

JOURNAL OF

SCIENCE AND TECHNOLOGY

MAHASARAKHAM UNIVERSITY

Volume 44 Number 5 September - October 2025

ISSN (Print) : 2985-2617
ISSN (Online) : 2985-2625

JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
MAHASARAKHAM UNIVERSITY
INDEXED IN



วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

วัตถุประสงค์

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม จัดทำขึ้นโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเป็นแหล่งเผยแพร่ผลงานทางวิชาการที่มีคุณภาพของนักวิชาการทั้งในและต่างประเทศ โดยเผยแพร่บทความวิจัย (research article) บทความปริทัศน์ (review article) ในสาขาวิชาต่างๆ ได้แก่ คณิตศาสตร์ วิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี วิศวกรรมศาสตร์ เกษตรศาสตร์ แพทยศาสตร์ วิทยาศาสตร์สุขภาพ และสหวิทยาการด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี

เจ้าของ

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
สำนักงานกองบรรณาธิการ
กองส่งเสริมการวิจัยและบริการวิชาการ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ตำบลขามเรียง อำเภอกันทรวิชัย จังหวัดมหาสารคาม 44150
โทรศัพท์ภายใน 1754 โทรศัพท์ 0-4371-9827

ที่ปรึกษา

อธิการบดีมหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ศาสตราจารย์ ดร.วิสุทธิ์ ไบไม่
ศาสตราจารย์ ดร.วิชัย บุญแสง
ศาสตราจารย์ ดร.พีระศักดิ์ ศรีนิเวศน์

บรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.ปรีชา ประเทพา

ผู้ช่วยบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.ไพโรจน์ ประมวล
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ศาสตราจารย์ ดร.ศิริธร ศิริอมพรพรณ
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ศาสตราจารย์ ดร.อนงค์ฤทธิ์ แข็งแรง
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ นายสัตวแพทย์ ดร.วรพล เองวานิช
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ ดร.วัลยา สุทธิชา
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ ดร.อรวิษณุ กุมพล
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมนึก พ่วงพรพิทักษ์
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.ทวีศักดิ์ บุญเกิด
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.ละอศรี เสนาะเมือง
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.ปราณี อานเป็รื่อง
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.นิวัฒน์ เสนาะเมือง
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.วงศา เล้าหศิริวงศ์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.ขวัญใจ กนกเมธากุล
มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ศาสตราจารย์ นายแพทย์ศิริเกษม ศิริลักษณ์
มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
รองศาสตราจารย์ ดร.สุนันท์ สายกระสุน
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ ดร.สุวรรณา บุญยะลีพรรณ
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.ฉันทนา อารมย์ดี
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.บุญจง ขาวสิทธิวงษ์
สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.พรเทพ ถนนแก้ว
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.นฤมล แสงประดับ
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต บุญปก
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์เทอดศักดิ์ คำเหม็ง
มหาวิทยาลัยนครพนม
รองศาสตราจารย์ยืน กูวรรรณ
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ นายสัตวแพทย์ ดร.ณัฐพล ภูมิพันธ์
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นพรัตน์ พุทธกาล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุชา เพียรชนะ
มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสกสรร สุขะเสนา
มหาวิทยาลัยนครสวรรค์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วัลย์พร ทองเจริญบัวงาม
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อลงกรณ์ ละม่อม
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อาจารย์ เกสัชกร ดร.รักษ์จินดา วัฒนาลัย
มหาวิทยาลัยสยาม

เลขานุการ

ผู้อำนวยการกองส่งเสริมการวิจัยและบริการวิชาการ

ผู้ช่วยเลขานุการ

פקตรีวิไล จันทร์ลอย
จิรารัตน์ ภูสิษฐ์

กำหนดเผยแพร่

ปีละ 6 ฉบับ
ฉบับที่ 1 มกราคม-กุมภาพันธ์
ฉบับที่ 2 มีนาคม-เมษายน
ฉบับที่ 3 พฤษภาคม-มิถุนายน
ฉบับที่ 4 กรกฎาคม-สิงหาคม
ฉบับที่ 5 กันยายน-ตุลาคม
ฉบับที่ 6 พฤศจิกายน-ธันวาคม

บทความและความคิดเห็นในวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม เป็นความคิดเห็นของผู้เขียน กองบรรณาธิการไม่จำเป็นต้องเห็นด้วยเสมอไป และบทความในวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สงวนสิทธิ์ตามกฎหมายไทย การจะนำไปเผยแพร่ต้องได้รับอนุญาตเป็นลายลักษณ์อักษรจากกองบรรณาธิการเท่านั้น

บทบรรณาธิการ

“ผักกระฉูด: พืชพื้นถิ่นที่รอการทบทวนคุณค่าใหม่”

ในบรรดาพืชพื้นบ้านของไทย “ผักกระฉูด” หรือที่บางถิ่นเรียกว่า “ผักกระเฉดบก” จะเป็นพืชที่ถูกมองข้ามและตีค่าว่าเป็นเพียงวัชพืชไร้ประโยชน์มานาน ทั้งที่แท้จริงแล้วผักชนิดนี้มีความน่าสนใจในหลายมิติ ทั้งทางนิเวศวิทยา พฤกษศาสตร์ และเศรษฐกิจชุมชน

ผักกระฉูด (*Neptunia javanica* Miq.) เป็นพืชในวงศ์ Leguminosae ซึ่งมีความใกล้เคียงทางสัณฐานวิทยากับผักกระเฉด (*Neptunia oleracea* Lour.) อย่างมาก ความแตกต่างสำคัญอยู่ที่ผักกระฉูดไม่มีเนื้อเยื่อฟองน้ำสีขาวหรือ “นมผักกระเฉด” ที่ช่วยให้ลอยน้ำได้ ผักกระฉูดจึงเป็นพืชที่เติบโตบนบกได้ดี พบทั่วไปในภูมิภาคอินโดจีน อินโดนีเซีย และเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ รวมถึงทุกภาคของประเทศไทย โดยสามารถปรับตัวได้ทั้งในพื้นที่แห้งแล้งและชื้นแฉะ

แม้ผักกระฉูดจะรับประทานได้เช่นเดียวกับผักกระเฉด แต่กลับไม่เป็นที่นิยมในหมู่ผู้บริโภค เนื่องจากยอดอ่อนมีลักษณะเหนียว เคี้ยวยาก และให้ผลผลิตที่ต้องเลือกเก็บเฉพาะส่วนยอดอ่อนเท่านั้น อย่างไรก็ตาม พืชชนิดนี้ยังมีคุณค่าทางอาหารพื้นฐานและสรรพคุณที่เริ่มได้รับการกล่าวถึงในวงการแพทย์พื้นบ้านและผลิตภัณฑ์สมุนไพรสมัยใหม่ เช่น การบำรุงสมรรถภาพทางเพศ การกระชับกล้ามเนื้อเรียบ และคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระบางประการ

สิ่งที่น่ากังวลคือ ผักกระฉูดกำลังเผชิญชะตากรรมที่น่าสนใจอย่างย้อนแย้ง กล่าวคือ จากพืชที่เคยขึ้นเองทั่วไปตามธรรมชาติ กลับถูกมองว่าเป็นวัชพืชที่ควรกำจัด เพราะการเลื้อยปกคลุมของมันสามารถทำลายพืชเศรษฐกิจอื่น ๆ ได้ง่าย ส่งผลให้มีการทำลายอย่างกว้างขวางจนมีแนวโน้มจะสูญหายจากระบบนิเวศบางพื้นที่ ขณะเดียวกันกลับมีผลิตภัณฑ์จากผักกระฉูดในรูปแบบแคปซูลและอาหารเสริมวางจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ โดยใช้คุณค่าทางสมุนไพรเป็นจุดขาย

สถานการณ์ดังกล่าวสะท้อนให้เห็นถึง “ช่องว่างทางความรู้” ระหว่างภูมิปัญญาท้องถิ่นกับกระแสวิทยาศาสตร์สมัยใหม่ ซึ่งอาจนำไปสู่การตีความและใช้ประโยชน์จากพืชพื้นบ้านอย่างไม่รอบด้าน วารสารของเรา ผู้เป็นส่วนหนึ่งของแวดวงวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี จึงเล็งเห็นว่าถึงเวลาอันเหมาะสมในการหันกลับมาศึกษาผักกระฉูดอย่างเป็นระบบ ทั้งในด้านอนุกรมวิธาน สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ ความเป็นพิษ รวมถึงบทบาททางนิเวศ เพื่อสร้างองค์ความรู้ใหม่ที่ยืนยันคุณค่าแท้จริงของพืชชนิดนี้

บางที “ผักกระฉูด” อาจไม่ได้เป็นเพียงวัชพืชที่น่ากำจัด หากแต่เป็น “ทรัพยากรชีวภาพที่รอการฟื้นคุณค่า” ซึ่งควรได้รับการอนุรักษ์ ศึกษา และพัฒนาอย่างมีวิจารณญาณ เพื่อสะท้อนให้เห็นว่าความหลากหลายทางชีวภาพของไทยยังคงซ่อนศักยภาพอันยิ่งใหญ่ รอเพียงสายตาแห่งวิทยาศาสตร์ที่จะมองเห็นได้อย่างลึกซึ้งยิ่งขึ้นต่อไป

รองศาสตราจารย์ ดร.วิไลยา สุทธิขำ

ผู้ช่วยบรรณาธิการ

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

สารบัญ

Agricultural Science

- การพัฒนาผลิตภัณฑ์ซึ่งต้องกวนผสมผักสำหรับไส้ขนมปัง 415
Development of pickled ginger paste mixed with vegetables for bread fillings
วิภา ประพินอักษร และนันทา เป็งเนต
Wipa Prapinagsorn and Nantha Pengnet
- ผลของการจัดการปุ๋ยชีวภาพต่อการผลิตข้าวโพดหวานในระบบอินทรีย์ 427
Effect of bio-fertilizer management on sweet corn production in an organic system
ฉัตรปวีณ์ เดชจิวรัตนสิริ, ศรัณย์ จันทร์วงศ์ และจิราภรณ์ อินทสาร
Chatprawee Dechjiraratthanasiri, Sarun Junwong and Jiraporn Inthasan

Chemistry

- การประยุกต์ใช้เซลลูโลสฟอสเฟตจากขานอ้อยสำหรับการดูดซับเหล็ก 435
Application of cellulose phosphate from bagasse for iron adsorption of iron metals
วิยารัตน์ กุมุทานาต, ศักดิ์ชัย หงษ์ทอง และปรัชญา วาทะสิทธิ์
Wiyarat Kumutanat, Sakchai Hongthong and Prachya Watasit
- คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไฮโดรเจลธรรมชาติจากขานอ้อยสำหรับชะลอการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรีย: อิทธิพลของกรดที่ใช้เชื่อมขวาง 446
Natural carboxymethyl cellulose hydrogel from bagasse for slow-release urea fertilizers: Effect of crosslinking acids
ปรัชญา วาทะสิทธิ์ และวิยารัตน์ กุมุทานาต
Prachya Watasit and Wiyarat Kumutanat

Computer and Information Technology

- การทำนายการระบาดของไข้เลือดออกโดยใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ร่วมกับการเรียนรู้ของเครื่อง: กรณีศึกษาอำเภอเมืองพะเยา จังหวัดพะเยา 457
Dengue outbreak prediction using geographic information system and machine learning:
A case study of Mueang Phayao District, Phayao Province
เสถียร หันตา, พันธิตรา ลือชา และจิราพัชร บุญสูง
Sathien Hunta, Phanthitra Luecha and Jirapad Boonsoong
- ตัวแบบพยากรณ์การตรวจจับข่าวปลอมด้วยเทคนิคการเรียนรู้แบบรวมกลุ่ม 471
A predictive model for fake news detection using ensemble learning techniques
ธงชัย แก้วกิริยา และกาญจนา ศิลาวราเวทย์
Thongchai Kaewkiriya and Kanchana Silawarawet

Engineering

- การเปลี่ยนแปลงแนวชายฝั่งจากการถ่ายเททรายข้ามปากร่องน้ำปะนาเระ จังหวัดปัตตานี 479
Shoreline change due to sand bypassing at Panare River mouth, Pattani Province
สีลาวดี หมอดี และสมปรารถนา ฤทธิ์พริ้ง
Seelawadee Mordee and Sompratana Ritphring
- การประเมินและวิธีการแก้ปัญหาแรงดันเหนี่ยวนำที่เปลือกของเคเบิลใต้ดินที่มีความยาวมากสำหรับวงจรเดียวในระบบแรงดันปานกลาง 490
Evaluation and solutions for induced voltage on the sheath of long underground cables
in single-circuit medium voltage systems
บัณฑิต ฤทธิ์ทอง
Bundit Rittong
- การพัฒนาอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนสำหรับงานท่ออลูมิเนียม 497
Development of a friction stir welding apparatus for aluminum pipe work
วรพงศ์ บุญช่วยแทน, ต่วนฮาร์ฟิตรี ตวนดิง และชัยนุลาอาบีดีน เจ๊ะแอ
Worapong Boonchouytan, Tuanhaft Tuanding and Sainul-Abeedeen Chea-Ea
- การออกแบบ ประเมินสมรรถนะ และ ความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ ของเครื่องสับกระถินสำหรับใช้เป็นอาหารของโคเนื้อ 507
Design, performance evaluation, and economic feasibility of a river tamarind
(Leucaena leucocephala (Lam.) de Wit) shredder for use as cattle feed
ณัฐวุฒิ พลศรี, พิศาล สมบัติวงศ์ และกนกกาญจน์ จิรศิริเลิศ
Natawut Ponsri, Pisarn Sombatwong and Ganokgarn Jirasirilerd

การพัฒนาผลิตภัณฑ์ขิงดองกวนผสมผักสำหรับไส้ขนมปัง

Development of pickled ginger paste mixed with vegetables for bread fillings

วิภา ประพินอักษร¹ และ นันทา เป็งเนตรี^{1*}

Wipa Prapinagsorn¹ and Nantha Pengnet^{1*}

Received: 1 September 2024 ; Revised: 11 October 2024 : Accepted: 1 November 2024

บทคัดย่อ

บริษัทวังทองผลพืช จำกัด มีกำลังการผลิตขิงอ่อนดอง 2,000 ตันต่อปี โดยปัญหาจากการผลิตพบว่าเศษขิงจากการตัดแต่งหลังดองคิดเป็นร้อยละ 5-10 ของปริมาณขิงดองทั้งหมด ผู้ประกอบการจึงมีแนวคิดนำเศษขิงดองมาเพิ่มมูลค่าโดยแปรรูปเป็นไส้ขนมปัง งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาชนิดของผักที่เหมาะสมต่อการผลิตขิงดองกวนผสมผัก ศึกษาสัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างขิงดองกับผักหอมผสมมันเทศสีม่วง (อัตราส่วน 3:1) โดยใช้ปริมาณขิงดองร้อยละ 35 40 45 50 และ 55 และของผักหอมผสมมันเทศสีม่วง ร้อยละ 25 30 35 40 และ 45 ของส่วนผสมทั้งหมด ศึกษาคุณภาพผลิตภัณฑ์ขิงดองกวนผสมผักและวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ผลการศึกษาพบว่าชนิดของผักมีผลต่อค่า $L^* a^* b^*$ ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด และค่าความชื้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) คุณภาพด้านประสาทสัมผัสพบว่าผู้บริโภคยอมรับขิงดองกวนผสมมันเทศสีม่วงมากที่สุด ค่าคะแนนความชอบด้านสี เนื้อสัมผัส รสชาติ และความชอบโดยรวมมีค่าเท่ากับ 7.61 7.55 7.17 และ 7.10 ตามลำดับ สูตรที่ได้รับการยอมรับมากที่สุดคือ ขิงดองร้อยละ 40 และผักหอมผสมมันเทศสีม่วงร้อยละ 40 ผลิตภัณฑ์ขิงดองกวนผสมผักมีคุณภาพตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนผักและผลไม้กวน (35/2558) มีโปรตีน เส้นใย ไขมันและคาร์โบไฮเดรต เท่ากับ 1.90 15.17 4.14 และ 31.15 กรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการนำเศษขิงดองมาใช้เป็นผลิตภัณฑ์ที่ดีต่อสุขภาพ

คำสำคัญ: ขิงดองกวน, ขิงดอง, ไส้ขนมปัง

Abstract

The Wang Thong Agri-Products Co., Ltd. has a production capacity of 2,000 tons of pickled ginger per year, and the production problem was that the ginger residue from pickling trimming accounts for 5-10% of the total pickled ginger. Therefore, entrepreneurs have the idea of using pickled ginger scraps to increase their value by processing them into bread fillings. This research aimed to study the types of vegetables suitable for producing pickled ginger paste stirred with vegetables. The appropriate ratio between pickled ginger and taro mixed with purple sweet potato (ratio 3:1) was studied using the content of pickled ginger 35, 40, 45, 50, and 55 percent of the taro mixed with purple sweet potato—25, 30, 35, 40 and 45 percent of the total ingredients. Study the quality of pickled ginger products, stir the vegetable mixture, and analyze the chemical composition. The results showed that the type of vegetable had a statistically significant effect on $L^* a^* b^*$, total dissolved solids content, and moisture value ($p \leq 0.05$). The 40% pickled ginger and 40% taro mixed with purple sweet potato was the most accepted. The analysis of the quality of ginger paste products showed that the product was safe according to the standards of the stirred fruit and vegetable community product (35/2015). The chemical quality of the pickled ginger paste product stirred with vegetables was found to contain protein, fiber, fat, and carbohydrates at 1.90 g, 15.17 g, 4.14 g, and 31.15 g per 100 g, respectively. This research shows the potential to use pickled ginger scraps as a healthy product.

Keywords: Pickled ginger paste, pickled ginger, bread filling

¹ อาจารย์, คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์ อำเภอเมือง จังหวัดอุตรดิตถ์ 53000

¹ Lecturer, Faculty of Agriculture, Uttaradit Rajabhat University, Muang District, Uttaradit 53000, Thailand.

* Corresponding author: nantha.pen@uru.ac.th

บทนำ

ขิง (*Zingiber officinale* Roscoe) เป็นพืชสมุนไพรที่ปลูกได้ทั่วทุกภาคของประเทศไทย ส่วนของเหง้าขิงนำมาใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ ได้แก่ การปรุงอาหาร เป็นเครื่องเทศ เครื่องดื่ม เครื่องสำอาง และด้านสมุนไพรที่อยู่ในรูปขิงสด ขิงแห้ง ขิงผง ขิงดอง และน้ำมันขิง ประเทศไทยมีการผลิตขิงอ่อนร้อยละ 65 ซึ่งผลิตได้ปริมาณมากกว่าขิงแก่ (ร้อยละ 35) รวมทั้งมีสัดส่วนของการบริโภคขิงอ่อนสูงกว่าในรูปแบบของการดองและรับประทานสด (วทันยา ลิ้มปพยอม และคณะ, 2557) บริษัทวังทองผลพืช จำกัด จังหวัดพิษณุโลก ดำเนินการผลิตขิงดองเค็มและขิงดองปรุงรส โดยมีกำลังการผลิตขิงดองประมาณ 2,000 ตันต่อปี กระบวนการแปรรูปขิงดองของบริษัทเริ่มจากการนำขิงสดมาทำความสะอาดด้วยเครื่องล้าง นำขิงไปทำการดองในบ่อซีเมนต์ ประมาณ 20 วัน หลังจากนั้นนำขิงดองเข้าเครื่องหมุนปอกเปลือกและตัดแต่งด้วยแรงงานคนโดยใช้มีดตัดแต่ง ขิงดองที่ผ่านการตัดแต่งแล้วนำไปบรรจุจำหน่ายหรือนำไปผลิตเป็นขิงดองปรุงรสต่อไป อย่างไรก็ตาม ปัญหาที่พบในกระบวนการแปรรูปขิงดองคือมีเศษขิงดองที่เหลือจากการตัดแต่งหลังการดอง คิดเป็นร้อยละ 5-10 ของปริมาณขิงดองทั้งหมด ซึ่งเศษขิงดองจากการตัดแต่งหลังดองจะมีน้ำหนักไม่เกิน 5 กรัมต่อชิ้น ทางบริษัทไม่สามารถจำหน่ายเศษขิงดองเหล่านี้ให้กับลูกค้าได้ และปัจจุบันยังไม่มี การนำเศษขิงดองไปใช้ประโยชน์ในเชิงพาณิชย์ สำหรับการนำเศษขิงดองไปใช้ประโยชน์จากเศษขิงดองมีงานวิจัยก่อนหน้านี้มีการนำเศษขิงดองไปใช้เป็นอาหารสัตว์แต่ยังไม่พบมีการนำมาผลิตเป็นผลิตภัณฑ์อาหาร อย่างไรก็ตามขิงเป็นสมุนไพรที่ประกอบด้วยสาร *zingiberene* มีฤทธิ์ช่วยในการย่อยอาหาร บรรเทาอาการผิดปกติของระบบทางเดินอาหาร สารสกัดขิงสามารถฆ่าเชื้อ *Helicobacter pylori* ซึ่งเป็นสาเหตุของโรคแผลในกระเพาะอาหาร อีกทั้งยังมีสรรพคุณในการลดการอักเสบ ลดระดับน้ำตาลและไขมันในเลือด ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการเรียนรู้และความจดจำ ช่วยชะลอความชราและต้านอนุมูลอิสระ (Leal *et al.*, 2003; วทันยา ลิ้มปพยอม และคณะ, 2557) มีรายงานวิจัยพบว่า ขิงแก่มีปริมาณสารพอลิฟีนอลทั้งหมดสูงกว่าขิงอ่อนแต่ประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระของขิงอ่อนและขิงแก่ไม่แตกต่างกัน (Malipan, 2006) ขิงเป็นเครื่องเทศที่สำคัญในการรักษาโรคและช่วยยกระดับรสชาติของอาหารด้วยสารระเหยที่มีในขิง (Shivakumar, 2019; Spence, 2023) ดังนั้นด้วยคุณประโยชน์ของขิงดังกล่าวและความต้องการอาหารเพื่อสุขภาพเพิ่มขึ้น การนำเศษขิงอ่อนดองที่เหลือจากกระบวนการผลิตมาแปรรูปเป็นขิงดองกวนผสมผักสำหรับใช้เป็นไส้ขนมจะช่วยเพิ่มโอกาสในการบริโภคผลิตภัณฑ์จากขิงมากขึ้น

ไส้ขนมเป็นผลิตภัณฑ์อาหารที่ใช้สำหรับสอดไส้ขนมปัง ขนมพาย ขนมปังเวเฟอร์ ซึ่งไส้ขนมที่มักนิยมผลิตคือ ไส้ผลไม้ ไส้คัสตาร์ด ไส้ครีม ไส้ไก่ และไส้เนื้อ เป็นต้น (สุทธาทิพย์ สกุลพรหมณ์ และคณะ, 2566) ปัจจุบันพบว่าผู้บริโภคและผู้ผลิตเบเกอรี่นิยมใช้ผลิตภัณฑ์ไส้ขนมสำเร็จรูปมากขึ้นเนื่องจากสะดวกในการนำไปใช้โดยเฉพาะไส้ขนมจากผักและผลไม้กวนเนื่องจากมีรสชาติอร่อยรับประทานง่ายมีคุณค่าทางโภชนาการและมีประโยชน์ต่อสุขภาพ อย่างไรก็ตามการผลิตไส้ขนมสำเร็จรูปที่จำหน่ายในท้องตลาดส่วนใหญ่จะผลิตจากถั่วแดง ถั่วทอง ถั่วดำ เผือก งาดำ ไข่แดงและมันม่วง ซึ่งจากการศึกษางานวิจัยที่ผ่านมายังไม่พบว่ามีกรรมวิธีนำขิงดองมาผลิตเป็นไส้ขนมสำหรับผลิตภัณฑ์ขนมอบต่าง ๆ อาจเนื่องจากขิงเป็นพืชสมุนไพรที่มีกลิ่นหอมฉุนเฉพาะตัวและมีรสเผ็ด จึงนิยมบริโภคในรูปขิงดองมากกว่า อย่างไรก็ตามทางโรงงานได้นำเศษขิงดองมาทดลองผลิตเป็นขิงดองกวน โดยใช้ขิงดองผสมกับแยมสับปะรดและน้ำตาลทราย พบว่าขิงดองกวนที่ใช้ปริมาณขิงดองร้อยละ 40 ให้กลิ่นและรสเผ็ดของขิงกำลังดีแต่คุณภาพทางด้านประสาทสัมผัสอื่น ๆ ยังไม่เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาชนิดของผักที่เหมาะสมในการผลิตขิงดองกวนผสมผักเพื่อให้รับประทานได้ง่ายขึ้น โดยทางโรงงานมีความต้องการนำผักทั้งสามชนิด ได้แก่ ถั่วแดง เผือกเขียว และมันเทศสีม่วง มาใช้เป็นส่วนผสมในการผลิตขิงดองกวน ซึ่งผักทั้งสามชนิดนิยมนำมาใช้เป็นส่วนผสมสำหรับทำไส้ขนมต่าง ๆ เช่น ขนมปัง และขนมเปียก ประกอบกับผักทั้งสามชนิดสามารถหาซื้อได้ง่าย ราคาไม่แพง และมีประโยชน์ทางคุณค่าทางโภชนาการ ศึกษาสัดส่วนระหว่างขิงดองกับเผือกหอมผสมมันเทศสีม่วงที่เหมาะสมในการผลิตขิงดองกวนผสมผัก และศึกษาคุณภาพของผลิตภัณฑ์ขิงดองกวนผสมผักที่ได้ โดยผลที่ได้จากการวิจัยครั้งนี้ผู้ประกอบการบริษัทวังทองผลพืช จำกัด สามารถนำสูตรและกระบวนการผลิตขิงดองกวนผสมผักไปใช้สำหรับการผลิตและจำหน่ายได้ เป็นการเพิ่มมูลค่าให้กับเศษขิงดองที่ไม่สามารถขายได้ อีกทั้งช่วยลดค่าใช้จ่ายในส่วนของจัดการของเหลือทิ้งที่เกิดจากกระบวนการผลิต

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

- 1) เพื่อศึกษาชนิดของผักที่เหมาะสมในการผลิตขิงดองกวนผสมผัก
- 2) ศึกษาสัดส่วนระหว่างขิงดองกับเผือกหอมผสมมันเทศสีม่วงในการผลิตขิงดองกวนผสมผัก และ
- 3) ศึกษาคุณภาพของขิงดองกวนผสมผัก

วิธีการวิจัย

1. การศึกษาชนิดของผักที่เหมาะสมในการผลิตซิงตองกวนผสมผัก

1.1 การเตรียมซิงตอง นำเศษซิงตองจากบริษัทวังทองผลพืช จำกัด จังหวัดพิษณุโลก ที่มีน้ำหนักไม่เกิน 5 กรัม มาล้างด้วยน้ำสะอาดเพื่อกำจัดเกลือออกและนำซิงตองมาแช่ในน้ำสะอาดโดยมีอัตราส่วนของซิงตองต่อน้ำสะอาดเป็น 1 ต่อ 4 (น้ำหนักต่อน้ำหนัก) ทำการเปลี่ยนน้ำแช่ซิงตองทุก 1 ชั่วโมง เป็นเวลา 2 ชั่วโมง นำไปต้มที่อุณหภูมิ 80-90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และปล่อยให้เย็น ทำการสุมตัวอย่างซิงตองมาบดละเอียดด้วยเครื่องปั่นอเนกประสงค์ (Philips รุ่น HR 2115) และกรองส่วนที่เป็นของเหลวมาทำการวัดค่าความเค็มด้วยเครื่องวัดความเค็มอาหาร (Food salinity meter) กำหนดค่าความเค็มไม่เกินร้อยละ 3 จากนั้นนำซิงตองมาบดให้ละเอียดด้วยเครื่องปั่นอเนกประสงค์ นำซิงตองที่บดละเอียดบรรจุในถุงพลาสติกชนิด HDPE เก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส ก่อนนำไปใช้ในการทดลอง

1.2 การเตรียมส่วนผสมที่เป็นผักประกอบด้วย ผือกหอม ถั่วแดง พักเขียว และมันเทศสีม่วง โดยซื้อจากร้านค้าในตลาดสด อำเภอเมือง จังหวัดอุตรดิตถ์ นำมาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำประปาเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่ติดมากับเปลือก ดำเนินการเตรียมส่วนผสม ดังนี้

1.2.1 ผือกหอมและมันเทศสีม่วง โดยนำมาหั่นลดขนาดแบ่งออกเป็น 4 ส่วนตามขนาดของหัว และนำมาหนึ่งที่อุณหภูมิน้ำเดือด เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทำการปอกเปลือกและบดให้ละเอียดด้วยเครื่องปั่นอเนกประสงค์ (Philips รุ่น HR 2115) บรรจุในถุงพลาสติกชนิด HDPE เก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส ก่อนนำไปใช้ในการทดลอง

1.2.2 ถั่วแดง นำถั่วแดงมาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำประปาเพื่อกำจัดสิ่งสกปรก จากนั้นแช่น้ำโดยมีอัตราส่วนระหว่างถั่วแดงต่อน้ำสะอาดเป็น 1 ต่อ 2 (น้ำหนักต่อน้ำหนัก) เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ทำการล้างด้วยน้ำสะอาดอีก 1 รอบ นำไปต้มที่อุณหภูมิ 80-90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง พักให้เย็นและนำถั่วแดงทั้งหมดมาบดให้ละเอียดด้วยเครื่องปั่นอเนกประสงค์ (Philips รุ่น HR 2115) บรรจุในถุงพลาสติกชนิด HDPE เก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส ก่อนนำไปใช้ในการทดลอง

1.2.3 พักเขียว นำมาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำประปาเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกที่ติดมากับเปลือก ทำการปอกเปลือกและหั่นลดขนาดพักเขียวเป็นชิ้นเล็ก จากนั้นบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบดอเนกประสงค์ (Philips รุ่น HR 2115)

นำเนื้อพักเขียวมาต้มให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80-90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 นาที พักให้เย็นและบรรจุในถุงพลาสติกชนิด HDPE เก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส ก่อนนำไปใช้ในการทดลอง

1.3 การผลิตซิงตองกวนผสมผัก

โดยใช้ซิงตองร้อยละ 40 (ของส่วนผสมทั้งหมด) โดยอ้างอิงจากสูตรพื้นฐานของบริษัทวังทองผลพืช จำกัด วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized design, CRD) โดยทำการแปรผันชนิดของ ถั่วแดง พักเขียว และมันเทศสีม่วง ดังแสดงใน Table 1 ทำการทดลอง 3 ซ้ำ โดยการชั่งส่วนผสมทั้งหมดตามสูตร

Table 1 The ingredients to produce pickled ginger paste with various vegetable

Ingredient (%)	Treatment 1	Treatment 2	Treatment 3
Pickled ginger *	40	40	40
Taro	30	30	30
Red bean	10	-	-
Wax Gourd	-	10	-
Purple Potatoes	-	-	10
Coconut milk	10	10	10
Sugar	10	10	10
Total (%)	100	100	100

Note: * The amount of pickled ginger in the production of pickled ginger paste according to Wang Thong Agri-Products Co., Ltd

นำมาใส่กระทะกวนโดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60-65 องศาเซลเซียส กวนนาน 5 นาที จากนั้นเติมน้ำตาลทรายและกวนให้เป็นเนื้อเดียวกันโดยปรับเพิ่มอุณหภูมิของการกวนเป็น 75 องศาเซลเซียส กวนนาน 15 นาที และปรับลดระดับอุณหภูมิของการกวนเป็น 55-60 องศาเซลเซียส ทำการกวนต่อเนื่องจนได้อเนกประสงค์ของซิงตองกวนผสมผักเป็นเนื้อเดียวกันและเนื้อซิงตองกวนผสมผักไม่ติดกระทะ จากนั้นยกลงจากเตาเพื่อให้ซิงตองกวนผสมผักมีอุณหภูมิต่ำกว่า 45 องศาเซลเซียส บรรจุใส่ถุงพลาสติกปิดผนึกแบบสุญญากาศ และเก็บรักษาที่อุณหภูมิแช่เย็น

1.4 การวิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์ซิงตองกวนผสมผัก

1.4.1 ค่าสี วิเคราะห์ด้วยเครื่องวัดสี ยี่ห้อ Hunter Lab รุ่น Colour Flex Miniscan XE plus แสดงผลค่าที่วัดในระบบ CIE ได้แก่ ค่า L* (L* คือ ค่าแสดงความสว่างของสี มีค่า 0 ถึง 100 โดย 0 หมายถึง ความสว่างสีดำ และ

100 ความสว่างสีขาว) ค่า a^* (a^* คือ ค่าแสดงความเป็นสีแดง และสีเขียว เครื่องหมาย + หมายถึง สีแดง และเครื่องหมาย - หมายถึง สีเขียว) และค่า b^* (b^* คือ ค่าแสดงความเป็นสีเหลืองและน้ำเงิน เครื่องหมาย + หมายถึง สีเหลือง และเครื่องหมาย - หมายถึง สีน้ำเงิน)

1.4.2 วิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัส ด้วยเครื่อง Texture Analyzer ยี่ห้อ Stable Systems รุ่น TA.XT. plus ใช้หัววัดแบบ cylinder probe P/2 กดลงบนตัวอย่าง 40 % ของความสูงเริ่มต้น ด้วยความเร็ว 0.3 มิลลิเมตรต่อวินาที บันทึกค่าแรงที่วัดได้ ระยะเวลาการกดต่างๆ รายงานค่าเป็นค่าความแข็ง (Hardness) ความสามารถในการเกาะยึด (Cohesiveness) และค่าความเหนียว (Gumminess)

1.4.3 วิเคราะห์คุณภาพทางด้านเคมี ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ด้วยเครื่องวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH meter) ยี่ห้อ SI Analytics รุ่น Lab 850 ประเทศเยอรมัน ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ (Total soluble solids; TSSs) ด้วยเครื่องรีแฟรคโทมิเตอร์ (Refractometer) ยี่ห้อ Atago รุ่น PAL-1 ประเทศญี่ปุ่น การเตรียมตัวอย่างโดยชั่งน้ำหนักตัวอย่าง 5 กรัม เติมน้ำกลั่นที่ปราศจากไอออน 50 กรัม คนให้ละลายเข้ากัน นำสารละลายไปวัด pH และ TSSs ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ (Titratable acidity) (AOAC, 2000) และปริมาณความชื้น (AOAC, 2000)

1.4.4 การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสโดยการทดสอบค่าความชอบ 9 ระดับ (9-point hedonic scale) โดยมีค่าระดับคะแนนตั้งแต่ 1-9 (1 = ไม่ชอบมากที่สุด ถึง 9 = ชอบมากที่สุด) ประเมินคุณลักษณะ ได้แก่ สี กลิ่นรส เนื้อสัมผัส รสชาติ และความชอบโดยรวม โดยใช้ผู้ทดสอบชิมที่ไม่ผ่านการฝึกฝน จำนวน 30 คน ช่วงอายุระหว่าง 20-65 ปี วางแผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design, RCBD) การทดลองนี้ผ่านการรับรองจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ ตามเลขที่การรับรอง URU-REC 056/65

1.4.5 วิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าสังเกตด้วยวิธี ANOVA เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's new multiple-range Test (DMRT) และกำหนดระดับความเชื่อมั่นทางสถิติที่ระดับ 95 เปอร์เซ็นต์โดยใช้โปรแกรมสถิติสำเร็จรูป

2. การศึกษาสัดส่วนระหว่างขิงดองกับเผือกหอมผสมมันเทศสีม่วงที่เหมาะสมในการผลิตขิงดองกวนผสมผัก

ในการศึกษานี้ได้คัดเลือกสูตรที่เหมาะสมจากการทดลองในข้อ 1 มาทำการศึกษาสัดส่วนระหว่างขิงดองที่ระดับ

ร้อยละ 35 40 45 50 และ 55 ของส่วนผสมทั้งหมด กับเผือกหอมผสมมันเทศสีม่วง (ใช้อัตราส่วนเผือกหอม 3 ส่วนผสมกับมันเทศสีม่วง 1 ส่วน) ร้อยละ 25 30 35 40 และ 45 ของส่วนผสมทั้งหมด (Table 2) วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely randomized design, CRD) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ วิเคราะห์คุณภาพของขิงดองกวนผสมผักทางด้านกายภาพเคมี (ตามข้อ 1.4) และประเมินคุณภาพทางด้านประสาทสัมผัสโดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design, RCBD) โดยวิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าสังเกตด้วยวิธี ANOVA เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's new multiple-range Test (DMRT) และกำหนดระดับความเชื่อมั่นทางสถิติที่ระดับ 95 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้โปรแกรมสถิติสำเร็จรูป

3. การวิเคราะห์คุณภาพของผลิตภัณฑ์ขิงดองกวนผสมผัก

นำผลิตภัณฑ์ขิงดองกวนผสมผักที่มีสัดส่วนระหว่างขิงดองกับเผือกหอมผสมมันเทศสีม่วงเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคมากที่สุดจากการทดลองในข้อ 2 มาวิเคราะห์คุณภาพตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนผักและผลไม้กวน (35/2558) โดยวิเคราะห์คุณภาพ ได้แก่ ค่าวอเตอร์แอคทิวิตีด้วยเครื่อง Water Activity (Aqua Lab, 3TE, USA) ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด ปริมาณยีสต์และรา และเชื้อเอสเชอริเชียโคไล (*E.coli*) (U.S. Food and Drug Administration, 2001a, 2001b, 2002)

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ขิงดองกวนผสมผัก ได้แก่ โปรตีน ไขมัน เส้นใย และคาร์โบไฮเดรต ตามวิธีการของ AOAC (2000) ทำการทดลอง 3 ซ้ำและวิเคราะห์ผลโดยใช้โปรแกรมสถิติสำเร็จรูป

Table 2 The percentage of pickled ginger and taro mixed with purple potatoes in the pickled ginger paste product

Treatment	Pickled ginger (%)	Taro mixed with purple potato (%)
1	35	45
2	40	40
3	45	35
4	50	30
5	55	25

ผลการทดลองและอภิปรายผล

1. ชนิดของผักที่เหมาะสมในการผลิตซิงดองกวนผสมผัก

ผลการศึกษานิตของผักที่เหมาะสมในการผลิตซิงดองกวนผสมผักมีคุณภาพทางด้านกายภาพ ได้แก่ ค่าสี L^* a^* b^* และค่าเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ซิงดองกวนผสมผักจำนวน 3 สูตร ได้แก่ ถั่วแดง (สูตรที่ 1) พริกเขียว (สูตรที่ 2) และมันเทศสีม่วง (สูตรที่ 3) พบว่าชนิดของผักส่งผลต่อค่า L^* a^* และ b^* ของซิงดองกวนผสมผักอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยซิงดองกวนผสมผักสูตรที่ 2 มีค่า L^* สูงสุดเท่ากับ 55.77 รองลงมา คือ สูตรที่ 1 และสูตรที่ 3 เท่ากับ 55.44 และ 44.41 ตามลำดับ การใช้พริกเขียวจะได้ซิงดองกวนผสมผักที่มีสีออกสว่างมากที่สุดเนื่องจากเนื้อพริกเขียวมีสีชาวจึงทำให้ซิงกวนมีสีเหลืองออกสว่างมากกว่าสูตรอื่น สำหรับค่า a^* และ b^* พบว่า ซิงดองกวนผสมผักสูตรที่ 3 มีค่า a^* สูงสุดและค่า b^* ต่ำสุดมีค่าเท่ากับ 8.61 และ 6.29 ตามลำดับ แสดงถึงซิงดองกวนผสมผักสูตรที่ 3 มีสีออกแดงเล็กน้อยและมีความเป็นสีเหลืองน้อย เนื่องจากสูตรที่ 3 ใช้มันเทศสีม่วงเป็นส่วนผสมซึ่งในมันเทศสีม่วงมีรงควัตถุชนิดแอนโทไซยานินหรือสารสี (Pigment) ที่ให้สีแดงม่วงและน้ำเงิน (พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และนิธิยา รัตนาปนนท์, 2567ก) ส่งผลให้ซิงดองกวนผสมผักมีสีแดงออกม่วงมากกว่าสูตรอื่น (Table 3)

ผลการศึกษาลักษณะเนื้อสัมผัสของซิงกวน ได้แก่ ค่าความแข็ง ความสามารถในการเกาะยึด และค่าความเหนียว พบว่าชนิดของผักมีผลต่อลักษณะเนื้อสัมผัสของซิงดองกวนผสมผักอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) โดยซิงดองกวนผสมผักในสูตรที่ 2 มีค่าความแข็งสูงสุด เท่ากับ 24.51 g เนื่องจากพริกเขียวที่นำมาใช้ในการทดลองเป็นผลแก่มีเนื้อแน่นแข็ง และในพริกเขียวมีคาร์โบไฮเดรตน้อยกว่าร้อยละ 3 (Zaini *et al.*, 2011) เมื่อนำมากรนส่งผลให้ซิงดองกวนผสมผักมีเนื้อสัมผัสแข็ง ในขณะที่ซิงดองกวนผสมผักสูตรที่ 1 ที่ใช้ถั่วแดงมีค่าความแข็งต่ำสุด เท่ากับ 12.84 g เนื่องจากองค์ประกอบของถั่วแดงมีแป้งเป็นองค์ประกอบหลัก ในขั้นตอนการเตรียมถั่วแดงจะแช่ถั่วแดงในน้ำที่อัตราส่วน 1 ต่อ 2 แช่นาน 2 ชั่วโมงทำให้เม็ดแป้งถั่วแดงดูดซับน้ำได้มากขึ้น และเมื่อนำถั่วแดงไปต้มสุกทำให้เม็ดแป้งบางส่วนเกิดการเจลาติไนเซชัน (Gelatinization) รวมถึงเม็ดแป้งได้รับความร้อนในขณะกวน

พันธะไฮโดรเจนภายในโมเลกุลของเม็ดแป้งจะถูกทำลายส่งผลให้เม็ดแป้งพองตัวและแตกออก และให้ความเหนียวกับผลิตภัณฑ์ ดังนั้นการที่มีสัดส่วนของเม็ดแป้งที่มีการพองตัวมากจึงทำให้โครงสร้างของผลิตภัณฑ์ไม่แข็งแรง เมื่อถูกแรงที่ใช้ในการกดตัวอย่างจึงแตกออกได้ง่าย (สิริการ หนูสิงห์ และบุศราภา ลีละวัฒน์, 2559) ค่าความสามารถในการเกาะยึดของซิงดองกวนผสมผักทั้ง 3 สูตร พบว่ามีระดับใกล้เคียงกัน (Table 3) โดยสูตรที่ 3 มีค่าสูงสุดที่ 0.71 ในขณะที่สูตรที่ 1 และ 2 ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) การลดอุณหภูมิของแป้งหลังการเจลาติไนเซชันทำให้โมเลกุลอะไมโลสจากเม็ดแป้งจัดเรียงตัวใหม่เกิดเป็นกระบวนการรีโทรเกรเดชัน (Retrogradation) ซึ่งส่งผลให้ความสามารถในการอุ้มน้ำลดลง (สุทธิณี สีสังข์, 2563) แป้งที่มีอะไมโลสสูงมักเกิดรีโทรเกรเดชันได้ง่าย เช่น แป้งถั่วแดงที่มีอะไมโลสร้อยละ 55.87 (จิรนาถ ทิพย์รักษา และสุภักษร นุดวงแก้ว, 2552) ขณะที่แป้งมันเทศมีปริมาณอะไมโลสเพียงร้อยละ 18-21 (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546) ทำให้การรีโทรเกรเดชันในแป้งมันเทศเกิดน้อยกว่าจึงได้ผลิตภัณฑ์ที่นุ่มและมีความสามารถในการเกาะยึดดีกว่า ต่างจากแป้งถั่วแดงที่เกิดรีโทรเกรเดชันมากขึ้น ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์มีลักษณะแห้งและร่วน ในขณะที่ค่าความเหนียวหรือค่าการแตกตัวพร้อมกลืน (Gumminess) ของสูตรที่ 1 มีค่าสูงสุดเท่ากับ 8.89 g เนื่องจากถั่วแดงที่ใช้มีปริมาณอะไมโลสสูงถึงร้อยละ 55.87 และอะไมโลเพกตินร้อยละ 44.13 (จิรนาถ ทิพย์รักษา และสุภักษร นุดวงแก้ว, 2552) ในขณะที่แป้งมันเทศมีปริมาณอะไมโลสร้อยละ 18-21 (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546) ทำให้แป้งถั่วแดงมีโครงสร้างร่างแหในเม็ดแป้งที่แข็งแรงกว่าแป้งมันเทศ ส่งผลให้มีการพองตัวและการละลายต่ำ นอกจากนี้ไขมันที่อยู่ในเม็ดแป้งยังรวมตัวกับอะไมโลสเกิดเป็น amylose-lipid complex ซึ่งเสริมความแข็งแรงของเม็ดแป้งทำให้เม็ดแป้งพองตัวได้ช้า (กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2543) โดยถั่วแดงมีไขมันร้อยละ 2.20 (อุษาพร ภูคัสมาส, 2561) ในขณะที่พริกเขียวและมันเทศสีม่วงมีไขมันเพียงร้อยละ 0.3 และร้อยละ 0.04 ตามลำดับ (Zaini *et al.*, 2011; วชิราพรรณ บุญญาพุทธิพงศ์, 2547) จึงทำให้ซิงดองกวนผสมผักสูตรที่ 1 มีความเหนียวมากกว่าสูตรอื่น (Table 3)

Table 3 Physical properties of pickled ginger paste with various vegetable

Treatment	Color			Hardness (g)	Cohesiveness	Gumminess (g)
	L*	a*	b*			
Red bean	53.44±1.22 ^b	3.60±0.14 ^b	17.22±0.87 ^b	12.84±3.17 ^c	0.67±0.10 ^b	8.89±1.05 ^a
Wax Gourd	55.77±1.07 ^a	3.42±0.21 ^c	20.34±0.25 ^a	24.51±4.16 ^a	0.63±0.15 ^b	6.74±1.33 ^b
Purple Potato	44.41±0.56 ^c	8.61±0.09 ^a	6.29±0.58 ^c	21.02±2.33 ^b	0.71±0.09 ^a	5.41±0.76 ^c

Note: Data are presented as means ± standard error

abc in the same column with different superscripts are significantly different ($p < 0.05$)

คุณภาพทางด้านเคมีของซิงดองกวนผสมผักพบว่า ชนิดของผักมีผลต่อค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดและค่าความชื้นของซิงดองกวนผสมผักอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เนื่องด้วยองค์ประกอบทางเคมีของถั่วแดง พริกเขียวและมันเทศสีม่วงมีความแตกต่างกัน โดยซิงดองกวนผสมผักที่ใช้มันเทศสีม่วงเป็นส่วนผสมให้ค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้มีค่าสูงสุดเท่ากับ 20.22 เปอร์เซ็นต์แห้งเนื่องจากในหัวมันเทศสดจะพบน้ำตาลซูโครส กลูโคส และฟรุคโทสเป็นหลัก (Lewthwaite *et al.*, 1997) และองค์ประกอบของมันเทศ สีม่วงมีแป้งร้อยละ 15-28 (กัญญารัตน์ สิ้นคำคุณ และจิตติรัตน์ นันทะกุล, 2563) เมื่อให้ความร้อนในระหว่างการกวนแป้งจะถูกเปลี่ยนเป็นเดกซ์ทรินและมอลโทสโดยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (alpha-amylase) และบีตา-อะไมเลส

(beta-amylase) (Lewthwaite *et al.*, 1997) ในขณะที่ซิงดองกวนผสมผักที่ใช้พริกเขียวมีปริมาณความชื้นสูงร้อยละ 64.22 ทั้งนี้เป็นผลเนื่องมาจากเนื้อผลของพริกเขียวมีองค์ประกอบของน้ำสูงร้อยละ 93.80-96.80 (Singh *et al.*, 2024) ในขณะที่ถั่วแดงและมันเทศสีม่วงมีองค์ประกอบของน้ำร้อยละ 12 และ 60.13 ตามลำดับ (อุษาพร ภูคัสมาส, 2561; กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ, 2546) เมื่อนำมาใช้เป็นส่วนผสมของซิงดองกวนผสมผักทำให้น้ำที่อยู่ในเนื้อของพริกเขียวเกิดรวมกับส่วนประกอบอื่น ๆ ส่งผลให้ปริมาณความชื้นสูงกว่าซิงดองกวนผสมผักสูตรอื่น ๆ ในขณะที่ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) และปริมาณกรดทั้งหมดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) (Table 4)

Table 4 Chemical properties of pickled ginger paste with various vegetable

Treatment	Total soluble solid (%Brix)	pH ^{ns}	TA (as citric acid) ^{ns} (%)	Moisture (%)
Red bean	15.55±0.09 ^c	5.51±0.05	0.43±0.17	62.06±0.14 ^b
Wax Gourd	16.90±0.31 ^b	5.40±0.01	0.53±0.17	64.22±0.39 ^a
Purple Potato	20.22±0.10 ^a	5.55±0.01	0.43±0.17	61.35±0.15 ^c

Note: Data are presented as means ± standard error

ns is not significantly different ($p > 0.05$)

abc in the same column with different superscripts are significantly different ($p < 0.05$)

การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสพบว่า ค่าคะแนนความชอบด้านคุณลักษณะ สี รสชาติ เนื้อสัมผัส และการยอมรับโดยรวมของซิงดองกวนผสมผักในสูตรที่ 3 มีค่าคะแนนความชอบเฉลี่ยมากที่สุด เท่ากับ 7.61 7.55 7.17 และ 7.10 ตามลำดับ จากคะแนนเต็ม 9 คะแนน โดยมีความชอบอยู่ในระดับความชอบปานกลาง เนื่องจากซิงดองกวนผสมผักที่ได้มีสีม่วงออกแดงซึ่งเป็นสีของมันเทศสีม่วงประกอบกับความหวานของมันเทศสีม่วงมีผลให้ผู้บริโภคชอบสี รสชาติ และความชอบโดยรวมมากกว่าซิงดองกวนผสมผักสูตรที่ 1 และสูตรที่ 2 ผลจากการประเมินความชอบด้านเนื้อสัมผัสพบ

ว่า ผู้บริโภคยอมรับซิงดองกวนผสมผักสูตรที่ 3 สูงสุดเนื่องมาจากมีค่าความสามารถในการเกาะยึดสูงซึ่งเป็นสมบัติการยึดเกาะกันภายในเนื้ออาหาร (ภาราดร งามดี และคณะ, 2562) เป็นความรู้สึกรับชอบของผู้บริโภคในขณะเคี้ยว ขณะเดียวกันความชอบด้านกลิ่นพบว่าทุกสูตรไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) เนื่องจากซิงดองกวนผสมผักทั้ง 3 สูตรใช้ซิงดองในปริมาณร้อยละ 40 เท่ากัน ทั้งนี้เป็นเพราะกลิ่นของซิงมีสารที่ชื่อว่าจินเจอร์อล (Gingerol) สามารถเปลี่ยนเป็นสารโชกาออล (Shogaol) และซิงเจอโรน (Zingerone) เมื่อผ่านการให้ความร้อนจะได้กลิ่นของซิงเพิ่มมากขึ้น

(Spence, 2023) รวมถึงชิงตองกวนผสมผักทั้ง 3 สูตรใช้เผือกหอมเป็นส่วนผสม เมื่อผ่านการต้มสุกจะให้กลิ่นหอมเฉพาะตัวของเผือกหอม (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2567) จึงทำให้กลิ่น

ชิงตองกวนผสมผักทั้ง 3 สูตรไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Table 5)

Table 5 Sensory evaluation of pickled ginger paste with various vegetable(n=30)

Treatment	Average acceptance score of the sensory evaluation				
	Color	Odor ^{ns}	Taste	Texture	Overall
Red bean	6.59±1.12 ^b	6.41±1.32	5.38±2.34 ^b	6.90±1.42 ^b	5.69±1.98 ^b
Wax Gourd	6.31±1.37 ^c	6.38±1.32	5.62±2.03 ^b	6.72±1.41 ^c	5.72±1.93 ^b
Purple Potatoes	7.61±0.79 ^a	7.24±1.15	7.17±1.73 ^a	7.55±0.91 ^a	7.10±1.70 ^a

Note: Data are presented as means ± standard error

ns is not significantly different ($p>0.05$)

abcin the same column with different superscripts are significantly different ($p\leq 0.05$)

จากการศึกษาชนิดของผักที่เหมาะสมจากการทดลองในข้อ 1 ได้เลือกชิงตองกวนผสมผักในสูตรที่ 3 ที่ใช้มันเทศสีม่วงเป็นส่วนผสมเพื่อนำไปศึกษาทดลองในข้อ 2 เนื่องจากชิงตองกวนผสมผักในสูตรที่ 3 มีผลการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสด้านคุณลักษณะ สี รสชาติ เนื้อสัมผัส และการยอมรับโดยรวมมีค่าคะแนนความชอบเฉลี่ยมากที่สุด ประกอบกับการใช้มันเทศสีม่วงเป็นส่วนผสมทำให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีสีม่วงออกแดง เนื้อสัมผัสมีลักษณะนุ่มและมีการเกาะตัวกันดีซึ่งเป็นคุณลักษณะที่ผู้บริโภคส่วนใหญ่ชอบ

2. สัดส่วนระหว่างชิงตองกับเผือกหอมผสมมันเทศสีม่วงที่เหมาะสมในการผลิตชิงตองกวนผสมผัก

ผลการศึกษาสัดส่วนระหว่างชิงตองกับเผือกหอมผสมมันเทศสีม่วงในการผลิตชิงตองกวนผสมผัก พบว่าสัดส่วนของชิงตองเพิ่มขึ้นส่งผลต่อค่า L^* และค่า b^* ของชิงตองกวนผสมผักอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$) การใช้ปริมาณชิงตองเพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า L^* และค่า b^* ของชิงตองกวนผสมผักมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยมีค่า L^* ระหว่าง 41.11-46.85 และค่า b^* ระหว่าง 4.67-12.73 ตามลำดับ

ในขณะที่ค่า a^* ของชิงตองกวนผสมผักในทุกสูตรไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) โดยมีค่า a^* ระหว่าง 8.04-9.25 (Table 6) การใช้ปริมาณชิงตองเพิ่มขึ้นส่งผลให้ชิงตองกวนผสมผักมีค่าความสว่างและค่าความเป็นสีเหลืองเพิ่มมากขึ้น เนื่องมาจากชิงตองมีการนำมาแช่ในน้ำสะอาดเพื่อลดความเค็มอย่างน้อย 2 ชั่วโมงก่อนนำมาใช้จึงส่งผลให้เนื้อชิงตองมีสีเหลืองซีด เมื่อนำมาใช้เป็นส่วนผสมในการผลิต โดยเพิ่มสัดส่วนของชิงตองมากขึ้นในขณะเดียวกันสัดส่วนของเผือกหอมผสมกับ มันเทศสีม่วงลดลงจะส่งผลให้สีของชิงตองกวนผสมผักที่ได้มีสีม่วงจางและมีความสว่างเพิ่มขึ้น (Figure 1)

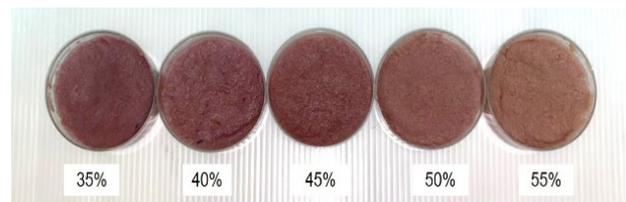


Figure 1 The percentage of pickled ginger used in pickled ginger paste product stirred with vegetable

ผลการวิเคราะห์ค่าเนื้อสัมผัสของชิงตองกวนผสมผัก พบว่าปริมาณชิงตองที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความแข็งและค่าความเหนียวของชิงตองกวนผสมผักมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$) ชิงตองกวนผสมผักที่ใช้ปริมาณชิงตองร้อยละ 35 มีค่าความแข็งและค่าความเหนียวสูงที่สุดเท่ากับ 22.41 g และ 16.03 g ตามลำดับ ในขณะที่เดียวกันค่าความสามารในการเกาะยึดของชิงตองกวนผสมผักในทุกสูตรไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) แสดงดัง Table 6 การเพิ่มปริมาณของชิงตองส่งผลให้ค่าความแข็งและค่าความเหนียวของชิงตองกวนผสมผักมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$) ทั้งนี้เป็นผลมาจากโยอาหารในเผือกหอมซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Alcantara *et al.* (2013) โดยพบว่าแป้งเผือกมีโยอาหาร ร้อยละ 3.10 เมื่อเพิ่มปริมาณแป้งเผือกในเส้นสปาเก็ตตี้มากขึ้นส่งผลให้เส้นสปาเก็ตตี้หลังจากต้มให้สุกมีค่าความเหนียวเพิ่มขึ้นซึ่งเป็นผลมาจากเส้นโยอาหารที่ไม่ละลายน้ำที่อยู่ในแป้งเผือก โดยโยอาหารที่ไม่ละลายน้ำประกอบด้วยเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส อาหารประเภทผักและผลไม้จะมีปริมาณเซลลูโลส มากถึงร้อยละ 20-50 มีองค์ประกอบคือโพลีเมอร์ของ β -D-glucose เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ B-1, 4-glucose bond เซลลูโลสจึงมีลักษณะจับกันเป็นเส้นโยอาหารหนาหยาบ ไม่ละลายน้ำ แต่สามารถดูดซับ

น้ำทำให้โมเลกุลเกิดการพองตัวได้ (Bittner *et al.*, 1982) นอกจากนี้ในเนื้อเยื่อยังมีกัมและมิวซิเลจ (Hong & Nip, 1990) ซึ่งสามารถรวมตัวกับน้ำได้สารละลายที่มีความข้นหนืดหรือเจล ส่งผลต่อความเหนียวของผลิตภัณฑ์ ในขณะที่ซิงสดทั้งซิงอ่อน ซิงกลาง และซิงแก่มีใยอาหารน้อยเพียงร้อยละ 0.15-0.29 (สิรินาฏ น้อยพิทักษ์ และอนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล, 2561) ดังนั้นการเพิ่มสัดส่วนของซิงสดทำให้สัดส่วนของเนื้อเยื่อหุ้มในสูตรลดลงและส่งผลให้ใยอาหารในซิงสดกวนผสมผักลดลงด้วย

คุณภาพทางด้านเคมีของซิงสดกวนผสมผักพบว่า ปริมาณซิงสดมีผลต่อปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้ และค่าความชื้น มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ปริมาณซิงสดเพิ่มขึ้นส่งผลให้ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดและค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของซิงสดกวนผสมผักมีแนวโน้มลดลง ขณะที่ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้และค่าความชื้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น Table 7 เนื่องจากซิงสดทั่วไปจะมี pH อยู่ในช่วง 3.25-3.75 (Chen *et al.*, 2023) ในขณะที่แป้งเผือกจะมี pH อยู่ในช่วง 5.98-6.16 (Boahemaa *et al.*, 2024) การเพิ่มสัดส่วนของซิงสดมากขึ้นจึงส่งผลให้ pH ของซิงสดกวนผสมผักมีแนวโน้มลดลง อย่างไรก็ตามในงานวิจัยนี้ได้นำซิงสดมาแช่น้ำเป็นเวลา 2 ชั่วโมงและนำไปต้มให้สุกนาน 1 ชั่วโมง เพื่อลดความเค็มส่งผลให้เนื้อซิงสดมีการดูดซับน้ำมากขึ้น เมื่อเพิ่มสัดส่วนของซิงสดในสูตรจึงส่งผลให้ค่าความชื้นมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในขณะที่ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากสัดส่วนของเนื้อเยื่อหุ้มผสมกับมันเทศมีแนวโน้มลดลง ในส่วนของปริมาณกรดที่ไทเทรตได้โดยคำนวณเป็นกรดซิตริก เนื่องจากมีการใช้กรดซิตริกในการดองซิง เมื่อเพิ่มปริมาณซิงสดมากขึ้นส่งผลให้ปริมาณกรดที่ไทเทรตได้มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นด้วย

ผลการยอมรับของผู้บริโภคต่อผลิตภัณฑ์ซิงสดกวนผสมผักโดยการประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส จากการเตรียมขนมปังบรรจุไส้ซิงสดกวนผสมผักให้ผู้บริโภคได้ทดสอบชิม (Figure 2 และ Table 8) พบว่าคะแนนความชอบเฉลี่ยด้านต่างๆ ได้แก่ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และการยอมรับโดยรวมมีแนวโน้มค่าคะแนนความชอบโดยเฉลี่ยลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณซิงสดในซิงสดกวนผสมผัก ปริมาณซิงสดร้อยละ 35 และ 40 ได้คะแนนความชอบเฉลี่ยมากที่สุด โดยความชอบด้านสี กลิ่น เนื้อสัมผัสและความชอบโดยรวมอยู่ในระดับความชอบปานกลาง ส่วนความชอบด้านรสชาติอยู่ในระดับความชอบเล็กน้อย เมื่อเพิ่มซิงสดในปริมาณร้อยละ 45-50 จะได้คะแนนความชอบเฉลี่ยในช่วงชอบเล็กน้อยถึงเฉยๆ และเมื่อเพิ่มซิงสดในปริมาณร้อยละ 55 คะแนนความชอบเฉลี่ยด้านรสชาติและความชอบโดยรวมอยู่ในระดับไม่ชอบเลย ทั้งนี้บริษัทวังทองผลพืช จำกัด ต้องการนำซิงสดมาใช้ในการผลิตซิงสดกวนผสมผักให้ได้มากที่สุด ดังนั้นปริมาณซิงสดร้อยละ 40 จึงเป็นปริมาณที่เหมาะสมและสอดคล้องกับความต้องการของผู้ประกอบการ

Table 6 Physical properties of pickled ginger paste product stirred with vegetable

Pickled ginger: Mixed taro and purple potato (w/w)	Color			Hardness (g)	Cohesiveness ^{ns}	Gumminess (g)
	L*	a* ^{ns}	b*			
35:45	41.11±0.04 ^e	8.04±2.27	4.67±0.13 ^e	22.41±1.73 ^a	0.74±0.10	16.03±1.29 ^a
40:40	43.06±0.05 ^d	9.04±0.03	5.52±0.19 ^d	10.63±2.02 ^b	0.80±0.02	11.57±3.23 ^b
45:35	45.09±0.06 ^c	9.06±0.03	7.99±0.03 ^c	10.99±2.29 ^b	0.78±0.03	6.35±0.64 ^c
50:30	46.02±0.09 ^b	9.18±0.07	9.52±0.14 ^b	10.50±3.52 ^b	0.73±0.07	5.07±1.31 ^c
55:25	46.85±0.04 ^a	9.25±0.03	12.73±0.13 ^a	8.72±0.51 ^b	0.76±0.05	2.91±0.63 ^d

Note: abcde in the same column with different superscripts are significantly different ($p \leq 0.05$)

ns is not significantly different ($p > 0.05$)

Table 7 Chemical properties of pickled ginger paste product stirred with vegetable

Pickled ginger :Mixed taro and purple potato (w/w)	Total soluble solid(%Brix)	pH	TA (as citric acid) (%)	Moisture (%)
35:45	27.65±0.30 ^a	5.80±0.02 ^a	0.14±0.03 ^b	58.75±0.88 ^d
40:40	27.70±0.31 ^a	5.63±0.02 ^b	0.16±0.04 ^{ab}	62.94±0.68 ^c
45:35	25.20±0.27 ^b	5.51±0.07 ^c	0.17±0.03 ^a	64.13±0.22 ^b
50:30	24.60±0.33 ^c	5.42±0.02 ^d	0.19±0.00 ^a	64.63±0.35 ^b
55:25	23.85±0.37 ^d	5.39±0.02 ^d	0.19±0.04 ^a	67.27±1.49 ^a

Note: ^{abcd} in the same column with different superscripts are significantly different ($p \leq 0.05$)

Table 8 Sensory evaluation of pickled ginger paste product stirred with vegetable in bread filling (n=30)

Pickled ginger :Mixed taro and purple potato (w/w)	Average acceptance score of the sensory evaluation				
	Color	Odor	Taste	Texture	Overall
35:45	7.37±0.76 ^a	7.00±0.74 ^a	6.77±1.30 ^a	7.20±0.89 ^a	7.03±1.30 ^a
40:40	7.37±0.81 ^a	6.97±1.10 ^a	6.83±1.02 ^a	7.13±1.04 ^a	7.10±1.03 ^a
45:35	6.23±1.07 ^b	5.77±1.61 ^b	5.47±1.53 ^b	6.07±1.51 ^b	5.63±1.27 ^b
50:30	5.90±1.27 ^b	5.83±1.23 ^b	5.13±1.01 ^{bc}	5.73±1.41 ^{bc}	5.27±1.05 ^b
55:25	5.70±1.18 ^b	5.33±1.63 ^b	4.50±1.33 ^c	5.27±1.60 ^c	4.60±1.16 ^c

Note: ^{abcd} in the same column with different superscripts are significantly different ($p \leq 0.05$)

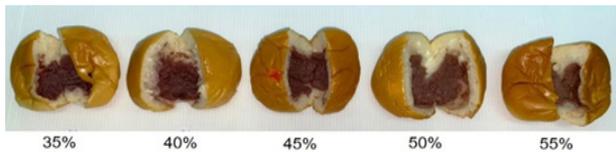


Figure 2 Pickled ginger paste product stirred with vegetable in bread filling

3. คุณภาพของผลิตภัณฑ์ซิงดองกวนผสมผักตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนผักและผลไม้กวน (35/2558)

การวิเคราะห์คุณภาพซิงดองกวนผสมผักที่มีส่วนผสมของซิงดองร้อยละ 40 และเผือกหอมผสมมันเทศสีม่วงร้อยละ 40 พบว่ามีค่าวอเตอร์แอกทิวิตี เท่ากับ 0.61 ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมด ปริมาณยีสต์และรา มีน้อยกว่า 10^2 cfu/g และไม่พบ *E. Coli* ในผลิตภัณฑ์ซิงดองกวนผสมผัก ตามข้อกำหนดมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนผักและผลไม้กวน (35/2558) (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน, 2558) ที่ระบุค่าวอเตอร์แอกทิวิตีต้องไม่เกิน 0.85 ปริมาณจุลินทรีย์ทั้งหมดน้อยกว่า 1×10^6 cfu/g ปริมาณยีสต์และรามีน้อยกว่า 1×10^3 cfu/g และ *E. Coli* น้อยกว่า 3 ต่อตัวอย่าง 1 กรัม ซึ่งโคลิฟอร์มแบคทีเรียเป็นดัชนีชี้บ่งในด้านสุขลักษณะของกระบวนการผลิตอาหาร และสามารถทำลายได้ด้วยความร้อนระดับการพาสเจอร์ไรซ์

(พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และนิธยา รัตนานนท์, 2567ข) ซึ่งในกระบวนการผลิตซิงดองกวนผสมผักได้ใช้อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส เวลา 15 นาที ประกอบกับในซิงมีสารสำคัญที่มีฤทธิ์ต้านจุลินทรีย์ คือ สารประกอบฟีนอลิก (Otunola & Afolayan, 2013) ที่สามารถต้านเชื้อแบคทีเรียและต้านเชื้อราได้ (Spence, 2023; Chen *et al.*, 2023)

4. องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ซิงดองกวนผสมผัก

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของผลิตภัณฑ์ซิงดองกวนผสมผักที่มีส่วนผสมของซิงดองร้อยละ 40 และเผือกหอมผสมมันเทศสีม่วงร้อยละ 40 พบว่ามีโปรตีน คาร์โบไฮเดรต ไขมัน และเส้นใย เท่ากับ 1.90 30.92 4.14 และ 15.17 กรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ เจตนิพัทธ์ บุญยสวัสดิ์ และจักรวาล ภูเสม (2562) ที่พัฒนาไส้ขนมจากมันสำปะหลังในผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ พบว่าไส้ขนมปังที่ผลิตจากถั่วแดงมีโปรตีน เส้นใย ไขมัน และคาร์โบไฮเดรตเท่ากับ 9.86 4.67 10.06 และ 39.65 กรัมต่อ 100 กรัม ตามลำดับ โดยซิงดองกวนผสมผักจะมีเส้นใยสูงกว่าไส้ขนมปังที่ผลิตจากถั่วแดงอาจเนื่องมาจากโครงสร้างของซิงดองมีเส้นใย (Spence, 2023) รวมถึงเส้นใยที่มาจากเผือกหอมและมันเทศสีม่วงที่เป็นส่วนผสมด้วยจึงช่วยเสริมเส้นใยได้มาก

ขึ้นและเนื่องจากเส้นใยมีคุณสมบัติที่ดีเชิงสุขภาพเส้นใยจะไม่ถูกย่อยและดูดซึมที่บริเวณกระเพาะอาหารและลำไส้เล็กจะผ่านไปทีลำไส้ใหญ่เพื่อเป็นอาหารให้กับจุลินทรีย์โปรไบโอติกและส่งผลให้เกิดกระบวนการหมักเพื่อผลิตกรดไขมันสายสั้นซึ่งอาจช่วยลดความเสี่ยงของการเกิดโรคมะเร็งลำไส้ใหญ่และเสริมภูมิคุ้มกันร่างกาย (Dhingra *et al.*, 2012; เจตนิพัทธ์ บุญยสวัสดิ์ และจักรวาล ภูเสม, 2562)

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

การใช้ชนิดของผักต่างกันส่งผลต่อค่า $L^* a^* b^*$ และค่าเนื้อสัมผัสของซิงดองกวนผสมผัก โดยซิงดองกวนผสมผักที่ใช้ผักเขียวเป็นส่วนผสมจะมีความแข็งมากกว่าซิงดองกวนผสมผักที่ใช้มันเทศสีม่วงและถั่วแดง ในขณะที่ซิงดองกวนผสมผักที่ใช้มันเทศสีม่วงจะให้ค่าความสามารถในการเกาะยึดสูงกว่าผักเขียวและถั่วแดง ส่วนค่าความเหนียวพบว่าซิงดองกวนผสมผักที่ใช้ถั่วแดงจะให้ค่าความเหนียวสูงสุด การประเมินคุณภาพทางด้านประสาทสัมผัสพบว่าผู้บริโภคให้คะแนนความชอบด้านสี รสชาติ เนื้อสัมผัสและความชอบโดยรวมของซิงดองกวนผสมผักที่ใช้มันเทศสีม่วงเป็นส่วนผสมมากที่สุด ในขณะที่ความชอบด้านกลิ่น ผู้บริโภคให้คะแนนความชอบไม่แตกต่างกัน เมื่อนำซิงดองกวนผสมผักสูตรที่ใช้มันเทศสีม่วงไปศึกษาสัดส่วนระหว่างซิงดองกับเปลือกหอมผสมกับมันเทศสีม่วง พบว่า การเพิ่มปริมาณซิงดองมีผลให้ซิงดองกวนผสมผักที่ได้มีค่า L^* และ b^* เพิ่มขึ้น สำหรับการวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของซิงดองกวนผสมผักพบว่าการเพิ่มปริมาณซิงดองส่งผลให้ซิงดองกวนผสมผักมีค่าความแข็งและค่าความเหนียวลดลงสำหรับคุณภาพทางด้านเคมีพบว่าการเพิ่มปริมาณซิงดองส่งผลให้ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ลดลงในขณะที่ปริมาณความชื้นเพิ่มขึ้น การประเมินคุณภาพทางด้านประสาทสัมผัสพบว่าผู้บริโภคให้คะแนนความชอบด้านสี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัสและความชอบโดยรวมของซิงดองกวนผสมผักที่ใช้ซิงดองร้อยละ 35 และ 40 มากที่สุด และคะแนนความชอบทุกด้านจะลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณซิงดองมากกว่าร้อยละ 40 ผลิตภัณฑ์ซิงดองกวนผสมผักที่มีสัดส่วนระหว่างซิงดองร้อยละ 40 กับและเปลือกหอมผสม มันเทศสีม่วงร้อยละ 40 มีความปลอดภัยตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนผักและผลไม้กวน (35/2558) การนำซิงดองมาใช้เป็นส่วนผสมในซิงดองกวนผสมผักได้มากถึงร้อยละ 40 นับว่าเป็นทางเลือกที่ดีให้กับผู้บริโภคเนื่องจากซิงดองกวนผสมผักจัดเป็น functional food ที่มีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่เป็นประโยชน์ต่อสุขภาพ คือสารประกอบฟีนอลิก และสอดคล้องกับความต้องการของผู้ประกอบการที่ต้องการนำซิงดองที่เหลือจากการตัดแต่งหลังดองที่ทาง

บริษัทไม่สามารถจำหน่ายให้กับลูกค้าได้มาใช้ในการผลิตซิงดองให้ได้มากที่สุด

จากการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้มีข้อเสนอแนะเพิ่มเติมว่าควรศึกษาฤทธิ์ทางชีวภาพและปริมาณสารสำคัญในผลิตภัณฑ์ซิงดองกวนผสมผักเพิ่มจะช่วยเพิ่มคุณค่าของผลิตภัณฑ์ซิงดองกวนผสมผักสำหรับไส้ขนมปัง

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากแผนงานพัฒนาขีดความสามารถทางเทคโนโลยีและวิจัยของภาคเอกชนในพื้นที่ภายใต้การสนับสนุนตามกลไกอุทยานวิทยาศาสตร์ภาคเหนือและบริษัทวังทองผลพืช จำกัด จังหวัดพิษณุโลก

เอกสารอ้างอิง

- กัญญารัตน์ สิ้นคำคุณ และจิตติรัตน์ นันทะกุล. (2563). *การพัฒนาผลิตภัณฑ์ทาร์ตมันเทศสีม่วง*. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ. <https://research.rmutsb.ac.th/fullpaper/2562/research.rmutsb-2562-20200909094323598.pdf>
- กรมส่งเสริมการเกษตร. (2567). *เปลือกหอม*. <https://esc.doae.go.th/wp-content/uploads/2015/02/taro.pdf>
- กล้าณรงค์ ศรีรอด และเกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. (2543). *เทคโนโลยีของแป้ง (พิมพ์ครั้งที่ 2)*. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- กล้าณรงค์ ศรีรอด และ เกื้อกุล ปิยะจอมขวัญ. (2546). *เทคโนโลยีของแป้ง (พิมพ์ครั้งที่ 3)*. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- เจตนิพัทธ์ บุญยสวัสดิ์ และจักรวาล ภูเสม. (2562). *การพัฒนาไส้ขนมจากมันสำปะหลังในผลิตภัณฑ์เบเกอรี่*. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร. https://repository.rmutp.ac.th/bitstream/handle/123456789/3251/HEC_63_05.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- จิรนาถ ทิพย์รักษา และสุภัทษร นุดวงแก้ว. (2552). *พาสต้าเสริมเส้นใยจากแป้งถั่วแดงหลวง*. *วารสารเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยสยาม*, 4(1), 6-22.
- พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ นิธิยา รัตนาปนนท์. (2567ก). *แอนโทไซยานิน*. Food Network Solution. <https://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/word/1103/anthocyanin-แอนโทไซยานิน>
- พิมพ์เพ็ญ พรเฉลิมพงศ์ และ นิธิยา รัตนาปนนท์. (2567ข). *โคลิฟอร์ม*. Food Network Solution. <https://www.foodnetworksolution.com/wiki/word/1127/coliform->

โคลิฟอร์ม

- ภาราดร นางมดี, อลิสา ศรีสุธรรม และอภิษฎา ทองมาก. (2562). ผลของการย่างและการลวกต่อคุณภาพทางเคมีกายภาพ เนื้อสัมผัส และประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ฟักทองย่าง พร้อมบริโภคร่วมกับผักกาดจากฟักทองพันธุ์คางคกและพันธุ์ศรีเมือง. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี*, 21(3), 152-165.
- วชิราพรรณ บุญญาพุทธิพงศ์. (2547). *การศึกษาสมบัติทางเคมีกายภาพของมันเทศ แป้งมันเทศและสตาร์ชมันเทศ*. มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี. https://www.esanpedia.oar.ubu.ac.th/e-research/sites/default/files/Wachiraporn_Boonyaputtipong2547.pdf
- วทันยา ลิ้มปวยอม, ณีฐฎา เลหากุลจิตต์, ภรณ์ทิพย์ ดุชะฎีลาวัฒน์ และเกษรา วามะศิริ. (2557). องค์ประกอบทางเคมีและฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระของน้ำมันหอมระเหยขิง. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.*, 37(3), 297-312.
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน. (2558). *มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน ผักและผลไม้กวน (มผช.35/2558)*. <http://www.tisi.go.th>
- สุทธาทิพย์ สกกุลพรหมณ์, กัญฐา เมืองอยู่ และศรศรีวิเชียร. (2566). การทดสอบลักษณะการใช้งานเสมือนจริงของผลิตภัณฑ์ในกลุ่มฟิลลิ่งและทอปปิ้ง. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี. https://www.coop.rmutt.ac.th/?wpfb_dl=113
- สุทธิณี สีสังข์. (2563). *คุณสมบัติของแป้งที่มีผลต่อการแปรรูปผลิตภัณฑ์สัตว์น้ำ*. กรมประมง.
- สิริการ หนูสิงห์ และบุศราภา ลีละวัฒน์. (2559). สมบัติทางรีโอโลยีและคุณภาพทางประสาทสัมผัสของถั่วเขียว (*Vigna radiate L*) กวน. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์*, 24(2), 277-287.
- สิรินาฏ น้อยพิทักษ์ และอนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล. (2561). การจำแนกและทำนายความแก่ ปริมาณความชื้นและปริมาณเส้นใยของขิงสดด้วยสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้. *วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย*, 24(1), 58-65.
- อุษาพร ภูตัสมาส. (2561). ถั่วแดงแหล่งโปรตีนจากพืช. *วารสารอาหาร*, 48(1), 59-62.
- Alcantara, R. M., Hurtada, W. A., & Dizon, E. I. (2013). The nutritional value and phytochemical components of taro (*Colocasia esculenta* (L.) Schott) powder and its selected processed foods. *Nutrition and Food Sciences*, 3(3), 1000207. <http://doi.org/10.4172/2155-9600.1000207>
- AOAC. (2000). *Official Method of Analysis of AOAC international* (17th ed.). The Association of Official Analytical Chemists.
- Bittner, A. S., Burritt, E. A., Moser, J., & Street, J. C. (1982). Composition of dietary fiber: Neutral and acidic sugar composition of the alcohol insoluble residue from human foods. *Journal of Food Science*, 47(5), 1469–1471. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2621.1982.tb04963.x>
- Boahemaa, L. V., Dzandu, B., Amisah, J. G. N., Akonor, P. T., & Saalia, F. K. (2024). Physico-chemical and functional characterization of flour and starch of taro (*Colocasia esculenta*) for food applications. *Food and Humanity*, 2, 100245. <https://doi.org/10.1016/j.foohum.2024.100245>
- Chen, Y., Chen, L., Liu, L., Bi, X., & Liu, X. (2023). Characteristics of microbial communities in fermentation of pickled ginger and their correlation with its volatile flavors. *Food Bioscience*, 53, 102736. <https://doi.org/10.1016/j.fbio.2023.102736>
- Dhingra, D., Michael, M., Rajput, H., & Patil, R. T. (2012). Dietary fibre in foods: a review. *Journal of Food Science and Technology*, 49(3), 255–266. <https://doi.org/10.1007/s13197-011-0365-5>
- Hong, G., & Nip, W. (1990). Functional properties of precooked taro flour in sorbets. *Food Chemistry*, 36(4), 261–270. [https://doi.org/10.1016/0308-8146\(90\)90065-C](https://doi.org/10.1016/0308-8146(90)90065-C)
- Leal, P. F., Braga, M. E., Sato, D. N., Carvalho, J. E., Marques, M. O., & Meireles, M. A. (2003). Functional properties of spice extracts obtained via supercritical fluid extraction. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 51(9), 2520–2525. <https://doi.org/10.1021/jf0260693>
- Lewthwaite, S. L., Sutton, K. H., & Triggs, C. M. (1997). Free sugar composition of sweetpotato cultivars after storage. *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*, 25(1), 33–41. <https://doi.org/10.1080/01140671.1997.9513984>
- Malipan, J. (2006). *Antiradical capacity and anti-microbial activity of extracts from ginger and its products* [Mas-

- ter's thesis, King Mongkut's Institute of Technology Ladkrabang]. (In Thai)
- Otunola, G. A., & Afolayan, A. J. (2013). Evaluation of the polyphenolic contents and some antioxidant properties of aqueous extracts of Garlic, Ginger, Cayenne Pepper and their mixture. *Journal of Applied Botany and Food Quality*, *86*, 66–70. <https://doi.org/10.5073/JABFQ.2013.086.010>
- Shivakumar, N. (2019). Biotechnology and crop improvement of Ginger (*Zingiber officinale* Rosc.). In *Ginger* (pp. 1–13). IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.88574>
- Singh, S., Gohil, K. J., & Singh, M. P. (2024). Pharmacological update on *Benincasa hispida* (Thunb.): A review. *Pharmacological Research - Modern Chinese Medicine*, *12*, 100478. <https://doi.org/10.1016/j.prmcm.2024.100478>
- Spence, C. (2023). Ginger: The pungent spice. *International Journal of Gastronomy and Food Science*, *33*, 100793. <https://doi.org/10.1016/j.ijgfs.2023.100793>
- U.S. Food and Drug Administration. (2001a). BAM Chapter 3: Aerobic Plate Count. In *Bacteriological Analytical Manual*. Retrieved from <https://www.fda.gov/food/laboratory-methods-food/bam-chapter-3-aerobic-plate-count>
- U.S. Food and Drug Administration. (2001b). BAM Chapter 18: Yeasts, Molds and Mycotoxins. In *Bacteriological Analytical Manual*. Retrieved from <https://www.fda.gov/food/laboratory-methods-food/bam-chapter-18-yeasts-molds-and-mycotoxins>
- U.S. Food and Drug Administration. (2002). BAM Chapter 4: Enumeration of *Escherichia coli* and the Coliform Bacteria. In *Bacteriological Analytical Manual*. Retrieved from <https://www.fda.gov/food/laboratory-methods-food/bam-chapter-4-enumeration-escherichia-coli-and-coliform-bacteria>
- Zaini, N. A. M., Anwar, F., Hamid, A. A., & Saari, N. (2011). Kundur [*Benincasa hispida* (Thunb.) Cogn.]: A potential source for valuable nutrients and functional foods. *Food Research International*, *44*(7), 2368–2376. <https://doi.org/10.1016/j.foodres.2010.10.024>

ผลของการจัดการปุ๋ยชีวภาพต่อการผลิตข้าวโพดหวานในระบบอินทรีย์

Effect of bio-fertilizer management on sweet corn production in an organic system

ฉัตรปวีณ์ เดชจิริรัตนสิริ¹, ศรัณย์ จันทรวงศ์² และ จีราภรณ์ อินทสาร^{2*}

Chatprawee Dechjirathanasiri¹, Sarun Junwong² and Jiraporn Inthasan^{2*}

Received: 13 September 2024 ; Revised 22 October 2024 ; Accepted: 20 November 2024

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบผลของการใช้ปุ๋ยชีวภาพชนิดต่าง ๆ ต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าวโพดหวานในระบบอินทรีย์ โดยทำการศึกษาในสภาพไร่นา วางแผนการทดลองแบบสุ่มลงไนบล็อกแบบสมบูรณ์ ประกอบด้วย 5 กรรมวิธี 4 ซ้ำ คือกรรมวิธีที่ 1 ชุดควบคุม (ไม่ใส่ปุ๋ยชีวภาพ) กรรมวิธีที่ 2 ปุ๋ยชีวภาพ Azotobacter (A) กรรมวิธีที่ 3 ปุ๋ยชีวภาพ Mycorrhiza (M) กรรมวิธีที่ 4 ปุ๋ยชีวภาพย่อยสลายโพแทสเซียม (Potassium solubilizing bacteria: KSB) และกรรมวิธีที่ 5 ปุ๋ยชีวภาพ M + A + KSB ผลการวิเคราะห์ตัวอย่างดินหลังการเก็บเกี่ยวพบว่าในดินระดับบน (0-15 ซม.) การใส่ปุ๋ยชีวภาพ A+M+KSB ทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ และ โพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินสูงที่สุด คือ 70 และ 153 มก/กก. ตามลำดับ ($P<0.05$) ปริมาณไนโตรเจนในใบข้าวโพดหวานระยะฝักติดใหม่ และ ในเมล็ดข้าวโพดสูงสุดพบในกรรมวิธีที่ใส่ปุ๋ยชีวภาพ Azotobacter (2.47 และ 2.45%N ตามลำดับ($P<0.05$)) ขณะที่ปริมาณฟอสฟอรัสใบข้าวโพดหวานระยะฝักติดใหม่และในเมล็ดข้าวโพดสูงที่สุดจากกรรมวิธีที่ใส่ปุ๋ยชีวภาพ Mycorrhiza คือ 0.57และ0.51 %Pตามลำดับ ($P<0.05$) ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ในเมล็ดข้าวโพดหวานสูงที่สุดในกรรมวิธีที่ใส่ปุ๋ยชีวภาพ (16.33 °Brix) แต่ไม่มีความแตกต่างกับกรรมวิธีที่ใส่ปุ๋ยชีวภาพ A+M+KSB (16.05 °Brix) ผลผลิตของข้าวโพดหวานสูงที่สุดจากการใส่ปุ๋ยชีวภาพ A+M+KSB คือ 1,540 กิโลกรัมต่อไร่ ($P<0.05$)

คำสำคัญ: ปุ๋ยชีวภาพ, เกษตรอินทรีย์, ข้าวโพดหวาน

Abstract

The sweet corn production in the organic system research objective is to compare the different biofertilizer management on growth and yield by Randomized Complete Block Design (RCBD). The experiment was conducted in 5 treatments with 4 replications as follows: 1) the control (without biofertilizer), 2) azotobacter (A), 3) mycorrhiza (M), 4) potassium solubilizing bacteria (KSB), and 5) azotobacter + mycorrhiza + potassium solubilizing bacteria (A + M + KSB). The soil analysis in top soil (0-15 cm) after harvesting showed that A+M+KSB caused the highest available phosphorus and potassium content (70 and 153 mg kg⁻¹ respectively) ($P<0.05$). The nutrient content in sweet corn leaves at the tasseling stage and seed content, azotobacter (A), resulted in the highest nitrogen content at 2.47 and 2.45%N, respectively($P<0.05$). Meanwhile, mycorrhiza (M) provided the highest phosphorus content in leaves (0.57%P) and seeds (0.51%P) ($P<0.05$). The total soluble solids (TSS) content was detected at the highest level in mycorrhiza, but no difference was observed with A + M + KSB (16.33 and 16.05 °Brix, respectively). Interestingly, A+M+KSB could gain the highest sweet corn yield at 1,540 kg rai⁻¹($P<0.05$).

Keywords: Bio-fertilizer, organic farming, sweet corn

¹ ภาควิชาปฐพีวิทยา คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

² สาขาวิชาปฐพีศาสตร์ คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่ 50290

¹ Department of Soil Science, Faculty of Agriculture, Kasetsart University, Bangkok 10900

² Program in Soil Science, Faculty of Agricultural Production, Maejo University, Chiang Mai 50290

* Corresponding author: inthasan@mju.ac.th

บทนำ

ข้าวโพดหวาน *Zea mays* L. *Var Saccharata*. เป็นพืชชนิดหนึ่งที่ปลูกเพื่อบริโภคและใช้เป็นวัตถุดิบในอุตสาหกรรม สามารถแปรรูปได้หลายรูปแบบ เช่น ข้าวโพดแช่แข็ง ข้าวโพดบรรจุกระป๋อง นิยมปลูกเนื่องจากเป็นพืชที่มีอายุการเก็บเกี่ยวสั้นและสามารถปลูกได้ตลอดทั้งปี จึงกลายเป็นพืชเศรษฐกิจที่ปลูกมากทั่วทั้งประเทศไทยให้ผลผลิตรวมทั้งประเทศในปี พ.ศ. 2563 อยู่ที่ 498,699 ตัน ซึ่งแหล่งเพาะปลูกส่วนใหญ่อยู่บริเวณภาคเหนือ มีผลผลิต 297,261 ตัน (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2563) การผลิตเพื่อให้ได้ผลผลิตที่คุณภาพดี ต้องพึ่งพาสารเคมีกำจัดแมลงศัตรูพืชและปุ๋ยเคมีเป็นจำนวนมาก อาจส่งผลกระทบต่อผู้ผลิตและผู้บริโภคที่จะได้รับการตกค้างของสารเคมีในพืชที่บริโภคเข้าไป ในช่วง 2-3 ปีที่ผ่านมาภาคการเกษตรของประเทศไทยประสบปัญหาปุ๋ยเคมีมีราคาเพิ่มสูงขึ้นจึงทำให้เกษตรกรต้องรับภาระต้นทุนการผลิตที่เพิ่มขึ้นซึ่งในระบบนิเวศมีจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ต่อพืช สามารถปลดปล่อยธาตุอาหารในดินจากรูปที่ไม่เป็นประโยชน์ให้อยู่ในรูปที่เป็นประโยชน์ เช่น จุลินทรีย์ที่ช่วยตรึงไนโตรเจนให้กับพืชโดยเปลี่ยนก๊าซไนโตรเจนในบรรยากาศเป็นแอมโมเนียม (NH_4^+) และไนเตรท (NO_3^-) ซึ่งพืชสามารถนำไปใช้ได้ทันที เช่น *Rhizobium* sp. มีลักษณะอยู่ร่วมกันแบบพึ่งพาอาศัยในรากพืชตระกูลถั่ว และ *Azotobacter*, *Azospirillum* ที่สามารถอาศัยอยู่ในดินและน้ำได้อย่างอิสระ (อรุณ ชาญชัยชาวีวัฒน์ และคณะ, 2559) เชื้อราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาที่ช่วยในการควบคุมโรคพืชทั้งทางตรงและทางอ้อม (ดุสิต อธิวัฒน์, 2556) และจุลินทรีย์ละลายโพแทสเซียมที่ช่วยทำให้สารประกอบอินทรีย์โพแทสเซียมที่อยู่ในแร่ที่มีโพแทสเซียมเป็นองค์ประกอบแตกตัวเพิ่มขึ้น เช่น *Aspergillus niger*, *Bacillus extroquens* และ *Clostridium pasteurianum* (Archana et al., 2013) การใช้จุลินทรีย์ร่วมด้วยในการผลิตพืชจะช่วยให้ความเป็นประโยชน์ของธาตุอาหารที่อยู่ในดินเพิ่มมากขึ้นนอกจากนี้ยังมีจุลินทรีย์ที่สามารถควบคุมโรคพืช เช่น เชื้อรา *Trichoderma* spp. และเชื้อแบคทีเรีย *Bacillus* spp. ที่สามารถทำลายหรือยับยั้งการเกิดโรครากเน่า (ประภาส กาวีชา และอภิเดช แสงดี, 2556) และเป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมอีกด้วย ซึ่งในปัจจุบันปุ๋ยเคมีที่เป็นปัจจัยหลักในการเพาะปลูกมีราคาที่สูงขึ้น จึงส่งผลให้ต้นทุนการผลิตของเกษตรกรเพิ่มขึ้น งานวิจัยในครั้งนี้จึงได้มีแนวคิดในการใช้ประโยชน์จากจุลินทรีย์ดินที่เป็นประโยชน์ต่อพืชมาทดแทนการใช้ปุ๋ยเคมีในการผลิตข้าวโพดหวานในระบบอินทรีย์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบการจัดการปุ๋ยชีวภาพชนิดต่าง ๆ ต่อการผลิตข้าวโพดหวานในระบบอินทรีย์

การทดลอง

1. พื้นที่การศึกษาและแผนการทดลอง

ศึกษาการใช้ปุ๋ยชีวภาพต่อการผลิตข้าวโพดหวานในระบบอินทรีย์ ดำเนินการในแปลงทดลองเกษตรอินทรีย์ของโครงการพัฒนานำร่องในเนื่องมาจากพระราชดำริ บ้านโป่ง อ.สันทราย จ.เชียงใหม่ ระหว่างเดือน เมษายน-มิถุนายน พ.ศ. 2562 การเตรียมแปลงปลูกขนาด 1×4 เมตร ใส่ปุ๋ยอินทรีย์อัดเม็ดรองกันหลุมอัตรา 400 กิโลกรัม/ไร่ หยอดเมล็ด 3 เมล็ด/หลุม เมื่ออายุได้ 2 สัปดาห์ ถอนให้เหลือ 1 ต้น โดยมีระยะปลูก 25×75 ซม. ให้น้ำด้วยระบบน้ำหยดวันละ 1 ครั้ง นาน 30 นาที และกำจัดวัชพืชด้วยมือสัปดาห์ละ 1 ครั้ง วางแผนการทดลองแบบสุ่มลงในบล็อกแบบสมบูรณ์ (Randomized Completely Block Design; RCBD) ประกอบด้วย 5 กรรมวิธี 4 ซ้ำ กรรมวิธีที่ 1 ควบคุม (ไม่ใส่ปุ๋ยชีวภาพ) กรรมวิธีที่ 2 ใส่ปุ๋ยชีวภาพ *Azotobacter* (A) กรรมวิธีที่ 3 ปุ๋ยชีวภาพ *Mycorrhiza* (M) จำนวน 300 สปอร์/ดิน 10 กรัม รองกันหลุมทุกหลุมในกรรมวิธีที่มีการใส่ *mucorrhiza* กรรมวิธีที่ 4 ปุ๋ยชีวภาพย่อยสลายโพแทสเซียม (*Potassium solubilizing bacteria*: KSB) กรรมวิธีที่ 5 ใส่ปุ๋ยชีวภาพ A + M + KSB กรรมวิธีที่ 2 และ 5 จะนำเมล็ดข้าวโพดมาคลุกกับปุ๋ยชีวภาพที่ทำการเตรียมในรูปแบบผงก่อนปลูก

โดยเชื้อ *Azotobacter* และ จุลินทรีย์ที่ย่อยสลายโพแทสเซียม แยกได้จากดินในแปลงทดลองเกษตรอินทรีย์ของโครงการพัฒนานำร่องในเนื่องมาจากพระราชดำริ บ้านโป่ง อ.สันทราย จ.เชียงใหม่ นำมาทำให้บริสุทธิ์ในอาหารแข็ง จากนั้นขยายหัวเชื้อด้วยอาหารเหลว Nutrient Broth; NB (Atlas, 2005) โดยเชื้อแต่ละชนิดจะนำมาคลุกกับพีทมอสเพื่อใช้เป็นปุ๋ยชีวภาพก่อนนำไปคลุกกับเมล็ดข้าวโพดหวานก่อนทำการปลูก โดยปุ๋ยชีวภาพ *Azotobacter* และ ปุ๋ยชีวภาพย่อยสลายโพแทสเซียม มีปริมาณจุลินทรีย์ 1×10^8 cfu/1 g

2. การเก็บตัวอย่างและการวิเคราะห์ดินและพืช

เก็บตัวอย่างดินก่อนปลูกและหลังการเก็บเกี่ยวแบบรวม (composite sample) ที่ระดับความลึก 0-15 และ 15-30 ซม. ตากไว้ในที่ร่ม (air-dried) บดและร่อนผ่านตะแกรงร่อนขนาด 0.5 และ 2.0 มม. วิเคราะห์ความเป็นกรด-ด่างของดินด้วย pH meter ในอัตราส่วนดินต่อน้ำ 1:1 (Wayne, 1980) ปริมาณอินทรีย์วัตถุวิเคราะห์โดยใช้วิธี Walkley and Black (FAO, 2008) วิเคราะห์หาปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินด้วยน้ำยาสกัด Bray II (Watanabe & Olsen, 1962) การวิเคราะห์หาปริมาณโพแทสเซียม แคลเซียมและแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินด้วยน้ำยาสกัดแอมโมเนียม

มอะซีเทต (NH_4OAc pH 7) (FAO, 2008) ปริมาณเหล็ก แมงกานีส สังกะสีและทองแดงที่สกัดได้ในดินสกัดด้วยน้ำยาสกัด DTPA (Diethylene Triamine Penta Acetic acid) แล้วนำไปอ่านด้วยเครื่อง atomic absorption spectrophotometer (Wayne, 1980)

เก็บตัวอย่างใบข้าวโพดในระยะฝักติดใหม่ โดยเลือกเก็บใบที่ 2 นับจากฝักและเก็บตัวอย่างข้าวโพดหวานที่ระยะเก็บเกี่ยวคือ 60-65 วัน หลังปลูก ล้างด้วยน้ำสะอาดและชะด้วยน้ำกลั่น นำมาอบในที่อุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส ($^{\circ}\text{C}$) นาน 48 ชั่วโมง เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณไนโตรเจน (Kjeldahl method) ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม เหล็ก แมงกานีส สังกะสี และทองแดง โดยวิธีการย่อยด้วยกรดไนตริก: เปอร์คลอริก กรองด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 (whatman) เก็บสารละลายไว้วิเคราะห์ธาตุต่าง ๆ (Wayne, 1980) การเก็บเกี่ยวผลผลิต เก็บผลผลิตข้าวโพดที่มีอายุ 60-65 วัน และวัดปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ในเมล็ดข้าวโพด (total soluble solid: TSS ($^{\circ}\text{Brix}$)) หลังเก็บทันที โดยใช้เครื่องวัดแบบ Hand refractometer ยี่ห้อ Atago รุ่น N-10X จากนั้นนำเมล็ดข้าวโพดมาอบที่อุณหภูมิ 70°C เมื่อแห้งแล้วนำไปบดเพื่อวิเคราะห์สมบัติทางเคมีเช่นเดียวกับตัวอย่างใบข้าวโพด

วิเคราะห์ความแปรปรวนโดยวิธี Analysis of variance (ANOVA) เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Least significant difference (LSD) กำหนดความเชื่อมั่นทางสถิติที่ระดับที่ระดับ 95 เปอร์เซ็นต์ ด้วยโปรแกรม Statistix 10

ผลการทดลองและอภิปรายผล

1. สมบัติทางเคมีดินบางประการของดินก่อนการทดลอง

สมบัติทางเคมีดินก่อนการทดลองที่ระดับความลึกที่ 0-15 และ 15-30 ซม. มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) คือ 5.18 และ 5.55 ปริมาณอินทรีย์วัตถุคือ 2.12 และ 1.43% มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน 77 และ 62 มก/กก. ปริมาณโพแทสเซียม แคลเซียมและแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินคือ 206, 1,792 และ 215 มก/กก. ในดินระดับบน และ 100, 1,210 และ 98 มก/กก. ในดินระดับล่างตามลำดับ ปริมาณเหล็ก แมงกานีส ทองแดงและสังกะสีที่สกัดได้ในดินคือ 63, 37.4, 2.46 และ 2.36 มก/กก. ในดินระดับบน และ 45, 22.4, 1.56 และ 1.72 มก/กก. ในดินระดับบนตามลำดับ (Table 1)

2. สมบัติทางเคมีดินหลังการเก็บเกี่ยว

สมบัติทางเคมีดินหลังการเก็บเกี่ยวข้าวโพดหวานในระบบอินทรีย์ของดินพบว่า ค่าความเป็นกรด-ด่างและปริมาณอินทรีย์วัตถุในดินทั้งสองระดับความลึกไม่มีความแตกต่างกันในทางสถิติระหว่างดำรับทดลอง ซึ่งกรรมวิธีที่ใส่ปุ๋ยชีวภาพทุกชนิดส่งผลให้ปริมาณความเป็นกรด-ด่างของดินมีค่าเพิ่มขึ้น จาก 5.18 เป็น 5.70-5.84 ในดินระดับบน ซึ่งอาจเป็นผลจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ดินจากกรรมวิธีทดลอง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Iwuagwu *et al.* (2013) ที่ศึกษาผลของการใช้จุลินทรีย์ Azotobacter, Azospirillum และ Phosphate solubilizing micro-organism ที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของข้าวโพดหวาน มีค่าความเป็นกรด-ด่างอยู่ที่ 5.04 และปริมาณอินทรีย์วัตถุเฉลี่ยอยู่ที่ 2.12% ในดินระดับบนโดยมีค่าลดลงจากดินก่อนการทดลองเล็กน้อย ซึ่งมีปริมาณอินทรีย์วัตถุต่ำกว่างานทดลองของ Hu *et al.* (2014) ที่ศึกษาผลของการใช้อาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาในการเจริญเติบโตของข้าวโพดและข้าวสาลีมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 4.57% ส่วนปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน พบว่าที่ระดับความลึก 0-15 ซม. กรรมวิธีที่ใส่ปุ๋ยชีวภาพส่งผลให้มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินมากกว่ากรรมวิธีควบคุม โดยกรรมวิธีที่ใส่ปุ๋ยชีวภาพ A+M+KSB ส่งผลให้มีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินคือ 70 มก/กก. ($P < 0.05$) สอดคล้องกับงานวิจัย Dhawi *et al.* (2015) พบว่าการใส่ปุ๋ยชีวภาพ Mycorrhiza และ Plant growth promoting bacteria (PGPB) ทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดินมีค่ามากกว่ากรรมวิธีที่ไม่ใส่ปุ๋ยชีวภาพ เนื่องจากเชื้อจุลินทรีย์ที่เติมลงในดินจะมีการผลิตและปลดปล่อยกรดอินทรีย์ซึ่งสามารถส่งเสริมการละลายธาตุอาหารพืชที่อยู่ในดิน (กนกกร สินมา, 2558) ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน พบว่ากรรมวิธีที่ใส่ปุ๋ยชีวภาพทุกกรรมวิธีส่งผลให้ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินมีค่าสูงกว่ากรรมวิธีที่ไม่ใส่ปุ๋ยชีวภาพ สอดคล้องกับงานทดลองของ วรวิทย์ วิเชียรเขต และจิราภรณ์ อินทสาร (2560) ที่ศึกษาการใช้เชื้อจุลินทรีย์แบบที่เรี่ยย่อยสลายฟอสเฟตต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีดินบางประการของ ข้าวโพดหวานพันธุ์หวานแม่โจ้ 80 พบว่าปริมาณ โพแทสเซียมที่สกัดได้ในดินในกรรมวิธีที่ใส่แบคทีเรียสลายฟอสเฟตมีค่าสูงกว่าดำรับควบคุมคือ (119 มก/กก. และ 112 มก/กก. ตามลำดับ) จากผลการทดลองโดยภาพรวมจะพบว่ากรรมวิธีที่ใส่ปุ๋ยชีวภาพ A+M+KSB มีผลทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมในดินสูงกว่ากรรมวิธีควบคุมและกรรมวิธีที่มีการใส่จุลินทรีย์ชนิดเดียว ซึ่งอาจเกิดจากข้อดีของกลไกการทำงานร่วมกันของจุลินทรีย์

ทั้งกลุ่มของเชื้อราไมคอร์ไรซาและแบคทีเรีย (Oliveira *et al.*, 2015) ส่วนปริมาณแคลเซียมและแมกนีเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดินระดับทั้งสองระดับไม่มีความแตกต่างในทางสถิติระหว่าง

ดำรับกรรมวิธีทดลอง สำหรับปริมาณธาตุอาหารเสริมที่สกัดได้ในดินทั้งสองระดับความลึกทุกกรรมวิธีการทดลองไม่มีความแตกต่างในทางสถิติ (Table 2)

Table 1 Soil chemical properties before starting experiment.

Soil Depth	pH	OM (%)	P (-----mg kg ⁻¹ -----)	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
0-15	5.18	2.12	77	206	1,792	215	63	37.4	2.46	2.36
15-30	5.55	1.43	82	100	1,210	98	45	22.4	1.56	1.72

Table 2 Soil chemical properties at 0-15 and 15-30 cm soil depth after harvesting.

Treatment	pH	OM (%)	P (-----mg kg ⁻¹ -----)	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
Top Soil 0-15 cm										
C	5.54	2.07	37 C	143 B	1,576	218	61	26	1.83	2.05
A	5.79	2.00	48 BC	148 AB	1,534	244	84	25	1.70	2.11
M	5.84	2.17	62 AB	145 B	1,533	220	75	27	1.90	2.51
KSB	5.74	2.28	56 AB	149 AB	1,556	238	85	26	2.00	2.46
A+M+KSB	5.70	2.15	70 A	153 A	1,571	245	85	27	1.90	2.37
Grand Mean	5.72	2.12	54	147	1,554	233	78	26	1.87	2.30
%CV	2.87	13.09	21.84	9.73	6.61	12.51	24	7.12	16.13	18.82
F-test	NS	NS	*	*	NS	NS	NS	NS	NS	NS
Sub Soil 15-30 cm										
C	5.77	1.38	25	139	1,532	207	54	23	0.83	1.67
A	5.83	1.66	38	159	1,522	226	69	25	0.95	1.89
M	5.81	1.50	42	143	1,543	230	50	22	0.90	1.66
KSB	5.76	1.48	36	151	1,409	198	59	21	0.90	1.91
A+M+KSB	5.69	1.55	42	162	1,436	206	72	28	0.90	1.73
Grand mean	5.77	1.51	37	151	1,488	213	61	24	0.90	1.77
%CV	2.09	16.78	39.60	11.50	8.61	16.18	30.88	35.58	24.73	30.75
F-test	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

Note: C: control, A: azotobacter, M: mycorrhiza, KSB: potassium solubilizing bacteria, M+A+KSB: mycorrhiza + azotobacter + potassium solubilizing bacteria. Means in the same column followed by different letters were significantly different by LSD *= 0.05 and NS = nonsignificant

3. ปริมาณธาตุอาหารของใบข้าวโพดหวานในระยะฝักติดใหม่

ปริมาณธาตุอาหารในใบข้าวโพดที่ระยะฝักติดใหม่ ปริมาณไนโตรเจนในใบข้าวโพด พบว่ากรรมวิธีที่ใส่ปุ๋ยชีวภาพทำให้ปริมาณไนโตรเจนในใบข้าวโพดมีค่าเพิ่มขึ้นจากกรรมวิธีควบคุม โดยกรรมวิธีที่ใส่ปุ๋ยชีวภาพ azotobacter ส่งผลให้ในใบมีปริมาณไนโตรเจนสูงสุด คือ 2.47 %N ($P < 0.05$) ซึ่งมีความแตกต่างในทางสถิติกับทุกตำรับทดลองยกเว้นการใส่ปุ๋ยชีวภาพ KSB สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ahmad *et al.* (2013) การใส่เชื้อจุลินทรีย์ที่ส่งผลให้ปริมาณไนโตรเจนในใบของถั่วเขียวเพิ่มขึ้นจากกรรมวิธีควบคุม (ไม่ใส่เชื้อจุลินทรีย์)

ซึ่งจากการศึกษาของ Polcyn *et al.* (2019) พบว่าการใส่เชื้อรา arbuscular mycorrhiza นั้นทำให้ปริมาณไนโตรเจนในใบเพิ่มขึ้น และยังส่งผลให้ปริมาณฟอสฟอรัสในใบข้าวโพดมีค่าเพิ่มขึ้นจากการดำรับควบคุม เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับงานทดลองนี้ที่พบว่าการใส่ปุ๋ยชีวภาพ mycorrhiza ทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสในใบข้าวโพดมีค่าสูงสุดคือ 0.57 %P ($P < 0.05$) ส่วนปริมาณแคลเซียม แมกนีเซียม เหล็ก แมงกานีส สังกะสีและทองแดงในใบข้าวโพด ไม่มีทำให้การใส่ปุ๋ยชีวภาพมีความแตกต่างกันในทางสถิติระหว่างกรรมวิธีการทดลอง การทำงานของไมคอร์ไรซาไม่เพียงแต่จะเพิ่มความสามารถในการดูดฟอสฟอรัสแต่ยังสามารถเพิ่มประโยชน์ของธาตุอาหารตัวอื่น ๆ ได้อีกด้วย (Meng *et al.*, 2015) (Table 3)

Table 3 Effect of Bio-fertilizer on nutrient concentration of leaf sample at heading stage.

Treatment	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
	(-----%-----)					(-----mg kg ⁻¹ -----)			
C	1.93 B	0.29 C	2.31	0.38	0.17	75	35	14	4.7
A	2.47 A	0.42 BC	2.50	0.38	0.15	77	30	16	4.5
M	2.10 B	0.57 A	2.84	0.40	0.15	76	29	20	4.7
KSB	2.30 AB	0.45 AB	2.72	0.40	0.14	76	32	18	5.0
A+M+KSB	2.05 B	0.46 AB	2.80	0.41	0.14	77	30	17	4.8
Grand mean	2.20	0.44	2.63	0.39	0.15	76	31	17	4.7
CV	9.75	21.30	12.01	10.04	16.76	19.47	12.73	19.47	19.29
F-test	*	*	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

Note: C: control, A: azotobacter, M: mycorrhiza, KSB: potassium solubilizing bacteria, M+A+KSB : azotobacter + mycorrhiza + potassium solubilizing bacteria. Means in the same column followed by different letters were significantly different by LSD *= 0.05 and NS = nonsignificant

4. ปริมาณธาตุอาหารในเมล็ดข้าวโพดหวาน

ปริมาณธาตุอาหารสะสมในเมล็ดข้าวโพดหวาน พบว่าปริมาณไนโตรเจนในเมล็ดข้าวโพดของกรรมวิธีที่ใส่ปุ๋ยชีวภาพ azotobacter ทำให้ปริมาณไนโตรเจนสูงสุด คือ 2.45 %N ($P<0.05$) ปริมาณฟอสฟอรัสในเมล็ดข้าวโพด จากกรรมวิธีที่ใส่ปุ๋ยชีวภาพ mycorrhiza และ กรรมวิธีที่ใส่ปุ๋ยชีวภาพ A+M+KSB ส่งผลให้มีปริมาณฟอสฟอรัสสูงกว่ากรรมวิธีอื่นคือ 0.51 และ 0.50%P ($P<0.05$) ซึ่งมีค่าสูงกว่างานทดลองของ Sabia *et al.* (2015) ที่ทำการคลุกเชื้อ mycorrhiza ร่วมกับ

เมล็ดข้าวโพดก่อนปลูก ทำให้มีปริมาณฟอสฟอรัสในใบอยู่ที่ 0.14% และในเมล็ดข้าวโพดอยู่ที่ 0.46% ในส่วนของปริมาณโพแทสเซียมในเมล็ดข้าวโพด พบว่ากรรมวิธีที่ใส่ปุ๋ยชีวภาพมีปริมาณโพแทสเซียมในเมล็ดข้าวโพดสูงกว่ากรรมวิธีควบคุม (ไม่ใส่ปุ๋ยชีวภาพ) โดยการใส่ปุ๋ยชีวภาพ KSB มีค่าสูงสุด คือ 1.44 %K แต่ไม่มีความแตกต่างในทางสถิติ ส่วนปริมาณแคลเซียม และแมกนีเซียมในเมล็ด และปริมาณธาตุอาหารเสริมในเมล็ดข้าวโพด ไม่มีความแตกต่างในทางสถิติระหว่างกรรมวิธีทดลอง (Table 4)

Table 4 Effect of Bio-fertilizer on nutrient concentration of seed sample at heading stage

Treatment	N	P	K	Ca	Mg	Fe	Mn	Cu	Zn
	(-----%-----)					(-----mg kg ⁻¹ -----)			
C	1.57 C	0.39 B	1.20	0.34	0.11	15	6.3	32	3.25
A	2.45 A	0.48 B	1.21	0.35	0.12	12	6.8	37	3.26
M	2.00 B	0.51 A	1.33	0.38	0.15	14	6.2	31	3.27
KSB	2.00 B	0.46 B	1.44	0.33	0.11	14	6.7	32	3.21
A+M+KSB	2.05 B	0.50 A	1.29	0.33	0.11	13	6.3	33	3.10
Grand mean	2.00	0.47	1.29	0.35	0.12	13	6.5	32	3.22
CV	17.21	9.93	13.63	19.02	19.51	14.43	14.43	13.65	14.24
F-test	*	*	NS	NS	NS	NS	NS	NS	NS

Note: C: control, A: azotobacter, M: mycorrhiza, KSB: potassium solubilizing bacteria, M+A+KSB: azotobacter + mycorrhiza + potassium solubilizing bacteria. Means in the same column followed by different letters were significantly different by LSD *= 0.05 and NS = nonsignificant

5. ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในเมล็ดข้าวโพด และผลผลิตของข้าวโพด

จากการทดลองพบว่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ กรรมวิธีที่ใส่ปุ๋ยชีวภาพ mycorrhiza และกรรมวิธีที่ใส่ปุ๋ยชีวภาพ A+M+KSB ส่งผลให้มีปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้สูงกว่ากรรมวิธีอื่นคือ 16.33 และ 16.06 °Brix

($P<0.05$) (Figure 1) และพบว่ากรรมวิธีควบคุมมีปริมาณของแข็งที่ละลายได้น้อยกว่ากรรมวิธีอื่น ๆ ซึ่งปริมาณของแข็งที่ละลายได้จากงานทดลองครั้งนี้มีค่าสูงกว่างานทดลองของ เสาวลักษณ์ บุญเย็น และจิราภรณ์ อินทสาร (2559) ที่ศึกษาผลของการใช้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยอินทรีย์ในการผลิตข้าวโพดหวาน พันธุ์ไฮบริด 53 มีปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้เฉลี่ย

คือ 11.46 °Brix นอกจากนี้ยังพบว่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้จากงานทดลองครั้งนี้สูงกว่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในข้าวโพดหวานที่มีการใช้ปุ๋ยโพแทสเซียมที่ทำการทดสอบในพื้นที่จังหวัดลำปางที่มีค่าเฉลี่ยปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้อยู่เพียง 13.89 °Brix (ประภัสสร เจริญไทย และชูชาติ สันทรทรัพย์, 2561) จากผลการทดลองจะพบว่ากรรมวิธีที่มีการใส่ไมคอร์ไรซามีการตอบสนองของปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้มากกว่ากรรมวิธีอื่น ซึ่งอาจเป็นผลจากปริมาณฟอสฟอรัสที่สะสมทั้งในส่วนของใบและเมล็ดที่มากกว่ากรรมวิธีอื่นไปช่วยในการลำเลียงซูโครสเข้าสู่ฟลูอิดด้วยกระบวนการสังเคราะห์เอ็กโซส ซึ่งสามารถใช้พลังงานที่ได้มาลำเลียงซูโครสเข้าสู่ฟลูอิดได้ (ยงยุทธ โอสถสกา, 2558)

สำหรับปริมาณผลผลิตของข้าวโพดหวาน กรรมวิธีที่ใส่ปุ๋ยชีวภาพส่งผลให้มีปริมาณผลผลิตข้าวโพดหวานสูงกว่าตำรับควบคุม พบว่ากรรมวิธีที่ใส่ปุ๋ยชีวภาพ A+M+KSB ทำให้มีปริมาณผลผลิตข้าวโพด 1,504 กก./ไร่ แต่ไม่แตกต่างกับ

กรรมวิธีที่ใส่ปุ๋ยชีวภาพ mycorrhiza และกรรมวิธีที่ใส่ปุ๋ยชีวภาพ KSB เพียงอย่างเดียว ($P < 0.05$) สอดคล้องกับ สิริพร สิริชัยเวชกุล และคณะ (2564) ได้ศึกษาชนิดของเชื้อราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาที่ส่งผลต่อผลผลิตของข้าวโพดหวาน พบว่ากรรมวิธีที่มีการเติมเชื้อราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซามีปริมาณผลผลิตสูงกว่ากรรมวิธีควบคุม และกรรมวิธีที่ใส่ปุ๋ยเคมี เฉลี่ย 1,156-1,547 กก./ไร่ ขณะที่ ยูวรี ละโพธิ์ และคณะ (2564) พบว่าการใส่ปุ๋ยไนโตรเจนร่วมกับจุลินทรีย์ฟิซีฟิอาร์ ทำให้ปริมาณผลผลิตข้าวโพดหวาน มีค่าเฉลี่ย สูงกว่างานทดลองครั้งนี้คือ 2,251 กก./ไร่ ซึ่งอาจเป็นผลของความแตกต่างของจุลินทรีย์ที่ใช้และสายพันธุ์ของข้าวโพดหวานในการทำการทดสอบ จากข้อมูลดังกล่าวพบว่า การนำปุ๋ยชีวภาพมาปรับใช้ร่วมกับการผลิตข้าวโพดหวานในระบบอินทรีย์ สามารถทำให้ผลผลิตของข้าวโพดหวานสูงกว่าตำรับควบคุม ซึ่งไม่มีการใส่เชื้อจุลินทรีย์หรือปุ๋ยชีวภาพอย่างมีความแตกต่างในทางสถิติ

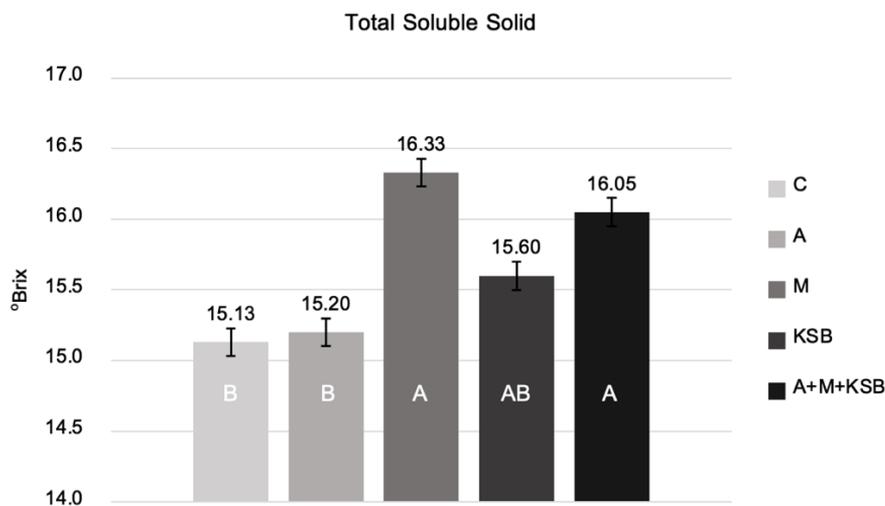


Figure 1 Effect of Bio-fertilizer on Total Soluble Solid: °Brix. C: control, A: azotobacter, M: mycorrhiza, KSB: potassium solubilizing bacteria, M+A+KSB: azotobacter + mycorrhiza + potassium solubilizing bacteria. Different letters indicate significant ($p < 0.05$) differences between treatments.

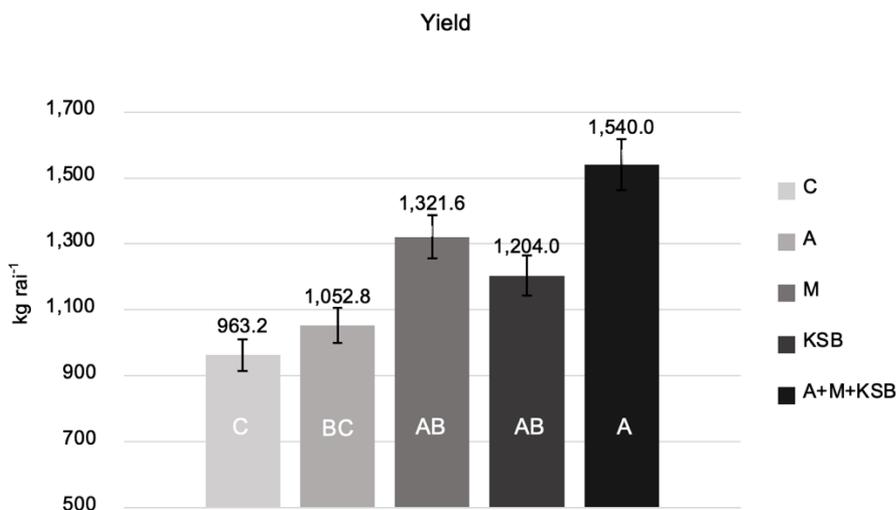


Figure 2 Effect of Bio-fertilizer on Sweet Corn Yield (kg rai⁻¹). C: control, A: azotobacter, M: mycorrhiza, KSB: potassium solubilizing bacteria, M+A+KSB: azotobacter + mycorrhiza + potassium solubilizing bacteria. Different letters indicate significant ($p < 0.05$) differences between treatments.

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

การใช้ปุ๋ยชีวภาพทั้ง 3 กรรมวิธีทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในดิน ปริมาณโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ในดิน ปริมาณธาตุอาหารรอง และธาตุอาหารเสริมเพิ่มสูงขึ้นจากกรรมวิธีควบคุม กรรมวิธีที่มีการใส่ปุ๋ยชีวภาพ azotobacter ทำให้ปริมาณไนโตรเจนในใบข้าวโพดระยะฝักติดใหม่และเมล็ดข้าวโพดหวานมีค่าสูงที่สุด กรรมวิธีที่มีการใส่ปุ๋ยชีวภาพ mycorrhiza ทำให้ปริมาณฟอสฟอรัสในใบข้าวโพดระยะฝักติดใหม่และเมล็ดข้าวโพดหวานมีค่าสูงที่สุด และยังทำให้ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ในเมล็ดข้าวโพดสูงที่สุด กรรมวิธีที่ใส่ปุ๋ยชีวภาพ A+M+KSB ทำให้ผลผลิตข้าวโพดหวานสูงกว่าทุกกรรมวิธี การผลิตข้าวโพดหวานระบบอินทรีย์ในพื้นที่ทดสอบนี้สามารถนำไปเป็นแนวทางประยุกต์ใช้กับพื้นที่อื่น โดยพบว่าปุ๋ยชีวภาพทั้งสามกลุ่มมีผลในทิศทางบวกกับการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าวโพดหวาน

เอกสารอ้างอิง

- กนกกร สินมา. (2558). จุลินทรีย์ในดินประโยชน์ที่ไม่อาจมองข้าม. *วารสารดินและปุ๋ย*, 37(1), 78-81.
- ดุสิต อธิวุฒินัน. (2556). จุลินทรีย์ที่มีประโยชน์ด้านการเกษตร. *Thai Journal of Science and Technology*, 2(1), 18-35.
- ประภาษ กาวีชา และอภิเดช แสงดี. (2556). การควบคุมโรคพืชโดยใช้จุลินทรีย์ปฏิปักษ์. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม*, 32(2), 220-229.

ประภัสสร เจริญไทย และชูชาติ สันทรทรัพย์. (2561). ผลของปุ๋ยโพแทสเซียมต่อคุณภาพและผลผลิตข้าวโพดหวานที่ปลูกในพื้นที่อำเภองาว จังหวัดลำปาง. *วารสารเกษตร*, 34(1), 29-40.

ยงยุทธ โอสภสภ. (2558). *ธาตุอาหารพืช* (พิมพ์ครั้งที่ 4). สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.

ยุวรี ละโพธิ์, จรรยา สิงห์คทา และ วณาลัย วิริยะสุธี. (2564). ผลของปุ๋ยชีวภาพพีจีพีอาร์-1 ร่วมกับปุ๋ยเคมีต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าวโพดหวาน ในอำเภอกุดรัง จังหวัดมหาสารคาม. ใน *การประชุมเสนอผลงานวิจัยระดับชาติ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช ครั้งที่ 11* (น. 1823-1836).

วรวิทย์ วิเชียรเขต และจิราภรณ์ อินทสาร. (2560). ผลของเชื้อแบคทีเรียย่อยสลายฟอสเฟตต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของดินบางประการและปริมาณธาตุอาหารในข้าวโพดหวาน พันธุ์หวานแม่ใจ 80. *วารสารวิจัยและส่งเสริมการเกษตร*, 34(1), 13-24.

สิริพร สิริชัยเวชกุล, นิจพร ณ พัทลุง, สำราญ มากมาย และ วรุต กริ่งไกร. (2564). ผลของเชื้อราอาร์บัสคูลาร์ไมคอร์ไรซาร่วมต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าวโพดหวาน ภายใต้สภาวะธรรมชาติ. *วารสารเกษตรพระจอมเกล้า*, 39(2), 89-94.

เสาวลักษณ์ บุญเย็น และจิราภรณ์ อินทสาร. (2559). ผลของการใช้ปุ๋ยเคมีและปุ๋ยอินทรีย์ต่อความอุดมสมบูรณ์ของดินและผลผลิตของข้าวโพดหวาน พันธุ์ไฮบริด 53 อำเภอแม่วาง จังหวัดเชียงใหม่. *วารสารวิจัยและส่งเสริมวิชาการ*

- เกษตร, 32(1), 17-27.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2563). ข้าวโพดหวาน: เปรียบเทียบเนื้อหาที่เพาะปลูกเนื้อที่เก็บเกี่ยวผลผลิตและผลผลิตต่อไร่ รายภาค และรายจังหวัด. <https://www.oae.go.th/assets/portals/1/fileups/prcaidata/files/sweet%20corn63.pdf>
- อรุณ ช่างชัยเชาว์วิวัฒน์, สุวินัย เกิดทับทิม และสมเกียรติ พรพิสุทธิมาศ. (2559). การนำจุลินทรีย์มาใช้ประโยชน์ในระบบเกษตรกรรมแบบยั่งยืน. วารสารหน่วยวิจัยวิทยาศาสตร์เทคโนโลยี และสิ่งแวดล้อมเพื่อการเรียนรู้, 7(2), 398-413.
- Ahmad, M., Zahir, Z. A., Khalid, M., Nazli, F., & Arshad, M. (2013). Efficacy of Rhizobium and Pseudomonas strains to improve physiology, ionic balance and quality of mung bean under salt-affected conditions on farmer's fields. *Plant Physiology and Biochemistry*, 63, 170-176.
- Archana, D., Nandish, M. S., Savalagi, V., & Alagawadi, A. R. (2013). Characterization of potassium solubilizing bacteria (KSB) from rhizosphere soil. *Bioinfolet*, 10(1), 248-257.
- Atlas, R. M. (2005). *Handbook of media for environmental microbiology* (2nd ed.). CRC Press.
- Dhawi, F., Datta, R., & Ramakrishna, W. (2015). Mycorrhiza and PGPB modulate maize biomass, nutrient uptake and metabolic pathways in maize grown in mining-impacted soil. *Plant Physiology and Biochemistry*, 97, 390-399.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations. (2008). *FAO fertilizer and plant nutrition bulletin*.
- Hu, J., Cui, X., Dai, J., Wang, J., Chen, R., Yin, R., & Lin, X. (2014). Interactive effects of arbuscular mycorrhiza and maize (*Zea mays* L.) straws on wheat (*Triticum aestivum* L.) growth and organic carbon storage in a sandy loam soil. *Soil & Water Research*, 9(3), 119-126.
- Iwuagwu, M., Chukwuka, K. S., Uka, U. N., & Amandianeze, M. C. (2013). Effects of biofertilizers on the growth of *Zea mays* L. *Asian Journal of Microbiology, Biotechnology & Environmental Sciences*, 15(2), 235-240.
- Meng, L., Zhang, A., Wang, F., Han, X., Wang, D., & Li, S. (2015). Arbuscular mycorrhizal fungi and rhizobium facilitate nitrogen uptake and transfer in soybean/maize intercropping system. *Frontiers in Plant Science*, 6, Article 369. <https://doi.org/10.3389/fpls.2015.00369>
- Oliveira, F. L. N., Stamford, N. P., Neto, D. S., Oliveira, E. C. A., Oliveira, W. S., & Santos, C. E. R. S. (2015). Effects of biofertilizers produced from rocks and organic matter, enriched by diazotrophic bacteria inoculation on growth and yield of sugarcane. *Australian Journal of Crop Science*, 9(6), 504-508.
- Polcyn, W., Paluch-lubawa, E., Lehmann, T., & Mikula, R. (2019). Arbuscular mycorrhiza in highly fertilized maize cultures alleviates short-term drought effects but does not improve fodder yield and quality. *Frontiers in Plant Science*, 10, Article 496. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00496>
- Sabia, E., Claps, S., Morone, G., Bruno, A., Sepe, L., & Aleandri, R. (2015). Field inoculation of arbuscular mycorrhiza on maize (*Zea Mays* L.) under low inputs: Preliminary study on quantitative and qualitative aspects. *Italian Journal of Agronomy*, 10(1), 30-33.
- Watanabe, F. S., & Olsen, S. R. (1962). Colorimetric determination of phosphorus in water extracts of soil. *Soil Science*, 93(3), 183-188.
- Wayne, E. S. (1980). *Handbook on reference method for soil testing*. Council on Soil Testing and Plant Analysis, University of Georgia.

การประยุกต์ใช้เซลลูโลสฟอสเฟตจากชานอ้อยสำหรับการดูดซับเหล็ก

Application of cellulose phosphate from bagasse for iron adsorption of iron metals

วียารัตน์ กุมุทานาต¹, ศักดิ์ชัย หงษ์ทอง¹ และ ปรัชญา วาทะสิทธิ์^{1*}

Wiyarat Kumutanat¹, Sakchai Hongthong¹ and Prachya Watasit^{1*}

Received: 29 August 2024 ; Revised: 2 October 2024 ; Accepted: 13 November 2024

บทคัดย่อ

ชานอ้อยเป็นของเสียได้จากกระบวนการผลิตน้ำตาล ชานอ้อยบางส่วนใช้เป็นอาหารสัตว์ ส่วนใหญ่ใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวล นอกจากนี้ชานอ้อยยังเป็นแหล่งของเซลลูโลสตามธรรมชาติซึ่งสามารถเปลี่ยนเป็นเซลลูโลสฟอสเฟตที่มีความสามารถในการดูดซับไอออนได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ในการสังเคราะห์เซลลูโลสฟอสเฟตจากชานอ้อย เพื่อใช้เป็นวัสดุดูดซับไอออนเหล็กที่มีประสิทธิภาพสูง ขั้นตอนแรกทำการสกัดเซลลูโลสจากชานอ้อย สังเคราะห์เซลลูโลสฟอสเฟตโดยปฏิกิริยาฟอสโฟรีเลชันที่อุณหภูมิที่แตกต่างกัน (100, 120, 150 และ 180 องศาเซลเซียส) ผลการทดลองพบว่าสามารถเตรียมเซลลูโลสได้ร้อยละ 38.28 โดยน้ำหนัก การใช้อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส ในขั้นตอนการสังเคราะห์ ได้ปริมาณฟอสเฟตมากที่สุดร้อยละ 7.67 โดยน้ำหนักของเซลลูโลสฟอสเฟต วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของเซลลูโลสฟอสเฟตด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared (FTIR) spectroscopy ผลปรากฏว่าการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่เลขคลื่น 900-1000 ต่อเซนติเมตร และ 810 ต่อเซนติเมตร สอดคล้องกับการสั่นของพันธะ P-OH และพันธะ P-O-C ตามลำดับ ศึกษาสัณฐานวิทยาของสารตัวอย่างด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope พบว่าเมื่ออุณหภูมิในการสังเคราะห์สูงขึ้นส่งผลให้พื้นผิวสารตัวอย่างแตกหักเป็นชิ้นเล็ก ๆ ด้วยเหตุนี้ทำให้ตัวดูดซับเซลลูโลสฟอสเฟตที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส สามารถดูดซับไอออนเหล็กได้ร้อยละ 88.60 สำหรับการทดลองแบบเขย่า กวน จากผลการทดสอบดูดซับในระบบคอลัมน์ พบว่าตัวดูดซับชนิดนี้สามารถดูดซับไอออนเหล็กได้ 100% หลังจากการทดสอบในคอลัมน์ที่สอง โดยสมมูลการดูดซับเป็นไปตามแบบจำลองของฟลูนิตซ์ ดังนั้นตัวดูดซับเซลลูโลสฟอสเฟตจากชานอ้อยมีประสิทธิภาพในการประยุกต์ใช้กำจัดไอออนเหล็กในน้ำเสียได้

คำสำคัญ: เซลลูโลสฟอสเฟต, ฟอสโฟรีเลชัน, ชานอ้อย, โลหะเหล็ก, การดูดซับ

Abstract

Bagasse is a waste material obtained from the sugar production process. Some parts of bagasse are used for animal feed production, while most of them are used to produce biofuel. In addition, bagasse is a source of natural cellulose, which can be modified to be cellulose phosphate for metal adsorption. Accordingly, this research aims to synthesize cellulose phosphate from bagasse waste for using as a highly efficient Fe metal absorbent material. In the first step, cellulose was extracted from bagasse. The cellulose phosphate was synthesized via phosphorylation reaction at different temperatures (100, 120, 150 and 180 °C). The results showed that cellulose could be prepared at 38.28% by weight. Using a temperature at 180 °C provided the maximum amount of phosphate as 7.67% by weight of cellulose phosphate. Functional groups of the cellulose phosphate were analyzed by the Fourier Transform Infrared (FTIR) spectroscopy technique. The results showed that the infrared absorption at wavenumbers of 900-1000 cm^{-1} and 810 cm^{-1} correspond to the vibration of P-OH bond and P-O-C bond, respectively. The morphology of the samples was examined using the Scanning Electron Microscopy (SEM) technique. It was found that increasing the reaction

¹ สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์ เบอร์โทรศัพท์ (038) 500000 Email science@rru.ac.th

¹ Department of Chemistry, Faculty of Science and Technology, Rajabhat Rajanagarindra University, Phone number (038) 500000 Email science@rru.ac.th

* Corresponding author: Email prachya.wa@gmail.com

temperature caused the surface of the samples to be broken into small pieces. For this reason, the cellulose phosphate adsorbent synthesized at 180 °C was able to adsorb 88.60% of ferrous ions in a shaking experiment. For adsorption testing in a column system found that this adsorbent was able to adsorb 100% of ferrous ions after testing with a second consecutive column. The adsorption isotherm follows the Flundlich model. Therefore, the cellulose phosphate adsorbent is effectively applied to remove ferrous ion in wastewater.

Keywords: Cellulose phosphate, phosphorylation, bagasse, iron ion, adsorption

บทนำ

การขยายตัวทางธุรกิจและเศรษฐกิจที่รวดเร็วในปัจจุบัน โดยเฉพาะในภาคอุตสาหกรรม เช่น การแปรรูปอาหารยานยนต์ อิเล็กทรอนิกส์ เชื้อเพลิงชีวภาพ และการผลิตโลหะหรือแบตเตอรี่ ได้สร้างความก้าวหน้าและการพัฒนาในหลายๆ ด้าน (กานต์มณี ทองศรี และคณะ, 2561) แต่ก็ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมอย่างสำคัญอีกปัญหาหนึ่งที่เกิดขึ้นคือ การปล่อยน้ำเสียที่มีการปนเปื้อนของโลหะหนัก ซึ่งอาจเกิดจากการผลิตโลหะเหล็กและอื่นๆ ส่งผลให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมที่ต้องให้ความสำคัญ ในชีวิตประจำวันการดำรงชีวิตของมนุษย์และสิ่งมีชีวิตทุกชนิดต้องการทรัพยากรน้ำอย่างหลีกเลี่ยงไม่ได้ ทั้งการใช้สำหรับการอุปโภค บริโภคและส่วนที่เกี่ยวข้องกับการจัดการสาธารณสุขไปเพื่อให้เพียงพอกับความต้องการของประชากรที่เพิ่มขึ้น การใช้ทรัพยากรน้ำที่มากขึ้นทำให้มีการเพิ่มผลผลิตและของเสีย รวมถึงโลหะบางชนิดที่อาจระบายนลงสู่แหล่งน้ำได้ ดังนั้นการลดการปนเปื้อนของโลหะและการรักษาคุณภาพน้ำก่อนการปล่อยน้ำทิ้งลงสู่แหล่งน้ำเป็นสิ่งสำคัญ เพื่อป้องกันปัญหามลพิษและการเสื่อมโทรมของคุณภาพน้ำ สิ่งนี้มีความสำคัญในการรักษาสิ่งแวดล้อมและการดำรงชีวิตอย่างยั่งยืน โดยเฉพาะในเขตที่มีการใช้ทรัพยากรน้ำอย่างมากและมีการปล่อยน้ำทิ้งจากอุตสาหกรรมและการผลิตที่หลากหลาย การบำบัดน้ำเสียอย่างมีประสิทธิภาพและการใช้เทคโนโลยีในการจัดการน้ำเสียสามารถช่วยลดการปนเปื้อนและรักษาคุณภาพของแหล่งน้ำได้ มีผลดีต่อระบบนิเวศ การเกษตร และสุขภาพของมนุษย์

ซึ่งโลหะหนักประเภทเหล็กเมื่ออยู่ในรูปที่ละลายน้ำได้จะทำให้เกิดน้ำใส แต่เมื่อสัมผัสกับอากาศ โลหะเหล็กจึงเปลี่ยนเป็นรูปที่ไม่ละลายน้ำ เกิดตะกอนเหล็ก น้ำจะมีสีแดงและมีตะกอนของสนิมเหล็กนอนก้น (Rejwers & Nocoń, 2014) หากทิ้งไว้นานๆ เครื่องสุขภัณฑ์เกิดคราบสีน้ำตาล และน้ำที่มีเหล็กมีฤทธิ์กัดกร่อน การวิเคราะห์คุณภาพน้ำแสดงให้เห็นถึงความสำคัญของการกำจัดโลหะในน้ำเพื่อป้องกันปัญหาดังกล่าว วิธีการกำจัดโลหะในน้ำอย่างมีประสิทธิภาพจึงเป็นเรื่องที่มีความสำคัญและได้รับความสนใจในการศึกษาอย่างต่อเนื่อง เทคนิคที่ใช้ในการกำจัดโลหะเหล่านี้มีหลายวิธี เช่น การตกตะกอนด้วยกระบวนการทางเคมี (Benalia *et al.*, 2022)

การแลกเปลี่ยนไอออน (Bashir *et al.*, 2019) รีเวอร์ออสโมซิส (Thaçi *et al.*, 2019) และการดูดซับ (adsorption) โดยเฉพาะการดูดซับโลหะเหล็กเป็นวิธีที่น่าสนใจอย่างมากเมื่อเปรียบเทียบกับเทคนิคอื่น ๆ (ชนิดา ตระกูลสุจริตโชค และปิยะพร ณหนองคาย, 2559) เนื่องจากขั้นตอนการเตรียมและกระบวนการทำไม่ยุ่งยาก ไม่ซับซ้อน ราคาไม่แพง สามารถนำไปใช้กำจัดโลหะเหล็กได้ง่ายและรวดเร็ว อีกทั้งยังสามารถใช้ซ้ำได้หลายครั้ง เทคนิคนี้จึงเป็นทางเลือกที่มีประสิทธิภาพและเหมาะสมสำหรับการจัดการปัญหาโลหะเหล็กในน้ำอ้อย (sugarcane) เป็นพืชไร่เศรษฐกิจที่สำคัญในประเทศไทย โดยสามารถนำผลผลิตไปแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ เช่น น้ำอ้อย น้ำตาลทราย (Solomon, 2016) และเชื้อเพลิงเอทานอล (Matsuoka *et al.*, 2009) กระบวนการผลิตเหล่านี้มักทิ้งขานอ้อยเป็นจำนวนมาก หากเราสามารถเปลี่ยนวัสดุเหลือใช้เหล่านี้ให้เป็นวัสดุที่มีประโยชน์ได้ ขานอ้อยก็เป็นตัวอย่างที่สามารถนำมาใช้ให้เกิดประโยชน์อย่างมากมาย เช่น เส้นใยเซลลูโลสขนาดนาโนเป็นสารดูดซับไอออนโลหะหนัก (Widjaja *et al.*, 2023) เสริมการดูดซับไอออนทองแดง (Nur *et al.*, 2024) ซึ่งขานอ้อยมีส่วนประกอบหลักคือเซลลูโลสที่มีปริมาณสูงและหาได้ง่าย เซลลูโลสจากขานอ้อยสามารถนำมาปรับปรุงและแปรสภาพเป็นเซลลูโลสฟอสเฟต (cellulose phosphate) (Adamu *et al.*, 2025) โดยการเติมหมู่ฟอสเฟตในเซลลูโลสผ่านกระบวนการฟอสโฟรีเลชัน (phosphorylation) ด้วยกรดฟอสฟอริก (Neacsu *et al.*, 2016) จึงเพิ่มความสามารถในการดูดซับไอออน ความสามารถในการแลกเปลี่ยนไอออนและดูดซับไอออนของโลหะได้ดี การเตรียมเซลลูโลสฟอสเฟตที่มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุนี้มีความสำคัญ เนื่องจากประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักขึ้นอยู่กับปริมาณความจุไอออนของวัสดุที่สังเคราะห์ได้ (อุดมศรี ทรัพย์เจริญกุล, 2554) ดังนั้นการสังเคราะห์เซลลูโลสฟอสเฟตที่มีปริมาณฟอสฟอรัสสูงจึงมีผลต่อความสามารถในการจับโลหะหนักได้มาก งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อสังเคราะห์และศึกษาประสิทธิภาพของเซลลูโลสฟอสเฟตจากขานอ้อยในการดูดซับโลหะเหล็ก โดยมุ่งเน้นที่การปรับปรุงโครงสร้างเซลลูโลสให้สามารถดูดซับโลหะได้อย่างมีประสิทธิภาพ

อุปกรณ์และการทดลอง

1. สารเคมีและเครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

โซเดียมไฮดรอกไซด์ และแอมโมเนียมโมลิบเดต (Univar, AR grade) ยูเรีย กรดแอสคอร์บิก และโพแทสเซียมแอนติโมนีทาร์เทรต (Unilab, AR grade) แอนไฮดรัสโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนออร์โทฟอสเฟต (Kemaus, AR grade) กรดฟอสฟอริก (QReC, AR grade)

2. วิธีดำเนินการวิจัย

2.1 การเตรียมและสกัดเซลลูโลสจากขาน้อย

ตัวอย่างขาน้อยเก็บจากพื้นที่จังหวัดฉะเชิงเทรา เตรียมตัวอย่างเซลลูโลส โดยนำขาน้อยที่ผ่านการทำความสะอาดด้วยน้ำสะอาด ปลูกเปลือก และหั่นเป็นชิ้นเล็กๆ จากนั้นอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นชั่งขาน้อยแห้ง 35 กรัม ต้มในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 10%w/v ปริมาตร 600 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 55-60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จนกระทั่งของเหลวเป็นสีน้ำตาลแดง เพื่อกำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลส ทิ้งให้เย็น (กิตติยา ปลื้มใจ และคณะ, 2564) จากนั้นกรองเยื่อเซลลูโลส นำมาล้างสะอาดหลายๆ ครั้ง เพื่อกำจัดโซเดียมไฮดรอกไซด์ จนกระทั่งค่า pH เป็นกลาง จากนั้นแช่ด้วยสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 35%v/v ปริมาตร 250 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง เพื่อทำการฟอกสีเยื่อขาน้อยจนกระทั่งเยื่อเป็นสีขาว จากนั้นนำมาล้างด้วยน้ำกลั่นจนได้ค่า pH เป็นกลาง กรองแล้วอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วบั่นด้วยเครื่องบั่นจนละเอียด ได้เซลลูโลสที่ผ่านการสกัดจากขาน้อย ซึ่งน้ำหนักและคำนวณหาผลผลิตร้อยละของเซลลูโลสที่ได้ ดังสมการที่ (1)

$$\text{ร้อยละเซลลูโลส} = (W_b/W_a) \times 100 \quad (1)$$

เมื่อ W_a คือ น้ำหนักขาน้อย (g) และ W_b คือ น้ำหนักเซลลูโลส (g)

2.2 การสังเคราะห์เซลลูโลสฟอสเฟต

ซึ่งเซลลูโลสที่สกัดได้จำนวน 3 กรัม เดิมยูเรีย 22.4 กรัม และกรดฟอสฟอริก 16.8 มิลลิลิตร ร้อนที่อุณหภูมิ 100, 120, 150 และ 180 องศาเซลเซียส ในอ่างน้ำมัน เป็นเวลา 2 ชั่วโมง เมื่อตัวอย่างเย็นแล้วนำไปกรองและล้างด้วยน้ำอุ่น จากนั้นอบลมร้อนที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ซึ่งน้ำหนักและคำนวณหาผลผลิตร้อยละของเซลลูโลสฟอสเฟตที่ได้ ดังสมการที่ (2) (สุธิดา ทองคำ และคณะ, 2560)

$$\text{ร้อยละเซลลูโลสฟอสเฟต} = W_c/W_d \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ W_d คือ น้ำหนักเซลลูโลส (g) และ W_c คือ เซลลูโลสฟอสเฟต (g)

2.3 การวิเคราะห์ปริมาณฟอสเฟต

เตรียมสารละลายมาตรฐานฟอสเฟต โดยใช้แอนไฮดรัสโพแทสเซียมไดไฮโดรเจนออร์โทฟอสเฟต (KH_2PO_4) เป็นสารละลายมาตรฐานที่ระดับความเข้มข้น 0.01, 0.03, 0.06, 0.40 และ 0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร นำแอมโมเนียมโมลิบเดต ($(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot H_2O$) 1.5 กรัม ละลายในน้ำกลั่น ปริมาตรให้ได้ 50 มิลลิลิตร นำกรดแอสคอร์บิก ($C_6H_8O_6$) 2.7 กรัม ละลายในน้ำกลั่น ปริมาตรให้ได้ 50 มิลลิลิตร นำโพแทสเซียมแอนติโมนีทาร์เทรต ($KSbO_4 \cdot 0.5H_2O$) 0.34 กรัม ปริมาตรให้ได้ 250 มิลลิลิตรและกรดซัลฟิวริก 14 มิลลิลิตร ปริมาตรให้ได้ 100 มิลลิลิตร ผสมสารรีเอเจนท์ในอัตราส่วน 2:5:2:1 หลังจากนั้นนำสารละลายแต่ละความเข้มข้นที่เตรียมไว้เทใส่ลงในขวดรูปชมพู่ เติมสารรีเอเจนท์ 1 มิลลิลิตร ลงในแต่ละความเข้มข้น เขย่าให้เข้ากัน พัก 1 ชั่วโมง นำสารละลายไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่อง UV-Visible Spectrophotometer (UV-1900i, Shimadzu) ที่ความยาวคลื่น 885 นาโนเมตร ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

การวิเคราะห์ปริมาณฟอสเฟต โดยตัวอย่างเซลลูโลสและเซลลูโลสฟอสเฟตที่ต้องการวิเคราะห์ปริมาณ 0.02 กรัม ย่อยด้วยกรดเปอร์คลอริก ($HClO_4$) ปริมาตร 2 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิ 165 องศาเซลเซียส ทิ้งไว้จนกระทั่งสารละลายในหลอดมีลักษณะใส แล้วนำออกมาวางทิ้งไว้ให้เย็น จากนั้นปรับปริมาตรสารละลายที่ได้ให้เป็น 5 มิลลิลิตร ดูดสารละลายที่ปรับปริมาตรแล้ว 1 มิลลิลิตร เติมรีเอเจนท์ 1 มิลลิลิตร ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นปริมาตร 10 มิลลิลิตร ทิ้งไว้ 1 ชั่วโมง ได้สารละลายสีน้ำเงินเกิดขึ้น วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 885 นาโนเมตร เทียบกับกราฟมาตรฐาน

2.4 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของตัวอย่าง

วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวอย่างด้วยเทคนิค Fourier Transform Infrared (FTIR) (Nicolet 6700, Thermo Scientific) โดยในการวิเคราะห์ตัวอย่าง ทำการวัดการดูดกลืนคลื่นแสงที่ความยาวคลื่นตั้งแต่ 400-5000 ต่อเซนติเมตร วิเคราะห์สัณฐานวิทยาโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) (Quanta 250, USA) และวิเคราะห์ธาตุองค์ประกอบของตัวอย่างด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS) โดยวิธี Mapping analysis

2.5 การศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับไอออนเหล็ก

2.5.1 ศึกษาผลของเวลาการดูดซับไอออนเหล็กแบบเขย่ากวน

ซึ่งตัวอย่างเซลลูโลสและเซลลูโลสฟอสเฟตมา 0.2 กรัม เติมสารละลายไอออนเหล็กเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 มิลลิลิตร เขย่าสารละลายด้วยเครื่องเขย่าที่ปรับความเร็วประมาณ 150 รอบต่อนาที (Figure 1) ศึกษาผลของการดูดซับที่เวลา 5, 10, 20, 40, 60 และ 90 นาที จากนั้นนำมาปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงตกตะกอน (centrifuge) นำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสง (ความยาวคลื่น 508 นาโนเมตร ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

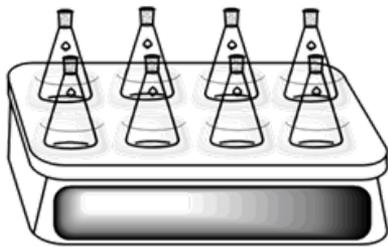


Figure 1 Adsorption of iron metal by shaking.

2.5.2 ศึกษาผลของความเข้มข้นการดูดซับไอออนเหล็ก

ซึ่งตัวอย่างเซลลูโลสและเซลลูโลสฟอสเฟตที่สังเคราะห์ด้วยอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส มา 0.2 กรัม ใส่ขวดรูปชมพู่ เติมสารละลายไอออนเหล็กเข้มข้น 0, 0.5, 1, 5, 8, 10, 15, 20 และ 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 10 มิลลิลิตร เขย่าสารละลายด้วยเครื่องเขย่าที่ปรับความเร็วประมาณ 150 รอบต่อนาที เป็นเวลา 40 นาที ณ ความเข้มข้นที่สมดุล (C_0) จากนั้นนำมาปั่นเหวี่ยงตะกอนจนเกิดการแยกชั้น นำสารละลายที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 508 นาโนเมตร ทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง คำนวณหาร้อยละการดูดซับและปริมาณโลหะหนักดูดซับตามสมการที่ (3) - (4)

$$\text{ร้อยละการดูดซับโลหะหนัก} = [(C_0 - C_e)/C_0] \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะเหล็ก (mg/L) และ C_e คือ ความเข้มข้นสมดุลของโลหะเหล็ก (mg/L)

$$\text{ปริมาณโลหะหนักดูดซับ} (q_e) = [(C_0 - C_e)/m] \times V \quad (4)$$

เมื่อ q_e คือ ปริมาณโลหะหนักดูดซับที่สมดุล (mg/g) C_0 คือ ความเข้มข้นเริ่มต้นของโลหะเหล็ก (mg/L) C_e คือ ความเข้มข้นสมดุลของสารละลายโลหะเหล็ก (mg/L) m คือ น้ำหนักของตัวอย่าง (g) และ V คือ ปริมาณของสารละลายที่ใช้ (L)

$$1/q_e = 1/(K_L q_m C) + 1/q_m \quad (5)$$

เมื่อ q_e คือ ปริมาณสารที่ถูกดูดซับบนผิวต่อตัวอย่างดูดซับที่สมดุล (mg/g) q_m คือ ความสามารถในการดูดซับ (mg/g) K_L คือ ค่าคงที่การดูดซับแลงเมียร์ C คือ ความเข้มข้นสมดุลของสารละลายโลหะเหล็ก (mg/L)

$$\log q_e = \log K_F + 1/n \log C \quad (6)$$

เมื่อ K_F คือ ค่าคงที่ของฟรุนด์ลิช (mg/g) n คือ ค่าคงที่ของฟรุนด์ลิชแสดงถึงความเข้มข้นในการดูดซับ

2.5.3 ศึกษาการใช้ซ้ำของการดูดซับไอออนเหล็กแบบคอลัมน์

ซึ่งตัวอย่างเซลลูโลสและเซลลูโลสฟอสเฟตมา 2.0 กรัม บรรจุลงในคอลัมน์แก้วทดลองขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร สูง 10 เซนติเมตร เทสารละลายไอออนเหล็กเข้มข้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ให้ไหลผ่านตัวอย่างจากบนลงล่าง เก็บสารละลายเหล็กที่ได้ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 508 นาโนเมตร นำสารละลายเหล็กที่ไหลผ่านตัวอย่างในครั้งแรกมาเทใส่คอลัมน์ทดลอง โดยศึกษาผลของการดูดซับและการใช้ซ้ำของตัวอย่างเซลลูโลสและเซลลูโลสฟอสเฟตจำนวน 10 ครั้ง แสดงดัง Figure 2

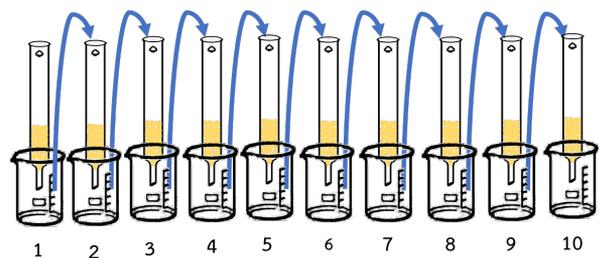


Figure 2 Column adsorption of iron ion.

ผลการทดลองและอภิปรายผล

1. ผลการเตรียมเซลลูโลสฟอสเฟตจากชานอ้อย

เตรียมตัวอย่างชานอ้อย 100 กรัม ต้มในสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ ความเข้มข้น 10 %w/v เป็นเวลา 3 ชั่วโมง นำมาสกัดเซลลูโลส พบว่า เซลลูโลสมีลักษณะเป็นผงเส้นใยสีเหลือง (Figure 3) และได้ผลผลิตเซลลูโลสร้อยละ 38.28 โดยน้ำหนัก



Figure 3 Characteristics of extracted cellulose
(a) cellulose before drying and
(b) cellulose after drying and milling.

เตรียมเซลลูโลสฟอสเฟต โดยนำเซลลูโลสที่ได้มาทำปฏิกิริยากับกรดฟอสฟอริกและยูเรีย (Neacsu *et al.*, 2016) ณ อุณหภูมิ 100, 120, 150 และ 180 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 120 นาที โดยปฏิกิริยาการสังเคราะห์แสดงดัง Figure 4 ซึ่งพบว่า เซลลูโลสฟอสเฟตมีลักษณะเป็นสีเหลือง เมื่ออุณหภูมิเพิ่มขึ้น ลักษณะเริ่มเปลี่ยนเป็นสีน้ำตาล ผิวขรุขระ เกาะกันเป็นก้อน แสดงดัง Figure 5 และได้ผลผลิตเซลลูโลสฟอสเฟต ดัง Table 1

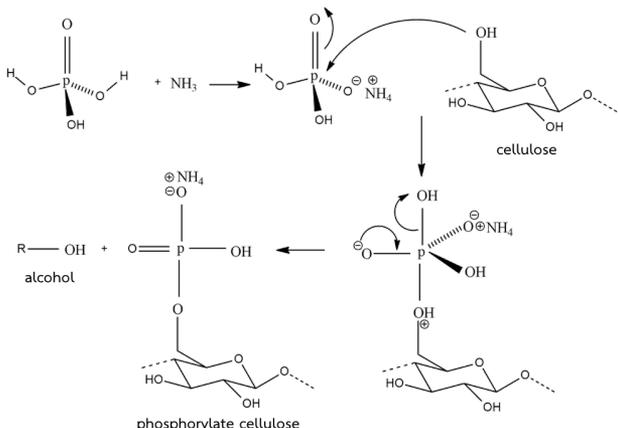


Figure 4 Reaction for the synthesis of cellulose phosphate.

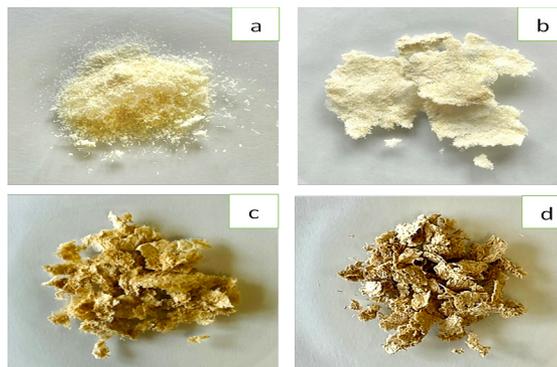


Figure 5 Characteristics of cellulose phosphate at different temperatures. (a) 100°C (b) 120°C (c) 150°C และ (d) 180°C

2. ผลการวิเคราะห์หาปริมาณฟอสเฟต

การวิเคราะห์หาปริมาณฟอสฟอรัสด้วยวิธีโมลิบดีนัมบลู เมื่อวิเคราะห์การดูดกลืนแสงด้วยยูวีแล้วนำไปพล็อตกราฟมาตรฐานเพื่อหาความเข้มข้นของสาร โดยใช้โปรแกรม Microsoft Excel Version 365 ผลดังกราฟ (Figure 6) ซึ่งแกน X แสดงความเข้มข้นของปริมาณฟอสเฟตในหน่วยของมิลลิกรัมต่อลิตร และแกน Y แสดงค่าการดูดกลืนแสง (Abs) จะเห็นว่ากราฟที่ได้มีความเป็นเส้นตรงอยู่ในช่วงความเข้มข้นของฟอสเฟต 0.01-0.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ($y = 0.3355x + 0.0059x$) ด้วยค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ 0.9999 แสดงว่าเมื่อความเข้มข้นของฟอสเฟตเปลี่ยนไป ค่าการดูดกลืนแสงจะเปลี่ยนแปลงไปในทิศทางเดียวกันอย่างสม่ำเสมอ กราฟมาตรฐานมีความถูกต้อง (accuracy) และความเชื่อถือได้ (reliability) สูง ดังนั้นความเข้มข้นของฟอสเฟตเพิ่มขึ้น ค่าการดูดกลืนแสงของสารที่เกิดขึ้นก็มีค่าเพิ่มขึ้น โดยพบว่าปริมาณฟอสเฟตเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มอุณหภูมิในการสังเคราะห์ เนื่องจากเซลลูโลสสามารถเปลี่ยนแปลงเป็นเซลลูโลสฟอสเฟตได้ผ่านกระบวนการฟอสโฟรีเลชัน ซึ่งเป็นการเพิ่มหมู่ฟอสฟอรัสเข้าไปและการทำเช่นนี้จะช่วยเพิ่มความสามารถในการดูดซับไอออนอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น โดยอุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส มีปริมาณฟอสเฟตสูงที่สุด เท่ากับ 7.68% (Table 1) ผลที่ได้สอดคล้องกับปริมาณฟอสเฟตในงานวิจัยของ จิตตรา ดอกบัว และคณะ (2551)

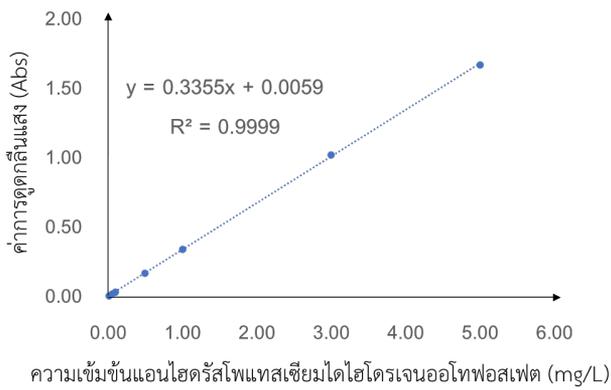


Figure 6 Absorbance values of standard solutions of anhydrous potassium dihydrogen orthophosphate

Table 1 Percentage of synthesized cellulose phosphate per amount of bagasse

Cellulose phosphate	%CP	%PO ₄ ³⁻	%P
100°C	48.01	0.18	0.00
120°C	44.67	0.28	0.74
150°C	46.12	2.78	3.01
180°C	45.37	7.68	6.23

3. ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ

องค์ประกอบของธาตุตัวอย่างเซลลูโลสฟอสเฟตที่สังเคราะห์ที่อุณหภูมิ 100, 120, 150 และ 180 องศาเซลเซียสด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-Ray Spectroscopy (EDS) จากสเปกตรัม พบว่า มีธาตุ C และ O ปริมาณมาก และมีธาตุ K, Mg, Ca, Cl, Al และ Cu ปริมาณน้อย Figure 7 (a-d) ส่วนปริมาณอะตอมของธาตุ P จะมีค่าเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิในการสังเคราะห์เซลลูโลสฟอสเฟต แสดงดัง Table 1 และสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ปริมาณฟอสเฟตจากเทคนิค UV-Visible Spectrophotometer เนื่องจากการปรับเปลี่ยนคุณสมบัติโดยอุณหภูมิสูงอาจส่งผลกระทบต่อการกระจายของหมู่ฟอสเฟตบนพื้นผิวโดยเฉพาะเมื่อมีการเพิ่มหมู่ฟอสเฟต และเป็นการเพิ่มประจุลบที่ทำให้วัสดุดูดซับไอออนได้ดียิ่งขึ้น

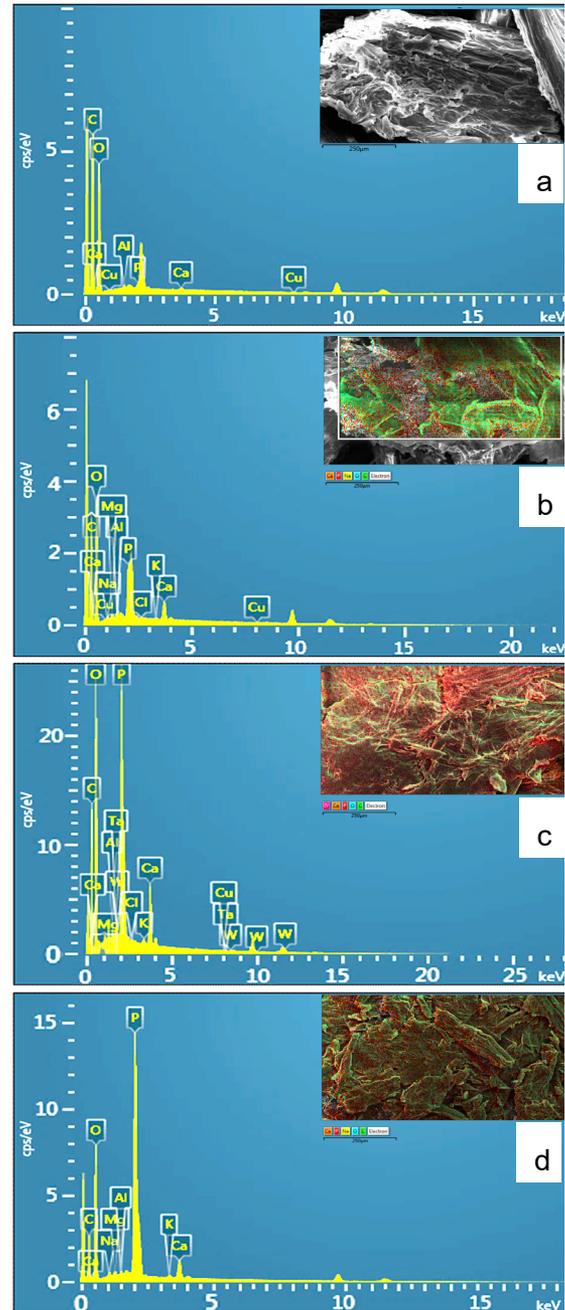


Figure 7 EDS spectrum and SEM image of the sample (a) cellulose phosphate at 100°C (b) 120°C (c) 150°C and (d) 180°C

4. ผลการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR

ในงานวิจัยนี้ทำการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันทางเคมีด้วย Fourier Transform Infrared (FTIR) ซึ่งเป็นเทคนิคที่ใช้ในการวิเคราะห์หาหมู่ฟังก์ชันของเซลลูโลสและเซลลูโลสฟอสเฟต โดยผลการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของหมู่ฟังก์ชันแสดงดัง Figure 8

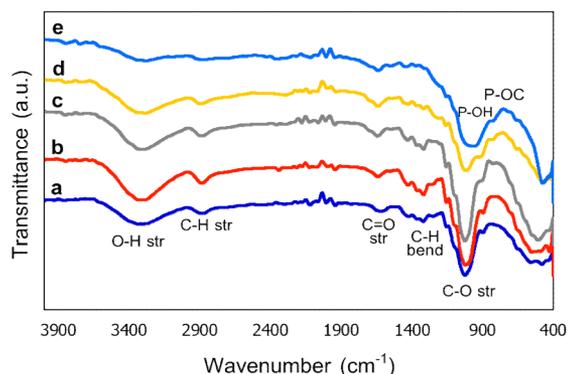


Figure 8 Infrared spectrum of the samples (a) cellulose (b) cellulose phosphate at temperatures of 100°C (c) 120°C (d) 150°C and (e) 180°C.

แสดงให้เห็นว่าค่าการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของเซลลูโลสของขานอ้อยก่อนทำปฏิกิริยาฟอสฟอรีเลชันแสดงหมู่ฟังก์ชันต่าง ๆ ที่ตำแหน่ง 3313 ต่อเซนติเมตร มีการดูดกลืนขนาดใหญ่ของหมู่ไฮดรอกซิล (-OH Group) เป็นการสั่นของพันธะ O-H stretching บริเวณตำแหน่ง 2864 ต่อเซนติเมตร เป็นการสั่นของพันธะ C-H stretching การดูดกลืนที่ตำแหน่ง 1610 ต่อเซนติเมตร เป็นการสั่นของพันธะ C=O stretching ของลิกนินและเฮมิเซลลูโลส การดูดกลืนตำแหน่ง 1311 ต่อเซนติเมตร และ 1020 ต่อเซนติเมตร เป็นการสั่นของพันธะ C-H bending และ C-O stretching ตำแหน่งการดูดกลืนบริเวณที่ 1100 ต่อเซนติเมตร (Ciolacu *et al.*, 2006) เนื่องจาก C-O-C พันธะกลูโคซิดิก โดยองค์ประกอบหลักของโครงสร้างเซลลูโลสจะสอดคล้องกับพีดตังกล่าวที่ปรากฏ

การดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของเซลลูโลสฟอสเฟตมีการดูดกลืนขนาดเล็กถึงที่บริเวณ 3313 ต่อเซนติเมตร O-H stretching เมื่ออุณหภูมิในการทำปฏิกิริยาเพิ่มขึ้น ที่ตำแหน่งการดูดกลืนประมาณ 2700 ต่อเซนติเมตร เริ่มปรากฏไหล่พีดและเกิดที่บริเวณประมาณ 900-1000 cm^{-1} ซึ่งเกิดการสั่นของพันธะ P-OH และตำแหน่ง C-O stretching บริเวณ 1120 ต่อเซนติเมตร (Rath *et al.*, 2021) เกิดการดูดกลืนตำแหน่งบริเวณ 810 ต่อเซนติเมตร ซึ่งเป็นการสั่นของพันธะ P-O-C (Ciolacu *et al.*, 2006) และพันธะ P(O)OH ดูดกลืนตำแหน่งบริเวณ 550 ต่อเซนติเมตร (Popescu *et al.*, 2003) โดยพบว่าเซลลูโลสฟอสเฟตที่สังเคราะห์ด้วยอุณหภูมิ 180 °C ปรากฏพีดที่มีสัญญาณการดูดกลืนแสงสูง ซึ่งสอดคล้องกับการวิเคราะห์ปริมาณฟอสเฟตที่ได้จากเทคนิคยูวีและ EDS

5. ผลการศึกษาสัณฐานวิทยาของเซลลูโลสและเซลลูโลสฟอสเฟต

ศึกษาสัณฐานวิทยาวิทยาลัยพื้นผิวด้วยเทคนิค Scanning Electron Microscope (SEM) ของตัวอย่างเซลลูโลสและเซลลูโลสฟอสเฟตวิเคราะห์โดยใช้กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด ผลการทดลองแสดงดัง Figure 9 (a-e)

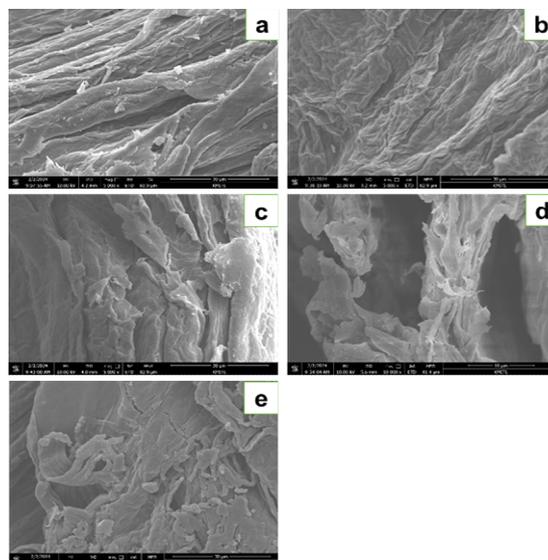


Figure 9 SEM images showing the surface morphology of samples at a magnification of 5k (a) cellulose (b) cellulose phosphate at 100°C (c) 120°C (d) 150°C and (e) 180°C.

พบว่า เซลลูโลสฟอสเฟตที่ได้จากการสังเคราะห์ที่ 100°C มีลักษณะของพื้นผิวเป็นแผ่นยึดเกาะกันจัดเรียงอย่างหนาแน่น (Figure 9b) เมื่ออุณหภูมิที่สังเคราะห์สูงขึ้นพื้นผิวดตัวอย่างจะมีความเปื่อยยุ่ยมากขึ้น (Figure 9d-e) เนื่องจากอุณหภูมิสูงที่ใช้ในกระบวนการฟอสฟอรีเลชันสามารถทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในโครงสร้างของเซลลูโลส เส้นใยมีรูพรุนมากขึ้น ซึ่งอาจส่งผลให้หมู่ฟอสเฟตเชื่อมต่อได้ดียิ่งขึ้นกับโครงสร้างของเซลลูโลส

6. ผลศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับโลหะเหล็ก

จากการวิเคราะห์การดูดซับโลหะเหล็ก มาสร้างกราฟมาตรฐาน ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel Version 365 โดยแกน X ใช้สารละลายเหล็กมาตรฐานช่วงความเข้มข้น 0, 0.5, 1, 3, 5, 8, 10, 15, 20 และ 25 มิลลิกรัมต่อลิตร และแกน Y ใช้ค่าการดูดกลืนแสงของสารละลายเหล็ก พบว่า กราฟมีค่าสมการ $y = 0.0894x$ และ $R^2 = 0.9993$ แสดงดัง Figure 10 แสดงว่าปริมาณความเข้มข้นของสารละลายเหล็กมากขึ้นทำให้ค่าการดูดกลืนแสงเพิ่มขึ้นตามลำดับ

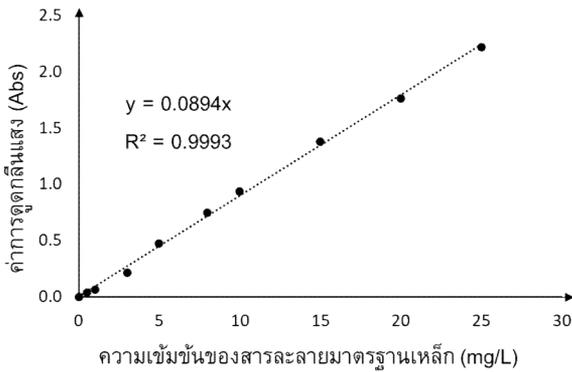


Figure 10 Shows the light absorbance values of the standard iron ion solution.

ทำการศึกษาผลของการดูดซับโลหะเหล็กที่เวลา 5, 10, 20, 40, 60 และ 90 นาที พบว่า เมื่อทำการดูดซับสารละลายมาตรฐานเหล็กเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร เซลลูโลสละลายเป็นเวลา 5 นาที พบว่า ตัวดูดซับเซลลูโลสและเซลลูโลสฟอสเฟตที่สังเคราะห์ด้วยอุณหภูมิ 100, 120, 150 และ 180 องศาเซลเซียส มีประสิทธิภาพการดูดซับของไอออนเหล็กเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว และเมื่อผ่านระยะเวลาทดสอบ 10 นาที พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับคงที่ไปจนกระทั่งระยะเวลาที่ 90 นาที แสดงดัง Figure 11 เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการดูดซับของตัวอย่างแต่ละชนิดพบว่า เซลลูโลสฟอสเฟตที่ 180°C มีประสิทธิภาพการดูดซับสูงกว่าตัวดูดซับชนิดอื่นตลอดช่วงระยะเวลาทดสอบ เนื่องจากมีปริมาณหมู่ฟอสเฟตมากที่สุด ซึ่งหมู่ฟอสเฟตมีประจุเป็นลบ มีความสามารถในการดึงดูดโลหะที่มีประจุบวก ปฏิกิริยาการดูดซับแสดงดัง Figure 12 ประกอบกับพื้นผิวที่เปื่อยยุ่ยของตัวดูดซับชนิดนี้ทำให้มีพื้นที่ผิวในการดูดซับได้ดี ส่งผลให้ตัวดูดซับชนิดนี้ดูดซับไอออนเหล็กได้ดีขึ้น

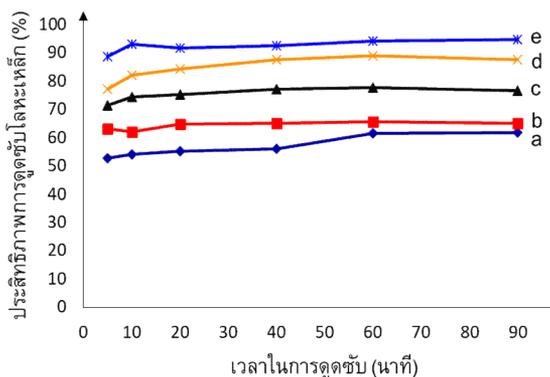


Figure 11 Efficiency of iron metal by shaking at different time intervals of samples (a) cellulose (b) cellulose phosphate at 100°C (c) 120°C (d) 150°C and (e) 180°C.

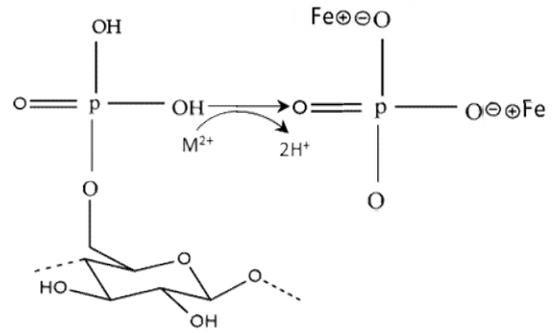


Figure 12 Metal adsorption reaction of the cellulose phosphate adsorbent.

เมื่อตรวจสอบผลการดูดซับโลหะเหล็กและยืนยันความสามารถในการดูดซับไอออนเหล็กด้วยการวิเคราะห์หาธาตุองค์ประกอบด้วยเทคนิค EDS พบว่ามีพีคของไอออนเหล็กในสเปกตรัม EDS และปริมาณที่พบเท่ากับ 0.07% โดยน้ำหนัก ดังนั้น เซลลูโลสฟอสเฟตสามารถดูดซับไอออนเหล็กได้ การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคนี้เป็นการวิเคราะห์เชิงคุณภาพที่แสดงชนิดของธาตุที่เป็นองค์ประกอบได้อย่างชัดเจน ซึ่งไม่ใช่ทั่วทุกบริเวณของตัวอย่าง แต่เป็น ณ บริเวณที่ทำการศึกษาเพียงตำแหน่งเดียว แสดงดัง Figure 13

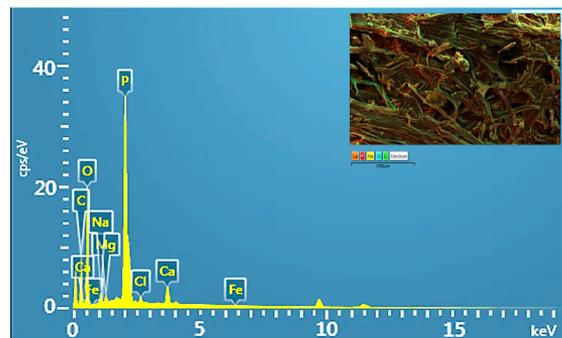


Figure 13 EDS spectrum of the cellulose phosphate adsorbent after the adsorption of iron ions at a concentration of 0.5 mg/L.

7. ผลการศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับ

การศึกษาไอโซเทอร์มของการดูดซับของโลหะหนัก ศึกษาโดยเปรียบเทียบระหว่างไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์และไอโซเทอร์มแบบฟลูนดิช ในสารละลายไอออนเหล็กความเข้มข้น 0, 0.5, 1, 5, 10, 15, 20 และ 25 มิลลิกรัมต่อลิตร การเขย่ากวนเป็นเวลา 40 นาที สร้างกราฟไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าความเข้มข้นสมดุลของโลหะเหล็ก (C₀) เท่ากับ 0.0390, 0.0581, 0.2869, 0.5482, 0.8158, 1.0433 และ 1.2640 มิลลิกรัมต่อลิตรกับอัตราส่วนระหว่างค่า

ความเข้มข้นสมดุลกับปริมาณสารที่ถูกดูดซับบนผิวต่อตัวอย่างดูดซับที่สมดุล (C_e/q_e) และไอโซเทอร์มแบบฟลุนดิช จากความสัมพันธ์ระหว่างค่าล็อก $\log C_e$ กับ $\log C_e/q_e$ ด้วยโปรแกรม Microsoft Excel Version 365 แสดงดัง Figure 14a-b

การศึกษารูปแบบการดูดซับ เมื่อพิจารณาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (R^2) ที่มีค่าใกล้เคียง 1 มากที่สุด พบว่าการดูดซับไอออนเหล็กสอดคล้องกับแบบฟลุนดิช เนื่องจากค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของไอโซเทอร์มการดูดซับแบบฟลุนดิชและไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์มีค่าเท่ากับ 0.9573 และ 0.3365 ตามลำดับ ($R_F^2 > R_L^2$) ซึ่งแสดงถึงการดูดซับที่ตัวดูดซับเรียงซ้อนกันหลายชั้นด้วยพันธะอ่อน ๆ โดยถ้าความเข้มข้นสูง ความสามารถในการดูดซับจะเพิ่มขึ้นอย่างมาก แต่ถ้าความเข้มข้นต่ำ การดูดซับจะลดลงอย่างรวดเร็ว ขึ้นอยู่กับความสามารถในการดูดซับและขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของสารที่มีอยู่

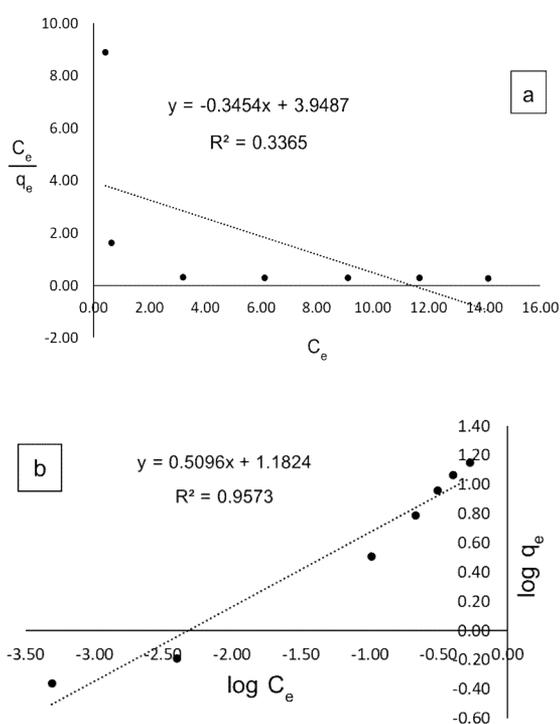


Figure 14 shows the isotherms of iron absorption by phosphate cellulose at a temperature of 180 °C:

(a) Langmuir model and (b) Flundlich model.

ไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์และฟลุนดิชใช้ในการอธิบายตัวถูกดูดซับและตัวดูดซับหลังจากเข้าสู่จุดสมดุลแล้ว ในรูปแบบการยึดเกาะของสารระหว่างเซลล์โลสฟอสเฟตกับไอออนเหล็ก โดยการเกิดการดูดซับแบบชั้นเดียว ซึ่งมีตำแหน่งยึดเกาะระหว่างตัวตัวดูดซับและถูกดูดซับยืนยันด้วยไอโซเทอร์มแบบแลงเมียร์ ในขณะที่การเกิดการดูดซับแบบหลายชั้นบนพื้นที่ผิวที่ไม่สม่ำเสมอ สามารถยืนยันด้วยไอโซเทอร์มแบบฟลุนดิช (วรรณกัษมา ฮารณ, 2563)

8. การดูดซับโลหะเหล็กในระบบคอลัมน์

ศึกษาผลการดูดซับโลหะเหล็กในระบบคอลัมน์ โดยเทสารละลายไอออนเหล็กเข้มข้น 25 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาตร 100 มิลลิลิตร ให้ไหลผ่านตัวดูดซับที่บรรจุในคอลัมน์ เก็บสารละลายที่ผ่านคอลัมน์ไปวัดค่าการดูดซับที่ความยาวคลื่น 508 นาโนเมตร ผลการทดสอบดูดซับแสดงดัง Table 2 หลังจากสารละลายผ่านคอลัมน์ครั้งที่ 1 พบว่าประสิทธิภาพการดูดซับของเซลล์โลสฟอสเฟตที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส มีค่ามากที่สุดเท่ากับ 93% และมีประสิทธิภาพในการดูดซับมากถึง 100% หลังจากผ่านคอลัมน์ที่ 2 ในขณะที่ตัวดูดซับเซลล์โลสฟอสเฟตที่อุณหภูมิ 150 องศาเซลเซียส ต้องใช้คอลัมน์ในการดูดซับครั้งที่ 3 ส่วนตัวดูดซับชนิดอื่นๆ ต้องใช้จำนวนคอลัมน์มากขึ้นในการดูดซับโลหะเหล็ก ซึ่งผลที่ได้สอดคล้องกับการทดสอบการดูดซับแบบเขย่ากวนจากผลทดลองก่อนหน้า

Table 2 Adsorption efficiency of iron ion in a column system of cellulose and cellulose phosphate at temperatures of 100°C 120°C 150°C and 180°C.

Sample of cellulose phosphate	Iron ion adsorption efficiency (%) after passing through the column									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Cellulose	22	27	35	42	47	51	57	62	69	78
100°C	24	30	38	45	53	60	67	79	83	88
120°C	41	68	86	96	98	100	-	-	-	-
150°C	81	98	100	-	-	-	-	-	-	-
180°C	93	100	-	-	-	-	-	-	-	-

จากผลการศึกษาเกี่ยวกับประสิทธิภาพการดูดซับโลหะเหล็กของเซลลูโลสฟอสเฟตที่อุณหภูมิ 180°C พบว่าปริมาณฟอสเฟตในชานอ้อยเพิ่มขึ้น จากผลวิเคราะห์ด้วยเทคนิค EDS เนื่องจากอุณหภูมิสูงในกระบวนการฟอสฟอไรเซชันทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในโครงสร้างของเซลลูโลส เส้นใยมีความพรุนมากขึ้น ส่งผลให้หมู่ฟอสเฟตสามารถเชื่อมต่อกับโครงสร้างเซลลูโลสได้ดียิ่งขึ้น ยืนยันว่าการดูดซับไอออนเหล็กมีความเร็วขึ้น

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอนแนะ

จากการทดลองพบว่าการสังเคราะห์เซลลูโลสฟอสเฟตจากชานอ้อยที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียส มีปริมาณฟอสเฟตสูงที่สุดร้อยละ 7.67 จากผล EDS พบปริมาณอะตอมฟอสฟอรัสเท่ากับร้อยละ 6.23% ผลการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดพบว่า ปรากฏไหล่พีคเกิดที่บริเวณ 900-1000 ต่อเซนติเมตร เป็นการสั่นของพันธะ P-OH และการดูดกลืนตำแหน่งบริเวณ 810 ต่อเซนติเมตร เป็นการสั่นของพันธะ P-O-C ซึ่งเป็นการยืนยันหมู่ฟังก์ชันฟอสเฟตในโครงสร้างเซลลูโลส และเมื่อศึกษาสัณฐานวิทยาบริเวณพื้นผิววัสดุดูดซับพบว่า พื้นผิวมีลักษณะเปื่อยยุ่ยเมื่อใช้อุณหภูมิในการสังเคราะห์เพิ่มขึ้น จากศึกษาการดูดซับแบบเขย่ากวนในตัวดูดซับเซลลูโลสฟอสเฟตที่อุณหภูมิ 180 องศาเซลเซียสสามารถดูดซับได้ร้อยละ 88.60 ในเวลาเพียง 5 นาที ตัวดูดซับชนิดนี้สามารถดูดซับโลหะเหล็กได้ร้อยละ 100 เมื่อผ่านคอลัมน์ในครั้งที่ 2 จากผล EDS พบว่ามีพีคของโลหะเหล็กในสเปกตรัม EDS ทำให้ยืนยันได้ว่าการดูดซับบนผิวของเซลลูโลสฟอสเฟต และศึกษารูปแบบการดูดซับ พบว่าการดูดซับโลหะเหล็กสอดคล้องกับทฤษฎีแบบฟลูนดิซเป็นการดูดซับหลายชั้น ดังนั้นตัวดูดซับเซลลูโลสฟอสเฟตจากงานวิจัยนี้มีความสามารถในการดูดซับโลหะเหล็กได้โดยปัจจัยส่งเสริมให้เกิดการดูดซับของตัวดูดซับ ได้แก่ ลักษณะพื้นผิวของตัวดูดซับ เมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นพบว่า การทดสอบหาประสิทธิภาพในการดูดซับโลหะหนักของ

เซลลูโลสฟอสเฟตที่เตรียมจากชานอ้อย โดยเตรียมจากปฏิกิริยาฟอสฟอไรเซชันอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้นทำให้การดูดซับดีขึ้น และทำการทดสอบในระบบคอลัมน์เปรียบเสมือนการทดสอบในกระบวนการบำบัดน้ำเสียหรือการทำชุดกรองน้ำตัวดูดซับชนิดนี้สามารถดูดซับโลหะเหล็กได้ดี

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณศูนย์วิทยาศาสตร์และวิทยาศาสตร์ประยุกต์ มหาวิทยาลัยราชภัฏราชนครินทร์ที่ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและสถาบันวิจัยและพัฒนาให้การสนับสนุนการวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- กานต์มณี ทองศรี, นิพนธ์ ตั้งคณานุกรักษ์, คณิตา ตั้งคณานุกรักษ์ และวัชรพงษ์ วาระรัมย์. (2561). การเตรียมซิลิกาแอโรเจลจากเถ้าแกลบเคลือบด้วยแมงกานีสและเหล็กออกไซด์เพื่อกำจัดโลหะหนักในน้ำเสีย. *วารสารวิจัย มหาวิทยาลัยขอนแก่น (ฉบับบัณฑิตศึกษา)*, 18(4), 51–60.
- กิตติยา ปลื้มใจ, กรองทิพย์ เดิมเกาะ, เอกรัฐ มีชูชาติ และวิชฌุ เพชรภา. (2564). การวิเคราะห์สมบัติทางความร้อนและหมู่ฟังก์ชันของเซลลูโลสจากชานอ้อย. *วารสารผลงานวิชาการ กรมวิทยาศาสตร์บริการ*, 9(9), 31–37.
- จิตตรา ดอกบัว, ศิริกานต์ ผาสุข และยงยุทธ ตันทุลเวสส. (2551). การศึกษาประสิทธิภาพเซลลูโลสฟอสเฟตจากฟางข้าวและชานอ้อยเพื่อใช้ดูดซับตะกั่วและแคดเมียมในน้ำเสีย. *วารสารบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์*, 2(1), 1–7.
- ธนิดา ตระกูลสุจริตโชค และปิยะพร ณ หนองคาย. (2559). *พอลิเมอร์ชีวภาพโคโคซาน/เจลาตินที่มีสมบัติแม่เหล็กสำหรับเป็นเรซินแลกเปลี่ยนไอออนและกำจัดโลหะหนักในน้ำทิ้ง [รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์]*. ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา.

- วรรณกัษมา ฮารณ. (2563). การเตรียมสารประกอบ Ni-based oxides โดยวิธีการตกตะกอนร่วมทางเคมีเพื่อนำไปประยุกต์ใช้เป็นตัวดูดซับโลหะหนัก. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มจร.*, 5(1), 17–27.
- สุธิดา ทองคำ, วิโรจน์ สามสี, อรุณช พงศากสิกร และศศิมา ภรณ์ หมื่นสุข. (2560). การดูดซับโลหะหนักของเซลลูโลสฟอสเฟตจากเปลือกข้าวโพด. *วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา*, 22(1), 262–270.
- อุดมศรี ทรัพย์เจริญกุล. (2554). การเตรียมเซลลูโลสฟอสเฟตที่มีความสามารถในการแลกเปลี่ยนประจุสูงจากชานอ้อยและศึกษาจลนพลศาสตร์การดูดซับของวัสดุ. [วิทยานิพนธ์ปริญญาโทบริหารบัณฑิต, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์].
- Adamu, A., Harun, M., Evans, C., Irene, G., & Francis, M. (2025). Synthesis and characterization of cellulose phosphate-based superabsorbent hydrogels from rice husk under microwave heating. *Next Materials*, 6, Article 100400. <https://doi.org/10.1016/j.nxmate.2024.100400>
- Bashir, A., Malik, L. A., Ahad, S., Manzoor, T., Bhat, M. A., Dar, G. N., & Pandith, A. H. (2019). Removal of heavy metal ions from aqueous system by ion-exchange and biosorption methods. *Environmental Chemistry Letters*, 17, 729–754. <https://doi.org/10.1007/s10311-018-00828-y>
- Benalia, M. C., Youcef, L., Bouaziz, M. G., Achour, S., & Menasra, H. (2022). Removal of heavy metals from industrial wastewater by chemical precipitation: Mechanisms and sludge characterization. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 47, 5587–5599. <https://doi.org/10.1007/s13369-021-05525-7>
- Ciolacu, D., Cazacu, G., & Popovici, V. I. (2006). Phosphorylation of polysaccharides: New results on synthesis and characterisation of phosphorylated cellulose. *Reactive & Functional Polymers*, 66(11), 1240–1249. <https://doi.org/10.1016/j.reactfunctpolym.2006.03.006>
- Matsuoka, S., Ferraz, J. B. S., & Zappa, P. A. (2009). The Brazilian experience of sugarcane ethanol industry. *In Vitro Cellular & Developmental Biology – Plant*, 45, 372–381. <https://doi.org/10.1007/s11627-009-9220-z>
- Neacsu, G., Blond, D., Becer, M. P., Belgacem, F., & Zerrouki, R. (2016). Hydrophobization of phosphorylated cellulosic fibers. *Cellulose*, 23(6), 3511–3520. <https://doi.org/10.1007/s10570-016-1071-2>
- Nur, I. F., Ibadurrohman, C., Haerudin, M. I., Luthfiana, A., Cholifah, G., Sary, M. H., & Nuryono, A. (2024). Enhanced copper ion adsorption by rice husk and sugarcane bagasse-based magnetic nanoparticles biocomposites. *ASEAN Journal of Chemical Engineering*, 24(1), 79–89. <https://doi.org/10.22146/ajche.12236>
- Popescu, O., Budrugaec, T., Popovici, I., & Cazacu, G. (2003). Reactions of some phosphorus compounds with cellulose dissolved in aqueous alkaline solution. *Journal of Applied Polymer Science*, 90(2), 327–333. <https://doi.org/10.1002/app.12658>
- Rath, N., & Sahoo, M. R. (2021). Usage of nanocrystalline cellulose phosphate as novel sustained release system for anti-inflammatory drugs. *Journal of Molecular Structure*, 1233, 130108. <https://doi.org/10.1016/j.molstruc.2021.130108>
- Rejwers, A., & Nocoń, J. (2014). Speciation of iron in the aquatic environment. *Water Environment Research*, 86(8), 741–758. <https://doi.org/10.2175/106143014X13975035525906>
- Solomon, S. (2016). Sugarcane production and development of sugar industry in India. *Sugar Tech*, 18(6), 588–602. <https://doi.org/10.1007/s12355-016-0494-2>
- Thaçi, B. S., & Gashi, S. T. (2019). Reverse osmosis removal of heavy metals from wastewater effluents using biowaste materials pretreatment. *Polish Journal of Environmental Studies*, 28(1), 337–341. <https://doi.org/10.15244/pjoes/81268>
- Widjaja, T. K., Sugiarto, H., Oey, B. R., & Setyoprato, A. (2023). Cellulose nanocrystals (CNCs) and cellulose nanofibers (CNFs) as adsorbents of heavy metal ions. *Journal of Chemistry*, 2023, Article 5037027. <https://doi.org/10.1155/2023/5037027>

คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไฮโดรเจลธรรมชาติจากชานอ้อยสำหรับชะลอการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรีย: อิทธิพลของกรดที่ใช้เชื่อมขวาง

Natural carboxymethyl cellulose hydrogel from bagasse for slow-release urea fertilizers: Effect of crosslinking acids

ปรัชญา วาทะสิทธิ์¹ และ วियาร์ตน์ กุมุทานัต^{1*}

Prachya Watasit¹ and Wiyarat Kumutanat^{1*}

Received: 16 July 2024 ; Revised: 24 September 2024 ; Accepted: 6 November 2024

บทคัดย่อ

ชานอ้อยเป็นวัสดุเศษเหลือทางการเกษตรจากอุตสาหกรรมผลิตน้ำตาล ซึ่งในแต่ละปีจะมีปริมาณชานอ้อยเหลือทิ้งเกิดขึ้นเป็นจำนวนมาก โดยชานอ้อยบางส่วนจะถูกเผาเพื่อผลิตพลังงานไฟฟ้า อย่างไรก็ตามกระบวนการนี้ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาการเตรียมไฮโดรเจลจากชานอ้อยเพื่อใช้เป็นวัสดุสำหรับชะลอการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรีย ในขั้นตอนแรกเซลลูโลสที่สกัดได้จากชานอ้อยจะถูกสังเคราะห์เป็นคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส จากนั้นทำการเชื่อมขวางของโครงสร้างคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสให้กลายเป็นวัสดุไฮโดรเจลโดยใช้กรดชนิดต่างๆ (กรดซิตริก กรดซัคซินิก และกรดทาร์ทาริก) ที่ความเข้มข้น 1, 3 และ 5 %w/w สมบัติทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของตัวอย่างถูกศึกษาด้วยเทคนิค Attenuated total reflection infrared (ATR-IR) spectroscopy เทคนิค X-ray diffraction (XRD) และเทคนิค Thermogravimetric analysis (TGA) ตามลำดับ สัณฐานวิทยาของตัวอย่างถูกวิเคราะห์ด้วยเครื่อง Scanning electron microscope (SEM) จากการทดลองพบว่าวัสดุไฮโดรเจลปรากฏการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดในช่วงเลขคลื่น 1700-1722 cm^{-1} ซึ่งสอดคล้องกับการสั่นของพันธะเอสเทอร์ที่เกิดจากการเชื่อมขวางของโครงสร้างคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์และข้อมูลทางสัณฐานวิทยาบ่งบอกได้ว่ายูเรียถูกดูดซับบนพื้นผิวของไฮโดรเจล ผลการทดสอบการบวมหน้าพบว่าการใช้ปริมาณกรด 1%w/w ในการเชื่อมขวาง ให้ผลการบวมหน้ามากกว่าการใช้ปริมาณกรด 3 และ 5 %w/w ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการปลดปล่อยยูเรีย โดยวัสดุไฮโดรเจลที่ถูกเชื่อมขวางด้วยกรด 1 %w/w ช่วยชะลอการปลดปล่อยยูเรียได้มากกว่าการใช้กรด 3 และ 5 %w/w นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้กรดซัคซินิก 1 %w/w ในการเชื่อมขวางสามารถชะลอการปลดปล่อยยูเรียได้ดีกว่าการใช้กรดซิตริกและกรดทาร์ทาริก ผลการศึกษาปริมาณความชื้นในดินบ่งบอกได้ว่าหลังจากปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียแล้ววัสดุไฮโดรเจลยังสามารถช่วยรักษาความชื้นในดินได้อีกด้วย ด้วยเหตุนี้จึงมีความเหมาะสมที่จะพัฒนาชานอ้อยเป็นวัสดุไฮโดรเจลสำหรับชะลอการปลดปล่อยยูเรียในทางการเกษตร

คำสำคัญ: ชานอ้อย, ไฮโดรเจล, ยูเรียปลดปล่อยช้า, คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส, การเชื่อมขวางด้วยกรด

Abstract

Sugarcane bagasse is an agricultural waste obtained from sugar industries. Each year, there is a large amount of abandoned bagasse occurring. When bagasse waste is burned to generate electric power, it leads to environmental impact. Accordingly, the objective of this research is to study the preparation of hydrogels from bagasse to be used as materials for the slow release of urea. In the first step, the extracted cellulose from bagasse was synthesized into carboxymethyl cellulose. Then carboxymethyl cellulose was crosslinked to hydrogel materials using various types of acids (citric acid, succinic acid and tartaric acid) at concentrations of 1, 3 and 5 %w/w. Chemical and physical properties

¹ สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏราชชนครินทร์

¹ Department of Chemistry, Faculty of Science and Technology, Rajabhat Rajanagarindra University

* Corresponding author: Email wiyarat.kum@rru.ac.th

of the samples were studied by Attenuated total reflection infrared (ATR-IR) spectroscopy, X-ray diffraction (XRD), and Thermogravimetric analysis (TGA) technique, respectively. The results showed the hydrogel materials presented infrared absorption at wavenumber in the range 1700-1722 cm^{-1} corresponding to the vibration of ester bonds occurring from crosslinking of carboxymethyl cellulose structures. The X-ray diffraction pattern and morphological information indicated that urea was adsorbed on the surface of the hydrogel. The results of water swelling suggest that the hydrogel obtained from crosslinking with 1 %w/w of acid provided a higher water swelling than using 3 and 5 %w/w of acid crosslinking. This result is relative to the slow release of urea; found that the hydrogel materials, which were crosslinked by 1 %w/w of acid, can slow up the release of urea better than the hydrogel obtained from 3 %w/w and 5 %w/w acid crosslinking. In addition, the hydrogel obtained from 1 %w/w succinic acid crosslinking can slow up the release of urea better than the hydrogel obtained from citric and tartaric crosslinking. The results of moisture in soil indicated that after completely releasing urea, the hydrogel material can also maintain the moisture in soil. Therefore, it is appropriate to develop bagasse into hydrogel materials to slow the release of urea in agriculture.

Keywords: Bagasse, hydrogel, slow-release urea, carboxymethyl cellulose, acid crosslink

บทนำ

ขานอ้อยเป็นของเสียที่เกิดจากอุตสาหกรรมเกษตร เช่น โรงงานผลิตน้ำตาล ซึ่งหลังจากกระบวนการผลิตน้ำตาลจะมีขานอ้อย (sugarcane bagasse) เหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก โดยส่วนใหญ่ขานอ้อยจะถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลสำหรับผลิตกระแสไฟฟ้า (Wibowo *et al.*, 2024) จากการศึกษาพบว่าขานอ้อยมีส่วนประกอบทางเคมีที่เป็นเซลลูโลสสูงถึงร้อยละ 41-55 (Teixeira *et al.*, 2015) ดังนั้นจึงมีความน่าสนใจที่จะนำขานอ้อยมาพัฒนาเป็นวัสดุพอลิเมอร์ชีวภาพ โดยงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าสามารถนำเซลลูโลสที่ได้จากธรรมชาติมาสังเคราะห์เป็นไฮโดรเจล (hydrogel) เพื่อใช้เป็นวัสดุกักเก็บความชื้นได้ (Ban *et al.*, 2022) โดยสารไฮโดรเจลเป็นพอลิเมอร์ที่มีโครงสร้างเป็นร่างตาข่ายสามมิติที่สามารถดูดซับน้ำได้ในปริมาณมาก ด้วยคุณสมบัติที่ดีนี้จึงทำให้วัสดุไฮโดรเจลถูกนำไปประยุกต์ใช้งานในหลายๆ ด้าน เช่น ใช้เป็นวัสดุอุ้มน้ำในภาคการเกษตร ใช้สำหรับช่วยควบคุมการปลดปล่อยยา และใช้เป็นวัสดุทางการแพทย์ (Antony *et al.*, 2024)

ในปัจจุบันปุ๋ยเคมีมีบทบาทสำคัญในการปรับปรุงคุณภาพดินเพื่อเพิ่มสารอาหารให้มีความเหมาะสมต่อการเพาะปลูกพืชแต่ละชนิด ในแต่ละปีพบว่าประเทศไทยมีการนำเข้าปุ๋ยเคมีจากต่างประเทศเป็นจำนวนมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งปุ๋ยที่เป็นธาตุอาหารหลักของพืช ได้แก่ ปุ๋ยยูเรีย ที่ช่วยเพิ่มธาตุไนโตรเจน ซึ่งจำเป็นในช่วงแรกของการเพาะปลูกที่ต้องเร่งการเจริญเติบโตของพืชอย่างรวดเร็ว ทำให้พืชมีลำต้นยาว มีใบดก ใบใหญ่ ใบสีเขียวเข้ม อย่างไรก็ตามปุ๋ยยูเรียมี

คุณสมบัติในการละลายน้ำได้อย่างรวดเร็ว (นิษฐา คูหะธรรมคุณ และสายันต์ แสงสุวรรณ, 2560) ในขณะที่พืชมีความสามารถในการดูดซึมแร่ธาตุในปริมาณที่จำกัดในแต่ละวัน ดังนั้นทำให้ปุ๋ยยูเรียที่ไม่ถูกดูดซึมจะเกิดการเปลี่ยนรูปเป็นแอมโมเนีย (NH_3) ระเหยสู่บรรยากาศ หรือถูกชะล้างลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติอยู่ในรูปของสารประกอบไนเตรท (NO_3^-) ซึ่งส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศใกล้เคียง (Swify *et al.*, 2024) ดังนั้นการพัฒนาปุ๋ยที่ช่วยชะลอการปลดปล่อยแร่ธาตุได้จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง โดยในปัจจุบันมีหลายๆ งานวิจัยให้ความสนใจศึกษาเกี่ยวกับการชะลอการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรีย โดยการใช้สารเคลือบชนิดต่างๆ เช่น กำมะถัน (Ali *et al.*, 2022) เรซินหรือเทอร์โมพลาสติกพอลิเมอร์ (Bilal *et al.*, 2020) และสารไฮโดรเจล (Hnoosong *et al.*, 2021, Cheng *et al.*, 2018) โดยในงานวิจัยนี้มีแนวคิดในการพัฒนาขานอ้อยซึ่งเป็นวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมาผลิตเป็นไฮโดรเจลชีวภาพเพื่อชะลอการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรีย ซึ่งไฮโดรเจลชีวภาพมีข้อดีคือเมื่อใช้ปลดปล่อยปุ๋ยยูเรียหมดแล้ว วัสดุชนิดนี้สามารถช่วยกักเก็บความชื้นในดิน นอกจากนี้ไฮโดรเจลจากขานอ้อยยังสลายตัวได้ง่ายในธรรมชาติโดยไม่เกิดมลพิษต่อสิ่งแวดล้อม (Olad *et al.*, 2018)

งานวิจัยนี้มุ่งเน้นศึกษาเปรียบเทียบชนิดของกรดและปริมาณของกรดที่ใช้ในการเชื่อมขวางโครงสร้างคาร์บอกซิลเมทิลเซลลูโลส ที่ส่งผลต่อการชะลอการปลดปล่อยปุ๋ยยูเรีย นอกจากนี้ยังศึกษาถึงความสามารถในการกักเก็บความชื้นในดินของวัสดุไฮโดรเจลอีกด้วย

การทดลอง

1. อุปกรณ์และสารเคมี

วัสดุขานอ้อยที่ได้จากพื้นที่จังหวัดฉะเชิงเทรา, กรดโมโนคลอโรอะซิติก (Sigma-Aldrich), โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Univar), กรดซัคซินิก (Kemaus), กรดซิติริก (Kemaus), กรดทาร์ทาริก (Kemaus), เครื่องปั่นกวนแม่เหล็ก (VELP SCIENTIFICA) เครื่องวัด pH (Innovation Beyond 2000, INDEX) และเครื่องปั่นละเอียด (HR2056, PHILIPS)

2. วิธีการทดลอง

2.1 การเตรียมวัตถุดิบ

ล้างขานอ้อยด้วยน้ำสะอาด จากนั้นหั่นขานอ้อยเป็นชิ้นเล็กๆ อบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วัน

2.2 การสกัดเซลลูโลสจากขานอ้อย

ขังขานอ้อย 35 กรัม เติมน้ำละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ เข้มข้น 10 %w/v ปริมาตร 500 มิลลิลิตร ต้มที่อุณหภูมิ 50-60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง ล้างเยื่อเซลลูโลสด้วยน้ำกลั่นจนค่า pH เป็นกลาง อบเยื่อเซลลูโลสที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 วันปั่นเยื่อให้ละเอียด แล้วแช่เยื่อในสารละลายไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ เข้มข้น 5 %v/v ปริมาตร 250 มิลลิลิตร เป็นเวลา 1 วัน ล้างเยื่อด้วยน้ำกลั่น และอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง ปั่นเยื่อเซลลูโลสให้ละเอียดอีกครั้ง แล้วเก็บไว้ในโถสุญญากาศ และคำนวณหาผลผลิตร้อยละของผงเซลลูโลส ผลผลิตร้อยละเซลลูโลส = $(W_B/W_A) \times 100$

เมื่อ W_A และ W_B คือ น้ำหนักขานอ้อยและ น้ำหนักเซลลูโลส ตามลำดับ

2.3 การสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC)

แช่ผงเซลลูโลส 10 กรัม ในไอโซโพรพานอล ปริมาตร 200 มิลลิลิตร (ที่มีสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ (30 %w/v) จำนวน 32 มิลลิลิตรผสมอยู่) เป็นเวลา 30 นาที เติมกรดโมโนคลอโรอะซิติก 12 กรัม ปั่นกวนเป็นเวลา 2 ชั่วโมง อบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นจน pH เป็นกลาง อบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วคำนวณหาผลผลิตร้อยละของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส

$$\text{ผลผลิตร้อยละ CMC} = (W_C/W_A) \times 100$$

เมื่อ W_A และ W_C คือ น้ำหนักเซลลูโลสและ น้ำหนักของคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส ตามลำดับ

2.4 การสังเคราะห์ CMC-hydrogel

ละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 1 กรัม ใน น้ำกลั่น 100 มิลลิลิตร เติมกรดเชื่อมขวาง (กรดซัคซินิก, กรดซิติริก และกรดทาร์ทาริก) ตามปริมาณที่กำหนด (1, 3 และ 5 %w/w) ปั่นกวนและให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียสอย่างต่อเนื่องจนมีลักษณะเหนียวและเหนียว เทสารละลายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสลงในภาชนะพิมพ์ จากนั้นอบตัวอย่างที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง

2.5 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและสมบัติทางกายภาพวัสดุไฮโดรเจล

วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของตัวอย่างด้วยเทคนิค Attenuated Total Reflectance-Fourier Transform Infrared (Nicolet 6700, Thermo Scientific) โดยวัดการดูดกลืนคลื่นแสงในช่วง $4000-650 \text{ cm}^{-1}$ วิเคราะห์สมบัติทางความร้อนของตัวอย่างไฮโดรเจลด้วยเทคนิคการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารโดยอาศัยคุณสมบัติทางความร้อน (Thermo gravimetric analysis; Pyris 1, Perkin Elmer) ช่วงอุณหภูมิทดสอบ 50-700 องศาเซลเซียส อัตราการให้ความร้อน $10^\circ\text{C}/\text{นาที่}$ ภายใต้สภาวะแก๊สไนโตรเจน วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของวัสดุไฮโดรเจลด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction; SmartLab, Rigaku) ศึกษาสัณฐานวิทยาของตัวอย่างไฮโดรเจลด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning electron microscope; Quanta 250, FEI) โดยตัวอย่างจะถูกทำให้แห้งแบบการแช่เยือกแข็ง (Freeze drying) ก่อนวิเคราะห์

2.6 การทดสอบการบวมน้ำ

ตัดตัวอย่างไฮโดรเจลเป็นชิ้นเล็กๆ ประมาณ 0.5 กรัม บันทึกน้ำหนักก่อนทำการทดสอบ ห่อตัวอย่างด้วยผ้าขาวบาง จากนั้นแช่ในน้ำกลั่น บันทึกน้ำหนักตัวอย่างหลังทดสอบเป็นเวลา 5, 10, 20, 30, 60 และ 120 นาที แล้วคำนวณร้อยละการบวมน้ำ

$$\text{ร้อยละการบวมน้ำ} = ((B-A)/A) \times 100$$

เมื่อ A และ B คือ น้ำหนักฟิล์มไฮโดรเจล ก่อนแช่น้ำและหลังแช่น้ำตามลำดับ

2.7 การทดสอบการปลดปล่อยยูเรีย

ตัด CMC-hydrogel เป็นชิ้นเล็กๆ จำนวน 0.5 กรัม ใส่ในสารละลายยูเรีย 5 %w/v จำนวน 10 มิลลิลิตร ตั้งทิ้งไว้จน CMC-hydrogel ดูดซับละลายสารยูเรียจนหมด จากนั้นอบที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 12 ชั่วโมง การทดสอบปลดปล่อยยูเรียเริ่มจากแช่ตัวอย่างปุ๋ยยูเรียไฮโดรเจลในน้ำกลั่น 500 มิลลิลิตร จากนั้นเก็บตัวอย่างสารละลายตามเวลาที่กำหนด (0.08, 0.16, 0.25, 0.5, 1, 5, 10, 30, 60,

120, 180, 240, 300, 360, 420 และ 480 นาที) วิเคราะห์ปริมาณยูเรียของสารละลายตัวอย่างด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (UV-Visible spectrophotometer; UV mini 1240V, SHIMADZU) โดยตรวจวัดที่ยาวความคลื่น 440 นาโนเมตร ตามวิธีของ Potts (1963)

2.8 การทดสอบการกักเก็บความชื้นในดิน

ผสมตัวอย่าง CMC-hydrogel 1 กรัม ในดิน 10 กรัมลงในภาชนะ บันทึกน้ำหนัก (W_1) เติมน้ำกลั่นจำนวน 10 มิลลิลิตร (W_2) จากนั้นชั่งน้ำหนักตัวอย่างทุกๆ 1 วัน จนครบ 7 วัน (W_t) แล้วคำนวณปริมาณความชื้นในดินตามสมการ

$$\text{ความชื้นในดิน (\%)} = \frac{W_2 - (W_t - W_1)}{W_2} \times 100$$

3. ผลการทดลองและอภิปรายผล

3.1 การสังเคราะห์ CMC-hydrogel

การทดลองการสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสจากวัสดุขานอ้อย ขั้นตอนแรกต้องนำขานอ้อยมากำจัดลิกนินและเฮมิเซลลูโลสด้วยสารละลายเบสโซเดียมไฮดรอกไซด์ก่อน จากการทดลองพบว่าได้ผลผลิตเป็นเซลลูโลส 35.82% จากนั้นสังเคราะห์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสโดยนำเซลลูโลสที่ได้มาทำปฏิกิริยากับกรดมอนอโคลอโรอะซิติก พบว่าเกิดผลิตภัณฑ์คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส 25.66% ในขั้นตอนสุดท้ายคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสที่ได้จะถูกนำมาเชื่อมขวางโครงสร้าง (crosslink) เพื่อเตรียมเป็นวัสดุไฮโดรเจล พบว่าได้ผลผลิตร้อยละ 23.51 (Table 1) โดยจากปฏิกิริยาเคมีพบว่าการเชื่อมขวาง CMC จะถูกเชื่อมขวางด้วยกรดผ่านการเกิดพันธะเอสเทอร์ แสดง Figure 1

Table 1 Percentage yield of products

Products	Percentage yield (%)
Cellulose	35.82
CMC	25.66
CMC-hydrogel	23.51

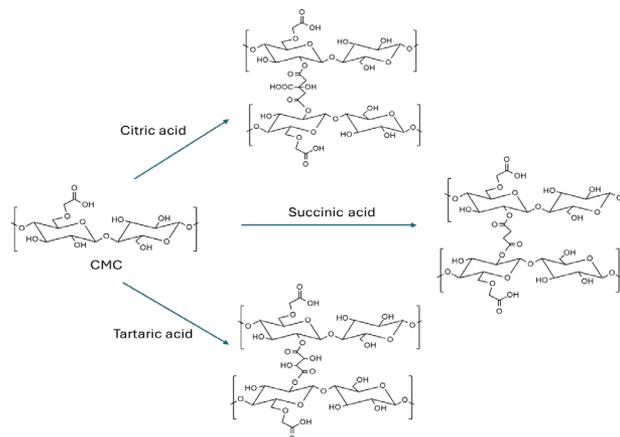


Figure 1 Crosslink reaction of carboxymethyl cellulose with acids

3.2 การวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและสมบัติทางกายภาพ

หมู่ฟังก์ชันทางเคมีของสารตัวอย่าง ได้แก่ ขานอ้อย เซลลูโลส CMC และ CMC-hydrogel ถูกวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Attenuated total reflection infrared (ATR-IR) spectroscopy สเปกตรัมการดูดกลืนแสงแสดงดัง Figure 2 และ 3 ตัวอย่างขานอ้อยปรากฏพีคการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่สำคัญ คือ ที่ตำแหน่ง 1726 cm⁻¹ สอดคล้องกับการสั่นของพันธะ C=O stretching ของเฮมิเซลลูโลสและลิกนินที่เป็นองค์ประกอบในขานอ้อย ตำแหน่ง 1631 cm⁻¹ เป็นการสั่นของพันธะไกลโคซิดิกชนิดเบต้าของเซลลูโลสและเฮมิเซลลูโลส ส่วนตำแหน่ง 1033 cm⁻¹ เป็นการสั่นของพันธะ C-O stretching ของโครงสร้างเซลลูโลส การดูดกลืนรังสีที่ตำแหน่ง 3334 cm⁻¹ แสดงถึงการสั่นของพันธะ O-H stretching ที่ตำแหน่ง 2918 และ 2821 cm⁻¹ เป็นการสั่นของพันธะ C-H stretching แบบ asymmetric และ symmetric ตามลำดับ (Scheufele *et al.*, 2015)

ผลการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของเซลลูโลสที่สกัดได้ พบการดูดกลืนแสงที่เลขคลื่น 1641 cm⁻¹ สอดคล้องกับการสั่นของพันธะ O-H bending ของโมเลกุลน้ำที่ถูกดูดซับในโครงสร้าง (Wulandari *et al.*, 2016) ซึ่งสอดคล้องกับการสั่นของหมู่ไฮดรอกซิล (-OH Group) ที่เลขคลื่น 3334 cm⁻¹ ในขณะที่ตำแหน่ง 1026 cm⁻¹ แสดงถึงการสั่นของพันธะ C-O stretching (Abdel-Halim, 2013)

คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลส (CMC) ที่สังเคราะห์ได้ปรากฏการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดที่สำคัญ คือ ที่เลขคลื่น 1587 cm⁻¹ เป็นการสั่นของพันธะ C=O stretching ของหมู่ carboxylate (Mohamood *et al.*, 2021) นอกจากนี้ยังพบการดูดกลืนแสงที่เลขคลื่น 1012 cm⁻¹ ซึ่งสอดคล้องกับการสั่นของพันธะ C-O stretching (Rozali *et al.*, 2015)

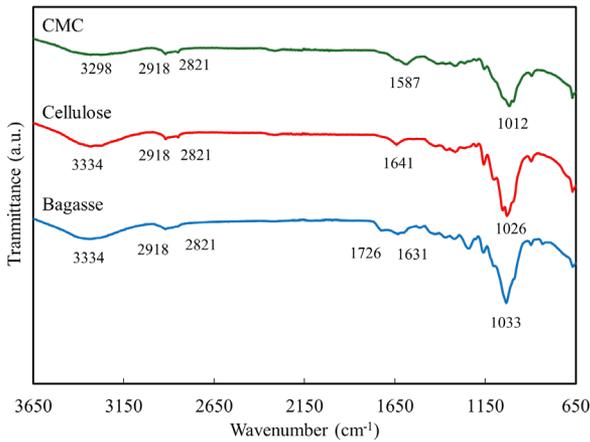


Figure 2 Infrared spectrum of bagasse cellulose and Carboxymethyl cellulose

คาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสไฮโดรเจล (CMC-hydrogel) ที่สังเคราะห์ได้จากการเชื่อมขวางโครงสร้างคาร์บอกซีเมทิลเซลลูโลสด้วยกรดซัลฟอนิก, กรดซิตริก และกรดทาร์ทาริกมีผลการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด ดังแสดงใน Figure 3 จากสเปกตรัมพบว่าโครงสร้างไฮโดรเจลทั้งสามชนิดปรากฏการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่ง 1587 cm^{-1} เช่นเดียวกับที่พบในโครงสร้าง CMC ซึ่งเป็นการสั่นของพันธะ C=O stretching ของหมู่ carboxylate อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาการดูดกลืนแสงในช่วง $1700\text{--}1600\text{ cm}^{-1}$ พบว่าวัสดุไฮโดรเจลมีการดูดกลืนแสงอินฟราเรดมากกว่าวัสดุ CMC อาจเป็นผลมาจากการรวมกันของพีคของหมู่ฟังก์ชัน carboxylate และหมู่คาร์บอนิลของกรดที่ใช้ในการเชื่อมขวาง และพบการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่ง 1722 cm^{-1} สำหรับไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยกรดทาร์ทาริก ซึ่งสอดคล้องกับช่วงการดูดกลืนแสงของหมู่คาร์บอนิลของเอสเทอร์ ที่เกิดจากปฏิกิริยาเชื่อมขวางของกรดและหมู่ไฮดรอกซิลของโครงสร้าง CMC นอกจากนี้ยังพบการดูดกลืนแสงที่ตำแหน่ง 1408 cm^{-1} ซึ่งเป็นการสั่นของพันธะ C-O bending ของกรดที่ใช้เชื่อมขวาง (Paris Junior *et al.*, 2021) ซึ่งปรากฏในสเปกตรัมของ CMC-hydrogel ชัดเจนกว่าสเปกตรัมของ CMC จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้นจึงสามารถอนุมานได้ว่ากรดที่เติมลงไปสามารถเชื่อมขวางโครงสร้างของ CMC ได้

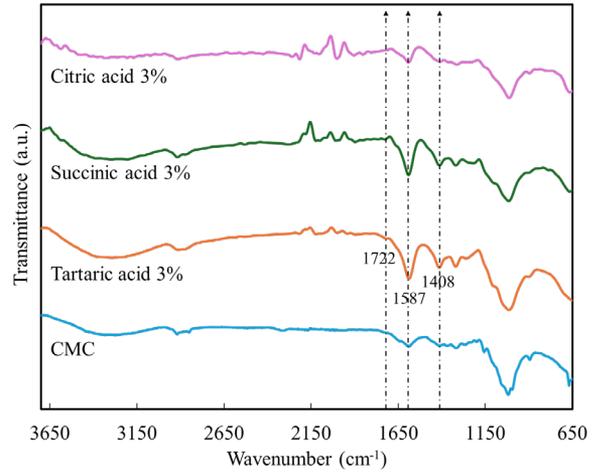


Figure 3 Infrared spectrum of CMC-hydrogel

การศึกษาโครงสร้างผลึกของไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยกรดซัลฟอนิก, กรดซิตริก และกรดทาร์ทาริก ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ แสดงดัง Figure 4(a) พบว่าสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยกรดทั้งสามชนิดแสดงการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ที่มุม 22.5 องศาสอดคล้องกับสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของ CMC-hydrogel (Yang *et al.*, 2011) นอกจากนี้ยังพบว่าสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของไฮโดรเจลเมื่อใช้กรดทาร์ทาริกในการเชื่อมขวางมีลักษณะฐานกว้าง (ที่มุมเลี้ยวเบน $16\text{--}22$ องศา) มากกว่าการใช้กรดอีกสองชนิด ซึ่งบ่งบอกได้ถึงปริมาณส่วนอสัณฐานที่เพิ่มขึ้น การเพิ่มขึ้นของส่วนอสัณฐานเป็นผลมาจากปฏิกิริยาเชื่อมขวางโครงสร้าง CMC ซึ่งจะขัดขวางการเกิดผลึกของวัสดุไฮโดรเจล (Yang *et al.*, 2011) จากผลการทดลองสามารถบ่งบอกได้ว่ากรดทาร์ทาริกสามารถเชื่อมขวางโครงสร้าง CMC ได้ดีกว่ากรดซิตริกและกรดซัลฟอนิก ซึ่งสอดคล้องกับผลการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด

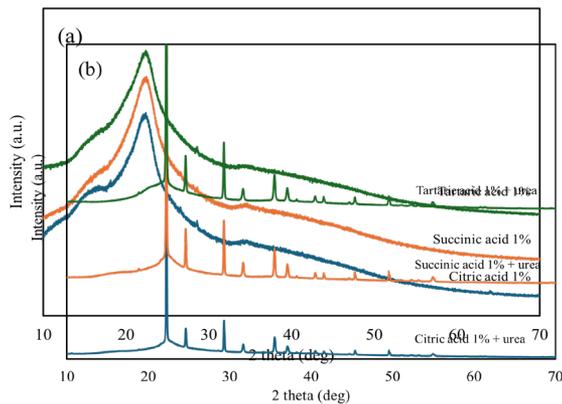


Figure 4 XRD patterns of (a) hydrogel obtained from acid crosslinking (b) hydrogel after adding urea

สเปกตรัมการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของไฮโดรเจลที่บรรจุปุ๋ยยูเรีย แสดงดัง Figure 4(b) จากสเปกตรัมพบว่าตัวอย่างทั้งสามชนิดแสดงการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ที่มุม 22.3 24.5 29.3 และ 35.5 องศา ซึ่งสอดคล้องกับสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของโครงสร้างผลึกยูเรีย (Qi et al., 2022) นอกจากนี้ยังปรากฏสเปกตรัมการเลี้ยวเบนที่บริเวณมุม 16-22 องศา โดยมีลักษณะเป็นฐานกว้างซึ่งสอดคล้องกับสเปกตรัมการเลี้ยวเบนของวัสดุ CMC-hydrogel จากผลการทดลองสามารถยืนยันได้ว่าวัสดุไฮโดรเจลที่เตรียมขึ้นสามารถดูดซับยูเรียได้

สัณฐานวิทยาของวัสดุไฮโดรเจลที่ได้จากการใช้ 1 %w/w กรดซิติริกเชื่อมขวาง ปรากฏรูพรุนขนาดใหญ่กระจายอยู่ทั่วบริเวณพื้นผิวของไฮโดรเจล และบริเวณพื้นผิวมีลักษณะเปื่อยยุ่ย แสดงดัง Figure 5(a) และเมื่อเพิ่มปริมาณกรดซิติริกที่ใช้เชื่อมขวาง (3-5 %w/w) พบว่ารูพรุนที่พื้นผิวของไฮโดรเจลมีขนาดเล็กลง ตามลำดับ และพื้นผิวมีความเรียบขึ้น แสดงดัง Figure 5(b) และ 5(c) อาจเนื่องมาจากเมื่อเพิ่มปริมาณกรดซิติริกที่ใช้เชื่อมขวาง จะช่วยส่งเสริมให้สามารถเชื่อมขวางโครงสร้าง CMC ได้มากขึ้น เป็นผลให้โครงสร้างไฮโดรเจลมีความแข็งแรงและมีรูพรุนน้อยลง เมื่อเปรียบเทียบกับลักษณะพื้นผิวของไฮโดรเจลเมื่อใช้กรดเชื่อมขวางต่างชนิดกัน (ที่ความเข้มข้น 1 %w/w) พบว่าการใช้กรดซิติริกทำให้พื้นผิวมีลักษณะเปื่อยยุ่ยและเกิดรูพรุนขนาดใหญ่จำนวนมาก ดังที่กล่าวมาข้างต้น เมื่อใช้กรดซิติริกในการเชื่อมขวาง พบว่าบริเวณพื้นผิวรูพรุนขนาดเล็กลง แสดงดัง Figure 5(d) และเมื่อใช้กรดทาร์ทาริกในการเชื่อมขวาง พบว่าพื้นผิวของไฮโดรเจลมีลักษณะเรียบ ไม่เปื่อยยุ่ยและมีรูพรุนขนาดใหญ่ แสดงดัง Figure 5(e) โดยการที่พื้นผิวของไฮโดรเจลมีลักษณะเรียบและไม่เปื่อยยุ่ยอาจเนื่องมาจากกรดทาร์ทาริกสามารถเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางโครงสร้าง CMC ได้ดีกว่ากรดทั้งสองชนิด

สอดคล้องกับผลการดูดกลืนรังสีอินฟราเรด และผลการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์

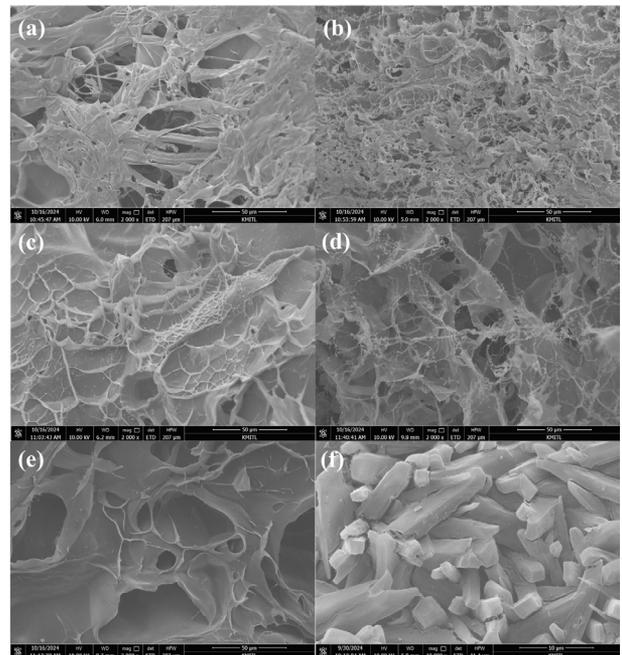


Figure 5 SEM images of hydrogel obtained from (a) citric 1 %w/w (b) citric 3 %w/w (c) citric 5 %w/w (d) succinic 1 %w/w (e) tartaric 1 %w/w and (f) citric 3 %w/w with urea

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาค่า pKa ของกรดแต่ละชนิด พบว่าค่า pKa ของกรดทาร์ทาริก (2.98) มีค่าน้อยกว่ากรดซิติริก (3.14) และกรดซัคซินิก (4.19) ซึ่งการที่ค่า pKa มีค่าน้อยจะบ่งบอกได้ว่ากรดชนิดนั้นมีความสามารถในการแตกตัวสูง นำไปสู่การเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวางได้ดี สำหรับการศึกษาสัณฐานวิทยาของวัสดุไฮโดรเจลที่บรรจุยูเรีย พบว่ามีผลึกยูเรีย กระจายปกคลุมทั่วพื้นผิวของวัสดุไฮโดรเจล แสดงดัง Figure 5(f) ซึ่งเป็นการยืนยันได้ว่ามีผลึกยูเรียเกาะติดอยู่กับวัสดุ CMC-hydrogel

3.3 การบวมหน้าของ CMC-hydrogel

ผลการทดสอบบวมหน้าของวัสดุไฮโดรเจลที่ได้จากการใช้กรดซิติริกเป็นสารเชื่อมขวางแสดงดัง Figure 6 พบว่าไฮโดรเจลที่ถูกเชื่อมขวางด้วย 1 %w/w กรดซิติริก มีค่าร้อยละการบวมหน้าสูงกว่าการใช้กรดซิติริก 3 %w/w และ 5 %w/w ในการเชื่อมขวางตลอดช่วงเวลาที่ทดสอบ 180 นาที นอกจากนี้ยังพบว่าการเพิ่มปริมาณกรดซิติริกที่ใช้เชื่อมขวางจะส่งผลให้ร้อยละการบวมหน้าของไฮโดรเจลมีแนวโน้มลดลง อาจเนื่องมาจากการเพิ่มปริมาณกรดซิติริกจะส่งผลให้เกิดการเชื่อมขวางโครงสร้าง CMC ได้มากขึ้น จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพ

ในการบวมน้ำลดลง ซึ่งสอดคล้องกับผลสัณฐานวิทยาจากเทคนิค SEM ที่พบว่าพื้นผิวของวัสดุไฮโดรเจลมีรูพรุนน้อยลงและมีลักษณะเรียบขึ้น เมื่อเพิ่มปริมาณกรดที่ใช้เชื่อมขวางส่งผลให้วัสดุมีพื้นที่ผิวในการดูดซับโมเลกุลน้ำลดลง ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้ความสามารถในการบวมน้ำลดลง โดยพฤติกรรมดังกล่าวเกิดขึ้นเช่นเดียวกันกับการใช้ กรดซัคซินิก และกรดทาร์ทาริกในการเชื่อมขวางโครงสร้าง CMC ดังปรากฏใน Figure 7 และ 8 ตามลำดับ

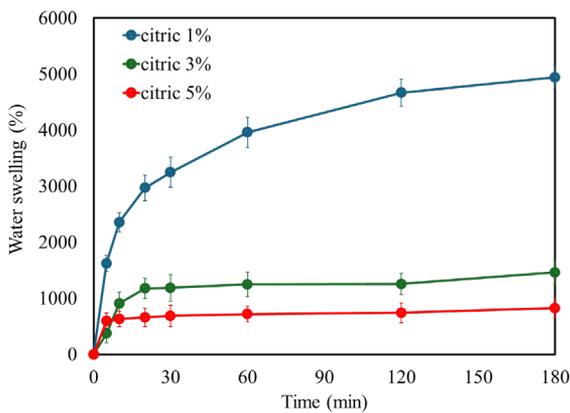


Figure 6 Water swelling of CMC-hydrogel with citric acid crosslinking

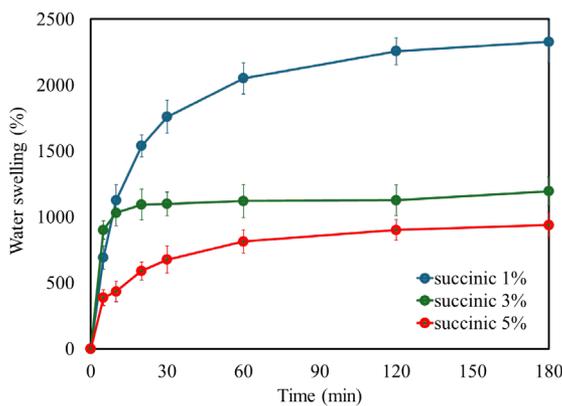


Figure 7 Water swelling of CMC-hydrogel with succinic acid crosslinking

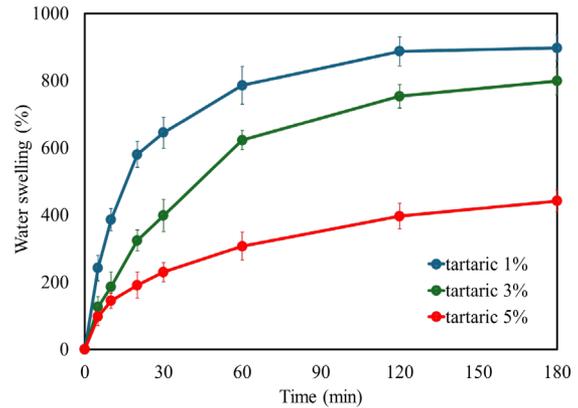


Figure 8 Water swelling of CMC-hydrogel with tartaric acid crosslinking

เมื่อพิจารณาผลการบวมน้ำของไฮโดรเจลที่เตรียมได้จากการใช้กรดต่างชนิดกัน พบว่าการใช้กรดทาร์ทาริกในการเชื่อมขวาง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการบวมน้ำของวัสดุไฮโดรเจลลดลงทุกความเข้มข้นของกรดที่ใช้เตรียม (1-5 %w/w) อาจเนื่องมาจากโครงสร้างของกรดทาร์ทาริกสามารถเชื่อมขวางโมเลกุลของ CMC ได้ดีกว่ากรดซิตริกและกรดซัคซินิก ซึ่งสอดคล้องกับผลการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดของ CMC-hydrogel ที่เชื่อมขวางด้วยกรดทาร์ทาริก ซึ่งตรวจพบการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดในช่วงเลขคลื่น 1722 cm^{-1} ได้ชัดเจนกว่าตัวอย่างไฮโดรเจลที่ถูกเชื่อมขวางด้วยกรดอีกสองชนิด และสอดคล้องกับผลการเลี้ยวเบนรังสีเอ็กซ์ของไฮโดรเจลที่ได้จากการใช้กรดทาร์ทาริกเชื่อมขวาง โดยพบปริมาณส่วนต่อสัณฐานเพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นผลจากผลการเชื่อมขวางโครงสร้าง CMC ได้ดี นอกจากนี้ผลการศึกษาพื้นผิววัสดุโดยเทคนิค SEM บ่งบอกได้ว่าไฮโดรเจลที่ได้จากการใช้กรดทาร์ทาริกเชื่อมขวางมีลักษณะพื้นผิวเรียบขึ้น ซึ่งเป็นผลมาจากการเกิดปฏิกิริยาเชื่อมขวาง ด้วยเหตุนี้จึงส่งผลให้ไฮโดรเจลชนิดนี้มีประสิทธิภาพในการบวมน้ำลดลง

3.4 การชะลอการปลดปล่อยยูเรีย

การทดสอบปลดปล่อยยูเรียของวัสดุไฮโดรเจลชนิดต่าง ๆ ทำได้โดยการแช่เม็ดยูเรียไฮโดรเจลในน้ำกลั่น จากนั้นตรวจวัดปริมาณยูเรียที่ถูกปลดปล่อยออกมาในระยะเวลาที่กำหนดจนครบ 480 นาที จากการทดลองพบว่าเม็ดยูเรียเปล่าสามารถละลายในน้ำได้อย่างรวดเร็ว และพบว่าเม็ดยูเรียละลายหมดที่เวลาทดสอบ 10 นาที (Figure 9) ในขณะที่ยูเรียไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยกรดซิตริกสามารถช่วยชะลอการปลดปล่อยยูเรียได้ดีขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเม็ดยูเรีย นอกจากนี้ยังสังเกตพบว่าการใช้ปริมาณกรดซิตริกในการเชื่อมขวางน้อยลง (จาก 5 %w/w ถึง 1 %w/w) จะช่วย

ให้การชะลอการปลดปล่อยปุ๋ยได้ดีขึ้น ดังแสดงใน Figure 9 อาจเนื่องมาจากผลสัมฤทธิ์ทางชีวภาพของไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วย 1 %w/w กรดซิตริกที่พื้นผิวมีสภาพเปื่อยยุ่ยและมีรูพรุนจำนวนมาก และมีการเชื่อมขวางของเส้นใยที่พื้นผิว ส่งผลให้เป็นการเพิ่มระยะทางในการที่โมเลกุลน้ำจะนำพาโมเลกุลยูเรียออกจากโครงสร้างไฮโดรเจล ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ไฮโดรเจลชนิดนี้สามารถชะลอการปลดปล่อยปุ๋ยได้ดีขึ้น

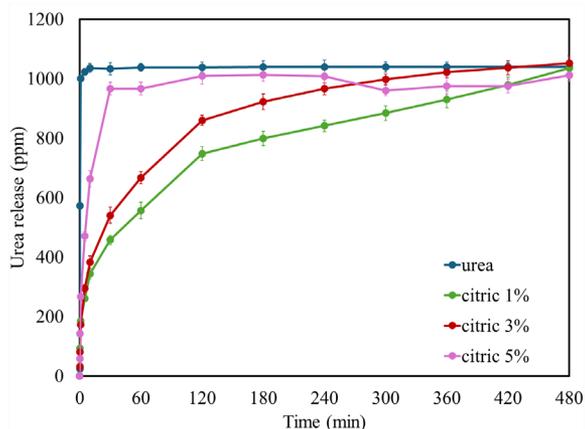


Figure 9 Urea release vs time of CMC-hydrogel with citric acid crosslinking

ผลการปลดปล่อยยูเรียของวัสดุ CMC-hydrogel ที่เชื่อมขวางด้วยกรดซัคซินิก และกรดทาร์ทาริก แสดงดัง Figure 10 และ 11 ตามลำดับ โดยพบว่าผลการปลดปล่อยยูเรียสอดคล้องกับการผลการปลดปล่อยยูเรียของวัสดุ CMC-hydrogel ที่เชื่อมขวางด้วยกรดซิตริก ซึ่งไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยกรด 1 %w/w สามารถชะลอการปลดปล่อยยูเรียได้ดีกว่าการใช้กรดเข้มข้น 3 และ 5 %w/w ในการเชื่อมขวางโครงสร้าง และเมื่อเปรียบเทียบผลการปลดปล่อยยูเรียของกรดแต่ละชนิดที่ความเข้มข้น 1 %w/w พบว่าวัสดุ CMC-hydrogel ที่เชื่อมขวางด้วยกรดซัคซินิก สามารถชะลอการปลดปล่อยยูเรียได้ดีกว่าการใช้กรดซิตริกและกรดทาร์ทาริก โดยเฉพาะเมื่อพิจารณาในช่วงเวลาทดสอบ 0-180 นาที ดังแสดงใน Figure 12 เมื่อพิจารณาจากสัมฤทธิ์ทางชีวภาพของวัสดุไฮโดรเจลพบว่าไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยกรดซิตริกและกรดซัคซินิก มีรูพรุนที่บริเวณพื้นผิวจำนวนมาก และมีการเชื่อมขวางของเส้นใยที่พื้นผิวในโครงสร้างไฮโดรเจล มากกว่าไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยกรดทาร์ทาริก แสดงใน Figure 5(a), 5(d) และ 5(e) จึงส่งผลให้โมเลกุลของน้ำสามารถนำพาโมเลกุลยูเรีย

ออกจากไฮโดรเจลทั้งสองชนิดนี้ได้ช้ากว่าวัสดุไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยกรดทาร์ทาริก อย่างไรก็ตามระหว่างการศึกษาทดสอบการปลดปล่อยยูเรีย พบว่าวัสดุไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยกรดซิตริกเมื่อสัมผัสน้ำเป็นระยะเวลานานจะเกิดการละลายเนื่องมาจากการเชื่อมขวางโครงสร้างที่ไม่แข็งแรงเพียงพอ ด้วยเหตุนี้จึงทำให้ โมเลกุลยูเรียถูกปลดปล่อยออกมาได้ง่ายขึ้น จึงส่งผลให้วัสดุไฮโดรเจลนี้มีความสามารถในการชะลอการปลดปล่อยยูเรียได้น้อยกว่าไฮโดรเจลเชื่อมขวางด้วยกรดซัคซินิก เมื่อเปรียบเทียบกับอัตราการปลดปล่อยยูเรียกับงานวิจัยอื่นๆ (Table 2) พบว่าวัสดุ CMC-hydrogel ที่เตรียมขึ้นมีประสิทธิภาพในการช่วยชะลอการปลดปล่อยยูเรียใกล้เคียงกับงานวิจัยอื่น อย่างไรก็ตามวัสดุ CMC-hydrogel ในงานวิจัยนี้มีข้อดี คือสามารถย่อยสลายได้ง่ายตามธรรมชาติ ช่วยกักเก็บความชื้นในดิน และสามารถเตรียมได้จากการใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร

Table 2 Comparison of urea release rate in water

Control-release materials	Urea release rate (mg/hr)
Polystyrene/Polycaprolactone (Netty <i>et al.</i> , 2016)	41.6
Polylactic acid (Kaavessina <i>et al.</i> , 2021)	17.8
Polypropylene succinate (Ye <i>et al.</i> , 2020)	66.6
CMC-hydrogel (this work)	62.5

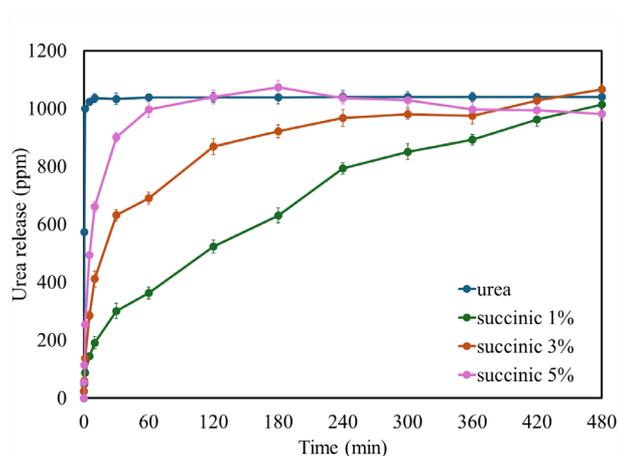


Figure 10 Urea release vs time of CMC-hydrogel with succinic acid crosslinking

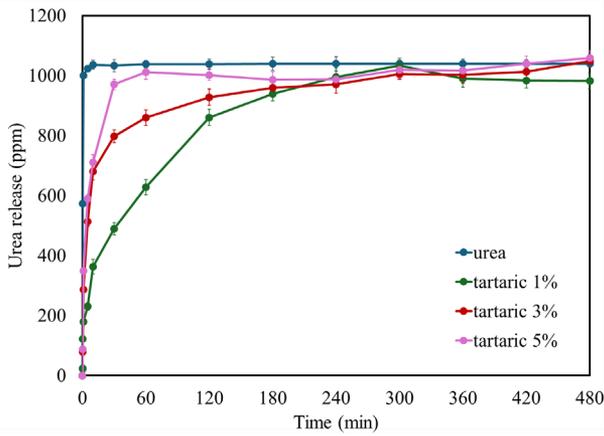


Figure 11 Urea release vs time of CMC-hydrogel with tartaric acid crosslinking

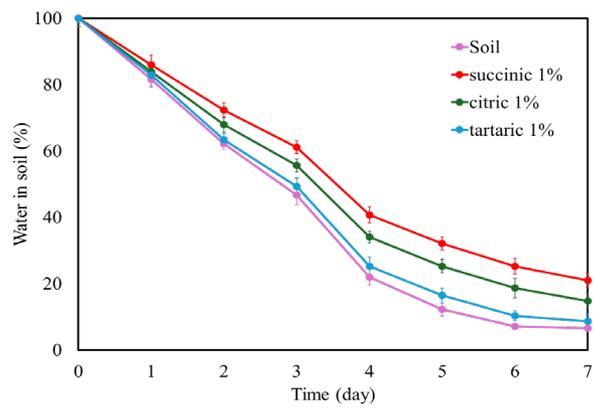


Figure 13 Water in soil vs time of hydrogels

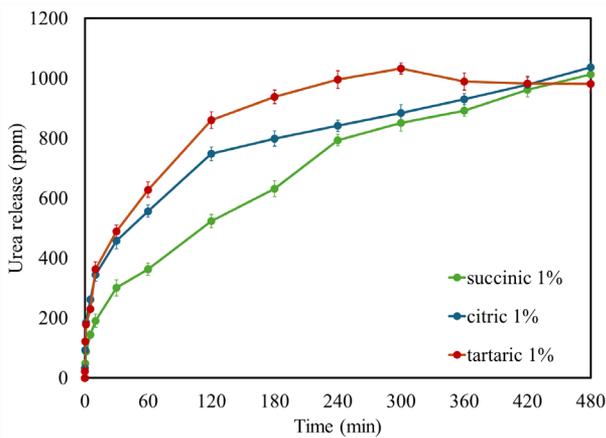


Figure 12 Urea release vs time of CMC-hydrogel with 1 %w/w acid crosslinking

3.5 การกักเก็บความชื้นในดิน

หลังจากที่วัสดุไฮโดรเจลปลดปล่อยยูเรียสู่ดินหมดแล้ว วัสดุไฮโดรเจลที่เหลืออยู่ในดินยังคงมีประโยชน์ในการช่วยกักเก็บความชื้นในดินได้ ซึ่งงานวิจัยนี้ได้จำลองการทดสอบการกักเก็บความชื้นในดินเป็นระยะเวลา 7 วัน จากผลการทดลองพบว่าวัสดุไฮโดรเจลทั้งสามชนิดสามารถช่วยกักเก็บความชื้นในดินได้ดีขึ้นเมื่อเทียบกับดินที่ไม่ได้ผสมวัสดุไฮโดรเจล (Figure 13) นอกจากนี้ยังสังเกตพบว่าวัสดุไฮโดรเจลที่ได้จากการใช้กรดซัคซินิกเชื่อมขวาง แสดงผลการกักเก็บความชื้นในดินได้ดีที่สุดตลอดช่วงเวลาที่ใช้ทดสอบ เนื่องจากไฮโดรเจลที่เชื่อมขวางด้วยกรดซัคซินิกมีพื้นที่ผิวสัมผัสในการดูดซับโมเลกุลน้ำมาก ประกอบกับมีโครงสร้างที่เชื่อมขวางแข็งแรง จึงส่งผลให้สามารถดูดซับน้ำได้ดีตลอดช่วงเวลาที่ทดสอบ

3.6 เสถียรภาพทางความร้อนของปุ๋ยยูเรียไฮโดรเจล

เสถียรภาพทางความร้อนของปุ๋ยยูเรียไฮโดรเจลถูกศึกษาในช่วงอุณหภูมิ 50-700 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงดัง Figure 14 จากการทดลองพบว่าการลดลงของน้ำหนักตัวอย่างในช่วงต้น (50-150°C) เกิดจากการระเหยของโมเลกุลน้ำและยูเรียที่ถูกกักเก็บภายในวัสดุไฮโดรเจล โดยพบว่าวัสดุไฮโดรเจลที่ได้จากการใช้กรดซัคซินิกเชื่อมขวาง มีการลดลงของน้ำหนักมากที่สุด ซึ่งบ่งบอกได้ว่าวัสดุไฮโดรเจลชนิดนี้สามารถกักเก็บความชื้นและยูเรียได้ดีกว่าไฮโดรเจลชนิดอื่น ซึ่งผลการทดลองนี้สอดคล้องกับความสามารถในการกักเก็บความชื้นในดินและผลการชะลอการปลดปล่อยยูเรีย ในขณะที่การลดลงของน้ำหนักในช่วงอุณหภูมิ 200-550°C เกิดจากการสลายตัวของโครงสร้างหลักของเซลลูโลส (Mohamood *et al.*, 2021) ซึ่งสังเกตได้ว่าไฮโดรเจลที่ได้จากการใช้กรดซัคซินิกและกรดซิตริกเชื่อมขวางมีพฤติกรรมการสลายตัวคล้ายคลึงกัน ในขณะที่ไฮโดรเจลที่ได้จากการใช้กรดทาร์ทาริกเชื่อมขวางเกิดการสลายตัวของโครงสร้างไฮโดรเจลง่ายกว่า ซึ่งบ่งบอกได้ว่าไฮโดรเจลชนิดนี้มีเสถียรภาพทางความร้อนน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุไฮโดรเจลอีกสองชนิด

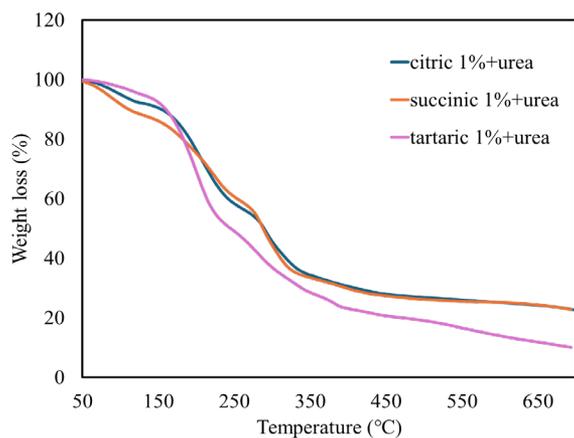


Figure 14 Thermogram of hydrogels with urea

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

จากการทดลองสามารถสังเคราะห์วัสดุไฮโดรเจลจากวัตถุดิบราคาถูกได้ คิดเป็นผลผลิตร้อยละ 11.42 จากผลจากการดักกลั่นรังสีอินฟราเรด สามารถยืนยันได้เบื้องต้นว่าสามารถใช้กรดซิตริก กรดซัคซินิก และกรดทาร์ทาริกในการเชื่อมขวางโครงสร้างคาร์บอกซิลเมทิลเซลลูโลสได้ ผลการเลี้ยงเบนรังสีเอ็กซ์และผลสัณฐานวิทยาบ่งบอกได้ว่ามีผลึกยูเรียผสมอยู่ในวัสดุ CMC-hydrogel และพบว่าการใช้ปริมาณกรดเชื่อมขวาง 1 %w/w ส่งผลให้พื้นผิววัสดุมีรูพรุนและมีการเชื่อมขวางของเส้นใยที่พื้นผิวในโครงสร้างไฮโดรเจล ซึ่งเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพการบวมน้ำและช่วยชะลอการปลดปล่อยยูเรียได้ โดยที่ใช้กรดซัคซินิก 1 %w/w ในการเชื่อมขวางจะให้ผลชะลอการปลดปล่อยยูเรียได้ดีที่สุด นอกจากนี้ไฮโดรเจลชนิดนี้ยังช่วยกักเก็บความชื้นในดินได้ดีอีกด้วย ดังนั้นไฮโดรเจลที่ได้การใช้กรดซัคซินิก 1 %w/w ในการเชื่อมขวางจึงมีความเหมาะสมที่จะพัฒนาเป็นวัสดุสำหรับช่วยชะลอการปลดปล่อยยูเรียต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยได้รับการสนับสนุนจากทุนสนับสนุนงบประมาณด้านวิจัยและนวัตกรรมประเภท Fundamental fund ประจำปีงบประมาณ 2566 และขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏราชชนครินทร์สำหรับความช่วยเหลือในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

นิษฐา กุหะธรรมคุณ และสายันต์ แสงสุวรรณ. (2560). ปุ๋ยควบคุมการปลดปล่อยยูเรียเพื่อประยุกต์ใช้ในทางเกษตรกรรม. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี, 19(3), 32–44.

- Abdel-Halim, E. S. (2013). Chemical modification of cellulose extracted from sugarcane bagasse: Preparation of hydroxyethyl cellulose. *Arabian Journal of Chemistry*, 7(4), 362–371. <https://doi.org/10.1016/j.arabjc.2013.05.006>
- Ali, S. M. G., Rashid, S., Mohamed, M. N., Wan, Z. N. Y., Amin, A., & Hamad, A. (2022). Sulfur enriched slow-release coated urea produced from inverse vulcanized copolymer. *Science of the Total Environment*, 846, 157417. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.157417>
- Antony, R., Varghese, A., Raqeeb, A., & Roy, S. (2024). Synthesis of hydrogel from sugarcane bagasse extracted cellulose. *International Journal of Research Publication and Reviews*, 5(2), 2902–2909. <https://doi.org/10.55248/gengpi.5.0224.0559>
- Ban, M. T., Mahadin, N., & Karim, K. J. A. (2022). Synthesis of hydrogel from sugarcane bagasse extracted cellulose for swelling properties study. *Materials Today: Proceedings*, 50(6), 2567–2575. <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2021.08.342>
- Bilal, Niazi, M. B. K., Jahan, Z., Kakar, S. J., Shah, G. A., Sajjad, M., Zia, M., Ullah, M., & Rao, M. I. (2020). Biodegradable polymer coated granular urea slows down N release kinetics and improves spinach productivity. *Polymers*, 12(11), 2623. <https://doi.org/10.3390/polym12112623>
- Cheng, D., Liu, Y., Yang, G., & Zhang, A. (2018). Water- and fertilizer-integrated hydrogel derived from the polymerization of acrylic acid and urea as a slow-release N fertilizer and water retention in agriculture. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 66(23), 5762–5769. <https://doi.org/10.1021/acs.jafc.8b00872>
- Hnoosong, W., Rungcharoenthong, P., & Sangjan, S. (2021). Preparation and properties of urea slow-release fertilizer hydrogel by sodium alginate-gelatin biopolymer. *Key Engineering Materials*, 889, 98–103. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/kem.889.98>
- Kaavessina, M., Distantina, S., & Shohih, E. N. (2021). A slow-release fertilizer of urea prepared via melt blending with degradable poly(lactic acid): Formula-

- tion and release mechanisms. *Polymers*, 13(11), 1856. <https://doi.org/10.3390/polym13111856>
- Mohamood, N. F. 'A.-Z. T., Halim, A. H. A., & Zainuddin, N. (2021). Carboxymethyl cellulose hydrogel from biomass waste of oil palm empty fruit bunch using calcium chloride as crosslinking agent. *Polymers*, 13(23), 4056. <https://doi.org/10.3390/polym13234056>
- Netty, Salman, Saidu, Dwisari, Febriyenti, Idris, & Akmal, M. (2016). Coating of urea granules for slow release fertilizer using bioblend. *Research Journal of Pharmaceutical, Biological and Chemical Sciences*, 7(5), 1691–1699.
- Olad, A., Zebhi, H., Salari, D., Mirmohseni, A., & Tabar, A. R. (2018). Slow-release NPK fertilizer encapsulated by carboxymethyl cellulose-based nanocomposite with the function of water retention in soil. *Materials Science and Engineering: C*, 90, 333–340. <https://doi.org/10.1016/j.msec.2018.04.083>
- Paris Junior, J. A., Rocchi, A. J. S., Biagioni, B. T., Cavicchioli, M., Machado, R. T. A., Pavan, F. R., Corbi, P. P., Lustri, W. R., Pereira, D. H., & Massabni, A. C. (2021). Chemical, spectroscopic characterization, molecular modeling and antibacterial activity assays of a silver (I) complex with succinic acid. *Eclética Química*, 46(2), 26–35. <https://doi.org/10.26850/1678-4618eqj.v46.2.2021.p26-35>
- Potts, T. T. (1963). A rapid determination of urea in fertilizers. *Journal of the Association of Official Agricultural Chemists*, 46(3), 303–306.
- Qi, X., Guo, Y., Chen, Q., Zhao, X., & Ao, X. (2022). Preparation and performance of a kitchen waste oil-modified polyvinyl alcohol-grafted urea slow-release fertilizer. *Journal of Applied Polymer Science*, 139(2), 51484. <https://doi.org/10.1002/app.51484>
- Rozali, M. L. H., Ahmad, N. H., & Isa, M. I. N. (2015). Effect of adipic acid composition on structural and conductivity solid biopolymer electrolytes based on carboxy methylcellulose studies. *American-Eurasian Journal of Sustainable Agriculture*, 9(2), 39–45.
- Scheufele, F. B., Ribeiro, C., Módenes, A. N., Espinoza-Quiñones, F. R., Bergamasco, R., & Pereira, N. C. (2015). Assessment of drying temperature of sugarcane bagasse on sorption of reactive blue 5G dye. *Fibers and Polymers*, 16, 1646–1656. <https://doi.org/10.1007/s12221-015-5087-2>
- Swify, S., Mažeika, R., Baltrusaitis, J., Drapanauskaitė, D., & Barčauskaitė, K. (2024). Review: Modified urea fertilizers and their effects on improving nitrogen use efficiency (NUE). *Sustainability*, 16(1), 188. <https://doi.org/10.3390/su16010188>
- Teixeira, S. R., Arenales, A., Souza, A. E., Magalhães, R. S., Peña, A. F. V., Aquino, D., & Freire, R. (2015). Sugarcane bagasse: Applications for energy production and ceramic materials. *The Journal of Solid Waste Technology and Management*, 41(3), 229–238. <https://doi.org/10.5276/JSWTM.2015.229>
- Wibowo, H., Congsomjit, D., Ketwong, T., Rattanapol, T., Museesut, W., Phunsanga, S., & Areeprasert, C. (2024). Application of sugarcane bagasse fly ash for syrup decolorization through activated carbon production and the circular utilization of its waste. *Biomass and Bioenergy*, 182, 107066. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2024.107066>
- Wulandari, W. T., Rochliadi, A., & Arcana, I. M. (2016). Nanocellulose prepared by acid hydrolysis of isolated cellulose from sugarcane bagasse. IOP Conference Series: *Materials Science and Engineering*, 107, 012045. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/107/1/012045>
- Yang, S., Fu, S., Liu, H., Zhou, Y., & Li, X. (2011). Hydrogel beads based on carboxymethyl cellulose for removal heavy metal ions. *Journal of Applied Polymer Science*, 119(2), 1204–1210. <https://doi.org/10.1002/app.32822>
- Ye, H.-M., Li, H.-F., Wang, C.-S., Yang, J., Huang, G., Meng, X., & Zhou, Q. (2020). Degradable polyester/urea inclusion complex applied as a facile and environment-friendly strategy for slow-release fertilizer: Performance and mechanism. *Chemical Engineering Journal*, 381, 122704. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.122704>

การทำนายการระบาดของไข้เลือดออกโดยใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ร่วมกับการเรียนรู้ของเครื่อง: กรณีศึกษาอำเภอเมืองพะเยา จังหวัดพะเยา

Dengue outbreak prediction using geographic information system and machine learning: A case study of Mueang Phayao District, Phayao Province

เสถียร หันตา^{1*}, พันธิตรา ลือชา¹ และ จิราพัชร บุญสูง¹

Sathien Hunta^{1*}, Phanthitra Luecha¹ and Jirapad Boonsoong¹

Received: 9 September 2024 ; Revised: 4 October 2024 ; Accepted: 6 November 2024

บทคัดย่อ

ไข้เลือดออกเป็นโรคติดต่อที่มีอยู่กลายเป็นพาหะ และเป็นปัญหาสาธารณสุขในหลายประเทศทั่วโลก งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อการระบาดของโรคไข้เลือดออก และสร้างแบบจำลองการพยากรณ์โรคด้วยเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง ข้อมูลที่ใช้ในการศึกษารวบรวมจากสถานีอุตุนิยมวิทยาพะเยา และจำนวนผู้ป่วยจากโรงพยาบาลพะเยา ระหว่างปี 2561 ถึง 2565 โดยแยกชุดข้อมูลตามปัจจัยต่าง ๆ ได้แก่ กลุ่มเพศ กลุ่มอายุ จำนวนประชากร พื้นที่ป่าไม้ ระยะห่างระหว่างพื้นที่การระบาดกับแหล่งน้ำ ระยะห่างระหว่างพื้นที่การเกิดการระบาดซ้ำ อุณหภูมิเฉลี่ย ความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ย และจำนวนวันที่ฝนตก อีกทั้งได้มีการประยุกต์ใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์เข้ามาช่วยในการวิเคราะห์หาปัจจัยที่เกี่ยวข้อง

ข้อมูลทั้งหมดถูกนำมาสร้างเป็น dataset แบบรายเดือน และรายสัปดาห์ โดยการสร้างแบบจำลองจะแบ่งออกเป็น 2 ประเภท คือ ประเภท Regression ได้แก่ Support Vector Machines, Generalized Linear Model และ Artificial Neural Network และ ประเภท Classification ได้แก่ Decision Tree, Gradient Boosting Tree และ Random Forest โดยจะใช้วิธี Ensemble Method แบบ Stacking Model เพื่อรวมหลายอัลกอริทึมการเรียนรู้ของเครื่องเข้าด้วยกันเพื่อปรับปรุงประสิทธิภาพในการพยากรณ์ โดยใช้ 2 อัลกอริทึมเป็น Base Learner และใช้อัลกอริทึมที่เหลือเป็น Stacking Model Learner จากนั้นใช้ 5-fold Cross Validation เพื่อเปรียบเทียบ และวัดประสิทธิภาพของแบบจำลอง

ผลการศึกษาพบว่าประเภท Regression การใช้ Generalized Linear Model เป็น Stacking Model Learner มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุด โดยมีค่า RMSE 1.457 ส่วนประเภท Classification แบบจำลอง Gradient Boosting Tree มีประสิทธิภาพสูงสุด โดยมีค่า Accuracy 99.12% การศึกษานี้ชี้ให้เห็นถึงความสำคัญของการใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องในการพยากรณ์ ซึ่งอาจนำไปใช้เป็นเครื่องมือในการเฝ้าระวัง และควบคุมโรคได้อย่างมีประสิทธิภาพในอนาคต

คำสำคัญ: ไข้เลือดออก, การเรียนรู้ของเครื่อง, แบบจำลองการพยากรณ์, ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์, การเรียนรู้แบบผสมผสาน

Abstract

Dengue fever is a mosquito-borne infectious disease and is a public health problem in many countries around the world. This research aims to study the factors affecting the spread of dengue fever and to create prediction models using machine learning techniques. The data were collected from the Phayao Meteorological Station and Phayao Hospital between 2018 and 2022. The geographic information system was used to analyze the related factors. The data preparation was performed by separating the datasets according to various factors, including gender, age group, population, forest area, distance between outbreak areas and water sources, distance between re-outbreak areas, average temperature, average relative humidity, average rainfall, and number of rainy days.

¹ คณะเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร มหาวิทยาลัยพะเยา จังหวัดพะเยา 56000

¹ School of Information and Communication Technology, University of Phayao, Phayao, 56000

* Corresponding author: sathien.hu@up.ac.th

All data were generated as monthly and weekly datasets. The prediction models are divided into regression and classification types. The regression includes support vector machines, generalized linear models, and artificial neural networks. The classification includes decision trees, gradient boosting trees, and random forests. The ensemble method of stacking models is used to combine multiple machine learning algorithms to improve the performance by using 2 algorithms as base learners and using another algorithm as the stacking model learner. Performance evaluation was performed through five-fold cross-validation and the different datasets and learning methods were compared.

The results found that the regression type using the generalized linear model as the stacking model learner gave the best performance with an RMSE value of 1.457, while the classification using the gradient boosting tree gave the highest performance with an accuracy of 99.12%. This study highlights the importance of using machine learning techniques in forecasting dengue fever outbreaks, which can be used as an effective tool for disease surveillance and control in the future.

Keywords: Dengue fever, machine learning, prediction model, geographic information system, ensemble learning

บทนำ

โรคไข้เลือดออกเป็นโรคภัยร้ายแรงที่ติดต่อกันได้จากเชื้อไวรัสเดงกี ซึ่งถูกแพร่ผ่านทางยุงลายบ้าน ไข้เลือดออก (Dengue fever) มีสาเหตุมาจากเชื้อไวรัสเดงกีที่ยุงลายที่เป็นพาหะนำมามีเมันกัดคนคนที่ติดเชื้อ ไวรัสเดงกีมี 4 สายพันธุ์ ได้แก่ DENV - 1, DENV - 2, DENV - 3 และ DENV - 4 ที่ทำให้เกิดไข้เลือดออกได้ โรคไข้เลือดออกถ้าหากเคยติดเชื้อแล้วสามารถติดเชื้อซ้ำได้อีก ในการติดเชื้อซ้ำครั้งถัดไป อาจเพิ่มความเสี่ยงในการเป็นโรคไข้เลือดออกที่รุนแรงขึ้นถึงร้อยละ 80 - 90 เนื่องจากมีไวรัสถึง 4 สายพันธุ์ และผู้ป่วยโรคไข้เลือดออกที่เคยได้รับเชื้อไวรัสสายพันธุ์ใด ๆ จะมีภูมิคุ้มกันเฉพาะสายพันธุ์นั้นไปตลอดชีวิต และจะมีภูมิคุ้มกันต่อสายพันธุ์อื่น 6 - 12 เดือนเท่านั้น (โรงพยาบาลพญาไท, ม.ป.ป.) ผู้ที่ติดเชื้อไวรัสจะมีอาการหลัก ๆ ได้แก่ ไข้สูง ปวดกล้ามเนื้อ ปวดหัว คลื่นไส้ อาเจียน และมีจ้ำเลือดหรือจุดเลือดบนผิวหนัง ในกรณีอาการรุนแรงสามารถทำให้เกิดภาวะไหลเวียนโลหิตล้มเหลว ช็อก หรือเสียชีวิตได้ ดังนั้น หากมีความเสี่ยงที่จะติดเชื้อไวรัสไข้เลือดออก ควรพบแพทย์เพื่อรับการตรวจ และรักษาโดยทันที (กรมควบคุมโรค, 2563) โดยที่การแพร่ระบาดของโรคไข้เลือดออกเป็นปัญหาสาธารณสุขที่สำคัญในหลายพื้นที่ของประเทศไทย โดยเฉพาะจังหวัดพะเยา ซึ่งมีการระบาดของโรคไข้เลือดออกเป็นประจำ โดยพบผู้ป่วยโรคไข้เลือดออกเป็นจำนวนมากในพื้นที่อำเภอเมืองพะเยาของทุก ๆ ปี ในประเทศไทยเริ่มมีการรายงานการติดเชื้อโรคไข้เลือดออกครั้งแรกในปี พ.ศ. 2492 โดยเกิดการระบาดครั้งแรกในปี พ.ศ. 2501 ระบาดใหญ่ที่สุดในปี พ.ศ. 2530 ซึ่งพบผู้ป่วยสูงสุดถึงกว่า 170,000 ราย และจำนวนผู้เสียชีวิตมากกว่า 1,000 ราย

(กรมควบคุมโรค, 2560) ส่วนในพื้นที่จังหวัดพะเยา มีการรายงานสถานการณ์โรคไข้เลือดออก ตั้งแต่วันที่ 1 มกราคม - 8 กันยายน ปี พ.ศ. 2566 พบผู้ป่วยในทุกอำเภอ และมียอดผู้ป่วยโรคไข้เลือดออกสะสม 951 ราย ผู้เสียชีวิตจำนวน 1 ราย (สำนักงานสาธารณสุขจังหวัดพะเยา, 2566) การระบาดเหล่านี้ส่งผลกระทบต่อสุขภาพของประชาชน ซึ่งก่อให้เกิดภาวะทางการแพทย์ และเศรษฐกิจอย่างมาก

ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (Geographic Information System: GIS) คือระบบที่รวบรวม จัดการ หรือวิเคราะห์ข้อมูลทางภูมิศาสตร์ เช่น ภาพถ่ายจากดาวเทียม ภาพแผนที่ ตัวเลข ตัวอักษร ระยะทาง และอื่น ๆ โดยวิเคราะห์ผ่านทางโปรแกรมคอมพิวเตอร์ สามารถนำไปประยุกต์ใช้งานได้หลายด้าน โดยเฉพาะการจัดการสิ่งแวดล้อม การคำนวณหาพื้นที่บริเวณที่จะใช้งานจากภาพแผนที่ การวัดระยะทางในการใช้งาน (ศูนย์วิจัยภูมิสารสนเทศเพื่อประเทศไทย, ม.ป.ป.)

กระบวนการของ Data Mining ประกอบด้วยขั้นตอนทั้งหมด 5 ขั้นตอน คือ 1) การทำความเข้าใจข้อมูล เริ่มต้นด้วยการวิเคราะห์ข้อมูลที่ได้จากการสำรวจเพื่อสร้างความคุ้นเคยกับข้อมูล และค้นหาความเข้าใจเชิงลึกเบื้องต้น ในขั้นตอนนี้จะใช้เทคโนโลยีสารสนเทศภูมิศาสตร์ (GIS) เพื่อสร้างฐานข้อมูลที่เกี่ยวข้องกับปัจจัยต่าง ๆ และทำความเข้าใจปัญหาผลกระทบ หรืออุปสรรคที่เกี่ยวข้องกับโครงการได้ 2) การเตรียมข้อมูลโดยทำการแปลงข้อมูลดิบให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมสำหรับการวิเคราะห์ โดยในขั้นตอนนี้ควรพิจารณาแหล่งที่มาของข้อมูล ความแม่นยำ ความน่าเชื่อถือของข้อมูล รวมถึงปริมาณ และรายละเอียดของข้อมูลที่เหมาะสมสำหรับการทำเหมืองข้อมูล 3) การสร้างแบบจำลองการพยากรณ์

ปัจจัย ได้แก่ 1) พื้นที่ป่าไม้ 2) ระยะห่างระหว่างพื้นที่การระบาดกับแหล่งน้ำ 3) ระยะห่างระหว่างพื้นที่การเกิดการระบาดซ้ำ โดยแสดงแผนที่ตำแหน่งผู้ป่วยโรคไข้เลือดออกในอำเภอเมืองพะเยา จังหวัดพะเยา ปี พ.ศ. 2561 – 2565 ดังแสดงใน Figure 2 และรายละเอียดของขั้นตอนการดำเนินงาน ดังแสดงใน Figure 3

2) การเตรียมข้อมูล

สำหรับการเตรียมข้อมูลสำหรับสร้างแบบจำลองการพยากรณ์ผู้ป่วยโรคไข้เลือดออกเป็นที่ใช้การใช้คุณลักษณะหลากหลาย ซึ่งรวมถึงจำนวนผู้ป่วยในแต่ละตำบล กลุ่มอายุ กลุ่มเพศ จำนวนประชากร ปริมาณน้ำฝนเฉลี่ยความชื้นสัมพัทธ์เฉลี่ย จำนวนวันที่ฝนตก โดยแยกเป็นข้อมูลรายสัปดาห์/รายเดือน ย้อนหลัง 5 ปี และข้อมูลด้านสารสนเทศภูมิศาสตร์ ได้แก่ ระยะห่างระหว่างพื้นที่การระบาดกับแหล่งน้ำ ระยะห่างระหว่างพื้นที่การเกิดการระบาดซ้ำ และพื้นที่ป่าไม้ ข้อมูลที่ใช้ในการวิเคราะห์ประกอบด้วยจำนวนตัวอย่างที่มีการแบ่งข้อมูลเป็นชุดสำหรับการสอนและทดสอบ ซึ่งช่วยในการประเมินความสามารถของแบบจำลองในการพยากรณ์ นอกจากนี้ยังมีการ

จัดการกับข้อมูลที่ขาดหายโดยใช้เทคนิคการเติมค่าที่ขาดหาย (Imputation) ด้วยการใส่ค่าเฉลี่ย (Mean) เพื่อรักษาความสัมพันธ์ของข้อมูล และใช้ Operator Normalization ในการปรับขนาดข้อมูล ในโปรแกรม RapidMiner (Hofmann & Klinkenberg, 2013) ซึ่งจะถูกรับโดยอัตโนมัติ เพื่อให้แน่ใจว่าค่าของคุณลักษณะต่าง ๆ อยู่ในช่วงที่เหมาะสมสำหรับการเรียนรู้ของเครื่อง ซึ่งจะช่วยให้ประสิทธิภาพของโมเดลในการพยากรณ์ค่าของผู้ป่วยได้อย่างแม่นยำยิ่งขึ้น

3) การวิเคราะห์ข้อมูล

ผู้วิจัยได้วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้ข้อมูลจำนวนผู้ป่วยที่ได้จากโรงพยาบาลพะเยา ข้อมูลสภาพอากาศจากสถานีอุตุนิยมวิทยาพะเยา ข้อมูลประชากรจากฐานข้อมูล สำนักงานสาธารณสุขจังหวัดพะเยา และข้อมูลที่ได้มาจากระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ โดยแยกข้อมูลออกเป็นชุดข้อมูล โดยทำการแยกเป็นรายสัปดาห์ รายเดือน โดยใช้ข้อมูลตั้งแต่ปี พ.ศ. 2561 - 2565 โดยรายละเอียดของปัจจัย ดังแสดงใน Table 1 และแสดงรายละเอียดของชุดข้อมูล ดังแสดงใน Table 2 เพื่อนำมาสร้างแบบจำลองการพยากรณ์ด้วยโปรแกรม RapidMiner

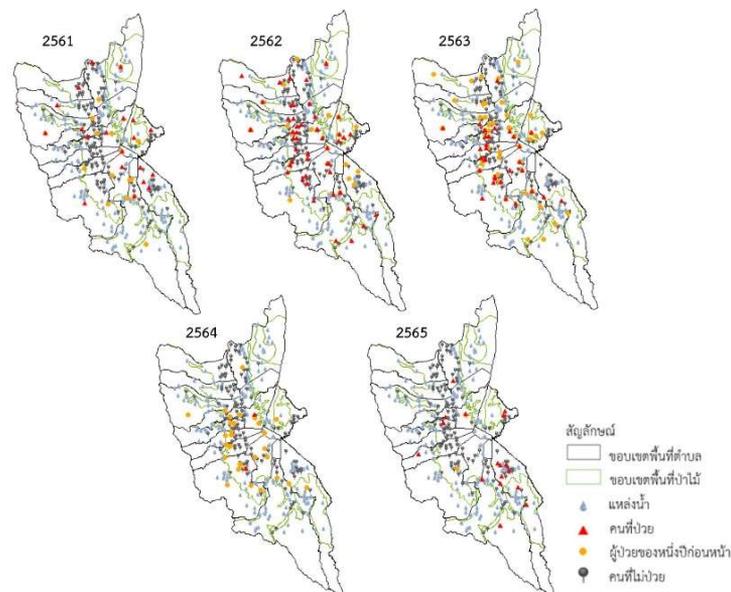


Figure 2 Map of dengue fever patient locations in Mueang Phayao District, Phayao Province, 2018 - 2022

Table 1 Factors used in the study.

Factor	Description	Data type	Source
Patient	Number of dengue fever patients	Label	
Subdistrict	Distriot	Feature	
Week	Week	Feature	
Month	Month	Feature	Phayao Hospital
Year	Year	Feature	
Age	Age group	(Feature)	
Sex	Gender group	Feature	
Population	Population	Feature	Phayao Provincial Public Health Office
Precipitation	Average weekly/monthly rainfall (mm)	Feature	Phayao Meteorological Station
Humidity	Average weekly/monthly relative humidity (percent)	Feature	
Rain-day	Number of rainy days weekly/monthly	Feature	Phayao Meteorological Station
Distance - water source	Distance between outbreak are water source (meter/measure from center)	Feature	
Distance - repeated outbreaks	Distance between reinfestation areas (meter/measure from center)	Feature	Geographic Information System
Forest	Forest area (square meter)	Feature	

ปัจจัยด้านสารสนเทศภูมิศาสตร์ ในส่วนของพื้นที่ป่าไม้เมื่อพื้นที่ป่าถูกทำลาย มักจะมีการขยายตัวของพื้นที่เมืองหรือพื้นที่เกษตร ซึ่งสามารถนำไปสู่การเพิ่มขึ้นของประชากร ยุงลาย และความเสี่ยงในการแพร่ระบาดของโรคไข้เลือดออก (EFD Initiative, 2024) ส่วนระยะห่างระหว่างพื้นที่การระบาดกับแหล่งน้ำ โดยทั่วไปแล้วพื้นที่ใกล้กับแหล่งน้ำมีความเสี่ยงสูงกว่า เนื่องจากยุงลายซึ่งเป็นพาหะของโรคไข้เลือดออกมักวางไข่ในน้ำขัง แหล่งน้ำที่มีการไหลน้อย และระยะห่างระหว่างพื้นที่การระบาดซ้ำมีความสำคัญ เนื่องจากผู้ที่เคยติดเชื้อไวรัสไข้เลือดออกสามารถติดเชื้อซ้ำได้ ซึ่งอาจเพิ่มความเสี่ยงในการเป็นโรคไข้เลือดออกรุนแรงขึ้น เพราะไวรัสไข้เลือดออกมีถึง 4 สายพันธุ์ ผู้ป่วยโรคไข้เลือดออกที่เคยได้รับเชื้อไวรัสสายพันธุ์ใด ๆ จะมีภูมิคุ้มกันเฉพาะสายพันธุ์นั้นไปตลอดชีวิต และจะมีภูมิคุ้มกันต่อสายพันธุ์อื่น 6 - 12 เดือน ดังนั้นผู้วิจัยจึงนำระยะห่างระหว่างพื้นที่การเกิดกับการระบาดในปีที่ผ่านมาเป็นปัจจัยหนึ่งในการสร้างแบบจำลอง

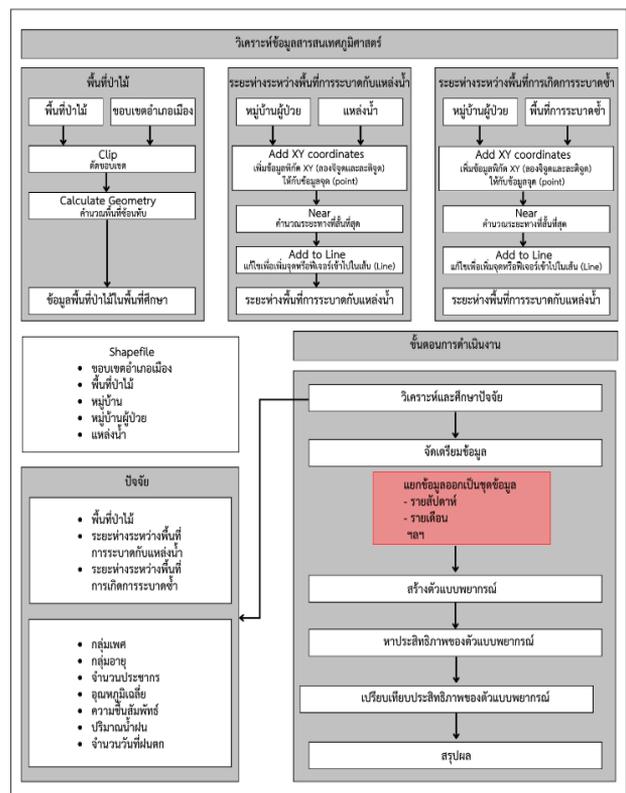


Figure 3 Procedures for implementation

4) การสร้างแบบจำลองการพยากรณ์และวัดประสิทธิภาพ

ในการดำเนินงานวิจัยได้ใช้กระบวนการของ Data mining ดังแสดงใน Figure 4 ด้วยการแปลงข้อมูลให้อยู่ในรูปแบบที่ต้องการ และสร้างแบบจำลองการพยากรณ์ เพื่อทำนายโรคไข้เลือดออก ด้วยเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง โดยประเภท Regression ได้แก่ ซัพพอร์ตเวกเตอร์แมชชีน (Support Vector Machines) แบบจำลองเชิงเส้นทั่วไป (Generalized Linear Model) และ โครงข่ายประสาทเทียม (Artificial Neural Network) ส่วนประเภท Classification ได้แก่ ต้นไม้ตัดสินใจ (Decision Tree) อัลกอริทึมการส่งเสริมประเภทหนึ่ง (Gradient Boosting Tree) และ ป่าไม้ตัดสินใจ (Random Forest) โดยใช้วิธี 5-fold Cross Validation ซึ่งแบ่งข้อมูลออกเป็น 5 ส่วนเท่ากัน ในแต่ละรอบจะใช้ 4 ส่วนในการฝึกแบบจำลอง และอีก 1 ส่วนสำหรับทดสอบ ทำซ้ำ 5 รอบ โดยสลับส่วนที่ใช้ทดสอบในแต่ละครั้ง (Kohavi, 1995) เพื่อทำการเปรียบเทียบ และวัดประสิทธิภาพของแบบจำลองการพยากรณ์ จากนั้นนำแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุดมาฝึกและทดสอบอีกครั้ง โดยใช้วิธีการ Ensemble Method โดยใช้เทคนิคย่อย Stacking Model เป็นแนวทางที่สำคัญในการพัฒนาประสิทธิภาพของการพยากรณ์และการวิเคราะห์ข้อมูล โดยมีหลักการรวมแบบจำลองหลายแบบที่ถูกสร้างจากอัลกอริทึมต่าง ๆ เพื่อเพิ่มความแม่นยำของผลลัพธ์ การทำงานของ Stacking มีขั้นตอนหลักสองส่วน ได้แก่ Base Learners และ Meta Learner โดยในขั้นตอนแรก Base Learners จะทำการฝึกอบรวมแบบจำลองโดยใช้อัลกอริทึมที่หลากหลายและมีคุณสมบัติต่างกันเพื่อทำการพยากรณ์ในชุดข้อมูล

จากนั้น Meta Learner ซึ่งเป็นแบบจำลองขั้นสุดท้าย จะทำการเรียนรู้จากผลลัพธ์ที่ได้จาก Base Learners โดยทำการปรับผลลัพธ์เหล่านี้เพื่อสร้างการพยากรณ์ที่ถูกต้องมากยิ่งขึ้น Meta Learner มีบทบาทในการผสมผสานผลลัพธ์จากแบบจำลองเบื้องต้นเหล่านี้ให้มีความแม่นยำมากขึ้นผ่านการเรียนรู้จากความผิดพลาดที่อาจเกิดขึ้นในแต่ละแบบจำลองเดี่ยว โดยเทคนิคนี้มีข้อได้เปรียบที่สำคัญเมื่อเทียบกับวิธีการ Voting, Bagging, หรือ Boosting เนื่องจาก Stacking สามารถรวมแบบจำลองที่ถูกสร้างจากอัลกอริทึมที่แตกต่างกันอย่างมีประสิทธิภาพ ช่วยให้สามารถรวมจุดแข็งของแบบจำลองแต่ละแบบและลดจุดอ่อนที่อาจเกิดขึ้นจากการใช้แบบจำลองเพียงหนึ่งเดียว ทำให้เกิดความเสถียรและความแม่นยำในการพยากรณ์ที่ดียิ่งขึ้น (Dietterich, 2000) ซึ่งรายละเอียดของการวัดประสิทธิภาพที่ใช้ มีดังนี้

1. **Accuracy** คือ การวัดความถูกต้องของแบบจำลอง โดยคำนวณจากสัดส่วนของการพยากรณ์ที่ถูกต้องทั้งหมด รวมทั้ง True Positive และ True Negative ต่อจำนวนข้อมูลทั้งหมด โดยค่าที่สูงใกล้ 100% แสดงถึงความแม่นยำของแบบจำลองในการพยากรณ์ผลลัพธ์ ดังสมการที่ 1

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

โดยที่

True Positive (TP) คือ การที่แบบจำลองทำนายว่าข้อมูลเป็นจริง และตรงกับความจริง

True Negative (TN) คือ การที่แบบจำลองทำนายว่าข้อมูลไม่เป็นจริง และตรงกับความจริง

False Positive (FP) คือ การที่แบบจำลองทำนายว่าข้อมูลเป็นจริงแต่ไม่ตรงกับความจริง

False Negative (FN) คือ การที่แบบจำลองทำนายว่าข้อมูลไม่เป็นจริงแต่ไม่ตรงกับความจริง

2. **AUC** คือ ค่าที่บ่งบอกถึงความสามารถของแบบจำลองในการแยกแยะระหว่างคลาสต่าง ๆ โดยมีค่าอยู่ระหว่าง 0 และ 1 ซึ่งค่าเข้าใกล้ 1 หมายถึงประสิทธิภาพดีมาก

3. **F-measure** คือ ค่าที่ใช้ประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองการจำแนกประเภท โดยรวมการพิจารณาทั้งความแม่นยำ (precision) และความสามารถในการตรวจจับ (recall) ซึ่งค่าที่สูงบ่งชี้ถึงความสมดุลที่ดีระหว่างการระบุผลลัพธ์ที่เป็นบวก และการลดความผิดพลาดจากการพลาดการตรวจพบ (false negatives) และผลบวกหลง (false positives) ดังสมการที่ 2

$$F - \text{measure} = \frac{2 \times \text{Precision} \times \text{Recall}}{(\text{Precision} + \text{Re})} \quad (2)$$

4. **Root Mean Square Error (RMSE)** คือ รากที่สองของค่าเฉลี่ยของค่าความคลาดเคลื่อนที่ยกกำลังสอง Squared Errors ทั้งหมด ดังสมการที่ 3

$$\text{RMSE} = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (3)$$

5. **Mean Squared Error (MSE)** คือ ค่าความคลาดเคลื่อนระหว่างค่าที่พยากรณ์กับค่าจริง ที่ยกกำลังสอง ดังสมการที่ 4

$$\text{MSE} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (4)$$

โดยที่

n คือ จำนวนตัวอย่าง

y_i คือ ค่าจริง

\hat{y}_i คือ ค่าที่พยากรณ์

ถ้าหากค่า RMSE และ MSE ต่ำหรือเข้าใกล้ 0 แสดงว่าแบบจำลองมีประสิทธิภาพสูงในการพยากรณ์

ส่วนค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดให้แต่ละแบบจำลองการพยากรณ์นั้นใช้การปรับค่าพารามิเตอร์แบบอัตโนมัติโดยใช้เครื่องมือ Optimize Parameters

ประเภท Regression การปรับค่าพารามิเตอร์ของแต่ละอัลกอริทึม สำหรับ Artificial Neural Network ใช้ learning rate เป็นค่าที่กำหนดความเร็วในการปรับปรุงค่าในการปรับค่า Max ค่า Min ให้อยู่ในช่วงที่ 0 - 1 ปรับค่าที่ละ 1 training cycles คือ จำนวนรอบ ในการปรับค่า Max ค่า Min ให้อยู่ในช่วงที่ 1 - 100 ปรับค่าที่ละ 10 hidden layer size 5 จำนวน 2 layer ส่วน Support Vector Machine ปรับ Parameter เป็น Anova เป็นฟังก์ชันที่สามารถใช้ในการทำให้ข้อมูลสามารถแยกออกจากกันได้ในกรณีที่มีข้อมูลไม่ได้เป็นเชิงเส้น ใช้ C ปรับค่าเพื่อลดข้อผิดพลาดจากข้อมูลฝึก ในการปรับค่า Max ค่า Min ให้อยู่ในช่วง 0.1 - 10 ใช้ max iterations ใช้กำหนดจำนวนครั้งสูงสุดที่อัลกอริทึมจะทำการปรับค่าพารามิเตอร์

ปรับค่า Max ค่า Min ให้อยู่ในช่วง 1 - 100 ส่วน Generalized Linear Model ปรับ Parameter ในช่วง stopping rounds เป็นจำนวนรอบที่โมเดลจะหยุดการฝึกเป็น 3 รอบ ช่วง stopping tolerance เป็น 0.001 และใช้ standardize ปรับสเกลของฟีเจอร์ให้อยู่ในช่วงที่เท่ากัน ในช่วง Value List ใช้ True

ส่วนประเภท Classification การปรับค่าพารามิเตอร์ของแต่ละอัลกอริทึม สำหรับ Decision Tree ใช้ maximal depth ความลึกสูงสุดของต้นไม้ ปรับค่า Max ค่า Min ให้อยู่ในช่วง 1 - 10 Criterion ใช้ในการแยกข้อมูลของแต่ละโหนด ในช่วง Value List ใช้ gain ratio, information gain, gini index และ accuracy ส่วน Gradient Boosting Tree ใช้ maximum number of threads จำนวนเธรดสูงสุดที่สามารถใช้ระหว่างการประมวลผล ในการปรับค่า Max ค่า Min ให้อยู่ในช่วงที่ 1 - 100 ใน min rows จำนวนข้อมูลขั้นต่ำที่ต้องมีในแต่ละโหนดเพื่อทำการ split ข้อมูลในโหนดนั้นๆ การปรับค่า Max ค่า Min ให้อยู่ในช่วงที่ 1 - 10 ส่วน Random Forest ใช้ maximal depth ความลึกสูงสุดของต้นไม้จะเติบโตได้ในแต่ละต้นไม้ ปรับค่า Max ค่า Min ให้อยู่ในช่วง 1 - 10 maximum number of threads เธรดสูงสุดที่สามารถใช้ในการประมวลผล ในการปรับค่า Max ค่า Min ให้อยู่ในช่วงที่ 1 - 100 และ Criterion ใช้ในการแยกข้อมูลของแต่ละโหนด ในช่วง Value List ใช้ gain ratio, information gain, gini index และ accuracy

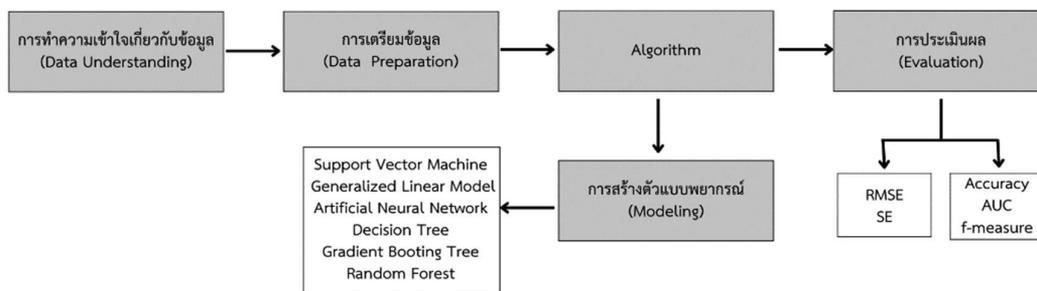


Figure 4 Forecasting model development process

Table 2 Datasets used in the study.

Data set	Details	Note
Monthly age-group data (age-month)	Month, Year, Annual population of Mueang Phayao District, Average monthly temperature, Average monthly rainfall, Average monthly relative humidity, Number of rainy days per month, Age group, Distance between outbreak areas and water sources, Distance between repeated outbreak areas, Forest area.	(In the regression analysis, the label used is the number of patients per 100,000 population per month or per week; in the classification analysis, the label used is the presence or absence of patients.)
Monthly gender-group data (sex-month)	Month, Year, Annual population of Mueang Phayao District, Average monthly temperature, Average monthly rainfall, Average monthly relative humidity, Number of rainy days per month, Gender group, Distance between outbreak areas and water sources, Distance between repeated outbreak areas, Forest area.	

ชุดข้อมูล	รายละเอียด	หมายเหตุ
Monthly sub-district data (subdistrict-month)	Subdistrict, Month, Year, Annual population by subdistrict, Average monthly temperature, Average monthly rainfall, Average monthly relative humidity, Number of rainy days per month, Population by subdistrict for each year, Distance between outbreak areas and water sources, Distance between repeated outbreak areas, Forest area.	
Weekly subdistrict data (subdistrict-week)	Subdistrict, Week, Year, Annual population by subdistrict, Average weekly temperature, Average weekly rainfall, Average weekly relative humidity, Number of rainy days per week, Distance between outbreak areas and water sources, Distance between repeated outbreak areas in the subdistrict health area, Forest area.	(In the regression analysis, the label used is the number of patients per 100,000 population per month or per week; in the classification analysis, the label used is the presence or absence of patients.)
Weekly age-group data (age-week)	Week, Year, Annual population of Mueang Phayao District, Average weekly temperature, Average weekly rainfall, Average weekly relative humidity, Number of rainy days per week, Age group, Distance between outbreak areas and water sources, Distance between repeated outbreak areas, Forest area.	
Weekly gender-disaggregated data (sex-week)	Week, Year, Annual population of Mueang Phayao District, Average weekly temperature, Average weekly rainfall, Average weekly relative humidity, Number of rainy days per week, Gender group, Distance between outbreak areas and water sources, Distance between repeated outbreak areas, Forest area.	

ผลการทดลอง

ผลการวัดประสิทธิภาพของแบบจำลองการพยากรณ์ประเภท Regression ซึ่งในชุดข้อมูลมีปัจจัยด้านระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ โดยใช้ Support Vector Machine, Generalized Linear Model และ Artificial Neural Network พบว่าแบบจำลอง Artificial Neural Network มีประสิทธิภาพสูงสุดในชุดข้อมูล sex-week ซึ่งให้ค่า RMSE ต่ำสุดที่ 2.350 ดังแสดงใน Table 3

ผลการวัดประสิทธิภาพของแบบจำลองการพยากรณ์ประเภท Regression ซึ่งในชุดข้อมูลไม่ได้นำปัจจัยด้านระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์มาใช้ในชุดข้อมูล โดยใช้ Support Vector Machine, Generalized Linear Model และ Artificial Neural Network พบว่าแบบจำลอง Artificial Neural Network มีประสิทธิภาพสูงสุดในชุดข้อมูล sex-week ซึ่งให้ค่า RMSE ต่ำสุดที่ 0.968 ดังแสดงใน Table 4

Table 3 Performance measurement results of Regression with geographic information system factors

Datasets	Support Vector Machine		Generalized Linear Model		Artificial Neural Network	
	RMSE	MSE	RMSE	MSE	RMSE	MSE
age-month	8.708	79.177	23.904	620.361	14.374	208.107
sex-month	8.008	70.643	14.093	246.917	9.248	100.780
subdistrict-month	41.001	1681.967	100.817	11317.320	34.311	1347.955
subdistrict-week	22.158	524.983	43.522	1918.165	13.904	193.514
age-week	3.346	11.521	9.557	92.275	5.720	32.767
sex-week	2.389	5.716	5.163	27.073	2.350	5.542

Table 4 Performance measurement results of Regression

Datasets	Support Vector Machine		Generalized Linear Model		Artificial Neural Network	
	RMSE	MSE	RMSE	MSE	RMSE	MSE
age-month	5.921	37.412	5.211	27.593	3.925	15.687
sex-month	3.097	11.146	2.942	9.146	2.149	4.772
subdistrict-month	77.368	6564.470	71.536	5216.128	62.428	4303.912
subdistrict-week	31.291	982.351	4.913	26.385	5.079	27.350
age-week	8.127	66.162	1.889	3.600	1.876	3.596
sex-week	6.166	38.058	1.027	1.064	0.968	0.942

ผลการวัดประสิทธิภาพของแบบจำลองการพยากรณ์ประเภท Classification ซึ่งในชุดข้อมูลมีปัจจัยด้านระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ โดยใช้ Decision Tree, Gradient Boosting Tree และ Random Forest พบว่า Random Forest มีความแม่นยำสูงสุดในทุกชุดข้อมูล โดยเฉพาะในชุดข้อมูล subdistrict-month ซึ่งให้ค่า Accuracy ที่ 99.82% ดังแสดงใน Table 5

ผลการวัดประสิทธิภาพของแบบจำลองการพยากรณ์ประเภท Classification ซึ่งในชุดข้อมูลไม่ได้นำปัจจัยด้านระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์มาใช้ในชุดข้อมูล โดยใช้ Decision Tree, Gradient Boosting Tree และ Random Forest พบว่า Gradient Boosting Tree มีความแม่นยำสูงสุดในทุกชุดข้อมูล โดยเฉพาะในชุดข้อมูล subdistrict-week ซึ่งให้ค่า Accuracy ที่ 99.62% ดังแสดงใน Table 6

Table 5 Performance measurement results of Classification with geographic information system factors

Datasets	Decision Tree			Gradient Boosting Tree			Random Forest		
	Accuracy	AUC	F-measure	Accuracy	AUC	F-measure	Accuracy	AUC	F-measure
age-month	65.99%	0.695	53.44%	85.29%	0.904	84.84%	88.60%	0.923	88.22%
sex-month	62.50%	0.576	45.37%	81.67%	0.853	79.41%	75.00%	0.755	72.53%
subdistrict-month	98.13%	0.989	98.18%	98.89%	0.999	98.89%	99.82%	1.000	99.83%
subdistrict-week	63.79%	0.733	56.20%	90.37%	0.955	90.95%	95.48%	0.996	95.70%
age-week	70.12%	0.727	75.68%	89.37%	0.946	89.29%	90.63%	0.983	91.08%
sex-week	78.33%	0.849	74.76%	88.67%	0.954	89.36%	91.13%	0.962	91.34%

Table 6 Performance measurement results of Classification

Datasets	Decision Tree			Gradient Boosting Tree			Random Forest		
	Accuracy	AUC	F-measure	Accuracy	AUC	F-measure	Accuracy	AUC	F-measure
age-month	89.01%	0.855	92.36%	85.71%	0.860	90.05%	85.25%	0.778	89.76%
sex-month	86.90%	0.964	82.87%	85.00%	0.907	80.00%	78.33%	0.708	73.95%
subdistrict-month	97.22%	0.963	97.30%	98.98%	0.992	98.98%	92.92%	0.949	93.34%
subdistrict-week	97.62%	0.757	97.75%	99.62%	0.998	99.48%	96.84%	0.982	96.95%
age-week	90.33%	0.942	91.10%	88.80%	0.962	88.62%	84.39%	0.877	85.65%
sex-week	85.11%	0.917	81.86%	85.96%	0.923	86.36%	77.14%	0.801	78.98%

ในส่วนของ Stacking model ผู้วิจัยได้สลับทั้ง 3 อัลกอริทึมในการสร้างแบบจำลอง โดยใช้ 2 อัลกอริทึมเป็น Base Learner และใช้อีก 1 อัลกอริทึมเป็น Stacking Model Learner จากการสร้างแบบจำลองประเภท Regression ผลการ

ศึกษาพบว่าการใช้ Generalized Linear Model เป็น Stacking Model Learner ให้ประสิทธิภาพดีที่สุด ในชุดข้อมูล age-week มีค่า RMSE ที่ 1.457 ดังแสดงใน Table 7 ส่วนผลของการสลับ Stacking Model Learner แสดงดัง Table 8 และ 9

Table 7 Regression performance measurement results with Generalized Linear Model in Stacking Model Learner

Datasets	Regression - Generalized Linear Model	
	RMSE	MSE
age-month	12.513	159.305
sex-month	8.970	85.451
subdistrict-month	18.518	344.392
subdistrict-week	11.739	138.044
age-week	1.457	2.122
sex-week	3.438	11.836

Table 8 Regression performance measurement results with Support Vector Machine in Stacking Model Learner

Datasets	Regression - Support Vector Machine	
	RMSE	MSE
age-month	8.686	76.257
sex-month	8.136	69.249
subdistrict-month	26.373	761.848
subdistrict-week	27.927	800.542
age-week	4.553	20.872
sex-week	2.162	4.700

Table 9 Regression performance measurement results with Artificial Neural Network in Stacking Model Learner

Datasets	Regression - Artificial Neural Network	
	RMSE	MSE
age-month	8.835	84.318
sex-month	8.711	80.090
subdistrict-month	22.538	517.055
subdistrict-week	19.369	399.752
age-week	6.310	41.419
sex-week	2.231	5.085

จากการสร้างแบบจำลองประเภท Classification ใน ส่วนของ Stacking model ซึ่งผู้วิจัยได้สลับทั้ง 3 อัลกอริทึมในการสร้างแบบจำลอง ซึ่งผลการศึกษาพบว่าการใช้ Gradient Booting Tree เป็น Stacking Model Learner ให้ประสิทธิภาพดีที่สุด ในชุดข้อมูล subdistrict-month มีค่า Accuracy ที่ 99.12% ดังแสดงใน Table 10 ส่วนผลของการสลับ Stacking Model Learner แสดงดัง Table 11 และ 12

นอกจากนี้ ผู้วิจัยได้ทำการประยุกต์ใช้แบบจำลอง การในการพยากรณ์ โดยได้ทำการเลือกแบบจำลองที่มี

ประสิทธิภาพสูงสุดในส่วนของ Stacking Model ที่ใช้ Generalized Linear Model เป็น Stacking Model Learner มาใช้ในการพยากรณ์จำนวนผู้ป่วยโรคไข้เลือดออกในอำเภอเมืองพะเยา จังหวัดพะเยา โดยใช้ข้อมูลปี 2566 โดยผลลัพธ์จากพยากรณ์นี้ได้ถูกนำเสนอในรูปแบบแผนที่ ดังแสดงใน Figure 5 เพื่อแสดงข้อมูลเชิงพื้นที่อย่างชัดเจน ซึ่งช่วยให้ผู้มีส่วนเกี่ยวข้องสามารถนำข้อมูลไปใช้ในการวางแผน และตัดสินใจได้อย่างมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

Table 10 Classification performance measurement results with Gradient Booting Tree in Stacking Model Learner

Datasets	Classification - Gradient Booting Tree					
	Accuracy	AUC	Precision	Recall	F-measure	Specificity
age-month	88.33%	0.893	83.92%	93.67%	88.40%	83.43%
sex-month	98.33%	1.000	100.00%	95.56%	97.50%	100.00%
subdistrict-month	99.12%	0.991	98.55%	99.78%	99.15	98.44%
subdistrict-week	96.27%	0.963	93.09%	100.00%	96.42%	92.50%
age-week	95.06%	0.953	91.05%	99.38%	95.03%	91.03%
sex-week	91.13%	0.910	87.66%	96.70%	91.94%	85.02%

Table 11 Classification performance measurement results with Random Forest in Stacking Model Learner

Datasets	Classification - Random Forest					
	Accuracy	AUC	Precision	Recall	F-measure	Specificity
age-month	88.85%	0.925	88.60%	88.35%	88.32%	89.33%
sex-month	72.50%	0.749	77.39%	61.97%	68.58%	82.05%
subdistrict-month	98.95%	1.000	97.99%	100.00%	98.98%	97.84%
subdistrict-week	96.59%	0.996	93.68%	100.00%	96.73%	93.15%
age-week	91.52%	0.980	84.98%	100.00%	91.86%	83.75%
sex-week	90.89%	0.958	92.67%	89.60%	91.09%	92.29%

Table 12 Classification performance measurement results with Decision Tree in Stacking Model Learner

Datasets	Classification - Decision Tree					
	Accuracy	AUC	Precision	Recall	F-measure	Specificity
age-month	82.00%	0.840	79.82%	85.12%	81.89%	79.18%
sex-month	75.83%	0.560	78.88%	72.58%	73.84%	78.97%
subdistrict-month	98.89%	0.988	97.99%	99.89%	98.93%	97.84%
subdistrict-week	86.43%	0.899	80.06%	97.47%	87.85%	75.29%
age-week	86.43%	0.883	80.99%	93.85%	86.88%	79.64%
sex-week	88.18%	0.906	87.30%	90.54%	88.83%	85.61%

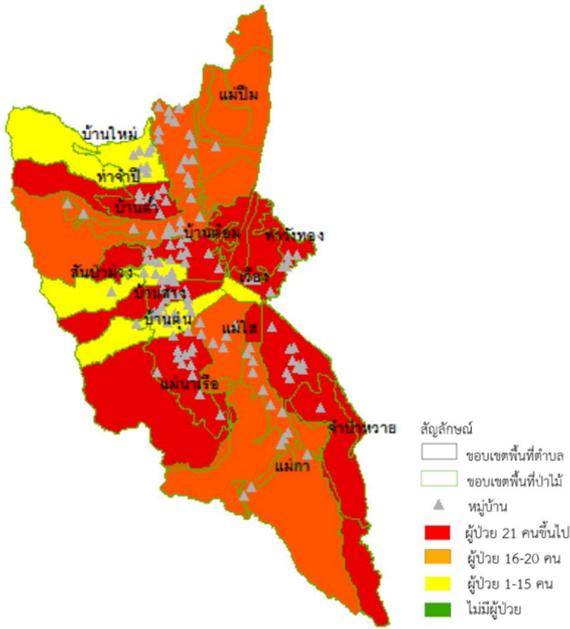


Figure 5 Map displaying the dengue fever outbreak forecast for 2023, by sub-district

อภิปรายผลการทดลอง

จากการศึกษาการใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) ในการพยากรณ์โรคไข้เลือดออกร่วมกับระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ (GIS) ในการพยากรณ์โรคไข้เลือดออกในอำเภอเมืองพะเยา จังหวัดพะเยา ผู้วิจัยได้ศึกษาวิเคราะห์ถึงความสัมพันธ์ของปัจจัยต่าง ๆ ในการเกิดโรคไข้เลือดออก โดยการใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องสามารถนำไปใช้เป็นเครื่องมือในการเฝ้าระวัง สามารถควบคุมโรคได้อย่างมีประสิทธิภาพในอนาคต การพยากรณ์ที่แม่นยำ และมีประสิทธิภาพจะช่วยให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องสามารถวางแผนและดำเนินการป้องกันการระบาดของโรคได้ทันทั่วทั้ง ซึ่งจะช่วยลดจำนวนผู้ป่วย หรือผลกระทบทางสังคมที่เกิดจากการระบาดของโรคไข้เลือดออก ซึ่งการใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ช่วยให้สามารถวิเคราะห์ และจัดการข้อมูลภูมิศาสตร์ที่มีความซับซ้อนได้ เช่น ระยะห่างระหว่างพื้นที่การระบาดกับแหล่งน้ำ และพื้นที่ป่าไม้ ซึ่งเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการแพร่ระบาดของโรคไข้เลือดออก การนำข้อมูลเหล่านี้มาวิเคราะห์ร่วมกับข้อมูลทางอุตุนิยมนวิทยา และข้อมูลประชากรช่วยให้สามารถสร้างแบบจำลองที่มีความแม่นยำในการพยากรณ์การระบาดของโรคได้ โดยผู้วิจัยได้นำปัจจัยดังกล่าวมาสร้างเป็นแบบรายเดือน และรายสัปดาห์

การวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่อการพยากรณ์ ผู้วิจัยได้สร้างชุดข้อมูลที่ใช้และไม่ใช้ระบบสารสนเทศทางภูมิศาสตร์ เพื่อเปรียบเทียบข้อแตกต่างของชุดข้อมูลพบว่า ชุดข้อมูลที่ใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ ในประเภท Regression พบว่า

แบบจำลอง ที่มีประสิทธิภาพสูงสุด อยู่ในชุดข้อมูล sex-week โดยให้ค่า RMSE ต่ำสุดที่ 2.350 ส่วนชุดข้อมูลที่ไม่ใช้ ให้ค่า RMSE ต่ำสุดที่ 0.968 ส่วนในประเภท Classification ชุดข้อมูลที่ใช้ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ พบว่าแบบจำลอง ที่มีประสิทธิภาพสูงสุด อยู่ในชุดข้อมูล subdistrict-month โดยให้ค่า Accuracy ที่ 99.82% ส่วนชุดข้อมูลที่ไม่ใช้ ให้ค่า Accuracy ที่ 99.62% แสดงถึงผลของปัจจัยด้านภูมิสารสนเทศมีผลต่อประสิทธิภาพของแบบจำลอง

จากการเปรียบเทียบอัลกอริทึมและชุดข้อมูล พบว่า ในประเภท Regression พบว่า Generalized Linear Model ให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด ที่ RMSE 1.457 ในชุดข้อมูล sex-week ส่วนผลที่ได้ประเภท Classification พบว่า Gradient Boosting Tree ให้ประสิทธิภาพที่ดีที่สุด ที่ Accuracy 99.12% ในชุดข้อมูล subdistrict-month เป็นแบบจำลองที่เหมาะสมที่สุดในการพยากรณ์การระบาดของโรคไข้เลือดออก เนื่องจากสามารถให้ค่าความแม่นยำ และประสิทธิภาพสูงสุดในการพยากรณ์ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยวิธีการที่ขับเคลื่อนด้วยข้อมูลในการพยากรณ์ และเฝ้าระวังโรคไข้เลือดออก ซึ่งแบบจำลองที่มีประสิทธิภาพสูงสุดสองแบบคือ Neural Networks และ Decision Trees ที่ Accuracy 52% (Sylvestre *et al.*, 2022) งานวิจัยแบบจำลองการพยากรณ์ของการระบาดของโรคไข้เลือดออก พบว่าวิธี Decision Tree เป็นแบบจำลองในการสร้างแบบจำลองสำหรับการพยากรณ์การระบาดของโรคไข้เลือดออกที่มีประสิทธิภาพสูงสุดโดยให้ค่าความแม่นยำสูงสุด 69.83% และ 75.4% ตามลำดับ (จิรโรจน์ ตอสะสุกุล, 2564) งานวิจัยการพยากรณ์จำนวนผู้ป่วยโรคไข้เลือดออกในประเทศมาเลเซีย พบว่า SSA-LSTM ซึ่งเป็นแบบจำลองที่ใช้ทั้ง stacked LSTM layers และ spatial attention ทำผลงานได้ดีที่สุด โดยมีค่า RMSE เท่ากับ 3.17 (Majeed *et al.*, 2023) และงานวิจัยการพยากรณ์พื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดโรคไข้เลือดออก เพื่อใช้ในการเฝ้าระวัง และวางแผนป้องกันใน โดยการใช้แบบสำรวจลูกน้ำยุงลาย เช่น House Index (HI), Container Index (CI) และ Breteau Index (BI) เพื่อนำมาพัฒนาแบบจำลองการวิเคราะห์ และพยากรณ์พื้นที่เสี่ยงในระบบ GIS ซึ่งในงานวิจัยนี้ไม่ได้ใช้ Machine Learning ในการพยากรณ์ (สุรศักดิ์ สุขสาย และ วณิชดา แก่นอากาศ, 2550)

จากผลการศึกษาผลว่า Generalized Linear Model และ Gradient Boosting Tree มีประสิทธิภาพที่ดีที่สุดในการพยากรณ์ เนื่องจากแบบจำลองเหล่านี้มีความสามารถในการจับความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนในข้อมูล สามารถจัดการกับความแปรปรวน ความเอนเอียงในข้อมูลได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้การพยากรณ์มีความแม่นยำสูง และสามารถใช้เป็น

เครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการคาดการณ์การระบาดของโรคได้ สามารถจัดการกับความไม่สมดุลของข้อมูล และเพิ่มประสิทธิภาพการพยากรณ์ได้เป็นอย่างดี ทำให้สามารถคาดการณ์การระบาดของโรคได้อย่างแม่นยำ

จากการศึกษาปัจจัยที่ใช้ในการสร้างชุดข้อมูล ผู้แต่งได้ใช้ปัจจัยที่คาดว่าจะมีผลต่อการระบาด เช่น ปัจจัยที่ส่งผลต่อผู้ที่เป็นพาหะไข้เลือดออก ซึ่งอาจจะเป็นแหล่งน้ำที่เป็นที่วางไข่ ปริมาณน้ำฝน ความชื้นหรือป่าไม้ซึ่งอาจมีผลต่อการเจริญเติบโตของยุง และปัจจัยด้านอื่น ที่เกี่ยวข้องกับการระบาด เช่น จำนวนประชากร การเกิดการระบาดซ้ำในพื้นที่ และปัจจัยที่ใช้ในการจัดกลุ่มชุดข้อมูล เช่น เพศ อายุ ฯลฯ ทั้งนี้การเกิดการระบาดเป็นกระบวนการธรรมชาติที่ซับซ้อน จำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมถึงปัจจัยที่ใช้ต่อไป อีกทั้งงานวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัดบางประการ เช่น การรวบรวมข้อมูลจากแหล่งข้อมูลที่หลากหลาย ซึ่งอาจทำให้เกิดความไม่สมบูรณ์ และความไม่สม่ำเสมอของข้อมูลในชุดข้อมูลรวมถึงความต้องการของแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องที่ต้องอาศัยข้อมูลจำนวนมาก และการปรับแต่งแบบจำลองให้มีความเหมาะสม ซึ่งอาจเป็นข้อจำกัดในการนำไปใช้ในบริบทที่มีข้อจำกัดด้านข้อมูล และอาจเกิดการ Overfitting ได้ ดังนั้น จำเป็นต้องมีการวิจัยเพิ่มเติมเพื่อพัฒนาปรับปรุงแบบจำลองให้มีความยืดหยุ่น และมีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้นในสภาพแวดล้อมที่หลากหลาย

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณโรงพยาบาลพะเยา สถานีอุตุนิยมวิทยาพะเยา และสำนักงานสาธารณสุขจังหวัดพะเยา ที่ให้ความอนุเคราะห์ข้อมูล ให้คำปรึกษา และข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

กรมควบคุมโรค. (2560). *ความรู้ทั่วไปโรคไข้เลือดออก*. กระทรวงสาธารณสุข.

กรมควบคุมโรค. (2563). *ไข้เลือดออก (Dengue Fever และ Dengue Hemorrhagic Fever) (ICD 10 A90, A91)*. <https://ddc.moph.go.th/dcd/pagecontent.php?page=565&dept=dcd>

กอบเกียรติ สระอุบล. (2563). *เรียนรู้ Data Science และ AI: Machine Learning ด้วย Python* (พิมพ์ครั้งที่ 1). มีเดียเนทเวิร์ค.

จิรโรจน์ ตอสะสุกุล. (2564). แบบจำลองการพยากรณ์ของการระบาดของโรคไข้เลือดออกโดยใช้เทคนิคการทำเหมืองข้อมูล. *วารสารวิชาการชาชนนเทคโนโลยี มจร.ภูเก็ต*, 5(2), 51–60.

โรงพยาบาลพญาไท. (ม.ป.ป.). *ไข้เลือดออก อย่าปล่อยให้เป็นซ้ำ อันตรายถึงชีวิต*. <https://www.phyathai-sriracha.com/article/medicine/>

สายชล สันสมบุรณ์ทอง. (2560). *การทำเหมืองข้อมูล เล่ม 1: การค้นหาความรู้จากข้อมูล*. จามจุรีโปรดักส์.

สำนักงานสาธารณสุขจังหวัดพะเยา. (2566). *บทสรุปผู้บริหารสถานการณ์โรคไข้เลือดออก จังหวัดพะเยา (ฉบับที่ 1 ปี 2566)*.

สุรศักดิ์ สุขสาย และ วนิดา แก่นอากาศ. (2550). การพยากรณ์พื้นที่เสี่ยงต่อการเกิดโรคไข้เลือดออกเพื่อการวางแผนเฝ้าระวังและป้องกันโรคในจังหวัดอุบลราชธานี. *วารสารวิจัย มข. (ฉบับบัณฑิตศึกษา)*, 7(2), 83–97. <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/gskku/article/view/23776/20224>

ศูนย์วิจัยภูมิสารสนเทศเพื่อประเทศไทย. (ม.ป.ป.). *ความหมายของคำว่า “ระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์”*. <https://www.gisthai.org/about-gis/gis.html>

Dietterich, T. G. (2000). Ensemble methods in machine learning. In J. Kittler & F. Roli (Eds.), *Multiple classifier systems* (pp. 1–15). Springer. https://doi.org/10.1007/3-540-45014-9_1

EFD Initiative. (2024, September 5). *Forest cover could reduce hospital admissions caused by dengue fever*. <https://www.efdininitiative.org/news/forest-cover-could-reduce-hospital-admissions-caused-dengue-fever>

Hofmann, M., & Klinkenberg, R. (Eds.). (2013). *RapidMiner: Data mining use cases and business analytics applications*. CRC Press.

Kohavi, R. (1995). A study of cross-validation and bootstrap for accuracy estimation and model selection. *Proceedings of the 14th International Joint Conference on Artificial Intelligence (IJCAI)*, 1137–1145. <https://doi.org/10.5555/1643031.1643047>

Majeed, M. A., Shafri, H. Z. M., Zulkaffi, Z., & Wayayok, A. (2023). A deep learning approach for dengue fever prediction in Malaysia using LSTM with spatial attention. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 20(5), 4087. <https://doi.org/10.3390/ijerph20054087>

Sylvestre, E., Joachim, C., Cécilia-Joseph, E., Bouzillé, G., Campillo-Gimenez, B., Cuggia, M., & Cabié, A. (2022). Data-driven methods for dengue prediction and surveillance using real-world and Big Data: A systematic review. *PLoS Neglected Tropical Diseases*, *16*(1), e0010056. <https://doi.org/10.1371/journal.pntd.0010056>

ตัวแบบพยากรณ์การตรวจจับข่าวปลอมด้วยเทคนิคการเรียนรู้แบบรวมกลุ่ม

A predictive model for fake news detection using ensemble learning techniques

ธงชัย แก้วกิริยา¹ และ กาญจนา ศีลาราวเวทย์²

Thongchai Kaewkiriya¹ and Kanchana Silawarawet²

Received: 6 August 2024 ; Revised: 30 September 2024 ; Accepted: 11 November 2024

บทคัดย่อ

ในปัจจุบันนี้ สื่อสังคมออนไลน์เป็นหนึ่งในกิจกรรมสำคัญของประชาชนทั่วไป เพื่อวัตถุประสงค์ในการแบ่งปันข่าวสารและเรื่องราวต่าง ๆ แก่ผู้คน ด้วยเหตุนี้ จึงก่อให้เกิดกลุ่มผู้ไม่ประสงค์ดีที่ต้องการหาผลประโยชน์แก่ตนเองและก่อความวุ่นวายในสังคม ด้วยการสร้างข่าวลวงและเผยแพร่แก่บุคคลทั่วไป ในช่วงเวลาที่ผ่านมาได้มีความพยายามในการสร้างระบบสำหรับตรวจจับข่าวลวงบนสื่อสังคมออนไลน์ได้โดยอัตโนมัติ เช่น การตรวจจับโดยใช้การเรียนรู้ของเครื่องจักรเรียนรู้ข้อมูลข่าวสาร หรือ การใช้ระบบการเรียนรู้พฤติกรรมของผู้คนบนสื่อสังคมออนไลน์ เป็นต้น ซึ่งจากวิธีการที่ได้กล่าวมา จึงก่อให้เกิดแนวคิดของการบูรณาการการวิเคราะห์ข้อมูลแบบหลายปัจจัย เพื่อเสริมความถูกต้องของการทำนายระบบตรวจจับข่าวลวงให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น ในงานวิจัยฉบับนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อนำเสนอตัวแบบพยากรณ์ในการตรวจจับข่าวปลอม ด้วยเทคนิคการเรียนรู้แบบรวมกลุ่มด้วยวิธีการโหวต โดยประกอบไปด้วยชุดข้อมูล 20,000 ชุดข้อมูล ซึ่งพิจารณาปัจจัยแหล่งที่มาของสื่อประกอบและปฏิสัมพันธ์ของผู้ใช้งานต่าง จากผลการทดสอบร่วมกับฐานข้อมูลข่าวลวงซึ่งบันทึกจากสื่อสังคมออนไลน์อย่าง Fakeddit.com พบว่าแบบจำลองที่นำเสนอมีประสิทธิภาพความถูกต้องในการพยากรณ์เท่ากับ 96.97% ซึ่งมากกว่าเทคนิคการเรียนรู้อื่นที่นำมาใช้ประกอบการเรียนรู้

คำสำคัญ: การพยากรณ์ข้อมูล, การตรวจจับข่าวปลอม, การเรียนรู้ของเครื่อง, การเรียนรู้แบบรวมกลุ่ม

Abstract

Nowadays, social media is one of the important activities for the general public for the purpose of sharing news and various stories with people. As a result, there are ill-intentioned individuals who seek to benefit themselves and cause chaos in society by creating and spreading fake news to the public. Recently, efforts have been made to develop systems for automatically detecting fake news on social media, such as using machine learning to analyze news data or using systems that learn the behavior of people on social media. From these methods, the concept of integrating multi-factor data analysis has emerged to enhance the accuracy and efficiency of fake news detection systems. This research aims to present a predictive model for detecting fake news using ensemble learning techniques with voting methods. It includes a dataset of 20,000 data points, considering factors such as media sources and user interactions. The test results, in conjunction with the fake news database recorded from social media like Fakeddit.com, show that the proposed model has a prediction accuracy of 96.97%, which is higher than other learning techniques used for comparison.

Keywords: Predictive model, fake news detection, machine learning, ensemble learning

¹⁻² สาขาวิศวกรรมไฟฟ้าและคอมพิวเตอร์ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์ ปทุมธานี 12120

¹⁻² Department of Electrical and Computer Engineering, Faculty of Engineering, Thammasat University, Pathumthani, 12120

Corresponding Email: tkaewkiriya@gmail.com

บทนำ

ด้วยการเติบโตทางเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ตที่มีความก้าวหน้าอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดสื่อสังคมออนไลน์ (Social Media) จำนวนมากที่ประชาชนทั่วไปสามารถเข้าถึงได้ไม่ยาก การติดตามและแบ่งปันข่าวสารกับคนใกล้ชิดหรือแม้แต่ผู้สาธารณะกลายเป็นหนึ่งในกิจวัตรประจำวันของบุคคลทั่วไป และเมื่อมีข่าวสารเกิดขึ้น ย่อมมีบุคคลไม่หวังดีบางกลุ่มที่พยายามสร้างและเผยแพร่ข่าวลวง (Fake News) สื่อสังคมออนไลน์ โดยมีจุดประสงค์ที่ไม่ดี เช่น ความรู้เท่าไม่ถึงการณ์ของบุคคลบางกลุ่มในการเผยแพร่เนื้อหาหลอกลวงเพื่อกลั่นแกล้งผู้คน การมุ่งสร้างผลประโยชน์โดยกลุ่มมิชชันนารีโดยแอบอ้างข่าวลวง การก่อความวุ่นวายของกลุ่มหัวรุนแรงทางการเมือง เป็นต้น ซึ่งข่าวลวงเหล่านี้อาจก่อความเสียหายต่อบุคคลและสังคมได้ ทั้งการทำให้เสื่อมเสียชื่อเสียง ไปจนถึงความขัดแย้งภายในสังคม เป็นต้น

ในช่วงหลายปีที่ผ่านมา บริษัท องค์กร หน่วยงานภาครัฐ และนักวิจัยจำนวนมาก ได้มีความพยายามที่จะกำจัดและยับยั้งข่าวลวงเหล่านี้ด้วยวิธีการที่หลากหลาย หนึ่งในวิธีการแรกเริ่มที่มีง่ายที่สุด นั่นคือการใช้บุคคลากรในการเฝ้าสังเกตเนื้อหาข่าวที่ได้รับรายงานมาจากผู้ใช้ในระบบ โดยเมื่อทางบุคคลากรได้รับรายงาน ก็จะทำการตรวจสอบข้อเท็จจริงโดยหากพบว่าเนื้อหาข่าวนั้นมีการนำเสนอข้อมูลเท็จ ก็จะทำการนำเนื้อหาข่าวนั้น ๆ ออกจากระบบไป อย่างไรก็ตามวิธีการดังกล่าวจำเป็นต้องใช้บุคคลากรในการเฝ้าสังเกตข่าวในระบบเป็นจำนวนมากและใช้เวลาในการพิจารณาที่ยาวนาน เนื่องจากสื่อสังคมออนไลน์นี้มีผู้ใช้งานจำนวนมาก และจำนวนข่าวเผยแพร่ในแต่ละวันนั้นก็ยังมีปริมาณสูงเช่นกัน อีกทั้งอาจมีบางกรณีที่เนื้อหาข่าวดังกล่าวเป็นข่าวปลอม แต่ผู้ใช้งานเข้าใจผิดว่าเป็นข่าวจริง จึงไม่ทำการรายงานข่าวนั้น ด้วยเหตุนี้จึงมีความพยายามให้วิธีการอื่น ๆ ที่พึ่งพาแรงงานมนุษย์น้อยลง และใช้เวลาในการพิจารณาที่ลดลงเช่นกัน

อย่างไรก็ดี เมื่อเวลาผ่านไป ผู้ไม่หวังดีได้มีการปรับปรุงรูปแบบการนำเสนอข่าวปลอม ทำให้เนื้อหาข่าวหรือพาดหัวข่าวมีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น และด้วยเหตุนี้การพิจารณาข้อมูลผ่านทางพาดหัวข่าวและเนื้อหาข่าวอาจจะยังไม่เพียงพอ ต่อมานักวิจัยทำการเพิ่มข้อมูลประกอบการพิจารณาและคัดกรองข่าวลวง โดยเพิ่มการวิเคราะห์รูปภาพประกอบข่าว เพื่อดูความเชื่อมโยงของเนื้อหาข่าว และความน่าเชื่อถือของข่าว ซึ่งผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าการเพิ่มคุณลักษณะประกอบการตัดสินใจ ช่วยเหลือการคัดกรองข่าวลวงได้เป็นอย่างดี

จากประเด็นที่กล่าวมาทำให้เห็นโอกาสในการพัฒนาและปรับปรุงวิธีการคัดกรองข่าวลวง โดยมีข้อสันนิษฐานว่า หากมีการเพิ่มคุณลักษณะของข่าว โดยพิจารณาข้อมูลการมีส่วนร่วมของผู้ใช้งาน เช่น การกดไลก์ การแสดงความคิดเห็น เข้าร่วมในการตัดสินใจ จะช่วยในการคัดกรองเพิ่มเติมได้ว่าข่าวดังกล่าวนั้นเป็นข่าวลวงหรือไม่

ในงานวิจัยฉบับนี้จึงได้นำเสนอแบบจำลองรูปแบบในการตรวจจับและคัดแยกข่าวลวงบนสื่อสังคมออนไลน์อย่างมีประสิทธิภาพ โดยแบบจำลองนี้ใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องจักร (Machine Learning) เพื่อพิจารณาข้อมูลประกอบไปด้วย 2 ส่วนหลัก ๆ ได้แก่ ข้อมูลรูปภาพข่าว และข้อมูลการมีส่วนร่วมของผู้ใช้งาน โดยใช้ฐานข้อมูลข่าวลวงของสื่อสังคมออนไลน์เรดดิต (Fakeddit) กว่า 20,000 ชุดข้อมูล

ทฤษฎีและงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. ข่าวลวงและผลกระทบที่อาจเกิดขึ้น

ข่าวลวง หมายถึง ข่าวที่มีความพยายามปลอมแปลงให้มีความน่าเชื่อถือและมีความเป็นผู้นำมาเผยแพร่ เพื่อให้ผู้คนทั่วไปไม่สามารถแยกออกได้ว่าข่าวดังกล่าวเป็นข่าวลวงหรือไม่ (Mustafaraj & Metaxas, 2017) โดยจากการศึกษาพบว่าข่าวลวงนั้นเกิดมาตั้งแต่สมัยโรมันโบราณ โดยในยุคนี้มีจุดมุ่งหมายของการเผยแพร่ข่าวลวงเพื่อการสงคราม (Shu et al., 2017) และด้วยการเติบโตของสื่อต่าง ๆ ในศตวรรษที่ 20 เช่น โทรทัศน์ หนังสือพิมพ์ และสื่อประเภทหนึ่งสู่จำนวนมาก (one-to-many) ทำการมีการเติบโตของข่าวลวงเพิ่มสูงขึ้น (Allcott & Gentzkow, 2017) และในศตวรรษที่ 21 การมาถึงของเทคโนโลยีอินเทอร์เน็ต ทำให้เกิดสื่อสังคมออนไลน์ (social media) เช่น Facebook, Twitter, Reddit เป็นต้น ทำให้การเผยแพร่ข่าวลวงเกิดขึ้นหลากหลายรูปแบบ และมีการแพร่กระจายของข่าวลวงเกิดขึ้นเป็นทวีคูณ

ตัวอย่างกรณีที่เกิดการเติบโตของการเผยแพร่ข่าวลวงที่น่าสนใจ นั่นคือ ช่วงการเลือกตั้งของสหรัฐอเมริกาในปี ค.ศ. 2016 นั้น พบว่ามีการเติบโตของข่าวลวงบนสื่อต่าง ๆ อย่างเห็นได้ชัด โดยกระทำไปเพื่อผลประโยชน์ในการเลือกตั้งและการโจมตีทางการเมือง (Gimpel et al., 2021)

ผลกระทบของข่าวลวงนั้นสามารถสร้างผลกระทบได้ตั้งแต่ความเกิดเข้าใจผิดในระดับบุคคล เช่น การเสียชีวิตของบุคคลที่มีชื่อเสียง (Paschen, 2020) ไปจนถึงความสูญเสียและความตื่นตระหนกเป็นวงกว้างในสังคม เช่น การเผยแพร่ข่าวลวงเกี่ยวข้องที่เกี่ยวกับโรคระบาด (Al Asaad & Erascu, 2018) เป็นต้น

2. สื่อสังคมออนไลน์ Reddit.com

เพื่อพิสูจน์สมมุติฐานดังกล่าว จึงจำเป็นจำต้อง มีกรณีตัวอย่างที่น่าเชื่อถือและเป็นกรณีที่เคยเกิดขึ้นในโลก ความเป็นจริง เพื่อเป็นการจำลองเหตุการณ์ที่อาจเกิดขึ้นเมื่อนำโครงประกอบไปประยุกต์ใช้ โดยในกรณีนี้ทางผู้วิจัยได้ จำกัดขอบเขตการศึกษาที่เว็บไซต์ Reddit.com

สำหรับ Reddit.com นั้น เป็นสื่อสังคมออนไลน์ ที่มีชื่อเสียงของสหรัฐอเมริกา โดยมีการรายงานว่า มีผู้ใช้งาน รวมมากกว่า 52 ล้านคนต่อวัน และยังมีกระทู้ย่อย (Subreddit) สำหรับให้ผู้ใช้งานเข้าพูดคุยรวมกันมากกว่า 138,000 กระทู้ ซึ่งเว็บไซต์นี้เคยมีส่วนสำคัญในประเด็นอันเป็นที่ถกเถียง มากมาย เช่น การค้นหาเมื่อระเบิดจากเหตุระเบิดเมืองบอสตัน รวมไปถึงการพูดคุยในประเด็นการเหยียดเชื้อชาติและการ เหยียดหยามเพศ (Proferes, 2021) อีกนัย Reddit.com เป็น เว็บไซต์ชาวสังคม ซึ่งเนื้อหาและการถกเถียงเป็นลักษณะของ การทำงานแบบมีส่วนร่วมโดยผู้ใช้ ตรงข้ามกับโซเชียลอื่น ๆ ที่เนื้อหาได้รับการจัดการโดยทีมบรรณาธิการหรืออัลกอริทึม ในทางปฏิบัติ ผู้ใช้ Reddit เลือกที่จะส่งลิงก์ไปยังโซเชียลอื่นหรือ แบ่งปันมุมมองของตนเองในโพสต์ Redditors รายอื่นที่สมัคร เป็นสมาชิกดังกล่าวจะพิจารณาแยกกันว่าโพสต์นั้นต้องการ โหวตขึ้นหรือลง ซึ่งจะถูกรวมเข้าด้วยกันเพื่อให้คะแนน ของโพสต์นั้น โดย The Reddiquette ซึ่งเป็นชุดกฎที่เป็นลาย ลักษณะอักษรและค่านิยมที่ Redditors สนับสนุนในการปฏิบัติ ตาม โดยเน้นย้ำถึงความจำเป็นในการลงคะแนนโดยพิจารณา ว่าโพสต์หรือความคิดเห็นมีส่วนในการสนทนาหรือไม่ การ โหวตขึ้นและลงเหล่านี้ทำหน้าที่เป็นการวิเคราะห์พฤติกรรมเชิงตัวเลขของการยอมรับทางสังคม (Yu et al., 2022) อัลกอริทึม

จะจัดเรียงและจัดลำดับโพสต์และเนื้อหาอื่น ๆ ตามคะแนนที่ ได้รับจากการโหวตและเวลาตั้งแต่เผยแพร่ ซึ่งแตกต่างจากการ กดไลค์ทั่วไปบน Facebook หรือ Twitter ภายใต้แต่ละโพสต์ และลิงก์ที่แบ่งปัน Redditors ได้รับการสนับสนุนให้พูดคุยผ่าน ความคิดเห็นที่ได้รับการประเมินและถกเถียงด้วยวิธีการโหวต ขึ้นและลงและเรียงลำดับตามนั้น (Duguay, 2022)

จากเหตุผลการใช้งานปริมาณมหาศาลที่เกิดขึ้น และ ความเสี่ยงต่อการแพร่กระจายข่าวที่ไม่ถูกต้องนี้ จึงนำไปสู่ ความพยายามในการนำโครงประกอบที่น่าเสนอมาทดสอบกับ ข้อมูลที่ได้รับจากเว็บไซต์นี้ เพื่อพิสูจน์ประสิทธิภาพของโครง ประกอบที่จะนำเสนอในบทความต่อไป

3. การเรียนรู้แบบรวมกลุ่ม

เทคนิคการเรียนรู้แบบกลุ่มเป็นเทคนิคของ การเรียนรู้ของเครื่องการขั้นสูงที่ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการ พยากรณ์ผล โดยการใช้เทคนิคที่ใช้แบบจำลองประเภทการ จำแนกข้อมูลหรือเทคนิคการเรียนรู้แบบมีผู้สอนหลายๆ แบบจำลอง มาช่วยในการหาคำตอบ ซึ่งเป็นเทคนิคที่มี ประสิทธิภาพสูง (Dietterich, 2000) โดยอัลกอริทึมที่พัฒนา บนแนวคิดเทคนิคแบบรวมกลุ่มที่นำมาใช้ในงานวิจัยครั้งนี้คือ เทคนิคแบบโหวต (Vote Ensemble) เป็นการนำชุดข้อมูลการ เรียนรู้ชุดเดียวกันแต่สร้างแบบจำลองด้วยเทคนิคหลากหลาย ต่างๆ โดยหลังจากได้แบบจำลองมาชุดหนึ่งแล้วจะทำการนำ ไปพยากรณ์ข้อมูลและนำคำตอบมารวมกันเพื่อดูว่าคำตอบ ไหนเหมาะสมที่สุดด้วยใช้วิธีการโหวตและทำการเลือกคำตอบ ที่ตอบตรงกันมากที่สุด แสดงตาม Figure 1

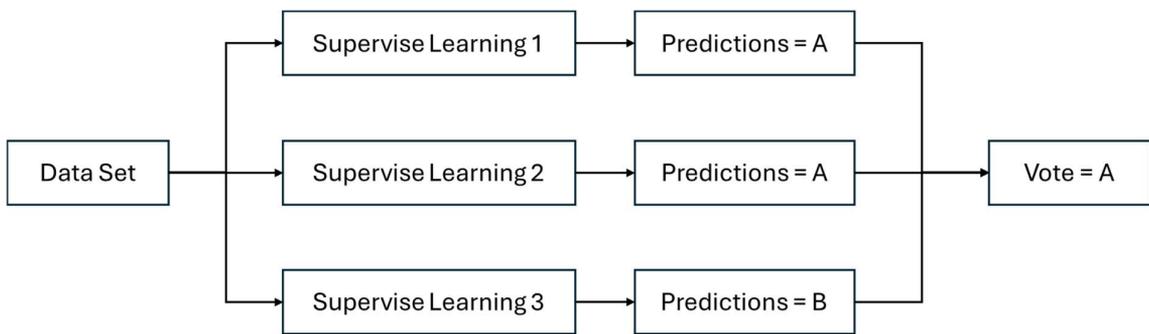


Figure 1 Ensemble learning techniques with voting

4. การแบ่งชุดข้อมูลและประเมินประสิทธิภาพ ตัวแบบพยากรณ์

ภายในงานวิจัยนี้ได้ใช้วิธีการแบ่งข้อมูลที่เรียกว่า Cross-validation โดยเป็นวิธีที่นิยมในการทำงานวิจัย เพื่อใช้ในการทดสอบประสิทธิภาพของโมเดลเนื่องจากผลที่ได้

มีความน่าเชื่อถือ เป็นการแบ่งข้อมูลออกเป็นหลายส่วน มักจะ แสดงด้วยค่า k เช่น 5-fold cross-validation คือ ทำการแบ่ง ข้อมูลออกเป็น 5 ส่วน โดยที่แต่ละส่วนมีจำนวนข้อมูลเท่ากัน และมีข้อมูลหนึ่งส่วนจะใช้เป็นตัวทดสอบประสิทธิภาพของ โมเดล โดยทำวนจนครบจำนวนที่แบ่งไว้

การวัดประสิทธิภาพโมเดลประเภทการจำแนกข้อมูล (Classification) จะมุ่งไปที่การหาค่าความถูกต้องโดยจะต้องทำความเข้าใจ โดย

1. True Positive (TP) คือสิ่งที่โปรแกรมทำนายว่าเป็นข่าวจริงและมีค่าเป็นจริง

2. True Negative (TN) คือสิ่งที่โปรแกรมทำนายว่าเป็นข่าวปลอมและมีค่าเป็นข่าวปลอมจริง

3. False Positive (FP) คือสิ่งที่โปรแกรมทำนายว่าเป็นข่าวจริงแต่มีค่าเป็นข่าวปลอม

4. False Negative (FN) คือสิ่งที่โปรแกรมทำนายว่าเป็นข่าวปลอมแต่มีค่าเป็นข่าวจริง

ซึ่งค่าดังกล่าวจะถูกนำไปแทนในสูตรเพื่อหาค่าวัดผลต่างๆ ได้ โดยจะได้มาจากตาราง Confusion Matrix ที่ให้ผลลัพธ์หลักๆ อยู่ 3 ค่า คือ Precision เป็นการวัดความถูกต้องของข้อมูล โดยพิจารณาแยกทีละคลาส Recall เป็นการวัดความถูกต้องของโมเดลโดยพิจารณาแยกทีละคลาส และ Accuracy เป็นการวัดความถูกต้องของตัวแบบ และเป็นค่าที่ใช้นำเสนอภายในงานวิจัย โดยจะพิจารณารวมทุกคลาส ด้วยสมการ (1)

$$\frac{TP+T}{TP+TN+FP+FN} \quad (1)$$

5. งานวิจัยการคัดแยกข่าว

จากการศึกษาข่าวปลอมและผลกระทบที่อาจเกิดขึ้น จะเห็นได้อย่างชัดเจนถึงผลกระทบร้ายแรงที่อาจเกิดขึ้นเป็นวงกว้าง หากมีข่าวปลอมเกิดขึ้นในสื่อต่างๆ และมีการเผยแพร่โดยไม่มีแหล่งที่มาหรือตรวจสอบหรือระงับไว้ ด้วยเหตุนี้จึงมีนักวิจัยจำนวนมากได้ทำการวิจัย และคิดค้นเทคโนโลยีในการตรวจจับข่าวปลอมที่อาจเกิดขึ้นเป็นสื่อสังคมออนไลน์ เพื่อให้ระบบคัดแยกข่าวปลอมมีประสิทธิภาพ จำเป็นจะต้องมีการใช้ข้อมูลที่มีความสำคัญและเป็นประโยชน์ในการตัดสินใจของระบบ หนึ่งในแนวทางที่นักวิจัยจำนวนมากมุ่งเน้น นั่นคือการพิจารณาจากเนื้อหาของข่าวที่ปรากฏ เช่น หัวข้อ บทบรรยาย เป็นต้น โดยงานวิจัยลักษณะดังกล่าวนี้มีนักวิจัยจำนวนมากได้นำเสนอแนวทางการพิจารณา โดยมีความแตกต่างกันคือ การใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องจักรที่แตกต่างกันหรือการใช้เทคนิคการประมวลผลภาษา (Przybyla, 2020)

หนึ่งในตัวอย่างงานวิจัยที่น่าสนใจ คือ การใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องจักรจำพวกนาอิว เบย์ (Naive Bayes) และเอสบีเอ็ม (SVM) ร่วมกับเทคนิคการประมวลผลภาษา ซึ่งจากการทดลองพบว่าการใช้เทคนิคร่วมกันดังกล่าว

สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการคัดแยกข่าวปลอมได้ โดยมีค่าความถูกต้องสูงถึง 83.50% (Jain et al., 2019) จะเห็นได้ว่าการพิจารณาข้อมูลจากเนื้อหาของข่าว สามารถช่วยระบบในการตรวจจับข่าวปลอมได้มีประสิทธิภาพในระดับหนึ่ง แต่อย่างไรก็ดี ยังมีนักวิจัยอีกส่วนหนึ่งที่เล็งเห็นโอกาสในการตรวจจับข่าวปลอมโดยอาศัยปัจจัยอื่น ๆ ที่มีใช้จากเนื้อหาของข่าว ประกอบกับการเติบโตของเทคโนโลยีด้านสื่อสังคมออนไลน์ จึงเกิดเป็นอีกหนึ่งแนวทางที่เริ่มได้รับความสนใจ นั่นคือ การพิจารณาปัจจัยทางสื่อสังคมออนไลน์เพื่อการคัดแยกข่าวปลอม

ในการศึกษาเชิงสำรวจ (Tandoc, 2020) พยายามทำความเข้าใจการแพร่กระจายของข้อมูลที่บิดเบือนโดยการตรวจสอบว่าผู้ใช้โซเชียลมีเดียตอบสนองต่อข่าวปลอมอย่างไร และเพราะเหตุใด โดยรวมผลลัพธ์จากการสำรวจกับผู้ตอบแบบสอบถาม 2,501 คนเข้ากับชุดการสัมภาษณ์เชิงลึกกับผู้เข้าร่วม 20 คนจากประเทศสิงคโปร์ที่มีขนาดเล็กแต่มีเศรษฐกิจและเทคโนโลยี พบว่าผู้ใช้โซเชียลมีเดียส่วนใหญ่ในสิงคโปร์เพิกเฉยต่อโพสต์ข่าวปลอมที่พบบนโซเชียลมีเดีย พวกเขาจะเสนอการแก้ไขเฉพาะเมื่อปัญหานั้นเกี่ยวข้องกับผู้ตอบแบบสอบถามอย่างมากและกับคนที่ผู้ตอบแบบสอบถามมีความสัมพันธ์ระหว่างบุคคลหรือมีความใกล้ชิด ซึ่งจากการเกิดขึ้นของสื่อสังคมออนไลน์ มักได้พบเห็นเสียงสะท้อนท่ามกลางการแพร่กระจายของข่าวปลอม ซึ่งทำให้ผู้คนลังเลที่จะมีส่วนร่วมในการแชร์ข่าวจริงเพราะกลัวว่าข้อมูลดังกล่าวจะเป็นเท็จ ทำให้มีความจำเป็นที่จะต้องตรวจสอบและนำเนื้อหาปลอมออกจากโซเชียลมีเดีย โดยจากการศึกษานี้สำรวจวิธีการต่าง ๆ อย่าง Natural Language Processing หรือ Hybrid model ระบุว่าการประยุกต์ใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องแบบผสมผสานและความพยายามร่วมกันของมนุษย์อาจมีโอกาสสูงในการต่อสู้กับข้อมูลที่บิดเบือนโซเชียลมีเดีย (Collins, 2021) จากการค้นคว้า พบว่ามีนักวิจัยส่วนหนึ่งที่ได้ทำการศึกษาและทดลองเกี่ยวกับการพัฒนาระบบเพื่อการตรวจจับข่าวปลอมผ่านความน่าเชื่อถือของผู้ใช้งานระบบ กล่าวคือ หากผู้ใช้ส่วนใดมีแนวโน้มจะเผยแพร่ข่าวปลอม ก็เป็นไปได้ที่จะสรุปว่าข่าวต่อไปที่ผู้ใช้คนดังกล่าวจะเผยแพร่ก็อาจเป็นข่าวปลอมเช่นเดียวกัน (Pizarro, 2019) นอกจากนี้ยังมีการพิจารณาปัจจัยความสัมพันธ์ของแหล่งที่มาข่าวและความการมีปฏิสัมพันธ์ของผู้ใช้ระบบ (Shu, 2019) ซึ่งผลการทดลองชี้ให้เห็นว่าการพิจารณาปัจจัยดังกล่าวเพิ่มประสิทธิภาพในการตรวจจับข่าวปลอมได้เป็นอย่างดี

เพิ่มเติมจากงานวิจัยรูปแบบการตรวจจับข่าวปลอมบนโซเชียลมีเดียด้วยการใช้ประโยชน์การวิเคราะห์ความ

รู้สึกของเนื้อหาข่าวและการวิเคราะห์อารมณ์ของความคิดเห็นของผู้ใช้ (Hamed *et al.*, 2023) ให้ความสำคัญกับข่าวปลอมที่มักมีความรู้สึกเชิงลบ โดยแยกคุณลักษณะต่างๆ จากการวิเคราะห์ความรู้สึกของบทความข่าวและการวิเคราะห์อารมณ์ของความคิดเห็นของผู้ใช้ จากชุดข้อมูล Fakeddit จำนวน 22,788 รายการมาตรฐานที่มีชื่อข่าวและความคิดเห็นที่โพสต์เกี่ยวกับข้อมูลเหล่านั้นเพื่อฝึกอบรมและทดสอบโมเดลด้วยเทคนิค Long Short-Term Memory เป็นโครงข่ายประสาทเทียมแบบหนึ่ง ให้ความถูกต้องในการตรวจจับสูงที่ 96.77% เช่นเดียวกันกับงานวิจัยการประเมินความน่าเชื่อถือของแหล่งข่าว: กรณีศึกษาของ Reddit (Amini, 2024) ได้นำเสนอ CREDiBERT การประเมินความน่าเชื่อถือโดยใช้การนำเสนอตัวเข้ารหัสแบบสองทิศทางจาก Transformers ที่เน้นวาทกรรมทางการเมืองเป็นการสนับสนุนหลัก ด้วยการเข้ารหัสเนื้อหาที่ส่งโดยใช้ CREDiBERT และรวมเข้ากับเครือข่ายประสาทเทียม โดยได้รับคะแนน F1 เพิ่มขึ้น 9% เมื่อเทียบกับวิธีการที่มีอยู่

นอกจากนี้จากงานวิจัยที่มีการใช้เทคนิคในการตรวจจับข่าวปลอมบนโซเชียลมีเดีย (Reshmi, 2022) โดยใช้เทคนิคแบบรวมกลุ่ม ที่มีการจำแนกประเภทการเรียนรู้ของเครื่อง 3 แบบได้แก่ Decision Tree, Naïve Bays และ K-NN จากฐานข้อมูล Politifact.com โดยไม่ระบุจำนวนข้อมูลที่ใช้นี้ มีค่าความถูกต้องเฉลี่ยเท่ากับ 98.54% และนอกจากนี้ยังมีงานวิจัยที่ใช้เทคนิค (Kaushik, 2024) Batch Genetic Algorithm และแบบจำลองการเรียนรู้เชิงลึกแบบรวมกลุ่มบนชุดข้อมูล Gossipcop จำนวน 22,152 ชุดข้อมูลข่าว ด้วยอัลกอริทึม LSTM, BiLSTM, CNNLSTM และ CNNBiLSTM ซึ่งให้ความแม่นยำที่ 85.99% และอีกงานวิจัยเสนอวิธีการที่ใช้การจำแนก โดยคำนึงถึงการประมวลผลภาษาธรรมชาติและแนวทางการเรียนรู้ของเครื่องสำหรับการประมวลผลภาษาธรรมชาติ พีเจอร์ TFIDF และ Word2vec และปรับให้เหมาะสมโดยใช้วิธี Wrapper ผ่านอัลกอริทึม RFE บนชุดข้อมูลจาก Kaggle กว่า 45,676 ชุดข้อมูล โดยมีค่าความถูกต้องเฉลี่ยเท่ากับ 98.29%

จากประเด็นนี้ ผู้วิจัยพิจารณาเห็นถึงโอกาสในการพัฒนาโครงข่ายที่พิจารณาทั้งเนื้อหาของข่าวและปัจจัยทางสื่อสังคมออนไลน์ โดยมีสมมติฐานว่าการพิจารณาปัจจัยทั้งสองพร้อมกัน จะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและความถูกต้องในการทำนายและคัดแยกข่าวปลอมจากแหล่งข่าวได้

การทดลอง

1. ชุดข้อมูล

ชุดข้อมูลที่ใช้ เป็นการรวบรวมข้อมูลทั้งหมดที่ได้จากแหล่งข่าวที่ได้มาจากเว็บไซต์ Reddit.com ซึ่งเก็บมาจากโพสต์ของผู้ใช้ต่างๆ โดยข้อมูลข่าวจะประกอบด้วยปัจจัยอันได้แก่ แหล่งของรูปภาพ จำนวนความคิดเห็น ผลคะแนนที่เกี่ยวข้อง จำนวนการติดตาม อัตราส่วนระหว่างการโหวตเห็นด้วยและผลลัพธ์ประเภทข่าวโดยประกอบไปด้วยชุดข้อมูล 20,000 ชุดข้อมูล ซึ่งเป็นข้อมูลที่เปิดให้ทดลองใช้ โดยเลือกเฉพาะผลลัพธ์ข่าวปลอม หรือข่าวจริง เท่านั้น (2-Ways) และเลือกด้วยวิธีการสุ่มที่เน้นผลลัพธ์ข่าวปลอมร้อยละ 60 และข่าวจริงร้อยละ 40 มีรายละเอียดทางสถิตินำเสนอ ดังนี้

1. **Domain** ของสื่อส่วนใหญ่คือ i.redd.it (6346) i.imgur.com (2642) imgur.com (1071) ตามลำดับ

2. **จำนวนข้อคิดเห็น** เท่ากับ 0 มี 9,286 ข้อความ ข้อคิดเห็นเท่ากับ 1 มี 2,230 ข้อความ ข้อคิดเห็นเท่ากับ 2 มี 1,585 ข้อความ และข้อคิดเห็นเท่ากับ 3 มี 1,154 ข้อความ

3. **หมวดหมู่จัดโดยผู้ใช้** มากที่สุดคือ psbatttle_artwork จำนวน 5,906 mildlyinteresting จำนวน 3,091 photoshopbattles จำนวน 2,025 และ pareidolia จำนวน 1,620 ตามลำดับ

4. **ค่าคะแนน** น้อยสุดคือติดลบ 52 มากสุดคือ 82,135 โดยมีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 409.26 คะแนน และค่าเบี่ยงเบนเท่ากับ 3,232.85 จากข้อมูลทั้งหมด 20,000 ข้อมูล

5. **ค่า upvote_ratio** เฉลี่ยคือ 60%

6. **จำนวนข่าวปลอมทั้งหมด** คือ 12,018 ข้อมูล และข่าวจริงจำนวน 7,982 ข้อมูล

2. การเตรียมข้อมูล

เนื่องจากข้อมูลในแต่ละโพสต์นั้นมียอดประกอบจำนวนมาก อีกทั้งยังอาจมีบางส่วนที่ไม่พร้อมต่อการนำไปดำเนินการต่อในการเรียนรู้ในขั้นตอนถัดไป ซึ่งในขั้นตอนนี้จึงเป็นการทำความสะอาดข้อมูลแต่ละส่วน เช่น ข้อมูลตัวเลขจะต้องทำการแปลงจากรูปแบบตัวอักษรเป็นตัวเลข การคัดกรองข้อมูลที่ขาดหายข้อมูลบางส่วนออกจากการพิจารณาและการเรียนรู้ การคัดกรองข้อมูลคุณภาพต่ำและข้อมูลที่ไม่มีความจำเป็นออกจากการพิจารณาและการเรียนรู้ ข้อมูลตัวอักษรจะต้องทำการนำอักขระที่ไม่มีความจำเป็นออก เช่น เครื่องหมายอีโมจิ เป็นต้น

หลังจากที่ได้ทำการทำความสะอาดข้อมูลแล้ว จากนั้นจะทำการแบ่งข้อมูลผ่านขั้นตอนที่กล่าวมาออกเป็น 3 ส่วนหลักประกอบด้วย ข้อมูลรูปภาพข่าว ข้อมูลพาดหัวข่าว และข้อมูลปัจจัยทางสื่อสังคมออนไลน์ เพื่อนำไปให้หน่วยการเรียนรู้ได้ทำการเรียนรู้ถัดไป

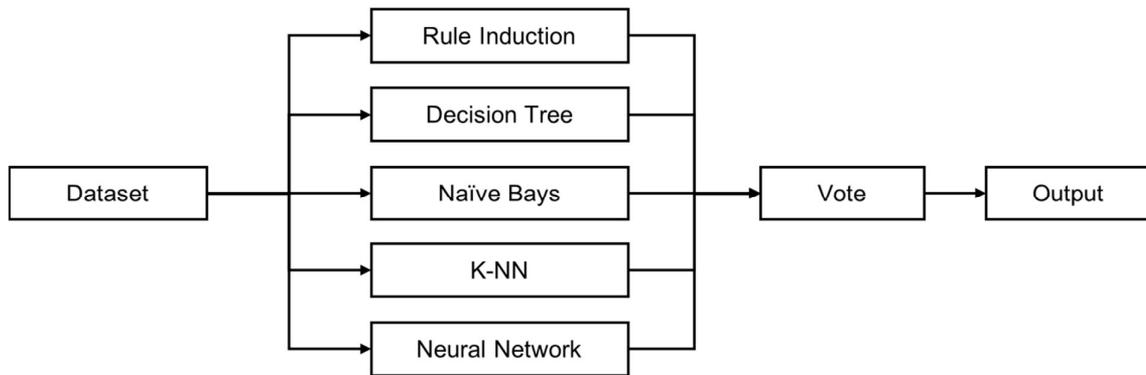


Figure 2 Various techniques are used in the voting technique

เป็นการนำชุดข้อมูลมาใช้ในการเรียนรู้ โดยผู้วิจัยได้คัดเลือกผ่านอัลกอริทึมแบบมีผู้สอน ประเภทการจำแนกข้อมูล เพื่อให้สามารถสร้างตัวแบบพยากรณ์ ได้แก่ กฎการอุปนัย ต้นไม้ตัดสินใจ นาอ็พเบย์ K-NN และโครงข่ายประสาทเทียม โดยกำหนดค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ ได้แก่ กฎการอุปนัย กำหนดเกณฑ์สำหรับการเลือกแอตทริบิวต์และการแบ่งตัวเลขแบบ Information Gain และอัตราส่วนตัวอย่างที่ 90% ต้นไม้ตัดสินใจ กำหนดเกณฑ์สำหรับการเลือกแอตทริบิวต์และการแบ่งตัวเลขแบบ Information Gain ความลึกของต้นไม้ = 10 ความเชื่อมั่นที่ใช้ในการคำนวณข้อผิดพลาดเชิงลบของการตัดแต่งกิ่งเท่ากับ 10% และ K-NN กำหนดค่า K เท่ากับ 5 และโครงข่ายประสาทเทียม กำหนด Activation เป็น Rectifier ให้มี 2 เลเยอร์ซ่อนโดยแต่ละเลเยอร์จะมี 5 โหนด

หลังจากนั้นจะนำผลลัพธ์ที่ได้จากการเรียนรู้ทั้ง 5 อัลกอริทึมมาโหวตหาผลลัพธ์ที่มีผลมากที่สุด ในลักษณะนับผลลัพธ์การทำนายหรือเสียงข้างมาก ผ่านโปรแกรม Rapid-Miner และหาค่าความถูกต้องด้วยตัวจัดการในการทดสอบโมเดล 5-Fold Cross Validation หรือการแบ่งข้อมูลออกเป็น 5 ชุด ที่ทำการแบ่งข้อมูลเพื่อวัดประสิทธิภาพที่ 5 ชุดข้อมูล โดยภายในจะทำการฝึกโมเดลด้วยเทคนิคการรวมกลุ่มแบบโหวตที่ประกอบไปด้วยอัลกอริทึมทั้ง 5 ที่ได้กล่าวในข้างต้น จากนั้นนำโมเดลที่มหาค่าประสิทธิภาพแล้วนำผลลัพธ์ส่งไปยัง Output ถัดไป

3. สังเคราะห์ตัวแบบพยากรณ์

เป็นการสังเคราะห์ตัวแบบพยากรณ์ สำหรับนำมาเปรียบเทียบกับค่าความถูกต้องของตัวแบบ โดยนำเสนอกรอบการทำงานของแบบจำลองตาม Figure 2

ผลการทดลองและอภิปรายผล

ผลการทดลองแบบกลุ่มด้วยวิธีการโหวตจาก 5 อัลกอริทึม แสดงค่าความถูกต้องของแต่ละอัลกอริทึมและค่าความถูกต้องรวมได้ตาม Table 1

Table 1 Accuracy values of various techniques

Techniques	Precision (%)	Recall (%)	F1-Score (%)	Accuracy (%)
Rule Induction	91.39	91.43	91.41	91.40
Decision Tree	89.90	89.94	89.92	89.92
Naïve Bays	78.90	67.33	72.66	72.65
K-NN	92.55	92.28	92.41	92.70
Neural Network	90.15	90.46	90.30	90.42
Ensemble Learning	97.06	96.91	96.89	96.97

โดยค่าความถูกต้อง (Accuracy) ของเทคนิคการเรียนรู้แบบรวมกลุ่มมีค่ามากที่สุดคือ 96.97% โดยถัดมาคือเทคนิค K-NN, Rule Induction, Neural Network, Decision Tree และ Naïve Bays ตามลำดับ รวมถึงค่าอื่นๆ ที่เป็นไปในทิศทางเดียวกัน ซึ่งผลลัพธ์ของแต่ละอัลกอริทึมจะเป็นเพียงค่าประสิทธิภาพที่เรียนรู้จากชุดข้อมูลการทดลองนี้เท่านั้น

อย่างไรก็ตาม เทคนิคการเรียนรู้แบบรวมกลุ่ม เป็นการนำอัลกอริทึมหลายๆ อัลกอริทึมมาทำงานร่วมกันใน

ลักษณะการโหวต หรือก็คือเป็นการให้น้ำหนักกับผลลัพธ์ที่อัลกอริทึมอื่นๆ โดยหากพบว่าอัลกอริทึมที่ตั้งต้น มีความถูกต้องที่ต่ำทั้งหมด จะไม่ได้ทำให้การพยากรณ์แม่นยำเท่าที่ควร

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

การตรวจจับข่าวปลอมที่อาจพบได้ในสื่อสังคมออนไลน์ โดยแบบพยากรณ์ดังกล่าว เมื่อทำการคัดเลือกข้อมูลอันเกี่ยวกับลักษณะทางสังคมออนไลน์ที่สามารถนำมาสังเคราะห์ตัวแบบพยากรณ์ด้วยเทคนิคแบบรวมกลุ่ม พบว่ามีค่าความถูกต้องมากที่สุดเมื่อเทียบกับการใช้เทคนิคแบบมีผู้สอนที่เป็นส่วนประกอบโดยไม่นำมาร่วมกันช่วยโหวตผลลัพธ์พยากรณ์ และเมื่อเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ ในด้านการตรวจจับข่าวปลอม พบว่า มีค่าความถูกต้องในระดับที่มากกว่า 96% ขึ้นไปใกล้เคียงกันในปริมาณข้อมูลที่แตกต่างกัน

สำหรับงานในอนาคตได้มีการวางแผนที่จะปรับปรุงรูปแบบจำลอง โดยจะเพิ่มข้อมูลสำหรับการประมวลผลในรูปแบบข้อความต่างๆ ไม่ว่าจะเป็นพาดหัวข่าว รายละเอียดข่าว รวมถึงข้อคิดเห็น การเพิ่มเติมในลักษณะดังกล่าว รวมถึงการทดลองในการนำอัลกอริทึมอื่นๆ มาใช้ร่วมในการทำ Ensemble Voting และการตั้งค่าพารามิเตอร์ของอัลกอริทึมที่หลากหลาย และให้ได้มาซึ่งค่าความถูกต้องที่ดีมากยิ่งขึ้น มีสันนิษฐานว่า จะเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพและค่าความถูกต้องของแบบจำลองได้เป็นอย่างดีซึ่งจะต้องมีการทดสอบและประเมินประสิทธิภาพต่อไป

เอกสารอ้างอิง

Al Asaad, B., & Erascu, M. (2018, September). A tool for fake news detection. In *2018 20th International Symposium on Symbolic and Numeric Algorithms for Scientific Computing (SYNASC)* (pp. 379–386). IEEE.

Allcott, H., & Gentzkow, M. (2017). Social media and fake news in the 2016 election. *Journal of Economic Perspectives*, *31*(2), 211–236.

Amini, A., Bayiz, Y. E., Ram, A., Marculescu, R., & Topcu, U. (2024). *News source credibility assessment: A Reddit case study*. arXiv preprint arXiv:2402.10938.

Collins, B., Hoang, D. T., Nguyen, N. T., & Hwang, D. (2021). Trends in combating fake news on social media—a survey. *Journal of Information and Telecommunication*, *5*(2), 247–266.

Dietterich, T. G. (2000, June). Ensemble methods in machine learning. In *International Workshop on*

Multiple Classifier Systems (pp. 1–15). Springer Berlin Heidelberg.

Duguay, P. A. (2022). Read it on Reddit: Homogeneity and ideological segregation in the age of social news. *Social Science Computer Review*, *40*(5), 1186–1202.

Gimpel, H., Heger, S., Olenberger, C., & Utz, L. (2021). The effectiveness of social norms in fighting fake news on social media. *Journal of Management Information Systems*, *38*(1), 196–221.

Hamed, S. K., Ab Aziz, M. J., & Yaakub, M. R. (2023). Fake news detection model on social media by leveraging sentiment analysis of news content and emotion analysis of users' comments. *Sensors*, *23*(4), 1748.

Jain, A., Shakya, A., Khatter, H., & Gupta, A. K. (2019, September). A smart system for fake news detection using machine learning. In *2019 International Conference on Issues and Challenges in Intelligent Computing Techniques (ICICT)* (Vol. 1, pp. 1–4). IEEE.

Kaushik, D., & Nadeem, M. (2024, May). Fake news detection using evolutionary ensemble deep learning. In *2024 International Conference on Communication, Computer Sciences and Engineering (IC3SE)* (pp. 161–166). IEEE.

Mustafaraj, E., & Metaxas, P. T. (2017, June). The fake news' spreading plague: Was it preventable? In *Proceedings of the 2017 ACM on Web Science Conference* (pp. 235–239).

Paschen, J. (2020). Investigating the emotional appeal of fake news using artificial intelligence and human contributions. *Journal of Product & Brand Management*, *29*(2), 223–233.

Pizarro, J. (2020, October). Profiling bots and fake news spreaders at PAN'19 and PAN'20: Bots and gender profiling 2019, profiling fake news spreaders on Twitter 2020. In *2020 IEEE 7th International Conference on Data Science and Advanced Analytics (DSAA)* (pp. 626–630). IEEE.

Proferes, N., Jones, N., Gilbert, S., Fiesler, C., & Zimmer, M. (2021). Studying Reddit: A systematic overview of disciplines, approaches, methods, and ethics. *Social Media+ Society*, *7*(2), 20563051211019004.

- Przybyla, P. (2020, April). Capturing the style of fake news. In *Proceedings of the AAAI Conference on Artificial Intelligence* (Vol. 34, No. 01, pp. 490–497).
- Reshmi, T. S. (2022, July). Fake news detection using voting ensemble classifier. In *2022 International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT)* (pp. 1241–1244). IEEE.
- Shu, K., Sliva, A., Wang, S., Tang, J., & Liu, H. (2017). Fake news detection on social media: A data mining perspective. *ACM SIGKDD Explorations Newsletter*, 19(1), 22–36.
- Shu, K., Wang, S., & Liu, H. (2019, January). Beyond news contents: The role of social context for fake news detection. In *Proceedings of the Twelfth ACM International Conference on Web Search and Data Mining* (pp. 312–320).
- Tandoc Jr, E. C., Lim, D., & Ling, R. (2020). Diffusion of disinformation: How social media users respond to fake news and why. *Journalism*, 21(3), 381–398.
- Yu, X., Gil-López, T., Shen, C., & Wojcieszak, M. (2022). Engagement with social media posts in experimental and naturalistic settings: How do message incongruence and incivility influence commenting? *International Journal of Communication*, 16, 24.

การเปลี่ยนแปลงแนวชายฝั่งจากการถ่ายเททรายข้ามปากร่องน้ำปะนาเระ จังหวัดปัตตานี

Shoreline change due to sand bypassing at Panare River mouth, Pattani Province

สีลาวดี หมอดี^{1*} และ สมปรารถนา ฤทธิ์พริ้ง¹

Seelawadee Mordee^{1*} and Sompratana Ritphring¹

Received: 29 August 2024 ; **Revised:** 2 October 2024 ; **Accepted:** 13 November 2024

บทคัดย่อ

ปากร่องน้ำปะนาเระ จังหวัดปัตตานี ประสบปัญหาตะกอนทรายปิดปากร่องน้ำบ่อยครั้ง ถึงแม้จะมีเขื่อนกั้นทรายและคลื่นปากร่องน้ำช่วยดักตะกอนทรายและมีการถ่ายเททรายบริเวณปากร่องน้ำ แต่กระนั้นก็ยังไม่สามารถบรรเทาปัญหาเหล่านี้ได้ ส่งผลให้ชาวประมงพื้นบ้านไม่สามารถใช้ปากร่องน้ำเป็นเส้นทางสัญจรเรือได้อย่างสะดวก ดังนั้นเพื่อแก้ไขปัญหาตะกอนทรายปิดปากร่องน้ำอย่างมีประสิทธิภาพ จึงต้องศึกษาการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งบริเวณปากร่องน้ำปะนาเระ เพื่อให้ทราบถึงระยะเปลี่ยนแปลงแนวชายฝั่งสุทธิ และอัตราการเปลี่ยนแปลงชายฝั่ง พร้อมวิเคราะห์ความสัมพันธ์กับการถ่ายเททรายข้ามร่องน้ำที่เกิดขึ้นในหลายช่วงเวลา โดยใช้เครื่องมือ DSAS (Digital Shoreline Analysis System) ในโปรแกรมระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ เพื่อระบุแนวชายฝั่งจากภาพถ่ายดาวเทียมในปี ค.ศ. 2007 2011 2015 2016 และ 2020 โดยทำการปรับแนวชายฝั่งให้อ้างอิงกับระดับทะเลปานกลาง จากการศึกษาพบว่าการถ่ายเททรายบริเวณปากร่องน้ำมีผลต่อการเปลี่ยนแปลงแนวชายฝั่ง โดยทิศตะวันตกของปากร่องน้ำปะนาเระเกิดการทับถมสูงสุดเท่ากับ 17.19 เมตร/ปี และกัดเซาะสูงสุดเท่ากับ -5.56 เมตร/ปี ส่วนทิศตะวันออกของปากร่องน้ำปะนาเระแนวชายฝั่งมีอัตราการทับถมสูงสุดเท่ากับ 4.31 เมตร/ปี และกัดเซาะสูงสุดเท่ากับ -6.89 เมตร/ปี ซึ่งผลที่ได้จะเป็นข้อมูลพื้นฐานเพื่อนำไปสู่ออกแบบและในการจัดการปากร่องน้ำปะนาเระต่อไป

คำสำคัญ: ปากร่องน้ำ, การเปลี่ยนแปลงชายฝั่ง, การถ่ายเททราย, ปะนาเระ, ระบบวิเคราะห์เส้นชายฝั่งดิจิทัล

Abstract

The Panare River mouth in Pattani Province has become a serious issue. Longshore sediments are blocking the entrance, despite jetties designed to trap sediments and sand bypassing to open the river mouth. However, these measures were unable to effectively solve the problem, as local fishers struggled to navigate their boats through the waterway with ease. Therefore, to discuss this issue, it is necessary to study the shoreline change in this area, determine the net shoreline movement and endpoint rate of shoreline position, and analyze the relationship of sand bypassing over various periods. There needs to be analyzed by using the Digital Shoreline Analysis System (DSAS) tool within a Geographic Information System to identify the shoreline from satellite images from the years 2007, 2011, 2015, 2016, and 2020, with the shoreline adjusted to reference the mean sea level. The study found that the western side experiences a maximum accumulation rate of 17.19 meters per year and a maximum erosion rate.

Keywords: River mouth, shoreline change, sand bypassing, Panare River, Digital Shoreline Analysis System

¹ ภาควิชาวิศวกรรมทรัพยากรน้ำ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

¹ Department of Water Resources Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University

* Corresponding author: E-mail: Seelawadee.mo@ku.th

บทนำ

พื้นที่ชายฝั่งของประเทศไทย โดยเฉพาะบริเวณอ่าวไทยและทะเลอันดามัน กำลังเผชิญกับการเปลี่ยนแปลงอย่างมีนัยสำคัญจากปัจจัยทางธรรมชาติและกิจกรรมของมนุษย์ โดยพบว่า มีระยะทางการกัดเซาะชายฝั่งรวม 89.19 กิโลเมตร จากแนวชายฝั่งทั้งหมด 3,151.13 กิโลเมตร (กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง, 2567) ปัญหานี้กำลังทวีความรุนแรงขึ้นจากการเปลี่ยนแปลงสภาพภูมิอากาศ ซึ่งส่งผลให้ความถี่ของพายุมากขึ้น และรุนแรงขึ้น ระดับน้ำทะเลเพิ่มสูงขึ้นในอนาคต (Langkulsen *et al.*, 2022) เมื่อผนวกกับการพัฒนาเมือง เช่น การพัฒนาโครงสร้างพื้นฐานริมชายฝั่ง การสร้างอาคารบังค้ำน้ำในลำน้ำ จะยิ่งรบกวนการป้องกันตะกอนลงสู่พื้นที่ชายฝั่งผ่านปากร่องน้ำ ส่งผลให้การกัดเซาะชายฝั่งทวีความรุนแรงเพิ่มขึ้นด้วย

ปากร่องน้ำเป็นระบบนิเวศที่มีความเป็นพลวัตสูง เนื่องจากเป็นจุดบรรจบระหว่างน้ำจืดและน้ำเค็ม ส่งผลให้บริเวณปากร่องน้ำมีการเปลี่ยนแปลงอยู่ตลอดเวลา โดยสาเหตุของการเปลี่ยนแปลงเกิดขึ้นทั้งจากธรรมชาติและกิจกรรมของมนุษย์ โดยตามธรรมชาติบริเวณปากร่องน้ำจะเป็นแหล่งรวมของตะกอนที่มาจากแม่น้ำและมหาสมุทร หากตะกอนมีปริมาณไม่มากแรงดันจากแม่น้ำสามารถผลักตะกอนเหล่านี้ออกไปได้ หรือในบางเวลาปากแม่น้ำอาจไม่มีตะกอนทับถม เนื่องจากถูกคลื่นทะเลพัดพาให้ตะกอนเหล่านี้เคลื่อนตัวไปบริเวณอื่น หรือในบางพื้นที่ที่รุ่มอาจทำให้มีตะกอนจากทะเลเคลื่อนตัวมาปิดปากร่องน้ำได้ หากมีการใช้ประโยชน์จากปากร่องน้ำเพื่อการคมนาคม ตะกอนทรายที่มากปิดปากร่องน้ำจะยิ่งก่อให้เกิดปัญหามากขึ้น

จากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าบริเวณปากร่องน้ำคูมรัฐทมิฬนาฑู ประเทศอินเดีย ตะกอนทรายที่มากเกินไปเนื่องจากมีโครงสร้างกีดขวางการเคลื่อนที่ของตะกอนบริเวณปากร่องน้ำ ส่งผลให้พื้นที่ด้านหลังสันทรายเกิดน้ำท่วมและเป็นอุปสรรคอย่างยิ่งต่อการสัญจรเดินเรือ (Varghese *et al.*, 2019) ปากร่องน้ำจิลิติก ตั้งอยู่ที่ฝั่งตะวันออกของเกาะบังกา ประเทศอินโดนีเซีย ช่วงน้ำลงต่ำสุดบริเวณนี้ไม่สามารถสัญจรเรือเข้าออกได้ เนื่องจากมีตะกอนทรายปริมาณมากมาปิดปากร่องน้ำไว้ (Wibowo *et al.*, 2020) หรือที่ปากร่องน้ำอตาจารย์ ประเทศอินเดีย แนวสันทรายที่ปากร่องน้ำ ส่งผลให้น้ำเสียจากบ้านเรือนประชาชนที่ปล่อยลงสู่แม่น้ำ ไม่สามารถระบายออกได้ เกิดเป็นแหล่งสะสมมลพิษทางน้ำ (Kiran *et al.*, 2022) เช่นเดียวกับประเทศไทยบริเวณปากร่องน้ำปะนาเระ จังหวัดปัตตานี ที่ยกมาเป็นกรณีศึกษาในงานวิจัยนี้ ยังคงมีตะกอนทรายมาปิดปากร่องน้ำบ่อยครั้ง ถึงแม้จะมีเขื่อนกันทรายและ

คลื่นปากร่องน้ำ (Jetty) ช่วยดักตะกอนทรายไว้แล้วก็ตาม อีกทั้งกรมเจ้าท่าได้ทำการถ่ายเททรายบริเวณปากร่องน้ำทุก 3-4 ปี (ระบบข้อมูลการใช้จ่ายภาครัฐ, 2567) แต่กระนั้นก็ยังไม่สามารถบรรเทาปัญหาเหล่านี้ได้ ส่งผลให้ชาวประมงพื้นบ้านไม่สามารถใช้ปากร่องน้ำเพื่อการเข้าออกของเรือได้อย่างสะดวก จะเห็นว่าการที่ตะกอนทรายมาปิดปากร่องน้ำ ก่อให้เกิดปัญหาต่างๆตามมา โดยเฉพาะการใช้ปากร่องน้ำเป็นทางสัญจรเรือ ปัญหาเหล่านี้จะไม่สามารถแก้ไขได้อย่างถูกต้อง หากไม่เข้าใจพฤติกรรมของการเปลี่ยนแปลงบริเวณปากร่องน้ำ

เพื่อแก้ไขปัญหาตะกอนทรายปิดปากร่องน้ำอย่างมีประสิทธิภาพ จำเป็นต้องศึกษาการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งบริเวณปากร่องน้ำปะนาเระ จังหวัดปัตตานี เพื่อให้ทราบถึงระยะทางแนวชายฝั่งสุทธิตั้งแต่ปี 2007-2020 ตามข้อจำกัดของข้อมูลภาพถ่ายดาวเทียมที่สืบค้นได้จาก Google Earth และสำนักงานพัฒนาเทคโนโลยีอวกาศและภูมิสารสนเทศ (GISTDA) และหาอัตราการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งพร้อมวิเคราะห์ความสัมพันธ์กับการถ่ายเททรายข้ามร่องที่เกิดขึ้นในหลายช่วงเวลา ผลที่ได้จะเป็นข้อมูลพื้นฐานเพื่อนำไปสู่ข้อเสนอแนะเพื่อการจัดการปากร่องน้ำปะนาเระต่อไป

พื้นที่ศึกษา

ขอบเขตพื้นที่ศึกษา คือ บริเวณปากร่องน้ำปะนาเระ ตำบลปะนาเระ อำเภอปะนาเระ จังหวัดปัตตานี โดยแบ่งพื้นที่ศึกษาออกเป็น 2 ส่วน ได้แก่ ฝั่งทิศตะวันออกของโครงสร้างปากร่องน้ำเป็นระยะทาง 3.2 กิโลเมตร และฝั่งทิศตะวันตกของโครงสร้างปากร่องน้ำเป็นระยะทาง 2.8 กิโลเมตร (Figure 1)



Figure 1 Study area

บริเวณด้านในของปากร่องน้ำคือ บึงกาโดที่ชาวประมงพื้นบ้านใช้เป็นท่าจอดเรือประมาณ 246 ลำ บริเวณนี้ได้รับอิทธิพลจากลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือในช่วงเดือนธันวาคมถึงเดือนกุมภาพันธ์ของทุกปี ส่งผลให้มีตะกอนทราย

จำนวนมากเคลื่อนตัวมาปิดปากร่องน้ำ สภาพทั่วไปของพื้นที่ศึกษา เป็นหาดทรายตลอดแนว (Figure 2)

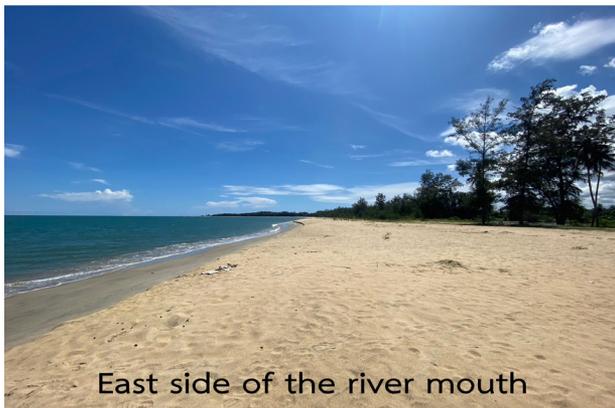
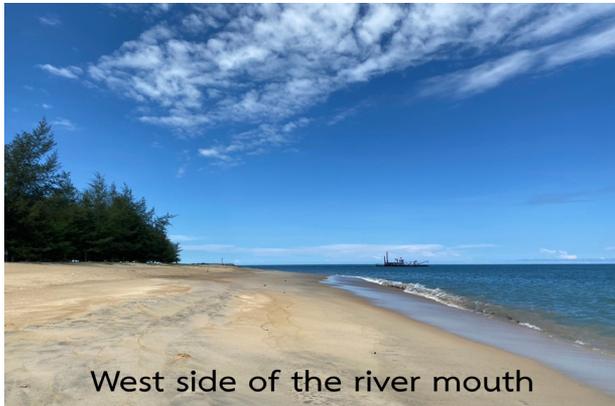


Figure 2 Beach around river mouth

ในอดีตบริเวณพื้นที่ศึกษามีลักษณะชายหาดที่ยาวต่อเนื่องกัน จากภาพถ่ายทางอากาศของกรมแผนที่ทหารในปีค.ศ. 1975 (Figure 3) เมื่อพิจารณาจากตำแหน่งอ้างอิง พบว่าแนวชายฝั่งมีลักษณะเป็นเส้นตรงขาวประมงพื้นบ้านนำเรือมาจอดกันบริเวณนี้ ต่อมาในปีค.ศ. 1986 มีตะกอนทรายเคลื่อนตัวจากทางทิศตะวันออกใกล้เข้ามายังตำแหน่งอ้างอิง (Figure 4) จนกระทั่งในปีค.ศ. 1995 บริเวณพื้นที่ศึกษาได้กลายมาเป็นบึง แต่ยังไม่มีการสร้างโครงสร้างเชื่อมกันทรายและคลื่นปากร่องน้ำ (Figure 5) ต่อมาเมื่อเกิดปัญหาขึ้นกรมเจ้าท่าได้สร้างโครงสร้างเชื่อมกันทรายและคลื่นปากร่องน้ำในปีค.ศ. 2000 ตั้งแต่นั้นเป็นต้นมาบริเวณปากร่องน้ำปะนาเระจึงมีลักษณะเป็นดังสภาพปัจจุบัน (Figure 6)



Figure 3 Panare River mouth in March 1975



Figure 4 Panare River mouth in March 1986

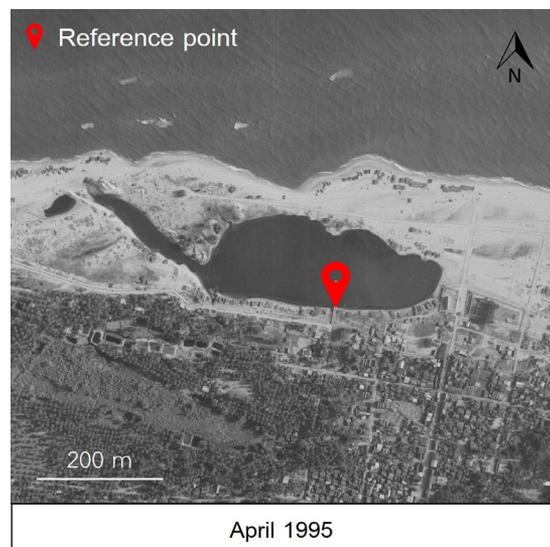


Figure 5 Panare River mouth in April 1995

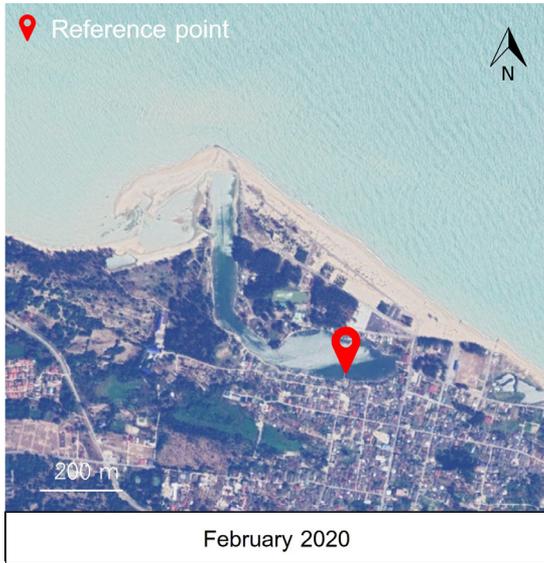


Figure 6 Panare River mouth in February 2020

วิธีการ

วิธีการประกอบไปด้วยหัวข้อย่อย ได้แก่ ข้อมูลที่ใช้, การระบุแนวชายฝั่ง, การปรับค่าระดับน้ำของภาพถ่าย และการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงชายฝั่ง มีรายละเอียดดังนี้

1. ข้อมูลที่ใช้

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงชายฝั่งในการศึกษานี้ได้ทำการรวบรวมทั้งข้อมูลปฐมภูมิและทุติยภูมิ เพื่อนำมาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงชายฝั่งตั้งแต่อดีตจนถึงปัจจุบัน มีรายละเอียดดังนี้

1.1 ความลาดชันชายหาด จากการสำรวจภาคสนาม โดยใช้เครื่องมือวัดความลาดชันแบบดิจิตอล

1.2 โครงสร้างทางวิศวกรรม จากการสำรวจภาคสนามพบ โครงสร้างเขื่อนกันทรายและคลื่นปากร่องน้ำ 1 คู่ เขื่อนกันทรายและคลื่นนอกชายฝั่ง 4 ตัว, รอดักทราย 3 ตัว

1.3 แผนที่ภูมิประเทศ (1:50000) จากกรมแผนที่ทหาร ประกอบด้วยระวาง 5222I และ 5322IV

1.4 ภาพถ่ายทางอากาศ จากกรมแผนที่ทหาร ค.ศ.1975 (1:15,000) 1986 (1:40,000) และ 1995 (1:50,000) ภาพถ่ายดาวเทียมจาก Google Earth ค.ศ. 2007 2011 2015 2016 และ 2020 มีรายละเอียดภาพถ่ายดัง Table 1

1.5 ระดับน้ำทะเล (ตรวจวัดรายชั่วโมงแบบอัตโนมัติ) จากกรมเจ้าท่า สถานีปัดตานี ค.ศ. 2007 2011 2015 2016 และ 2020

Table 1 Time of images

Day/Month/Year	Time of image	
	East side	West side
30/12/2007	11:51 AM	11:54 AM
05/08/2011	12:30 PM	12:15 PM
23/03/2015	-	12:05 PM
27/08/2015	12:08 PM	-
28/07/2016	12:51PM	13:17 PM
16/02/2020	11:34 AM	11:27 AM

2. การระบุแนวชายฝั่ง

ทำการตรึงพิกัดภาพถ่ายดาวเทียมในโปรแกรมระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ (ArcGIS) เวอร์ชัน 10.5 และทำการเทียบตำแหน่งของภาพถ่ายดาวเทียมกับแผนที่ภูมิประเทศ เพื่อให้ได้พิกัดของภาพถ่ายดาวเทียมที่แม่นยำ ซึ่งใช้ระบบพิกัด WGS84 (World Geodetic System 1984) UTM (Universal Transvers Mercator) ตำแหน่ง 47N จากนั้นลากแนวชายฝั่งในแต่ละปี โดยใช้นิยามเส้นระดับน้ำ (Waterline) จากนั้นทำการปรับแนวชายฝั่งให้อ้างอิงกับระดับทะเลปานกลาง (ภทกร นิธินรางกูร และสมปรรณนา ฤทธิ์พริ้ง, 2562) เพื่อให้เป็นระดับอ้างอิงเดียวกันของทุกปี โดยการปรับแก้ระดับน้ำทะเล

3. การปรับค่าระดับน้ำของภาพถ่าย

การปรับแก้ระดับน้ำทะเล (Tidal Correction) ของภาพถ่าย เพื่อให้แนวชายฝั่งอ้างอิงกับระดับทะเลปานกลาง ซึ่งขึ้นอยู่กับความลาดชันชายหาด ความกว้างชายหาด และระดับน้ำทะเล ณ เวลาที่ถ่ายภาพ (Figure 7) แต่เนื่องจากไม่สามารถระบุเวลาของภาพถ่ายดาวเทียมได้ จึงจำเป็นต้องใช้การวัดมุม Solar Azimuth Angle ของเงาในภาพถ่ายแทน เพื่อนำมุมที่ได้ไปหาเวลาของภาพถ่าย แล้วนำเวลามาเทียบกับระดับน้ำทะเลตรวจวัดรายชั่วโมง

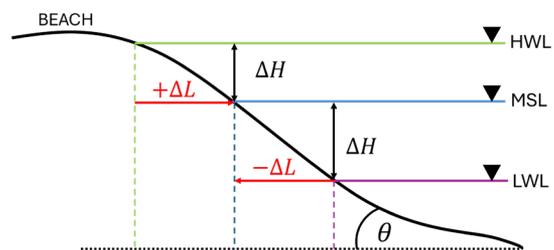


Figure 7 Relationship between beach slope, beach width, and water level

(นิรัตติยากร แสนหาใต้ และสมปรรณนา ฤทธิ์พริ้ง, 2566)

เมื่อได้ค่าระดับน้ำให้ทำการปรับแนวชายฝั่งอ้างอิงกับระดับทะเลปานกลาง (Figure 7) จะเห็นว่าถ้าระดับน้ำของภาพถ่ายอยู่สูงกว่าระดับทะเลปานกลาง (HWL สูงกว่า MSL) แนวชายฝั่งจะมีความกว้างน้อยกว่าความเป็นจริง ดังนั้นถ้าใช้แนวชายฝั่งที่ระดับทะเลปานกลางเป็นเกณฑ์ต้องปรับระยะแนวชายฝั่งออกไปสู่ทะเลเป็นระยะ + ΔL ในทางกลับกันหากระดับน้ำของภาพถ่ายอยู่ต่ำกว่าระดับทะเลปานกลาง (LWL ต่ำกว่า MSL) แนวชายฝั่งจะมีความกว้างมากกว่าความเป็นจริง ดังนั้นแนวชายฝั่งต้องถอยเข้าสู่ฝั่งเป็นระยะ - ΔL ซึ่งสามารถคำนวณหาค่า ΔL ได้จากสมการที่ (1)

$$\Delta L = \Delta H / \tan \theta \tag{1}$$

โดยที่ ΔL คือ ระยะห่างระหว่างแนวชายฝั่ง ณ ช่วงเวลาที่ถ่ายภาพกับตำแหน่งแนวชายฝั่งที่ระดับทะเล

ปานกลาง ΔH คือ ค่าระดับน้ำทะเลที่แตกต่างกันระหว่าง HWL กับ MSL หรือ LWL กับ MSL และ θ คือ ความลาดชันชายหาดส่วนหน้า (Foreshore Slope)

การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงชายฝั่ง

ในการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงชายฝั่งใช้เครื่องมือ DSAS (Digital Shoreline Analysis System) ที่ถูกพัฒนาโดยหน่วยสำรวจธรณีวิทยาประเทศสหรัฐอเมริกา ในโปรแกรม ArcGIS ซึ่งคำนวณหาอัตราการเปลี่ยนแปลงชายฝั่ง (End Point Rate, EPR) จากระยะทางการเปลี่ยนแปลงแนวชายฝั่งสุทธิ (Net Shoreline Movement, NSM)หารจำนวนปีของแนวชายฝั่งทั้งหมด โดยระยะทางการเปลี่ยนแปลงแนวชายฝั่งสุทธิ คือระยะห่างระหว่างแนวชายฝั่งปีเก่าสุดกับแนวชายฝั่งปีใหม่สุด (Figure 8)

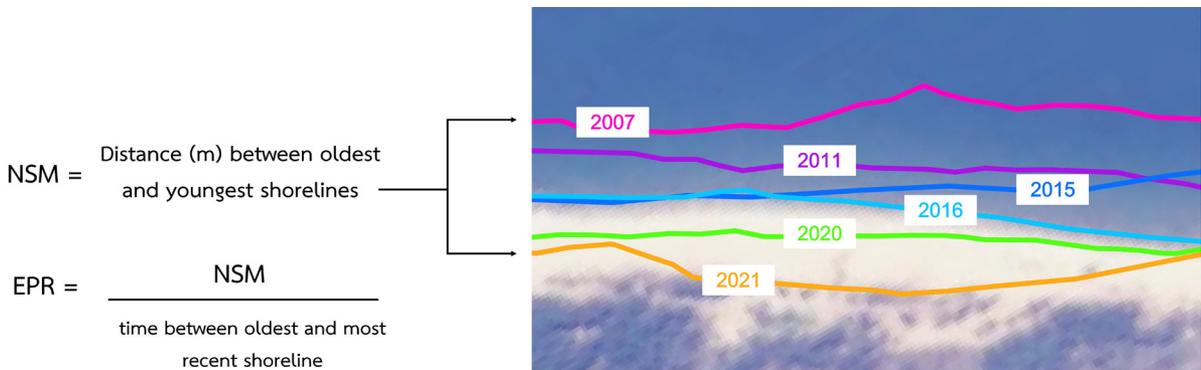


Figure 8 Calculation of Digital Shoreline Analysis System

ผลที่ได้จาก DSAS ได้นำมาวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงชายฝั่งได้คือ วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงแนวชายฝั่งและอัตราการเปลี่ยนแปลงชายฝั่ง

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

จากผลการวิเคราะห์พบว่าด้านทิศตะวันออกของปากร่องน้ำปะนาเร่ตั้งแต่ระยะทางที่ 1.2 กิโลเมตรถัดจากโครงสร้างเขื่อนกันทรายและคลื่นปากร่องน้ำไปทางด้านทิศตะวันออก แนวชายฝั่งเกิดการกัดเซาะเป็นระยะทาง 1.9 กิโลเมตร (Figure 9) โดยมีอัตราการกัดเซาะสูงสุดอยู่ที่ -6.89 เมตร/ปี และอัตราการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งเฉลี่ยเท่ากับ -4.80 เมตร/ปี เนื่องจากบริเวณนี้ตะกอนเคลื่อนตัวออกจากระบบมากกว่าตะกอนที่เคลื่อนตัวเข้าสู่ระบบ ทำให้ระยะทางการเปลี่ยนแปลงแนวชายฝั่งสุทธิมีค่าลดลง (Figure 10) และเนื่องจากตะกอนทรายเคลื่อนที่จากทิศตะวันออกไปยังทิศ

ตะวันตก จึงส่งผลให้บริเวณส่วนปลายของโครงสร้างเขื่อนกันทรายและคลื่นปากร่องน้ำ ซึ่งทำหน้าที่ดักตะกอนทรายเกิดการทับถมของตะกอนเป็นระยะทาง 1.20 กิโลเมตรไปทางด้านทิศตะวันออกของโครงสร้าง (Figure 9) โดยมีอัตราการทับถมสูงสุดอยู่ที่ 4.31 เมตร/ปี (Figure 11) และอัตราการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งเฉลี่ยเท่ากับ 2.09 เมตร/ปี โดยผลที่ได้มีลักษณะเดียวกันกับการศึกษาบริเวณปากร่องน้ำทูตง ประเทศบรูไน บริเวณปากร่องน้ำมีโครงสร้างเขื่อนกันทรายและคลื่นปากร่องน้ำ แต่เนื่องจากตะกอนทรายตามแนวชายฝั่งมีการเคลื่อนตัวจากทิศเหนือไปยังทิศใต้ ส่งผลให้ด้านทิศเหนือของปากร่องน้ำเกิดการทับถมของตะกอนทรายจนตะกอนทรายล้นออกนอกโครงสร้างเกิดเป็นสันดอนทรายบริเวณปากร่องน้ำ ในทางตรงกันข้ามด้านทิศใต้ของปากแม่ น้ำกลับเกิดการกัดเซาะเนื่องจากไม่มีตะกอนทรายสามารถเคลื่อนตัวไปยังบริเวณนั้น (Alessio et al., 2010)

ส่วนด้านทิศตะวันตกของปากร่องน้ำปะนาละระ ตะกอนส่วนใหญ่ทับถมกันบริเวณถัดจากโครงสร้างเขื่อนกันทรายและคลื่นปากร่องไปทางด้านทิศตะวันตกเป็นระยะทาง 1.10 กิโลเมตร (Figure 9) โดยมีอัตราการทับถมสูงสุดอยู่ที่ 17.19 เมตร/ปี (Figure 11) และอัตราการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งเฉลี่ยเท่ากับ 9.81 เมตร/ปี เนื่องจากกรมเจ้าท่าทำการถ่ายเททรายจากบริเวณปากร่องน้ำปะนาละระมาไว้ทางด้านทิศตะวันตกของปากร่องน้ำ ในปี 2012 2015 2017 2018 และ 2020 ทำให้บริเวณนี้เกิดการทับถมของตะกอนทรายขึ้น ส่งผลให้ระยะทางการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งสุทธิมีค่าเพิ่มขึ้น (Figure 10) ในทางตรงกันข้ามบริเวณถัดจากโครงสร้างเขื่อนกันทรายและคลื่นปากร่องน้ำเป็นระยะทาง 1.20 กิโลเมตร พบว่าแนวชายฝั่งเกิดการกัดเซาะ เนื่องจากตะกอนทรายจากการถ่ายเททรายเคลื่อนตัวมาไม่ถึงบริเวณนี้ อีกทั้งยังได้รับผลกระทบจากโครงสร้างเขื่อนกันคลื่นนอกชายฝั่ง ทำให้พื้นที่บริเวณด้านหลังและด้านข้างของโครงสร้างเขื่อนกันทรายและคลื่นนอกชายฝั่งไปทางด้านทิศตะวันตกเป็นต้นไปเกิดการกัดเซาะ โดยมีอัตราการกัดเซาะสูงสุดอยู่ที่ -5.56 เมตร/ปี (Figure 11) และอัตราการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งเฉลี่ยเท่ากับ -2.81 เมตร/ปี ซึ่งมีความสอดคล้องกันกับการศึกษาบริเวณปากแม่น้ำเทนรีวประเทศญี่ปุ่น โดยพบว่าการถ่ายเททรายสามารถลดอัตราการกัดเซาะชายฝั่งได้ แต่เนื่องจากบริเวณหน้าหาดมีโครงสร้างเขื่อนกันคลื่นนอกชายฝั่งจึงทำให้การถ่ายเททรายต้องใช้เวลานานกว่าปกติถึงจะช่วยลดปัญหาการกัดเซาะชายฝั่งได้ (Miyahara *et al.*, 2011) นอกจากนี้พบว่าในปีที่มีการถ่ายเททรายส่วนใหญ่ปากร่องน้ำจะเปิด (Figure 12)

เมื่อนำข้อมูลอัตราการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งเฉลี่ยแบ่งเป็นช่วงเวลาทั้งด้านทิศตะวันออกและด้านทิศตะวันตกพบว่า ช่วงปีค.ศ. 2007-2016 ตะกอนทรายส่วนใหญ่เกิดการทับถมทางด้านทิศตะวันตก และเกิดการกัดเซาะทางด้านทิศตะวันออก มีเพียงช่วงปีค.ศ. 2016-2020 ที่ด้านทิศตะวันออกเกิดการทับถม และเกิดการกัดเซาะในด้านทิศตะวันตก ซึ่งเป็นไปได้ว่าปริมาณตะกอนทรายที่ถ่ายเทจากด้านทิศตะวันออกไปไว้ทางด้านทิศตะวันตกในช่วงปีค.ศ.2007-2016 มีมากกว่าช่วงปี ค.ศ.2016-2020 จึงส่งผลแนวชายฝั่งด้านทิศตะวันออกเกิดการกัดเซาะ และแนวชายฝั่งด้านทิศตะวันตกเกิดการทับถมขึ้น แสดงดัง Table 2

Table 2 The average rate of shoreline change

Years	Rate of shoreline change (m/year)	
	East side	West side
2007-2011	-2.78	12.33
2011-2015	-4.91	2.46
2015-2016	-3.83	6.29
2016-2020	0.60	-2.33

จากผลการศึกษาจะเห็นว่า การถ่ายเททรายของกรมเจ้าท่ามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งทั้งด้านทิศตะวันออกและทิศตะวันตกของปากร่องน้ำปะนาละระ เมื่อนำทรายจากบริเวณปากร่องน้ำและบริเวณด้านทิศตะวันออกของปากร่องน้ำไปไว้ทางด้านทิศตะวันตก ส่งผลให้ตะกอนทรายด้านทิศตะวันออกลดลง ส่วนทางด้านทิศตะวันตกของปากร่องน้ำ ตะกอนทรายเพิ่มขึ้น ทำให้เกิดการทับถมบริเวณแนวชายฝั่งซึ่งช่วยลดปัญหาการกัดเซาะชายฝั่งได้ นอกจากนี้ยังช่วยชะลอการเคลื่อนที่ของตะกอนข้ามปากร่องน้ำอีกด้วย เช่นเดียวกับบริเวณปากร่องน้ำชะอำ ปากร่องน้ำทราย และปากร่องน้ำหน้าสนน ที่โครงสร้างเขื่อนกันทรายและคลื่นปากร่องน้ำได้ดักตะกอนทรายเอาไว้ ส่งผลให้แนวชายฝั่งด้านทิศใต้ของปากร่องน้ำทั้ง 3 แห่งเกิดการทับถม ส่วนแนวชายฝั่งด้านทิศเหนือเกิดการกัดเซาะ (Saengsupavanich *et al.*, 2022) หรือกรณีปากร่องน้ำสะกอมที่โครงสร้างเขื่อนกันทรายและคลื่นปากร่องน้ำทำให้แนวชายฝั่งด้านทิศตะวันตกของปากร่องน้ำเกิดการกัดเซาะ (รัฐพล รุ่งโรจน์เจริญผล และสมปรารถนา ฤทธิ์พริ้ง, 2561) และเพื่อลดปัญหาการกัดเซาะชายฝั่งบริเวณส่วนถัดจากโครงสร้างปากร่องน้ำ งานศึกษาดังกล่าวจึงเสนอให้มีการถ่ายเททรายจากบริเวณที่มีตะกอนมาทับถมไปยังบริเวณที่เกิดการกัดเซาะอย่างจริงจัง เจกเช่นเดียวกับกับบริเวณปากร่องน้ำปะนาละระ หากมีการถ่ายเททรายในปริมาณที่เหมาะสมจะสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการแก้ไขปัญหาปากร่องน้ำปิดและช่วยลดการกัดเซาะชายฝั่งทางด้านทิศตะวันตกของปากร่องน้ำได้ดียิ่งขึ้นด้วย

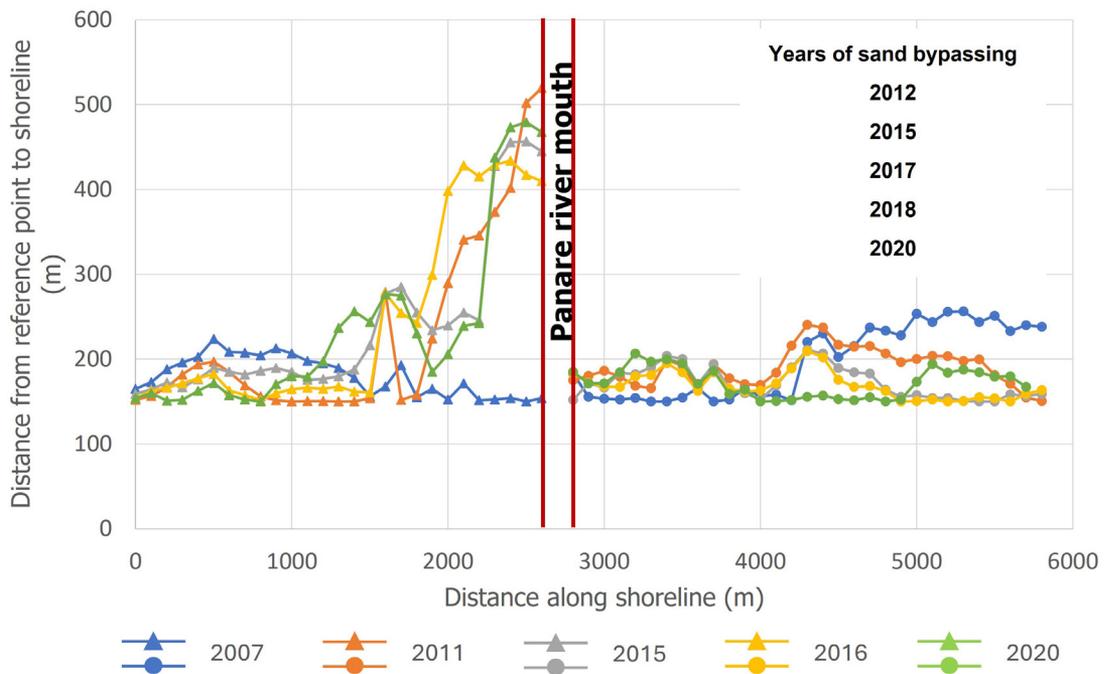


Figure 9 Relationship between distance from reference point to shoreline and distance along shoreline

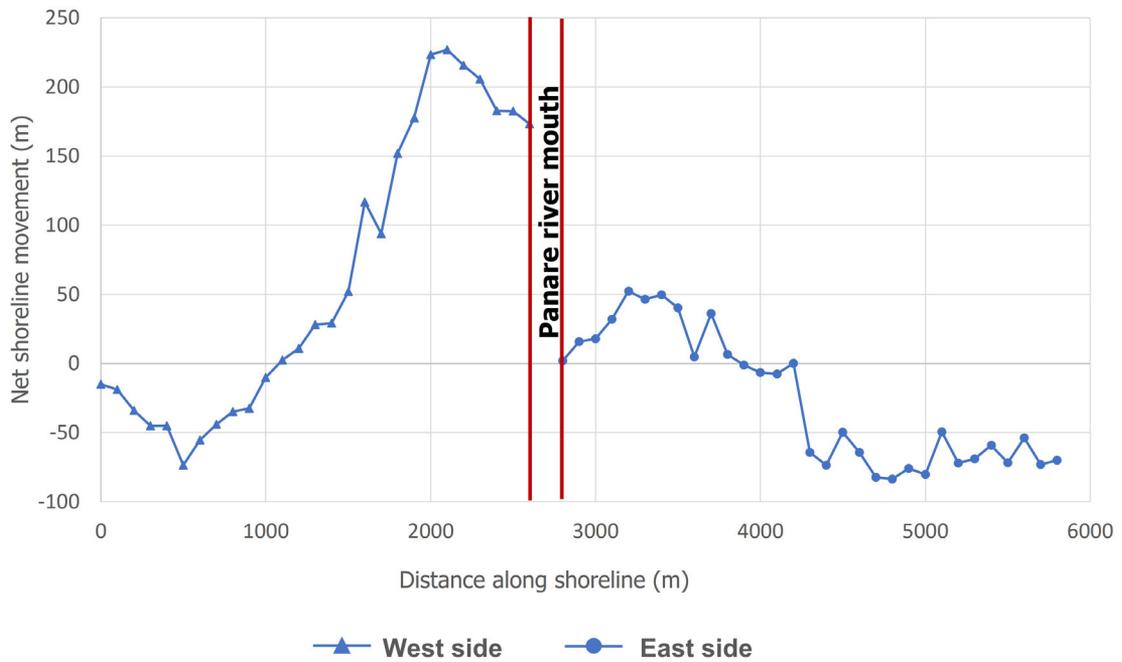


Figure 10 Relationship between net shoreline movement and distance along shoreline

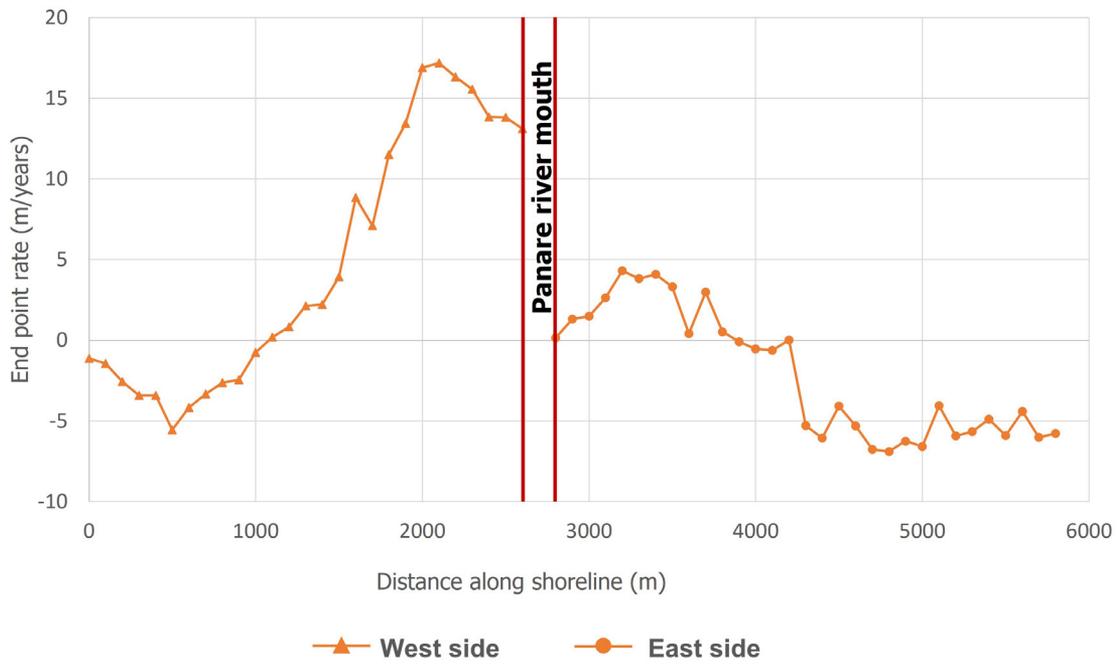


Figure 11 Relationship between end point rate and distance along shoreline

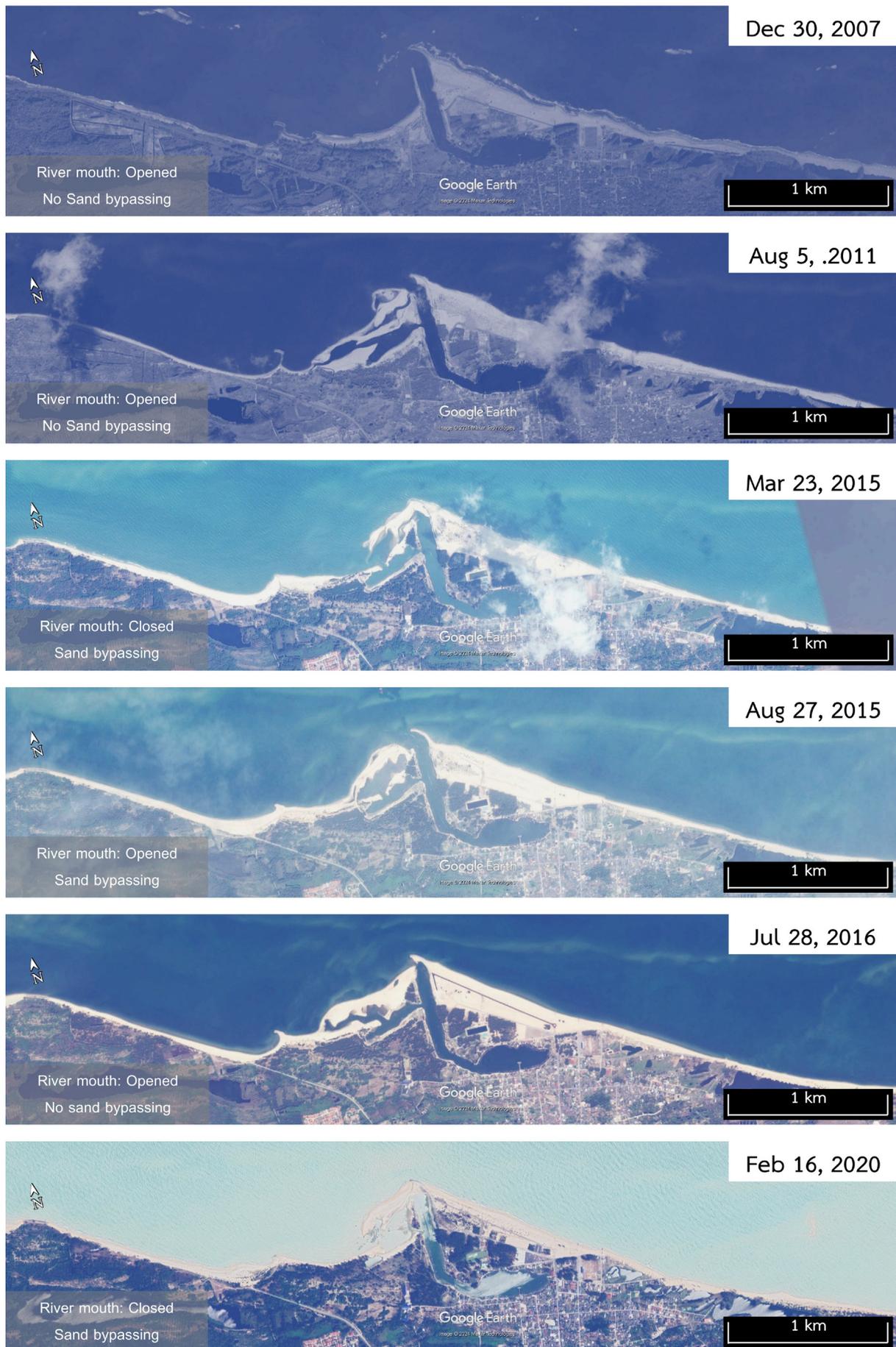


Figure 12 Satellite images

สรุปผลการศึกษา

จากการศึกษาการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งบริเวณปากร่องน้ำปะนาละ พบว่าบริเวณด้านทิศตะวันตกของปากร่องน้ำแนวชายฝั่งเกิดการทับถมของตะกอนทรายโดยเฉพาะบริเวณถัดจากโครงสร้างเขื่อนกันทรายและคลื่นนอกชายฝั่ง เนื่องจากการถ่ายเททรายจากปากร่องน้ำมาไว้ทางด้านทิศตะวันตกของปากร่องน้ำ แต่บริเวณที่ตะกอนทรายจากการถ่ายเททรายเคลื่อนที่ไปไม่ถึงแนวชายฝั่งเกิดการกัดเซาะ

ส่วนด้านทิศตะวันออกของปากร่องน้ำปะนาละ พบว่าถึงแม้จะมีการถ่ายเททรายบริเวณส่วนปลายของโครงสร้างเขื่อนกันทรายและคลื่นนอกชายฝั่งไปไว้ทางด้านทิศตะวันตกของปากร่องน้ำ แต่แนวชายฝั่งกลับเกิดการทับถมของตะกอนทราย เนื่องจากโครงสร้างเขื่อนกันทรายและคลื่นปากร่องน้ำทำหน้าที่ดักตะกอนทรายที่เคลื่อนตัวมาจากทางทิศตะวันออกส่งผลให้มีตะกอนทรายมาสะสมตัวบริเวณส่วนปลายของโครงสร้าง นอกจากนี้ยังพบว่าด้านทิศตะวันออกบางบริเวณเกิดการกัดเซาะขึ้น เนื่องจากปริมาณตะกอนทรายที่ออกนอกระบบมีมากกว่าตะกอนทรายที่เข้ามาในระบบ ทำให้แนวชายฝั่งมีปริมาณตะกอนลดลงจึงเกิดการกัดเซาะชายฝั่ง

จะเห็นว่าการถ่ายเททรายของกรมเจ้าท่ามีผลต่อการเปลี่ยนแปลงชายฝั่ง โดยแนวชายฝั่งด้านทิศตะวันตกของปากร่องน้ำเกิดการทับถมของตะกอนทรายอย่างเห็นได้ชัด หากไม่มีการถ่ายเททรายจากบริเวณปากร่องน้ำมาไว้ทางด้านทิศตะวันตกของโครงสร้างเขื่อนกันทรายและคลื่นนอกชายฝั่งบริเวณดังกล่าวจะเกิดการกัดเซาะชายฝั่งขึ้น เนื่องจากโครงสร้างเขื่อนกันทรายและคลื่นนอกชายฝั่งทำหน้าที่ดักตะกอนทรายที่มาจากทางด้านทิศตะวันออกไม่ให้เคลื่อนที่ไปทางด้านทิศตะวันตก จึงทำให้บริเวณด้านทิศตะวันตกของโครงสร้างเขื่อนกันทรายและคลื่นนอกชายฝั่งขาดตะกอนทราย อีกทั้งผลกระทบจากโครงสร้างเขื่อนกันคลื่นนอกชายฝั่งจะยิ่งส่งเสริมให้แนวชายฝั่งเกิดการกัดเซาะมากขึ้น

ข้อเสนอแนะ

ในการศึกษาการเปลี่ยนแปลงชายฝั่งจากภาพถ่ายดาวเทียม เป็นเพียงการวิเคราะห์เบื้องต้น เนื่องจากในแต่ละปีสภาพแนวชายฝั่งมีการเปลี่ยนแปลงแตกต่างกันออกไป อันเนื่องมาจากพายุที่เคลื่อนตัวผ่านพื้นที่ศึกษา หรือกิจกรรมของมนุษย์ที่อาจส่งผลให้แนวชายฝั่งเกิดการเปลี่ยนแปลงที่แตกต่างไปจากทุกปี ดังนั้นในการวิเคราะห์พฤติกรรมของแนวชายฝั่ง ควรพิจารณาปัจจัยอื่นที่ร่วมด้วย เพื่อให้ได้พฤติกรรมของแนวชายฝั่งที่ถูกต้อง นอกจากนี้หากมีข้อมูลภาพถ่ายที่นำมาวิเคราะห์จำนวนมากขึ้น จะยิ่งช่วยให้วิเคราะห์การ

เปลี่ยนแปลงชายฝั่งได้ถูกต้องมากยิ่งขึ้น โดยเฉพาะการมีข้อมูลภาพถ่ายในช่วงเวลาที่เกิดเหตุการณ์สำคัญบริเวณพื้นที่ศึกษา เช่น การถ่ายเททราย หรือผลที่เกิดจากพายุซัดฝั่ง เป็นต้น

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษานี้ได้รับการสนับสนุนจากคณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

- กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง. (2567). รายงานสถานการณ์ด้านทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่งและการกัดเซาะชายฝั่งของประเทศ พ.ศ. 2565. <https://www.dmcr.go.th/detailLib/8098>
- นิรัตติยากร แสนนาใต้ และสมปรารถนา ฤทธิ์พริ้ง. (2566). การคาดการณ์การเปลี่ยนแปลงชายฝั่งของหาดท่องเที่ยวจังหวัดภูเก็ต. ใน *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 28* (WR E4.1-4.9). คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ภัทรกร นิธิรางกูร และสมปรารถนา ฤทธิ์พริ้ง. (2562). การศึกษาเปรียบเทียบวิธีการระบุแนวชายฝั่งทะเล. ใน *การประชุมวิชาการวิศวกรรมโยธาแห่งชาติ ครั้งที่ 24* (น. 2106–2113). คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- รัฐพล รุ่งโรจน์เจริญผล และสมปรารถนา ฤทธิ์พริ้ง. (2561). ผลกระทบจากเขื่อนกันทรายและคลื่นปากร่องน้ำสะกอมต่อการเปลี่ยนแปลงชายฝั่ง. ใน *เรื่องเต็มการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 56* (น. 214–221). มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- ระบบข้อมูลการใช้จ่ายภาครัฐ. (2567). *ข้อมูลการใช้จ่ายภาครัฐ*. สืบค้นเมื่อ 14 กุมภาพันธ์ 2567, จาก <https://govspending.data.go.th/>
- Kiran, A. S., Lokesh, T., Sankar, S., Jebakumar, P. P., Ravichandran, V., & Ramanamurthy, M. V. (2022). Sustainable opening of Adayar River mouth. In *OCEANS 2022-Chennai*. IEEE. <https://doi.org/10.1109/OCEANSChennai45887.2022.9775238>
- Langkulsen, U., Cheewinsirawat, P., Rwodzi, D. T., Lambomung, A., Poompongthai, W., Chamchan, C., Boonmanunt, S., Nakhapakorn, K., & Moses, C. (2022). Coastal erosion and flood coping mechanisms in Southern Thailand: A qualitative study. *Internationa*

- tional Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(19), 12326. <https://doi.org/10.3390/ijer-ph191912326>
- Miyahara, S., Uda, T., Furuike, K., Serizawa, M., San-nami, T., & Ishikawa, T. (2011). Effect of sand bypassing at Sakuma Dam in Tenryu River as a measure against erosion of Tenryu River Delta Coast. *Coastal Engineering Proceedings*, 1(32), sediment. 106. <https://doi.org/10.9753/icce.v32.sediment.106>
- Saengsupavanich, C., Yun, L. S., Lee, L. H., & Sanitwong-Na-Ayutthaya, S. (2022). Intertidal intercepted sediment at jetties along the Gulf of Thailand. *Frontiers in Marine Science*, 9, Article 970592. <https://doi.org/10.3389/fmars.2022.970592>
- Varghese, B. K., Kiran, A. S., Vijaya, R., & Suriyakala, C. D. (2019). Sand bypassing methodology for sustainable river mouth opening. *International Journal of Recent Technology and Engineering*, 8(2S11), 2280–2284. <https://www.ijrte.org/wp-content/uploads/papers/v8i2S11/B12530982S1119.pdf>
- Wibowo, M., Hendriyono, W., Rahman, R. A., Susatijo, G., Kongko, W., Istiyanto, D. C., Widagdo, A. B., Nugroho, S., Khoirunnisa, H., Wiguna, E., Aziz, H., & Santoso, B. (2020). Sediment transport modeling at Jelitik Estuary, Sungailiat-Bangka Regency for the design of sediment control structures. *Journal of Physics: Conference Series*, 1625(1), Article 012042. <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1625/1/012042>

การประเมินและวิธีการแก้ปัญหาแรงดันเหนี่ยวนำที่เปลือกของเคเบิลใต้ดินที่มีความยาวมากสำหรับวงจรเดียวในระบบแรงดันปานกลาง

Evaluation and solutions for induced voltage on the sheath of long underground cables in single-circuit medium voltage systems

บัณฑิต ฤทธิทอง,^{1*}

Bundit Rittong,^{1*}

Received: 3 September 2024 ; Revised: 2 October 2024 ; Accepted: 6 November 2024

บทคัดย่อ

รูปแบบการวางเคเบิลใต้ดินมีผลต่อการเกิดแรงดันเหนี่ยวนำที่เปลือกของสายต้องจำกัดค่าไม่เกิน 65 V ตามข้อกำหนดของมาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้าสำหรับประเทศไทย เพื่อให้เกิดความปลอดภัยกับผู้ปฏิบัติงาน บทความนี้ นำเสนอการประเมินแรงดันเหนี่ยวนำที่เปลือกของเคเบิลใต้ดินสำหรับวงจรเดียวในระบบแรงดันปานกลาง 2 รูปแบบ คือ การวางสายแบบรูปสามเหลี่ยมและวางสายแบบในแนวเดียวกัน โดยที่เปลือกของสายต่อลงดินแบบทั้งสองปลาย ผลการศึกษาพบว่า แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นของแบบรูปสามเหลี่ยมมีค่าน้อยและปลอดภัยกว่าแบบในแนวเดียวกัน และแนวทางปฏิบัติในการแก้ปัญหาแรงดันเหนี่ยวนำเกินมาตรฐาน คือ การบาลานซ์โหลดในแต่ละสายป้อนให้มีค่าใกล้เคียงกันโดยคำนึงถึงระยะสายที่ใช้ต้องสั้นที่สุด และการติดตั้งสายดินขนานไปกับสายเฟสพร้อมตัวจำกัดแรงดันเหนี่ยวนำ

คำสำคัญ: แรงดันเหนี่ยวนำ, เคเบิลใต้ดิน, วงจรเดียว

Abstract

The layout of underground cables affects the induced voltage at the sheath of the cable, which must be limited to no more than 65 V according to the electrical installation standards for Thailand to ensure safety for the operators. This paper presents the evaluation of the induced voltage at the sheath of underground cables for a single-circuit in a medium-voltage system in two formations: trefoil and flat formation with the sheath of the cable grounded at both ends. The results of the study found that the induced voltage of the trefoil formation is less and safer than the flat formation, and the practice of solving the problem of induced voltage exceeding the standard is to balance the load in each feeder to have a similar value, taking into account the shortest cable length, and install the ground wire parallel to the phase wire with a sheath voltage limiter.

Keywords: Induced voltage, underground cable, single-circuit

¹ อาจารย์, สาขาวิชาวิศวกรรมเครื่องกล-วิศวกรรมระบบราง คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ 60 หมู่ 3 ถนนสายเอเชีย ตำบลหันตรา อำเภอพระนครศรีอยุธยา จังหวัดพระนครศรีอยุธยา 13000

¹ Lecturer, Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi 60 Moo 3 Asian Highway, Phranakhon Si Ayutthaya 13000

* Corresponding author: Bundit Rittong, Email: bundit.r@rmutsb.ac.th

บทนำ

การพัฒนาาระบบจำหน่ายไฟฟ้าของประเทศไทยในเขตเมืองใหญ่ และพื้นที่เศรษฐกิจสำคัญที่มีประชากรอาศัยอยู่อย่างหนาแน่น ทางกรไฟฟ้าฝ่ายจำหน่าย ได้แก่ การไฟฟ้านครหลวง (กฟน.) และการไฟฟ้าส่วนภูมิภาค (กฟภ.) ได้ดำเนินโครงการเปลี่ยนระบบไฟฟ้าจากสายอากาศเป็นสายไฟฟ้าใต้ดินอย่างต่อเนื่อง โดยมีจุดประสงค์หลักคือ ปรับปรุงภูมิทัศน์ เพิ่มความปลอดภัย ความมั่นคง ความเชื่อถือได้ของระบบไฟฟ้า และรองรับการใช้โหลดที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องในอนาคต อีกทั้งการนำสายไฟฟ้าลงใต้ดินนั้นช่วยลดอุบัติเหตุที่เกิดขึ้นจากสายไฟฟ้าที่ตกหล่นหรือชำรุดจากเสาไฟฟ้าได้ ทั้งนี้ในสถานประกอบขนาดใหญ่ที่อยู่ในเขตเมืองเศรษฐกิจที่ใช้โหลดขนาดใหญ่และมีสถานีไฟฟ้าเป็นของตนเองส่วนใหญ่จะดำเนินการเปลี่ยนระบบไฟฟ้าจากสายอากาศเป็นสายไฟฟ้าใต้ดินมากขึ้น รูปแบบการจัดวางสายมีความสำคัญในประเด็นเรื่องการเกิดแรงดันเหนี่ยวนำที่เปลือกของสาย ซึ่งค่าแรงดันเหนี่ยวนำนี้ต้องไม่เกิน 65 V ตามข้อกำหนดของมาตรฐานการติดตั้งทางไฟฟ้าสำหรับประเทศไทย เพื่อให้เกิดความปลอดภัยกับผู้ปฏิบัติงาน การจัดวางสายสามารถจัดได้ 2 รูปแบบ คือ การวางสายแบบรูปสามเหลี่ยม (Trefoil formation) และการวางสายแบบในแนวเดียวกัน (Flat formation) ซึ่งแต่ละรูปแบบส่งผลทำให้เกิดแรงดันเหนี่ยวนำที่เปลือกของสายต่างกัน และที่เปลือกของเคเบิลใต้ดินต้องมีการต่อลงดินเพื่อให้สนามไฟฟ้าจากตัวนำกระจายไปยังสายต่อลงดินอย่างสม่ำเสมอ ป้องกันการเกิดเบรคดาวน์ที่ฉนวนของสาย อีกทั้ง รูปแบบการต่อลงดินนี้มีความสำคัญในการแก้ปัญหาของแรงดันเหนี่ยวนำ โดยรูปแบบการต่อลงดินของเคเบิลใต้ดิน สามารถทำได้ 5 วิธี คือ 1) การต่อลงดินข้างเดียว (Single-point bonding) 2) การต่อลงดินทั้งสองปลาย (Both-ends bonding) 3) การต่อลงดินแบบกึ่งกลาง (Middle-point bonding) 4) การต่อลงดินแบบหลายจุด (Multi-points bonding) และ 5) การต่อลงดินแบบไขว้ (Cross-bonding) (กองมาตรฐานระบบไฟฟ้า, การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, 2548; สายงานวิศวกรรม, การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, 2560)

การประยุกต์ใช้งานการต่อลงดินแต่ละรูปแบบสำหรับประเทศไทยนั้น แบ่งออกเป็นตามระดับแรงดัน โดยระบบ 69/115 kV การต่อลงดินทำได้ 3 วิธี คือ การต่อลงดินข้างเดียว ใช้สำหรับเคเบิลใต้ดินระยะทางไม่เกิน 500 m การต่อลงดินแบบกึ่งกลางใช้ในระยะทางที่มากกว่า 500 m แต่ไม่เกิน 1,000 m และการต่อลงดินแบบไขว้ใช้ในระยะทางที่มากกว่า 1,000 m สำหรับในระบบ 22-33 kV การต่อลงดินทำได้ 3 วิธี คือ การต่อลงดินข้างเดียว การต่อลงดินทั้งสองปลาย ซึ่งระยะทางของ

สายต้องไม่เกิน 500 m และในกรณีที่มีความยาวของสายมากกว่า 500 m จะต้องใช้การต่อลงดินแบบหลายจุด (กองมาตรฐานระบบไฟฟ้า, การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, 2548; สายงานวิศวกรรม, การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, 2560)

วิธีการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำสำหรับการวางสายแบบรูปสามเหลี่ยม และแบบในแนวเดียวกันของวงจรเดี่ยวและวงจรคู่ขนานเสนอโดย (Shaban *et al.*, 2014) โดยทำการศึกษาเพิ่มเติมในการไขว้สลับสายของวงจรเดี่ยวด้วยการต่อลงดินแบบไขว้ใน (Shaban *et al.*, 2015) และได้ขยายผลการศึกษาไปยังวงจรคู่การต่อลงดินแบบข้างเดียวและแบบหลายจุดใน (Shaban *et al.*, 2015) และ (Guevara *et al.*, 2024) นำเสนอการศึกษาในวงจรเดี่ยวด้วยการต่อลงดิน 3 รูปแบบ ได้แก่ แบบไขว้ แบบผสมระหว่างไขว้ร่วมกับการต่อลงดินข้างเดียว และระหว่างไขว้ร่วมกับการต่อลงดินแบบกึ่งกลาง ตามลำดับ

การใช้โปรแกรมมาช่วยในการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำโดย (Gouramanis *et al.*, 2011) ใช้โปรแกรม ATP/EMTP (Alternative transients program-electromagnetic transients program) ศึกษาวงจรเดี่ยวการต่อลงดินแบบทั้งสองปลายสายและแบบไขว้ ในขณะที่ (Guevara *et al.*, 2023) ใช้ ATP ในกรณีไขว้สลับสายของวงจรเดี่ยวด้วยการต่อลงดินแบบไขว้และขยายผลเป็นวงจรคู่ใน (Guevara *et al.*, 2023) สำหรับการใช้ MATLAB (Matrix laboratory) ในวงจรคู่การต่อลงดินแบบไขว้เสนอโดย (Guevara Asorza *et al.*, 2024) และ (Papadopoulos *et al.*, 2024) ใช้ ATP/EMTP และ CDEGS (Current distribution, electromagnetic fields, grounding and soil structure analysis) ในวงจรเดี่ยวด้วยการต่อลงดินแบบข้างเดียวและแบบไขว้

ทั้งนี้ การติดตั้งเคเบิลใต้ดินในบางกรณีมีความจำเป็นต้องใช้สายที่มีความยาวมาก ซึ่งส่งผลทำให้เกิดความเสี่ยงในการเกิดแรงดันเหนี่ยวนำของสายสูงกว่าค่าที่มาตรฐานกำหนดไว้ โดย (Lee *et al.*, 2012; Maneepeth *et al.*, 2021) นำเสนอการติดตั้งสายดิน (Parallel ground continuity conductor, PGCC) ขนานไปกับสายเฟสพร้อมตัวจำกัดแรงดัน (Sheath voltage limiter, SVL) เพื่อจำกัดแรงดันไม่เกินกว่าค่ามาตรฐาน

บทความนี้ นำเสนอการประเมินค่าแรงดันเหนี่ยวนำของเคเบิลใต้ดินวงจรเดี่ยวจากการวางสายแบบรูปสามเหลี่ยมและแบบในแนวเดียวกันด้วยการต่อลงดินแบบทั้งสองปลายในระบบไฟฟ้าของสถานประกอบการขนาดใหญ่ที่ดำเนินการปรับปรุงจากสายอากาศเป็นระบบเคเบิลใต้ดิน พร้อมข้อเสนอแนะสำหรับแนวทางปฏิบัติในกรณีที่ค่าแรงดันเหนี่ยวนำเกิน

มาตรฐาน เพื่อใช้เป็นแนวทางที่ทำให้เกิดความปลอดภัยกับผู้ปฏิบัติงาน

ทฤษฎีการคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำและวิธีการต่อลงดินของเคเบิลใต้ดิน

1. การคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำ

การวางเคเบิลใต้ดินเป็นแบบรูปสามเหลี่ยมจะรวมถึงการวางสายแบบชิดกันหรือวางสายแบบมีระยะห่าง แสดงได้ดัง Figure 1 โดยที่ S คือ ระยะห่างระหว่างตัวนำ (mm) สามารถคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำที่เปลือกตัวนำ ได้ดังสมการที่ (1) (Comittee, I. C., 2014)

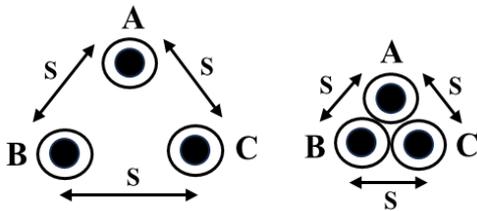


Figure 1 Trefoil formation

$$E_a = j\omega I_a (2 \times 10^{-7}) \left(-\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \log_e \left(\frac{2S}{d} \right) \text{ V/m}$$

$$E_b = j\omega I_b (2 \times 10^{-7}) \log_e \left(\frac{2S}{d} \right) \text{ V/m}$$

$$E_c = j\omega I_c (2 \times 10^{-7}) \left(-\frac{1}{2} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \log_e \left(\frac{2S}{d} \right) \text{ V/m}$$

$$I_a = aI_b, I_c = a^2 I_b : a = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}, I_b = I_o (1 + j0)$$

สำหรับการวางเคเบิลใต้ดินแบบในแนวเดียวกัน แสดงได้ดัง Figure 2 ซึ่งจะรวมถึงการวางสายทั้งในแนวนอนหรือแนวตั้ง สามารถคำนวณแรงดันเหนี่ยวนำที่เปลือกตัวนำ ได้ดังสมการที่ (2) (Comittee, I. C., 2014)

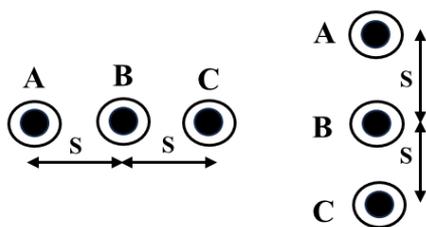


Figure 2 Flat formation

$$E_a = j\omega I_a (2 \times 10^{-7}) \left(-\frac{1}{2} \log_e \frac{S}{d} + j \frac{\sqrt{3}}{2} \log_e \frac{4S}{d} \right) \text{ V/m}$$

$$E_b = j\omega I_b (2 \times 10^{-7}) \log_e \left(\frac{2S}{d} \right) \text{ V/m}$$

$$E_c = j\omega I_c (2 \times 10^{-7}) \left(-\frac{1}{2} \log_e \frac{S}{d} - j \frac{\sqrt{3}}{2} \log_e \frac{4S}{d} \right) \text{ V/m}$$

$$I_a = aI_b, I_c = a^2 I_b : a = -\frac{1}{2} + j \frac{\sqrt{3}}{2}, I_b = I_o (1 + j0)$$

เมื่อ I_o คือ ขนาดกระแสไหล (A), E_a, E_b, E_c คือ แรงดันเหนี่ยวนำที่เปลือกของสายเฟส A, B, C (V/m) และ d คือ เส้นผ่านศูนย์กลาง Sheath ของสาย (mm)

2. การต่อลงดินของเคเบิลใต้ดิน

วิธีการต่อลงดินที่เปลือกตัวนำของเคเบิลใต้ดิน ในระดับแรงดันปานกลางสำหรับประเทศไทย สามารถทำได้ 3 วิธี คือ การต่อลงดินข้างเดียว แสดงได้ดัง Figure 3

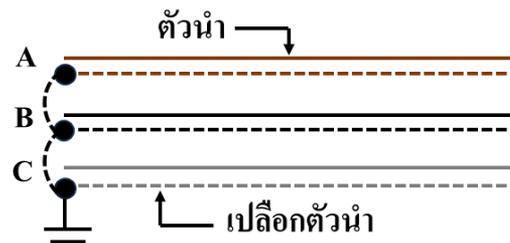


Figure 3 Single-point bonding

วิธีการนี้มีความเสี่ยงที่อาจทำให้แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นเกินมาตรฐาน (ต้องไม่เกิน 65 V) เนื่องจากแรงดันที่เกิดขึ้นเป็นสัดส่วนตามความยาวของสายที่ติดตั้ง ซึ่งส่งผลทำให้เกิดความไม่ปลอดภัยกับผู้ปฏิบัติงาน วิธีการนี้ทางไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายไม่แนะนำให้ใช้งาน ดังนั้น วิธีการที่ถูกนำมาใช้ในการแก้ปัญหาแรงดันเหนี่ยวนำนี้ คือ การต่อลงดินทั้งสองปลาย แสดงได้ดัง Figure 4 วิธีการนี้ช่วยจำกัดแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นได้ แต่มีข้อเสียในเรื่องของการเกิดกระแสไหลวนที่เปลือกตัวนำตลอดเวลา ทำให้เกิดความร้อน และเกิดการสูญเสียของสายขึ้นส่งผลทำให้การนำกระแสของสายลดลง แต่เพื่อความปลอดภัยกับผู้ปฏิบัติงาน วิธีการนี้การไฟฟ้าฝ่ายจำหน่ายได้เลือกนำมาใช้งานสำหรับประเทศไทย และวิธีสุดท้ายเป็นการต่อลงดินแบบหลายจุด แสดงได้ดัง Figure 5 รูปแบบนี้เหมาะสมกับการติดตั้งเคเบิลใต้ดินที่ต้องการต่อสายเพื่อให้ความยาว แต่วิธีการนี้มีความเสี่ยงจากการต่อสายที่ไม่ดีได้

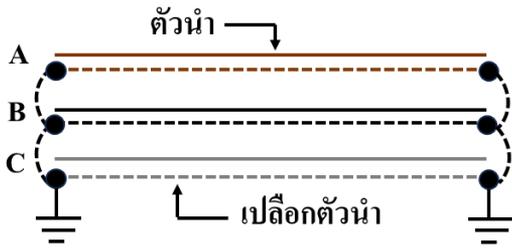


Figure 4 Both-ends bonding

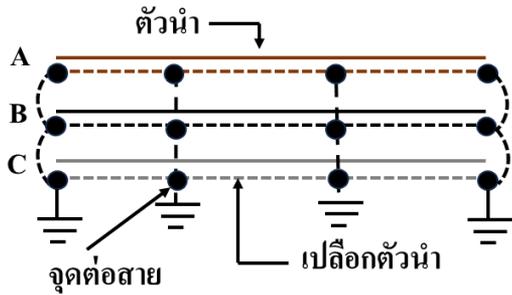


Figure 5 Multi-points bonding

วิธีการต่อลงดินแบบทั้งสองปลายที่ถูกเลือกใช้ในประเทศไทยนั้นมีข้อจำกัดในการติดตั้งสายต้องมีระยะทางไม่เกิน 500 m ตามข้อกำหนดของการไฟฟ้า ทั้งนี้ การติดตั้งสายในบางโครงการอาจมีระยะทางที่เกินกว่า 500 m ซึ่งส่งผลอาจทำให้ค่าแรงดันเหนี่ยวนำเกินมาตรฐาน ในการแก้ปัญหา นี้ คือ การติดตั้งสาย PGCC พร้อมติดตั้ง SVL เพื่อจำกัดแรงดันเหนี่ยวนำ แสดงได้ดัง Figure 6 (Comittee, I. C., 2014) การคำนวณขนาดสาย PGCC ได้ดังสมการที่ (3) (International Electrotechnical Commission, 2011)

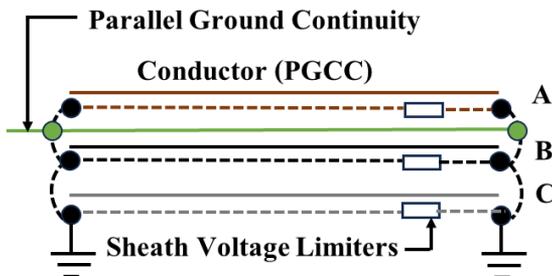


Figure 6 Both-end bonding with SVL

$$S = \frac{\sqrt{I^2 t}}{k} ; k = 226 \tag{3}$$

เมื่อ S คือ ขนาดสาย PGCC (mm^2), I คือ ค่ากระแสลัดวงจร 3 เฟสที่บัสแรงดันปานกลาง (A), t คือ เวลาที่ใช้ในการตัดกระแสลัดวงจร (Sec) และ k แฟกเตอร์ของสายที่ใช้ตัวนำเป็นทองแดง

กรณีศึกษาระบบเคเบิลใต้ดิน

ระบบเคเบิลใต้ดินที่ใช้ในการศึกษา เขียนเป็นไดอะแกรมเส้นเดียว แสดงได้ดัง Figure 7 สถานีไฟฟ้ามีรูปแบบการจ่ายไฟเป็นระบบ 69/24 kV มีหม้อแปลง ขนาด 50 MVA จำนวน 2 เครื่อง หม้อแปลงแต่ละเครื่องจ่ายสายป้อนเคเบิลใต้ดิน จำนวน 6 สายป้อน (Feeder) เป็นแบบลูป (Loop) มีหลักการจ่ายไฟฟ้าเป็นแบบ N-1 คือ การจ่ายแบบเป็นลูปกรณีที่สายป้อนใดสายป้อนหนึ่ง หรือหม้อแปลง (Transformer, TR) ของสถานีไฟฟ้าเครื่องใดเครื่องหนึ่งเกิดการชำรุดเสียหาย สถานีไฟฟ้าก็ยังคงสามารถจ่ายไฟฟ้าให้กับโหลดตามอาคารได้

ในสภาวะระบบไฟฟ้าปกติหม้อแปลงเครื่องที่ 1 (TR1) และหม้อแปลงเครื่องที่ 2 (TR2) ของสถานีไฟฟ้าแบ่งกันจ่ายโหลดให้กับหม้อแปลงตามอาคารในแต่ละลูป แสดงได้ดัง Table 1 เห็นได้ว่า ลูป1 ที่รับไฟมาจาก TR1 มีความยาวของสายป้อนมากที่สุด และลูป4 สายมีความยาวน้อยสุด ทั้งนี้เมื่อพิจารณาในสภาวะระบบไฟฟ้าฉุกเฉิน TR (Total) คือ การจ่ายไฟโดยใช้หม้อแปลงเครื่องเดียว ลูป1 มีความยาวสายของสายป้อนมากที่สุด และลูป4 มีความยาวสายน้อยสุด ในขณะที่ โหลดรวมในแต่ละลูปเมื่อรวมขนาดหม้อแปลงของแต่ละอาคาร ลูป5 มากสุด และลูป6 น้อยสุด ทั้งนี้เห็นได้ว่า สายป้อนและโหลดในแต่ละลูปยังไม่ได้ทำการบาลานซ์โหลด

บทความนี้ ดำเนินการประเมินค่าแรงดันเหนี่ยวนำของเคเบิลใต้ดินวงจรเดียว โดยใช้ขนาดกระแสโหลด แสดงได้ดัง Table 1 และในแต่ละลูปใช้สายขนาด 240 mm^2 ฉนวนเป็นชนิด Cross-linked polyethylene (XLPE) มีเส้นผ่านศูนย์กลางรวม (Overall diameter, D) เท่ากับ 42.2 mm และเส้นผ่านศูนย์กลาง Sheath (d) เท่ากับ 2.1 mm ซึ่งเป็นข้อมูลทางเทคนิคที่ได้จากผู้ผลิตสาย โดยการวางสายแบบรูปสามเหลี่ยม S มีค่าเท่ากับ 42.2 mm แสดงได้ดัง Figure 8 และการวางสายแบบในแนวเดียวกันกำหนดระยะห่างระหว่างสายเฟสเท่ากับ D ของเคเบิลใต้ดิน ดังนั้น S มีค่าเท่ากับ 84.4 mm แสดงได้ดัง Figure 9 ซึ่งเป็นไปตามข้อกำหนดโดย (กองมาตรฐานระบบไฟฟ้า, การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค, 2548)

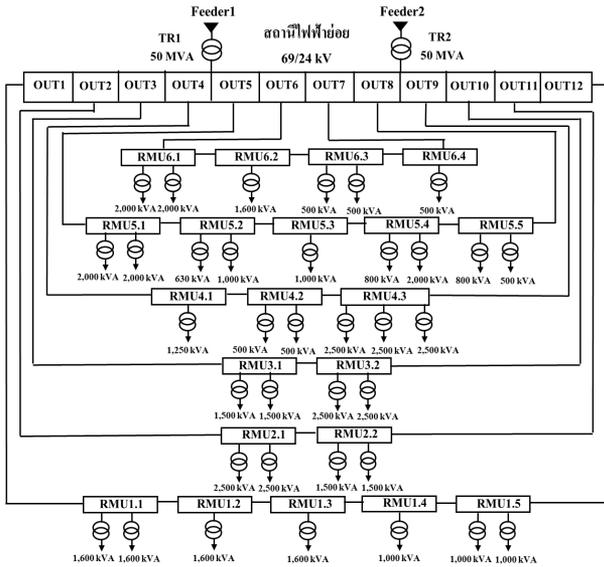


Figure 7 Underground cable system used in the study

Table 1 Cable length and load usage for each loop of underground cable system

TR	Loop	Cable length	Load	Current
		(m)	(kVA)	(A)
TR1	1	370	6,400	154
	2	247	5,000	120
	3	205	3,000	72
	4	10	2,250	54
	5	170	6,630	159
	6	109	4,000	96
TR2	1	298	3,000	72
	2	247	3,000	72
	3	105	5,000	120
	4	20	7,500	180
	5	176	4,100	99
	6	61	3,100	75
TR (Total)	1	668	9,400	226
	2	494	8,000	192
	3	310	8,000	192
	4	30	9,750	235
	5	346	10,730	258
	6	170	7,100	171

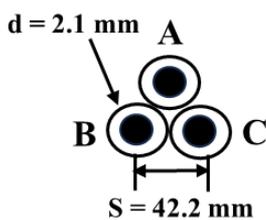


Figure 8 Trefoil formation single-circuit underground cable used in the study

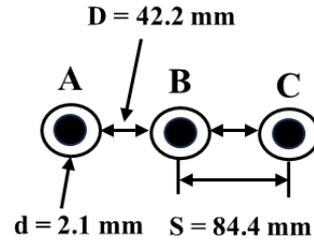


Figure 9 Flat formation single-circuit underground cable used in the study

ผลการศึกษาและอภิปรายผล

ผลที่ได้จากการประเมินค่าแรงดันเหนี่ยวนำจากการวางสายแบบรูปสามเหลี่ยม เมื่อคิดที่โหลด 100% และ 80% ของหม้อแปลง ตามลำดับ แสดงได้ดัง Figure 10 และ Figure 11 เห็นได้ว่า ในสภาวะระบบไฟฟ้าปกติ สายบ่อนทั้ง 6 ลูป ค่าแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นไม่เกิน 65 V อยู่ในเกณฑ์ของมาตรฐานมีความปลอดภัยกับผู้ปฏิบัติงาน

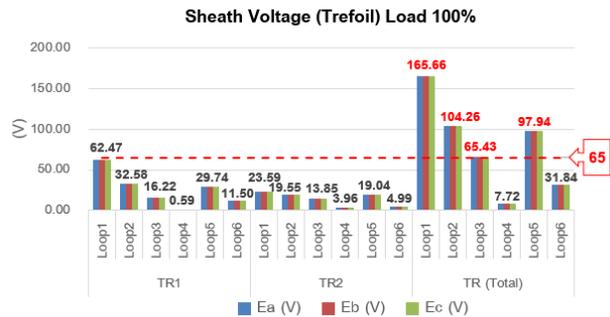


Figure 10 Trefoil formation sheath voltage at load 100%

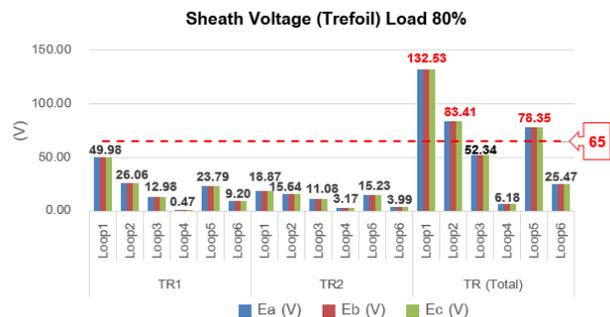


Figure 11 Trefoil formation sheath voltage at load 80%

ในขณะที่ เมื่อระบบไฟฟ้าอยู่ในสภาวะฉุกเฉินที่โหลด 100% สายบ่อนลูป 1, 2, 3, และ 5 ที่โหลด 80% สายบ่อนลูป 1, 2, และ 5 ตามลำดับ แรงดันเหนี่ยวนำเกินมาตรฐาน ทั้งนี้ สามารถวิเคราะห์ได้ว่า สาเหตุที่ทำให้แรงดันเกินเป็นผลมาจาก 2 ปัจจัยหลัก คือ สายบ่อนมีการใช้โหลดที่สูงและมีความยาวมาก

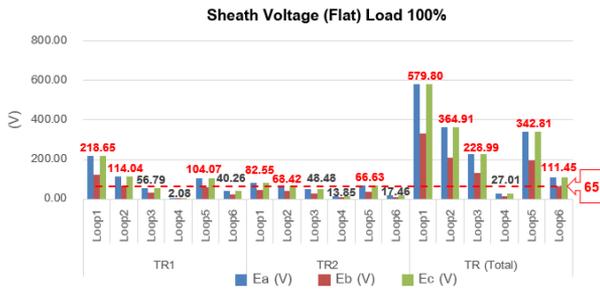


Figure 12 Flat formation sheath voltage at load 100%

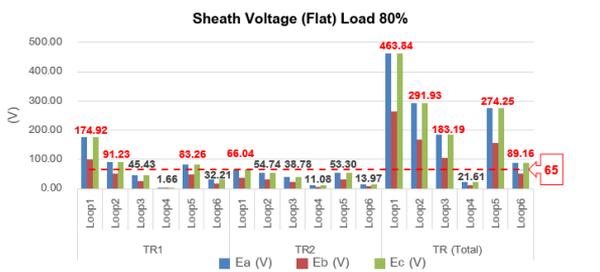


Figure 13 Flat formation sheath voltage at load 80%

สำหรับการวางเคเบิลใต้ดินแบบในแนวเดียวกัน เมื่อคิดที่โหลด 100% และ 80% ของหม้อแปลง ตามลำดับ แสดงได้ดัง Figure 12 และ Figure 13 เห็นได้ว่า ทั้งในสภาวะระบบไฟฟ้าปกติและฉุกเฉิน แรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นสูงกว่าแบบรูปสามเหลี่ยมมากและเกินกว่ามาตรฐานในหลายๆ สายป้อน ซึ่งเป็นรูปแบบที่ไม่เหมาะสมสำหรับการติดตั้ง

สรุปผลการศึกษาและข้อเสนอแนะ

บทความนี้ นำเสนอการประเมินแรงดันเหนี่ยวนำที่เปลือกของเคเบิลใต้ดินแบบวงจรถัดจากการวางสายแบบรูปสามเหลี่ยมและวางแบบในแนวเดียวกัน ผลการศึกษาพบว่า แบบรูปสามเหลี่ยมแรงดันเหนี่ยวนำที่เกิดขึ้นมีค่าน้อยและปลอดภัยกว่าแบบในแนวเดียวกัน สำหรับในกรณีศึกษาเมื่อพิจารณาระบบไฟฟ้าอยู่ในสภาวะปกติ การวางสายแบบรูปสามเหลี่ยมค่าแรงดันเหนี่ยวนำอยู่ในเกณฑ์ของมาตรฐาน ในขณะที่ เมื่อเกิดสภาวะฉุกเฉินในระบบไฟฟ้าค่าแรงดันเหนี่ยวนำเกินมาตรฐานยังไม่ปลอดภัย แม้ว่าสภาวะนี้มีโอกาสเกิดขึ้นได้น้อยมากในทางปฏิบัติ แต่เพื่อให้เกิดความปลอดภัยกับบุคคลที่เข้าไปปฏิบัติงานในทุกสถานการณ์ของระบบไฟฟ้า ข้อเสนอแนะสำหรับแนวทางปฏิบัติในการแก้ปัญหาสามารถสรุปได้ ดังนี้

1) ทำการบาลานซ์โหลดในแต่ละป้อนให้มีค่าใกล้เคียงกัน เพื่อหลีกเลี่ยงการใช้โหลดที่สูงในบางสายป้อนโดยคำนึงถึงระยะสายที่ใช้ต้องสั้นที่สุด

2) ติดตั้งสาย PGCC ขนานไปกับสายเฟสพร้อม SVL เพื่อจำกัดแรงดันเหนี่ยวนำ ทั้งนี้กรณีศึกษาที่ ขนาดสาย PGCC จะเท่ากับ 35 mm² เมื่อคำนวณตามสมการที่ 3 ที่ค่ากระแสลัดวงจร 3 เฟสที่บัส 24 kV เท่ากับ 7.1365 kA และเวลาการตัดกระแสลัดวงจรที่ 0.5 Sec ซึ่งเป็นค่าที่ใช้ในสถานีไฟฟ้าย่อยแห่งนี้

เอกสารอ้างอิง

กองมาตรฐานระบบไฟฟ้า, การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. (2548). ระบบเคเบิลใต้ดิน. การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.

สายงานวิศวกรรม, การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค. (2560). คู่มือการออกแบบเคเบิลใต้ดิน. การไฟฟ้าส่วนภูมิภาค.

Gouramanis, K., Kaloudas, C. G., Papadopoulos, T. A., Papagiannis, G. K., & Stasinou, K. (2011, June 19-23). *Sheath voltage calculations in long medium voltage power cables* [Paper presentation]. 2011 IEEE Trondheim PowerTech, Trondheim, Norway. <https://doi.org/10.1109/ptc.2011.6019234>

Guevara, J. E., Colqui, J. S., Bautista, J. P., & Pissolato Filho, J. (2023). Analysis of induced voltages on the sheath of single-circuit underground power lines-Part I: Without phases transposition. In *2023 IEEE Colombian Caribbean Conference (C3)* (pp. 1–6). IEEE. <https://doi.org/10.1109/C359124.2023.10324831>

Guevara, J. E., Colqui, J. S. L., Bautista, J. P., & Filho, J. P. (2023, October 17-20). *Analysis of induced voltages on the sheath of double-circuit underground power lines - Part I: Without phases transposition* [Paper presentation]. 2023 IEEE XXX International Conference on Electronics, Electrical Engineering and Computing (INTERCON), Lima, Peru. <https://doi.org/10.1109/intercon59652.2023.10326027>

Guevara, J. E., Ruiz, W. G. F., Colqui, J. S. L., & Pissolato Filho, J. (2024). Evaluation of mixed systems for sheath bonding of single-circuit underground power lines. In *SoutheastCon 2024* (pp. 486–491). IEEE.

Guevara Asorza, J. E., Colqui, J. S. L., Kurokawa, S., & Pissolato Filho, J. (2024). Analysis of increased induced voltages on the sheath of double-circuit underground transmission lines guaranteeing ampacity.

- Energies*, 17(7), 1637. <https://doi.org/10.3390/en17071637>
- International Electrotechnical Commission. (2011). *Low-voltage electrical installations – Part 5-54: Selection and erection of electrical equipment – Earthing arrangements and protective conductors (IEC 60364-5-54:2011)*.
- Lee, J.-B., & Jung, C.-K. (2012). Technical review on parallel ground continuity conductor of underground cable systems. *Journal of International Council on Electrical Engineering*, 2(3), 250–256. <https://doi.org/10.5370/jicee.2012.2.3.250>
- Maneepeth, P., Thararak, P., Jirapong, P., & Karaaom, C. (2021, May 12-14). *Mitigation of induced currents and overvoltages in metallic sheath of 115 kV underground cable using sheath voltage limiter and parallel ground continuity conductor* [Paper presentation]. 2021 18th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), Chiang Mai, Thailand. <https://doi.org/10.1109/ieecon51072.2021.9440357>
- Papadopoulos, T. A., Charalambous, C. A., & Chrysoschos, A. I. (2024). Important insights into steady-state calculations of voltages and currents in complex sheath bonding configurations of single-core cables. *Electric Power Systems Research*, 235, 110859. <https://doi.org/10.1016/j.epsr.2024.110859>
- Shaban, M., Salam, Md. A., Ang, S. P., & Voon, W. (2014, March 31-April 3). *Calculation of sheath voltage of underground cables using various configurations* [Paper presentation]. 10th IET International Conference on Developments in Power System Protection (DPSP 2014), Copenhagen, Denmark. <https://doi.org/10.1049/cp.2014.1074>
- Shaban, M., Salam, Md. A., Ang, S. P., Norfauzi, Md., Wen, F., & Voon, W. (2015, November 1-4). *Calculation of induced sheath voltage for transposed and untransposed cable conductors* [Paper presentation]. TENCON 2015 - 2015 IEEE Region 10 Conference, Macao, China. <https://doi.org/10.1109/tencon.2015.7372833>
- Shaban, M., Salam, Md. A., Ang, S. P., Poulouse, M. M., & Voon, W. (2015, November 1-4). *Induced sheath voltage in double circuit* [Paper presentation]. TENCON 2015 - 2015 IEEE Region 10 Conference, Macao, China. <https://doi.org/10.1109/tencon.2015.7373111>

การพัฒนาอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนสำหรับงานท่ออลูมิเนียม

Development of a friction stir welding apparatus for aluminum pipe work

วรพงษ์ บุญช่วยแทน¹, ต่วนฮาร์ฟิตร์ ตวนดิง¹ และ ซัยนุลอาบีดีน เจ๊ะแเอ¹

Worapong Boonchouytan¹, Tuanhafit Tuanding¹ and Sainul-Abeedeen Chea-Ea¹

Received: 23 August 2024 ; Revised: 27 September 2024 ; Accepted: 1 November 2024

บทคัดย่อ

การเชื่อมเสียดทานแบบกวนงานท่อในปัจจุบัน เป็นงานที่ทำหายความสามารถด้านการสร้างอุปกรณ์สำหรับการเชื่อมเฉพาะทางนี้มาก เพราะมักเกิดปัญหาได้หลายประการ เช่น การสัมผัสของเครื่องมือที่น้อยลงเนื่องจากรูปทรงที่โค้งมนของผิวงานท่อ การจัดเตรียมสำหรับการจับยึดท่อ อุปกรณ์เสริมการเชื่อมท่อ เป็นต้น ดังนั้นงานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างอุปกรณ์สำหรับการเชื่อมเสียดทานแบบกวนสำหรับงานท่อ และทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนทรงกระบอก ที่จะช่วยแก้ไขปัญหาในการเชื่อมท่อได้ และทำให้รอยเชื่อมมีคุณภาพที่สูงขึ้น อุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนงานท่อ ส่งกำลังด้วยมอเตอร์ที่ต่อเข้ากับหัวจับยึด สามารถควบคุมปัจจัยในการเชื่อม คือ ความเร็วเดินเชื่อม (มิลลิเมตรต่อนาที) และเครื่องกีดแนวตั้งสำหรับการจัดวางอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนวัสดุงานท่อบนโต๊ะงาน สามารถควบคุมปัจจัยในการเชื่อม คือ ความเร็วหมุนเชื่อม (รอบต่อนาที) โดยขึ้นส่วนที่สำคัญของอุปกรณ์แบ่งออกเป็น 4 ส่วนหลักคือ ส่วนควบคุมความเร็วเดินเชื่อม ส่วนหัวแบ่งติดตั้งเข้ากับโต๊ะงานเครื่องกีดแนวตั้ง ส่วนรองรับแรงกดงานเชื่อม และส่วนยื่นศูนย์ท้ายแทน การทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนงานท่อ จะใช้วัสดุท่ออลูมิเนียมเกรด 6063 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 50.80 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใน 38.80 มิลลิเมตร ความหนาของท่อ 6 มิลลิเมตร ใช้ความเร็วหมุนเชื่อม 1 ระดับ คือ 710 รอบต่อนาที และความเร็วเดินเชื่อม 3 ระดับ คือ 1.5 2.5 และ 3.5 มิลลิเมตรต่อนาที เครื่องมือเชื่อมใช้หัวพินทรงกระบอกเกลียวหมุนขวา ระยะพิตซ์ 0.8 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ความยาวของหัวพิน 4.8 มิลลิเมตร และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปากกวน 20 มิลลิเมตร ผลการทดสอบพบว่า อุปกรณ์สำหรับการเชื่อมเสียดทานแบบกวนสำหรับงานท่อสามารถเชื่อมชิ้นงานท่อได้ตามวัตถุประสงค์ โครงสร้างจุลภาคเกิดการบิดเบี้ยวของเกรนด้วยรูปแบบที่อิสระต่อกันซึ่งเป็นผลมาจากการแพร่กระจายของความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานในเนื้อชิ้นงาน พบข้อบกพร่องในรอยเชื่อมที่บริเวณแนวกวน สภาวะการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ใช้ความเร็วหมุนเชื่อมที่ 710 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อมที่ 2.5 มิลลิเมตรต่อนาที มีค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยมากที่สุด คือ 149.65 MPa และความแข็งของรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 2.5 มิลลิเมตรต่อนาที มีค่าความแข็งสูงสุดในบริเวณที่แนวกวนซึ่งมีความแข็งเท่ากับ 52.9 HV

คำสำคัญ: การเชื่อมเสียดทานแบบกวน, งานท่อ, อลูมิเนียม

Abstract

The development of specialized welder for friction stir welding of pipes is challenging. This is because a number of issues, including decreased contact area resulting from pipe curvature, improper positioning of the pipe clamping device, and pipe welding accessories, etc., frequently arise during friction stir welding of pipes. Therefore, in order to address the issues with pipe welding and enhance the quality of the welds, the objectives of this study were to design and build a friction stir welder for pipes and perform performance tests. The friction stir welder

¹ หลักสูตรสาขาวิชาวิศวกรรมการผลิต คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

¹ Program in Production Engineering, Faculty of Engineering, Rajamankala University of Technology Srivijaya

* Corresponding author: Email worapong.b@rmutsv.ac.th

developed in this study was driven by a motor held in a spindle and a vertical milling machine, which was responsible for placement of the friction welder on the bench. This friction stir welder setup contributed to automatic adjustment of welding speed (mm/min) and the rotation speed (rpm). This friction stir welder consisted of 4 main components, which were the welding speed control unit, the dividing plate mounted on the vertical milling machine, a support for the compression during welding of the specimen, and a tailstock. The performance test was conducted using aluminum alloy AA6063 pipe with an outer diameter of 50.8 mm, an inner diameter of 38.85 mm, and a thickness of 5.1 mm at one rotation speed (710 rpm) and three welding speeds (1.5, 2.5 and 3.5 rpm). The welder had a right-hand threaded cylindrical pin with a pitch of 0.8 mm, a diameter of 5 mm, a pin length of 4.8 mm, and a shoulder diameter of 20 mm. The results showed that this welder could be used in the friction stir welding of pipes as intended. The microstructural characterization revealed grain distortion due to excessive frictional heat accumulation in the specimens. The frictional stir welding at a rotation speed of 710 rpm and a welding speed of 2.5 mm/min resulted in the highest tensile strength of 149.65 MPa and the highest hardness of 52.9 HV at the Stir Zone.

Keywords: Friction stir welding, pipe work, aluminum

บทนำ

ความก้าวหน้าในการวิจัยด้านการเชื่อมวัสดุด้วยกรรมวิธีการเชื่อมเสียดทานแบบกวน (Friction Stir Welding: FSW) ซึ่งเป็นกรรมวิธีการเชื่อมที่สามารถแก้ไขปัญหาดังกล่าวของการเชื่อมวัสดุที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมโรงไฟฟ้า อุตสาหกรรมการบินและอวกาศ และอุตสาหกรรมยานยนต์ การเชื่อมเสียดทานแบบกวน เป็นกระบวนการเชื่อมในสภาวะของแข็งที่ไม่ได้รับผลกระทบจากข้อจำกัดของการเชื่อมในสภาวะหลอมละลายที่เกิดจากอุณหภูมิสูง วัสดุเกรดต่าง ๆ ที่มีความแตกต่างด้านสมบัติเชิงกลของวัสดุ ส่วนผสมของโลหะผสม หรือแม้กระทั่งการอบชุบด้วยความร้อนก่อนการเชื่อม ล้วนแต่อาจจะทำให้เกิดโครงสร้างจุลภาค ขนาดเกรน ข้อบกพร่องในรอยเชื่อม และสมบัติวัสดุที่แตกต่างกัน ซึ่งวัสดุแต่ละชนิดมีขอบเขตการใช้งาน และต้นทุนการผลิตที่แตกต่างกัน (Suresh *et al.*, 2023)

การเชื่อมท่อโดยทั่วไปจะเชื่อมด้วยเทคนิคการเชื่อมแบบหลอมละลาย (Na & Lee, 1996) เทคนิคการเชื่อมแบบหลอมละลายให้ความร้อนสูง ซึ่งจะทำให้เนื้อโลหะเดิมของวัสดุอ่อนตัวลง และส่งผลให้มีความแข็งแรงดิ่งน้อยลง สำหรับการเชื่อมเสียดทานเป็นกระบวนการเชื่อมในสภาวะของแข็ง ความร้อนที่ป้อนเข้าในกระบวนการจึงต่ำกว่าเทคนิคการเชื่อมในสภาวะหลอมละลาย วิธีนี้ช่วยลดการอ่อนตัวของเนื้อวัสดุเดิม และส่งผลให้มีความแข็งแรงดิ่งของรอยเชื่อมที่มากขึ้น (Jain *et al.*, 2015) แต่การเชื่อมเสียดทานแบบกวนกับงานท่อย่อมอาจเกิดปัญหาได้หลายประการ เช่น การสัมผัสของเครื่องมือที่น้อยลงเนื่องจากรูปทรงโค้งมน การจัดเตรียมสำหรับการจับยึดท่อ อุปกรณ์เสริมเพิ่มเติมเกี่ยวกับการเชื่อมท่อ เป็นต้น ใน

อดีตที่ผ่านมา มีนักวิจัยหลายท่านพยายามเชื่อมโครงสร้างท่อด้วยกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวน เช่น การศึกษาของ (Lammlein *et al.*, 2012) การเชื่อมเสียดทานแบบกวนของท่อวัสดุอลูมิเนียมเกรด AA6061 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 107 มิลลิเมตร ความหนา 5.1 มิลลิเมตรมีประสิทธิภาพการเชื่อมสูงสุด 70% ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 1,600 รอบต่อนาทีและความเร็วเดินเชื่อม 355 มิลลิเมตรต่อนาที และโครงสร้างทางโลหะวิทยาของรอยเชื่อมยืนยันว่าไม่พบข้อบกพร่องในรอยเชื่อม จากนั้น (Chen *et al.*, 2015) ในการศึกษาการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของท่ออลูมิเนียมร่วมกับท่อทองแดงที่มีความหนา 1.5 และ 1 มิลลิเมตร ผลการศึกษาด้านการทดสอบความแข็งแรงดิ่งและความแข็งแรง พบว่าความแข็งแรงดิ่งไม่มีรอยเชื่อมใดแตกหักจากข้อต่อรอยเชื่อมระหว่างวัสดุ Al-Cu ผลไปในทิศทางเดียวกันกับ (Hattingh *et al.*, 2016) ในการศึกษาการเชื่อมเสียดทานแบบกวนท่อ AA6082 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 38 มิลลิเมตร จากผลงานวิจัยพบว่าการเชื่อมเสียดทานแบบกวน จำนวน 2 รอบ ไม่มีข้อบกพร่องของรอยเชื่อมเมื่อเปรียบเทียบกับ การเชื่อมแบบรอบเดียว นอกจากนี้ยังได้ออกแบบเครื่องมือเชื่อมที่หัวพินสามารถยึดและหดได้เพื่อขจัดรูทางออกที่ส่วนปลายของท่ออีกด้วย นอกจากนี้ (Ismail *et al.*, 2016) ในการศึกษาอิทธิพลของความร้อนที่มีต่อความแข็งแรงระหว่างการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของท่อ พบว่าค่าความแข็งแรงของรอยเชื่อมจะอ่อนตัวลงมากขึ้นเมื่อใกล้กับบริเวณหัวพินของเครื่องมือเชื่อม และ (Jamshidi & Falahati, 2017) ในการศึกษาการเชื่อมเสียดทานแบบกวนท่อในรูปแบบเชื่อมซ้อนทับ 2 ชั้น โดยใช้เครื่องมือเชื่อมหัวพินรูปสามเหลี่ยมทรงกรวยสำหรับการเชื่อม ผลการ

วิจัยพบว่า ไม่พบข้อบกพร่องในรอยเชื่อม เมื่อใช้ความเร็วเดินเชื่อม 40 มิลลิเมตรต่อนาที และความเร็วหมุนเชื่อม 600 และ 800 รอบต่อนาที จากผลงานวิจัยที่นำเสนอข้างต้น พบว่า การออกแบบเทคนิคการเชื่อมเสียดทานแบบกวนของการเชื่อมท่อร่วมด้วยเครื่องกัดแนวตั้งยังไม่มีความก้าวหน้าได้ศึกษาก่อน ประกอบกับการเลือกใช้วัสดุที่แตกต่างกัน ปัจจัยที่แตกต่างกัน ซึ่งเป็นจุดที่น่าสนใจในงานวิจัยครั้งนี้

อย่างไรก็ตาม ในกรณีของงานโครงสร้างแบบท่อมีการใช้งานกันอย่างแพร่หลายในการออกแบบตัวถังรถยนต์ที่ใช้เทคนิคการเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยเฉพาะความท้าทายในการเชื่อมท่อสำหรับความหนาของผนังท่อที่มีความบาง และความลึกของร่องมือเชื่อมที่ตกลงไปในเนื้อผนังของท่อ และวัสดุรองรับในระหว่างการเชื่อม และยังรวมถึงอุปกรณ์ที่ช่วยในการเชื่อมท่อให้มีประสิทธิภาพดีขึ้น เพื่อแก้ไขปัญหาจากการเชื่อมเสียดทานแบบกวนงานท่อดังกล่าวบทความนี้ นำเสนอถึงการออกแบบ พัฒนา และสร้างอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนวัสดุงานท่ออลูมิเนียมสำหรับกระบวนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนอลูมิเนียมผสม 6063-T6 ที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางภายนอก 50.8 มิลลิเมตร และความหนาของท่อ 6 มิลลิเมตร โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างอุปกรณ์สำหรับการเชื่อมเสียดทานแบบกวนสำหรับงานท่อ และทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนทรงกระบอก ที่จะช่วยแก้ไขปัญหาในการเชื่อมท่อได้ และทำให้รอยเชื่อมมีคุณภาพที่สูงขึ้น

วิธีการวิจัย

อุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนวัสดุงานท่อ
 อุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนวัสดุงานท่อส่งกำลังกับมอเตอร์ประยุกต์ใช้ร่วมกับหัวแบ่งการจับยึดท่อสามารถควบคุมปัจจัยในการเชื่อม คือ ความเร็วเดินเชื่อม (มิลลิเมตรต่อนาที) และเครื่องกัดแนวตั้งสำหรับการจัดวางอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนวัสดุงานท่อบนโต๊ะงานสามารถควบคุมปัจจัยในการเชื่อม คือ ความเร็วหมุนเชื่อม (รอบต่อนาที) โดยมีลักษณะและรายละเอียดอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนวัสดุงานท่อ ดังนี้

1. ขนาดของอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนวัสดุงานท่อ ความกว้าง x ความยาว x ความสูง (189 x 149 x 173 มิลลิเมตร) น้ำหนัก 22 กิโลกรัม ระยะฐานถึงจุดกึ่งกลางหัวจับ 125 มิลลิเมตร สามารถปรับองศาได้ตั้งแต่ -10 ถึง 90 องศา

2. ขนาดของวัสดุที่ใช้ในการเชื่อม สามารถจับชิ้นงานท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ตั้งแต่ 10 - 152 มิลลิเมตร

3. ความเร็วเดินเชื่อม ปรับระดับได้ตั้งแต่ 0 - 3.5 มิลลิเมตรต่อนาที

4. มอเตอร์เกียร์ SUNTECH ชนิด : ไฟ 1 เฟส 220 โวลต์ขนาด 1 แรงม้า โดยในการจัดวางมอเตอร์และอินเวอร์เตอร์จัดให้อยู่ใกล้กัน เป็นโซนในการควบคุมและปรับความเร็วรอบให้หมุนอัตโนมัติในการเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยความเร็วรอบของมอเตอร์ มีความเร็วรอบสูงสุด 1420 รอบต่อนาที และสามารถส่งกำลังไปยังหัวแบ่งได้ ตามลำดับดังนี้ (1) มอเตอร์ อัตราทด 1 : 1 (2) เกียร์ทดรอบ อัตราทด 10 : 1 และ (3) หัวแบ่ง อัตราทด 40 : 1 ในส่วนของอินเวอร์เตอร์สามารถปรับความเร็วรอบของมอเตอร์ได้น้อยที่สุด 3 รอบต่อนาที ถึงมากที่สุด 1420 รอบต่อนาทีได้ โดยอินเวอร์เตอร์จะเพิ่มขึ้นครั้งละ 3 รอบต่อนาที (Figure 1)

อุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนวัสดุงานท่อได้นำส่วนประกอบต่าง ๆ มาประยุกต์ใช้ในการเชื่อมเสียดทานแบบกวนงานท่อ โดยติดตั้งอินเวอร์เตอร์ (หมายเลข 1) เข้ากับมอเตอร์ในการปรับความเร็วให้หัวแบ่งหมุนอัตโนมัติ มีชุดจับยึดชิ้นงานท่อ (หมายเลข 2) และสามารถปรับความเร็วรอบในการหมุนของชิ้นงานท่อได้ การติดตั้งอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนวัสดุงานท่อบนโต๊ะงานของเครื่องกัดแนวตั้ง ในขณะที่ดำเนินการเชื่อมเสียดทานแบบกวนงานท่อจะมีชุดรองรับ (หมายเลข 3) เพื่อรับแรงกดในขณะที่เชื่อมชิ้นงาน และยื่นศูนย์ท้ายแทน (หมายเลข 4) ขณะจับยึดอลูมิเนียมในขณะที่เชื่อมชิ้นงาน (วรพงศ์ บุญช่วยแทน, 2567) (Figure 2)

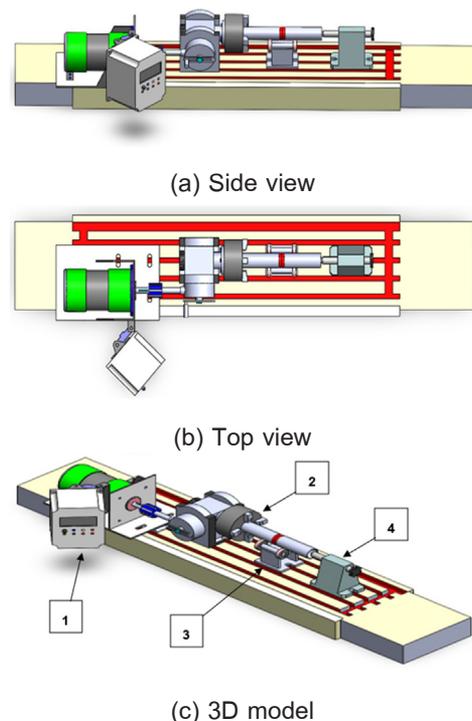


Figure 1 Schematic of friction stir welding machine for aluminum pipe work



Figure 2 Friction stir welding machine for aluminum pipe work

ขั้นตอนการเชื่อมเสียดทานแบบกวนงานท่อ

การทดสอบประสิทธิภาพของอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนวัสดุงานท่อ จะใช้วัสดุท่ออลูมิเนียมเกรด 6063 มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางนอก 50.80 มิลลิเมตร และขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางใน 38.80 มิลลิเมตร ความหนาของท่อ 6 มิลลิเมตร ใช้ความเร็วหมุนเชื่อม 1 ระดับ คือ 710 รอบต่อนาที และความเร็วในการเดินเชื่อม 3 ระดับ คือ 1.5 2.5 และ 3.5 มิลลิเมตรต่อนาที

เครื่องมือเชื่อมเสียดทานแบบกวน ผลิตจากเหล็ก SKD11 หัวพินเป็นเกลียวหมุนขวา ระยะพิตซ์ 0.8 มิลลิเมตร ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 5 มิลลิเมตร ความยาวของหัวพิน 4.8 มิลลิเมตร และมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางของปากกวน 20 มิลลิเมตร (Figure 3)

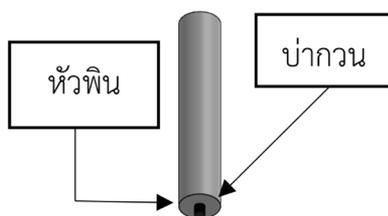


Figure 3 Welding tools

การปรับความเร็วหมุนเชื่อมและความเร็วเดินเชื่อม โดยความเร็วหมุนเชื่อมจะปรับระดับความเร็วหมุนเชื่อมได้ตรงตามบังคับของเครื่องกวดตั้งมีหน่วยเป็น รอบต่อนาที ส่วนความเร็วเดินเชื่อมจะปรับระดับความเร็วหมุนเชื่อมได้ที่ปุ่มหมุนปรับระดับความเร็วตรงแผงควบคุมของอินเวอร์เตอร์ และกดปุ่มเปิด-ปิด การหมุนอินเวอร์เตอร์ได้ที่แผงควบคุมเช่นเดียวกัน (Figure 4)



Figure 4 Adjusting welding rotation speed and welding travel speed

การเชื่อมเสียดทานแบบกวนแบบท่อ แสดงใน Figure 5 ในทุก ๆ สภาวะการทดลองประกอบด้วยขั้นตอนดังนี้ (ก) เปิดเครื่องกวดตั้งให้หัวพินหมุนตามเข็มนาฬิกา (ข) จากนั้นหัวพินสอดลงไปใ้เนื้อวัสดุ จนกระทั่งปลายของหัวพินสัมผัสกับวัสดุไปในระยะความลึกที่กำหนดเป็นระยะเวลา 30 วินาที เนื่องจากระยะเวลาที่กำหนดนั้น ทำให้อลูมิเนียมเกิดการอ่อนตัว และสามารถไหลวนรอบ ๆ หัวพินได้สะดวกก่อนทำการเดินแนวเชื่อมด้วยความเร็วเดินแนวเชื่อมที่กำหนด (ค) จากนั้นความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานระหว่างผิวหัวพินและปากของเครื่องมือจะทำให้เกิดความร้อนที่ทำให้วัสดุเกิดการอ่อนตัวและเกิดการเคลื่อนที่ไหลวนรอบ ๆ หัวพิน (ง) เดินเชื่อมตามความเร็วในการเดินแนวเชื่อมที่กำหนดในขั้นตอนนี้จะเกิดการรวมตัวของวัสดุ (จ) ทำให้เกิดรอยต่อขึ้น (ฉ) เมื่อสิ้นสุดการเชื่อมก่อนยกหัวพินออกจากรอยเชื่อม ก่อนทำการยกหัวพินควรให้การเสียดทานที่เกิดจากหัวพินคงที่ ณ ตำแหน่งสุดท้ายของการเชื่อมประมาณ 30 วินาที

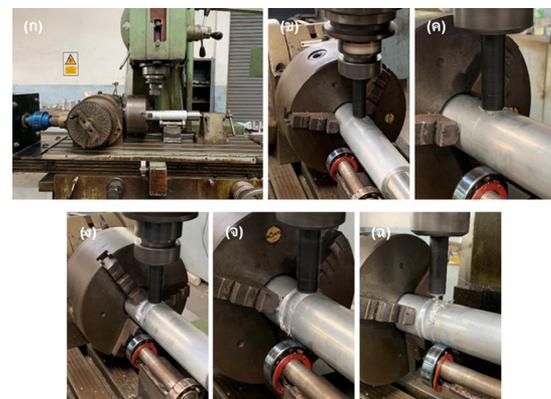


Figure 5 Friction stirring welding process for pipe

ขั้นตอนการเตรียมวัสดุเพื่อทดสอบโครงสร้างโลหะวิทยาและสมบัติเชิงกล

การเตรียมวัสดุเพื่อทดสอบโครงสร้างโลหะวิทยาและสมบัติเชิงกล เริ่มจากการนำชิ้นงานที่เชื่อมเสร็จแล้วนำมาตัดตามแนวขวางกับรอยเชื่อม แสดงใน Figure 6 โดยชิ้นงานส่วนที่เป็นส่วนจุดเริ่มต้น และจุดสิ้นสุดแนวเชื่อมจะเป็นส่วนที่ตัดทิ้งไป จากนั้นส่วนที่ติดกันจะเป็นชิ้นงานส่วนที่จะทำการตัด

เพื่อนำไปทำการทดสอบความแข็งและตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา และส่วนที่จะทำการตัดเพื่อนำไปทำการทดสอบความแข็งแรงอ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM-B557M แสดงใน Figure 7 ซึ่งในแต่ละปัจจัยการทดลองจะดำเนินการทดสอบ 6 ชิ้น



Figure 6 Layout and cutting of the workpiece

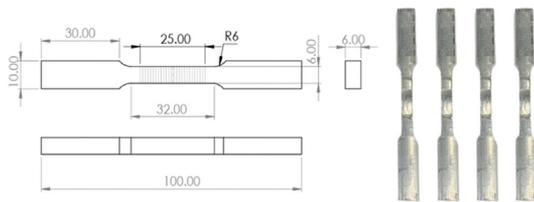


Figure 7 Tensile strength test pieces

การตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยา โดยชิ้นงานที่จะทดสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาจะนำไปผ่าครึ่งด้วยเลื่อยมือ พร้อมใช้น้ำหล่อเย็น จากนั้นนำไปหุ้มเรซินด้วยน้ำยาอีพอกซีเรซิน (Epoxy Resin) แล้วนำไปขัดด้วยกระดาษทรายเบอร์ 80 320 400 600 800 1,000 และ 1,500 ตามลำดับ แล้วขัดด้วยผ้าสักหลาดอีกครั้ง โดยใช้ผงอลูมินา ขนาด 5.0 3.0 และ 0.1 ไมโครเมตร ตามลำดับ เสร็จแล้วนำไปกัดด้วยกรดคิลเลอร์ (Keller etching) เป็นเวลา 10 วินาที แล้วนำไปตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาในระดับมหภาคและจุลภาค ด้วยกล้องจุลทรรศน์แสง ชิ้นงานที่ผ่านการหล่อเรซินเสร็จแล้วพร้อมนำส่งตรวจดูโครงสร้างมหภาคและโครงสร้างจุลภาคต่อไป (Figure 8)



Figure 8 Cross section specimen ready for inspection

การทดสอบความแข็งใช้ชิ้นงานที่ผ่านการตรวจสอบโครงสร้างทางโลหะวิทยาในระดับมหภาคและจุลภาคมาแล้วใช้ในการทดสอบ ด้วยเครื่องทดสอบความแข็งแบบวิกเกอร์ส (Vickers) กดบริเวณพื้นที่หน้าตัดของรอยเชื่อม ระยะห่างรอยกด 500 ไมโครเมตร แรงที่ใช้กด 100 กิโลกรัมแรง เป็นเวลา 10 วินาที ทั้งหมด 3 แถว แถวละ 16 จุด (Figure 9)

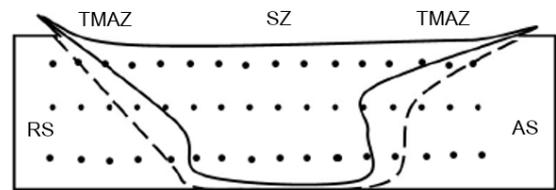


Figure 9 The weld surface area tested for hardness

ผลการทดลองและอภิปรายผล

ผลการทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนงานท่อ

จากการออกแบบและสร้างอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนงานท่อ ผู้วิจัยได้อธิบายส่วนที่เป็นองค์ประกอบหลักของอุปกรณ์เชื่อม โดยขึ้นส่วนที่สำคัญของเครื่องจักรออกเป็น 4 ส่วนหลักคือ ส่วนสำหรับควบคุมความเร็วเดินเชื่อม ส่วนหัวแบ่งติดตั้งเข้ากับโต๊ะงานเครื่องกัดแนวตั้ง ส่วนรองรับแรงกดงานเชื่อม และส่วนยื่นศูนย์ท้ายแทน ประกอบด้วยดังต่อไปนี้

ส่วนสำหรับควบคุมความเร็วเดินเชื่อม ขนาดฐานยึดมอเตอร์ของอุปกรณ์เชื่อม 300 x 450 มิลลิเมตร ความเร็วรอบมอเตอร์ปรับได้ตั้งแต่ 3 รอบต่อนาที ถึง 1420 รอบต่อนาที ซึ่งสามารถทดสอบความเร็วรอบได้เป็นความเร็วเดินเชื่อมตั้งแต่ 0 ถึง 3.5 มิลลิเมตรต่อนาที (Figure 10) ซึ่งสามารถสรุปค่าความเร็วรอบที่ใช้ได้ แสดงดัง Table 1



Figure 10 Layout of the welding speed control unit of the equipment

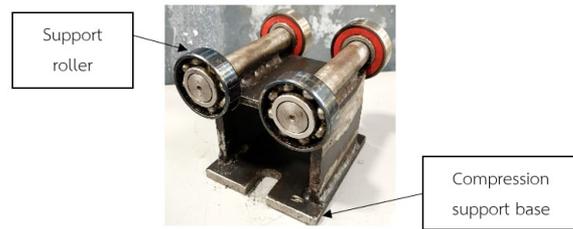
Table 1 Performance of friction welding equipment

No	Motor speed (rpm)	Welding speed (mm/min)
1	100	0.25
2	200	0.50
3	300	0.75
4	400	1.00
5	500	1.25
6	600	1.50
7	700	1.75
8	800	2.00
9	900	2.25
10	1000	2.50
11	1100	2.75
12	1200	3.00
13	1300	3.25
14	1400	3.50
15	1420	3.55

ส่วนหัวแบ่งติดตั้งเข้ากับโต๊ะงานเครื่องกัดแนวตั้ง ประสิทธิภาพของอุปกรณ์หัวแบ่ง ประยุกต์ใช้ในการเชื่อมเสียดทานวัสดุงานท่อ โดยจับหัวแบ่งหมุนอัตโนมัติของชิ้นงานเชื่อม สามารถจับชิ้นงานได้ทั้งเพลาดันและเพลากลวง ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางชิ้นงานสูงสุด 152 มิลลิเมตร สำหรับเพลาดัน ชิ้นงานสูงสุด 256 มิลลิเมตร สำหรับเพลากลวง ปรับองศาของหัวแบ่งได้ตั้งแต่ -10 ถึง 90 องศา (Figure 11)

**Figure 11** Equipment for holding pipe workpieces

ส่วนรองรับแรงกดงานเชื่อม เป็นส่วนที่ช่วยรองรับแรงกดจากเครื่องมือเชื่อมที่หมุนวนส่งกำลังมาจากเครื่องกัดแนวตั้งในขณะที่เชื่อมชิ้นงาน ลูกกลิ้งจะช่วยในการหมุนเคลื่อนที่ของชิ้นงานให้ได้จุดศูนย์กลางตลอดแนวเชื่อม โดยการออกแบบและสร้างให้สามารถรองรับวัสดุทรงกระบอกขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางตั้งแต่ 50.8 – 100 มิลลิเมตร (Figure 12)

**Figure 12** Support roller

ส่วนยื่นศูนย์ท้ายแทน ใช้ยื่นศูนย์ชิ้นงานเชื่อม โดยจับชิ้นงานด้วยสามจับพร้อมด้านหนึ่ง อีกด้านหนึ่งยื่นศูนย์ให้แน่นด้วยมือหมุนซึ่งสามารถหมุนปรับเลื่อนเข้าและออกได้ตามขนาดความยาวของชิ้นงานเชื่อม สามารถยื่นศูนย์ชิ้นงานได้ทั้งเพลาดันและเพลากลวง (Figure 13)

จุดเด่น สามารถใช้เชื่อมเสียดทานแบบกวนกับวัสดุทรงกระบอกที่ไม่ต้องใช้อุปกรณ์เสริมจำนวนมาก รองรับขนาดการเชื่อมท่อที่มีขนาดใหญ่ได้ ปรับรูปแบบการทดลองการเชื่อมไม่ว่าจะเป็น ขนาดของเครื่องมือเชื่อม ความเร็วหมุนเชื่อม ความเร็วเดินเชื่อม และขนาดของชิ้นงานเชื่อมได้ สามารถประยุกต์ใช้งานกับการเชื่อมท่อวัสดุอื่นได้ เช่น เหล็ก เหล็กกล้า ไร้สนิม เป็นต้น นอกจากนี้เป็นการประยุกต์ใช้เครื่องมือกลที่มีอยู่ภายในโรงงานมาใช้สำหรับงานเชื่อมเสียดทานแบบกวน โดยที่ไม่ต้องพึ่งเครื่องจักรกลขนาดใหญ่หรือเครื่องจักรเฉพาะ

จุดด้อย เมื่อมีการปรับลดขนาดของวัสดุที่จะเชื่อมจะต้องดำเนินการสร้างศูนย์ท้ายแทนที่มีขนาดที่เหมาะสมเพื่อให้สามารถยื่นศูนย์ได้ การปรับความเร็วรอบ และความเร็วเดินเชื่อมอยู่ในช่วงที่จำกัดตามข้อจำกัดของเครื่องกัดแนวตั้ง และมอเตอร์ที่ควบคุม นอกจากนี้เมื่อต้องการเชื่อมวัสดุที่มีขนาดความยาวมากขึ้นจนเกินขนาดของโต๊ะงานของเครื่องกัดแนวตั้ง อาจจะต้องออกแบบฟีกเจอร์จับยึดท่อใหม่ เพื่อให้สามารถจับยึดท่อให้มั่นคงและแข็งแรงมากขึ้นในขณะดำเนินการเชื่อมเสียดทานแบบกวน

**Figure 13** Center Head

ผลการทดสอบการเชื่อมเสียดทานแบบกวนด้วยอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนงานท่อ

ผลการทดสอบการเชื่อมเสียดทานแบบกวนด้วยอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบกวนงานท่ออลูมิเนียม 6063 ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 รอบต่อนาที และความเร็วหมุนเชื่อม 3 ระดับ คือ 1.5 2.5 และ 3.5 มิลลิเมตรต่อนาที

ผลการทดสอบและวิเคราะห์ผิวหน้าของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวนท่ออลูมิเนียม 6063 (Figure 14)

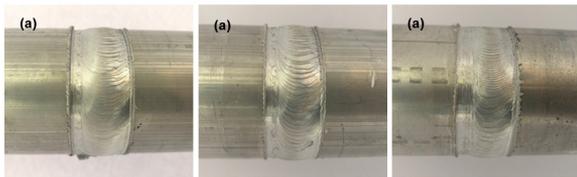


Figure 14 Surfaces of weld joints at welding speed of (a) 1.5 mm/min (b) 2.5 mm/min and (c) 3.5 mm/min

จาก Figure 14 ข้อสังเกตด้วยสายตาพบว่าความเร็วเดินเชื่อมที่ 1.5 และ 3.5 มิลลิเมตรต่อนาที เกิดครีบบนผิวแนวเชื่อมด้านรีทริทซิง (Retreating Side : RS) ทำให้ผิวแนวเชื่อมไม่สม่ำเสมอไม่สมบูรณ์ ความเร็วเดินเชื่อม 3.5 มิลลิเมตรต่อนาที รอยเชื่อมจะมีจุดบกพร่องบนแนวเชื่อมระหว่างรอยต่อของรอยเชื่อมทำให้รอยเชื่อมประสานกันไม่ดี และความเร็วเดินเชื่อม 2.5 มิลลิเมตรต่อนาที จะแตกต่างกับความเร็วเดินเชื่อมที่กล่าวข้างต้นผิวหน้าแนวเชื่อมจะมีความสมบูรณ์ที่ดีกว่าและไม่พบจุดบกพร่องใด ๆ ทำให้รอยเชื่อมประสานกันได้ดี สาเหตุที่เกิดจุดบกพร่องของรอยเชื่อมขึ้นอยู่กับปัจจัยในการเดินเชื่อม ความร้อนสะสมของวัสดุเชื่อม คืออุณหภูมิในการเชื่อม เช่นหากใช้ระดับความเร็วเดินเชื่อมเร็วจะมีข้อบกพร่องเป็นครีบบนผิวหน้าแนวเชื่อมไม่ประสานกัน หากใช้ระดับความเร็วเดินเข้าข้อบกพร่องที่เกิดบนผิวหน้ารอยเชื่อมน้อยกว่า

ผลการทดสอบและวิเคราะห์โครงสร้างมหภาคของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวนท่ออลูมิเนียม 6063 ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 รอบต่อนาที และความเร็วหมุนเชื่อม 3 ระดับ คือ 1.5 2.5 และ 3.5 มิลลิเมตรต่อนาที (Figure 15)

จาก Figure 15 พบว่า ทุกสภาวะมีข้อบกพร่องแบบโพรง (Cavity) ในบริเวณของแนวกวน (SZ) และเมื่อยิ่งเพิ่มความเร็วเดินเชื่อมมากขึ้นขนาดของโพรงก็จะมีขนาดกว้างมากขึ้น ซึ่งเป็นอิทธิพลมาจากความเร็วเดินเชื่อม นอกจากนี้ในบริเวณแนวกวน (SZ) ยังพบรูพรุนขนาดเล็ก และรอยแตก ร้าวเล็ก ๆ กระจุกกระจายทั่วบริเวณ ส่วนบริเวณที่ได้รับผลกระทบความร้อน (TMAZ) ไม่พบข้อบกพร่องใด ๆ ในบริเวณดังกล่าว ในทุกสภาวะการทดลอง สอดคล้องกับ ธีรภัทร ยามานนท์ (2558) ซึ่งพบว่า จุดบกพร่องในรอยเชื่อมที่เพิ่มมากขึ้นเป็นผลมาจากอิทธิพลมาจากความเร็วเดินเชื่อม ที่สะสมความร้อนจากการเสียดทานในรอยเชื่อมไม่มากพอที่จะทำให้วัสดุทั้งสองชิ้นเกิดสภาวะพลาสติก (Plastic Deformation) โดยที่การแก้ไขปัญหาของการเกิดโพรงในครั้งนี้ ต้องดำเนินการเพิ่มความเร็วหมุนเชื่อมให้มีค่ามากขึ้น ในขณะที่เดียวกันต้องลดความเร็วเดินเชื่อมให้น้อยลง เพื่อให้เกิดการเสียดทานในระดับที่พอเหมาะทำให้วัสดุทั้งสองชิ้นเกิดการประสานกัน

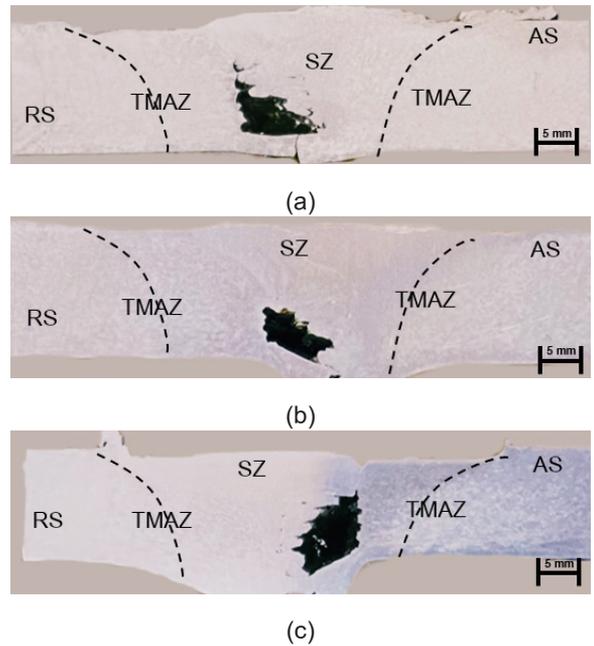


Figure 15 Macrostructures of weld joints at welding speed (a) 1.5 mm/min (b) 2.5 mm/min and (c) 3.5 mm/min

ผลการทดสอบและวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของรอยเชื่อมเสียดทานแบบกวนท่ออลูมิเนียม 6063 (Figure 16)

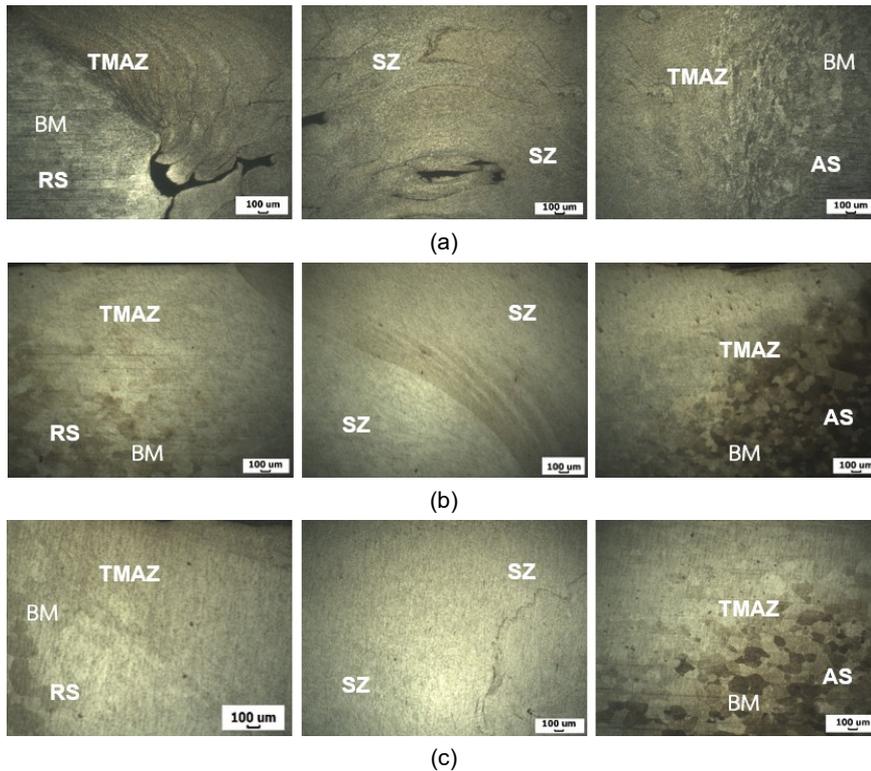


Figure 16 Microstructures of weld joints at welding speed (a) 1.5 mm/min, (b) 2.5 mm/min and (c) 3.5 mm/min

จาก Figure 16 พบว่า โครงสร้างบริเวณแนวแกน (SZ) มีลักษณะเป็นเกรนที่ละเอียดมากกว่าเมื่อเทียบกับเกรนในบริเวณบริเวณที่ได้รับผลกระทบความร้อน (TMAZ) ทั้ง 3 ปัจจัยความเร็วเดินเชื่อม นอกจากนี้ยังสังเกตได้ว่าบริเวณแนวแกน (SZ) เกรนจะมีความซับซ้อน โดยที่ความซับซ้อนของเกรน คือ รูปร่างของเกรนบิดเบี้ยว มีรูปร่างที่ไม่สามารถระบุรูปร่างที่แน่นอนได้ มีหลายรูปร่างปะปนกันอยู่ทั่วบริเวณแนวแกน (SZ) ต่อเนื่องไปยังบริเวณที่ได้รับผลกระทบความร้อน (TMAZ) และพบจุดบกพร่องในบริเวณแนวแกน (SZ) ส่วนบริเวณที่ได้รับผลกระทบความร้อน (TMAZ) ด้าน Retreating Side : (RS) จะมีรูปร่างเกรนที่บิดเบี้ยวไม่เป็นรูปทรงคล้าย ๆ กับด้าน Advancing Side : (AS) แต่เมื่อเทียบกันจะพบว่าด้าน Retreating Side : (RS) มีรูปร่างของเกรนที่บิดเบี้ยวมากกว่า ซึ่งโครงสร้างของเกรนที่เกิดการบิดเบี้ยวนี้เกิดจากผลของการหมุนของหัวพินที่ส่งผลกระทบโดยตรงสู่การแพร่กระจายของความร้อนที่เกิดจากการเสียดทานในเนื้อชิ้นงาน สอดคล้องกันกับ ชีริกัทร์ ยามานนท์ (2558) โดยที่เกรนบิดเบี้ยวเสีรูปร่างจากการกวนของเครื่องมือเชื่อมเมื่อเทียบกับเนื้อวัสดุอะลูมิเนียม

ผลการทดสอบและวิเคราะห์ค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อม พบว่า ที่สภาวะการเชื่อมเสียดทานแบบกวนที่ใช้ความเร็วหมุนเชื่อมที่ 710 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อมที่

2.5 มิลลิเมตรต่อนาที มีค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยมากที่สุด คือ 149.65 MPa ส่วนความแข็งแรงดึงเฉลี่ยต่ำที่สุด คือ 144.75 MPa ที่ความเร็วเดินเชื่อมที่ 3.5 มิลลิเมตรต่อนาที (Figure 17) ทั้งนี้จุดที่เกิดการแตกหักจากการทดสอบ พบว่า จะแตกหักบริเวณแนวแกนซึ่งเป็นบริเวณที่พบข้อบกพร่องในรอยเชื่อม

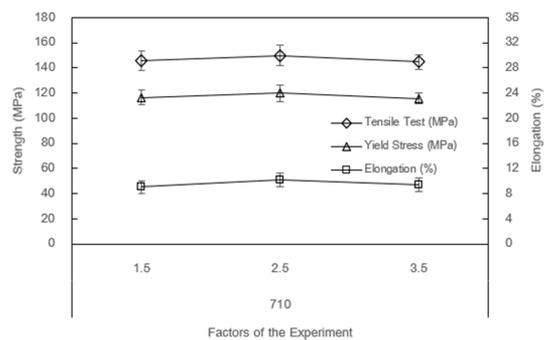


Figure 17 Tensile strength of weld joint

เมื่อวิเคราะห์ค่าประสิทธิภาพรอยเชื่อม โดยการนำผลค่าความแข็งแรงดึงของรอยเชื่อมมาเปรียบเทียบกับค่าความแข็งแรงดึงของเนื้อวัสดุเดิม โดยที่ค่าความแข็งแรงดึงของเนื้อวัสดุเดิม เท่ากับ 225 MPa พบว่า มีค่าประสิทธิภาพรอยเชื่อมเฉลี่ยทั้ง 3 ปัจจัย ไม่เกิน 65 เปอร์เซ็นต์ โดยที่

ความเร็วหมุนเชื่อมที่ 710 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อมที่ 2.5 มิลลิเมตรต่อนาที มีค่าประสิทธิภาพรอยเชื่อม มากที่สุด คือ 66.51 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งมีผลไปในทิศทางเดียวกันกับ (Doos & Abdul Wahab, 2012) ซึ่งมีค่าประสิทธิภาพแนวเชื่อมเฉลี่ยไม่เกิน 62 เปอร์เซ็นต์เนื่องจากพบข้อบกพร่องกระจายทั่วบริเวณแนวทวน

ผลการทดสอบและวิเคราะห์ค่าความแข็งของรอยเชื่อม ที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 รอบต่อนาที (Figure 18) พบว่า ค่าความแข็งของชิ้นทดสอบที่ความเร็วในการเดินเชื่อมที่ 2.5 มิลลิเมตรต่อนาที มีค่าความแข็งสูงสุดในบริเวณที่แนวทวน (Stir Zone : SZ) ซึ่งมีความแข็งเท่ากับ 52.9 HV และชิ้นทดสอบที่มีค่าความแข็งน้อยที่สุด ที่ความเร็วเดินเชื่อม 3.5 มิลลิเมตรต่อนาที มีความแข็งเท่ากับ 42.9 HV

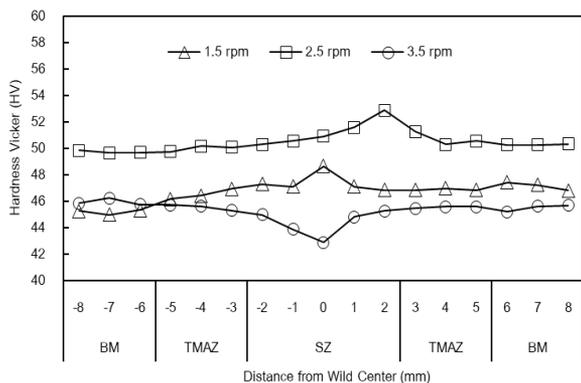


Figure 18 Hardness test of weld joint

สรุปผลการวิจัย

อุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบทวนงานท่อ ส่งกำลังกับมอเตอร์ประยุกต์ใช้ร่วมกับหัวแบ่งการจับยึดท่อ สามารถควบคุมปัจจัยในการเชื่อม คือ ความเร็วเดินเชื่อม (มิลลิเมตรต่อนาที) และเครื่องกัดแนวตั้งสำหรับการจัดวางอุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบทวนวัสดุงานท่อบนโต๊ะงาน สามารถควบคุมปัจจัยในการเชื่อม คือ ความเร็วหมุนเชื่อม (รอบต่อนาที) โดยชิ้นส่วนที่สำคัญของเครื่องจักรออกเป็น 4 ส่วนหลัก คือ ส่วนสำหรับควบคุมความเร็วเดินเชื่อม ส่วนหัวแบ่งติดตั้งเข้ากับโต๊ะงานเครื่องกัดแนวตั้ง ส่วนรองรับแรงกดงานเชื่อม และส่วนยื่นศูนย์ท้ายแทน

อุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบทวนงานท่อ สามารถเชื่อมชิ้นงานท่อที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ตั้งแต่ 10 - 152 มิลลิเมตร และมีความเร็วเดินเชื่อมที่ปรับระดับได้ตั้งแต่ 0 - 3.5 มิลลิเมตรต่อนาที

ทุกสภาวะการทดลองพบข้อบกพร่องแบบโพรง (Cavity) ในบริเวณของแนวทวน (SZ) และเมื่อยิ่งเพิ่มความเร็วเดินเชื่อมมากขึ้นขนาดของโพรงก็จะมีขนาดกว้างมากขึ้น ซึ่งเป็นอิทธิพลมาจากความเร็วเดินเชื่อม

สภาวะการเชื่อมเสียดทานแบบทวนที่ใช้ความเร็วหมุนเชื่อมที่ 710 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อมที่ 2.5 มิลลิเมตรต่อนาที มีค่าความแข็งแรงดึงเฉลี่ยมากที่สุด คือ 149.65 MPa

ความแข็งของรอยเชื่อมที่ความเร็วหมุนเชื่อม 710 รอบต่อนาที ความเร็วเดินเชื่อม 2.5 มิลลิเมตรต่อนาที มีค่าความแข็งสูงสุดในบริเวณที่แนวทวน (Stir Zone : SZ) ซึ่งมีความแข็งเท่ากับ 52.9 HV

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการจัดสรรจัดงบประมาณผ่านกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) ประจำปี พ.ศ. 2567 ภายใต้แผนงานยุทธศาสตร์ การวิจัยและพัฒนานวัตกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

เอกสารอ้างอิง

- ธีรภัทร์ ยามานนท์. (2558). ปัจจัยความเร็วรอบและความเร็ว การเดินเชื่อมของโลหะอลูมิเนียมผสม 6061-T6 ในการเชื่อมแบบหมุนเสียดทาน [วิทยานิพนธ์ปริญญาวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์]. TU Digital Collections. <https://10.14457/TU.the.2015.1309>
- วรพงศ์ บุญช่วยแทน. (2567). อุปกรณ์การเชื่อมเสียดทานแบบทวนวัสดุงานท่อ (คำขออนุญาตสิทธิบัตร เลขที่ 2403001645). กรมทรัพย์สินทางปัญญา.
- Chen, B., Chen, K., Hao, W., Liang, Z., Yao, J., Zhang, L., & Shan, A. (2015). Friction stir welding of small-dimension Al3003 and pure Cu pipes. *Journal of Materials Processing Technology*, 223, 48–57. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2015.03.044>
- Doos, Q. M., & Abdul Wahab, B. (2012). Experimental study of friction stir welding of 6061-T6 aluminum pipe. *International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research*, 1(3), 143–156. <https://www.ijmerr.com/show-121-276-1.html>
- Hattingh, D. G., Von Welligh, L. G., Bernard, D., Susmel, L., Tovo, R., & James, M. N. (2016). Semiautomatic friction stir welding of 38 mm OD 6082-T6 aluminium tubes. *Journal of Materials Processing Technology*, 238, 255–266. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2016.07.027>
- Ismail, A., Awang, M., Samsudin, H. S., Rojan, A. M., & Jasri, M. (2016). *The hardness variation due to secondary*

heating in friction stir welding of small diameter aluminum alloy 6063 pipe. In J. P. Davim (Ed.), *Machining, joining and modifications of advanced materials* (pp. 143–152). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-981-10-1082-8_13

Jain, R., Kumari, K., Kesharwani, R. K., Kumar, S., Pal, S. K., Singh, S. B., Panda, S. K., & Samantaray, A. K. (2015). *Friction stir welding: Scope and recent development*. In J. P. Davim (Ed.), *Modern manufacturing engineering* (pp. 145–171). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-20152-8_6

Jamshidi, A. H., & Falahati, N. M. (2017). Orbital friction stir lap welding in tubular parts of aluminium alloy AA5083. *Science and Technology of Welding and Joining*, 22(7), 562–572. <https://doi.org/10.1080/13621718.2016.1275099>

Lammlein, D. H., Gibson, B. T., DeLapp, D. R., Cox, C., Strauss, A. M., & Cook, G. E. (2012). The friction stir welding of small-diameter pipe: An experimental and numerical proof of concept for automation and manufacturing. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture*, 226(3), 383–398. <https://doi.org/10.1177/0954405411402767>

Na, S. J., & Lee, H. J. (1996). A study on parameter optimization in the circumferential GTA welding of aluminium pipes using a semi-analytical finite-element method. *Journal of Materials Processing Technology*, 92–93, 405–409. [https://doi.org/10.1016/0924-0136\(95\)02052-7](https://doi.org/10.1016/0924-0136(95)02052-7)

Suresh, G., Suman, K. D., Acharyya, S. K., & Sanyal, D. (2023). Friction stir welding of industrial grade AISI 316L and P91 steel pipes: A comparative investigation based on mechanical and metallurgical properties. *International Journal of Pressure Vessels and Piping*, 201, Article 104865. <https://doi.org/10.1016/j.ijpvp.2022.104865>

การออกแบบ ประเมินสมรรถนะ และ ความเหมาะสมทางเศรษฐศาสตร์ ของเครื่องสับกระถิน สำหรับใช้เป็นอาหารของโคเนื้อ

Design, performance evaluation, and economic feasibility of a river tamarind (*Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit) shredder for use as cattle feed

ณัฐวุฒิ พลศรี^{1*}, พิศาล สมบัติวงศ์² และ กนกกาญจน์ จิรศิริเลิศ³

Natawut Ponsri¹, Pisarn Sombatwong² and Ganokgarn Jirasirilerd³

Received: 11 July 2024 ; Revised: 10 September 2024 ; Accepted: 21 October 2024

บทคัดย่อ

การใช้แรงงานคนในการสับกระถินสำหรับเตรียมอาหารสัตว์ โดยเฉพาะโคเนื้อ ยังคงเป็นกระบวนการที่ใช้เวลานานและไม่ประหยัดต้นทุน อีกทั้งยังอาจส่งผลกระทบต่อความสม่ำเสมอของขนาดกระถิน ซึ่งมีผลกระทบต่อประสิทธิภาพในการย่อยอาหารของโคเนื้อ ด้วยเหตุนี้ งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องสับย่อยกระถินสำหรับเป็นอาหารโคเนื้อ ประเมินสมรรถนะการสับย่อยกระถิน และศึกษาระยะเวลาคืนทุนของเครื่องสับย่อย การวิจัยได้ทำการออกแบบเครื่องสับย่อยกระถินที่ติดตั้งมอเตอร์ขนาด 2 แรงม้า ใช้ใบมีดสับจำนวน 3 ใบ จากนั้นทำการทดสอบเพื่อประเมินประสิทธิภาพในการสับย่อยกระถินด้วยการวัดระยะเวลาในการสับย่อย 2 กิโลกรัม และเปรียบเทียบกับวิธีการสับย่อยด้วยการสับด้วยแรงงานคน ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าเครื่องสับกระถินที่พัฒนาขึ้นสามารถลดเวลาการทำงานได้ถึง 94% เมื่อเทียบกับการใช้แรงงานคน โดยเครื่องใช้เวลาเฉลี่ยเพียง 61 วินาทีในการสับย่อยกระถิน 2 กิโลกรัม ในขณะที่แรงงานคนใช้เวลาเฉลี่ย 952 วินาที นอกจากนี้ กระถินที่สับด้วยเครื่องมีความละเอียดและสม่ำเสมอกว่ากระถินที่สับด้วยแรงงานคน ซึ่งส่งผลดีต่อกระบวนการย่อยอาหารของโคเนื้อ จากการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์พบว่า เครื่องสับกระถินสามารถคืนทุนได้ภายในระยะเวลา 42 วัน เมื่อใช้เลี้ยงโคเนื้อจำนวน 7 ตัว ทั้งนี้ระยะเวลาคืนทุนจะสั้นลงเมื่อเลี้ยงโคเนื้อจำนวนมากขึ้น ดังนั้นเครื่องสับกระถินนี้จึงเป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการเพิ่มความสะดวกในการทำงานของเกษตรกร ลดต้นทุนการผลิตอาหารสัตว์ และสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้อย่างมีประสิทธิภาพในฟาร์มปศุสัตว์ขนาดกลางถึงใหญ่

คำสำคัญ: กระถิน, เครื่องสับ, โคเนื้อ

Abstract

Manual labor for chopping *Leucaena* to prepare animal feed, particularly for beef cattle, remains a time-consuming and inefficient process. Moreover, it can affect the consistency of *Leucaena* size, which impacts the digestion efficiency of beef cattle. Therefore, this research aims to design and build a *Leucaena* shredding machine for beef cattle feed, evaluate its performance, and study the payback period of the shredder. The study designed a *Leucaena* shredder equipped with a 2-horsepower motor and three shredding blades. The machine was tested to assess its performance by measuring the time taken to shred 2 kilograms of *Leucaena* and comparing the results with manual shredding. The results showed that the developed *Leucaena* shredder reduced working time by 94% compared to manual labor, with the machine taking an average of 61 seconds to shred 2 kilograms of *Leucaena*, while manual

^{1,3} ผู้ช่วยศาสตราจารย์, สาขาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมและสิ่งแวดล้อม คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ

² อาจารย์ สาขาวิศวกรรมการจัดการอุตสาหกรรมและสิ่งแวดล้อม คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ

^{1,3} Assistant Professor, Department of Industrial and Environmental Management Engineering, Faculty of Liberal Arts and Sciences, Sisaket Rajabhat University

² Lecturer, Department of Industrial and Environmental Management Engineering, Faculty of Liberal Arts and Sciences, Sisaket Rajabhat University

* Corresponding author: E-mail: natawut.p@sskru.ac.th

labor took an average of 952 seconds. Additionally, the *Leucaena* shredded by the machine was finer and more uniform than that shredded by hand, which positively affects the digestion process in beef cattle. Economic analysis revealed that the *Leucaena* shredder could achieve a payback period within 42 days when used for feeding seven beef cattle, and the payback period shortens with an increased number of cattle. Therefore, this *Leucaena* shredder is an efficient tool for improving farmers' convenience, reducing animal feed production costs, and being effectively utilized in medium to large-sized livestock farms.

Keywords: *Leucaena*, shredder, beef cattle

บทนำ

การเลี้ยงโคเนื้อเป็นกิจกรรมทางการเกษตรที่สำคัญและแพร่หลายในประเทศไทย โดยมีโคเนื้อทั้งหมดประมาณ 9.9 ล้านตัว ซึ่งกระจายอยู่ในแต่ละภูมิภาค ได้แก่ ภาคเหนือ 1.5 ล้านตัว ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ 5.5 ล้านตัว ภาคกลาง 1.7 ล้านตัว และภาคใต้ 1.2 ล้านตัว โดยจังหวัดที่มีการเลี้ยงโคเนื้อมากที่สุด ได้แก่ สุรินทร์ นครราชสีมา อุบลราชธานี บุรีรัมย์ และศรีสะเกษ (ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร กรมปศุสัตว์, 2567) ซึ่งปัจจัยที่ทำให้การเลี้ยงโคเนื้อได้รับความนิยมเกิดจากสภาพภูมิประเทศและภูมิอากาศที่เหมาะสม รวมถึงความต้องการบริโภคเนื้อโคคุณภาพสูงที่เพิ่มขึ้นทั้งในและต่างประเทศ

ปัจจุบันการใช้พืชกระถิน (*Leucaena leucocephala*) ในการเลี้ยงโคเนื้อกำลังได้รับความสนใจอย่างมาก เนื่องจากกระถินเป็นพืชตระกูลถั่วที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูง โดยเฉพาะโปรตีนในใบและกิ่งอ่อน และสามารถให้ผลผลิตได้ตลอดทั้งปี (สุวิช บุญโปร่ง, 2558) อย่างไรก็ตาม การใช้กิ่งอ่อนของกระถินเป็นอาหารสัตว์ยังคงมีข้อจำกัด เนื่องจากต้องมีการลดขนาดหรือสับให้เหมาะสมกับการบริโภคของสัตว์ ซึ่งเป็นกระบวนการที่ใช้เวลาและแรงงานมาก (Kumar & Kumar, 2015)

เพื่อแก้ไขปัญหาดังกล่าว การวิจัยหลายชิ้นได้มุ่งพัฒนาเครื่องสับย่อยที่มีประสิทธิภาพสูงเพื่อลดภาระงานของเกษตรกร (Lomchangkum *et al.*, 2024) เครื่องสับย่อยที่จำหน่ายในตลาดมีรูปแบบหลากหลาย ออกแบบมาเพื่อการใช้งานทั่วไปในภาคเกษตรกรรม แต่ไม่ตอบสนองความต้องการเฉพาะ เช่น การสับย่อยกระถินซึ่งมีเนื้อไม้กึ่งแข็งและมีลักษณะเฉพาะที่แตกต่างจากวัสดุอื่น ๆ

ดังนั้น การวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นการออกแบบและสร้างเครื่องสับย่อยกระถินที่ปรับแต่งเพื่อให้เหมาะสมกับการสับย่อยพืชชนิดนี้โดยเฉพาะ ซึ่งจะช่วยให้ประสิทธิภาพในการสับวัสดุให้ได้ขนาดที่เหมาะสมและสม่ำเสมอ อีกทั้งเครื่องที่พัฒนายังใช้มอเตอร์ขนาดเล็กที่ออกแบบมาเพื่อเพิ่มความคุ้มค่าในการใช้งานในฟาร์มขนาดเล็ก ลดต้นทุนการบำรุงรักษาและการดำเนินงานเมื่อเทียบกับเครื่องที่มีจำหน่ายทั่วไป

การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์หลักเพื่อออกแบบและสร้างเครื่องสับย่อยกระถินที่มีประสิทธิภาพ ประเมินสมรรถนะการสับกระถินสำหรับใช้เป็นอาหารโคเนื้อ และศึกษาระยะเวลาดำเนินการของเครื่องสับย่อยกระถิน การพัฒนาเครื่องสับย่อยนี้มีเป้าหมายไม่เพียงแต่ช่วยลดภาระงานของเกษตรกรเท่านั้น แต่ยังมุ่งเสริมสร้างประสิทธิภาพในการเลี้ยงโคเนื้อ และสนับสนุนอุตสาหกรรมเกษตรในประเทศไทยให้เติบโตอย่างยั่งยืน

วัตถุประสงค์ และทฤษฎี ที่เกี่ยวข้อง

1. ต้นกระถิน (แหล่งที่มาและลักษณะของกระถิน)

กระถิน (*Leucaena*) ดัง Figure 1 จัดเป็นได้ทั้งพืชผัก สมุนไพร และไม้เศรษฐกิจ เนื่องจากสามารถนำส่วนของยอด ดอก และฝักมารับประทานเป็นอาหาร ใช้ในด้านสมุนไพร ใช้เป็นส่วนผสมอาหารสัตว์ ซึ่งในการให้อาหารโคเนื้อที่มีขนาด 500 กิโลกรัม หากใช้กระถินเป็นอาหารจะมีสูตรเบื้องต้นดัง Table 1

Table 1 Feeding Beef Cattle (Weight 500 kg) (สุวิช บุญโปร่ง, 2558)

Type of Food	kg/day	Main Nutrients
Fresh <i>Leucaena</i>	10	Protein, Fiber
Ground Corn	3	Energy
Soybean Meal	1	Protein
Hay	2	Fiber, Energy
Mineral Supplements	0.5	Vitamins, Minerals
Clean Water	Always Available	-



Figure 1 Characteristics of *Leucaena* and *Leucaena* Weight Measurement

ในส่วนของเนื้อไม้กระถินสามารถนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตกระดากในอุตสาหกรรม ไม้ใช้สอย และใช้เป็นเชื้อเพลิง โดยมีข้อมูลทางกายภาพและทางกลเบื้องต้นดัง Table 2

Table 2 Conditions and Shear Strength of *Leucaena leucocephala* (บุญส่ง สมเพาะ และคณะ, 2555)

Species	conditions	Shear Strength (MPa)
Leucaena	air dry	16.6
	green	12.3

2. การสร้างเครื่องสับ

การออกแบบเครื่องสับต้นกระถิน มีสมการที่เกี่ยวข้อง คือ การคำนวณแรงเฉือนที่ต้องใช้ (Shear Force) ดังสมการ (1) โดยคำนวณจากพื้นที่หน้าตัดและค่าต้านทานแรงเฉือนของต้นกระถิน (Figure 2) การคำนวณแรงบิดที่ใช้ในการสับดังสมการ (2) การคำนวณกำลังที่ต้องการดังสมการ (3) และคำนวณกำลังที่ต้องใช้จากสมการ (4) เพื่อหาขนาดมอเตอร์ที่เหมาะสม(Norton, 2010)

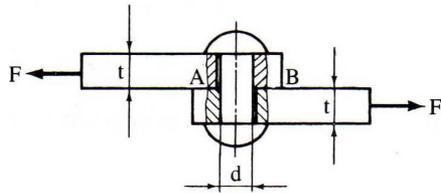


Figure 2 Shredded *Leucaena* Branches

- A. Shredded by Manual Labor (Size varies, 2-4 cm)
- B. Shredded by Shredder Machine (Size 1-2 cm)

$$F = \tau \times A \tag{1}$$

โดยที่ F คือ แรงเฉือน Shear Force (N)
 τ คือ ค่าความต้านทานแรงเฉือนของวัสดุ (N/m^2)
 A คือ พื้นที่หน้าตัดของวัตถุ (m^2)
 จำนวนแรงบิดที่ใช้ในการสับ

$$T = F \times r \tag{2}$$

โดยที่ T คือ แรงบิดที่กระทำ Torque ($N \cdot m$)
 F คือ แรงที่ใช้ในการตัด (N)
 r คือ รัศมีของเพลารวมกับระยะใบมีด (m)

คำนวณกำลังที่ต้องการสามารถคำนวณได้จากสมการกำลังทางกลศาสตร์

$$\omega = \frac{2\pi \times RPM}{60} \tag{3}$$

โดยที่ ω คือ ความเร็วเชิงมุม Angular Velocity (rad/s)

RPM คือ ความเร็วรอบมอเตอร์ (rpm)

$$P = \frac{T \times \omega}{1000} \tag{4}$$

โดยที่ P คือ กำลังที่ต้องการ (kW)
 T คือ แรงบิดที่กระทำ ($N \cdot m$)
 ω คือ ความเร็วเชิงมุม (rad/s)

$$P_{actual} = \frac{P}{\eta} \tag{5}$$

โดยที่ P_{actual} คือ กำลังที่ต้องใช้ (kW)
 η คือ ประสิทธิภาพของมอเตอร์ (%)

ขั้นตอนการออกแบบเครื่องสับกระถินหลังจากที่ได้รวบรวมข้อมูล เช่น ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง ค่าความต้านทานแรงเฉือน (Table 2) ของกระถินที่จะนำมาสับ จากนั้นจึงได้นำข้อมูลมาออกแบบเครื่องสับกระถิน โดยมีขั้นตอนดัง Figure 3

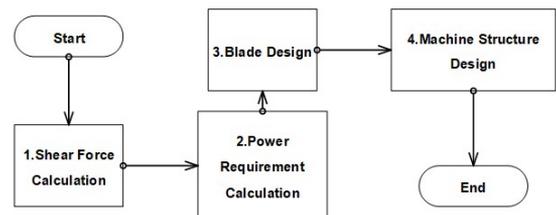


Figure 3 Design Process of the *Leucaena* Shredder

เริ่มจากการคำนวณแรงเฉือนที่ต้องใช้ โดยผู้วิจัยได้ปรับลดค่าแรงเฉือน (Shear Strength) จากค่าอ้างอิงเดิม 12.3 MPa ดัง Table 2 ลงเป็น 0.5 MPa เพื่อให้สอดคล้องกับการใช้งานจริง โดยการลดค่าแรงเฉือนดังกล่าว มีสาเหตุดังนี้

1. ลักษณะของกระถินเป็นพืชเนื้ออ่อน

กระถิน (*Leucaena leucocephala*) เป็นพืชที่มีเนื้ออ่อนและมีโครงสร้างเส้นใยที่ไม่แข็งเหมือนไม้เนื้อแข็งทั่วไป ซึ่งการตัดหรือเฉือนพืชประเภทนี้จึงต้องการแรงเฉือนที่น้อย อีกทั้งในงานวิจัยได้เลือกใช้กระถินสด โดยจะยังคงความชื้นเดิมอยู่ ซึ่งจะส่งผลให้ต้องใช้แรงเฉือนที่น้อยกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับค่าความชื้นในกิ่งกระถินที่ลดลง

2. ประสิทธิภาพการใช้ใบมีดที่คมสูง

การใช้ใบมีดที่คมในการตัดพืชมีผลอย่างมากต่อการลดแรงต้านในการเฉือนพืช ใบมีดที่คมช่วยให้การตัดวัสดุเป็นไปได้ง่ายขึ้น ซึ่งช่วยลดแรงเสียดทานและแรงเฉือนที่ต้องใช้ในการสับพืช กระถินที่เป็นพืชเนื้ออ่อนยิ่งทำให้การตัดเฉือนด้วยใบมีดคมเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพ

3. สภาวะการใช้งานจริงและการออกแบบเพื่อความประหยัดพลังงาน

การลดค่าแรงเฉือนนี้ยังสอดคล้องกับการควบคุมงบประมาณในการออกแบบเครื่อง ให้ประหยัดงบประมาณและสามารถใช้มอเตอร์ที่มีขนาดเล็กลงได้ การใช้แรงเฉือนที่ลดลงจึงทำให้สามารถเลือกใช้มอเตอร์ขนาด 2 HP ได้ และเมื่อทดสอบใช้งานจริงแล้วยังคงรักษาความสามารถในการสับวัสดุได้ดีโดยไม่ต้องเพิ่มขนาดของมอเตอร์

ในส่วนของชุดใบมีดสับ โดยใบมีดสับจะใช้ใบมีดของเครื่องสับหญ้า (2.5" x 9" x 5mm High Carbon Steel Straight Grass Cutting Blade) ที่มีจำหน่ายในท้องตลาด (Figure 4) โดยลักษณะส่วนประกอบของชุดใบมีดสับถูกติดตั้งขนานกับแนวแกนเพลลาจำนวน 3 ใบมีด (Figure 4) จากนั้นจึงได้ออกแบบส่วนรับ (Inlet) และด้านทางออก (Outlet) ให้มีขนาดเหมาะสมกับกำลังสับของเครื่องสับ (Figure 5) จากนั้นจึงออกแบบโครงสร้างเครื่องสับให้มีความแข็งแรงเพียงพอที่จะรับแรงกระทำทั้งหมด โดยคำนึงถึงการประกอบและการใช้งานจริง ขั้นตอนสุดท้ายคือการทดสอบเครื่องสับเพื่อประเมินประสิทธิภาพและปรับปรุงให้เหมาะสมกับการใช้งานจริง



Figure 4 Components of the Leucaena Shredding Blade Assembly

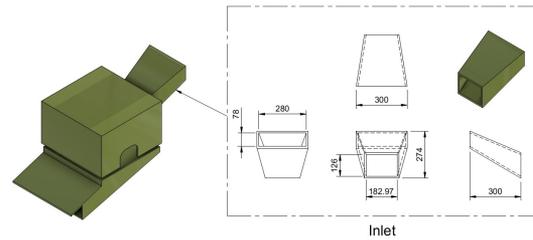


Figure 5 Inlet of Leucaena Shredder

ในการออกแบบและสร้างเครื่องสับกึ่งกระถินที่ใช้ 3 ใบมีดและความเร็วรอบของมอเตอร์ 1250 rpm (Table 3) พบว่ากำลังมอเตอร์ที่ต้องการสำหรับการทำงานอย่างมีประสิทธิภาพควรอยู่ที่ประมาณ 2.58 HP เมื่อพิจารณาประสิทธิภาพของมอเตอร์ที่ 80% (Table 4)

อย่างไรก็ตาม ดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น ในงานวิจัยได้ทำการควบคุมงบประมาณในการสร้างเครื่องจักร ซึ่งผู้วิจัยได้พิจารณาเลือกใช้มอเตอร์ขนาด 2 HP แม้ว่าจะมีกำลังที่น้อยกว่าที่คำนวณไว้เล็กน้อย แต่สามารถจัดการได้โดยการปรับลดความเร็วในการป้อนกึ่งกระถินหรือเพิ่มเวลาการทำงานต่อกึ่งเพื่อให้สามารถใช้งานเครื่องได้ภายในขีดจำกัดของกำลังมอเตอร์ที่มีอยู่ ซึ่งจะช่วยลดต้นทุนในการผลิตเครื่องจักร และยังคงทำงานได้ภายใต้สภาพแวดล้อมการทำงานที่กำหนด

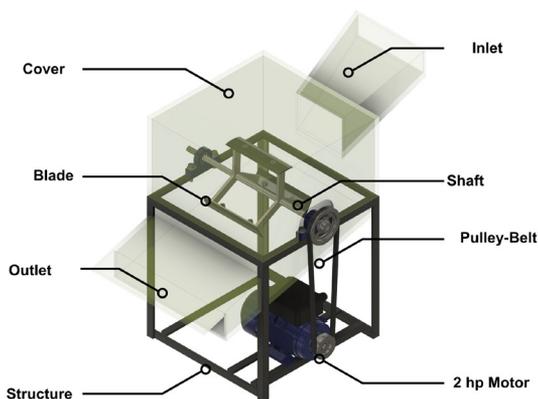
ลักษณะและรูปแบบการทำงานของเครื่องสับกระถินที่ออกแบบและสร้างขึ้น ดัง Figure 6 โดยมีช่องป้อน (Inlet) กระถินขนาดดัง Figure 5 ที่จะถูกป้อนโดยแรงงาน 1 คน เข้าสู่บริเวณห้องสับกระถิน ที่ประกอบด้วย 3 ใบมีดสับ ถูกติดตั้งกับเพลลาที่มีมุมเลี้ยว 4 นิ้ว เชื่อมต่อสายพานกับมุมเลี้ยว 3 นิ้ว ที่มอเตอร์ขนาด 2 แรงม้า และมีช่องทางออก (Outlet) ของกระถินสับดัง Figure 5

Table 3 Input Parameters

Input Parameters	Value
Number of Blades	3 blades
Shear Strength of Leucaena (τ)	0.5 MPa
Diameter of Leucaena (d)	2 cm
Cross-sectional Area (A)	$3.14 \times 10^{-4} \text{ m}^2$
Distance Between Blade and Shaft (r)	10 cm
Motor Speed (RPM)	1250 rpm
Shaft speed (RPM)	938 rpm
Motor Efficiency (η)	80%

Table 4 Calculation Results

Calculation	Result
Shear Force (F)	157 N
Torque (T)	15.7 Nm
Angular Velocity (ω)	98.13 rad/s
Required Motor Power (P)	1.54 kW
Required Motor Power (HP)	2.07 HP
Actual Motor Power Required (P_{actual})	1.93 kw
Actual Motor Power Required (P_{actual})	2.58 HP

**Figure 6** Components of the Leucaena Shredder

3. การทดลอง

ในการทดลองเครื่องสับต้นกระถินที่ได้ทำการออกแบบและสร้างขึ้น ได้ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพในการสับต้นกระถินระหว่างการใช้แรงงานคน 1 คน กับการใช้เครื่องสับที่ออกแบบและสร้างขึ้น โดยมีแรงงานควบคุมเครื่อง

1 คน เพื่อคำนวณหาประสิทธิภาพที่เพิ่มขึ้น โดยพิจารณาจากปริมาณกระถินสับที่ได้และระยะเวลาที่ใช้ในการสับในปริมาณกระถินที่เท่ากัน และขนาดของกระถินสับ โดยมีการกำหนดตัวแปรต้นและตัวแปรตามดังนี้

ตัวแปรต้น (Independent Variable)

1) วิธีการสับกระถิน (การใช้แรงงานคนเทียบกับการใช้เครื่องสับที่ออกแบบและสร้างขึ้น)

ตัวแปรตาม (Dependent Variable)

- 1) ปริมาณกระถินสับที่ได้ (กิโลกรัม)
- 2) ระยะเวลาที่ใช้ในการสับ (นาที)
- 3) ขนาดของชิ้นกระถินสับ (มิลลิเมตร)

ตัวแปรควบคุม

1) เลือกใช้กิ่งกระถินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางไม่เกิน 2 เซนติเมตร ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของกิ่งกระถิน *Leucaena leucocephala* ดัง Table 2 และไม่เลือกใช้กิ่งที่ใหญ่เกินกว่านี้ เพราะค่าความต้านทานแรงเฉือนจะสูงเกินไป

2) การควบคุมขนาดหลังสับ กรณีคนสับมีการควบคุมขนาดชิ้นสับให้อยู่ในช่วง 20-30 มม.

3) อัตราการป้อน ในการทดลองกำหนดอัตราการป้อนที่ 100 กิโลกรัมต่อชั่วโมง หรือ 1.67 กิโลกรัมต่อนาที โดยทำการป้อนครั้งละกิ่ง หรือกิ่งเล็กๆแต่รวมกันไม่เกินขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 2 เซนติเมตร เพื่อให้อยู่ภายใต้ค่าการออกแบบของเครื่อง โดยอยู่ภายใต้กำลังการผลิตของเครื่องสับซึ่งเป็นข้อมูลที่ได้จากการทดสอบกำลังการผลิตของเครื่อง (120 กิโลกรัมต่อชั่วโมง)

$$\text{Shredder working hours (hr)} = \frac{\text{Required amount of Leucaena per day (kg)}}{\text{Machine capacity (kg / hr)} \times \text{Efficiency}} \quad (6)$$

$$\text{Electricity cost / day} = \text{Working hours (hr)} \times \text{Power (kW)} \times \text{Electricity cost per unit (THB / unit)} \quad (7)$$

$$\text{Total Variable Costs} = \text{Labor cost for operating the shredder} + \text{Electricity cost} \quad (8)$$

$$\text{Cost Savings / Day} = (\text{Cost of Manual Labor / day}) - (\text{Cost of Using Shredder / day}) \quad (9)$$

$$\text{Payback Period (days)} = \frac{\text{Initial cost of the Leucaena shredder}}{\text{Cost saving / day}} \quad (10)$$

4. การคำนวณทางเศรษฐศาสตร์

ค่าทางเศรษฐศาสตร์ที่จะทำการวิเคราะห์ คือ ระยะเวลาคืนทุนของการใช้เครื่องสับกระถินเปรียบเทียบกับ การใช้แรงงานคนสับจะเริ่มต้นด้วยการคำนวณต้นทุน (7) (8) รวมของการใช้เครื่องสับกระถินและการใช้แรงงานคนสับ จากนั้นทำการเมื่อได้ข้อมูลการทดลอง คือ ระยะเวลาที่ใช้ในการ สับของแรงงานคนและเครื่องสับย่อย (6) แล้วมาคำนวณหาผล ต่างที่ประหยัดได้ต่อวัน ($Cost\ Savings / Day$) (9) และคำนวณหา ระยะเวลาคืนทุนต่อไป ($Payback\ Period\ (days)$) (10)

ผลการศึกษา

จากผลการทดลองเพื่อประเมินสมรรถนะของการสับ ต้นกระถินพบว่า ได้มีการทดลองจำนวน 10 ครั้ง โดยกำหนด ให้การสับแต่ละครั้งสับเพื่อให้ได้กระถินสับ 2 กิโลกรัม จึงหยุด และทำการจับเวลา พบว่ากรณีแรงงานคนสับจะใช้เวลาเฉลี่ย 952.7 วินาที ขณะที่กรณีเครื่องสับจะใช้เวลาเฉลี่ย 61.1 วินาที มีความแตกต่างกัน 891.6 วินาที หรือคิดเป็น 94% (Table 5) โดยเครื่องสับย่อยในการวิจัยนี้มีอัตราการผลิตที่ 120 กิโลกรัม ต่อชั่วโมง

เครื่องสับย่อยที่พัฒนาขึ้นในการวิจัยนี้มีการออกแบบ เพื่อตอบสนองต่อการใช้งานเฉพาะด้าน คือการสับกระถิน สำหรับเป็นอาหารโคเนื้อ โดยมุ่งเน้นให้ได้ขนาดที่เหมาะสม และสม่ำเสมอ ขณะที่เครื่องสับย่อยในบทความของ Kumar and Kumar (2015) ถูกออกแบบมาเพื่อสับวัสดุให้ละเอียดมากขึ้นสำหรับการแปรรูปวัสดุเหลือใช้ สำหรับการผลิตปุ๋ย แม้ว่า ทั้งสองเครื่องจะใช้กำลังไฟฟ้าใกล้เคียงกันที่ 2 HP แต่มีความ แตกต่างในลักษณะการใช้งานดังกล่าว

นอกจากนี้การสับกระถินด้วยเครื่องสับทำให้ได้ กระถินที่มีความละเอียดกว่าใช้คนสับ (Figure 7) ซึ่ง การสับ ด้วยแรงงานคน ขนาดของกระถินสับมักจะมีขนาดไม่สม่ำเสมอ ขึ้นอยู่กับทักษะของผู้สับ โดยมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 2-4 เซนติเมตร หรือใหญ่กว่า (Figure 7A) เนื่องจากการควบคุม ขนาดของการสับด้วยมือมักทำได้ยากกว่าการใช้เครื่องจักร ส่วนขนาดของกระถินสับด้วยเครื่องสับจะมีขนาดสม่ำเสมอ มากกว่า โดยขนาดกระถินสับที่ได้จากการใช้เครื่องสับจะมี ขนาด 1-2 เซนติเมตร (Figure 7 B) ซึ่งการสับอาหารหยาบ ให้มีขนาดขึ้น 10-15 มม. (1.0-1.5 ซม.) เป็นขนาดที่เหมาะสม และช่วยกระตุ้นการเคี้ยวเอื้องให้อยู่ในเกณฑ์ปกติ (วิโรจน์ ภัทรจินดา, 2564) ช่วยให้โคเนื้อย่อยและดูดซึมสารอาหารได้ ง่ายขึ้น และการผสมกับอาหารอื่น ๆ ง่ายขึ้น ลดการสูญเสีย อาหารและลดความเสี่ยงจากการบาดเจ็บจากการกิน กิ่งกระถิน ที่แข็งและใหญ่ สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Kumar & Kumar,

2015) กับ (Lomchangkum et al., 2024) และ (ภาณุวัฒน์ วงศ์แสงน้อย, 2563) ที่ได้ทำการการพัฒนาเครื่องย่อยวัสดุ ทางการเกษตรเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตและลดต้นทุน โดยมีการทดสอบปัจจัยด้านมุมใบมีด ความเร็วรอบ และความ ละเอียดที่ได้ของชิ้นงานสับ เพื่อหาค่าที่เหมาะสมที่สุด และ วิเคราะห์ความคุ้มค่าทางเศรษฐศาสตร์ เช่นเดียวกับ (เทิดศักดิ์ พรหมทา, 2562) ที่ได้พัฒนาเครื่องหั่นต้นกล้วยให้เป็นชิ้นเล็ก ๆ เพื่อใช้ในการเลี้ยงสัตว์ที่ได้มีการพัฒนาให้ชิ้นกล้วยสับมีขนาด เล็กกลงกว่าการใช้เครื่องสับเดิม

Table 5 Comparison of Leucaena Branch Shredding Tests: Manual Labor vs. Custom-Made Leucaena Shredder Machine

Experi-ment Number	Time to Shred 2 kg of Leucaena (seconds)		Difference (seconds)	Difference (%)
	Labor	Machine		
1	900	65	835	93%
2	1020	59	961	94%
3	927	57	870	94%
4	910	60	850	93%
5	820	55	765	93%
6	950	65	885	93%
7	1030	68	962	93%
8	1050	65	985	94%
9	980	62	918	94%
10	940	55	885	94%
Average	952.70	61.10	891.60	94%
SD.	69.73	4.61	-	-

ผลการวิเคราะห์ระยะเวลาคืนทุนของการใช้เครื่องสับ กระถินเปรียบเทียบกับการใช้แรงงานคนสับ (Table 6) โดยมี รายละเอียดต้นทุนที่เกี่ยวข้องทั้งในส่วนของต้นทุนคงที่และ ต้นทุนแปรผัน ดังนี้

ต้นทุนคงที่ ประกอบด้วย ต้นทุนเครื่องสับกระถิน 10,000 บาท ค่าเสื่อมราคา 1,800 บาทต่อปี (คิดราคาเครื่อง เมื่อสิ้นสุดปีที่ 5 คือ 1,000 บาท) วัน ค่าบำรุงรักษา 500 บาท ต่อปี (คิดจาก 5% ของต้นทุนเครื่องสับ) รวมต้นทุนคงที่ 12,300 บาท

ต้นทุนแปรผัน ประกอบด้วย ค่าจ้างแรงงาน พนักงาน ควบคุมเครื่องสับ 1 คน ค่าแรง 300 บาทต่อวัน ทำงาน 8 ชั่วโมงต่อวัน มอเตอร์มีขนาด 2 แรงม้า คิดค่าไฟหน่วยละ 4

บาท และคิดประสิทธิภาพการทำงาน 70% มีค่าไฟฟ้า 47.74 บาทต่อวัน รวมต้นทุนแปรผัน 347.74 บาทต่อวัน

เมื่อคิดต้นทุนต่อวันในระยะเวลา 1 ปี คือต้นทุนคงที่หารด้วยจำนวนวันคือ 365 วัน และรวมกับต้นทุนแปรผันจะได้ต้นทุนรวมต่อวันคือ 381.74 บาทต่อวัน

เมื่อทำการหารระยะเวลาคืนทุน พบว่าจะแปรผันตามจำนวนโคเนื้อที่เลี้ยง โดยคิดที่โคเนื้อขนาดน้ำหนักตัวละ 500 กิโลกรัม ที่จะมีความต้องการกระถิน 10 กิโลกรัมต่อวัน (สุวิษบุญโญปรัง, 2558) โดยจะมีความคุ้มค่าเมื่อคิดที่จำนวน 7 ตัวขึ้นไป ซึ่งหากทำการสับกระถินเพื่อเป็นอาหารโคเนื้อ 7 ตัว จะมีส่วนต่างที่ประหยัดได้ 295 บาท/วัน จะคืนทุนภายใน 42 วัน

(Table 7) เพราะใช้เวลาในการสับต่อวันน้อย และจะคืนทุนเร็วขึ้นเมื่อจำนวนโคเนื้อมากขึ้น (Figure 8) โดยหากเกษตรกรเลี้ยงโคเนื้อ 100 ตัว และใช้เครื่องสับหญ้าเพื่อเป็นอาหารโคเนื้อจะคืนทุนภายใน 3 วัน ซึ่งหากเกษตรกรมีการรวมกลุ่มหรือเป็นชุมชนในการเลี้ยงโคเนื้อ และหันมาใช้เครื่องสับก็จะมี ความคุ้มค่า โดยสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Kamma *et al.*, 2020) ที่ได้ทำการพัฒนาเครื่องสับวัสดุพืชเกษตรและเปลือกผลไม้ พบว่าค่าใช้จ่ายในการสับพืชจะลดลงเมื่อทำการสับในปริมาณมาก และ (Chuchom & Lemkhun, 2022) ที่ได้ทำการพัฒนาเครื่องปลูกสับประรด พบว่ามีระยะเวลาคืนทุนแปรผันตามพื้นที่การปลูกสับประรด

Table 6 Total Cost of a *Leucaena* Shredder

Item	Cost	Unit
Fixed Costs		
Initial cost of the <i>Leucaena</i> shredder	10,000	THB
Depreciation cost of the <i>Leucaena</i> shredder*	1,800	THB/year
Maintenance cost (5% of the shredder Initial cost)	500	THB/year
Total Fixed Costs	12,300	THB
Variable Costs		
Labor cost for operating the shredder	300	THB/day
Electricity cost / day (8** hr. x 1.492 kw x 4***THB/unit)	47.74	THB/day
Total Variable Costs	347.74	THB/day
Total Costs per day (347.74 THB/day + (12,300 THB / 365 days)	381.44	THB/day

Note: *Residual value of the shredder at the end of year 5

** Depending on the number of beef cattle, but it is set to operate 8 hours per day.

*** Electricity cost / unit 4 THB/unit

Table 7 Payback Period Calculation for a Shredding Machine vs. Manual Labor

Number of Cattle	Amount of <i>Leucaena</i> Required (kg)	Manual Labor		Shredder		Difference in Daily Savings (Baht/Day)	Payback Period (Days)
		Number of Workers	Cost per Worker (Baht/Day)	Number of Hours (Amount of <i>Leucaena</i> required * <i>Leucaena</i> shredding capacity * 70% working efficiency)	Cost per Day = [B*Motor Power * Electricity Cost per Unit] + Labor Cost for Machine Operator)		
-	-	-	A	B	C	D=C-A	Fixed cost/D
1	10	1	300	0.12	300.72	(0.72)	(17,001)
2	20	1	300	0.24	301.45	(1.45)	(8,500)
3	30	1	300	0.36	302.17	(2.17)	(5,667)
4	40	1	300	0.48	302.89	(2.89)	(4,250)
5	50	1	300	0.61	303.62	(3.62)	(3,400)
6	60	1	300	0.73	304.34	(4.34)	(2,833)
7	70	2	600	0.85	305.06	295	42
8	80	2	600	0.97	305.79	294	42
9	90	2	600	1.09	306.51	293	42
10	100	2	600	1.21	307.24	293	42

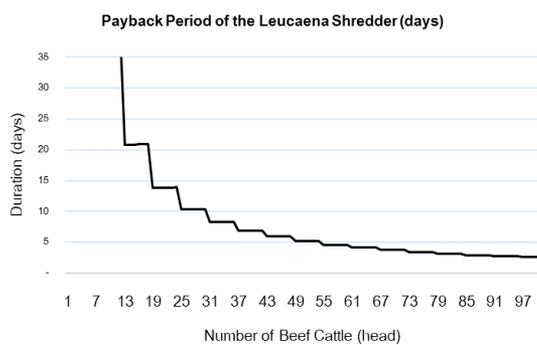


Figure 7 Payback Period of the Leucaena Shredder Compared to the Number of Beef Cattle

อภิปรายและสรุปผล

จากการออกแบบและสร้างเครื่องสับต้นกระถินเพื่อนำไปเป็นอาหารโคเนื้อ มีกำลังสับย่อยตามขนาดขนาดมอเตอร์ 2 แรงม้า ซึ่งเป็นขนาดที่ยังไม่เพียงพอเนื่องจากงบประมาณที่ต้องควบคุมไม่ให้สูงเกินไป แต่ชดเชยโดยการปรับเงื่อนไขการทำงานคือ ปรับลดความเร็วในการป้อนกิ่งกระถินหรือเพิ่มเวลาการทำงานต่อกิ่ง พบว่าเครื่องสับสามารถลดระยะเวลาการสับกระถินได้ถึง 94% โดยใช้เวลาสับเฉลี่ยเพียง 61 วินาทีในการสับกระถิน 2 กิโลกรัม ขณะที่แรงงานคนใช้เวลาเฉลี่ย 952 วินาที อีกทั้งกระถินที่สับด้วยเครื่องยังมีความละเอียดมากกว่าโดยกรณีสับมีขนาดเฉลี่ยประมาณ 2-4 เซนติเมตร หรือใหญ่กว่า แต่เครื่องสับมีขนาด 1-2 เซนติเมตร ช่วยให้โคเนื้อสามารถย่อยและดูดซึมสารอาหารได้ดีขึ้น ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าเครื่องสับสามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการสับและลดความเหนื่อยล้าของแรงงานคนได้อย่างมาก

การวิจัยนี้สอดคล้องกับงานวิจัยที่มีอยู่ในวารสารต่างๆ ที่เน้นการพัฒนาเครื่องจักรเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตทางการเกษตร เช่น งานวิจัยของ (Kumar & Kumar, 2015) ที่ออกแบบเครื่องย่อยวัสดุทางการเกษตร และ (Lomchangkum *et al.*, 2024) ที่พัฒนาเครื่องย่อยข้าวโพดสำหรับอาหารสัตว์ ผลการวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงความเป็นไปได้ในการนำเครื่องสับกระถินไปใช้ในภาคการเกษตรไทยเพื่อเสริมสร้างความยั่งยืนในการผลิตอาหารสัตว์และลดภาระงานของเกษตรกร นอกจากนี้ ผลการวิจัยยังชี้ให้เห็นว่าการใช้เครื่องสับต้นกระถินช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการจัดการเวลาและลดต้นทุนการผลิต ซึ่งสามารถนำไปประยุกต์ใช้กับพืชชนิดอื่น ๆ เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการผลิตและการจัดการทรัพยากรในภาคการเกษตรต่อไป

เมื่อพิจารณาค่าทางเศรษฐศาสตร์คือ ระยะเวลาคืนทุนโดยมีต้นทุนคงที่ 12,300 บาทต่อปี หรือ 33.70 บาทต่อวัน

ต้นทุนแปรผัน 347.74 บาทต่อวัน รวมต้นทุนต่อวัน 381.44 บาทต่อวัน(กรณีทำงานครบ 8 ชั่วโมง) และเมื่อพิจารณาตามปริมาณความต้องการกระถินของโคเนื้อในแต่ละวันพบว่าเครื่องสับกระถินสามารถคืนทุนได้ภายในภายใน 42 วัน ต้องการเมื่อใช้ในการเลี้ยงโคเนื้อจำนวน 7 ตัว และระยะเวลาคืนทุนจะลดลงเมื่อเลี้ยงโคเนื้อในจำนวนที่มากขึ้น

ในการพัฒนาเครื่องสับต่อไปในอนาคตจะเป็นการศึกษาผลที่เกิดขึ้นจากการปรับเปลี่ยนตัวแปรต้นใหม่ คือ จำนวนใบมีดสับและมุมของใบมีดที่เหมาะสม เพื่อศึกษาผลที่ได้และขยายผลให้เครื่องสับสามารถสับย่อยพืชได้หลากหลายชนิดมากขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจาก คณะศิลปศาสตร์ และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏศรีสะเกษ ในการเอื้อเฟื้อสถานที่ในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- เทิดศักดิ์ พรหมทา. (2562). การออกแบบและพัฒนาเครื่องหั่นสับต้นกล้วย. *การประชุมวิชาการระดับชาติด้านวิทยาศาสตร์ เทคโนโลยี และนวัตกรรม ครั้งที่ 1*, มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย.
- บุญส่ง สมเพาะ, วิเชียร ปิยาจารย์ประเสริฐ, บางรักษ์ เชษฐสิงห์, ชาวลิตร วงศ์ศรีแก้ว, อุทาร์ตน์ ภูไพบูลย์, จันทิ จิตจักร และอนงค์ณี เรือนทิพย์. (2555). *คุณสมบัติพื้นฐานของไม้เพื่อการใช้ประโยชน์*. สำนักวิจัยและพัฒนาการป่าไม้ กรมป่าไม้. https://forprod.forest.go.th/forprod/forprod2017/research_forest/data/
- สุวิษ บุญโปร่ง. (2558). *คู่มือการเลี้ยงโคเนื้อสำหรับเกษตรกรไทย. กองส่งเสริมและพัฒนาปศุสัตว์. กรมปศุสัตว์ กระทรวงเกษตรและสหกรณ์.*
- ภาณุวัฒน์ วงศ์แสงน้อย. (2563). การออกแบบและการพัฒนาเครื่องสับต้นข้าวโพดสำหรับผลิตอาหารสัตว์. *วารสารวิชาการ มหาวิทยาลัยราชภัฏอุตรดิตถ์*, 15(1), 15–31.
- วิโรจน์ ภัทรจินดา. (2564). *TMR โคนมพรีเมียม (เล่ม 1)*. โรงพิมพ์มหาวิทยาลัยขอนแก่น.
- ศูนย์เทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร กรมปศุสัตว์. (2567). *ข้อมูลเกษตรกรผู้เลี้ยงสัตว์และโคเนื้อ ปีงบประมาณ พ.ศ. 2567*. <https://ict.dld.go.th/webnew/index.php/th/service-ict/report/428-report-thailand-livestock/reportservey2567/1813-2567-monthly>

- Kumar, I. S., & Kumar, T. H. (2015). Design and development of agricultural waste shredder machine. *International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, 2(10), 164–172.
- Lomchangkum, C., Junsiri, C., Sopha, P., Thongyothee, S., & Doungpueng, K. (2024). Designing a waxy maize shredder for animal feed. *International Journal of Agricultural Technology*, 20(1), 159–176.
- Norton, R. L. (2010). *Machine design: An integrated approach (4th ed.)*. Pearson Education, Inc.

คำแนะนำสำหรับผู้พิมพ์

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม กำหนดพิมพ์ปีละ 6 ฉบับ ฉบับที่ 1 (มกราคม-กุมภาพันธ์) ฉบับที่ 2 (มีนาคม-เมษายน) ฉบับที่ 3 (พฤษภาคม-มิถุนายน) ฉบับที่ 4 (กรกฎาคม-สิงหาคม) ฉบับที่ 5 (กันยายน-ตุลาคม) ฉบับที่ 6 (พฤศจิกายน-ธันวาคม) ผู้พิมพ์ทุกท่านสามารถส่งบทความวิจัยเพื่อรับการพิจารณาลงตีพิมพ์ได้ โดยไม่ต้องเป็นสมาชิกและไม่จำเป็นต้องสังกัดมหาวิทยาลัยมหาสารคาม ผลงานที่ได้รับการพิจารณาในวารสารจะต้องมีสาระที่น่าสนใจ เป็นงานที่ทบทวนความรู้เดิมหรือองค์ความรู้ใหม่ ที่ทันสมัย รวมทั้งข้อคิดเห็นทางวิชาการที่เป็นประโยชน์ต่อผู้อ่าน และจะต้องเป็นงานที่ไม่เคยตีพิมพ์เผยแพร่ในวารสารอื่นมาก่อน รวมถึงไม่อยู่ระหว่างพิจารณาลงพิมพ์ในวารสารใด บทความอาจถูกตัดแปลง แก้ไข เนื้อหา รูปแบบ และสำนวน ตามที่กองบรรณาธิการเห็นสมควร ทั้งนี้ เพื่อให้วารสารมีคุณภาพในระดับมาตรฐานสากลและนำไปอ้างอิงได้

การเตรียมต้นฉบับ

1. ต้นฉบับพิมพ์เป็นภาษาไทยหรือภาษาอังกฤษ แต่เรื่องจะต้องมีบทคัดย่อทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ การใช้ภาษาไทยให้ยึดหลักการใช้คำศัพท์การเขียนทับศัพท์ภาษาอังกฤษตามหลักของราชบัณฑิตยสถาน ให้หลีกเลี่ยงการเขียนภาษาอังกฤษร่วมกับภาษาไทยในข้อความ ยกเว้นกรณีจำเป็น เช่น ศัพท์ทางวิชาการที่ไม่มีทางแปล หรือคำที่ใช้แล้วทำให้เข้าใจง่ายขึ้น คำศัพท์ภาษาอังกฤษที่เขียนเป็นภาษาไทยให้ใช้ตัวเล็กทั้งหมด ยกเว้นชื่อเฉพาะ สำหรับต้นฉบับภาษาอังกฤษ ควรได้รับการตรวจสอบความถูกต้องของภาษาจากผู้เชี่ยวชาญด้านภาษาอังกฤษก่อน

2. ขนาดของต้นฉบับ ใช้กระดาษขนาด A4 (8.5x11 นิ้ว) และพิมพ์โดยเว้นระยะห่างจากขอบกระดาษด้านละ 1 นิ้ว จัดเป็น 2 คอลัมน์

3. ชนิดของขนาดตัวอักษร ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษให้ใช้ตัวอักษร **Browallia New**

3.1 ชื่อเรื่องให้ใช้อักษรขนาด **18 pt.** ตัวหนา

3.2 ชื่อผู้พิมพ์ใช้อักษรขนาด **16 pt.** ตัวปกติ

3.3 หัวข้อหลักใช้อักษรขนาด **16 pt.** ตัวหนา

3.4 หัวข้อรองใช้อักษรขนาด **14 pt.** ตัวหนา

3.5 บทคัดย่อและเนื้อหาใช้ตัวอักษรขนาด **14 pt.** ตัวบาง ซึ่งบทคัดย่อควรประกอบด้วย เนื้อหา 5 ส่วน คือ

1) ที่มาของปัญหาการวิจัย 2) วัตถุประสงค์ของการวิจัย 3) วิธีการศึกษาโดยย่อแต่ครอบคลุมรายละเอียด 4) ผลการวิจัย 5) สรุปและแนวทางการนำไปใช้ประโยชน์ จำนวนคำไม่เกิน 350 คำ

3.6 เชิงอรรถอยู่หน้าแรกที่เป็นรายละเอียดชื่อตำแหน่งทางวิชาการ และที่อยู่ของผู้พิมพ์ใช้อักษรขนาด 12 pt. ตัวบาง และใส่ Corresponding author

4. ผู้พิมพ์จะต้องจัดเตรียมต้นฉบับในรูปแบบของไฟล์ “.doc” (MS Word) และ “.pdf” (Portable Document Format)

5. จำนวนหน้า ความยาวของบทความไม่ควรเกิน 12 หน้า รวมตาราง รูป ภาพ และเอกสารอ้างอิง

6. รูปแบบการเขียนต้นฉบับ แบ่งเป็น 2 ประเภท ได้แก่ ประเภทบทความรายงานผลวิจัยหรือบทความวิจัย (research article) และบทความจากการทบทวนเอกสารวิจัยที่ผู้อื่นทำเอาไว้ หรือบทความทางวิชาการ หรือบทความทั่วไป หรือบทความปริทัศน์ (review article)

7. การส่งบทความ ส่ง online ผ่านระบบ ThaiJo โดยสามารถเข้าไปดูรายละเอียดที่ www.scjmsu.msu.ac.th

8. หากจัดรูปแบบไม่ถูกต้องทางวารสารจะจัดส่งคืนผู้พิมพ์เพื่อปรับแก้ไข ก่อนเสนอผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณา ซึ่งอาจทำให้กระบวนการตีพิมพ์ล่าช้า

บทความวิจัย/บทความวิชาการ ให้เรียงลำดับหัวข้อดังนี้

ชื่อเรื่อง (Title) ชื่อเรื่องให้มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ควรสั้น กระชับ และสื่อเป้าหมายหลักของงานวิจัย ไม่ใช่คำย่อ ความยาวไม่เกิน 100 ตัวอักษร

ชื่อผู้พิมพ์ [Author (s)] และที่อยู่ ให้มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ และระบุตำแหน่งทางวิชาการ หน่วยงาน หรือสถาบันที่สังกัด และ E-mail address ของผู้พิมพ์ไว้เป็นเชิงบรรณของหน้าแรก เพื่อกองบรรณาธิการสามารถติดต่อได้

บทคัดย่อ (Abstract) เป็นการย่อเนื้อความงานวิจัยทั้งเรื่องให้สั้น และมีเนื้อหา ประกอบด้วย วัตถุประสงค์ ผลการค้นพบที่สำคัญ และสรุป มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ โดยบทคัดย่อภาษาอังกฤษมีความยาวไม่เกิน 350 คำ สำหรับบทคัดย่อภาษาไทยให้สอดคล้องกับบทคัดย่อภาษาอังกฤษ

คำสำคัญ (Keywords) ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ไม่เกิน 5 คำ ให้ระบุไว้ท้ายบทคัดย่อของแต่ละภาษา

บทนำ (Introduction) เป็นส่วนเริ่มต้นของเนื้อหา ที่บอกความเป็นมา เหตุผล และวัตถุประสงค์ ที่นำไปสู่งานวิจัยนี้ ให้ข้อมูลทางวิชาการที่เกี่ยวข้องจากการตรวจสอบเอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้องที่มีรายงานการศึกษาก่อนหน้า

วัสดุอุปกรณ์และวิธีการศึกษา (Materials and Methods) ให้ระบุรายละเอียด วัสดุอุปกรณ์ สิ่งื่อนำมาศึกษา จำนวน ลักษณะเฉพาะของตัวอย่างที่ศึกษา อธิบายวิธีการศึกษา แผนการทดลองทางสถิติ วิธีการเก็บข้อมูลการวิเคราะห์และการแปรผล

ผลการศึกษา (Results) รายงานผลที่ค้นพบ ตามลำดับขั้นตอนของการวิจัย อย่างชัดเจนได้ใจความ ถ้าผลไม่ซับซ้อน และมีตัวเลขไม่มากควรใช้คำบรรยาย แต่ถ้ามีตัวเลข หรือ ตัวแปรมาก ควรใช้ตารางหรือแผนภูมิประกอบการรายงานผลการศึกษา

วิจารณ์และสรุปผล (Discussion and Conclusion) การอภิปรายผลการศึกษาว่าตรงกับวัตถุประสงค์และเปรียบเทียบกับสมมติฐานของการวิจัยที่ตั้งไว้ หรือแตกต่างไปจากผลงานที่มีผู้รายงานไว้ก่อนหรือไม่ อย่างไร เหตุผลใดจึงเป็นเช่นนั้น และมีพื้นฐานอ้างอิงที่เชื่อถือได้ ผู้พิมพ์อาจมีข้อเสนอแนะที่นำผลงานวิจัยไปใช้ประโยชน์ หรือทิ้งประเด็นคำถามการวิจัย ซึ่งเป็นแนวทางสำหรับการวิจัยต่อไป

ตาราง รูป ภาพ แผนภูมิ (Table, Figures, and Diagrams) ควรคัดเลือกเฉพาะที่จำเป็น แทรกไว้ในเนื้อเรื่อง โดยเรียงลำดับให้สอดคล้องกับคำอธิบายในเนื้อเรื่อง และมีคำอธิบายเป็นภาษาอังกฤษ ที่สื่อความหมายได้สาระครบถ้วน กรณีที่เป็นตาราง คำอธิบายอยู่ด้านบน ถ้าเป็นรูป ภาพ แผนภูมิ คำอธิบายอยู่ด้านล่าง

กิตติกรรมประกาศ (Acknowledgements) ระบุว่างานวิจัยได้รับการสนับสนุนงบประมาณ หรือสนับสนุนด้านอื่นๆ รวมถึงความช่วยเหลือจากองค์กรใดหรือผู้ใดบ้าง

เอกสารอ้างอิง (References) ระบุรายการเอกสารที่นำมาใช้อ้างอิงให้ครบถ้วนไว้ท้ายเรื่อง โดยใช้ APA Style ดังตัวอย่าง สามารถดูรายละเอียดและตัวอย่างเพิ่มเติมได้ที่ www.scjmsu.msu.ac.th

เอกสารอ้างอิงให้เขียนตามรูปแบบ “Publication Manual of the American Psychological Association” (7th Edition)

1. หนังสือ (ในรูปแบบรูปเล่ม)

ชื่อ-สกุล. (ปีพิมพ์). *ชื่อเรื่อง* (พิมพ์ครั้งที่). สำนักพิมพ์.

ตัวอย่าง:

วิธาน ฐานะวุฑฒ์. (2547). *หัวใจใหม่-ชีวิตใหม่*. ปิติศึกษา.

2. บทความในวารสารอิเล็กทรอนิกส์

ชื่อ-สกุล. (ปีพิมพ์). ชื่อบทความ. ชื่อวารสาร, เลขของปีที่ (เลขของฉบับที่), เลขหน้า. /<https://doi.org/เลขdoi>

ตัวอย่าง:

มานะ สินธุวงษานนท์. (2549). ปัจจัยส่งเสริมการจัดการศึกษาที่ส่งผลต่อคุณภาพนักเรียนในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ. วารสาร
ครุศาสตร์, 18 (2), 115-116.

3. รายงานการประชุมเชิงวิชาการ (Proceeding)

ชื่อ-สกุล. (ปี). ชื่อบทความ. ในชื่อบรรณานุกรม (บ.ก.), ชื่อหัวข้อการประชุม. ชื่อการประชุม (น. เลขหน้า). ฐานข้อมูล.

ตัวอย่าง:

พัชรภา ตันติชูเวช. (2553). การศึกษาทั่วไปกับคุณลักษณะบัณฑิตที่พึงประสงค์ในประเทศมาเลเซีย และสิงคโปร์ ศึกษา
โดยเปรียบเทียบกับประเทศไทย. ใน ศิริชัย กาญจนาวาสี (บ.ก.), การขับเคลื่อนคุณภาพการศึกษาไทย. การประชุมวิชาการ
และเผยแพร่ ผลงานวิจัยระดับชาติ (น. 97-102). คณะครุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.

4. หนังสือพิมพ์และหนังสือพิมพ์ออนไลน์

ชื่อสกุล. (ปี, /วัน/เดือน). ชื่อคอลัมน์. ชื่อหนังสือพิมพ์, เลขหน้า.

ตัวอย่าง:

พงษ์พรรณ บุญเลิศ. (2561, 15 สิงหาคม). เติลนิวส์ว่าไรต์: 'สื่อพิพิธภัณฑน์' เชื่อม ยุคสมัย เข้าถึงด้วย 'มิติใหม่' อินเทอร์เน็ต.
เติลนิวส์, 4.

5. หนังสือ (ในรูปแบบอิเล็กทรอนิกส์)

ชื่อ สกุล. (ปีพิมพ์). ชื่อเรื่อง (พิมพ์ครั้งที่). URL

ตัวอย่าง:

กระทรวงศึกษาธิการ. (2560). หลักสูตรการศึกษาปฐมวัย พุทธศักราช 2560 สำหรับเด็กอายุ ต่ำกว่า 3-5 ปี. http://drive.google.com/file/d/1HiTwiRh1Er73hVYIMh1cYWzQiaNI_Vc/view

Instruction for Authors

Research manuscripts relevant to subject matters outlined in the objectives are **Accepted** from all institutions and private parties provided they have not been preprinted elsewhere. The context of the papers may be **Revised** as appropriate to the standard. The manuscript must be interesting topic, review knowledge, modern knowledge, and academic comments that are beneficial to readers. The journal publishes 6 issues a year. Vol.1 (January-February) Vol.2 (March-April) Vol.3 (May-June) Vol.4 (July-August) Vol.5 (September-October) Vol.6 (November-December).

Preparation of manuscripts:

1. Manuscripts can be written in either Thai or English with the abstract in both Thai and English. The use of Thai language adheres to the principles of vocabulary, transliteration in English according to the principles of the Royal Society of Thailand. Manuscript should be specific, clear, concise, accurate, and consistent. Mixing Thai and English should be avoided except for the case of necessity, such as academic vocabulary with no translation or mixing words for easier understanding. English vocabulary written in Thai must use all lowercase except for unique names. English language manuscripts should be checked by an English language editor prior to submission.

2. Manuscript should be on A4 standard size paper. Each side must have 1" margins with 2 columns.

3. Browallia New font is required with font size as follows:

3.1 Title of the article: **18 pt. Bold**

3.2 Name (s) of the authors: **16 pt. Unbold**

3.3 Main Heading: **16 pt. Bold**

3.4 Sub-heading: **14 pt. Bold**

3.5 Body of the text: **14 pt. Unbold**, The abstract should consist of 5 parts: 1) the origin of the research problem, 2) the objectives of the research, 3) a brief but detailed study method, 4) the research results, 5) a conclusion and guidelines for use.

3.6 Footnotes for authors and their affiliations: **12 pt. Unbold**, must be cited at the bottom of the first page. Academic position and corresponding author must be added at footnotes.

4. Manuscripts should be typed in MS word ".doc" and ".pdf" (Portable Document Format)

5. The number of pages are limited to 12 pages, including references, Tables, graphs, or pictures.

6. Types of manuscripts: research articles and review articles.

7. Manuscript submission: online submission via www.scjmsu.msu.ac.th.

8. Manuscript with uncorrected format will be sent back to the author before review process which can delay the publication process.

Research article / review article must be in sequence as follows:

Title: denoted in both Thai and English, must be concise and specific to the point, normally less than 100 characters.

Name (s) of the author (s): denoted with affiliation must be in Thai and English, academic position must be specified, and email address for contact the author.

Abstract: This section of the paper should follow an informative style, concisely covering all the important of findings. The abstract must include objectives, findings, and conclusion. Thai and English abstract is required. The English abstract is restricted to **350 words**. Thai abstract should be relevant to English version.

Keywords: Give 4-5 concise words to specify your article

Introduction: This section is the initial part of the article, contain information about background, reasons, purposes, and review section.

Materials and Methods: A discussion of the materials used, and a description clearly detailing how the experiment was undertaken, e.g., experimental design, data collection and analysis, and interpretation

Results: Present the output. Li the information in complicated, add Tables, graphs, diagrams etc., as necessary.

Discussion and Conclusion: Discuss how the results are relevant/oppose to the objective and hypothesis. How the result is different/relevant when comparing to the former findings. Give us your reason why result is like that base on reliable researches. This part should end with suggestions for research utilization or providing questions for future studies.

Tables, figures, diagrams: Selected only necessary objects to insert in the body of manuscript in accordance with the description in the text. The short description is required in English with completely meaningful. For figures and diagrams, the description is below the picture. But, for Table, the description is on top of the Table.

Acknowledgement: the name of the persons, organization, or funding agencies who helped support the research are acknowledged in this section.

References: listed and referred in APA.

Reference are written in “Publication Manual of the American Psychological Association” (7th Edition)

1. Book

Mertens, D.M. (2014). *Research and evaluation in education and psychology: Integrating diversity with quantitative, qualitative, and mixed methods* (4th ed.). SAGE.

2. Academic Journal

Herbst-Damm, K.L., & Kulik, J.A. (2005). Volunteer support, marital status, and the survival times of terminally ill patients. *Health Psychology*, 24, 225-229. <https://doi.org/10.1037/0278-6133.24.2.225>

3. Conference Proceeding

Katz, I., Gabayan, K., & Aghajan, H. (2007). A multi-touch surface using multiple cameras. In J. Blanc-Talon, W. Philips, D. Popescu, & P. Scheunders (Eds.), *Lecture notes in computer science: Vol. 4678. Advanced concepts for intelligent vision systems* (pp. 97-108). Springer-Verlag. https://doi.org/10.1007/978-3-540-74607-2_9

4. Newspaper / Online Newspaper

Brody, J.E. (2007, December 11). Mental reserves keep brain agile. *The New York Times*. <http://www.nytimes.com>

5. E-book

Dahlberg, G., & Moss, P. (2005). *Ethics and politics in early childhood education*. <https://epdf.tips/ethics-and-politics-in-early-childhoodeducation-contesting-early-childhood.html>

Aim and Scope:

The Journal of Science and Technology aims to disseminate of scientific knowledge in the discipline of Mathematics, Science, Technology, Engineering, Agriculture, Medicine, Health Science, Interdisciplinary in science and technology. The journal publishes both research article and review article.

Ownership

Maharakham University
Editorial Office
Division of Research Facilitation and Dissemination,
Khamriang Sub-distict, Kantharawichai District,
Maha Sarakham Province 44150
Tel & Fax: 0 4371 9827 ext. 1754

Advisors

President of Maharakham University
Professor Dr.Visut Baimai
Professor Dr.Vichai Boonsaeng
Professor Dr.Peerasak Srinives

Editor-in-Chief

Professor Dr.Preecha Prathepha

Assistant Editors

Professor Dr.Pairot Pramual
Maharakham University
Professor Dr.Sirithon Siriamornpun
Maharakham University
Professor Dr.Anongrit Kangrang
Maharakham University
Associate Professor Dr.Worapol Aengwanich
Maharakham University
Associate Professor Dr.Vallaya Sutthikhum
Maharakham University
Associate Professor Dr.Orawich Goompol
Maharakham University
Assistant Professor Dr.Somnuk Puangpronpitag
Maharakham University

Editorial Board

Professor Dr.Thaweesakdi Boonkerd
Chulalongkorn University
Professor Dr.La-orsri Sanoamuang
Khon Kaen University
Professor Dr.Pranee Anprung
Chulalongkorn University
Professor Dr.Niwat Sonoamuang
Khon Kaen University
Professor Dr.Wongsa Laohasiriwong
Khon Kaen University
Professor Dr.Kwanjai Kanokmedhakul
Khon Kaen University

Professor Dr.Sirikasem Sirilak
Naresuan University
Associate Professor Dr.Sunan Saikrasun
Maharakham University
Associate Professor Dr.Suwanna Boonyaleepun
Khon Kaen University
Associate Professor Dr.Chantana Aromdee
Khon Kaen University
Associate Professor Dr.Boonchong Chawsithiwong
National Institute of Development Administration
Associate Professor Dr.Porntep Tanonkeo
Khon Kaen University
Associate Professor Dr.Narumon Sangpradub
Khon Kaen University
Associate Professor Dr.Chawalit Boonpok
Maharakham University
Associate Professor Terdsak Khammeng
Nakhon Phanom University
Associate Professor Yuen Poovarawan
Kasetsart University
Associate Professor Dr.Natapol Pumipuntu
Maharakham University
Assistant Professor Dr.Napparat Buddhakala
Rajamangala University of Technology Thanyaburi
Assistant Professor Dr.Anucha Pranchana
Ubon Ratchathani Rajabhat University
Assistant Professor Dr.Seckson Sukhasena
Naresuan University
Assistant Professor Dr.Walaiporn Tongjaroenbuengam
Maharakham University
Assistant Professor Dr.Alongkorn Lamom
Maharakham University
Dr.Rakjinda Wattanalai
Siam University

Secretary

Director of the Division of Research Facilitation
and Dissemination

Assistant secretary

Phakwilai Janloy
Jirarat Puseerit

Six issues per year

Number 1 January-February
Number 2 March-April
Number 3 May-June
Number 4 July-August
Number 5 September-October
Number 6 November-December

วารสาร

วิทยาศาสตร์ และ เทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

ปีที่ 44 ฉบับที่ 5 กันยายน - ตุลาคม 2568

ISSN (Print) : 2985-2617
ISSN (Online) : 2985-2625

JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
MAHASARAKHAM UNIVERSITY

INDEXED IN

