรียนใน ปี 3 ภาคการศึกษา 1

วิชา	วัน	เวลา
AM260	จันทร์	13:30 – 16:30 น.
AM411	อังคาร, พฤหัสบดี	09:30 – 11:00 น.
TU107	พุธ	09:30 – 12:30 น.
AM201	พุธ, ศุกร์	13:30 – 15:00 น.

ตารางที่ 13. ตารางเรียนที่แนะนำให้เรียนใน ปี 3 ภาคการศึกษา 2

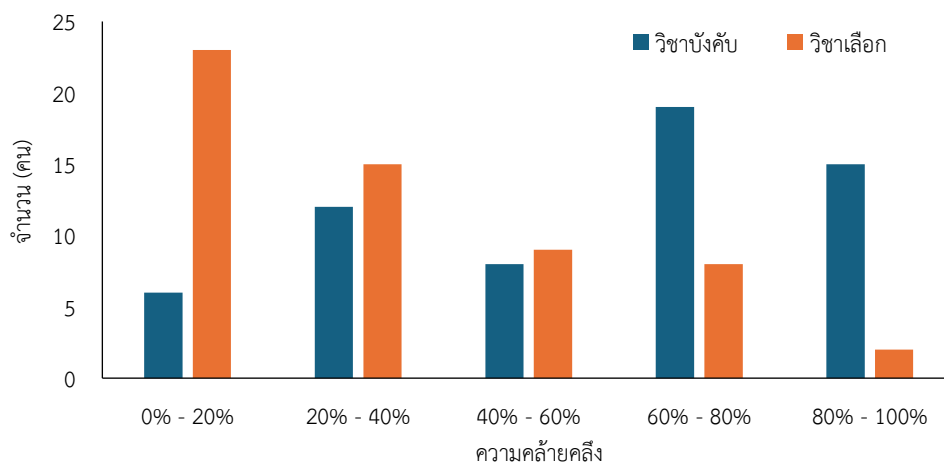
วิชา	วัน	เวลา
SC301	จันทร์	09:30 – 12:30 น.
AM360	จันทร์	13:30 – 16:30 น.
AM311	อังคาร, พฤหัสบดี	11:00 – 12:30 น.
MA318(3)	พุธ, ศุกร์	08:00 – 09:30 น.
AM438(3)	พุธ, ศุกร์	09:30 – 11:00 น.
AM437(3)	พุธ, ศุกร์	11:00 – 12:30 น.
AM338(3)	พุธ, ศุกร์	13:30 – 15:00 น.
AM246(4)	อังคาร, พฤหัสบดี	09:30 – 11:00 น.
AM448(4)	อังคาร, พฤหัสบดี	13:30 – 16:30 น.
AM457(4)	พุธ, ศุกร์	09:30 – 11:00 น.
AM327(2)	อังคาร, พฤหัสบดี	09:30 – 11:00 น.
AM426(2)	อังคาร, พฤหัสบดี	13:30 – 15:00 น.
AM428(2)	พุธ, ศุกร์	09:30 – 11:00 น.
AM427(2)	พุธ, ศุกร์	13:30 – 15:00 น.

ตารางที่ 14. ตารางเรียนที่แนะนำให้เรียนใน ปี 4 ภาคการศึกษา 1

วิชา	วัน	เวลา
AM460	จันทร์	13:30 – 16:30 น.
AM341	พุธ, ศุกร์	11:00 – 12:30 น.
MA316(3)	พุธ, ศุกร์	08:00 – 09:30 น.
AM346(4)	พุธ, ศุกร์	09:30 – 11:00 น.
AM347(4)	พฤหัสบดี	13:30 – 16:30 น.
AM326(2)	พุธ, ศุกร์	15:00 – 16:30 น.

โดยเลขตัวในวงเล็บด้านหลังรหัสรายวิชาแทนรายวิชาในกลุ่มวิชาโทกลุ่มนั้น เช่น AM346(4) หมายถึง รายวิชา AM346 เป็นรายวิชาในกลุ่มวิชาโทที่ 4 ($m = 4$)

สำหรับรายภาคการศึกษาจากการสำรวจกรณีตัวอย่างทั้งหมด 10 คน โดยแต่ละคนจะมีตารางเรียน 6 ภาคการศึกษา ทำให้มีตัวอย่างทั้งสิ้น 60 ตัวอย่าง จากนั้นนำแต่ละตัวอย่างที่ลงทะเบียนเรียนจริงและตารางเรียนที่โปรแกรมแนะนำมาเปรียบเทียบกันได้ผลดังรูปที่ 1



รูปที่ 1. ความคล้ายคลึงระหว่างตารางเรียนจริงจากการสำรวจและตารางเรียนจากตัวแบบ

จากรูปที่ 1 พบว่า ตัวแบบทางคณิตศาสตร์ในงานวิจัยนี้ มีความแม่นยำในการแนะนำวิชาบังคับมากกว่าวิชาเลือก โดยมีความแม่นยำเฉลี่ยในการแนะนำวิชาบังคับให้แก่ผู้เรียนเท่ากับ 60.18% แต่ในทางกลับกันจะเห็นได้ว่าความแม่นยำเฉลี่ยในการแนะนำวิชาเลือกลดลงอย่างมาก โดยมีความคล้ายคลึงเพียง 31.40% จากจำนวนตัวอย่างของวิชาเลือกทั้งหมดอยู่ 57 ตัวอย่าง โดยมี 3 ตัวอย่างที่ไม่ลงทะเบียนเรียนวิชาเลือก ซึ่งความแม่นยำเฉลี่ยรวมอยู่ที่ 45.79% จะเห็นได้ว่าความแม่นยำในการแนะนำวิชาเลือกนั้นส่งผลให้ความแม่นยำโดยรวมลดลงเป็นอย่างมาก นั่นอาจเป็นเพราะผู้เรียนมีความสนใจเรียนด้านอื่นโดยเฉพาะและตัวแบบทางคณิตศาสตร์ในงานวิจัยนี้ยังไม่ครอบคลุมถึงความถนัดหรือความสนใจของผู้เรียน

4. สรุปผลการวิจัย

จากการศึกษากระบวนการจัดตารางเรียนและตัวแบบจำลองทางคณิตศาสตร์พบว่า สามารถช่วยผู้เรียนและผู้จัดทำหลักสูตรในการวางแผนการศึกษาได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการวางแผนตามตัวอย่างที่แสดงนั้น จะเห็นได้ว่าในบางภาคการศึกษาผู้เรียนมีหน่วยกิตเพียงพอให้ลงทะเบียนเรียนวิชาเลือกเสรีเพิ่มเติมได้ตามความต้องการ

สำหรับตลอดการศึกษาสามารถจัดให้ผู้เรียนเรียนวิชาโทและสำเร็จการศึกษาได้เร็วที่สุดในระยะเวลา 7 ภาคการศึกษา หรือเทียบเท่ากับการเรียน 3.5 ปี อีกทั้งยังสามารถเรียนวิชาเลือกและวิชาเสรีได้ และสามารถช่วยให้ผู้เรียนที่เลือกเรียนวิชาโทได้อีกด้วย โดยผลลัพธ์ที่แสดงมีความยืดหยุ่นในการจัดตารางเรียน

ในการนำไปใช้งานนั้น ตัวแบบจำลองจะต้องการข้อมูลออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ข้อมูลของหลักสูตรและข้อมูลของผู้เรียน โดยข้อมูลของหลักสูตรนั้น ๆ จะสามารถใช้ได้กับผู้เรียนทุกคนที่เรียนอยู่ในหลักสูตรนั้น ดังนั้นหากผู้เรียนต้องการใช้งานตัวแบบนี้ ทางสาขาวิชาต้องกรอกข้อมูลของหลักสูตรให้ และผู้เรียนกรอกเพียงแค่ประวัติการเรียนของผู้เรียนเท่านั้น

สำหรับผู้จัดทำหลักสูตร ตัวแบบทางคณิตศาสตร์นี้สามารถนำไปปรับใช้ให้เหมาะสมกับหลักสูตรและโปรแกรมอื่น ๆ ที่มีโครงสร้างหลักสูตรตั้งงานวิจัยนี้ โดยต้องมีข้อมูลหลักสูตร ได้แก่ ช่วงเวลาการเปิดสอนวิชา ความสัมพันธ์ระหว่างรายวิชา รวมถึงจำนวนหน่วยกิตที่แต่ละวิชาต้องการ อย่างไรก็ตาม ข้อจำกัดที่พบ คือ หากหลักสูตรมีข้อมูลรายวิชาและความสัมพันธ์ระหว่างวิชามาก ผู้จัดทำอาจต้องใช้เวลามากในการจัดเก็บข้อมูล และมีโอกาสเกิดข้อผิดพลาดได้

เมื่อพิจารณาด้านการจัดตารางเรียนที่โปรแกรมประมวลผลออกมานั้นพบว่า โปรแกรมจะเน้นการลดจำนวนหน่วยกิตที่ยังต้องศึกษาของผู้เรียนตลอดหลักสูตรให้ได้มากที่สุด เพื่อให้ผู้เรียนสามารถเรียนจบได้เร็ว ซึ่งส่งผลให้โปรแกรมมักจัดเรียงวิชาบังคับให้เรียนในช่วงแรก ๆ ของหลักสูตรมากที่สุด เพื่อให้ผู้เรียนผ่านเกณฑ์การสำเร็จการศึกษาได้อย่างรวดเร็ว ในกรณีตารางเรียนที่โปรแกรมแนะนำไม่สอดคล้องกับความสนใจของผู้เรียน ผู้เรียนสามารถใช้ตารางเรียนที่ได้จากโปรแกรมมาเป็นแนวทางประกอบการตัดสินใจในการลงทะเบียนเรียนได้

งานวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัดหลายประการ เช่น ตัวแบบยังไม่ได้นำความถนัดของผู้เรียนเข้ามาช่วยในการจัดตารางเรียน และข้อจำกัดที่สำคัญ คือ โปรแกรมไม่ได้คำนึงถึงระดับความยากง่ายหรือความสำคัญของแต่ละวิชา ดังนั้น อาจเกิดกรณีที่โปรแกรมแนะนำรายวิชาที่ผู้เรียนจะต้องลงทะเบียนในภาคการศึกษาถัดไปมีวิชาที่มีความยากหลายวิชาในภาคการศึกษาเดียวกัน ซึ่งผู้เรียนจะต้องนำไปพิจารณาการลงทะเบียนเรียนตามความเหมาะสมกับตนเอง ซึ่งเป็นหัวข้อที่คณะผู้วิจัยสนใจที่จะศึกษาในลำดับถัดไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลงไปได้ด้วยความอนุเคราะห์ที่ให้ความรู้ ให้คำแนะนำ และช่วยเหลือในการศึกษาและจัดทำวิจัยขึ้นนี้โดย อาจารย์ ดร.วินทร์ ยั่งยืน อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงาน และผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชัยณรงค์ เกษามูล อาจารย์ที่ปรึกษาโครงงานร่วม นอกจากนี้ผู้จัดทำขอขอบพระคุณสำนักงานทะเบียน

นักศึกษา มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ และผู้เป็นกรณีศึกษาที่อำนวยความสะดวกให้ข้อมูลเพื่อเป็นกรณีศึกษา
โครงการวิจัยจนสำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง (References)

- Anwar, A. A., & Bahaj, A. S. (2003). Student project allocation using integer programming. *IEEE Transactions on Education*, 46(3), 359-367. <https://doi.org/10.1109/TE.2003.813526>
- Beros, I., & Meter, J. (2015). An integer programming model for assigning students to elective courses. *Croatian Operational Research Review*, 6(2), 511-524. <https://doi.org/10.17535/corr.2015.0038>
- Borges, A., Leite, A., Ospina, R., & Silva, G. (2014). Integer programming model for university courses timetabling: A case study. *Proceedings of the World Congress on Engineering and Computer Science 2014* (pp. 918-922). International Association of Engineers.
- Colajanni, G. (2019). An integer programming formulation for university course timetabling. In G. Fasano & J. D. Pintér (Eds.), *Advances in optimization and decision science for society, services and enterprises: ODS 2019* (pp. 219-231). Springer.
- Daskalaki, S., & Birbas, T. (2005). Efficient solutions for a university timetabling problem through integer programming. *European Journal of Operational Research*, 160(1), 106-120. <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2003.06.023>
- Daskalaki, S., Birbas, T., & Housos, E. (2004). An integer programming formulation for a case study in university timetabling. *European Journal of Operational Research*, 153(1), 117-135. [https://doi.org/10.1016/S0377-2217\(03\)00103-6](https://doi.org/10.1016/S0377-2217(03)00103-6)
- Department of Mathematics and Statistics, Thammasat University. (n.d.). *Bachelor of science in applied mathematics*. <https://math.sci.tu.ac.th/applied-math-th-2/>
- Feng, X., Lee, Y., & Moon, I. (2017). An integer program and a hybrid genetic algorithm for the university timetabling problem. *Optimization Methods and Software*, 32(3), 625-649. <https://doi.org/10.1080/10556788.2016.1233970>
- Majdoub, S., Loqman, C., & Boumhidi, J. (2024). A new integer model for selecting students at higher education institutions: Preparatory classes of engineers as case study. *Information*, 15(9), Article 529. <https://doi.org/10.3390/info15090529>
- Maneengam, R., Maneengam, A., & Chunin, M. (2022). A multi-objective binary integer programming model and method for online course timetable problem: A case study of mechanical drawing division. *The Journal of Industrial Technology*, 18(2), 180-202. <https://doi.org/10.14416/j.ind.tech.2022.08.004> (in Thai)

- MirHassani, S. A. (2006). A computational approach to enhancing course timetabling with integer programming. *Applied Mathematics and Computation*, 175(1), 814-822. <https://doi.org/10.1016/j.amc.2005.07.039>
- Nguyen, V. A., Nguyen, H. H., Nguyen, D. L., & Le, M. D. (2021). A course recommendation model for students based on learning outcome. *Education and Information Technologies*, 26(5), 5389-5415. <https://doi.org/10.1007/s10639-021-10524-0>
- Office of the Registrar, Thammasat University. (n.d.). *Office of the Registrar, Thammasat University*. <https://reg.tu.ac.th/>
- Urbán Rivero, L. E., Benítez Escárcega, M. R., & Álvarez, J. V. (2020). An integer linear programming model for a case study in classroom assignment problem. *Computación y Sistemas*, 24(1), 97-104. <https://doi.org/10.13053/cys-24-1-3191>
- Van Deventer, H., Mills, M., & Evrard, A. (2024). *From interests to insights: An LLM approach to course recommendations using natural language queries*. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2412.19312>
- Vendla, S. (2012). *Scheduling of teaching resources and classes using mixed integer linear programming* [Master's thesis, Aalto University]. Aalto University Campus Repository. https://sal.aalto.fi/publications/pdf-files/esan12_public.pdf
- Yaemcharone, S. (2017). *The development of course management system for digital media* [Master's thesis, Sripatum University]. Sripatum University. (in Thai)
- Yuan, Y. (2023). *A mixed-integer linear programming model for university course timetabling problems* [Master's thesis, Wageningen University]. Wageningen University & Research. <https://edepot.wur.nl/637835>

ผลของการใช้แป้งข้าวเจ้าทดแทนแป้งข้าวสาลีต่อคุณภาพของ เส้นบะหมี่ผสมผงแมงกะพรุนที่เก็บรักษาในสภาวะต่างกัน Effect of Using Rice Flour Substituted Wheat Flour on Quality of Noodle Mixed Jellyfish Powder Stored in Different Conditions

เบญจวรรณ ธรรมธนารักษ์^{1,2,3*} นลินนิภา นิวัฒนากุล¹ และ วิไล รังสาดทอง^{1,2,3}

Benjawan Thumthanaruk^{1,2,3*} Nalinnipha Niwatthanakun¹ and Vilai Rungsardthong^{1,2,3}

¹ภาควิชาเทคโนโลยีอุตสาหกรรมเกษตร อาหาร และสิ่งแวดล้อม คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ ประเทศไทย

²ศูนย์วิจัยเฉพาะทางด้านอาหารและอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
กรุงเทพฯ ประเทศไทย

³ศูนย์ปฏิบัติการเทคโนโลยีและนวัตกรรมการผลิตอุตสาหกรรมอาหาร อุทยานเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ ประเทศไทย

¹Department of Agro-Industrial, Food and Environmental Technology, Faculty of Applied Science,
King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

²Food and Agro-Industrial Research Center, King Mongkut's University of Technology North Bangkok
Bangkok, Thailand

³Center for Food Industry Innovation Technology, Techno Park,
King Mongkut's University of Technology North Bangkok, Bangkok, Thailand

วันที่ส่งบทความ : 8 เมษายน 2567 วันที่แก้ไขบทความ : 18 มิถุนายน 2568 วันที่ตอบรับบทความ : 23 มิถุนายน 2568

Received: 8 April 2024, Revised: 18 June 2025, Accepted: 23 June 2025

บทคัดย่อ

เส้นบะหมี่เป็นอาหารหลักที่ได้รับความนิยมในการบริโภคจากประชากรทั่วโลก แต่การพัฒนาเส้นบะหมี่ให้มีความหลากหลายเพื่อเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการยังคงมีจำกัด ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ 1) ผลิตเส้นบะหมี่ที่มีการใช้แป้งข้าวเจ้าทดแทนแป้งข้าวสาลีบางส่วน โดยทดแทนแป้งข้าวสาลีร้อยละ 0, 10 และ 15 ร่วมกับผสมผงแมงกะพรุนร้อยละ 5 ต่อปริมาณแป้งผสมทั้งหมด (เส้นบะหมี่แมงกะพรุน) เพื่อเสริมปริมาณโปรตีนคอลลาเจน ตัวอย่างเส้นบะหมี่แมงกะพรุนที่ได้ถูกนำไปวิเคราะห์การทดสอบทางประสาทสัมผัสโดยใช้สเกลความชอบ 5 คะแนน การทดสอบรสชาติเค็มและกลิ่นคาวของบะหมี่โดยใช้สเกลวัดความพอติ 5 คะแนน และคุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ สี แรงต้านการดึงขาด และคุณภาพการต้มสุก 2) ศึกษาผลของสภาวะการเก็บรักษาต่อคุณภาพของเส้นบะหมี่ ซึ่งรวมถึงการวิเคราะห์ลักษณะปรากฏ คุณภาพทางกายภาพ และผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสจากผู้ทดสอบ 50 คน ผลการวิจัยพบว่า มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในด้านสี ลักษณะปรากฏ กลิ่น รสชาติ และคะแนนความชอบโดยรวม

*ที่อยู่ติดต่อ E-mail address: benjawan.t@sci.kmutnb.ac.th

<https://doi.org/10.55003/scikmitl.2025.262856>

ระหว่างเส้นบะหมี่แมงกะพรุนและเส้นบะหมี่ที่ไม่มีผงแมงกะพรุน (กลุ่มควบคุม) เส้นบะหมี่แมงกะพรุนและกลุ่มควบคุมถูกนำไปวิเคราะห์กลิ่นเค็มและกลิ่นคาวโดยใช้ 5 สเกล ซึ่งมีระดับตั้งแต่ 1 ถึง 5 โดยมีการจำแนกดังนี้ 1-อ่อนมาก 2-อ่อนเล็กน้อย 3-พอดี 4-เข้มข้นเล็กน้อย และ 5-เข้มข้นมาก ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าคะแนนรสชาติเค็มและกลิ่นคาวของบะหมี่ทุกตัวอย่างไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยมีค่าเฉลี่ยของรสชาติเค็มเท่ากับ 2.16-2.38 และกลิ่นคาวเท่ากับ 2.50-2.84 ตามลำดับ ซึ่งแสดงระดับอ่อนเล็กน้อย ดังนั้นรสชาติเค็มและกลิ่นคาวของผงแมงกะพรุนจึงไม่มีผลต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์เส้นบะหมี่ ในด้านคุณภาพการต้มสุกของเส้นบะหมี่แมงกะพรุนทุกตัวอย่างมีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมดสูงกว่าตัวอย่างควบคุม ส่งผลให้น้ำหนักหลังการต้มสุกต่ำกว่าตัวอย่างควบคุม เส้นบะหมี่ผสมแมงกะพรุนที่มีการทดแทนแป้งข้าวเจ้าร้อยละ 10 แสดงค่าแรงต้านการดึงขาดสูงกว่าการทดแทนแป้งข้าวเจ้าร้อยละ 15 นอกจากนี้ การเติมผงแมงกะพรุนลงในเส้นบะหมี่ยังช่วยเพิ่มความเหนียวและปริมาณโปรตีนถึง 8.85% และปริมาณคอลลาเจน 0.425 กรัมต่อ 100 กรัม ผลิตภัณฑ์เส้นบะหมี่มีอายุการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง 2 วัน และเก็บในอุณหภูมิตู้เย็น 11 วัน ซึ่งพิจารณาจากการเปลี่ยนแปลงลักษณะปรากฏจนกระทั่งเกิดการเน่าเสีย เส้นบะหมี่แมงกะพรุนมีสีเหลืองอ่อนและมีการเปลี่ยนแปลงความเหนียวเพียงเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม คุณภาพการต้มสุกของเส้นบะหมี่ที่เก็บไว้แสดงให้เห็นถึงการสูญเสียน้ำหนักจากการหุงต้มสุกเพิ่มขึ้น และน้ำหนักที่ได้หลังการหุงต้มที่ลดลง

คำสำคัญ : เส้นบะหมี่ แมงกะพรุน คอลลาเจน การทดสอบความพอดี แรงต้านการดึงขาด

Abstract

Noodles are a staple food widely consumed across the globe. However, the development of noodles with enhanced nutritional diversity remains limited. This study aimed to 1) produce jellyfish-enriched noodles by partially substituting wheat flour with rice flour at 0%, 10%, and 15%, combined with 5% jellyfish powder (based on total flour weight), to enhance collagen protein content. The resulting jellyfish noodles were subjected to sensory evaluation using a 5-point hedonic scale. Saltiness and fishy odor intensity were assessed using a 5-point just-about-right (JAR) scale. Physical properties such as color, tensile strength, and cooking quality were also analyzed; 2) to investigate the effect of storage conditions on noodle quality, including appearance, physical properties, and sensory acceptance by 50 panelists. Results indicated no statistically significant differences ($p>0.05$) in color, appearance, odor, taste, and overall acceptability between the jellyfish noodles and the control sample (no jellyfish powder). Saltiness and fishy odor intensities were evaluated using a scale of 1 (very weak) to 5 (very strong), with classifications as follows: 1-very weak, 2-slightly weak, 3-just right, 4-slightly strong, and 5-very strong. The mean scores for saltiness ranged from 2.16 to 2.38, and for fishy odor from 2.50 to 2.84, indicating slight

intensities and suggesting that jellyfish powder had no significant impact on flavor quality. Regarding cooking quality, all jellyfish noodle samples exhibited higher total soluble solids than the control, resulting in lower cooked weight. The 10% rice flour substitution sample showed higher tensile strength than the 15% substitution group. Moreover, adding jellyfish powder increased chewiness and boosted protein content to 8.85%, with collagen content reaching 0.425 grams per 100 grams of noodles. Shelf-life evaluation revealed that the jellyfish noodles had a storage life of 2 days at room temperature and 11 days under refrigerated conditions, as determined by visible spoilage. The noodles exhibited a light yellow color and only slight changes in texture over time. However, stored samples showed increased cooking loss and reduced post-cooking weight, indicating changes in cooking performance over time.

Keywords: Noodle, Jellyfish, Collagen, Just about right, Tensile strength

1. บทนำ

ชาวเอเชียมีวัฒนธรรมการบริโภคคาร์โบไฮเดรต เช่น ข้าว เส้นบะหมี่ ซาลาเปา หรือหมั่นโถว เป็นอาหารหลักในชีวิตประจำวัน เส้นบะหมี่ยังเป็นผลิตภัณฑ์แปรรูปที่ได้รับความนิยมในการบริโภคจากชาวตะวันตกเช่นกัน (Fu, 2008) การผลิตเส้นบะหมี่ใช้แป้งข้าวสาลีเป็นหลัก โดยสามารถแบ่งเส้นบะหมี่ออกเป็น 2 ชนิด ขึ้นกับส่วนผสมที่ใช้ในการผลิต คือ เส้นบะหมี่แบบเค็ม (Salted noodle) และเส้นบะหมี่สีเหลือง (Yellow noodle) เส้นบะหมี่สีเหลืองมีส่วนผสมหลัก คือ แป้งข้าวสาลี น้ำ และสารละลายต่าง ๆ ที่ประกอบด้วยโซเดียมคาร์บอเนตและโพแทสเซียมคาร์บอเนตในปริมาณร้อยละ 0.5-3.0 โดยมีอัตราส่วนของสารทั้งสองชนิดอยู่ในช่วง 1:9-9:1 (Asenstorfer et al., 2006; Hatcher & Anderson, 2007) ขั้นตอนการผลิตเส้นบะหมี่ไม่ซับซ้อน โดยเริ่มจากการผสมแป้ง น้ำ และสารละลายต่าง ๆ ให้เข้ากัน จากนั้นทำการนวด พักโด รีดให้เป็นแผ่น และทำการตัดเป็นเส้น การนวดแป้งเป็นการทำให้โปรตีนกลูเตนในแป้งข้าวสาลีเกิดการเชื่อมต่อกันของโปรตีนไกลอะดินและกลูเตนินด้วยพันธะไดซัลไฟด์ ทำให้ได้ลักษณะโดซึ่งเป็นโครงสร้างตาข่ายที่แข็งแรงขึ้น

สารละลายต่าง ๆ มีผลต่อคุณภาพและอันตรกิริยาของไฟฟ้าสถิตและแรงไฮโดรโฟบิก ส่งผลทำให้เส้นบะหมี่มีเนื้อแน่นและมีความเหนียว (Jia et al., 2019) เส้นบะหมี่สีเหลืองเกิดจากปฏิกิริยาการเปลี่ยนสีของสารสี ฟลาโวนอยด์ในแป้งข้าวสาลีในสภาวะที่เป็นด่าง (Fu, 2008) คุณภาพสำคัญของเส้นบะหมี่หลังจากการต้มสุก (Cooking quality) ที่ผู้บริโภคยอมรับ ได้แก่ ความเหนียว ความยืดหยุ่นและความนุ่ม โดยคุณภาพหลังการต้มเกี่ยวข้องกับเวลาที่ใช้ในการต้มสุก (Cooking time) น้ำหนักที่ได้หลังการต้ม (Cooking weight) และปริมาณของแข็งที่สูญเสียระหว่างการต้ม (Cooking loss) ปัจจุบันมีการพัฒนาผลิตภัณฑ์เส้นบะหมี่ที่ทำให้มีความหลากหลายและมีคุณค่าทางโภชนาการมากขึ้น เช่น การเพิ่มปริมาณโปรตีนโดยใช้ผงโปรตีนแมงกะพรุน (Muangrod, 2020) การเติมโปรตีนเคสเนื่องจากโครงปลานิล (Popert & Gawborisut, 2015) การทดแทนแป้งข้าวสาลีด้วยแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ (Chokchaithanawiwat et al., 2019;

Sirichokworakit et al., 2015) แป้งกล้วยหินและกล้วยหักมุก (Loikaeo & Chaisakdanugull, 2016) การเติมผงแก่นตะวัน (Malai et al., 2013) และเนื้อตาลผง (Tanasombun et al., 2014) สำหรับในเส้นบะหมี่กึ่งสำเร็จรูปมีการผสมเส้นใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำจากการสกัดเปลือกมะม่วงและเปลือกทับทิม (Bhatt & Gupta, 2023) การใช้แป้งข้าวสาลี โปรตีนตั่ว (Choy et al., 2010) และการปรับปริมาณเกลือในเส้นบะหมี่ (Hu et al., 2017) เป็นต้น

ประเทศไทยมีธุรกิจประมงพื้นบ้านที่สามารถทำรายได้ให้กับชาวประมง และเป็นธุรกิจส่งออกที่ทำรายได้ให้กับประเทศ ได้แก่ การจับแมงกะพรุนชนิดกินได้ ซึ่งจัดเป็นแหล่งดอนสัตว์ขนาดใหญ่ แมงกะพรุนชนิดกินได้ที่พบอยู่ทั่วโลกมีจำนวนมากกว่า 30 สายพันธุ์ (Brotz et al., 2017) นิยมนำมาแปรรูปให้อยู่ในรูปแมงกะพรุนดองเกลือ โดยธุรกิจแมงกะพรุนนี้คาดว่าจะมีมูลค่ามากกว่า 100 ล้านบาท (Khong et al., 2016) ในประเทศไทย มีปริมาณการส่งออกแมงกะพรุนตั้งแต่ปี พ.ศ. 2546 - 2566 เฉลี่ย 5,531 ตัน โดยคิดเป็นมูลค่า 456 ล้านบาทต่อปี (Customs Department, 2024) แมงกะพรุนที่ส่งออก คือ แมงกะพรุนสายพันธุ์ *Lobonema smithii* และ *Rhopilema hispidum* ซึ่งเป็นที่รู้จักในชื่อไทยว่า แมงกะพรุนพันธุ์ลอดช่องและแมงกะพรุนพันธุ์หนัง ตามลำดับ (Thumthanaruk et al., 2008) ชาวเอเชียโดยเฉพาะชาวจีนบริโภคแมงกะพรุนมากกว่า 1,000 ปี อาหารที่ทำจากแมงกะพรุนจัดเป็นอาหารที่มีไขมันและโคเลสเตอรอลต่ำแต่มีโปรตีนคอลลาเจนสูง (Hsieh et al., 2001) ซึ่งมีรายงานว่า แมงกะพรุนสดพันธุ์หนังมีความชื้น โปรตีน และคอลลาเจน ร้อยละ 95.54, 3.06 และ 2.76 ตามลำดับ ในขณะที่แมงกะพรุนสายพันธุ์ลอดช่องมีความชื้น โปรตีน และคอลลาเจน ร้อยละ 95.78, 3.17 และ 2.88 ตามลำดับ (Kromfang et al., 2009) และแมงกะพรุนสายพันธุ์ลอดช่อง แมงกะพรุนหนัง และแมงกะพรุนหอมมีโคเลสเตอรอลน้อยกว่า 0.35 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม (Lelawatcharamas, 2004) เนื้อสัมผัสของแมงกะพรุนมีความเหนียว กรอบ และยืดหยุ่น (Palmieri et al. 2023; Pedersen & Vilgis, 2019) ผงโปรตีนแมงกะพรุนอบแห้งด้วยเครื่องอบลมร้อนพบว่า มีความชื้น โปรตีน ไขมัน และเถ้า ร้อยละ 7.69, 67.85, 1.35 และ 15.76 ตามลำดับ (Muangrod, 2020) นอกจากนี้ เมื่อนำคอลลาเจนจากแมงกะพรุนมาย่อยด้วยเปปซินหรือโบรมิเลนจะได้เป็นโปรตีนไฮโดรไลเซตที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH radical) ซึ่งมีคุณสมบัติการเป็นอนุมูลอิสระและทำให้โฟมมีความคงตัว (Lueyot & Thumthanaruk, 2014; Silaprueng et al., 2015) โดยคอลลาเจนจากแมงกะพรุนได้รับการศึกษามากขึ้นเพื่อนำมาใช้ในอุตสาหกรรมอาหารและอุตสาหกรรมในอนาคตก (Chiarelli et al., 2023)

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาต่อยอดงานวิจัยของ Muangrod (2020) ที่พบว่า เส้นบะหมี่สดที่มีการผสมผงแมงกะพรุนต่อแป้งข้าวสาลีในอัตราส่วน 5:95 โดยน้ำหนัก ทำให้เส้นบะหมี่มีความยืดหยุ่นมากขึ้น เมื่อแป้งข้าวสาลีผสมกับน้ำทำให้เกิดโปรตีนกลูเตนที่มีลักษณะเหนียวและยืดหยุ่นได้ดี ประกอบกับประเทศไทยเป็นหนึ่งในประเทศผู้ผลิตข้าวเจ้าชั้นนำของโลก และแป้งข้าวเจ้าสามารถนำมาเป็นวัตถุดิบหลักในการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ได้หลากหลาย เช่น เส้นหมี่ เส้นก๋วยเตี๋ยว และเส้นก๋วยจั๊บ เป็นต้น

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ เพื่อศึกษาการผลิตเส้นบะหมี่จากการใช้แป้งข้าวเจ้าทดแทนแป้งข้าวสาลี และศึกษาคุณภาพของเส้นบะหมี่ผสมผงแมงกะพรุน จากนั้นศึกษาผลของอุณหภูมิและระยะเวลาในการเก็บรักษาต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพในด้านต่าง ๆ ของเส้นบะหมี่ผสมผงแมงกะพรุน เพื่อเป็น

ข้อมูลสำหรับการผลิตเชิงพาณิชย์ในอนาคต รวมทั้งเพิ่มมูลค่าและความหลากหลายให้กับผลิตภัณฑ์เส้นบะหมี่

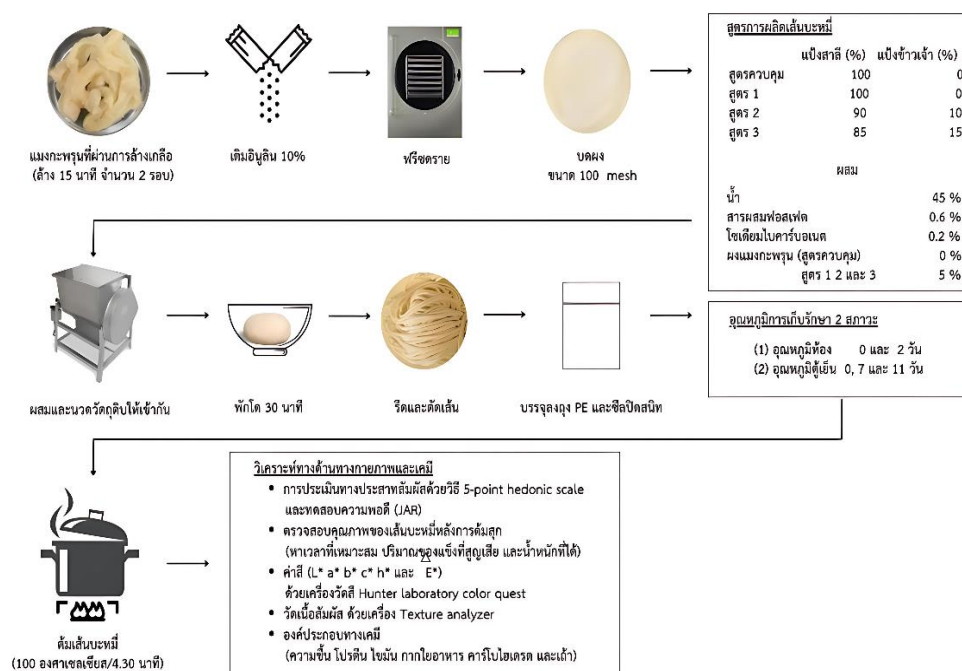
2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 วัตถุดิบ

แป้งกะพรวนดองเกลือสายพันธุ์ลอดช่อง อินูลิน แป้งข้าวสาลี (ตราว่าว) แป้งข้าวเจ้า (ตราใบหยก) โซเดียมไบคาร์บอเนต (ตราแมกกาเร็ต) สารผสมฟอสเฟตระหว่างโซเดียมเฮกซะเมตาฟอสเฟต โซเดียมคาร์บอเนตและโพแทสเซียมคาร์บอเนต

2.2 วิธีดำเนินการวิจัย

แผนภาพรอบการวิจัยเส้นบะหมี่ที่ใช้แป้งข้าวเจ้าทดแทนแป้งข้าวสาลีผสมผงแป้งกะพรวนแสดงดังในรูปที่ 1 การผลิตเส้นบะหมี่ที่มีส่วนผสมของแป้งสาลี แป้งข้าวเจ้า สารผสมฟอสเฟต โซเดียมไบคาร์บอเนต ผงแป้งกะพรวน และน้ำในอัตราส่วนที่แตกต่างกัน ผสมวัตถุดิบ นวด พักโด รีด และตัดเส้น ก่อนนำไปทดสอบทางด้านเคมีและกายภาพของเส้นบะหมี่



รูปที่ 1. แผนภาพกรอบงานวิจัยการผลิตและการวิเคราะห์เส้นบะหมี่ที่ใช้แป้งข้าวเจ้าทดแทนแป้งข้าวสาลีผสมผงแป้งกะพรวน

2.2.1 การเตรียมผงแมงกะพรุน

นำแมงกะพรุนต้องเกลือจำนวน 100 กิโลกรัม มาล้างเกลือด้วยวิธีการของ Charoenchokpanich et al. (2020) ด้วยเครื่องล้างที่พัฒนาขึ้นของบริษัทมหาชัยซีฟู้ด แอนด์ เทรตติ้งจำกัด จำนวน 2 ครั้ง แล้วนำมาปั่นเหวี่ยงเป็นเวลา 5 นาที จากนั้นคลุกผสมกับอินูลินจำนวน 10 กิโลกรัม (Charoenchokpanich et al., 2024) และนำไปทำแห้งด้วยเครื่องแช่เยือกแข็งอบแห้ง (Freeze dryer) ที่บริษัทชันสแนค ฟู้ดเทค จำกัด ทำการบดตัวอย่างที่แห้งแล้วให้ละเอียดและร่อนผ่านตะแกรงขนาด 100 เมช บรรจุในถุงออลูมิเนียมฟอยล์ และเก็บรักษาไว้ในที่อุณหภูมิห้องก่อนนำมาใช้งาน

2.2.2 การใช้แป้งข้าวเจ้าทดแทนแป้งข้าวสาลีในการผลิตเส้นบะหมี่ผสมผงแมงกะพรุน

สูตรการผลิตเส้นบะหมี่จำนวน 4 สูตร โดยในแต่ละสูตรใช้แป้งทั้งหมดรวมจำนวน 1,000 กรัม ทำการแปรผันปริมาณแป้งข้าวสาลีและแป้งข้าวเจ้าดังแสดงในตารางที่ 1 การผลิตเส้นบะหมี่สดผสมโปรตีนคอลลาเจนจากแมงกะพรุนดัดแปลงวิธีของ Muangrod (2020) โดยในแต่ละสูตรนำส่วนผสมแป้งผสมกับผงโปรตีนแมงกะพรุนร้อยละ 5 (ของปริมาณแป้ง) ผสมกับน้ำร้อยละ 40 ผสมให้เข้ากัน เติมน้ำส่วนของโซเดียมไบคาร์บอเนตร้อยละ 0.02 และสารฟอสเฟตผสมร้อยละ 0.06 ต่อปริมาณแป้ง โดยเตรียมสารฟอสเฟตมาละลายผสมกับน้ำที่เหลือร้อยละ 5 นวดให้เข้ากันแล้ว พักไว้เวลานาน 30 นาที นำโดมารีดและตัดเป็นเส้นก่อนทำการบรรจุในถุงโพลีเอทิลีนเพื่อรอการตรวจสอบ

ตารางที่ 1. สูตรการผลิตเส้นบะหมี่ผสมผงโปรตีนคอลลาเจนจากแมงกะพรุน

สูตร/ ส่วนประกอบ (ร้อยละ)	แป้งสาลี	แป้งข้าวเจ้า	น้ำ*	โซเดียมไบ คาร์บอเนต*	สารผสม ฟอสเฟต*	ผง แมงกะพรุน*
สูตรควบคุม	100.00	0.00	45.00	0.20	0.60	0.00
สูตร 1	100.00	0.00	45.00	0.20	0.60	5.00
สูตร 2	90.00	10.00	45.00	0.20	0.60	5.00
สูตร 3	85.00	15.00	45.00	0.20	0.60	5.00

*หมายเหตุ คำนวณจากปริมาณของแป้งทั้งหมด (แป้งข้าวสาลีและแป้งข้าวเจ้า)

2.2.3 การประเมินทางประสาทสัมผัส

ทำการตรวจสอบคุณภาพของเส้นบะหมี่ในทุกสูตร โดยต้มเส้นบะหมี่เป็นเวลานาน 4.30 นาที ที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส สะเด็ดน้ำ ทิ้งให้เย็น แล้วนำมาทดสอบคุณภาพทางด้านประสาทสัมผัส โดยให้คะแนนความชอบทางด้านลักษณะปรากฏ กลิ่น รสชาติ และความชอบโดยรวม ด้วยวิธี 5-point hedonic scale โดยมีคะแนน 1, 2, 3, 4 และ 5 หมายถึง ไม่ชอบมากที่สุด ไม่ชอบมาก เฉย ๆ (บอกไม่ได้ว่าชอบหรือไม่ชอบ) ชอบมาก และชอบมากที่สุด ตามลำดับ และตรวจสอบวัดความพอดีของตัวอย่างโดยใช้สเกล 5 คะแนน โดยมีคะแนน 1, 2, 3, 4 และ 5 หมายถึง อ่อนมาก อ่อนเล็กน้อย พอดี เข้มข้นเล็กน้อย และเข้มข้นมาก อ่อนมากเกินไป อ่อนเกินไปเล็กน้อย พอดี เข้มเกินไปเล็กน้อย และเข้มข้นมากเกินไป ตามลำดับ สอบถามขนาดและความหนาของเส้นบะหมี่ สี กลิ่นควาแมงกะพรุน รสเค็ม และความยืดหยุ่น

จากผู้ทดสอบจำนวน 50 คน โครงการนี้ได้ผ่านการอนุมัติจากคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์
เครือข่ายภูมิภาคมหาวิทยาลัยนครสวรรค์ รหัส PREC 0045/2565

2.2.4 การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพ

การตรวจสอบคุณภาพด้านกายภาพด้านสี โดยนำตัวอย่างมาตรวจวัดค่าสี L^* , a^* และ b^* ด้วย
เครื่องวัดสี Hunter Laboratory Color Quest (Hunter Lab, USA) โดยค่า L^* เท่ากับ 100 หมายถึง
ตัวอย่างมีสีขาว แต่ถ้าค่า L^* เข้าใกล้ 0 หมายถึง ตัวอย่างมีสีดำ ค่า a^* เป็นบวก แสดงว่า ตัวอย่างมีสีแดง
ค่า a^* เป็นลบ แสดงว่า ตัวอย่างมีสีเขียว และค่า b^* เป็นบวก แสดงว่า ตัวอย่างมีสีเหลือง ค่า b^* เป็นลบ
แสดงว่า ตัวอย่างมีสีน้ำเงิน โดยวางตัวอย่างลงบนช่องว่างสำหรับตัวอย่างที่บดแสง (Reflectance port) และ
นำค่า L^* , a^* และ b^* ไปคำนวณหาความต่างของสี (ΔE^*) เฉดสี (Hue angle; h^*) ในหน่วยเป็นองศา
เป็นตัวเลขที่ระบุตำแหน่งของสีในกราฟ โดยมุม 0° แสดงสีแดง มุม 90° แสดงสีเหลือง มุม 180° แสดงสีเขียว
และมุม 270° แสดงสีน้ำเงิน และความเข้มของสี (Chroma, C^*) แสดงดังสมการที่ (1) – (3)

$$Total\ Color\ Difference\ (\Delta E^*) = \sqrt{(L^*_0 - L^*)^2 + (a^*_0 - a^*)^2 + (b^*_0 - b^*)^2} \quad (1)$$

$$h^* = \tan^{-1} \left(\frac{b^*}{a^*} \right) \quad (2)$$

$$C^* = \sqrt{(a^*)^2 + (b^*)^2} \quad (3)$$

- เมื่อ L^*_0 คือ ค่า L^* ของตัวอย่างควบคุม
 L^* คือ ค่า L^* ของตัวอย่างที่ต้องการเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม
 a^*_0 คือ ค่า a^* ของตัวอย่างควบคุม
 a^* คือ ค่า a^* ของตัวอย่างที่ต้องการเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม
 b^*_0 คือ ค่า b^* ของตัวอย่างควบคุม
 b^* คือ ค่า b^* ของตัวอย่างที่ต้องการเปรียบเทียบกับตัวอย่างควบคุม

ทำการตรวจสอบคุณภาพของเส้นบะหมี่หลังการต้มสุกด้วยวิธีของ Wandee et al. (2015) โดยการ
หาเวลาที่เหมาะสมในการต้มสุก โดยชั่งตัวอย่างเส้นบะหมี่หนัก 5.00 ± 0.01 กรัม นำไปต้มในน้ำเดือด 200
มิลลิลิตร ในปิกเกอร์ที่มีกระจกนาฬิกาปิด ทำการจับเวลาในการต้มที่ทำให้เส้นบะหมี่สุก ตรวจสอบความสุก
ของตัวอย่างเส้นบะหมี่ทุก 10 วินาที โดยนำเส้นบะหมี่มาแช่น้ำสะอาดในทุกช่วงเวลา ลักษณะเส้นบะหมี่
ที่สุกจะมีลักษณะเส้นมีขนาดใหญ่ขึ้น มีความยืดหยุ่น สีของเส้นบะหมี่จะมีความสว่างใสขึ้นตลอดทั้งเส้น เมื่อ
นำมาเส้นที่ต้มแล้วมาวางระหว่างแผ่นกระจกของจานอาหารเลี้ยงเชื้อแล้วกดอัด จะต้องไม่ปรากฏจุดขาวที่
แสดงลักษณะของแป้งที่ไม่สุก จึงใช้เป็นระยะเวลาการต้มเส้นบะหมี่ให้สุก

ทำการวิเคราะห์ร้อยละปริมาณของแข็งที่สูญเสียระหว่างการต้ม โดยชั่งตัวอย่างเส้นบะหมี่หนัก
 5.00 ± 0.01 กรัม นำไปต้มในน้ำเดือด 200 มิลลิลิตร หลังการต้มสุก นำน้ำที่เหลือจากการต้มเส้นบะหมี่ไปใส่
ในปิกเกอร์ที่ทราบน้ำหนักแน่นอน และนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง
หรือจนกว่าน้ำหนักคงที่ ชั่งน้ำหนักปิกเกอร์หลังการอบแห้ง คำนวณหาร้อยละปริมาณของแข็งที่สูญเสีย
ระหว่างการต้ม ดังสมการที่ (4)

$$\% \text{ Cooking loss} = \frac{W_2 - W_1}{W_3} \times 100 \quad (4)$$

เมื่อ W_1 คือ น้ำหนักปีกเกอร์เปล่า (กรัม)
 W_2 คือ น้ำหนักปีกเกอร์หลังการอบ (กรัม)
 W_3 คือ น้ำหนักของเส้นบะหมี่ก่อนการต้ม (กรัม)

ทำการวิเคราะห์ร้อยละน้ำหนักที่ได้หลังการต้ม โดยชั่งตัวอย่างเส้นบะหมี่หนัก 5.00 ± 0.01 กรัม นำไปต้มในน้ำเดือด 200 มิลลิลิตร หลังจากการต้มตัวอย่างเส้นบะหมี่ให้สุก นำตัวอย่างเส้นบะหมี่สุกมา สะเด็ดน้ำบนตะแกรงเป็นเวลา 1 นาที ชับน้ำที่เหลือด้วยกระดาษแล้วนำไปชั่งน้ำหนัก คำนวณหาร้อยละ น้ำหนักที่ได้หลังการต้ม (American Association of Cereal Chemists (AACC), 2000) ดังสมการที่ (5)

$$\% \text{ Cooking weight} = \frac{W_2}{W_1} \times 100 \quad (5)$$

เมื่อ W_2 คือ น้ำหนักของเส้นบะหมี่ก่อนการต้ม (กรัม)
 W_1 คือ น้ำหนักของเส้นบะหมี่หลังการต้ม (กรัม)

ทำการตรวจสอบเนื้อสัมผัสของเส้นบะหมี่ผสมผงแมงกะพรุนหลังต้มสุกในน้ำเดือดนาน 4.30 นาที สะเด็ดน้ำ นำมาวัดค่าแรงต้านการดึงขาด (Tensile strength) ด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (Texture analyzer: Stable microsystem Model TA. XT plus, USA) โดยใช้อุปกรณ์โรลเลอร์คู่ (Parallel friction rollers) และตั้งค่าความเร็วของหัววัดก่อนที่จะถึงจุดกระทบตัวอย่าง (Pre-test speed) ความเร็วของหัววัดเมื่อถึงจุดกระทบตัวอย่าง (Test speed) และความเร็วของหัววัดเคลื่อนที่กลับไปยังจุดเริ่มต้น (Post-test speed) เท่ากับ 3 มิลลิเมตรต่อวินาที ระยะเดินทางของลูกกลิ้งเท่ากับ 100 มิลลิเมตร

ทำการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี (Proximate analysis) ของผงแมงกะพรุนและปริมาณ คอลลาเจนด้วยวิธี AOAC (AOAC, 2019) โดยส่งตรวจบริษัทห้องปฏิบัติการกลาง (ประเทศไทย) จำกัด การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเส้นบะหมี่ผสมผงแมงกะพรุน ได้แก่ ความชื้น โปรตีน ไขมัน เถ้า และ คาร์โบไฮเดรต โดยดัดแปลงจากวิธี AOAC (AOAC, 2005)

2.2.5 การศึกษาผลของสภาวะในการเก็บรักษาที่อุณหภูมิและระยะเวลาที่ต่างกันต่อคุณภาพของ เส้นบะหมี่ผสมผงแมงกะพรุน

นำเส้นบะหมี่ผสมผงแมงกะพรุนทุกสูตรมาเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง ($28 \pm 2^\circ\text{C}$) และอุณหภูมิในตู้เย็น ($8 \pm 2^\circ\text{C}$) จนผลิตภัณฑ์เสื่อมเสีย โดยมีเกณฑ์การตัดสินการเสื่อมเสียจากลักษณะที่ปรากฏคือ เส้นบะหมี่มี ลักษณะเป็นเมือกและมีกลิ่นเหม็นผิดปกติ โดยมีการตรวจสอบคุณภาพของเส้นบะหมี่ผสมผงแมงกะพรุน หลังการต้มสุกร่วมกับการตรวจสอบเนื้อสัมผัส

1) การวิเคราะห์สมบัติทางกายภาพของตัวอย่างระหว่างการเก็บรักษา

นำเส้นบะหมี่ผสมผงแมงกะพรุนที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิในตู้เย็น มาตรวจสอบคุณภาพของเส้นบะหมี่หลังการต้มสุกโดยวิธีของ Wandee et al. (2015) และตรวจสอบเนื้อสัมผัสโดยวัดค่าแรงต้านการดึงขาด (วิธีการตามข้อ 2.2.4)

2) การวางแผนการทดลองและการวิเคราะห์ทางสถิติ

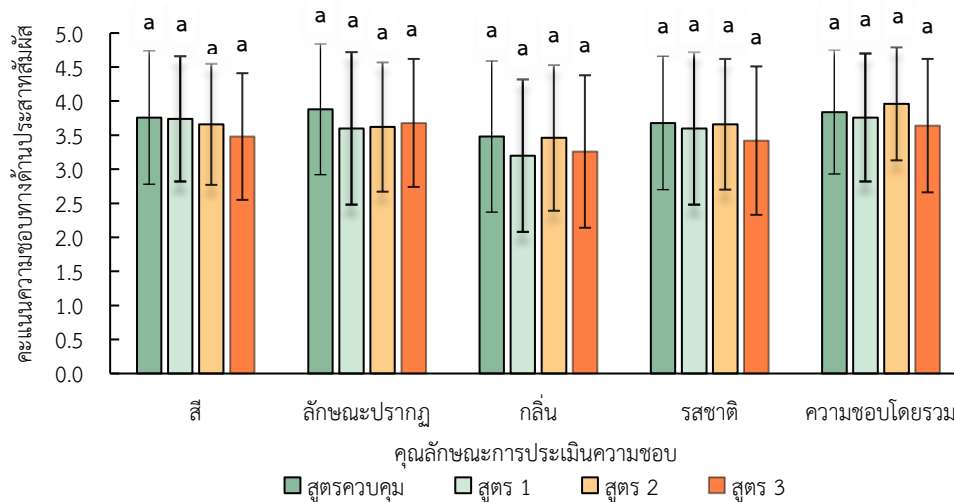
ดำเนินการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely randomized design) จำนวน 3 ซ้ำ การวิเคราะห์ทางสถิติโดยการหาค่าเฉลี่ยและเปรียบเทียบโดยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% โดยใช้โปรแกรม SPSS เวอร์ชัน 17.0 (SPSS Inc, 2008)

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

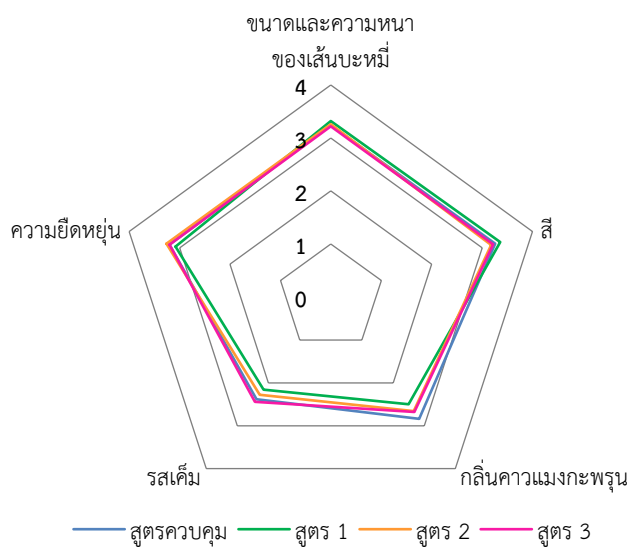
3.1 ผลการใช้แป้งข้าวเจ้าทดแทนแป้งข้าวสาลีต่อคุณภาพของเส้นบะหมี่ผสมผงแมงกะพรุน

3.1.1 คุณภาพทางประสาทสัมผัส

ในการทดลองนี้ ได้ผลิตเส้นบะหมี่ผสมผงแมงกะพรุนโดยมีขนาดการผลิต 1,000 กรัม จำนวน 4 ตัวอย่าง แต่ละตัวอย่างมีปริมาณแป้งข้าวสาลี แป้งข้าวเจ้า และผงแมงกะพรุนที่แตกต่างกัน คือ ตัวอย่างควบคุมมีเฉพาะแป้งข้าวสาลี น้ำ โซเดียมไบคาร์บอเนต และผงฟอสเฟตผสม โดยที่สูตร 1 มีปริมาณส่วนผสมเช่นเดียวกับสูตรควบคุมแต่เติมผงแมงกะพรุนร้อยละ 5 (คำนวณจากปริมาณแป้งรวม) สูตร 2 ใช้แป้งข้าวเจ้าทดแทนแป้งข้าวสาลีร้อยละ 10 และผงแมงกะพรุนร้อยละ 5 และสูตร 3 มีปริมาณแป้งข้าวเจ้าทดแทนแป้งข้าวสาลีร้อยละ 15 และผงแมงกะพรุนร้อยละ 5 ดังแสดงในตารางที่ 1 ผลการทดสอบทางประสาทสัมผัสจากผู้ทดสอบจำนวน 50 คน พบว่า มีคะแนนผลการประเมินความชอบทางด้านสีมีค่าเท่ากับ 3.48-3.76 ลักษณะปรากฏมีค่าเท่ากับ 3.60-3.88 กลิ่นมีค่าเท่ากับ 3.20-3.48 รสชาติ มีค่าเท่ากับ 3.42-3.68 และความชอบโดยรวมมีค่าเท่ากับ 3.64-3.96 ไม่แตกต่างกัน โดยคะแนนเฉลี่ยที่ได้อยู่ในช่วงเฉย ๆ ค่อนไปทางชอบมาก ผลคะแนนการทดสอบทางประสาทสัมผัสแสดงได้ดังรูปที่ 2(ก)



(ก) คะแนนความชอบใช้ 5-Point hedonic scale



(ข) ระดับความพอดี (Just about right score) สเกล 5 คะแนน

รูปที่ 2. คะแนนการทดสอบทางประสาทสัมผัสของเส้นบะหมี่ผสมผงแมงกะพรุนในสูตรต่าง ๆ

*หมายเหตุ สูตรควบคุม คือ ร้อยละแป้งข้าวสาลี เท่ากับ 100

สูตร 1 คือ ร้อยละแป้งข้าวสาลี เท่ากับ 100 และผสมผงแมงกะพรุนร้อยละ 5 ต่อปริมาณแป้งทั้งหมด

สูตร 2 คือ ร้อยละแป้งข้าวสาลีต่อแป้งข้าวเจ้า เท่ากับ 90:10 และผสมผงแมงกะพรุนร้อยละ 5 ต่อปริมาณแป้งทั้งหมด

สูตร 3 คือ ร้อยละแป้งข้าวสาลีต่อแป้งข้าวเจ้า เท่ากับ 85:15 และผสมผงแมงกะพรุนร้อยละ 5 ต่อปริมาณแป้งทั้งหมด

ผงแมงกะพรุนพรีซตรรายที่ใช้ในงานวิจัยนี้ ผลิตจากการนำแมงกะพรุนที่ต้องเกลือและล้างเกลือออกแล้ว มาทำให้แห้งด้วยเทคนิคพรีซตรรายร่วมกับการใช้อินูลินซึ่งทำหน้าที่เป็นสารไครโอโพรเทกแทนต์ อินูลินเป็นพอลิแซคคาไรด์ที่ประกอบด้วยน้ำตาลฟรักโทสร้อยละ 80 น้ำตาลกลูโคสร้อยละ 20 เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ β -(2-1) ไกลโคซิดิกที่มีความยาวตั้งแต่ 2-60 หน่วย เป็นใยอาหารที่ละลายน้ำได้ (Soluble dietary fiber) สามารถอุ้มน้ำได้ดี และไม่มีกลิ่น (Charoenchokpanich et al., 2024) จึงนำแมงกะพรุนที่ล้างเกลือแล้วมาคลุกผสมด้วยสารละลาย อินูลินความเข้มข้น 10% ก่อนนำตัวอย่างไปแช่แข็ง เมื่อนำมาละลายจะพบว่า สารละลายอินูลินมีประสิทธิภาพเป็นสารไครโอโพรเทกแทนต์ที่สามารถช่วยป้องกันการสูญเสียสภาพธรรมชาติของโปรตีน โดยมีค่าร้อยละการสูญเสียของเหลว (Drip loss) หลังการละลายน้ำแข็งน้อยกว่าตัวอย่างควบคุมแต่ใกล้เคียงกับการใช้ซูโครสกับซอร์บิทอล ผลการวิเคราะห์เนื้อเยื่อด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope) พบว่า อินูลินแทรกเข้าไปภายในโปรตีนแมงกะพรุน ทำให้ชั้นของโปรตีนบางส่วนแยกออกจากกัน จึงปรากฏลักษณะเป็นโพรง ในขณะที่ตัวอย่างควบคุมที่แช่แมงกะพรุนในน้ำหลังการแช่แข็งและละลายแล้ว ชั้นของโปรตีนจะจับกันแน่นมาก แมงกะพรุนล้างเกลือที่แช่อินูลินที่ผ่านการพรีซตรรายมีลักษณะทางกายภาพของชิ้นแมงกะพรุนที่แห้ง มีสารอินูลินเกาะติดอยู่ มีความกรอบ มีรสหวานเล็กน้อย เคี้ยวง่าย ไม่แห้งแข็ง เมื่อเคี้ยวจะได้ลักษณะเนื้อสัมผัสของเจลลี่ของแมงกะพรุน สามารถบดให้ละเอียดได้ง่าย เมื่อนำผงแมงกะพรุนมาผสมในผลิตภัณฑ์เส้นบะหมี่จึงเป็นเนื้อเดียวกับเส้นบะหมี่ โดย Yue et al. (2023) ระบุว่าคุณภาพของโดของเส้นบะหมี่มีความสัมพันธ์กับอินูลินซึ่งเป็นพอลิแซคคาไรด์ที่สามารถจับกับน้ำได้ดี เมื่อเกิดปฏิกิริยาร่วมกับสตาร์ช โปรตีน และส่วนผสมอื่นๆ ในสภาวะที่เป็นด่างและมีเกลือ สารอินูลินจะช่วยให้โครงสร้างของเส้นบะหมี่มีสมบัติวิสโคอีลาสติก (Viscoelasticity) มากขึ้น แต่ในสภาวะที่มีสารละลายด่างและเกลือ จะเกิดการแย่งจับน้ำระหว่างโปรตีนในโด อินูลิน และสตาร์ช ด้วยเช่นกัน

เนื่องจากแมงกะพรุนต้องเกลือเป็นผลิตภัณฑ์อาหารทะเลที่มีกลิ่นคาวและมีรสเค็ม แม้จะมีขั้นตอนการล้างเกลือออกแล้ว แต่กลิ่นคาวและรสเค็มที่ยังตกค้างอยู่ในผงแมงกะพรุนพรีซตรรายอาจจะส่งผลกระทบต่อกลิ่นและรสชาติของเส้นบะหมี่ผสมผงแมงกะพรุนได้ ดังนั้น จึงทดสอบประสาทสัมผัสทางด้านความพอดีของขนาดและความหนาของเส้นบะหมี่ สี กลิ่นคาวแมงกะพรุน รสเค็ม และความยืดหยุ่นพบว่า ในทุกตัวอย่างมีค่าคะแนนของระดับความพอดีไม่แตกต่างกัน นั่นคือ มีขนาดและความหนาของเส้นบะหมี่เท่ากับ 3.22-3.32 คะแนนความชอบด้านสีเท่ากับ 3.18-3.36 ความยืดหยุ่นเท่ากับ 3.08-3.26 รสเค็มเท่ากับ 2.16-2.38 และกลิ่นคาว เท่ากับ 2.50-2.84 โดยระดับความพอดีของรสเค็มและกลิ่นคาวของแมงกะพรุนอยู่ในระดับอ่อนเกินไปเล็กน้อย

การที่ผลิตภัณฑ์เส้นบะหมี่ผสมผงแมงกะพรุนมีรสเค็มหรือกลิ่นคาวน้อย แสดงให้เห็นว่าผงแมงกะพรุนไม่ก่อให้เกิดกลิ่นและรสที่ผิดปกติในเส้นบะหมี่ จึงสามารถนำมาเสริมโปรตีนในผลิตภัณฑ์เส้นบะหมี่ได้ ผลคะแนนการทดสอบแสดงดังรูปที่ 2(ข) ผลการทดสอบความชอบและระดับความพอดีให้ผลที่สอดคล้องกันคือ ผู้ทดสอบค่อนข้างชอบผลิตภัณฑ์และลักษณะของเส้นบะหมี่ในทุกสูตร โดยมีขนาดและความหนาของเส้นบะหมี่ สี และความเหนียวกำลังพอดี รวมทั้งเส้นบะหมี่ผสมผงแมงกะพรุนมีรสเค็มและกลิ่นคาวเพียงเล็กน้อย

3.1.2 ลักษณะทางกายภาพ

เส้นบะหมี่ผสมผงแมงกะพรุนในทุกสูตร ที่สภาวะการเก็บรักษาที่อุณหภูมิและวันต่าง ๆ มีลักษณะเส้นบะหมี่สดที่มีสีเหลืองอ่อนและมีความหนานุ่มเหมือนเส้นราเม็งญี่ปุ่นแสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2. ลักษณะปรากฏของเส้นบะหมี่ผสมโปรตีนคอลลาเจนจากแมงกะพรุนที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิแช่เย็น

สภาวะการเก็บรักษา	สูตร			
	สูตรควบคุม	1	2	3
อุณหภูมิห้อง วันที่ 0				
อุณหภูมิห้อง วันที่ 2				
อุณหภูมิแช่เย็น วันที่ 7				
อุณหภูมิแช่เย็น วันที่ 11				

*หมายเหตุ สูตรควบคุม คือ ร้อยละแป้งข้าวสาลี เท่ากับ 100

สูตร 1 คือ ร้อยละแป้งข้าวสาลี เท่ากับ 100 และผสมผงแมงกะพรุนร้อยละ 5 ต่อปริมาณแป้งทั้งหมด

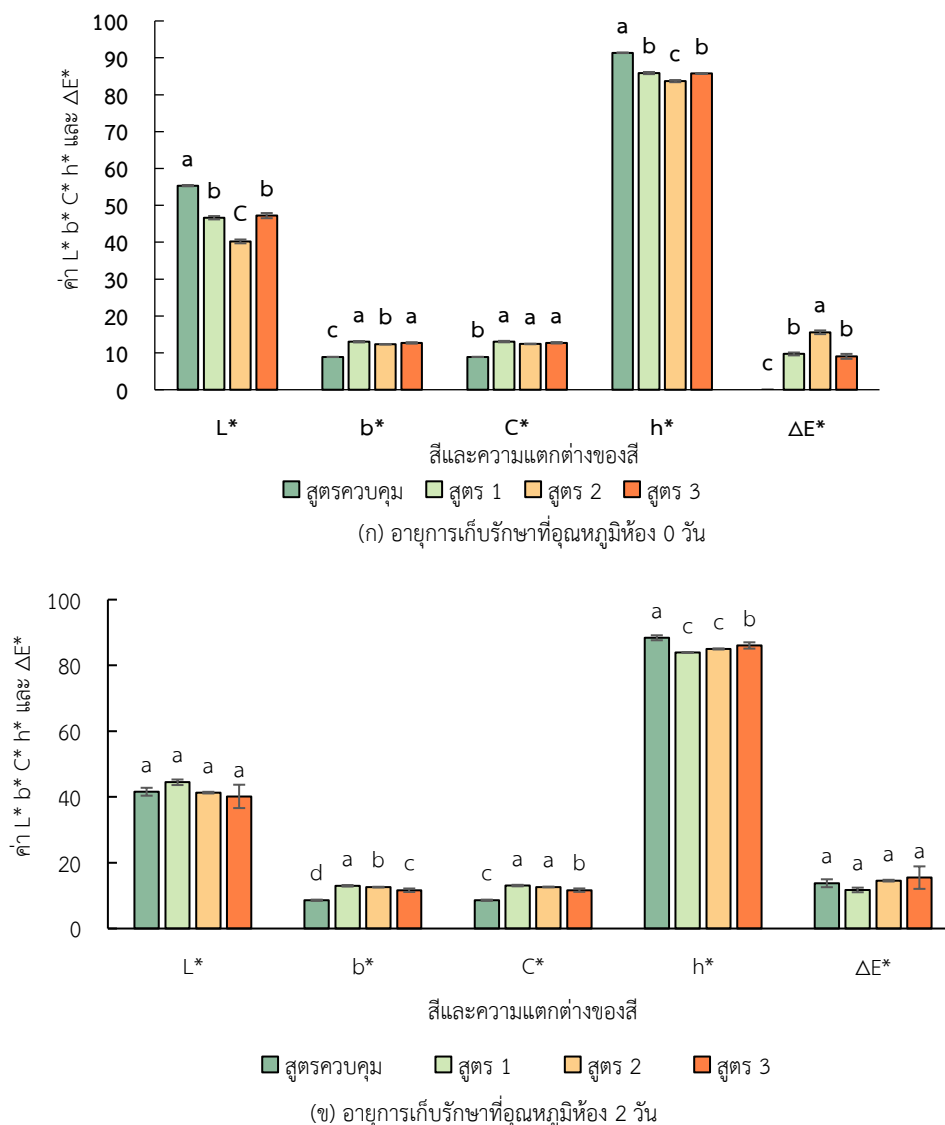
สูตร 2 คือ ร้อยละแป้งข้าวสาลีต่อแป้งข้าวเจ้า เท่ากับ 90:10 และผสมผงแมงกะพรุนร้อยละ 5 ต่อปริมาณแป้งทั้งหมด

สูตร 3 คือ ร้อยละแป้งข้าวสาลีต่อแป้งข้าวเจ้า เท่ากับ 85:15 และผสมผงแมงกะพรุนร้อยละ 5 ต่อปริมาณแป้งทั้งหมด

จากการตรวจสอบสีของตัวอย่างเส้นบะหมี่ผสมผงแมงกะพรุนจำนวน 4 ตัวอย่าง ที่เก็บรักษาในวันที่ 0 ที่อุณหภูมิห้องสีของเส้นบะหมี่ แสดงดังรูปที่ 3(ก) ค่า a^* มีค่าเท่ากับ 0 – 1 แสดงค่าสีแดงของเส้นบะหมี่ จากผลการคำนวณค่าเฉดสี (h^*) ความเข้มของสี (C^*) และค่าความแตกต่างของสี (ΔE^*) และเปรียบเทียบค่าความแตกต่างของสีของตัวอย่างเส้นบะหมี่ที่เก็บรักษาไว้กับสูตรควบคุมที่เก็บรักษาในวันที่ 0 ที่อุณหภูมิห้องพบว่า เส้นบะหมี่ที่ไม่มีการเติมผงแมงกะพรุน (สูตรควบคุม) มีค่าความสว่าง (L^*) เท่ากับ 55.34 แต่ค่าสีเหลือง (b^*) เท่ากับ 8.90 โดยค่า h^* อยู่ในเฉดสีเหลือง (91.37°) และเส้นบะหมี่ที่เติมผงแมงกะพรุนแต่ไม่มีการใช้แป้งข้าวเจ้า (สูตร 1) พบว่า มีค่า L^* ลดลง (46.64) แต่ค่า b^* เพิ่มขึ้น (13.02) ค่า h^* ใกล้เคียงเฉดสีเหลือง (85.87°) แต่ค่า C^* ของสูตรควบคุม (8.90) ต่ำกว่าค่า C^* ของสูตร 1 (13.05) เมื่อมีการใช้แป้งข้าวเจ้าทดแทนร้อยละ 10 ในเส้นบะหมี่ผสมผงแมงกะพรุน (สูตร 2) พบว่า ค่า L^* มีค่าลดลง (40.22) ค่า b^* ลดลง (12.33) ค่า h^* ใกล้เคียงเฉดสีเหลือง (83.68°) และค่า C^* ลดลง (12.40) แต่มีค่า ΔE^* เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจน (15.58) เปรียบเทียบกับสูตร 1 ซึ่งแตกต่างจากเส้นบะหมี่ผสมผงแมงกะพรุนที่มีการใช้แป้งข้าวเจ้าทดแทนร้อยละ 15 (สูตร 3) ที่มีค่า L^* ไม่แตกต่างจากสูตร 1 โดยสูตร 3 พบว่า มีค่า

L^* เท่ากับ 47.21 แต่ค่า b^* เท่ากับ 12.69 ค่า h^* เท่ากับ 85.74° ค่า C^* เท่ากับ 12.73 และค่า ΔE^* เท่ากับ 9.05 จะเห็นได้ว่า ผลิตภัณฑ์เส้นบะหมี่ที่ผสมผงแมงกะพรุนจะมีเฉดใกล้เคียง โดยคุณภาพของเส้นบะหมี่ที่มีสีเหลืองมีปัจจัยที่เกี่ยวข้อง เช่น ขนาด และ สีเหลืองของแป้ง และปริมาณสารละลายต่าง เป็นต้น (Asenstorfer et al., 2006; Hatcher & Anderson, 2007)

สำหรับสารละลายต่างในงานวิจัยนี้ เป็นสารผสมฟอสเฟตที่ประกอบด้วยระหว่างโซเดียมเฮกซะเมตาฟอสเฟต โซเดียมคาร์บอเนต และโปตัสเซียมคาร์บอเนต ซึ่งเส้นบะหมี่สีเหลืองที่มีคุณภาพสูงจะมีค่าสีเหลือง (b^*) มากกว่า 30 หน่วย (Jia et al., 2019) ซึ่งเกิดจากปฏิกิริยาการเปลี่ยนสีของสารสีฟลาโวนอยด์ในแป้งข้าวสาลีในสภาวะที่เป็นด่าง (Fu, 2008) โดยใช้สารละลายต่างที่ประกอบด้วยโซเดียมคาร์บอเนตและโพแทสเซียมคาร์บอเนตในปริมาณร้อยละ 0.5-3.0 (Asenstorfer et al., 2006; Hatcher & Anderson, 2007) แต่จากการทดลองพบว่า เส้นบะหมี่ในสูตรมีค่า b^* น้อยกว่า 30 โดยเส้นบะหมี่สูตรควบคุม สูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3 มีค่า b^* เท่ากับ 8.9 13.02 12.33 และ 12.69 ตามลำดับ เส้นบะหมี่สูตรควบคุมมีค่าสีเหลืองต่ำกว่าคุณภาพของแป้งข้าวสาลีที่นำมาใช้ และปริมาณสารละลายต่างที่ใช้โดยในการทดลองนี้ ใช้ปริมาณที่น้อยมากคือ โซเดียมโบคาร์บอเนตร้อยละ 0.02 และสารฟอสเฟตผสมร้อยละ 0.06 ต่อปริมาณแป้ง สีเหลืองที่เพิ่มขึ้นในสูตรเส้นบะหมี่ สูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3 เกิดจากการเติมผงแมงกะพรุน โดยสีเหลืองของผงแมงกะพรุนมาจากการเกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดของน้ำตาลรีดิวซ์และกรดอะมิโนในสภาวะที่เป็นด่าง (Tamanna & Mahmood, 2015) แต่ค่าสีเหลืองในสูตร 2 และสูตร 3 ลดลงเล็กน้อย เมื่อใช้ปริมาณแป้งข้าวเจ้าทดแทนแป้งสาลี เมื่อเปรียบเทียบสูตร 1 ที่มีการใช้แป้งสาลีร่วมกับผงแมงกะพรุนร้อยละ 5 กับงานวิจัยของ Muangrod (2020) พบว่า เส้นบะหมี่ผสมผงแมงกะพรุนมีค่าสีเหลืองน้อยกว่าเส้นบะหมี่ที่ใช้แป้งข้าวสาลีผสมผงแมงกะพรุนในอัตราส่วน 95:5 โดยน้ำหนักที่มีค่า b^* เท่ากับ 18.22 ± 0.03 ทั้งนี้เนื่องจากความแตกต่างของอัตราส่วนของแป้งสาลีและแมงกะพรุน ปริมาณและชนิดของสารละลายต่างที่แตกต่างกันและวิธีการเตรียมผงแมงกะพรุน งานวิจัยของ Muangrod (2020) พบว่า ผงแมงกะพรุนที่ใช้เป็นผงแมงกะพรุนแห้งที่ไม่ได้มีการผสมอินูลินและใช้การอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำให้สีของผงแมงกะพรุนมีสีเหลืองเข้มมีค่า b^* เท่ากับ 19.47



รูปที่ 3. สีของเส้นบะหมี่ผสมโปรตีนคอลลาเจนจากแมงกะพรุนเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง ($28 \pm 2^\circ\text{C}$)

*หมายเหตุ สูตรควบคุม คือ ร้อยละแป้งข้าวสาลี เท่ากับ 100

สูตร 1 คือ ร้อยละแป้งข้าวสาลี เท่ากับ 100 และผสมผงแมงกะพรุนร้อยละ 5 ต่อปริมาณแป้งทั้งหมด

สูตร 2 คือ ร้อยละแป้งข้าวสาลีต่อแป้งข้าวเจ้า เท่ากับ 90:10 และผสมผงแมงกะพรุนร้อยละ 5 ต่อปริมาณแป้งทั้งหมด

สูตร 3 คือ ร้อยละแป้งข้าวสาลีต่อแป้งข้าวเจ้า เท่ากับ 85:15 และผสมผงแมงกะพรุนร้อยละ 5 ต่อปริมาณแป้งทั้งหมด

ตัวอักษรภาษาอังกฤษตัวเล็กใช้กำกับข้อมูลที่แตกต่างกันอยู่ในค่าวิเคราะห์เดียวกันแสดงว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

คุณภาพหลังต้มสุกบ่งชี้ถึงคุณภาพของเส้นบะหมี่ผสมผงแมงกะพรุนสำหรับการบริโภค โดยพิจารณาระยะเวลาในการต้มสุก ปริมาณของแข็งที่สูญเสียหลังการต้มสุก และน้ำหนักที่ได้หลังต้มสุก ในการทดลองนี้พบว่า ระยะเวลาการต้มสุกนาน 4.30 นาที เส้นบะหมี่มีความสุกสม่ำเสมอทั่วทั้งเส้น เส้นบะหมี่ในทุกสูตรที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิในตู้เย็นในวันที่ 0 พบว่า สูตรควบคุมมีค่าร้อยละน้ำหนักที่ได้หลังต้มสุกสูงสุดเท่ากับ 198.85 แต่เมื่อเติมผงแมงกะพรุนในเส้นบะหมี่สูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3 ทำให้ค่าร้อยละน้ำหนักที่ได้หลังต้มสุกลดลงเหลือ 166.09, 160.58 และ 156.51 ตามลำดับ และการใช้แป้งข้าวเจ้าทดแทนแป้งข้าวสาลีในเส้นบะหมี่สูตรที่ 2 กับสูตร 3 ทำให้ร้อยละน้ำหนักที่ได้หลังต้มสุกลดลง ผลการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่า เมื่อเปรียบเทียบสูตร 1 กับสูตร 2 และสูตร 2 กับสูตร 3 มีค่าร้อยละน้ำหนักที่ได้หลังต้มสุกไม่แตกต่างกัน แต่ร้อยละน้ำหนักที่ได้หลังต้มสุกในสูตร 1 กับสูตร 3 มีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากการทดลองพบว่า การต้มสุกทำให้แป้งในข้าวสาลีและข้าวเจ้าเกิดการดูดซับน้ำเพิ่มขึ้น แป้งเกิดการเจลาติไนซ์ซึ่งมีผลต่อเนื้อสัมผัสและคุณภาพหลังต้มสุก เมื่อเติมผงแมงกะพรุนในแป้งข้าวสาลีและแป้งข้าวเจ้าและนำไปต้มสุก จะทำให้โปรตีนคอลลาเจนเสียสภาพ ความสามารถของโปรตีนคอลลาเจนในการอุ้มน้ำน้อยลง จึงทำให้น้ำหนักหลังการต้มสุกลดลง สำหรับค่าปริมาณของแข็งที่สูญเสียเพิ่มขึ้นระหว่างการต้มสุกในสูตรควบคุม สูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3 เท่ากับร้อยละ 8.72, 7.49, 8.29 และ 10.29 ตามลำดับ เนื่องจากผงโปรตีนในแมงกะพรุนเกิดการพองตัวในสถานะที่เป็นต่าง แต่อาจไม่สามารถเชื่อมต่อกับโมเลกุลของแป้งและกลูเตนได้อย่างแข็งแรง นอกจากนี้ อุณหภูมิที่ใช้ในการต้มสุก 100 องศาเซลเซียส มีผลต่อการเสียสภาพของโปรตีนคอลลาเจนที่มีอยู่ในผงแมงกะพรุน โดยมีรายงานว่าอุณหภูมิสูงกว่า 60 องศาเซลเซียส ทำให้โปรตีนคอลลาเจนจากแมงกะพรุนเสียสภาพ โปรตีนมีการหดตัว และสามารถถูกย่อยได้เป็นกรดอะมิโน (Klaiwong et al., 2014) ทำให้ความแข็งแรงของการเชื่อมต่อระหว่างโปรตีนคอลลาเจนกับเม็ดแป้งลดลง การสูญเสียปริมาณของแข็งเพิ่มขึ้น ประกอบกับการทดแทนแป้งข้าวสาลีด้วยแป้งข้าวเจ้าที่มีปริมาณโปรตีนต่ำกว่าและไม่มีส่วนประกอบของกลูเตน (Detchewa et al., 2022) จึงมีผลกระทบต่อโครงสร้างของแป้งและโปรตีนในระบบ รายงานของ Jia et al. (2019) พบว่า การเติมสารละลายต่างในปริมาณร้อยละ 0.5-1.5 ส่งผลให้ปริมาณของแข็งที่สูญเสียในเส้นบะหมี่ผสมถั่วหรั่งเท่ากับร้อยละ 7 ซึ่งในผลการทดลองของเส้นบะหมี่ผสมผงแมงกะพรุนนี้มีปริมาณการสูญเสียของแข็งที่สูงกว่า แต่ใช้ระยะเวลาในการต้มสุกเพียง 4.30 นาที ในขณะที่ Li et al. (2024) พบว่า การเติมเจลาตินในเส้นจากแป้งมันฝรั่งทำให้ระยะเวลาในการต้มสุกลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากการเกิดโฟมของเจลาตินขณะผสมกับแป้งมันฝรั่ง จึงเกิดฟองอากาศที่ผิวและภายในเม็ดแป้ง เมื่อนำไปต้มสุกจึงเกิดการหลุดของทั้งเม็ดแป้งและเจลาติน ส่งผลให้เกิดโครงสร้างที่เป็นช่องว่างมากขึ้น การเติมในอัตราส่วนแป้งมันฝรั่งต่อเจลาตินสูงขึ้นทำให้การสูญเสียปริมาณของแข็งเพิ่มขึ้น มีค่าสูงสุดเท่ากับร้อยละ 8.54 เมื่อใช้แป้งมันฝรั่งต่อเจลาตินเท่ากับ 80:20 โดยน้ำหนัก

การวัดค่าเนื้อสัมผัสของเส้นบะหมี่สดในทุกตัวอย่าง จะวัดค่าการต้านแรงดึงขาดของเส้นบะหมี่หลังต้มสุกที่เวลา 4.30 นาที ในวันที่ 0 ของการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิตู้เย็นพบว่า เส้นบะหมี่ในสูตรควบคุมมีค่าการต้านแรงดึงขาดต่ำสุด (16.61 กรัม) ในขณะที่เส้นบะหมี่สูตรที่มีการเติมผงแมงกะพรุนในสูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3 มีค่าการต้านแรงดึงขาดไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p \geq 0.05$) แต่มีค่าที่สูงกว่าสูตรควบคุม เส้นบะหมี่ผสมผงแมงกะพรุนที่มีการใช้แป้งข้าวเจ้าทดแทนแป้งข้าวสาลี (สูตร 2 และสูตร 3) มีค่า

การต้านแรงดึงขาดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p \geq 0.05$) แสดงว่าแป้งข้าวเจ้าที่เกิดความหนืดจากปฏิกิริยาเจลาติไนซ์สามารถจับกับผงแมงกะพรุนได้ จึงมีส่วนช่วยเพิ่มความต้านทานในการดึงขาด เนื่องจากโปรตีนคอลลาเจนที่มีในผงแมงกะพรุนเป็นโปรตีนเส้นใยประเภทไกลโคโปรตีน (Glycoprotein) มีลักษณะโมเลกุลโพลีเปปไทด์เป็นเส้นยาว เป็นสายที่มีเกลียวเวียนซ้ำมา รวมกันทั้งหมด 3 สายในลักษณะเกลียวเวียนขวา คอลลาเจนมีลำดับของกรดอะมิโนที่ซ้ำกันในทุก ๆ 3 ลำดับ โดยลำดับของกรดอะมิโนที่พบบ่อยและพบมากที่สุดคือ ไกลซีน โพรลีน และไฮดรอกซีโพรลีน (Bailey & Light, 1989; Soontaros & Rimphanitchayakit, 2004)

ในขั้นตอนการผลิตเส้นบะหมี่ผสมผงแมงกะพรุน เมื่อแป้งสาลีที่มีโปรตีนไกลอะตินรวมตัวกับกลูเตนเป็นกลูเตน ผสมกับผงแมงกะพรุนที่มีโปรตีนคอลลาเจนผสมกับอินูลิน และทำปฏิกิริยากับสารละลายต่าง โซเดียมเฮกซะเมตาฟอสเฟต โซเดียมคาร์บอเนต และโพแทสเซียมคาร์บอเนต ทำให้ออลลาเจนสามารถพองตัว โดยประจุลบในรูปของคาร์บอเนตไอออน และฟอสเฟตไอออนจากโซเดียมเฮกซะเมตาฟอสเฟต ทำให้ในระบบมีปริมาณประจุลบเพิ่มขึ้น สายโพลีเปปไทด์ที่มีประจุลบเพิ่มขึ้น เกิดการผลักกันของประจุลบ ทำลายของพันธะไฮโดรเจนที่เชื่อมต่อกันระหว่างสายโพลีเปปไทด์ ส่งผลให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างโพลีเปปไทด์ที่มีลักษณะเป็นสายเกลียวพันกันอยู่นั้น เสียสภาพเปลี่ยนไปเป็นโครงสร้างใหม่ที่คลายตัวออก มีการจับกับโมเลกุลของน้ำมากขึ้น ผงคอลลาเจนจึงพองตัว ในรายงานของ Klaiwong et al. (2014) ทดสอบอัตราการพองตัวของผงแมงกะพรุนแห้งในสภาวะ pH 3 ถึง pH 12 พบว่า ผงแมงกะพรุนมีการพองตัวมากที่สุดที่ pH 12 เท่ากับร้อยละ 73.68 ในตัวอย่างเส้นบะหมี่ผสมผงแมงกะพรุนนี้ สายโพลีเปปไทด์ของคอลลาเจนที่เสียสภาพอาจเชื่อมต่อกับกลูเตนที่มีอยู่ในแป้งข้าวสาลีจึงช่วยเพิ่มการต้านทานแรงดึงขาดของเส้นบะหมี่ได้ จึงทำให้เนื้อสัมผัสของเส้นบะหมี่มีความเหนียวมากขึ้น

เนื่องจากแป้งข้าวเจ้าไม่มีส่วนประกอบของกลูเตน ดังนั้นการเพิ่มปริมาณแป้งข้าวเจ้าในเส้นบะหมี่ผสมผงแมงกะพรุนในสูตร 2 กับสูตร 3 จึงเจือจางปริมาณของกลูเตนในระบบ ส่งผลต่อของความแข็งแรงและการอุ้มน้ำของโครงสร้างโดลดลง ทำให้เส้นบะหมี่หลังการต้มสุกในสูตร 2 กับสูตร 3 มีการสูญเสียปริมาณของแข็งเพิ่มขึ้นจากเม็ดแป้งที่พองตัวบางส่วน น้ำหนักที่ได้หลังต้มลดลง สอดคล้องกับผลการเติมแป้งข้าวไรซ์เบอร์รี่ในเส้นบะหมี่ทำให้คุณภาพหลังการต้มสุกลดลง แต่เส้นบะหมี่ที่มีปริมาณของแข็งที่สูงสูญเสียหลังการต้มสุกเพิ่มขึ้น (Sirichokworakit et al., 2015) ในการผลิตเส้นบะหมี่ที่ใช้แป้งข้าวเจ้าอย่างเดียวพบว่าคุณภาพหลังการต้มสุกและความเหนียวของเส้นบะหมี่ลดลง (Seetapan et al., 2019) ในส่วนของคุณสมบัติเนื้อสัมผัสหลังการต้มสุกโดยตรวจวัดค่าการต้านแรงดึงขาดพบว่า เส้นบะหมี่สูตร 1 ที่ไม่มีแป้งข้าวเจ้า และเส้นบะหมี่สูตร 2 กับสูตร 3 ที่มีแป้งข้าวเจ้า มีค่าไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยในสภาวะที่มีส่วนผสมของแป้งข้าวเจ้านั้น เม็ดแป้งปกติที่อยู่ในรูปธรรมชาติไม่ละลายน้ำที่อุณหภูมิห้อง แต่ในระหว่างการต้มสุก จะเกิดปฏิกิริยาเจลาติไนซ์ เกิดการทำลายพันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลของสตาร์ชที่อยู่ในเม็ดแป้ง เม็ดแป้งจะเกิดการพองตัว เมื่อได้รับความร้อนเพิ่มขึ้นจนเม็ดแป้งแตก สายของอะไมโลสและอะไมโลเพคตินจะหลุดออก ทำให้หมู่ไฮดรอกซิลจับกับโมเลกุลของน้ำได้มากขึ้น น้ำแป้งจึงมีลักษณะหนืดและเป็นตัวเชื่อมโปรตีนกลูเตนและคอลลาเจนได้ แต่เนื่องจากสูตร 2 กับสูตร 3 มีการเติมผงโปรตีนแมงกะพรุน จึงทำให้เพิ่มความเหนียวของเส้นบะหมี่มีค่าการต้านแรงดึงขาดไม่แตกต่างจากสูตร 1

3.1.3 ผลการตรวจวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี

จากการวิเคราะห์ผงแมงกะพรุนที่ผ่านการแช่เยือกแข็งอบแห้งพบว่า มีค่าปริมาณความชื้น โปรตีน ไขมัน คาร์โบไฮเดรต และเถ้า เท่ากับ 3.38, 34.48, 3.00, 54.56 และ 4.58 กรัม ต่อ 100 กรัม ตามลำดับ และมีปริมาณคอลลาเจน 10.88 กรัม ต่อ 100 กรัม สำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเส้นบะหมี่ในทุกตัวอย่างพบว่า เส้นบะหมี่มีปริมาณ โปรตีน ไขมัน และคาร์โบไฮเดรต แตกต่างกันอย่างเล็กน้อย ($p < 0.05$) โดยมีค่าอยู่ในช่วง 8.16-9.45, 0.03-1.72 และ 54.80-57.73 กรัม ต่อ 100 กรัม ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 3 แต่มีปริมาณความชื้น กากใยอาหาร และ เถ้าที่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) เมื่อคำนวณการเพิ่มขึ้นของปริมาณโปรตีนเทียบกับสูตรควบคุมพบว่า การเติมผงแมงกะพรุนในสูตร 1 สูตร 2 และ สูตร 3 ทำให้เส้นบะหมี่สดมีปริมาณโปรตีนสูงขึ้นเท่ากับร้อยละ 15.80, 8.45 และ 5.27 ตามลำดับ จากผลการทดลองในตารางที่ 3 พบว่า ตัวอย่าง (สูตร 2 กับ สูตร 3) ที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวเจ้าในปริมาณที่สูงขึ้น ส่งผลให้ปริมาณโปรตีนลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ดังนั้น การเติมผงแมงกะพรุนจึงสามารถเพิ่มปริมาณโปรตีนและปริมาณคอลลาเจนเพิ่มขึ้นจากเส้นบะหมี่สูตรควบคุม ในการทดลองนี้เลือกสูตร 2 ที่มีการทดแทนแป้งข้าวเจ้าร้อยละ 10 ไปวิเคราะห์หาปริมาณคอลลาเจน เนื่องจากมีผลคุณภาพหลังการต้มโดยมีน้ำหนักที่ได้หลังการต้มที่สูงกว่า และปริมาณของแข็งที่สูญเสียระหว่างการต้มต่ำกว่าสูตร 3 ที่ใช้แป้งข้าวเจ้าทดแทนร้อยละ 15 จากการทดลองพบว่า ตัวอย่างเส้นบะหมี่ผสมผงแมงกะพรุนสูตร 2 มีคอลลาเจนเท่ากับ 0.425 กรัมต่อ 100 กรัม โดยเส้นบะหมี่ผสมผงแมงกะพรุนในสูตร 2 มีปริมาณโปรตีนที่ต่ำกว่าเส้นบะหมี่ในงานวิจัยของ Muangrod (2020) ที่รายงานว่าเส้นบะหมี่สดที่ใช้แป้งข้าวสาลีผสมผงแมงกะพรุนในอัตราส่วน 95:5 โดยน้ำหนัก มีร้อยละปริมาณโปรตีนเพิ่มมากขึ้นจากสูตรที่ใช้แป้งข้าวสาลีอย่างเดียวร้อยละ 2.56 โดยปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมผงแมงกะพรุน เช่น ลีोटของผงแมงกะพรุน วิธีการเตรียม อุณหภูมิและระยะเวลาในการอบแห้ง ซึ่งมีผลต่อคุณภาพและองค์ประกอบทางเคมีของผงแมงกะพรุนแห้ง โดยผงแมงกะพรุนอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง มีค่าปริมาณความชื้น โปรตีน ไขมัน และเถ้า เท่ากับ 7.69, 67.85, 1.35 และ 15.76 กรัม ต่อ 100 กรัม ตามลำดับ (Muangrod, 2020) แต่เมื่อผลิตคนละลีोटแล้ว อบแห้งที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 24 ชั่วโมง มีค่าปริมาณความชื้น โปรตีน ไขมัน และเถ้า เท่ากับ 8.59, 75.09, 5.16 และ 9.66 กรัม ต่อ 100 กรัม ตามลำดับ (Silaprueng et al., 2015) จากผลการทดลองพบว่า ผงแมงกะพรุนฟรีซดรายนี้มีปริมาณโปรตีนเพียง 34.48 กรัม ต่อ 100 กรัม เมื่อนำผงแมงกะพรุนฟรีซดรายมาผสมกับเส้นบะหมี่ จึงทำให้เส้นบะหมี่ผสมผงแมงกะพรุนนี้มีปริมาณโปรตีนน้อยกว่างานวิจัยที่มีรายงานมาแล้ว (Muangrod, 2020)

ตารางที่ 3. องค์ประกอบทางเคมีของเส้นบะหมี่สดผสมผงแมงกะพรุนสูตรต่าง ๆ (กรัม ต่อ 100 กรัม)

สูตร	ความชื้น ^{ns}	โปรตีน	ไขมัน	กากใยอาหาร ^{ns}	คาร์โบไฮเดรต	เถ้า ^{ns}
ควบคุม	32.98±1.25	8.16±0.06 ^d	0.03±0.01 ^d	0.12±0.06	57.73±1.29 ^a	0.97±0.01
1	32.98±0.82	9.45±0.06 ^a	0.08±0.01 ^c	0.10±0.02	56.40±0.85 ^a	1.00±0.01
2	33.49±0.13	8.85±0.07 ^b	0.19±0.02 ^b	0.14±0.02	56.29±0.27 ^a	1.04±0.11
3	33.67±0.36	8.59±0.07 ^c	1.72±0.09 ^a	0.16±0.02	54.80±0.32 ^b	1.06±0.13

สูตรควบคุม คือ ร้อยละแป้งข้าวสาลี เท่ากับ 100

สูตร 1 คือ ร้อยละแป้งข้าวสาลี เท่ากับ 100 และผสมผงแมงกะพรุนร้อยละ 5 ต่อปริมาณแป้งทั้งหมด

สูตร 2 คือ ร้อยละแป้งข้าวสาลีต่อแป้งข้าวเจ้า เท่ากับ 90:10 และผสมผงแมงกะพรุนร้อยละ 5 ต่อปริมาณแป้งทั้งหมด

สูตร 3 คือ ร้อยละแป้งข้าวสาลีต่อแป้งข้าวเจ้า เท่ากับ 85:15 และผสมผงแมงกะพรุนร้อยละ 5 ต่อปริมาณแป้งทั้งหมด

a, b, c และ d คือเป็นตัวอักษรที่ใช้กำกับข้อมูลที่อยู่ในคอลัมน์เดียวกันแสดงว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

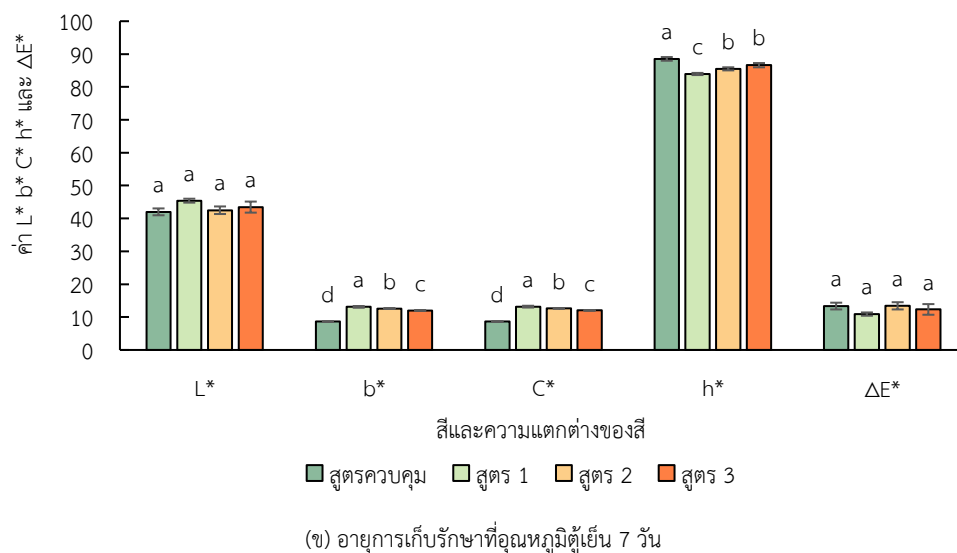
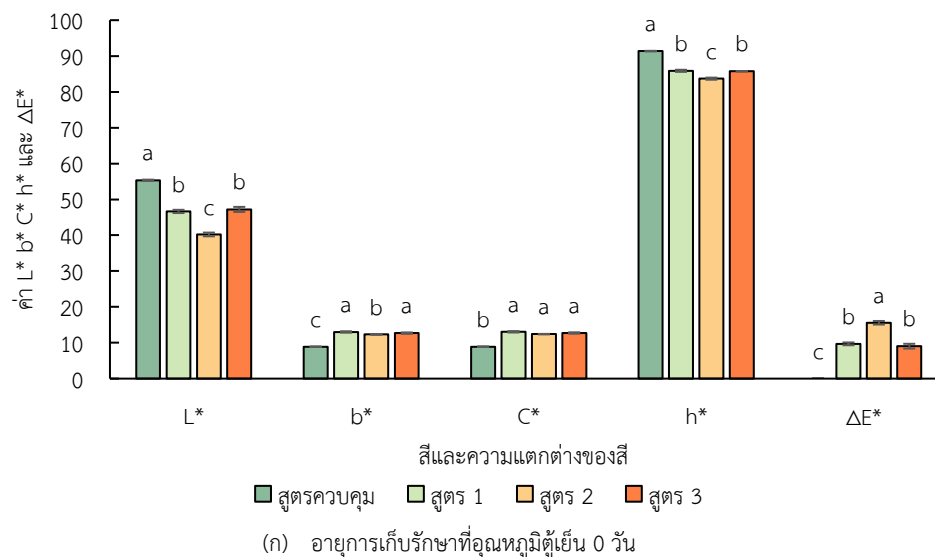
^{ns} คือเป็นตัวอักษรที่ใช้กำกับข้อมูลที่อยู่ในคอลัมน์เดียวกันแสดงว่าความไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

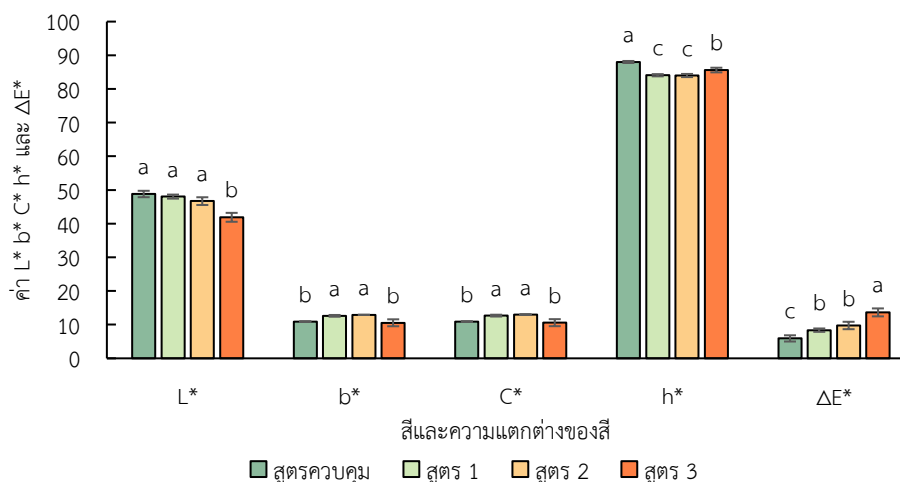
3.2 ผลของการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องและอุณหภูมิในตู้เย็นจนเน่าเสียต่อคุณภาพของเส้นบะหมี่ผสมผงแมงกะพรุน

จากการตรวจสอบคุณภาพภายหลังการเก็บรักษาของเส้นบะหมี่ผสมผงแมงกะพรุนในทุกสูตรที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง (28 ± 2 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 2 วัน และที่อุณหภูมิตู้เย็น (8 ± 2 องศาเซลเซียส) เป็นเวลา 11 วัน โดยเกณฑ์ที่ใช้พิจารณาการเสื่อมเสีย คือ ตัวอย่างมีลักษณะเป็นเมือกและมึนลื่นผิดปกติ และวัดสีในเส้นบะหมี่ทุกสูตรที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลานาน 2 วัน เปรียบกับวันที่ 0 พบว่า ในสูตรควบคุม เส้นบะหมี่มีค่า L^* ลดลงจาก 55.34 เหลือ 41.59 มีค่า b^* ลดลงจาก 8.90 เหลือ 8.59 ส่วนเส้นบะหมี่สูตร 1 มีค่า L^* ลดลงจาก 46.64 เหลือ 44.47 มีค่า b^* ลดลงจาก 13.02 เหลือ 12.99 เส้นบะหมี่สูตร 3 มีค่า L^* ลดลงจาก 47.21 เหลือ 40.17 และมีค่า b^* ลดลงจาก 12.69 เหลือ 11.64 ส่วนสูตร 2 มีค่า L^* เพิ่มขึ้นจาก 40.22 เป็น 41.32 และมีค่า b^* เพิ่มขึ้นจาก 12.33 เป็น 12.59 แสดงดังรูปที่ 3(ข) ผลลัพธ์ส่วนมากจะมีสีคล้ำลง เมื่อพิจารณาค่า C^* , h^* และ ΔE^* พบว่า ผลลัพธ์เส้นบะหมี่ที่มีระยะเวลาการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องนาน 2 วัน มีค่าการเปลี่ยนแปลงสี (ΔE^*) เพิ่มขึ้นในสูตรควบคุม สูตร 1 และสูตร 3 ยกเว้นสูตร 2 เนื่องจากตัวอย่างเส้นบะหมี่ในทุกสูตรเป็นเส้นบะหมี่สดไม่ได้ใส่วัตถุกันเสีย จึงมีอายุการเก็บรักษาสั้นเนื่องจากเกิดการเน่าเสียจากเชื้อจุลินทรีย์ และส่งผลให้มีการเปลี่ยนแปลงของสีที่ชัดเจนขึ้น โดยมีค่า L^* ลดลง พบเมือกและกลิ่นที่ผิดปกติ ทำให้ไม่สามารถตรวจวัดในวันที่ 3 ของการเก็บรักษาได้

จากการตรวจสอบค่าสี (L^* , b^* , C^* และ ΔE^*) ของตัวอย่างเส้นบะหมี่ที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิแช่เย็น ในวันที่ 0, 7 และ 11 แสดงดังรูปที่ 4(ก) - 4(ค) พบว่า เส้นบะหมี่ชุดควบคุมและสูตร 1 มีค่า L^* , b^* , h^* และ ΔE^* ลดลง เมื่อเก็บนาน 7 วัน แต่หลังจากวันที่ 7 ถึงวันที่ 11 จะมีค่าเพิ่มขึ้นเล็กน้อย ยกเว้นค่า h^* ที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อย ในวันที่ 11 สำหรับเส้นบะหมี่สูตร 2 มีค่าสี L^* , b^* และ C^* เพิ่มขึ้น เมื่อเก็บไว้นาน 7 และ 11 วัน แต่ค่า h^* เพิ่มขึ้นในวันที่ 7 และลดลงในวันที่ 11 แต่มีค่า ΔE^* ลดลง ในช่วงเวลาที่เก็บรักษา 7 และ 11 วัน ส่วนเส้นบะหมี่สูตร 3 ค่าสี L^* , b^* และ C^* ลดลง เมื่อเก็บไว้นาน 7 และ 11 วัน แต่มีค่า h^* เพิ่มขึ้น ในวันที่ 7 และลดลงใกล้เคียงกับค่า h^* ในวันที่ 11 แต่มีค่า ΔE^* เพิ่มขึ้น ในช่วงเวลาที่เก็บรักษา

นาน 7 และ 11 วัน ผลของการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์เส้นบะหมี่ในทุกสูตรเป็นระยะเวลานานขึ้นพบว่า มีการเปลี่ยนแปลงค่า ΔE^* ที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน จากวันที่ 0 แต่เมื่อเก็บตัวอย่างในวันที่ 12 พบว่า ผลิตภัณฑ์เน่าเสีย มีการเปลี่ยนแปลงของสี มีลักษณะเป็นเมือกและมีกลิ่นผิดปกติ ดังนั้น การเก็บรักษาเส้นบะหมี่ในทุกสูตรเก็บรักษาในตู้เย็นจึงสามารถเก็บรักษาไว้ได้นาน 11 วัน





(ค) อายุการเก็บรักษาที่อุณหภูมิตู้เย็น 11 วัน

รูปที่ 4. สีของเส้นบะหมี่ผสมผงแมงกะพรุนเก็บรักษาที่อุณหภูมิตู้เย็น ($8 \pm 2^\circ\text{C}$)

*หมายเหตุ สูตรควบคุม คือ ร้อยละแป้งข้าวสาลี เท่ากับ 100

สูตร 1 คือ ร้อยละแป้งข้าวสาลี เท่ากับ 100 และผสมผงแมงกะพรุนร้อยละ 5 ต่อปริมาณแป้งทั้งหมด

สูตร 2 คือ ร้อยละแป้งข้าวสาลีต่อแป้งข้าวเจ้า เท่ากับ 90:10 และผสมผงแมงกะพรุนร้อยละ 5 ต่อปริมาณแป้งทั้งหมด

สูตร 3 คือ ร้อยละแป้งข้าวสาลีต่อแป้งข้าวเจ้า เท่ากับ 85:15 และผสมผงแมงกะพรุนร้อยละ 5 ต่อปริมาณแป้งทั้งหมด

a, b, c และ d คือเป็นตัวอักษรที่ใช้กำกับข้อมูลที่อยู่ในคอลัมน์เดียวกันแสดงว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

ns คือเป็นตัวอักษรที่ใช้กำกับข้อมูลที่อยู่ในคอลัมน์เดียวกันแสดงว่าความไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

จากการตรวจสอบคุณภาพหลังการต้มสุกของเส้นบะหมี่ทุกสูตรที่เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องในวันที่ 0 พบว่า ร้อยละน้ำหนักที่ได้หลังการต้มของสูตรควบคุมมีค่ามากที่สุดและมีค่าแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) กับ สูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3 แต่สูตร 1 กับสูตร 2 มีร้อยละน้ำหนักที่ได้หลังการต้มสุกไม่แตกต่างกัน ภายหลังการเก็บรักษาเส้นบะหมี่ทุกสูตรที่อุณหภูมิห้องนาน 2 วัน พบว่า เส้นบะหมี่ทุกสูตรมีค่าร้อยละน้ำหนักที่ได้หลังการต้มสุกลดลง โดยสูตรควบคุมยังมีค่าน้ำหนักที่ได้หลังการต้มสุกมากที่สุดและแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) กับสูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3 แต่สูตร 1 กับสูตร 2 มีร้อยละน้ำหนักที่ได้หลังต้มสุกไม่แตกต่างกัน โดยสูตร 3 มีค่าร้อยละน้ำหนักที่ได้หลังการต้มสุกต่ำที่สุด สำหรับการตรวจสอบปริมาณของแข็งที่สูญเสียระหว่างการต้มในวันที่ 0 พบว่า สูตร 3 มีร้อยละการสูญเสียปริมาณของแข็งระหว่างการต้มมากที่สุด และมีค่าแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) กับ สูตรควบคุม สูตร 1 และสูตร 2 แต่สูตร 1 กับสูตร 2 มีร้อยละการสูญเสียปริมาณของแข็งระหว่างการต้มไม่แตกต่างกัน เมื่อเก็บรักษานานเป็นเวลา 2 วัน พบการเพิ่มขึ้นของร้อยละการสูญเสียปริมาณของแข็งระหว่างการต้มในทุกระยะ โดยสูตร 3 มีค่าร้อยละการสูญเสียปริมาณของแข็งระหว่างการต้มมากที่สุด และมีค่าแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) กับทั้ง 3 สูตร (สูตรควบคุม สูตร 1 และสูตร 2) โดยมีค่าร้อยละการสูญเสียปริมาณของแข็งระหว่างการต้มไม่แตกต่างกัน

สำหรับผลการตรวจสอบค่าการต้านแรงดึงขาดในเส้นบะหมี่ทุกสูตรที่เก็บรักษาในวันที่ 0 ที่อุณหภูมิห้องพบว่า เส้นบะหมี่สูตร 2 มีค่าการต้านแรงดึงขาดมากที่สุด และมีค่าแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) กับสูตรควบคุมและสูตร 1 แต่เส้นบะหมี่สูตร 2 มีค่าการต้านแรงดึงขาดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญกับสูตร 3 จากการเปรียบเทียบค่าการต้านแรงดึงขาดเปรียบเทียบในสูตร 1 กับสูตร 3 พบว่า มีค่าไม่แตกต่างกัน และเมื่อเก็บรักษาไว้นาน 2 วัน เส้นบะหมี่ทุกสูตรมีค่าการต้านแรงดึงขาดลดลง โดยสูตร 2 ยังคงมีค่าการต้านแรงดึงขาดสูงกว่าทุกสูตรและมีค่าแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) กับสูตรควบคุม สูตร 1 และสูตร 3 โดยสูตร 1 กับสูตร 3 มีค่าการต้านแรงดึงขาดไม่แตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4. คุณภาพหลังต้มสุกของเส้นบะหมี่ผสมผงแมงกะพรุนเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง

อายุการเก็บรักษา (วัน)	สูตร	น้ำหนักที่ได้หลังต้ม (%)	ปริมาณของแข็งที่สูญเสียระหว่างการต้ม (%)	ค่าการต้านแรงดึงขาด (กรัม)
0	ควบคุม	198.85±1.24 ^a	8.72±0.05 ^d	16.61±1.88 ^f
	1	166.09±2.15 ^b	7.49±0.25 ^e	25.69±0.85 ^b
	2	160.58±7.38 ^{bc}	8.29±0.92 ^e	27.46±0.48 ^a
	3	156.51±3.95 ^c	10.29±0.61 ^c	26.80±2.32 ^{ab}
2	ควบคุม	147.08±0.58 ^d	18.65±0.54 ^b	11.32±0.55 ^g
	1	123.95±2.26 ^{ef}	17.79±1.21 ^b	21.34±0.42 ^d
	2	119.97±0.60 ^{fg}	18.12±1.04 ^b	22.53±0.32 ^c
	3	117.79±1.16 ^g	22.83±3.59 ^a	21.08±0.16 ^d

*หมายเหตุ สูตรควบคุม คือ ร้อยละแป้งข้าวสาลี เท่ากับ 100

สูตร 1 คือ ร้อยละแป้งข้าวสาลี เท่ากับ 100 และผสมผงแมงกะพรุนร้อยละ 5 ต่อปริมาณแป้งทั้งหมด

สูตร 2 คือ ร้อยละแป้งข้าวสาลีต่อแป้งข้าวเจ้า เท่ากับ 90:10 และผสมผงแมงกะพรุนร้อยละ 5 ต่อปริมาณแป้งทั้งหมด

สูตร 3 คือ ร้อยละแป้งข้าวสาลีต่อแป้งข้าวเจ้า เท่ากับ 85:15 และผสมผงแมงกะพรุนร้อยละ 5 ต่อปริมาณแป้งทั้งหมด

a, b, c, d, e, f และ g คือเป็นตัวอักษรที่ใช้กำกับข้อมูลที่อยู่ในคอลัมน์เดียวกันแสดงว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

จากการตรวจสอบคุณภาพหลังการต้มสุก พิจารณาจากค่าการต้านแรงดึงขาดของเส้นบะหมี่ผสมผงแมงกะพรุนในทุกสูตรพบว่า สูตร 2 ที่ประกอบด้วยแป้งข้าวสาลีและแป้งข้าวเจ้าในปริมาณอัตราส่วนร้อยละ 90 และ 10 ตามลำดับ และผสมผงแมงกะพรุนร้อยละ 5 ต่อปริมาณแป้งทั้งหมด มีค่าการต้านแรงดึงขาดสูงสุดเมื่อเก็บรักษาในวันที่ 0 และเมื่อเก็บรักษาไว้นาน 2 วัน ก็ยังมีค่าการต้านแรงดึงขาดสูงกว่าสูตรอื่น ๆ โดยมีค่าแตกต่างกันเล็กน้อยกับสูตร 1 และสูตร 3 เมื่อเปรียบเทียบกันทั้ง 3 สูตรที่มีปริมาณผงแมงกะพรุนเท่ากันคือร้อยละ 5 กับสูตรควบคุมที่ไม่ได้เติมแมงกะพรุน แสดงให้เห็นว่าการเติมผงแมงกะพรุนทำให้ค่าการต้านแรงดึงขาดหรือความเหนียวของเส้นบะหมี่นั้นสูงกว่า สำหรับปริมาณแป้งข้าวเจ้าที่แปรผันร้อยละ 0 (สูตร 1) ร้อยละ 10 (สูตร 2) และร้อยละ 15 (สูตร 3) มีผลทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงความเหนียวของเส้นบะหมี่เล็กน้อย

ผลิตภัณฑ์เส้นบะหมี่เป็นเส้นบะหมี่สดที่ไม่ได้มีการเติมวัตถุกันเสีย จึงอาจมีการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ชนิดต่าง ๆ รวมถึงจุลินทรีย์ที่สามารถสร้างเอนไซม์โปรตีเอสและอะไมเลสที่สามารถย่อยเส้น

บะหมี่ได้ (Belay & Teshome, 2021) ทำให้โครงสร้างของเส้นบะหมี่ไม่แข็งแรงและขาดง่าย หากนำไปต้มสุกจึงมีปริมาณของแข็งที่สูญเสียมากขึ้น เมื่อเก็บรักษาเส้นบะหมี่ทุกสูตรในตู้เย็นระยะเวลานาน 7 วัน พบว่าร้อยละของน้ำหนักที่ได้หลังการต้มมีค่าลดลงในทุกสูตร สูตรควบคุมยังมีค่าร้อยละน้ำหนักที่ได้หลังการต้มสูงกว่า และมีค่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) กับสูตรที่มีการเติมผงแมงกะพรุน (สูตร 1 สูตร 2 และสูตร 3) โดยสูตรที่มีการเติมผงแมงกะพรุนทั้ง 3 สูตร เส้นบะหมี่มีค่าร้อยละน้ำหนักที่ได้หลังการต้มที่ไม่แตกต่างกัน จากการตรวจสอบร้อยละการสูญเสียปริมาณของแข็งระหว่างการต้มพบว่า เส้นบะหมี่ในทุกสูตรมีค่าร้อยละการสูญเสียปริมาณของแข็งระหว่างการต้มสูงขึ้น แต่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เส้นบะหมี่มีค่าการต้านแรงดึงขาดลดลงในทุกสูตร โดยสูตร 2 ยังคงมีค่าการต้านแรงดึงขาดสูงสุดและไม่แตกต่างจากสูตร 3 แต่แตกต่างจากสูตร 1 กับสูตรควบคุม เมื่อเปรียบเทียบค่าการต้านแรงดึงขาดในสูตรที่ 1 กับสูตร 3 พบว่า ไม่แตกต่างกัน ผลจากการเก็บรักษานาน 7 วัน เส้นบะหมี่สูตรควบคุมมีค่าการต้านแรงดึงขาดน้อยที่สุด

จากการตรวจสอบการเก็บรักษาเส้นบะหมี่ในทุกสูตรเป็นเวลา 11 วัน เส้นบะหมี่มีค่าร้อยละน้ำหนักที่ได้หลังการต้มลดลงในทุกสูตร โดยเส้นบะหมี่สูตรควบคุมมีค่าร้อยละน้ำหนักที่ได้หลังการต้มสูงกว่าและแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) กับทั้ง 3 สูตรที่มีการเติมผงแมงกะพรุน เส้นบะหมี่สูตร 3 มีค่าร้อยละน้ำหนักที่ได้หลังต้มน้อยที่สุด จากการตรวจสอบร้อยละของการสูญเสียปริมาณของแข็งระหว่างการต้มพบว่า ในทุกสูตรมีแนวโน้มสูงขึ้น โดยสูตร 2 มีค่าร้อยละการสูญเสียปริมาณของแข็งระหว่างการต้มไม่แตกต่างกันกับสูตรควบคุม และสูตร 1 แต่แตกต่างจากสูตร 3

จากผลการทดลองพบว่า เส้นบะหมี่มีค่าการต้านแรงดึงขาดลดลงในทุกสูตร โดยเส้นบะหมี่สูตรควบคุมมีค่าน้อยที่สุดและแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) กับทุกสูตรที่มีการเติมผงแมงกะพรุน เส้นบะหมี่ผสมผงแมงกะพรุนสูตร 2 มีค่าการต้านแรงดึงขาดสูงสุดและไม่แตกต่างจากสูตร 3 แต่แตกต่างจากสูตร 1 และสูตรควบคุม เมื่อเปรียบเทียบค่าการต้านแรงดึงขาดพบว่า เส้นบะหมี่สูตรที่ 1 กับสูตร 3 มีค่าการต้านแรงดึงขาดไม่แตกต่างกัน แสดงดังตารางที่ 5 แสดงว่าอุณหภูมิการเก็บรักษาในสภาวะตู้เย็นสามารถช่วยยืดอายุการเก็บรักษาโดยชะลอการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์และลดปฏิกิริยาการทำงานของเอนไซม์ แต่เมื่อเก็บไว้ในวันที่ 12 จะไม่สามารถตรวจวัดผลได้ เนื่องจากผลิตภัณฑ์มีลักษณะเป็นเมือกและมีกลิ่นผิดปกติ

ตารางที่ 5. คุณภาพหลังต้มสุกของเส้นบะหมี่ผสมผงแมงกะพรุนเก็บรักษาที่อุณหภูมิตู้เย็น

อายุการเก็บรักษา (วัน)	สูตร	น้ำหนักที่ได้หลังต้ม (%)	ปริมาณของแข็งที่สูญเสียระหว่างการต้ม (%)	ค่าการต้านแรงดึงขาด (กรัม)
0	ควบคุม	198.85±1.24 ^a	8.72±0.05 ^{de}	16.61±1.88 ^d
	1	166.09±2.15 ^c	7.49±0.25 ^e	25.69±0.85 ^{abc}
	2	160.58±7.38 ^d	8.29±0.92 ^{de}	27.46±0.48 ^a
	3	156.51±3.95 ^d	10.29±0.61 ^{cd}	26.80±2.32 ^a
7	ควบคุม	173.17±2.28 ^b	10.80±1.50 ^c	12.42±0.61 ^e
	1	144.07±1.65 ^e	11.43±1.62 ^c	23.88±0.67 ^c
	2	139.64±2.23 ^e	9.64±1.76 ^{cd}	26.46±1.50 ^{ab}
	3	138.87±2.16 ^e	11.14±1.40 ^c	25.61±2.80 ^{abc}
11	ควบคุม	140.91±2.63 ^e	20.38±0.96 ^{ab}	13.41±1.31 ^e
	1	118.97±0.85 ^f	20.53±0.81 ^{ab}	24.08±0.46 ^{bc}
	2	110.93±1.75 ^g	18.62±0.79 ^b	27.58±1.39 ^a
	3	101.83±0.31 ^h	21.08±1.31 ^a	26.05±2.07 ^{abc}

*หมายเหตุ สูตรควบคุม คือ ร้อยละแป้งข้าวสาลี เท่ากับ 100

สูตร 1 คือ ร้อยละแป้งข้าวสาลี เท่ากับ 100 และผสมผงแมงกะพรุนร้อยละ 5 ต่อปริมาณแป้งทั้งหมด

สูตร 2 คือ ร้อยละแป้งข้าวสาลีต่อแป้งข้าวเจ้า เท่ากับ 90:10 และผสมผงแมงกะพรุนร้อยละ 5 ต่อปริมาณแป้งทั้งหมด

สูตร 3 คือ ร้อยละแป้งข้าวสาลีต่อแป้งข้าวเจ้า เท่ากับ 85:15 และผสมผงแมงกะพรุนร้อยละ 5 ต่อปริมาณแป้งทั้งหมด

a, b, c, d, e, f และ g คือเป็นตัวอักษรที่ใช้กำกับข้อมูลที่อยู่ในคอลัมน์เดียวกันแสดงว่าแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05)

4. สรุปผลการวิจัย

ผลิตภัณฑ์เส้นบะหมี่ที่ใช้แป้งข้าวเจ้าทดแทนแป้งข้าวสาลีผสมผงแมงกะพรุนมีค่าสีเหลืองและมีเอดสี (h^*) อยู่ใกล้ช่วงสีเหลือง จากการศึกษาคุณภาพหลังการต้มสุกที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4.30 นาที ในวันที่ 0 ในสูตร 2 และสูตร 3 ของเส้นบะหมี่ที่มีการใช้แป้งข้าวเจ้าทดแทนร้อยละ 10 และ 15 นั้นพบว่า การทดแทนแป้งข้าวเจ้ามากขึ้นทำให้มีร้อยละปริมาณการสูญเสียน้ำหนักที่ได้หลังการต้มสุกลดลง ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่มีค่าปริมาณของแข็งที่สูญเสียระหว่างการต้มเพิ่มขึ้นและแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05) เส้นบะหมี่ทุกสูตรที่ผสมผงแมงกะพรุนมีค่าการต้านทานแรงดึงขาดหรือความเหนียวมากกว่าสูตรควบคุม เส้นบะหมี่สูตร 2 มีคุณภาพทางกายภาพที่ดีและมีความเหนียวกว่าเส้นบะหมี่สูตร 3 โดยสูตร 2 ให้คุณค่าทางด้านโภชนาการเพิ่มขึ้น จากปริมาณโปรตีนที่เพิ่มขึ้นร้อยละ 8.85 เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรควบคุม และมีปริมาณคอลลาเจน 0.425 กรัม ใน 100 กรัม จากการใช้เกณฑ์ตัดสินการเสื่อมเสียจากลักษณะปรากฏที่มีลักษณะเป็นเมือกและมีกลิ่นเหม็นผิดปกติพบว่า เส้นบะหมี่ในทุกสูตรสามารถเก็บได้นาน 2 วัน ที่อุณหภูมิห้อง และ 11 วัน ที่อุณหภูมิตู้เย็น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากเงินรายได้คณะวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ ประจำปีงบประมาณ 2565 ขอขอบคุณนายวิริยะ เจริญโชคพานิชย์ นายปรัชญา ม่วงรอด นายกอบโชค อริยะสินสมบูรณ์ นายสิทธิชัย หอมหวาน และนายธีรภัทร จรุงเกียรติวัฒนา ที่ช่วยดำเนินการทดสอบทางด้านประสาทสัมผัส สารผสมฟอสเฟตได้รับความอนุเคราะห์จากคุณภคิน รักชาติไทย

เอกสารอ้างอิง (References)

- American Association of Cereal Chemists (AACC). (2000). *Approved Methods of the AACC* (10th ed.). American Association of Cereal Chemists, St. Paul. USA.
- AOAC. (2005). *Official Method of Analysis, Association of Official Agricultural Chemists* (12th ed.). Washington, D.C., USA.
- AOAC. (2019). *Official Method of Analysis* (21st ed.). The Association of Official Analytical Chemists, Rockville, Maryland. USA.
- Asenstorfer, R. E., Wang, Y., & Mares, D. J. (2006). Chemical structure of flavonoid compounds in wheat (*Triticum aestivum* L.) flour that contribute to the yellow color of Asian alkaline noodles. *Journal of Cereal Science*, 43(1), 108-119. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2005.09.001>
- Bailey, A. J., & Light, N. D. (1989). *Connective tissue in meat and meat products* (1st ed.). Elsevier Applied Science, London.
- Belay, E., & Teshome, M. (2021). Production of Bacterial Amylase and Evaluation for Starch Hydrolysis. *International Journal of Microbiology and Biotechnology*, 6(2), 34-44. <https://doi.org/10.11648/j.ijmb.20210602.12>
- Bhatt, S., & Gupta, M. (2023). Formulation of instant noodles incorporated with insoluble dietary fiber from fruit peel: In vitro starch digestibility, biophysical, structural and textural characteristics. *Applied Food Research*, 3(2), Article 100326. <https://doi.org/10.1016/j.afres.2023.100326>
- Brotz, L., Schiariti, A., López-Martínez, J., Álvarez-Tello, J., Hsieh, Y.-H. P., Jones, R. P., Quiñones, J., Dong, Z., Morandini, A. C., Preciado, M., Laaz, E., & Mianzan, H. (2017). Jellyfish fisheries in America: Origin, state of the art, and perspectives on new fishing grounds. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*, 27(1), 1-29. <https://doi.org/10.1007/s11160-016-9445-y>
- Charoenchokpanich, W., Muangrod, P., Thumthanaruk, B., Rungsardthong, V., Vatanyoopaisarn, S., Wonganu, B., & Roytrakul, S. (2024). Effect of cryoprotectants on quality of desalted jellyfish subjected to multiple freeze-thaw cycles. *Applied Science and Engineering Progress*, 17(2), Article 7075. <https://doi.org/10.14416/j.asep.2023.11.001>

- Charoenchokpanich, W., Rungsardthong, V., Vatanypoaisarn, S., Thumthanaruk, B., & Tamaki, Y. (2020). Salt reduction in salted jellyfish (*Lobonema smithii*) using a mechanical washing machine. *Science, Engineering and Health Studies*, 14(3), 184-192. <https://doi.org/10.14456/sehs.2020.17>
- Chiarelli, P. G., Suh, J. H., Pegg, R. B., Chen, J., & Solval, K. M. (2023). The emergence of jellyfish collagen: A comprehensive review on research progress, industrial applications, and future opportunities. *Trends in Food Science & Technology*, 141, Article 104206. <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2023.104206>
- Chokchaithanawiwat, P., Rungsardthong, V., Thumthanaruk, B., Puttanlek, C., Uttapap, D., Boonraksa, S., & Wonngsa, J. (2019). Product development of dried noodle from wheat flour and riceberry rice flour by extrusion. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 346, Article 012043. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/346/1/012043>
- Choy, A. L., Hughes, J. G., & Small, D. M. (2010). The effects of microbial transglutaminase, sodium stearoyl lactylate and water on the quality of instant fried noodles. *Food Chemistry*, 122, 957-964. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2009.10.009>
- Customs Department. (2024). *Statistics on jellyfish exports*. Customs Department. <https://www.customs.go.th/> (in Thai)
- Detchewa, P., Prasajak, P., Phungamngoen, C., Sriwichai, W., Naivikul, O., & Moongngarm, A. (2022). Substitution of rice flour with rice protein improved quality of gluten-free rice spaghetti processed using single screw extrusion. *LWT - Food Science and Technology*, 153, Article 112512. <https://doi.org/10.1016/j.lwt.2021.112512>
- Fu, B. X. (2008). Asian noodles: History, classification, raw materials, and processing. *Food Research International*, 41(9), 888-902. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2007.11.007>
- Hatcher, D. W., & Anderson, M. J. (2007). Influence of alkaline formulation on oriental noodle color and texture. *Cereal Chemistry*, 84(3), 253-259. <http://dx.doi.org/10.1094/CCEM-84-3-0253>
- Hsieh, Y.-H. P., Leong, F.-M., & Rudloe, J. (2001). Jellyfish as food. *Hydrobiologia*, 451, 11-17. <https://doi.org/10.1023/A:1011875720415>
- Hu, Y., Wei, J., & Chen, Y. (2017). The impact of salt on the quality of fresh wheat noodle. *Acta Universitatis Cibiniensis Series E Food Technology*, 21, 53-61. <https://doi.org/10.1515/auaft-2017-0015>
- Jia, F., Ma, Z., Wang, X., Li, X., Liu, L., & Hu, X. (2019). Effect of kansui addition on dough rheology and quality characteristics of chickpea-wheat composite flour-based

- noodles and the underlying mechanism. *Food Chemistry*, 298, Article 125081. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2019.125081>
- Khong, N. M. H., Yusoff, F. M., Jamilah, B., Basri, M., Maznah, I., Chan, K. W., & Nishikawa, J. (2016). Nutritional composition and total collagen content of three commercially important edible jellyfish. *Food Chemistry*, 196, 953-960. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.09.094>
- Klaiwong, T., Hutanguru, P., Rutatip, S., Wongsangasri, P., & Thumthanaruk, B. (2014). Comparative properties of pepsin hydrolyzed jellyfish protein from salted jellyfish. *Journal of Agricultural Science Technology B*, 4(7), 555-564.
- Kromfang, I., Thumthanaruk, B., & Laohakunjit, N. (2009). Effect of acetic acid, citric acid and lime juice on constituents and properties of concentrated protein extracts from sand jellyfish (*Rhopilema hispidum*) and white jellyfish (*Lobonema smithii*). *Proceedings of the 47th Kasetsart University Annual Conference* (pp. 751-759). Kasetsart University. (in Thai)
- Lelawatcharamas, W. (2004). Jellyfish: A new food for Western countries. *Food Journal*, 34(3), 225-228. (in Thai)
- Li, Y., Wang, Z., Qin, Y., Xiong, L., & Sun, Q. (2024). Preparation of porous-structured flat potato starch noodles with gelatin for shortening cooking time. *Food Hydrocolloid*, 149, Article 109573. <https://doi.org/10.1016/j.foodhyd.2023.109573>
- Loikaeo, N., & Chaisakdanugull, C. (2016). Properties of the kluai hin flour and kluai hakmuk flour and their application in fresh noodle. *Proceedings of RSU National Research Conference 2016* (pp. 468-476). Rangsit University, Bangkok. (in Thai)
- Lueyot, A., & Thumthanaruk, B. (2014). Optimization of functional properties of jellyfish (*Lobonema smithii*) protein hydrolysate as influenced by the degree of hydrolysis. *Proceedings of the 1st Joint ACS AGFD - ACS ICSCS Symposium on Agricultural and Food Chemistry* (pp. 103-108).
- Malai, D., Chaichawalit, C., Janphen, S., & Mailaed, S. (2013). Development of fresh noodles by substitution of Jerusalem artichoke powder. *Agricultural Science Journal*, 44(2) (Suppl.), 269-272. (in Thai)
- Muangrod, P. (2020). *Preparation of jellyfish powder and application in fresh noodle* [Master's thesis, King Mongkut's University of Technology North Bangkok]. King Mongkut's University of Technology North Bangkok. (in Thai)
- Palmieri, N., Nervo, C., & Torri, L. (2023). Consumers' attitudes towards sustainable alternative protein sources: Comparing seaweed, insects and jellyfish in Italy. *Food Quality and Preference*, 104, Article 104735. <https://doi.org/10.1016/j.foodqual.2022.104735>

- Pedersen, M. T., & Vilgis, T. A. (2019). Soft matter physics meets the culinary arts: From polymers to jellyfish. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, 16, Article 100135. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2019.100135>
- Popert, P., & Gawborisut, S. (2015). Quality of egg noodles as affected by tilapia frame meat supplement. *Journal of Khon Kaen Agriculture*, 43(1) (Suppl.), 56-61. (in Thai)
- Seetapan, N., Limpanyoon, N., Yooberg, R., Leelawat, B., & Charunuch, C. (2019). Influence of addition of extruded rice flour on preparation and quality of fresh gluten-free yellow alkaline noodles. *Journal of Cereal Science*, 90, Article 102828. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2019.102828>
- Silaprueng, S., Thumthanaruk, B., & Wongsangasri, P. (2015). Comparative functional properties of jellyfish (*Lobonema smithii*) protein hydrolysate as influenced by bromelain and hydrochloric acid. *Journal of Food Science and Agricultural Technology*, 1(1), 171-176.
- Sirichokworakit, S., Phetkhut, J. & Khommoon, A. (2015). Effect of partial substitution of wheat flour with riceberry flour on quality of noodles. *Procedia - Social and Behavioral Sciences*, 197, 1006-1012. <https://doi.org/10.1016/j.sbspro.2015.07.294>
- Soontaros, S., & Rimphanitchayakit, V. (2004). *Biomolecules* (1st ed.). Chulalongkorn University Press, Bangkok. (in Thai)
- SPSS Inc. (2008). *Statistics for Windows*, Version 17.0 [Computer software]. SPSS Inc., Chicago, USA.
- Tamanna, N., & Mahmood, N. (2015). Food processing and Maillard reaction products: effect on human health and nutrition. *International Journal of Food Science*, 2015, Article 526762. <https://doi.org/10.1155/2015/526762>
- Tanasombun, P., Siripanwattana, C., Prasengchom, S., & Ngamsangiam, N. (2014). Replacement of palmyra palm powder in fresh noodle. *SDU Research Journal Science and Technology*, 7(1), 105-123. (in Thai)
- Thumthanaruk, B., Chikhunthod, U., Rutatip, S., Hutangoon, P., Karpilanondh, P., & Wongsangasri, P. (2008). Survey and study of collagen protein from jellyfish [Unpublished report, King Mongkut's University of Technology North Bangkok]. King Mongkut's University of Technology North Bangkok. <https://shorturl.asia/HtUS4>
- Wandee, Y., Uttapap, D., Pancha-arnon, S., Puttanlek, C., Rungsardthong, V., & Wetprasit, N. (2015). Quality assessment of noodles made from blends of rice flour and canna starch. *Food Chemistry*, 179, 85-93. <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2015.01.119>
- Yue, C., Tang, Y., Peng, H., Wang, Z., Zhu, Y., Chang, M., Wang, X., Wang, Y., Li, X., & Luo, D. (2023). Effect of salt and kansui on rheology, water mobility and physicochemical

properties of long-chain inulin non-fermented dough and its noodles quality. *Journal of Cereal Science*, 114, Article 103783. <https://doi.org/10.1016/j.jcs.2023.103783>

การตรวจจับการหกล้มภายในอาคารด้วยการเรียนรู้เชิงลึก Detecting Falls Inside the Building by Deep Learning

เพชรรัตน์ สุขอุบล¹ ชลธิชา ยาศรี¹ ณัฐโชติ พรหมฤทธิ์² และ สัจจาภรณ์ ไวจรรยา^{2*}

Phetcharat Suk-ubon¹ Chonticha Yasri¹ Nuttachot Promrit² and Sajjaporn Waijanya^{2*}

¹สาขาวิชาวิทยาการข้อมูล คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร จ.นครปฐม ประเทศไทย

²ศูนย์เชี่ยวชาญปัญญาประดิษฐ์และภาษาธรรมชาติ ภาควิชาคอมพิวเตอร์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยศิลปากร
จ.นครปฐม ประเทศไทย

¹Data Science Major, Faculty of Science, Silpakorn University, Nakhon Pathom, Thailand

²Center of Excellence on Artificial Intelligence and Natural language processing, Department of Computer,
Faculty of Science, Silpakorn University, Nakhon Pathom, Thailand

วันที่ส่งบทความ : 7 มีนาคม 2565 วันที่แก้ไขบทความ : 25 มิถุนายน 2568 วันที่ตอบรับบทความ : 28 มิถุนายน 2568

Received: 7 March 2022, Revised: 25 June 2025, Accepted: 28 June 2025

บทคัดย่อ

บทความนี้นำเสนอการจำแนกภาพการหกล้มภายในอาคารด้วยการเรียนรู้เชิงลึก โดยใช้อัลกอริทึมโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน (Convolutional Neural Network: CNN) ในการทำ Regularization ด้วยเทคนิค Dropout ในการทำโมเดลการจำแนก ซึ่งรวบรวมข้อมูลที่เป็นข้อมูลไฟล์วิดีโอจาก University de Franche-Comté ห้องปฏิบัติการ ImViA โดยมีการแบ่งข้อมูลสำหรับฝึกฝน (Train set) 60% ชุดข้อมูลทดสอบ (Test set) 20% และชุดข้อมูลสำหรับทดสอบและปรับโมเดลตามผลการทดสอบ (Validation set) 20% การทดลองแบ่งเป็น 3 การทดลองหลักตามรูปแบบข้อมูลนำเข้าที่ต่างกัน คือ 1) Grayscale image 2) Motion History Image (HMI) และ 3) MHI ร่วมกับ Grayscale image การวัดประสิทธิภาพของโมเดลเพื่อคัดเลือกผลการทดลองที่ดีที่สุดตามลักษณะของข้อมูลนำเข้าพบว่า โมเดลที่จำแนกภาพแบบ Grayscale image ให้ค่าความถูกต้องเท่ากับ 0.9204 โมเดลที่จำแนกภาพแบบ MHI ให้ค่าความถูกต้องเท่ากับ 0.9193 และโมเดลที่จำแนกภาพแบบ MHI ร่วมกับ Grayscale image ได้ค่าความถูกต้องเท่ากับ 0.9575 ซึ่งเป็นโมเดลที่ดีที่สุดจาก 3 การทดลอง

คำสำคัญ : หกล้ม การประมวลผลรูปภาพ รูปภาพประวัติของการเคลื่อนไหว โครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน

Abstract

This article presents the detection of falls inside the building using deep learning. The method is to apply Convolutional Neural Network (CNN) for regularization by Dropout

*ที่อยู่ติดต่อ E-mail address: waijanya_s@silpakorn.edu

<https://doi.org/10.55003/scikmitl.2025.254055>

technique to create classification models. The data are collected in the form of video files from InVia laboratory room, University de Franche-Comté, and separated into 60% of Training set, 20% of Test set, and 20% of Validation set. The three experiments are designed for different patterns according to the different inputs: 1) Grayscale images 2) Motion History Images (MHI), and 3) MHI combined with Grayscale image. Regarding the efficiency evaluation of the three best models, the classification model for Grayscale images has 0.9204 accuracy. The model for classifying MHI achieves 0.9193 accuracy. On the other hand, the model for classifying MHI combined with Grayscale images results in 0.9575 accuracy, which is the best model of all 3 experiments.

Keywords: Fall, Image processing, Motion History Image, Convolutional Neural Network

1. บทนำ

ในปัจจุบันคนไทยเสียชีวิตจากการหกล้มสูงถึงปีละ 1,600 คน ซึ่งเป็นสาเหตุการตายอันดับ 2 ในกลุ่มของการบาดเจ็บโดยไม่ตั้งใจ รองจากการบาดเจ็บจากอุบัติเหตุทางถนน โดย 1 ใน 3 พบว่า อยู่ในกลุ่มผู้สูงอายุที่มีอายุ 60 ปีขึ้นไป และความเสี่ยงจะเพิ่มสูงขึ้นตามอายุ ปัญหาที่พบบ่อยของผู้สูงอายุที่ได้รับอุบัติเหตุดังกล่าว คือ กระดูกสะโพกแตกหักหรืออุบัติเหตุทางสมอง ซึ่งเป็นสาเหตุทำให้มีอัตราความพิการและอัตราการเสียชีวิตค่อนข้างสูง (Bangkok Hospital, 2021) ปัจจุบันประชากรผู้สูงอายุในประเทศไทยเพิ่มขึ้นเป็นอย่างมาก และสถานะภาพในปัจจุบันของสังคมไทย คนส่วนใหญ่เป็นวัยทำงานต้องทำงานนอกบ้าน ครอบครัวที่มีผู้สูงอายุจำเป็นต้องอาศัยอยู่บ้านเพียงลำพัง ทำให้มีโอกาสเกิดอันตรายจากการหกล้มเพิ่มสูงขึ้น

บทความนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อจำแนกการหกล้มภายในอาคาร โดยใช้วิธีการ Motion History Image (MHI) ซึ่งเป็นวิธีการที่แสดงถึงตำแหน่งการเคลื่อนที่ของวัตถุจากแต่ละเฟรมในภาพวิดีโอหนึ่งชุดตามลำดับเหตุการณ์ จากนั้นนำมารวมกันไว้ในภาพเดียว และแสดงค่าแต่ละบริเวณด้วยค่าความเข้มแสงที่แตกต่างกัน เพื่อสื่อถึงลำดับการเกิดเหตุการณ์ก่อนและหลัง บริเวณที่มีความเข้มแสงมากที่สุด หรือบริเวณที่สว่างที่สุด รวมทั้งสื่อถึงบริเวณที่มีการเคลื่อนที่ผ่านล่าสุดหรือเป็นปัจจุบันที่สุด ในขณะที่บริเวณที่มีการเคลื่อนที่เฟรมก่อนหน้าจะแสดงด้วยค่าความเข้มแสงที่ลดลงตามลำดับการเกิดเหตุการณ์ (Jaroonphan & Covavisaruch, 2013) นอกจากนี้ MHI เป็นวิธีที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์การเคลื่อนไหวและการเดิน โดยการเก็บประวัติของการเปลี่ยนแปลงในขณะที่มีการเคลื่อนไหวในแต่ละเฟรมของรูปภาพ และ MHI ถูกใช้ในงานทางด้านการจดจำการเคลื่อนไหวในรูปแบบหรือท่าทางต่าง ๆ

ดังนั้น ผู้วิจัยจึงได้ศึกษาการตรวจจับการหกล้มภายในอาคารด้วยวิธีการสกัดคุณลักษณะแบบ MHI เพื่อเป็นแบบจำลองในการพัฒนาการสร้างโมเดลตรวจจับการหกล้มในอนาคต เช่น การแจ้งเตือนขณะมีคนหกล้มเพื่อลดอุบัติเหตุที่ร้ายแรงที่อาจเกิดขึ้น ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ต่อภาครัฐ ภาคเอกชน และบุคคลทั่วไปที่มีความสนใจต่อไป

2. วิธีดำเนินการวิจัย

การดำเนินงานในงานวิจัยนี้ ผู้วิจัยออกแบบการทดลองโดยใช้วิธีการสกัดคุณลักษณะแบบ MHI และ Grayscale image และสร้างโมเดลแบบโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน (Convolutional Neural Network: CNN) โดยได้มีการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้อง จากนั้นเตรียมข้อมูล สร้างโมเดล ทดลองและประเมินเปรียบเทียบผลการวิจัย โดยมีรายละเอียดในแต่ละขั้นตอนต่าง ๆ ดังนี้

2.1 งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

2.1.1 Motion History Image (MHI)

Jaroonphan & Covavisaruch (2013) ได้ทำวิจัยเรื่อง การปรับใช้ MHI กับท่าทางของมนุษย์ที่มีการเคลื่อนที่ซ้ำแนวเดิม สามารถใช้ MHI ที่ไม่เหมาะสมสำหรับข้อมูลการเคลื่อนที่ซ้ำแนวเดิม นำมาแยกวิถีทัศนออกเป็นสองส่วนที่มีแนวการเคลื่อนที่ของวัตถุในภาพไม่ทับซ้อนกัน เพื่อสื่อถึงบริเวณและแนวทางการเคลื่อนที่ตามลำดับก่อนและหลังของท่าทางการเคลื่อนที่ได้ถูกต้อง และชัดเจนกว่าการใช้ MHI โดยไม่แบ่งช่วงของวิถีทัศนได้เป็นอย่างดี ในขณะที่ Meng et al. (2009) ได้จัดทำวิจัยเรื่อง Motion History Histograms for human action recognition โดยใช้ MHI ในการจดจำท่าทางต่าง ๆ เช่น เดิน (Walking) วิ่งออกกำลังกาย (Jogging) วิ่ง (Running) ชกมวย (Boxing) ประบมือ (Hand-clapping) และโบกมือ (Hand-waving) จากนั้น Ahad (2013) ได้วิจัยเรื่อง MHI for action recognition and understanding เพื่อศึกษาแนวคิดของรูปภาพแบบ MHI สำหรับการเคลื่อนไหวหรือการรับรู้ท่าทางต่าง ๆ การคิดวิเคราะห์ถึงการเคลื่อนไหวของการเดิน หรือการเคลื่อนที่ไม่ว่าจะเป็นยานพาหนะหรือบุคคล โดยที่ MHI จะแสดงลำดับการเคลื่อนไหวในลักษณะกะทัดรัด ลำดับภาพจะถูกย่อให้เป็นภาพระดับสีเทา นอกจากนี้ MHI ยังเป็นอัลกอริทึมที่สามารถใช้งานในที่แสงน้อยที่ไม่สามารถตรวจจับได้ง่ายได้ ทำให้ MHI จึงเป็นอัลกอริทึมหนึ่งที่เหมาะสมกับการใช้งานประเภทการเฝ้าระวังมากกว่าวิธีการอื่น

Hu et al. (2019) ได้ศึกษาการเรียนรู้สำหรับการจดจำอารมณ์จากใบหน้า โดยเสนอการทำงานที่ปรับปรุงอัลกอริทึม MHI ด้วยการใช้วิธีการ Improved Enhanced Motion History Image (IEMHI) โดยใช้จุดสังเกตบนใบหน้าของมนุษย์ที่ตรวจจับภาพการกระทำของใบหน้าได้อย่างชัดเจนมากขึ้น และมีประสิทธิภาพมากขึ้นหลังจากนั้นจะเข้าโมเดล CNN เพื่อทำนายอารมณ์จากใบหน้า

2.1.2 โครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน (CNN)

Hwang et al. (2017) ได้ศึกษาเกี่ยวกับ Maximizing accuracy of fall detection and alert systems based on 3D CNN เพื่อตรวจจับการหกล้มจากภาพถ่ายที่ได้จากกล้องที่มีเซนเซอร์อินฟราเรด (Depth Camera) ยิ่งกวาดไปยังพื้นที่ที่สนใจ จากนั้นมีการนำรูปภาพเข้าโมเดล 3D Convolutional Neural Network (3D-CNN) เพื่อวิเคราะห์ข้อมูลการเคลื่อนไหวอย่างต่อเนื่องและตรวจจับการหกล้ม จากการทดสอบพบว่า มีความแม่นยำเท่ากับ 96.9 เปอร์เซ็นต์

Lu et al. (2019) ได้ทำวิจัยเรื่อง Deep learning for fall detection: three-dimensional CNN combined with Long Short Term Memory (LSTM) on video kinematic data เพื่อศึกษาการสร้างโมเดลการเรียนรู้เชิงลึกสำหรับการตรวจจับการล้ม โดยการใช้อัลกอริทึม CNN ร่วมกับ LSTM บนชุดข้อมูล

Kinematic เพื่อตรวจจับการล้ม มีการใช้ข้อมูลนำเข้าโมเดลรูปแบบวิดีโอที่มีการหกล้มและไม่หกล้ม เพื่อให้โมเดลเรียนรู้และสามารถดึงคุณลักษณะออกมาได้โดยอัตโนมัติ และดึงลักษณะการเคลื่อนไหวออกจากลำดับเวลา ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการตรวจจับการหกล้ม อีกทั้งยังใช้ LSTM ร่วมกับ Visual attention module เพื่อระบุตำแหน่งที่สนใจในแต่ละเฟรมอีกด้วย

2.1.3 การเพิ่มข้อมูลภาพ (Image augmentation)

Zhang et al. (2019) ได้ทำวิจัยเรื่อง Image based fruit category classification by 13-layer deep CNN and data augmentation ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้จัดทำโมเดลการแยกชนิดของผลไม้ โดยได้ออกแบบโครงสร้าง CNN จำนวน 13 ชั้น ซึ่งเป็นโมเดลที่ผู้วิจัยได้ออกแบบขึ้น และได้ใช้เทคนิคการเพิ่มจำนวนข้อมูลโดยการหมุนภาพ การแก้ไข Gamma correction ในรูปภาพ จากเดิมมีรูปภาพในโมเดลจำนวน 1,800 รูปภาพ แต่เมื่อมีการทำ Image augmentation ทำให้มีจำนวนรูปภาพเพิ่มขึ้นเท่ากับ 63,000 รูปภาพ และมีการเปรียบเทียบผลลัพธ์กันระหว่างโมเดลที่มีข้อมูลนำเข้าแบบปกติ และโมเดลที่ข้อมูลมีการเพิ่มจำนวนข้อมูลด้วยเทคนิค Image augmentation พบว่า โมเดลที่มีการใช้ Image augmentation ได้ค่าความถูกต้องเท่ากับ 89.60% ซึ่งมากกว่าโมเดลที่ไม่ได้ทำ Image augmentation ซึ่งมีค่าความถูกต้องเท่ากับ 84.39%

Peng et al. (2019) ได้ทำวิจัยเรื่อง End-to-End change detection for high resolution satellite images using improved UNet++ ซึ่งในงานวิจัยนี้ได้จัดทำโมเดลเพื่อตรวจจับการเปลี่ยนแปลงสิ่งที่เกิดขึ้นบนพื้นที่ ณ ช่วงเวลาก่อนหน้า T1 กับช่วงเวลาถัดไป T2 โดยใช้ข้อมูลนำเข้าเป็นภาพถ่ายทางดาวเทียม ณ เวลา T1 และ T2 นำเข้าโมเดล CNN ประเภท Unet เพื่อให้โมเดลตรวจจับการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นบนรูปภาพ เช่น ภาพถ่าย ณ เวลา T1 ยังไม่มีถนน แต่ภาพถ่าย ณ เวลา T2 นั้นมีถนนเกิดขึ้น โมเดลจะแสดงภาพถนนออกมาเพื่อเป็นผลลัพธ์ อีกทั้งในงานวิจัยนี้ยังได้มีการทำ Image augmentation โดยการหมุนภาพ พลิกภาพ กลับภาพ และได้นำผลลัพธ์ที่ได้มาเปรียบเทียบกับโมเดลที่ไม่ผ่านการทำ Image augmentation พบว่า โมเดลที่ผ่านการทำ Image augmentation ให้ผลลัพธ์ที่ดีกว่าทั้งค่าความแม่นยำ (Precision) ค่าความระลึก (Recall) ค่า F1-score และ Overall accuracy

2.1.4 การตรวจจับการหกล้ม

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการตรวจจับการหกล้มภายในอาคาร เช่น Wang et al. (2016) ได้ทำวิจัยเรื่องการตรวจจับการหกล้มโดยใช้เทคนิคฮิสโตแกรมของทิศทางตามค่าเกรเดียนต์ (Histogram of Oriented Gradient: HOG) เทคนิค Local Binary Pattern (LBP) และคุณลักษณะที่ได้จาก Deep Learning Framework Caffe นำมารวมกัน เพื่อใช้แสดงทิศทางการเคลื่อนไหวของบุคคลในแต่ละเฟรมของลำดับวิดีโอ โดยใช้โมเดล Support Vector Machine (SVM) ในการตรวจจับการหกล้ม ซึ่งแบ่งรูปภาพเป็น 3 ประเภท คือ การเดิน การหกล้ม และการนั่ง จากนั้นนำประเภทของรูปภาพที่ได้มาตรวจสอบการหกล้ม ซึ่งได้ข้อสรุป 2 ประเภท คือ ล้มและไม่ล้ม

Menacho และ Ordonez (2020) ได้ทำงานวิจัยเรื่องการตรวจจับการล้มโดยใช้แบบจำลอง CNN ซึ่งโมเดลนำมาใช้กับหุ่นยนต์ชนิดเคลื่อนที่ได้ (Mobile robot) สำหรับการตรวจจับการหกล้มโดยการดึง

คุณสมบัติที่ได้จากการแยก Optical flow จากภาพสีในรูปแบบ Red-Green-Blue (RGB) สองภาพที่มีความต่อเนื่องกัน และในการประเมินประสิทธิภาพของโมเดลในงานวิจัยนี้ ได้แสดงกราฟ Receiver Operating Characteristic (ROC) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการทำงานของโมเดลระหว่าง VGG-16 และ ResNet50 จากการเปรียบเทียบพบว่า VGG-16 ให้ผลประสิทธิภาพสูงสุด และใช้จำนวนพารามิเตอร์ที่น้อยกว่า สามารถทำงานได้เร็ว ซึ่งส่งผลให้โมเดลในงานวิจัยนี้สามารถตรวจจับการหกล้ม รวมถึงการทำการกิจวัตรประจำวันได้แบบเรียลไทม์ จึงทำให้โมเดลมีความแม่นยำเท่ากับ 88.55%

ในขณะที่ Li et al. (2017) ได้ทำวิจัยเรื่องการตรวจจับการล้มสำหรับการดูแลสูงผู้สูงอายุโดยใช้ CNN ซึ่งมีการนำรูปภาพแต่ละเฟรมในวิดีโอเพื่อเรียนรู้คุณลักษณะการเปลี่ยนรูปร่างของมนุษย์ที่อธิบายท่าทางต่าง ๆ และพิจารณาว่ามีการหกล้มหรือไม่ ในการทดลองได้ใช้เทคนิคของการแบ่งข้อมูลออกเป็น 10 ส่วนเท่า ๆ กัน เพื่อฝึกฝนและทดสอบโมเดล นอกจากนี้ยังมีการรวบรวมวิดีโอการใช้อุปกรณ์ประจำวันของผู้สูงอายุจำนวนมาก และในงานวิจัยนี้ได้กล่าวถึงความท้าทายในการฝึกฝนโมเดล เช่น การเปลี่ยนพื้นหลังของวิดีโอ เช่น เงาม วัตถุที่เคลื่อนไหว การบดบัง และสีของเสื้อผ้าที่ต่างกัน เป็นต้น ซึ่งสิ่งนี้อาจส่งผลให้ประสิทธิภาพของการฝึกฝนโมเดลลดลง อีกทั้งในงานวิจัยนี้ยังได้เสนอวิธีที่จะสามารถเพิ่มประสิทธิภาพของโมเดลได้โดยการทำให้พื้นหลังมีสีเดียวกัน โมเดลนี้ให้ค่าความถูกต้องอยู่ที่ 99.87 %

2.1.5 การนำคุณลักษณะของรูปภาพมารวมกัน (Feature concatenation image)

งานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการนำคุณลักษณะของรูปภาพมารวมกัน เช่น Eppel (2017) ได้วิจัยเรื่อง Setting an attention region for convolutional neural networks using region selective features for recognition of materials within glass vessels มีการใช้เทคนิคการรวมคุณลักษณะของรูปภาพเข้าด้วยกันเพื่อแสดงจุดที่สนใจ งานวิจัยนี้มีการนำภาพ RGB ของภาชนะแก้วทดลองมารวมกับแผนที่บริเวณที่สนใจ (ROI Map) ซึ่งเป็นภาพไบนารีที่แสดงเฉพาะบริเวณของภาชนะแก้ว และใช้วิธี Valve filter approach เพื่อควบคุมการประมวลผลของ CNN ให้โฟกัสเฉพาะในบริเวณสำคัญ ภาพผลลัพธ์ที่ได้เป็นภาพสีที่แสดงบริเวณที่สนใจได้อย่างชัดเจน และถูกนำไปใช้เป็นอินพุตสำหรับการเรียนรู้ของโมเดล

จากนั้น Song et al. (2021) ได้วิจัยเรื่อง An effective multimodal image fusion method using MRI and PET for Alzheimer's Disease Diagnosis โดยใช้เทคนิคการรวมภาพ MRI ของสมองและภาพ FDG-PET เพื่อให้ได้รูปภาพแบบใหม่ที่เรียกว่า “GM-PET” ซึ่งรูปภาพนี้จะเน้นบริเวณ Gray Matter (GM) ซึ่งมีความสำคัญต่อการวินิจฉัยโรคอัลไซเมอร์ อีกทั้งยังคงรักษาทั้งรูปร่างและลักษณะการเผาผลาญของเนื้อเยื่อสมองของอาสาสมัครไว้อีกด้วย นอกจากนี้ ยังใช้โครงข่ายประสาทเทียมแบบสามมิติแบบง่าย (3D Simple CNN) และ 3D Multi-Scale CNN เพื่อประเมินประสิทธิภาพของวิธีการรวมภาพ ซึ่งจากการทดลองการจำแนกโรคอัลไซเมอร์โดยใช้ CNN ระบุว่า วิธีการรวมภาพแบบที่เสนอมามีค่าเริ่มต้นให้ประสิทธิภาพโดยรวมที่ดีกว่าวิธีการรวมภาพแบบ Unimodal อีกทั้งยังช่วยลดจำนวนพารามิเตอร์ของโมเดลได้อย่างมาก เมื่อเทียบกับอินพุตแบบหลายช่องสัญญาณ

2.2 การจัดเตรียมข้อมูล และการสร้างโมเดล

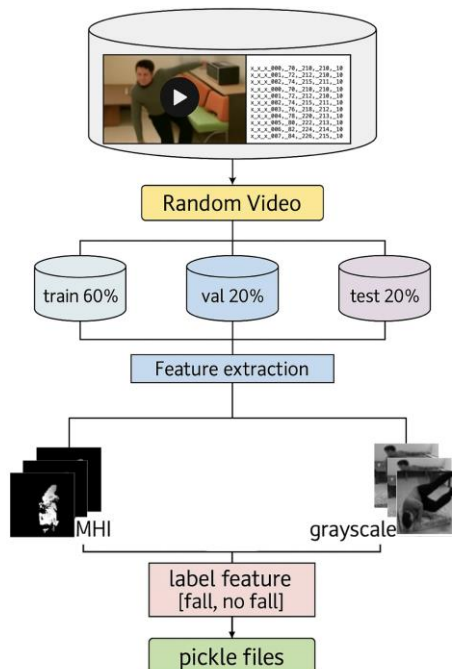
กระบวนการทำงานของระบบแบ่งเป็น 2 ส่วนคือ การเตรียมข้อมูล (Data preparation) และการฝึกฝนโมเดลและการวัดประสิทธิภาพของโมเดล (Model training and evaluation)

2.2.1 การเก็บข้อมูล

ในขั้นตอนการเก็บข้อมูลได้เก็บข้อมูลแบบทุติยภูมิ จาก University de Franche-Comté ห้องปฏิบัติการ ImViA (Laboratoire ImViA, 2020) ซึ่งข้อมูลประกอบด้วยไฟล์วิดีโอแสดงการหกล้มในสถานที่ที่แตกต่างกัน เช่น การหกล้มที่บ้าน (Home) จำนวน 60 วิดีโอ ห้องกาแฟ (Coffee room) จำนวน 70 วิดีโอ ห้องทำงาน (Office) จำนวน 33 วิดีโอ และห้องเรียน (Lecture room) จำนวน 27 วิดีโอ ซึ่งในแต่ละวิดีโอมีความยาวไม่เกิน 60 วินาที ซึ่งแสดงสถานการณ์การหกล้มในท่าทางที่แตกต่างกัน เช่น หกล้มจากเก้าอี้ เดินแล้วหกล้ม หกล้มจากบันได และประกอบด้วยไฟล์ Annotation files โดยภายในไฟล์ประกอบด้วยข้อมูล เลขเฟรมที่มีการเริ่มหกล้ม เลขเฟรมสิ้นสุดการหกล้ม และตำแหน่งแสดงกรอบภาพระบุตัวบุคคลในวิดีโอ (Bounding boxes) ในแต่ละเฟรม

2.2.2 การเตรียมข้อมูล

ผู้วิจัยนำข้อมูลที่รวบรวมมาจัดเตรียมให้อยู่ในรูปแบบที่สามารถใช้เพื่อฝึกฝน และทดสอบโมเดล โดยแสดงขั้นตอนการเตรียมข้อมูลดังรูปที่ 1



รูปที่ 1. ขั้นตอนการเตรียมข้อมูลก่อนเข้าโมเดล

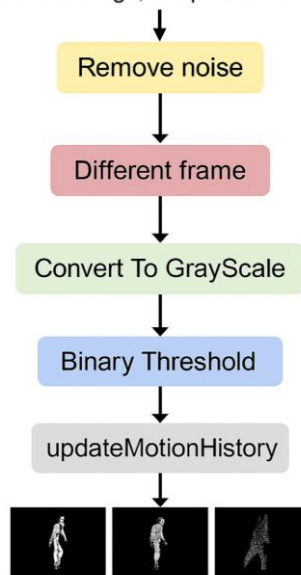
2.2.3 การสุ่มวิดีโอ

สุ่มข้อมูลชุดฝึกฝน (Train set) 60% ชุดข้อมูลทดสอบ (Test set) 20% และชุดข้อมูลสำหรับทดสอบและปรับโมเดลตามผลการทดสอบ (Validation set) 20%

2.2.4 การดึงคุณลักษณะ MHI และ Grayscale image

ดึงคุณลักษณะ MHI โดยดำเนินการปรับขนาดรูปภาพเท่ากับ 224x224 และตัด Noise ออกจากรูปภาพโดยใช้วิธี Gaussian blur จากนั้นหาค่าความต่างระหว่างเฟรม 2 เฟรมที่ต่อเนื่องกัน (Frame differencing) เพื่อแยกภาพบุคคลออกจากภาพพื้นหลัง และเปลี่ยนรูปภาพเป็น Grayscale หลังจากแยกวัตถุออกจากภาพพื้นหลัง ทำขั้นตอนที่เรียกว่า Threshold คือ การนำภาพ 1 Channel หรือ Grayscale image มาแปลงค่า Intensity ของแต่ละ Pixel ให้เหลือเพียง 2 ค่า คือ 0 (สีดำ) และ 255 (สีขาว) (Laboratoire ImViA, 2020) และรวมภาพวัตถุในแต่ละเฟรมในภาพที่ผ่านการตัดพื้นหลังออก ตามลำดับเวลา กำหนดค่า MHI_DURATION คือ ระยะเวลาของตำแหน่งการเคลื่อนที่ของวัตถุจากแต่ละเฟรมในภาพเท่ากับ 1,500 มิลลิวินาที แสดงดังรูปที่ 2

INPUT: The current image, the previous image, a duration



OUTPUT: Motion History Image MHI

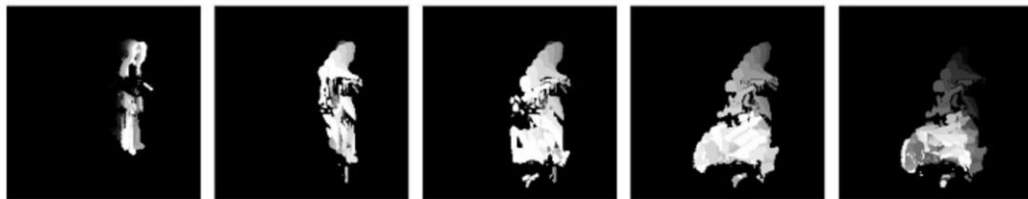
รูปที่ 2. ขั้นตอนการทำ Motion History Image

Grayscale image ดำเนินการครอบตัดภาพตัวบุคคลโดยใช้ตำแหน่งของ Array ตามที่ไฟล์ Annotation files ได้ระบุมา และเปลี่ยนขนาดรูปภาพเป็นขนาด 224x224 จากนั้นแปลงสีรูปภาพจาก RGB เป็น Grayscale

การดึงคุณลักษณะแบบ MHI และ Grayscale image ของภาพการหกล้ม แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 3



(ก) รูปภาพแบบ Grayscale

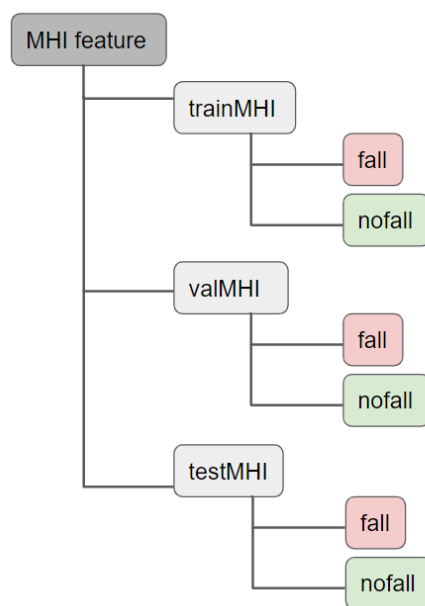


(ข) รูปภาพแบบ MHI

รูปที่ 3. คุณลักษณะของรูปภาพการหกล้ม

2.2.5 การใส่ผลเฉลย (Labeling)

ไฟล์ Annotation files ได้มีการระบุเลขเฟรมที่เริ่มหกล้มไปจนถึงสิ้นสุดการหกล้ม โดยดำเนินการเปลี่ยนชื่อรูปภาพที่ได้ครอบตัดภาพ และรูปภาพ MHI ที่จากเดิมชื่อไฟล์ถูกตั้งชื่อด้วยเลขเฟรมและเปลี่ยนเป็นชื่อ fall และ no fall หากชื่อไฟล์มีเลขเฟรมมากกว่าหรือเท่ากับเลขเฟรมที่เริ่มหกล้ม และเลขเฟรมน้อยกว่าหรือเท่ากับเลขเฟรมที่สิ้นสุดการหกล้ม File จะถูกเปลี่ยนชื่อเป็น fall ซึ่งหมายถึงรูปภาพคนหกล้มเพื่อเป็นการสร้างผลเฉลยให้กับข้อมูล และรูปที่ไม่ได้อยู่ในช่วงเลขเฟรมที่ได้กล่าวไปข้างต้นจะถูกเปลี่ยนชื่อ File เป็น no fall ซึ่งหมายถึงรูปภาพที่ไม่มีการหกล้ม จากนั้นดำเนินการแยกโฟลเดอร์ fall และ no fall ตามชื่อไฟล์รูปภาพที่ผ่านการใส่ผลเฉลย โดยตัวอย่างโครงสร้างการจัดเก็บข้อมูลและผลเฉลยของภาพแบบ MHI แสดงตัวอย่างดังรูปที่ 4



รูปที่ 4. ตัวอย่างโครงสร้างการจัดเก็บข้อมูล MHI

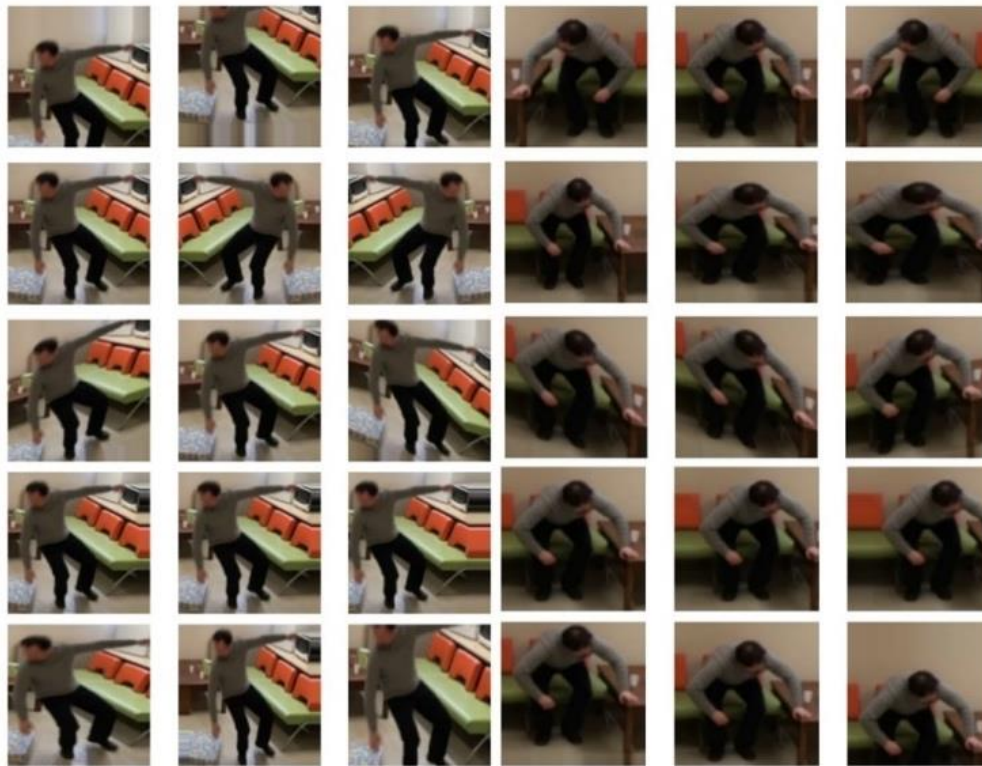
ทั้งนี้ไฟล์ทั้งหมดถูกนำมาสร้างเป็นชุดข้อมูลในรูปแบบไฟล์ Pickle file (.pkl) สำหรับใช้ในการฝึกฝนโมเดล โดยประกอบด้วยคุณลักษณะแบบ Grayscale แบบ MHI และแบบ MHI รวมกับ Grayscale image (MHI+Grayscale) ซึ่งรายละเอียดจำนวนของภาพในแต่ละชุดข้อมูล (Train, Validation และ Test) แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1. จำนวนรูปภาพในแต่ละชุดข้อมูล

Pickle File	Feature	Train	Validation	Test
1	Grayscale	19105	5848	3694
2	MHI	19207	5797	3657
3	MHI + Grayscale	16839	5632	3226

2.2.6 การเพิ่มจำนวนข้อมูลและความหลากหลายของรูปภาพด้วยวิธีการ Augmentation

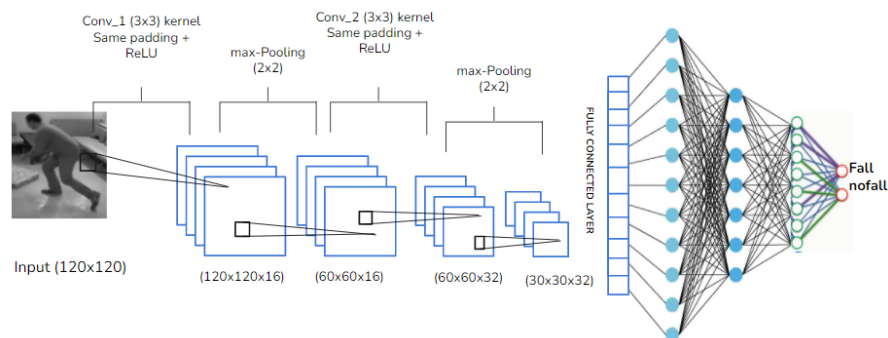
ในงานวิจัยครั้งนี้ได้เพิ่มจำนวนข้อมูลและความหลากหลายของรูปภาพ ด้วยการชมรูปภาพ การเลื่อนรูปภาพซ้าย ขวา บนล่าง รวมไปถึงการบิดรูปภาพ แสดงดังรูปที่ 5



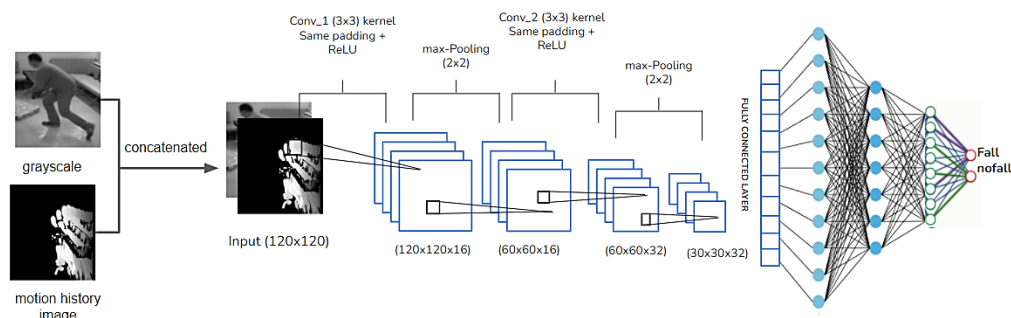
รูปที่ 5. ตัวอย่างภาพการเพิ่มจำนวนข้อมูลและความหลากหลายของรูปภาพด้วยวิธีการ Augmentation

2.2.7 การสร้างโมเดลจำแนกประเภท

ในขั้นตอนนี้ นำข้อมูลที่ได้จากขั้นตอนที่ 2.2.5 มาดำเนินการสร้างโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมแบบ CNN โดยทดลองนำรูปภาพที่มีคุณลักษณะที่ต่างกันเข้าโมเดล ดังนั้นผู้วิจัยจึงนิยามโมเดลเป็น 2 แบบ คือ แบบที่ 1 โมเดลที่มีข้อมูลนำเข้าเป็น Grayscale หรือ MHI ดังแสดงในรูปที่ 6 และแบบที่ 2 โมเดลที่มีข้อมูลนำเข้าเป็นคุณลักษณะแบบ MHI ร่วมกับ Grayscale image ดังแสดงในรูปที่ 7



รูปที่ 6. CNN ที่ใช้ข้อมูลนำเข้าแบบ Grayscale หรือ MHI (การทดลองที่ 1-2)



รูปที่ 7. CNN ที่ใช้ข้อมูลนำเข้าแบบ MHI + Grayscale (การทดลองที่ 3)

ในการนิยามโมเดล จากรูปที่ 6 มีการกำหนด Input shape = (120, 120, 1) และจากรูปที่ 7 มีการกำหนด Input shape = (120, 120, 2) ซึ่งทั้งรูปที่ 6 และรูปที่ 7 ได้กำหนด Output layer เป็น 2 โหนด (fall และ no fall) กำหนดค่า Dropout เท่ากับ 0.3 และ 0.4 ใช้ Activation function ReLu และ Output layer ใช้ Activation Function SoftMax ใช้ Optimizer คือ Adam และ Learning rate เท่ากับ 0.0001 ซึ่งจากงานวิจัย ของ Adrián Núñez- Marcos ที่ศึกษาเรื่อง Vision-based fall detection with CNN พบว่า ค่า Learning rate ที่เหมาะสมสำหรับข้อมูลชุดนี้อยู่ระหว่าง 0.001 ถึง 0.00001 (Warunsiri & Toontharm, 2017) ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้ค่า Learning rate เท่ากับ 0.0001 สำหรับการทดลองในงานวิจัยนี้

2.2.8 การออกแบบการทดลอง

การสร้างโมเดลเพื่อจำแนกคนหกล้ม ผู้วิจัยได้ออกแบบเป็น 3 การทดลองหลักที่มีข้อมูลรูปภาพนำเข้าที่แตกต่างกัน โดยแต่ละการทดลองมี 2 โมเดลย่อยที่มีค่าพารามิเตอร์ต่างกัสดังตารางที่ 2 โดยที่

โมเดลที่ 1 และ 2 Grayscale image เป็นรูปภาพที่ได้จากการครอบตัด (Crop) เฉพาะตัวบุคคล และเปลี่ยนจากรูปภาพสี RGB เป็นรูปภาพ Grayscale จากรูปที่ 3(ก)

โมเดลที่ 3 และ 4 MHI เป็นรูปภาพที่ได้จากการทำ Motion History Image ดังขั้นตอนที่ 3.2.2 จากรูปที่ 3(ข)

โมเดลที่ 5 และ 6 MHI รวมกับ Grayscale image เป็นการนำรูปภาพทั้งสองแบบ คือ Grayscale image มีมิติ 120x120x1 และ MHI Image มีมิติ 120x120x1 มารวมเข้าด้วยกัน โดยภาพที่รวมแล้วจะมีมิติเท่ากับ 120x120x2

ตารางที่ 2. การออกแบบการทดลองสร้างโมเดลจำแนกคนหกล้มในรูปภาพที่มีคุณลักษณะแตกต่างกัน

การทดลองที่	Input image	Model	Dropout	Epoch	Learning rate
1	Grayscale	1	0.3	1000	0.0001
		2	0.4		
2	MHI	3	0.3		
		4	0.4		

ตารางที่ 2. (ต่อ) การออกแบบการทดลองสร้างโมเดลจำแนกคนทกล้มในรูปภาพที่มีคุณลักษณะแตกต่างกัน

การทดลองที่	Input image	Model	Dropout	Epoch	Learning rate
3	MHI + Grayscale	5	0.3		
		6	0.4		

2.2.9 การวัดประสิทธิภาพของโมเดล

การวัดประสิทธิภาพของโมเดล (Promrit & Waijanya, 2021) จะแสดงผลออกมาในรูปตาราง Confusion Matrix ซึ่งพิจารณาค่า True Positive (TP), True Negative (TN), False Positive (FP) และ False Negative (FN) แสดงดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3. Confusion Matrix

		Actually	
		Positive	Negative
Predicted	Positive	TP	FN
	Negative	FP	TN

การวัดประสิทธิภาพของโมเดล ประกอบด้วยค่าที่สำคัญ ดังนี้

Accuracy เป็นการวัดความถูกต้องของโมเดล โดยพิจารณารวมทุกคลาส คำนวณค่าได้โดยใช้สมการที่ (1)

$$\text{Accuracy} = \frac{TP+TN}{TP+TN+FP+FN} \quad (1)$$

ค่าความแม่นยำ (Precision) เป็นการวัดความแม่นยำของข้อมูล โดยพิจารณาแยกทีละคลาส คำนวณค่าโดยใช้สมการที่ (2)

$$\text{Precision} = \frac{TP}{TP+FP} \quad (2)$$

ค่าความระลึก (Recall) เป็นการวัดความถูกต้องของโมเดล โดยพิจารณาแยกทีละคลาส คำนวณค่าโดยใช้สมการที่ (3)

$$\text{Recall หรือ Sensitivity} = \frac{TP}{TP+FN} \quad (3)$$

ค่าความจำเพาะ (Specificity) เป็นการวัดค่าสัดส่วนการตรวจพบผลลบ ซึ่งหากมีค่าความจำเพาะมากหมายถึง โมเดลมีความสามารถในการตรวจพบหรือค้นหาผู้ที่ทกล้มมากขึ้นตามไปด้วย คำนวณได้โดยใช้สมการที่ (4)

$$\text{Specificity} = \frac{TN}{TN+FP} \quad (4)$$

โดยที่

<i>TP</i>	หมายถึง จำนวนผลลัพธ์ที่โมเดลทำนายว่าจริงได้ถูกต้อง
<i>TN</i>	หมายถึง จำนวนผลลัพธ์ที่โมเดลทำนายว่าไม่จริงได้ถูกต้อง
<i>FP</i>	หมายถึง จำนวนผลลัพธ์ที่โมเดลทำนายว่าจริงไม่ถูกต้อง
<i>FN</i>	หมายถึง จำนวนผลลัพธ์ที่โมเดลทำนายว่าไม่จริงไม่ถูกต้อง

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล

3.1 การทดสอบประสิทธิภาพการจำแนกรูปภาพการหกล้ม

การทดสอบประสิทธิภาพในการจำแนกรูปภาพการหกล้มเมื่อมีข้อมูลนำเข้าเป็น 1) MHI 2) Grayscale image และ 3) รวมคุณลักษณะ Grayscale image และ MHI เป็นการทดสอบเพื่อดูความแม่นยำของระบบเมื่อเทียบกับความเป็นจริงหรือผู้เชี่ยวชาญ โดยวัดจากค่าความแม่นยำ ดังสมการที่ (2) ค่าความระลึก ดังสมการที่ (3) และค่าความจำเพาะ ดังสมการที่ (4) แสดงเป็นตาราง Confusion Matrix ดังตารางที่ 3 ในการทดสอบการวัดประสิทธิภาพและวิเคราะห์ผลความถูกต้อง ของโมเดลการจำแนกรูปภาพการหกล้มเมื่อมีข้อมูลรูปภาพนำเข้าที่มีคุณลักษณะแตกต่างกัน ระหว่างระบบกับความเป็นจริง โดยใช้ชุดข้อมูลในการฝึกสอน (Training data set) คือรูปภาพที่มีการล้ม (fall) และรูปภาพที่ไม่มีการล้ม (no fall) และทดสอบการวัดประสิทธิภาพได้ผลดังตารางที่ 4 และตารางที่ 5

ตารางที่ 4. Confusion Matrix การจำแนกรูปภาพของโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน เมื่อ Dropout เท่ากับ 0.3 ทั้ง 3 การทดลอง

Model	Predicted	Actually	
		fall	no fall
Grayscale	fall	967	299
	no fall	93	2,335
MHI	fall	1,244	22
	no fall	273	2,118
MHI + Grayscale	fall	1,145	65
	no fall	72	1,944

จากตารางที่ 4 สามารถวิเคราะห์การจำแนกรูปภาพ เมื่อข้อมูลนำเข้าเป็นรูปภาพแบบ Grayscale สามารถทำนายได้ตรงกับความเป็นจริงรวมทั้งสิ้น 3,302 รูปภาพ ข้อมูลนำเข้าเป็นรูปภาพแบบ MHI สามารถทำนายได้ตรงกับความเป็นจริงรวมทั้งสิ้น 3,362 รูปภาพ และเมื่อข้อมูลนำเข้า เป็นรูปภาพแบบ MHI รวมกับ Grayscale สามารถทำนายได้ตรงกับความเป็นจริงรวมทั้งสิ้น 3,089 รูปภาพ

ตารางที่ 5. Confusion Matrix การจำแนกรูปภาพของโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน เมื่อ Dropout เท่ากับ 0.4 ทั้ง 3 การทดลอง

Model	Predicted	Actually	
		fall	no fall
Grayscale	fall	1,048	218
	no fall	76	2,352
MHI	fall	829	437
	no fall	57	2,334
Grayscale + MHI	fall	1,197	30
	no fall	107	1,892

จากตารางที่ 5 สามารถวิเคราะห์การจำแนกรูปภาพเมื่อข้อมูลนำเข้าเป็นรูปภาพแบบ Grayscale สามารถทำนายได้ตรงกับความเป็นจริงรวมทั้งสิ้น 3,400 รูปภาพ ข้อมูลนำเข้าเป็นรูปภาพแบบ MHI สามารถทำนายได้ตรงกับความเป็นจริงรวมทั้งสิ้น 3,163 รูปภาพ และเมื่อข้อมูลนำเข้า เป็นรูปภาพแบบ MHI รวมกับ Grayscale สามารถทำนายได้ตรงกับความเป็นจริงรวมทั้งสิ้น 3,089 รูปภาพ โดยมีตัวอย่างภาพที่โมเดลทำนายผิด แสดงดังรูปที่ 8



รูปที่ 8. ตัวอย่างรูปภาพที่โมเดลจำแนกผิด

จากรูปที่ 8 ตัวอย่างการจำแนกที่โมเดลทำนายผิดพบว่า ภาพที่โมเดลทำนายผิด เนื่องจากรูปภาพจะมีลักษณะเหมือนการนั่งลงไป หรือล้มขาพับลงไป และรูปภาพที่โมเดลทำนายผิดว่าไม่ล้ม ผู้วิจัยสังเกตเห็นว่า รูปที่บุคคลทำท่าทางก้มโค้ง โมเดลจะทำนายว่าเกิดการหกล้ม

ตารางที่ 6. การวัดประสิทธิภาพการจำแนกรูปภาพของโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชันทั้ง 3 การทดลอง

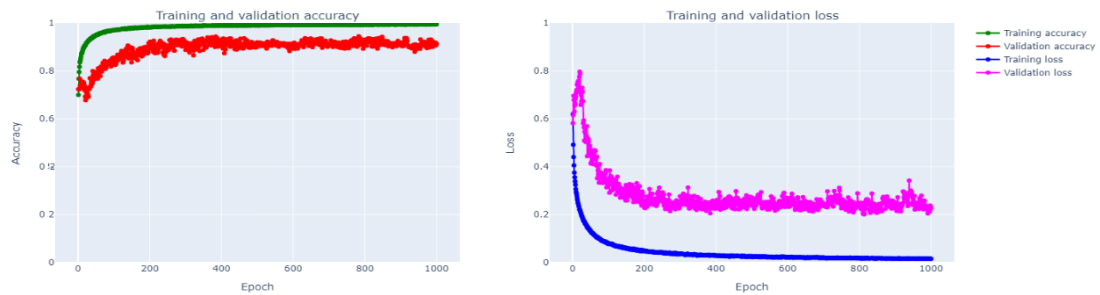
การทดลองที่	Input Image	Model	Dropout	Recall	Precision	F1-score	Accuracy
1	Grayscale	1	0.3	0.8627	0.8994	0.8770	0.8939
		2	0.4	0.9238	0.8982	0.9091	0.9204
2	MHI	3	0.3	0.9342	0.9049	0.9145	0.9193
		4	0.4	0.8155	0.8890	0.8373	0.8649
3	MHI + Grayscale	5	0.3	0.9197	0.9756	0.9459	0.9575
		6	0.4	0.9463	0.9408	0.9436	0.9575

จากตารางที่ 6 การวัดประสิทธิภาพการจำแนกรูปภาพของโมเดลโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชันพบว่า โมเดลการจำแนกรูปภาพแบบ Grayscale หากใช้ค่า Dropout เท่ากับ 0.3 ผลที่ได้ คือ ให้ค่าความถูกต้อง 0.8939 ในขณะที่ Dropout เท่ากับ 0.4 ผลคือ ให้ค่าความถูกต้อง 0.9204 โมเดลการจำแนกรูปภาพแบบ MHI หากใช้ค่า Dropout เท่ากับ 0.3 ให้ค่าความถูกต้อง 0.9193 ซึ่ง Dropout เท่ากับ 0.4 ให้ค่าความถูกต้อง 0.8649 และโมเดลการจำแนกรูปภาพแบบ MHI รวมกับ Grayscale ให้ค่าความถูกต้อง 0.9575 ทั้งใน Dropout เท่ากับ 0.3 และ 0.4 ซึ่งทั้ง 6 โมเดลใช้ค่า Learning rate เท่ากับ 0.0001 จากการทดลองผู้วิจัยจึงคัดเลือกโมเดลที่มีค่าความถูกต้องมากที่สุดตามรูปแบบข้อมูลรูปภาพนำเข้า ทั้งหมด 3 โมเดล ดังนี้ Dropout เท่ากับ 0.4 ในโมเดลการจำแนกรูปภาพแบบ Grayscale และโมเดลการจำแนกรูปภาพแบบ MHI รวมกับ Grayscale โดยประเมินผลจากค่า Accuracy, Precision, Recall และ F1-Score ร่วมกับการประเมินประสิทธิภาพกราฟการเรียนรู้ ที่จะแสดงในลำดับถัดไป

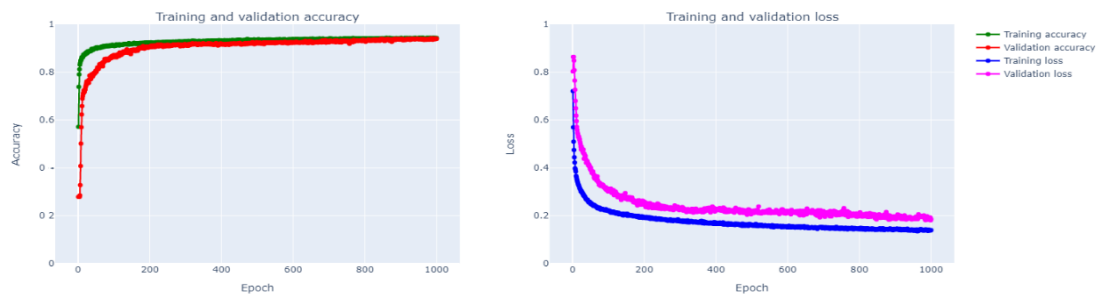
3.2 ผลการประเมินประสิทธิภาพโมเดลจากกราฟ

เพื่อประเมินประสิทธิภาพของโมเดลขณะฝึกฝน ซึ่งใช้ข้อมูลชุดฝึกฝน (Train set) และชุดข้อมูลสำหรับทดสอบและปรับโมเดลตามผลการทดสอบ (Validation set) ของทั้ง 3 การทดลอง ที่จำนวนรอบของการฝึก คือ 1,000 รอบเท่ากัน จากกราฟวัดประสิทธิภาพของโมเดลพบว่า โมเดลที่ 1 ข้อมูลนำเข้ารูปภาพแบบ Grayscale พบว่า มีช่องว่างระหว่างเส้น Training accuracy และ Validation accuracy แสดงดังภาพที่ 9(ก) แสดงให้เห็นว่ามีชุดข้อมูลฝึกฝนอาจไม่เพียงพอในการฝึกฝนโมเดลที่ใช้ข้อมูลนำเข้าเป็นภาพแบบ Grayscale โมเดลที่ 2 ข้อมูลนำเข้ารูปภาพแบบ MHI จากกราฟพบว่า ช่องว่างระหว่างเส้น Training accuracy และ Validation accuracy มีน้อยมาก แสดงดังภาพที่ 9(ข) จึงแสดงให้เห็นว่าโมเดลที่ 2 มีการเรียนรู้ที่ดี เมื่อใช้ข้อมูลนำเข้าเป็นรูปภาพแบบ MHI และโมเดลที่ 3 ข้อมูลนำเข้ารูปภาพแบบ MHI

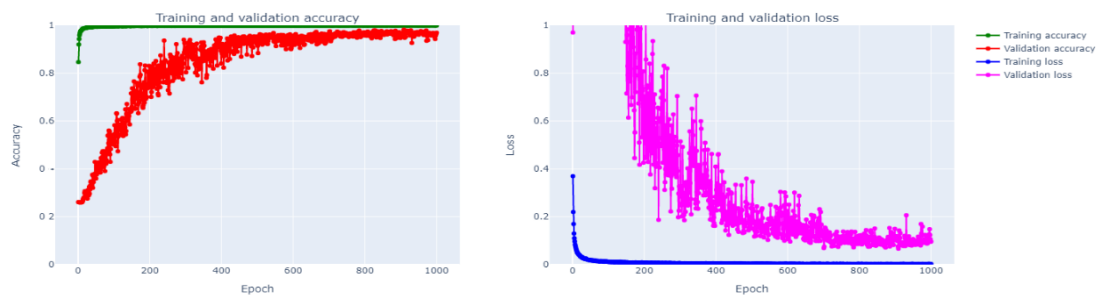
รวมกับ Grayscale พบว่า มีช่องว่างระหว่างเส้น Training accuracy และ Validation accuracy และเส้น Validation loss มีความแกว่งในช่วงต้น ดังรูปที่ 9(ค)



(ก) ข้อมูลนำเข้ารูปภาพแบบ Grayscale image



(ข) ข้อมูลนำเข้ารูปภาพแบบ MHI Image



(ค) ข้อมูลนำเข้ารูปภาพแบบ Grayscale image รวมกับ MHI Image

รูปที่ 9. เปรียบเทียบกราฟ Accuracy และ Loss ของการนำเข้าข้อมูลแบบต่าง ๆ

จากรูปที่ 9 แม้จำนวนการฝึก 1,000 รอบ จะให้ค่า Accuracy ที่ดีที่สุดก็ตาม ยังอาจสามารถฝึกฝนเพิ่มได้อีกเพื่อให้เห็นกราฟที่นิ่งมากขึ้น จากการทดลองทั้ง 3 โมเดลพบว่า กราฟแสดงค่า Training loss

และ Validation loss มีค่าลดลงอย่างต่อเนื่องจนถึงจุดหนึ่งจะคงที่ จึงแสดงให้เห็นว่าโมเดลทั้ง 3 มีการเรียนรู้ที่ดี สามารถนำไปทำนายข้อมูลชุดใหม่ได้อย่างแม่นยำ

เนื่องจากงานวิจัยนี้ใช้ชุดข้อมูลที่เป็นข้อมูลเปิด ดังนั้นจึงมีงานวิจัยอื่น ๆ ใช้ชุดข้อมูลนี้แต่มีรูปแบบการสกัดคุณลักษณะที่ต่างกัน โดยผลการวิจัยของงานวิจัยอื่น เปรียบเทียบกับงานวิจัยนี้แสดงดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7. การเปรียบเทียบผลของแต่ละงานวิจัยที่ใช้ Fall Detection Datasets

Model	The Extracted Features	Recall (%)	Specificity (%)	Accuracy (%)
3D CNN (Núñez-Marcos et al., 2017)	Movement Tube	100.00	97.04	97.23
CNN (Zou et al., 2017)	3D Features Extractor CNN	99.00	97.00	97.00
Centroid of a Person in The Frame (Subramanyan et al., 2020)	Texture Segmentation, Ground Point Estimates	91.17	96.00	90.53
Our Model1 (2D Convolution: Grayscale)	Grayscale	92.38	96.87	92.04
Our Model 2 (2D Convolution: MHI)	MHI	93.42	88.58	91.93
Our Model 3 (2D Convolution: MHI + Grayscale)	MHI + Grayscale	94.63	94.08	95.75

จากตารางที่ 7 พบว่า การสกัดคุณลักษณะรูปภาพแบบ Grayscale การสกัดคุณลักษณะรูปภาพแบบ MHI และคุณลักษณะรูปภาพแบบ MHI รวมกับ Grayscale ที่ได้ศึกษาในงานวิจัยครั้งนี้ นอกจากให้ค่าความถูกต้องที่เทียบเคียงได้กับงานวิจัยอื่น ๆ แล้ว การสกัดคุณลักษณะดังกล่าวยังเป็นวิธีการที่สามารถเข้าใจได้ง่ายและสามารถนำไปใช้งานได้ง่าย หากในอนาคตได้มีการเพิ่มในส่วนของ Fine-tuning ให้กับโมเดล CNN อาจทำให้โมเดลมีประสิทธิภาพมากขึ้น

4. สรุปผลการวิจัย

บทความนี้นำเสนอการตรวจจับการหกล้มภายในอาคารโดยนำข้อมูลมาจาก Université de Franche-Comté ประมวลผลรูปภาพโดยใช้ CNN โดยออกแบบ 3 การทดลองหลักที่มีโมเดลย่อย จำนวน 6 โมเดล จากนั้นคัดเลือกโมเดลที่มีค่าประสิทธิภาพมากที่สุดจากแต่ละการทดลอง โดยการทดลองที่ 1 จำแนกรูปภาพแบบ Grayscale ข้อมูลชุดฝึกสอนจำนวน 19,105 รูปภาพ และข้อมูลชุดทดสอบจำนวน 3,694 รูปภาพ การทดลองที่ 2 จำแนกรูปภาพแบบ MHI ข้อมูลชุดฝึกสอนจำนวน 19,207 รูปภาพ และข้อมูลชุดทดสอบจำนวน 3,657 รูปภาพ และการทดลองที่ 3 จำแนกรูปภาพแบบ MHI รวมกับรูปภาพแบบ Grayscale ข้อมูลชุดฝึกสอนจำนวน 16,839 รูปภาพ และข้อมูลชุดทดสอบจำนวน 3,226 รูปภาพ ค่า

วัดประสิทธิภาพของโมเดลที่ดีที่สุดในการทดลองที่ 1 แสดงค่า Recall เท่ากับ 0.9238 ค่า Precision เท่ากับ 0.8982 ค่า F1-score เท่ากับ 0.9091 และค่า Accuracy เท่ากับ 0.9204 โมเดลที่ดีที่สุดในการทดลองที่ 2 แสดงค่า Recall เท่ากับ 0.9342 ค่า Precision เท่ากับ 0.9049 ค่า F1-score เท่ากับ 0.9145 และค่า Accuracy เท่ากับ 0.9193 และโมเดลที่ดีที่สุดในการทดลองที่ 3 แสดงค่า Recall เท่ากับ 0.9463 ค่า Precision เท่ากับ 0.9408 ค่า F1-score เท่ากับ 0.9436 และให้ค่า Accuracy เท่ากับ 0.9575 พบว่าโมเดลที่ดีที่สุดของทั้ง 3 การทดลองที่ได้กล่าวมานั้นให้ค่าความถูกต้องเทียบเคียงได้กับการดึงคุณลักษณะแบบต่าง ๆ ดังตารางที่ 7 และจากการวัดประสิทธิภาพที่ได้จากการทดลองพบว่า โมเดลจากการทดลองที่ 3 ให้ค่าความถูกต้องเมื่อทดสอบกับข้อมูลชุดทดสอบมากที่สุด เนื่องจากการนำรูปภาพแบบ MHI รวมกับรูปภาพแบบ Grayscale เป็นวิธีที่นำคุณลักษณะ 2 ประเภทของรูปภาพมารวมกัน ทำให้โมเดลได้ข้อมูลสำหรับการทำนายมากขึ้น จึงอาจเป็นสาเหตุที่ทำให้โมเดลนี้มีประสิทธิภาพมากที่สุด

งานวิจัยการตรวจจับการหกล้มภายในอาคารด้วยการเรียนรู้เชิงลึก มีวัตถุประสงค์เพื่อจำแนกการหกล้มจากไฟล์วิดีโอที่มีการจำลองการหกล้มภายในอาคาร โดยเสนอวิธีการสกัดคุณลักษณะรูปภาพแบบ Grayscale การสกัดคุณลักษณะรูปภาพแบบ MHI และคุณลักษณะรูปภาพแบบ MHI รวมกับ Grayscale จากไฟล์วิดีโอที่มีการจำลองการหกล้มภายในอาคาร โดยใช้ CNN ในการทำ Regularization ด้วยเทคนิค Dropout ในการทำโมเดลพบว่า วิธีการสกัดคุณลักษณะรูปภาพแบบ MHI รวมกับ Grayscale ให้ค่าความถูกต้อง 95.75 ซึ่งมากที่สุดในการสกัดคุณลักษณะรูปภาพแบบอื่น ซึ่งโมเดลการจำแนกการหกล้มอาจนำไปพัฒนาต่อเป็นระบบตรวจจับการหกล้มได้ในอนาคต และงานวิจัยในอนาคตอาจมีการเพิ่มอัลกอริทึมในการตรวจจับการหกล้มให้มีความหลากหลายมากขึ้น เช่น RCNN และ Faster รวมถึงอาจมีการเพิ่มอัลกอริทึมในทดลองโมเดลให้มีความหลากหลายมากขึ้น

เอกสารอ้างอิง (References)

- Ahad, M. A. R. (2013). *Motion history images for action recognition and understanding*. Springer. <https://doi.org/10.1007/978-1-4471-4730-5>
- Bangkok Hospital. (2021). *Reducing fall-related accidents in the elderly*. <https://www.bangkokhospital.com/content/reduce-accidents-in-the-elderly-2>
- Eppel, S. (2017). *Setting an attention region for convolutional neural networks using region selective features, for recognition of materials within glass vessels*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1708.08711>
- Hu, M., Wang, H., Wang, X., Yang, J., & Wang, R. (2019). Video facial emotion recognition based on local enhanced motion history image and CNN-CTS-LSTM networks. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, 62, 176-185.
- Hwang, S., Ahn, D., Park, H., & Park, T. (2017). Poster abstract: Maximizing accuracy of fall detection and alert systems based on 3D convolutional neural network. *Proceedings of the IEEE/ACM Second International Conference on Internet-of-Things Design and Implementation (IoTDI)* (pp. 343-344). IEEE.

- Jaroonphan, P., & Covavisaruch, N. (2013). Utilizing MHI for human's gesture with repeating-path trajectory. *Information Technology Journal*, 9(2), 56-61. (in Thai)
- Laboratoire ImViA. (2020). *Fall detection dataset*.
<https://imvia.u-bourgogne.fr/en/database/fall-detection-dataset-2.html>
- Li, X., Pang, T., Liu, W., & Wang, T. (2017). Fall detection for elderly person care using convolutional neural networks. *Proceedings of the 2017 10th International Congress on Image and Signal Processing, BioMedical Engineering and Informatics (CISP-BMEI)* (pp. 1-6). IEEE.
- Lu, N., Wu, Y., Feng, L., & Song, J. (2019). Deep learning for fall detection: Three-dimensional CNN combined with LSTM on video kinematic data. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 23(1), 314-323. <https://doi.org/10.1109/JBHI.2018.2808281>
- Menacho, C., & Ordoñez, J. (2020). Fall detection based on CNN models implemented on a mobile robot. *Proceedings of the 2020 17th International Conference on Ubiquitous Robots (UR)* (pp. 284-289). IEEE.
- Meng, H., Pears, N., Freeman, M., & Bailey, C. (2009). Motion history histograms for human action recognition. In B. Kisačanić, S. S. Bhattacharyya, & S. Chai (Eds.), *Embedded Computer Vision* (pp. 139-162). Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-84800-304-0_7
- Núñez-Marcos, A., Azkune, G., & Arganda-Carreras, I. (2017). Vision-based fall detection with convolutional neural networks. *Wireless Communications and Mobile Computing*, 2017, 3-17. <https://doi.org/10.1155/2017/9474806>.
- Peng, D., Zhang, Y., & Guan, H. (2019). End-to-end change detection for high-resolution satellite images using improved UNet++. *Remote Sensing*, 11(11), Article 1382. <https://doi.org/10.3390/rs11111382>
- Promrit, N., & Waijanya, S. (2021). *Fundamental of deep learning in practice* (1st ed.). Infopress Publisher, Bangkok. (In Thai)
- Song, J., Zheng, J., Li, P., Lu, X., Zhu, G., & Shen, P. (2021). An effective multimodal image fusion method using MRI and PET for Alzheimer's disease diagnosis. *Frontiers in Digital Health*, 3, Article 637386. <https://doi.org/10.3389/fdgth.2021.637386>.
- Subramanyan, T., Jang, Y., Tsogtbaatar, E., & Cho, S. (2020). Fall detection system for elderly people using vision-based analysis. *Romanian Journal of Information Science and Technology*, 23(1), 69-83.
- Wang, K., Cao, G., Meng, D., Chen, W., & Cao, W. (2016). Automatic fall detection of human in video using combination of features. *Proceedings of the IEEE International Conference on Bioinformatics and Biomedicine (BIBM)* (pp. 1228-1233). IEEE.

- Warunsiri, W., & Toontharm, K. (2017). Procentage rice inspection program based on image processing principles. *Proceedings of the 10th Rajamangala University of Technology Tawan-ok Research Conference* (pp. 56-62). Rajamangala University of Technology Tawan-ok, Chonburi, Thailand. (In Thai)
- Zhang, Y., Dong, Z., Chen, X., Jia, W., Du, S., Muhammad, K., & Wang, S.-H. (2019). Image based fruit category classification by 13-layer deep convolutional neural network and data augmentation. *Multimedia Tools and Applications*, 78, 3613-3632.
- Zou, S., Min, W., Liu, L., Wang, Q., & Zhou, X. (2017). Movement tube detection network integrating 3D CNN and object detection framework to detect fall. *Electronics*, 10(8), 2-16.

คู่มือการเขียนบทความ วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง

1. ใช้ตัวอักษรแบบ TH Sarabun PSK และระยะห่างระหว่างบรรทัด 1 เท่า (Single Space)
2. จัดพิมพ์เป็น 1 คอลัมน์ ตั้งค่าน้ำกระดาษ ขอบบน ขอบล่าง ขอบซ้าย และขอบขวา 1.58 นิ้ว จัดขนาดกระดาษแบบ Letter
3. ชื่อเรื่องพิมพ์ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ขนาด 18 ตัวหนา ชื่อภาษาอังกฤษเฉพาะคำขึ้นต้น ให้พิมพ์เป็นตัวพิมพ์ใหญ่ จัดวางที่กึ่งกลางของคอลัมน์
4. ชื่อผู้แต่งและผู้แต่งร่วม ที่อยู่หน่วยงานผู้แต่ง ใช้ตัวอักษรขนาด 12 ตัวปกติ จัดวางที่กึ่งกลางของคอลัมน์
5. เนื้อหา
 - บทคัดย่อ และ Abstract ใช้ตัวอักษรขนาด 16 ตัวหนา จัดกึ่งกลางหน้ากระดาษ คำว่า Abstract เฉพาะตัวอักษรนำ A ให้ใช้ตัวพิมพ์ใหญ่ ส่วนเนื้อความใช้ตัวอักษรขนาด 14 ตัวปกติ โดยจัดรูปแบบ “กระจายแบบไทย (Thai Distributed)” และจัดพิมพ์เป็น 1 คอลัมน์
 - คำสำคัญ (Keywords) ให้พิมพ์ต่อจากส่วนของบทคัดย่อก่อนขึ้นบทนำ หัวข้อใช้ตัวอักษรขนาด 12 ตัวหนา ควรเลือกคำสำคัญที่เกี่ยวข้องกับบทความประมาณ 3-5 คำ ใช้ตัวอักษรขนาด 12 ตัวปกติ
 - หัวข้อใหญ่ใช้ตัวอักษร 16 ตัวหนา **บทความวิจัย (Research article)** เนื้อหาประกอบด้วย 1. บทนำ 2. วิธีดำเนินการวิจัย (รวมถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง) 3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล และ 4. สรุปผลการวิจัย ส่วน**บทความวิชาการ (Review article)** เนื้อหาประกอบด้วย 1. บทนำ 2. เนื้อหาสาระ 3. เนื้อหาสาระ (ถ้ามีเพิ่ม) และ 4. บทสรุป โดยหัวข้อย่อยใช้ตัวอักษรขนาด 14 ตัวหนา จัดชิดซ้ายคอลัมน์ ส่วนเนื้อความใช้ตัวอักษรขนาด 14 ตัวปกติ จัดรูปแบบ “กระจายแบบไทย (Thai Distributed)”
 - กิตติกรรมประกาศ ไม่ต้องใส่หมายเลขกำกับ หน้าหัวข้อใหญ่ ใช้ตัวอักษรขนาด 16 ตัวหนา ส่วนเนื้อหาใช้ตัวอักษรขนาด 14 ตัวปกติ
 - เอกสารอ้างอิง (References) หัวข้อใหญ่ใช้ตัวอักษรขนาด 16 ตัวหนา ส่วนเนื้อหาใช้ตัวอักษรขนาด 14 ตัวปกติ
6. ตาราง ให้ใช้คำว่า ตารางที่ใช้ตัวอักษรขนาด 12 ตัวหนา ในส่วนชื่อตาราง เนื้อหาในตาราง ใช้ตัวอักษรขนาด 12 ปกติ โดยที่หัวตารางให้จัดวางชิดซ้ายของคอลัมน์ ชื่อตารางอยู่ด้านบนของตาราง ระยะห่างระหว่างบรรทัด 1 เท่า (Single Space)
7. รูป (ภาพ) ให้ใช้คำว่า รูปที่ใช้ตัวอักษรขนาด 12 ตัวหนา ในส่วนชื่อรูปพร้อมคำบรรยาย ใช้ตัวอักษรขนาด 12 ปกติ โดยที่รูปให้จัดวางที่กึ่งกลางของคอลัมน์ ชื่อและคำบรรยายรูปให้อยู่ใต้รูป ระยะห่างระหว่างบรรทัด 1 เท่า (Single Space)
8. สมการ ให้ใช้สมการที่ (x) ใช้ตัวอักษรขนาด 14 ตัวปกติ
9. จำนวนหน้าบทความ ไม่ควรเกิน 20 หน้า

ตัวอย่างการเขียนเอกสารอ้างอิงและบรรณานุกรมตามรูปแบบ APA (7th edition)

1. การอ้างอิงแทรกในเนื้อหา (In-text citations) ให้ใช้ชื่อสกุลผู้แต่ง หรือชื่อเรื่อง (กรณีไม่มีผู้แต่ง) ตามด้วยปี ค.ศ. ที่พิมพ์ โดยต้องเขียนเป็นภาษาอังกฤษเท่านั้น ไม่ว่าต้นฉบับจะเป็นภาษาไทยหรือภาษาต่างประเทศ รูปแบบคือ (นามสกุลผู้แต่ง, ปีที่พิมพ์) โดยมีรูปแบบการอ้างอิงดังต่อไปนี้

1.1 การอ้างอิงหน้าข้อความ

ผู้แต่งคนเดียว Damasio (2020)
ผู้เขียนสองคน Kruekaew & Kimpan (2022)
ผู้เขียนสามคนหรือมากกว่า ให้ระบุนามสกุลคนแรก ตามด้วย et al. Puraram et al. (2021)

1.2 การอ้างอิงท้ายข้อความ

ผู้แต่งคนเดียว (Mingkwan, 2023)
ผู้เขียนสองคน (Kruekaew & Kimpan, 2022)
ผู้เขียนสามคนหรือมากกว่า ให้ระบุนามสกุลคนแรก ตามด้วย et al. (Puraram et al., 2021)

1.3 กรณีการอ้างอิงหลายรายการในครั้งเดียว

ตัวอย่าง

การอ้างอิงหน้าข้อความ ให้ระบุดังนี้
Kruekaew & Kimpan (2022) และ Puraram et al. (2021) กล่าวว่า
การอ้างอิงท้ายข้อความ ให้ระบุดังนี้
..... (Wannaphan & Tadee, 2024; Puraram et al., 2021)

1.4 กรณีมีการอ้างอิงงานหลายรายการที่มีคนเดียวกันและปีเดียวกัน

ให้ใส่ตัวอักษรพิมพ์เล็ก (ระบุเป็น a, b) หลังปีที่พิมพ์ทั้งในการอ้างอิงในเนื้อหาและรายการอ้างอิง

ตัวอย่าง Haque et al. (2005a,b)..... หรือ(Haque et al., 2005a,b)

1.5 กรณีมีการอ้างอิงงานหลายรายการที่มีคนเดียวกันและปีต่างกัน

ตัวอย่าง

Medina & Reyes (2020, 2023) และ Zhou (n.d., 2016, 2018)
..... (Medina & Reyes, 2020, 2023; Zhou, n.d., 2016, 2018)

2. การเขียนเอกสารอ้างอิง (References)

ในการเขียนเอกสารอ้างอิงเป็นภาษาอังกฤษ ให้มีการจัดเรียงตามลำดับอักษรชื่อสกุลของผู้แต่ง หรือชื่อเรื่องในกรณีที่ไม่มีชื่อผู้แต่ง หากเอกสารที่อ้างอิงไม่ได้เขียนด้วยภาษาอังกฤษ ให้แปลความหมายของชื่อเรื่องเป็นภาษาอังกฤษ และวงเล็บท้ายชื่อเรื่องของเอกสารนั้นว่า ต้นฉบับเป็นภาษาใด เช่น ระบุว่า (in Thai)

- การระบุผู้เขียน ให้ใช้นามสกุล ตามด้วยอักษรตัวแรกของชื่อต้น และชื่อกลาง (ถ้ามีชื่อกลาง)
- เอกสารที่มีเนื้อหาเป็นภาษาไทย ให้วงเล็บ (in Thai)
- ใช้เครื่องหมาย “&” แทนคำว่า and ในการอ้างอิงเสมอ ทั้งในการอ้างอิงเอกสารภาษาไทย และเอกสารภาษาต่างประเทศ

2.1 วารสารออนไลน์

ก. กรณีมีเลข DOI

ชื่อผู้แต่ง (ใช้ชื่อสกุลขึ้นก่อน, ตามด้วยอักษรย่อของชื่อต้น, อักษรย่อชื่อรอง (ถ้ามี)). (ปีที่พิมพ์). ชื่อบทความ. *ชื่อวารสารที่เป็นชื่อเต็ม (ตัวเอียง)*, ฉบับที่(เล่มที่ ถ้ามี), หน้าแรก-หน้าสุดท้าย. DOI (กรณีหนังสือภาษาไทยให้ใส่ (in Thai))

ตัวอย่าง

Kruekaew, B., & Kimpan, W. (2022). Multi-objective task scheduling optimization for load balancing in cloud computing environment using hybrid artificial bee colony algorithm with reinforcement learning. *IEEE Access*, 10, 17803-17818.
<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3149955>

Palananda, A., & Kimpan, W. (2022). Classification of adulterated particle images in coconut oil using deep learning approaches. *Applied Sciences*, 12(2), Article 656.
<https://doi.org/10.3390/app12020656>

Ponggun, Y., Namkao, B., Sirirat, A., Natakutung, U., Onruk, K., & Nudee, K. (2024). A mathematical model of melioidosis transmission with effect of wearing boots. *Journal of Science Ladkrabang*, 30(1), 8-26.
<https://doi.org/10.55003/scikmitl.2024.259094> (in Thai)

Welutung, P., Pengthamkeerati, P., Kachenchart, B., & Tawornpruek, S. (2024). Effects of nitrogen fertilizer rate with urease and nitrification inhibitors on certain morphological traits and quality of sugarcane (*Saccharum officinarum* L.). *Current Applied Science and Technology*, 25(3), Article e0261218.
<https://doi.org/10.55003/cast.2024.261218>

ข. กรณีไม่มีเลข DOI

ชื่อผู้แต่ง (ใช้ชื่อสกุลขึ้นก่อน, ตามด้วยอักษรย่อของชื่อต้น, อักษรย่อชื่อรอง (ถ้ามี)). (ปีที่พิมพ์). ชื่อบทความ. *ชื่อวารสารที่เป็นชื่อเต็ม (ตัวเอียง)*, ฉบับที่(เล่มที่ ถ้ามี), หน้าแรก-หน้าสุดท้าย. (กรณีหนังสือภาษาไทยให้ใส่ (in Thai))

ตัวอย่าง

Boughton, J. M., Kirk, J., & Munday, R. J. (2002). The bretton woods proposal: A brief look.

Political Science Quarterly, 42(6), 564-570.

Chaisupakitsin, M., Mahaprathum, C., & Saenbualuang, V. (2009). Effect of silk yarn residues on morphology and properties of rigid polyurethane foam. *Journal of Science Ladkrabang*, 18(1), 67-79. (in Thai)

2.2. หนังสือหรือตำรา

ชื่อผู้แต่ง (ใช้ชื่อสกุลขึ้นก่อน, ตามด้วยอักษรย่อของชื่อต้น. อักษรย่อชื่อรอง (ถ้ามี)). (ปีที่พิมพ์). ชื่อหนังสือ (ใช้ตัวเอียง) (พิมพ์ครั้งที่). สำนักพิมพ์, สถานที่พิมพ์. (กรณีหนังสือภาษาไทยให้ใส่ (in Thai))

ตัวอย่าง

Barker, R., Kirk, J., & Munday, R. J. (1988). *Narrative analysis* (3rd ed.). Bloomington, Indiana publishing, Indiana University Press.

Svendsen, S., & Løber, L. (2020). *The big picture/academic writing: The one-hour guide* (3rd digital ed.). Hans Reitzel Forlag. <https://thebigpicture-academicwriting.digi.hansreitzel.dk/>

Thanaboripat, D. (1991). *Industrial Microbiology* (2nd ed.). Korat Thai Roongkit Publisher, Nakhonratchasima. (in Thai)

2.3 บทความหรือบทในหนังสือ

ชื่อผู้แต่ง (ใช้ชื่อสกุลขึ้นก่อน, ตามด้วยอักษรย่อของชื่อต้น. อักษรย่อชื่อรอง (ถ้ามี)). (ปีที่พิมพ์). ชื่อบทความ. In อักษรย่อของชื่อต้น. อักษรย่อชื่อรอง (ถ้ามี). ตามด้วยชื่อสกุล (Ed. หรือ Eds.), ชื่อหนังสือ (ตัวเอียง). (พิมพ์ครั้งที่, เล่มที่, pp. หน้าที่ปรากฏบทความ). สำนักพิมพ์. DOI (กรณีหนังสือภาษาไทยให้ใส่ (in Thai))

ตัวอย่าง

Lotong, N. (1998). Koji. In B. J. B. Wood (Ed.), *Microbiology of fermented foods Vol 1* (2nd ed., pp. 658-695). Blackie Academic and Professional.

Smith, J. E. (2006). Public perception of biotechnology. In C. Ratledge & B. Kristiansen (Eds.), *Basic biotechnology* (pp. 3-24). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CB_O9780511802409

2.4 รายการการประชุมวิชาการที่มี Proceedings

ชื่อผู้แต่ง (ใช้ชื่อสกุลขึ้นก่อน, ตามด้วยอักษรย่อของชื่อต้น. อักษรย่อชื่อรอง (ถ้ามี)). (ปีที่พิมพ์). ชื่อบทความ. *Proceedings of ชื่อรายงานการประชุม (Proceedings Title)* (ตัวเอียง) (pp. เลขหน้า). สำนักพิมพ์. DOI (กรณีหนังสือภาษาไทยให้ใส่ (in Thai))

ตัวอย่าง

Herrington, J., & Oliver, R. (2000). An instructional design framework for authentic learning environments. *Proceedings of the Annual Conference of the Australasian Society for Computers in Learning in Tertiary Education (ASCILITE)* (pp. 255-263). Southern Cross University Press. <https://ro.ecu.edu.au/ecuworks/3209>

Puraram, T., Chaovalit, P., Peethong, A., Tiyanunti, P., Charoensiriwath, S., & Kimpan, W. (2021). Thai food recommendation system using hybrid of particle swarm optimization and k-means algorithm. *Proceedings of the 6th International Conference on Machine Learning Technologies* (pp. 90-95). Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3468891.3468904>

2.5 บทความฉบับพิมพ์ล่วงหน้า (Preprint)

ชื่อผู้แต่ง (ใช้ชื่อสกุลขึ้นก่อน, ตามด้วยอักษรย่อของชื่อต้น, อักษรย่อชื่อรอง (ถ้ามี)). (ปีที่พิมพ์). ชื่อบทความฉบับพิมพ์ล่วงหน้า (ตัวเอียง). ชื่อฐานข้อมูล. DOI (ถ้ามี) หรือ URL (กรณีภาษาไทยให้ใส่ (in Thai)) (หมายเหตุ บทความฉบับพิมพ์ล่วงหน้า หมายถึงบทความที่อาจผ่านการตรวจสอบโดยผู้ทรงคุณวุฒิหรือไม่ก็ได้ หรืออาจเป็นต้นฉบับสุดท้ายของผู้เขียนที่ผ่านการตรวจสอบโดยผู้ทรงคุณวุฒิที่ยอมรับให้ตีพิมพ์)

ตัวอย่าง

Eppel, S. (2017). *Setting an attention region for convolutional neural networks using region selective features, for recognition of materials within glass vessels*. arXiv. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1708.08711>

2.6 วิทยานิพนธ์ที่เผยแพร่ (ไม่อยู่ในฐานข้อมูลเชิงพาณิชย์)

ชื่อผู้แต่ง (ใช้ชื่อสกุลขึ้นก่อน, ตามด้วยอักษรย่อของชื่อต้น, อักษรย่อชื่อรอง (ถ้ามี)). (ปีที่พิมพ์). ชื่อวิทยานิพนธ์ (ตัวเอียง) [ระดับปริญญา, มหาวิทยาลัย]. ชื่อฐานข้อมูล. URL (กรณีภาษาไทยให้ใส่ (in Thai))

ตัวอย่าง

Hamhongs, W. (2023). *Rice leaf disease analysis using pre-trained CNN model* [Master's thesis, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang]. King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang Repository. <https://opac.lib.kmitl.ac.th/catalog/Bibltem.aspx?BibID=b00292423> (in Thai)

2.7 วิทยานิพนธ์ที่เผยแพร่ (อยู่ในฐานข้อมูลเชิงพาณิชย์)

ชื่อผู้แต่ง (ใช้ชื่อสกุลขึ้นก่อน, ตามด้วยอักษรย่อของชื่อต้น, อักษรย่อชื่อรอง (ถ้ามี)). (ปีที่พิมพ์). ชื่อวิทยานิพนธ์ (ตัวเอียง) (หมายเลข UMI) [ระดับปริญญา, มหาวิทยาลัย]. ชื่อฐานข้อมูล. (กรณีภาษาไทยให้ใส่ (in Thai))

ตัวอย่าง

Knight, A. M. (2019). *The impact of project-based learning on critical thinking in high school economics* (Publication No. 27542981) [Doctoral dissertation, University of Southern California]. ProQuest Dissertations and Theses Global.

2.8 วิทยานิพนธ์ที่เผยแพร่ (ไม่ได้ตีพิมพ์เผยแพร่)

ชื่อผู้แต่ง (ใช้ชื่อสกุลขึ้นก่อน, ตามด้วยอักษรย่อของชื่อต้น, อักษรย่อชื่อรอง (ถ้ามี)). (ปีที่พิมพ์). ชื่อวิทยานิพนธ์ (ตัวเอียง) [ไม่ได้ตีพิมพ์ ระดับปริญญา]. มหาวิทยาลัย. (กรณีภาษาไทยให้ใส่ (in Thai))

ตัวอย่าง

Tantisuk, P. (2021). *Factors affecting online purchasing decisions for cosmetic products among consumers in Bangkok* [Unpublished master's thesis]. Chulalongkorn University.

2.9 แหล่งข้อมูลอิเล็กทรอนิกส์

นามสกุลผู้เขียน, อักษรย่อชื่อ. (ปี, เดือน วันที่เผยแพร่). ชื่อเรื่อง (ตัวเอียง). ชื่อเว็บไซต์. URL (กรณีหนังสือภาษาไทยให้ใส่ (in Thai))

*** กรณีที่ไม่มีวันที่เผยแพร่ปรากฏ ให้ใส่ (n.d.)

*** กรณีที่มีปรากฏเฉพาะ ค.ศ. ให้ใส่แค่ (ปี) เท่านั้น

ตัวอย่าง

Fueangfuchat, A. (2024). *Cheese science learning activity*. MTEC.

https://www.mtec.or.th/mat_sci_design_acti/cheese/ (in Thai)

National Institute of Mental Health. (2023, July). *Anxiety disorders*. U.S. Department of Health and Human Services, National Institutes of Health.

<https://www.nimh.nih.gov/health/topics/anxiety-disorders>

Saengyenphan, S. (2023). *10 color matching websites for instantly beautiful designs*.

Naresuan University Press. <https://www.nupress.grad.nu.ac.th/จับคู่สี/> (in Thai)

World Health Organization. (2024, August 7). *The top 10 causes of death*. World Health Organization. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/the-top-10-causes-of-death>

หมายเหตุ

- กรณีไม่ปรากฏปีที่พิมพ์ ให้ใส่ n.d.
- กรณีพิมพ์ครั้งที่ 1 ไม่ต้องระบุครั้งที่พิมพ์
- กรณีไม่ปรากฏสถานที่พิมพ์ ให้ใส่ n.p.

ระยะขอบบน (หัวกระดาษ) ให้เว้น 1.58 นิ้ว หรือ 4.01 เซนติเมตร

ชื่อเรื่องภาษาไทย (ขนาดอักษร 18 ตัวหนา)
ชื่อเรื่องภาษาอังกฤษ (ขนาดอักษร 18 ตัวหนา)

{ เว้น 1 บรรทัด 14 ตัวปกติ

ชื่อผู้วิจัย^{1*} ผู้วิจัยร่วม² ภาษาไทย (ขนาดอักษร 12 ตัวปกติ)

ชื่อผู้วิจัย¹ ผู้วิจัยร่วม² ภาษาอังกฤษ (ขนาดอักษร 12 ตัวปกติ)

¹ที่อยู่หน่วยงานผู้วิจัย ภาษาไทย (ขนาดอักษร 12 ตัวปกติ)

²ที่อยู่หน่วยงานผู้วิจัยร่วม ภาษาไทย (ขนาดอักษร 12 ตัวปกติ)

¹ที่อยู่หน่วยงานผู้วิจัย ภาษาอังกฤษ (ขนาดอักษร 12 ตัวปกติ)

²ที่อยู่หน่วยงานผู้วิจัยร่วม ภาษาอังกฤษ (ขนาดอักษร 12 ตัวปกติ)

วันที่ส่งบทความ : วันที่แก้ไขบทความ : วันที่ตอบรับบทความ : (ขนาดอักษร 12 ตัวปกติ)

Received:, Revised:, Accepted: ภาษาอังกฤษ (ขนาดอักษร 12 ตัวปกติ)

{ เว้น 1 บรรทัด 14 ตัวปกติ

บทคัดย่อ (ขนาดอักษร 16 ตัวหนา)

{ เว้น 1 บรรทัด 14 ตัวปกติ

เว้นเข้า 1 ซม.
ทุกย่อหน้าแรก

เนื้อหา (ขนาดอักษร 14 ตัวปกติ, Thai distributed)

ระยะห่างระหว่าง
บรรทัด 1 เท่า

{ เว้น 1 บรรทัด 14 ตัวปกติ

คำสำคัญ : (ขนาดอักษร 12 ตัวหนา) อักษรภาษาไทย อ่านหนังสือ ชอบมากกว่า (ขนาดอักษร 12 ตัวปกติ)

{ เว้น 1 บรรทัด 14 ตัวปกติ

Abstract (ขนาดอักษร 16 ตัวหนา)

{ เว้น 1 บรรทัด 14 ตัวปกติ

เนื้อหา (ขนาดอักษร 14 ตัวปกติ, Thai distributed)

1.58"

1.58"

ระยะขอบ

ระยะขอบ

ขวากระดาษ

ซ้ายกระดาษ

ให้เว้น 1.58

Keywords: (ขนาดอักษร 12 ตัวหนา) Thai font, Readability, Preferable style, Computer display (ขนาดอักษร 12 ตัวปกติ)

ให้เว้น 1.58

นิ้ว หรือ

{ เว้น 1 บรรทัด 14 ตัวปกติ

นิ้ว หรือ

4.01

1. บทนำ (ขนาดอักษร 16 ตัวหนา)

4.01

เซนติเมตร

เนื้อหา (ขนาดอักษร 14 ตัวปกติ, Thai distributed)

เซนติเมตร

*ที่อยู่ติดต่อ E-mail address: (ขนาดอักษร 12 ตัวปกติ, Thai justify ให้ทำแบบการแทรกเชิงอรรถ (Footnote) มาจากผู้วิจัยหลัก)

เว้นเข้า 1 ซม.
ทุกย่อหน้าแรก

2. วิธีดำเนินการวิจัย (รวมถึงทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง) (ขนาดอักษร 16 ตัวหนา)

2.1 หัวข้อย่อย (ขนาดอักษร 14 ตัวหนา)

เนื้อหา (ขนาดอักษร 14 ตัวปกติ, Thai distributed)

{ เว้น 1 บรรทัด 14 ตัวปกติ

3. ผลการวิจัยและอภิปรายผล (ขนาดอักษร 16 ตัวหนา)

3.1 หัวข้อย่อย (ขนาดอักษร 14 ตัวหนา)

เนื้อหา (ขนาดอักษร 14 ตัวปกติ, Thai distributed)

{ เว้น 1 บรรทัด 14 ตัวปกติ

4. สรุปผลการวิจัย (ขนาดอักษร 16 ตัวหนา)

เนื้อหา (ขนาดอักษร 14 ตัวปกติ, Thai distributed)

{ เว้น 1 บรรทัด 14 ตัวปกติ

กิตติกรรมประกาศ (ถ้ามี) (ขนาดอักษร 16 ตัวหนา)

เนื้อหา (ขนาดอักษร 14 ตัวปกติ, Thai distributed)

{ เว้น 1 บรรทัด 14 ตัวปกติ

เอกสารอ้างอิง (References) (ขนาดอักษร 16 ตัวหนา)

..... (ขนาดอักษร 14 ตัวปกติ, รูปแบบการเขียนเอกสารอ้างอิง (References) เป็นไปตามคู่มือการเขียนบทความของวารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง และจัดเรียงรายการเอกสารอ้างอิงตามลำดับตัวอักษร A-Z).....

จัดตัวอักษรเยื้องกันหน้าลอย (Hanging Indent)
เว้นเข้า 1 ซม.

ตัวอย่าง

Kruekaew, B., & Kimpan, W. (2022). Multi-objective task scheduling optimization for load balancing in cloud computing environment using hybrid artificial bee colony

<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2022.3149955>

<https://doi.org/10.3390/app12020656>

(2021). Thai food recommendation system using hybrid of particle swarm optimization and k-means algorithm. *Proceedings of the 6th International Conference on Machine Learning Technologies* (pp. 90-95). Association for Computing Machinery. <https://doi.org/10.1145/3468891.3468904>

<https://doi.org/10.55003/cast.2024.261218>

ตารางที่ 1. (ขนาดอักษร 12 ตัวหนา) (ชื่อตารางและเนื้อหาในตาราง ใช้อักษรขนาด 12 ตัวปกติ, Thai Distributed)

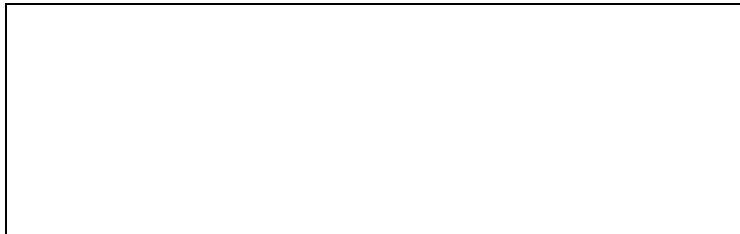
Personnel	Personnel	Personnel	Personnel	Personnel

{ เว้น 1 บรรทัด 14 ตัวปกติ

ปีการศึกษา	ระบบการรับเข้า			รวม
	แอดมิชชั่น	โควตา	รับตรง	
2558	27 (15.4%)	99 (56.6%)	49 (28.0%)	175 (100%)
2559	26 (17.3%)	81 (54.0%)	43 (28.7%)	150 (100%)
2560	30 (22.1%)	58 (42.5%)	48 (35.3%)	136 (100%)
2561	18 (14.9%)	43 (35.5%)	60 (49.6%)	121 (100%)

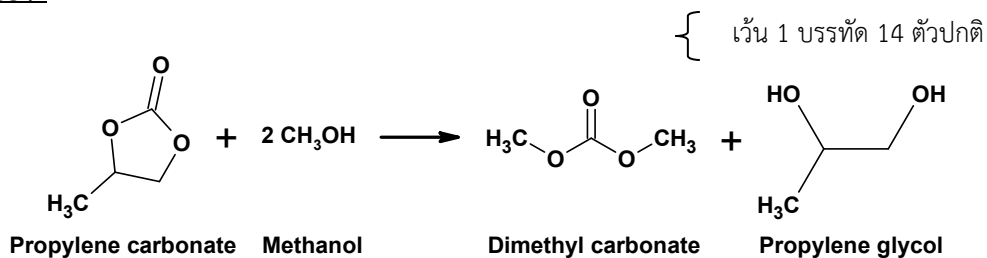
{ เว้น 1 บรรทัด 14 ตัวปกติ

การจัดรูป (ภาพ) ให้จัดวางที่กึ่งกลางของคอลัมน์



รูปที่ 1. (ขนาดอักษร 12 ตัวหนา) (ชื่อรูปและคำบรรยาย ใช้ขนาดอักษร 12 ตัวปกติ, Thai Distributed, ไม่ใส่กรอบ)

ตัวอย่าง



รูปที่ 1. xxxxxxxx

การจัดสมการให้จัดวางที่กึ่งกลางของคอลัมน์

รูปแบบฟอนต์การเขียนสมการแนะนำผู้แต่งใช้ Cambria Math ขนาดสมการ 11 หรือปรับให้ขนาดพอเหมาะสม ตัวของสมการให้จัดวางที่กึ่งกลางของคอลัมน์ และเลขสมการที่ (1) ให้จัดวางชิดขวาสุดของคอลัมน์

ตัวอย่าง

เนื้อหา (ขนาดอักษร 14 ตัวปกติ, Thai distributed)

สมการที่ (1)

$$r^2 = \left(\frac{\sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})(qs_i - \bar{qs})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (q_i - \bar{q})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (qs_i - \bar{qs})^2}} \right)^2 \quad (1)$$

การเขียน ชื่อผู้วิจัย* ผู้วิจัยร่วม (ถ้ามี) ที่อยู่หน่วยงานผู้วิจัย ที่อยู่หน่วยงานผู้วิจัยร่วม (ถ้ามี) ภาษาไทย และภาษาอังกฤษ รวมถึงการใส่ข้อมูล วันที่ส่ง วันที่แก้ไข วันที่ตอบรับ (ใช้ตัวอักษรขนาด 12 ตัวปกติ จัดวางที่กึ่งกลางของคอลัมน์)

กรณีผู้วิจัย และ ผู้วิจัยร่วม ที่อยู่หน่วยงานคนละที่กัน

ตัวอย่าง

พิมพร อ่อนละออ¹ และ กรกช อ่อนละออ^{2*}

Pimporn Onla-or¹ and Korakot Onla-or^{2*}

¹ภาควิชาฟิสิกส์ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ ประเทศไทย

²วิทยาลัยนาโนเทคโนโลยีพระจอมเกล้าลาดกระบัง สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
กรุงเทพฯ ประเทศไทย

¹Department of Physics, School of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Bangkok, Thailand

²College of Nanotechnology, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang, Bangkok, Thailand

วันที่ส่งบทความ : 11 มีนาคม 2567 วันที่แก้ไขบทความ : 11 มีนาคม 2567 วันที่ตอบรับบทความ : 13 เมษายน 2567

Received: 11 March 2024, Revised: 11 March 2024, Accepted: 13 April 2024

กรณีผู้วิจัย และ ผู้วิจัยร่วม ที่อยู่หน่วยงานเดียวกัน

ตัวอย่าง

อัจฉรา แผ้วบาง* และ สายชล สิ้นสมบุญทอง

Achara Phaeobang* and Saichon Sinsomboonthong

ภาควิชาสถิติ คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ ประเทศไทย

Department of Statistics, School of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Bangkok, Thailand

วันที่ส่งบทความ : 20 มกราคม 2567 วันที่แก้ไขบทความ : 18 มีนาคม 2567 วันที่ตอบรับบทความ : 13 เมษายน 2567

Received: 20 January 2024, Revised: 18 March 2024, Accepted: 13 April 2024

ธนภรณ์ ลาพรม ปณิธิตา จันทรพา พรชิตา ชันทอง มณิสรา ค้างาม และ ภิชะก รุ่งโรจน์ชัยพร*

Thanaphron Laphrom Panthita Janpa Ponchita Khuntong Manisara Kome-ngan*

and Pesak Rungrojchaipon

ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง กรุงเทพฯ ประเทศไทย

Department of Chemistry, School of Science, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang,
Bangkok, Thailand

วันที่ส่งบทความ : 7 มกราคม 2567 วันที่แก้ไขบทความ : 14 พฤษภาคม 2567 วันที่ตอบรับบทความ : 22 พฤษภาคม 2567

Received: 7 January 2024, Revised: 14 May 2024, Accepted: 22 May 2024

หมายเหตุ 1) ให้ใส่สัญลักษณ์ดอกจัน (*) ที่ผู้วิจัยหลักเท่านั้น

2) กรณีที่ผู้เขียนสังกัดหน่วยงานที่ไม่ได้อยู่ใน กรุงเทพฯ ให้ใส่ “จ.” ด้วย ตัวอย่างเช่น จ.ภูเก็ต

การใส่ข้อมูล วันที่ส่งบทความ วันที่แก้ไขบทความ วันที่ตอบรับบทความ

วันที่ส่งบทความ กับ วันที่แก้ไขบทความ โดยวันที่ส่งบทความให้ใส่วันที่จากบทความได้ถูกส่งเข้ามาในระบบการจัดการวารสารออนไลน์ (Thai Journals Online: ThaiJO) วันที่แก้ไขบทความให้ใส่วันที่ได้ส่งบทความที่แก้ไขแล้ว (ครั้งสุดท้าย) หลังจากได้รับ e-mail จากหัวหน้ากองบรรณาธิการ และวันที่ตอบรับบทความ จะใส่วันที่จากหัวหน้ากองบรรณาธิการได้ตรวจสอบบทความเป็นที่เรียบร้อยแล้ว พร้อมกับเห็นเหมาะสมที่จะได้รับการเผยแพร่บทความลงในวารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง ซึ่งทั้งหมดนี้ทางวารสารจะเป็นผู้ใส่ข้อมูลวันที่ดังกล่าวไว้ในภายหลัง

การใช้เครื่องหมายทวิภาค (:) หรือ colon

สำหรับวารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง ขอแจ้งแนวทางการใช้เครื่องหมายทวิภาค (:) หรือ colon ประโยคภาษาไทยให้เว้นระยะ 1 วรค ประโยคภาษาอังกฤษให้เขียนติดกับตัวอักษรเลยไม่ต้องเว้นวรรค

ตัวอย่าง

คำสำคัญ :

Keywords:

วันที่ส่งบทความ :

Received:

การจัดสมดุลสายการผลิต : กรณีศึกษา

Assembly Line Balancing: a Case Study