

JOURNAL OF

SCIENCE AND TECHNOLOGY

MAHASARAKHAM UNIVERSITY

Volume 45 Number 4 September - October 2026

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

JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
MAHASARAKHAM UNIVERSITY

INDEXED IN



เครดิตภาพจาก : Jarunee Khempila, Pumin Kongto

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 ศิริอมรพรรณ
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ศาสตราจารย์ ดร.อนงค์ฤทธิ์ แข็งแรง
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ นายสัตวแพทย์ ดร.วรพล เองวานิช
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ ดร.วัลยา สุทธิขำ
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ ดร.อริชัญญ์ กุมพล
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมนึก พ่วงพรพิทักษ์
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.ทวีศักดิ์ บุญเกิด
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.ละอศรี เสนาะเมือง
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.ปราณี อานเปื้อง
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ศาสตราจารย์ ดร.นิวัฒน์ เสนาะเมือง
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.วงศา เล้าศิริวงศ์
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศาสตราจารย์ ดร.ขวัญใจ กนกเมธากุล
มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ศาสตราจารย์ นายแพทย์ศิริเกษม ศิริลักษณ์
มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.สุนันท์ สายกระสุน
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ ดร.สุวรรณา บุญยะลีพรรณ
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.ฉันทนา อารมย์ดี
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.บุญจง ขาวสิทธิวงษ์
สถาบันบัณฑิตพัฒนบริหารศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.พรเทพ ถิ่นแก้ว
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.นฤมล แสงประดับ
มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.ชวลิต บุญปก
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์เทอดศักดิ์ คำเหม็ง
มหาวิทยาลัยนครพนม
รองศาสตราจารย์ยืน ภู่วรรณ
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ นายสัตวแพทย์ ดร.ณัฐพล ภูมิพันธุ์
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นพรัตน์ พุทธกาล
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อนุชา เพียรชนะ
มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เสกสรรค์ สุขะเสนา
มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วลัยพร ทองเจริญบัวงาม
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อลงกรณ์ ละม่อม
มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
อาจารย์ เกษัชกร ดร.รักษิณดา วัฒนาลัย
มหาวิทยาลัยสยาม

เลขานุการ

ผู้อำนวยการกองส่งเสริมการวิจัยและบริการวิชาการ

ผู้ช่วยเลขานุการ

พักรัตริ์โล จันทร์ลอย
จิรารัตน์ ภูสีฤทธิ์

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

อ้อยเป็นพืชเศรษฐกิจสำคัญของประเทศไทย ทั้งในฐานะวัตถุดิบอุตสาหกรรมน้ำตาลและแหล่งวัสดุเหลือใช้ โดยเฉพาะชานอ้อยที่สามารถนำมาใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลเพื่อผลิตพลังงาน ภาพปกวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ฉบับนี้ จึงสะท้อนความเชื่อมโยงระหว่างทรัพยากรทางการเกษตร ชีวมวล และพลังงานทดแทน เพื่อการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าและยั่งยืน แม้ชานอ้อยมีศักยภาพเป็นเชื้อเพลิง แต่ “ขุยมอ” และ “เส้นใยอ้อย” มีสมบัติแตกต่างกัน งานวิจัยในวารสารฉบับนี้พบว่าเส้นใยอ้อยมีคาร์บอนคงตัว สารระเหย คาร์บอน และไฮโดรเจนสูงกว่า จึงมีค่าความร้อนสูงกว่าขุยมอ ขณะที่ขุยมอมีเถ้าและสารอนินทรีย์ โดยเฉพาะองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับซิลิกอนสูงกว่า ผลดังกล่าวชี้ให้เห็นความสำคัญของการพิจารณาสมบัติของชีวมวลแต่ละส่วนก่อนนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง ดังนั้น ภาพต้นอ้อยและขุยมอบนปกจึงสื่อถึงเส้นทางของทรัพยากรจากภาคเกษตรสู่การแปรรูปและการนำวัสดุเหลือใช้กลับมาใช้ประโยชน์ด้านพลังงาน การศึกษาสมบัติของวัสดุอย่างเป็นระบบช่วยสนับสนุนการเลือกใช้ชีวมวลอย่างเหมาะสม ทั้งด้านประสิทธิภาพพลังงาน การจัดการเถ้า และการนำวัสดุแต่ละส่วนไปใช้ประโยชน์ในรูปแบบอื่น

นอกจากนี้ วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ปีที่ 45 ฉบับที่ 4 ยังรวบรวมผลงานวิจัยหลากหลายสาขา ได้แก่ วิทยาศาสตร์ชีวภาพ เทคโนโลยีคอมพิวเตอร์และสารสนเทศ วิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม วิทยาศาสตร์สุขภาพ คณิตศาสตร์ และวิทยาศาสตร์กายภาพ สะท้อนบทบาทของวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีในการสร้างองค์ความรู้และการประยุกต์ใช้เพื่อแก้ไขปัญหาของสังคม กองบรรณาธิการหวังว่าผลงานในวารสารฉบับนี้จะเป็นประโยชน์ต่อนักวิจัย นักวิชาการ นักศึกษา และผู้สนใจ ตลอดจนส่งเสริมการต่อยอดองค์ความรู้สู่การประยุกต์ใช้ การใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ การเพิ่มมูลค่าวัสดุเหลือใช้ และการพัฒนาอย่างยั่งยืนในภาคเกษตร อุตสาหกรรม พลังงาน และสิ่งแวดล้อมต่อไป

รองศาสตราจารย์ นายสัตวแพทย์ ดร.วรพล เองวานิช

ผู้ช่วยบรรณาธิการ

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

สารบัญ

Biological Science

- การคัดกรองแอคติโนแบคทีเรียที่ผลิตสารต้านจุลชีพจากดินป่าพรุเพื่อต้าน *Candida albicans* 417
Screening of antimicrobial-producing actinobacteria from peat soils against *Candida albicans*
 เจษฎา ทองทนต์, ชลธิชา เบญจพาด, จินตนาถ วงศ์ชวลิต และรัชณี มิ่งมา
 Jetsda Tongtoht, Chonticha Benpard, Jintanart Wongchawalit and Ratchanee Mingma

- สารสกัดใบสาบเสือและน้ำนมราชสีห์ยับยั้งการเจริญเติบโตของเซลล์มะเร็งลำไส้และมะเร็งท่อน้ำดี 428
Leaf extracts from *Chromolaena odorata* and *Euphorbia hirta* suppress the growth of colorectal and bile duct cancer cells
 พรประภาวีร์ ตันติเมตตา, นิชาธิศม์ ไชยเมธีเวช, ฉัฐกนก อุไรรัตน์, ดิสทัต ยงประเดิม,
 ธนกฤต รัตนอาชาไนย, สมภพ แซ่เฮง และสุมาลี อบเชย
 Phonprapavee Tantimettha, Nicharas Chaimeteveeth, Chatkanok Urairat, Dissathut Yongpraderm,
 Thanakrit Rattanaarchanai, Sompop Saeheeng and Sumalee Obchoei

Computer and Information Technology

- การจำแนกข่าวโควิด-19 โดยใช้อัลกอริทึมความคล้ายคลึงของโคไซน์ 437
COVID-19 news classification using cosine similarity algorithm
 อุกฤษฏ์วิวัฒน์ พิมพ์พา, สุธิดา ชัยชมชื่น และวาทีณี นุ้ยเพียร
 Aukkritthiwat Phimpha, Suthida Chaichomchuen and Vatinnee Nuipian

- การพัฒนาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโมเดลภาษาขนาดใหญ่สำหรับการสร้างกรณีทดสอบอัตโนมัติ 446
Development and comparative evaluation of large language models for automated test case generation in banking software testing
 หทัยรัตน์ เจนวนิทยา และรัฐศิลป์ รานอกภานุวัชร
 Hathairat Janwittaya and Ratthaslip Ranokphanuwat

Engineering

- การเปรียบเทียบสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของขุยอ้อยและเส้นใยอ้อยต่อการเป็นเชื้อเพลิงแข็งในโรงไฟฟ้าชีวมวล 463
Physicochemical properties comparison of sugarcane bagasse pith and fiber as solid fuel for biomass power plants
 จารุณี เข้มพิลา และภูมินทร์ คงโต
 Jarunee Khempila and Pumin Kongto

- การพัฒนาเตาเผาถ่านมลพิษต่ำขนาด 200 ลิตร เพื่อผลิตถ่านชีวภาพและน้ำส้มควันไม้จากไม้ไผ่: 475
 การเปรียบเทียบกับเตาเผาถ่านแบบดั้งเดิมสำหรับใช้ในชุมชน
Development of a low-emission 200-liter charcoal kiln for producing biochar and wood vinegar from bamboo: A comparison with traditional charcoal kilns for community use
 ศรีกุลณัฐ นิลโนรี และศศิธร สรรพอคำ
 Srikunath Nilnorie and Sasithorn Sunphorka

- ผนังดินอัดจากวัสดุท้องถิ่น จังหวัดกำแพงเพชร 490
Rammed earth from local materials of Kamphaeng Phet Province
 เอกสิทธิ์ เทียนมาศ, พัชรวิรัตน์ หาวไชย, มาณพ ตันเคน และประภัสสรฯ ห่อทอง
 Aekasit Thianmas, Patchareerat HaraChai, Manop Tonken and Prapatsara Hothong

สารบัญ

Environmental Science

ศักยภาพของ *Alcaligenes faecalis* No.4 ในการบำบัด Bisphenol A และสารประกอบอินทรีย์
ในน้ำเสียจากท่าอากาศยาน 499

The potential of *Alcaligenes faecalis* No.4 in the treatment of Bisphenol A and organic compounds
in airport wastewater

ชญาณัฐ วิทยาภิรมย์, ปิยะรัตน์ ปรีย์มาโนช และนารารัตน์พร นวลสุวรรณ
Chayanid Witthayaphirom, Piyarat Premanoch and Nararatchporn Nuansawan

Health Science

การวิเคราะห์ปริมาณฟีนอลิกรวมและความสามารถในการต้านออกซิเดชันของเครื่องดื่มคอมบูชา
จากการหมักชาดำร่วมกับแก่นตะวัน 510

Determination of total phenolic content and antioxidant capacity of Kombucha beverage fermented
from black tea and *Helianthus tuberosus* L.

ธีรธาร คำสะอึง, ธีรภัทร โฆสิตกุล, พัฒนา ศรีพลากิจ และอรสร สารพันโชติวิทยา
Teeratan Khamsaing, Thirapat Kositkul, Pattana Sripalakit and Aurasorn Saraphanchotiwitthaya

การศึกษาเบื้องต้นเพื่อออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ถ่ายภาพหลอดเลือดดำแบบเรียลไทม์ต้นทุนต่ำ
ด้วยคลื่นอินฟราเรดช่วงใกล้ 523

Preliminary study on designing and developing a low-cost, real-time vein visualization
device utilizing near-infrared technology

กรุณา จันทุม, สามารต สินทร และณัฐธินิชา เมืองมูล
Karuna Chuntum, Samart Sinton and Nuttanicha Muangmool

Mathematics

อิทธิพลกลุ่มเพื่อนของนักดื่มหน้าใหม่ที่มีต่อตัวแบบคณิตศาสตร์การระบาดโรคติดสุรา 534

The influence of new drinkers' peer groups on a mathematical model of alcoholism epidemics

กัญญารัตน์ หนูชุม และปฐิณชญาณ์ วิสุทธีสิริ
Kanyarat Noochum and Purinchaya Wisutsiri

Physical Science

การพัฒนาคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศผสมขี้เถ้าแกลบและขวดแก้วรีไซเคิล
ตามแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน 545

Development of aerated lightweight concrete incorporating rice husk ash and recycled glass
bottles under the circular economy approach

ธรรพ บุศย์น้ำเพชร, นิพนธ์ ต้นไพบูลย์กุล และธีรสิริ เกิดทอง
Tharaporn Budnumpetch, Nipon Tanpaiboonkul and Thiansiri Kertthong

การคัดกรองแอคติโนแบคทีเรียที่ผลิตสารต้านจุลชีพจากดินป่าพรุเพื่อต้าน *Candida albicans*

Screening of antimicrobial-producing actinobacteria from peat soils against *Candida albicans*

เจษฎา ทองทัศนีย์¹, ชลธิชา เบ็ญพาด¹, จินตนาถ วงศ์ชวลิต¹ และรัชณี มิ่งมา^{1*}

Jetsda Tongtoht¹, Chonticha Benpard¹, Jintanart Wongchawalit¹ and Ratchanee Mingma^{1*}

Received: 2 January 2025 ; Revised: 8 July 2025 ; Accepted: 5 August 2025

บทคัดย่อ

ยีสต์ *Candida albicans* เป็นเชื้อก่อโรคที่พบบ่อยที่สุด ซึ่งเป็นสาเหตุของการติดเชื้อในเยื่อเมือกและระบบต่าง ๆ ของร่างกาย นอกจากนี้ยังเป็นสาเหตุหลักของการติดเชื้อราจากทั่วโลกประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ สารประกอบที่ได้จากจุลินทรีย์กำลังได้รับความสนใจในฐานะทางเลือกที่มีแนวโน้มดีในการควบคุมโรคจากเชื้อรา โดยเฉพาะอย่างยิ่งในการต่อสู้กับเชื้อ *C. albicans* ซึ่งอาจต้องอยู่ในระหว่างการรักษา งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินฤทธิ์การต้าน *C. albicans* CBS 562 ของแอคติโนแบคทีเรียที่แยกจากดินป่าพรุ แอคติโนแบคทีเรียทั้งหมด 20 ไอโซเลต ที่นำมาทดสอบแสดงฤทธิ์ต้าน *C. albicans* CBS 562 บนอาหารแข็ง starch casein และ glucose yeast extract malt extract โดยใช้วิธี agar overlay ไอโซเลต 11A3 และ 41N6 ซึ่งแสดงฤทธิ์การยับยั้งมากที่สุดถูกคัดเลือกเพื่อนำมาทดสอบฤทธิ์ต้าน *C. albicans* CBS 562 ของสารสกัดหยาบ พบว่าสารสกัดหยาบจาก 11A3 และ 41N6 แสดงฤทธิ์ยับยั้งการเจริญของ *C. albicans* CBS 562 โดยมีค่าความเข้มข้นต่ำที่สุดที่ยับยั้งการเจริญ (MIC) เท่ากันที่ 3.125 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร และมีค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่ฆ่าเชื้อรา (MFC) เท่ากับ 6.250 และ 3.125 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทด์ของยีน 16S rRNA พบว่าไอโซเลต 11A3 และ 41N6 อยู่ในสกุล *Streptomyces* และมีความคล้ายคลึงของลำดับนิวคลีโอไทด์สูงที่สุดกับ *Streptomyces murinus* NBRC 12799^T (99.54 เปอร์เซ็นต์) และ *Streptomyces malaysiense* MUSC 136^T (99.37 เปอร์เซ็นต์) ตามลำดับ งานวิจัยนี้ชี้ให้เห็นว่าแอคติโนแบคทีเรียมีศักยภาพสูงในการยับยั้ง *C. albicans* ซึ่งอาจนำไปสู่การประยุกต์ใช้ในด้านเทคโนโลยีชีวภาพและเภสัชกรรม

คำสำคัญ: แอคติโนแบคทีเรีย, *Candida albicans*, ฤทธิ์ต้านแคนดิดา, *Streptomyces*

Abstract

Yeast *Candida albicans* is the most frequent pathogen responsible for mucosal and systemic infections. Furthermore, it is the primary cause of approximately 70% of fungal infections globally. Microorganism-derived compounds are gaining attention as a promising alternative approach for controlling fungal diseases. The use of these compounds to combat *C. albicans*, which may develop drug resistance during therapy, is particularly promising. This study aimed to assess the anticandidal activity of actinobacteria obtained from peat soils against *C. albicans* CBS 562. Seventeen tested actinobacterial isolates exhibited anticandidal activity on starch casein agar and glucose yeast extract malt extract agar using the agar overlay method. The isolates 11A3 and 41N6, which showed the highest activity, were selected for evaluating the anticandidal efficacy of their crude extracts. The crude extracts of 11A3 and 41N6 demonstrated inhibitory effects on *C. albicans* CBS 562, with identical minimum inhibitory concentration (MIC) values of 3.125 mg/mL and minimum fungicidal concentration (MFC) values of 6.250 mg/mL and 3.125 mg/mL, respectively.

¹ ภาควิชาวิทยาศาสตร์และนวัตกรรมชีวภาพ คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

¹ Department of Science and Bioinnovation, Faculty of Liberal Arts and Science, Kasetsart University, Kamphaeng Saen Campus.

* Corresponding author: Ratchanee Mingma, Email: ratchanee.mi@ku.th

Based on 16S rRNA gene sequence analysis, isolates 11A3 and 41N6 belong to the genus *Streptomyces*, showing the highest sequence similarity to *Streptomyces marinus* NBRC 12799^T (99.54%) and *Streptomyces malaysiense* MUSC 136^T (99.37%), respectively. This research indicates that actinobacteria have a strong potential to inhibit *C. albicans*, suggesting applications in biotechnology and pharmaceuticals.

Keywords: Actinobacteria, *Candida albicans*, anticandidal activity, *Streptomyces*

บทนำ

แคนดิดา อัลบิแคนส์ (*Candida albicans*) เป็นยีสต์ที่จัดเป็นเชื้อประจำถิ่น (normal flora) อาศัยอยู่ตามส่วนต่าง ๆ ของร่างกาย เช่น ช่องปาก ช่องคลอด ผิวหนัง ทางเดินปัสสาวะ และทางเดินอาหาร เป็นต้น เมื่อร่างกายมีภูมิคุ้มกันต่ำ เชื้อชนิดนี้จะเจริญและทำให้เกิดโรค เกิดการติดเชื้อที่ผิวหนังและเยื่อเมือกต่าง ๆ ยีสต์แคนดิดาเป็นสาเหตุหลักของการติดเชื้อจากราประมาณ 70 เปอร์เซ็นต์ทั่วโลก (Morad *et al.*, 2018) โรคจาก *C. albicans* เป็นสาเหตุหลักของการติดเชื้อที่คุกคามชีวิตในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมา แม้จะได้รับการรักษาแล้ว แต่อัตราการเสียชีวิตยังสูงถึง 40 เปอร์เซ็นต์ (Basmacıyan *et al.*, 2019; Chen *et al.*, 2020) ปัจจุบันการรักษาโรคติดเชื้อจาก *C. albicans* นิยมใช้ยาปฏิชีวนะซึ่งมีข้อจำกัดและมีรายงานพบการดื้อต่อยาปฏิชีวนะของ *C. albicans* เพิ่มขึ้น เช่น ยาฟลูโคนาโซล (fluconazole) (Berkow & Lockhart, 2017) ดังนั้นการพัฒนาและค้นหาสารที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพในการยับยั้งยีสต์ก่อโรค *C. albicans* จึงมีความสำคัญ

แอคติโนแบคทีเรียเป็นแบคทีเรียแกรมบวกมีปริมาณของเบสกวานีนและไซโทซีนในจีโนมสูงมากกว่า 55 เปอร์เซ็นต์ (Duddu & Guntuku, 2015; Jose & Jha, 2016) เป็นแบคทีเรียกลุ่มสำคัญที่มีรายงานว่าสามารถผลิตสารที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพได้หลากหลายชนิด แอคติโนแบคทีเรียมีการเจริญเป็นเส้นสายที่มีลักษณะทางสัณฐานวิทยาคล้ายคลึงกับเชื้อรา แต่มีขนาดของเส้นใยเล็กกว่า แอคติโนแบคทีเรียเป็นจุลินทรีย์ที่พบกระจายตัวทั่วไปในธรรมชาติ สามารถพบได้ทุกสภาพแวดล้อมทั้งในดินและแหล่งน้ำ (Shrestha *et al.*, 2021) มีรายงานว่าแอคติโนแบคทีเรียผลิตสารเมแทบอลิต์ที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพได้หลากหลายชนิดคิดเป็น 45 เปอร์เซ็นต์ของสารเมแทบอลิต์ที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพทั้งหมดที่ผลิตจากจุลินทรีย์ เช่น สารปฏิชีวนะต้านเชื้อรา สารต้านมะเร็ง สารกดระบบภูมิคุ้มกัน สารฆ่าแมลง และสารปราบวัชพืช เป็นต้น (Abdel-Razek *et al.*, 2020; Bubic, 2018; Harir *et al.*, 2018) โดยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพประมาณ 7,600 ชนิดผลิตจากแอคติโนแบคทีเรียในสกุล *Streptomyces* spp. (Berdy, 2005)

ป่าพรุ (peat swamp forest) เป็นป่าดิบชื้นชนิดหนึ่งที่แตกต่างกันจากป่าชนิดอื่น โดยมีน้ำท่วมขังตลอดทั้งปีและมี

กิจกรรมการย่อยสลายของจุลินทรีย์ต่ำ ดินของป่าพรุประกอบด้วยชั้นพีทหนาประมาณ 0.5-5 เมตร มีค่า pH เป็นกรดอยู่ในช่วง 4.0-6.0 (Niyasom *et al.*, 2015) ตามรายงานการแยกและศึกษาแอคติโนแบคทีเรียจากดินพรุในประเทศไทย พบว่ามีการค้นพบแอคติโนแบคทีเรียสายพันธุ์ใหม่หลายชนิด เช่น *Streptomyces acididurans* และ *Streptomyces acidicola* (Chantavorakit *et al.*, 2021; Lipun *et al.*, 2020) นอกจากนี้ยังมีการศึกษาของ Thawai *et al.* (2000) และ Niyasom *et al.* (2015) ที่พบความสามารถในการยับยั้งจุลินทรีย์หลายชนิดของแอคติโนแบคทีเรียที่แยกได้จากดินพรุในจังหวัดตรังและพัทลุงของประเทศไทย ซึ่งแสดงให้เห็นถึงศักยภาพในการผลิตสารที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพในการยับยั้งเชื้อก่อโรคหลายชนิด จากเหตุผลดังกล่าวป่าพรุจึงจัดเป็นระบบนิเวศที่จำเพาะและน่าสนใจในการศึกษากิจกรรมการยับยั้งยีสต์ก่อโรค *C. albicans* ของแอคติโนแบคทีเรีย วัตถุประสงค์ของการวิจัยนี้คือเพื่อศึกษากิจกรรมของแอคติโนแบคทีเรียที่แยกจากดินป่าพรุต่อการยับยั้งยีสต์ *C. albicans* ซึ่งอาจนำไปสู่ความรู้ใหม่ที่มีประโยชน์ทางเทคโนโลยีชีวภาพ และเภสัชกรรมต่อไปในอนาคต

การทดลอง

1. การเตรียมเชื้อแอคติโนแบคทีเรีย

นำแอคติโนแบคทีเรียจำนวน 20 ไอโซเลตที่แยกจากดินป่าพรุ ของสวนพฤกษศาสตร์ อำเภอกาหลง จังหวัดระยอง ประเทศไทย มาเลี้ยงบนอาหารแข็ง International *Streptomyces* Project 2 (ISP2) agar (Shirling & Gottlieb, 1966) บ่มที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน จากนั้นใช้หลอดเชื้อ (loop) ที่ผ่านการเผาไฟจนร้อนแดง เชียสเปอร์และเส้นใย 1-2 หลูป ใส่หลอดไมโครเซนตริฟิวส์ที่มี 0.85 เปอร์เซ็นต์ (w/v) โซเดียมคลอไรด์ ปริมาตร 800 ไมโครลิตร เพื่อเตรียมเป็นซัสเพนชัน (suspension) สำหรับการทดลองในขั้นตอนถัดไป

2. การทดสอบกิจกรรมการยับยั้งยีสต์ *C. albicans* CBS 562

ทดสอบกิจกรรมการยับยั้งยีสต์ *C. albicans* CBS 562 ด้วยวิธี agar overlay (Mingma *et al.*, 2014) บนอาหาร

แข็ง starch casein (SC) และ glucose yeast extract malt extract (GYM) (Ait Assou *et al.*, 2023) ดูดซับเพนชันแอกติโนแบคทีเรียปริมาณ 5 ไมโครลิตร หยดบนผิวหน้าอาหารทดสอบ ทำการทดลอง 3 ซ้ำ บ่มที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียสเป็นเวลา 7 วัน เตรียมยีสต์ทดสอบโดยเลี้ยงยีสต์ในอาหารเหลว Yeast extract peptone dextrose (YPD) บ่มแบบเขย่าที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ปรับให้มีปริมาณเซลล์เริ่มต้น (10^7 เซลล์ต่อมิลลิลิตร) ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (spectrophotometer) ที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร ให้มีค่าเท่ากับ 0.12 จากนั้นดูดเซลล์ยีสต์ ปริมาตร 100 ไมโครลิตร ผสมในอาหารแข็งกึ่งเหลว YPD soft agar (วุ้น 0.5 เปอร์เซ็นต์, w/v) ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันแล้วเทราดบนจานอาหารเลี้ยงเชื้อที่เลี้ยงแอกติโนแบคทีเรียไว้ 7 วัน บ่มเพิ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง สังเกตบริเวณยับยั้งที่เกิดขึ้นรอบโคโลนีแอกติโนแบคทีเรีย วัดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางโซนยับยั้งและเส้นผ่านศูนย์กลางโคโลนีแอกติโนแบคทีเรียในหน่วยเซนติเมตร คำนวณค่าความสามารถในการยับยั้ง (Inhibition capacity; IC) ซึ่งเป็นอัตราส่วนระหว่างเส้นผ่านศูนย์กลางโซนยับยั้งต่อเส้นผ่านศูนย์กลางโคโลนี

3. การสกัดสารเมตาบอไลต์ทุติยภูมิจากแอกติโนแบคทีเรีย

คัดเลือกแอกติโนแบคทีเรียที่ให้ผลการยับยั้งยีสต์บนจานอาหารแข็งดีที่สุด นำมาเลี้ยงในอาหารเหลว Tryptic soy (TS) ที่เติมน้ำตาลกลูโคส 1.0 เปอร์เซ็นต์ บ่มแบบเขย่าที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงที่ 6,900 g เป็นเวลา 15 นาที เก็บส่วนใสด้านบนนำมาสกัดด้วยตัวทำละลายเอทิลอะซิเตทในอัตราส่วน 1:1 (v/v) เขย่าข้ามคืนที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที จากนั้นเก็บชั้นของตัวทำละลายนำมาระเหยแยกตัวทำละลายด้วยเครื่องระเหยสารแบบหมุน (evaporator) ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส ละลายสารสกัดที่ได้ออกด้วยสารละลาย 1 เปอร์เซ็นต์ (V/V) ไดเมทิล ซัลฟอกไซด์ (Dimethyl sulfoxide, DMSO) ให้ได้ความเข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร เก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส สำหรับการทดสอบในขั้นตอนถัดไป

4. การทดสอบฤทธิ์ของสารสกัดยับยั้ง *C. albicans* CBS 562

ทดสอบฤทธิ์ทางชีวภาพของสารสกัดยับยั้งต่อการยับยั้ง *C. albicans* CBS 562 ด้วยวิธี agar well diffusion โดย

เตรียมเชื้อ *C. albicans* ให้มีปริมาณเซลล์เริ่มต้น 10^7 เซลล์ต่อมิลลิลิตร ตามวิธีการข้อ 2 จากนั้นเกลี่ยเชื้อ *C. albicans* ให้ทั่วผิวหน้าอาหารแข็งทดสอบ Sabouraud dextrose (SD) (HiMedia, India) โดยใช้ไม้พันสำลี (cotton swab) ป้อนเชื้อรอบจานอาหารแห้ง ใช้ที่เจาะจุกคอร์ก (cork borer) ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.7 เซนติเมตร เจาะหลุมบนจานอาหารเลี้ยงเชื้อและเติมสารสกัดยับยั้งปริมาณ 50 ไมโครลิตร ลงในแต่ละหลุม ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ใช้ยาปฏิชีวนะไนสแตติน (nystatin) เข้มข้น 50 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร เป็นตัวควบคุมผลบวก (positive control) และสารละลาย 1 เปอร์เซ็นต์ (V/V) DMSO เป็นตัวควบคุมผลลบ (negative control) บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตรวจผลโดยวัดเส้นผ่านศูนย์กลางโซนยับยั้งที่เกิดขึ้นในหน่วยเซนติเมตร

5. การหาค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่ยับยั้งและฆ่าเชื้อจุลินทรีย์

หาค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่ยับยั้งเชื้อจุลินทรีย์ (minimum inhibitory concentration; MIC) ของสารสกัดยับยั้งต่อการยับยั้ง *C. albicans* CBS 562 ในเพลท 96 หลุม (96-well plate) ตามวิธีดัดแปลงของ Jamal and Satheesh (2022) ดังนี้ เติมน้ำอาหารเหลว SD ปริมาตร 50 ไมโครลิตร ลงในแต่ละหลุม แล้วเติมสารสกัดยับยั้งปริมาณ 50 ไมโครลิตร ในหลุมแรก ผสมให้เข้ากัน จากนั้นดูดสารละลายปริมาณ 50 ไมโครลิตร ใส่หลุมที่ 2 เพื่อเจือจางสารสกัดยับยั้งที่ละ 2 เท่า ทำซ้ำจนถึงหลุมที่ 10 และดูดสารละลายในหลุมสุดท้ายทิ้งไป 50 ไมโครลิตร จะได้ความเข้มข้นของสารสกัดยับยั้งในช่วง 12.5 – 0.024 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ทำการทดลองความเข้มข้นละ 3 ซ้ำ จากนั้นเติมเชื้อ *C. albicans* CBS 562 (10^7 เซลล์/มิลลิลิตร) ปริมาตร 50 ไมโครลิตร บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ชุดควบคุมผลลบ คือหลุมที่มีอาหารเหลว SD เพียงอย่างเดียว และชุดควบคุมผลบวก คือหลุมที่มียีสต์ในอาหารเหลว SD ที่ไม่มีการเติมสารสกัดยับยั้ง เมื่อครบเวลาเติมสารละลาย 0.02 เปอร์เซ็นต์ รีซาซูลิน (resazurin) หลุมละ 30 ไมโครลิตร บ่มที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง อ่านผลการทดสอบโดยสังเกตการเปลี่ยนสีรีซาซูลิน ความเข้มข้นที่น้อยที่สุดของสารสกัดยับยั้งที่ทำให้รีซาซูลินไม่เปลี่ยนเป็นสีชมพูบันทึกเป็นค่า MIC

การหาค่าความเข้มข้นต่ำสุดที่ฆ่าเชื้อรา (minimum fungicidal concentration; MFC) ใช้หลอดเชื้อเชื้อจุลินทรีย์สารละลายในแต่ละหลุม นำมาลาบนอาหารแข็ง SD บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง สังเกตการเจริญของยีสต์ ความเข้มข้นที่น้อยที่สุดของสารสกัดยับยั้งที่ไม่พบการเจริญของยีสต์บนอาหารเลี้ยงเชื้อ บันทึกเป็นค่า MFC

6. การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแอดดีโนแบคทีเรีย

เลี้ยงแอดดีโนแบคทีเรียบนจานอาหารแข็ง ISP 3 (Shirling & Gottlieb, 1966) จากนั้นปิ้งกระจกปิดสไลด์ปลอดเชื้อให้เย็นทำมุม 45 องศากับผิวหน้าอาหาร บ่มที่อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 วัน ดึงกระจกปิดสไลด์นำมาวางบนแผ่นสไลด์ที่หยดสีย้อมคริสตัลไวโอเล็ต นำไปส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยายภาพ 1000 เท่า เพื่อศึกษาโครงสร้างเส้นใยและการจัดเรียงตัวของสปอร์ บันทึกสปีชีส์เส้นใยอาหาร และสัณฐานของแอดดีโนแบคทีเรียที่เจริญบนอาหาร ISP 3

7. การระบุชนิดของแอดดีโนแบคทีเรียโดยการวิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทด์บางส่วนของยีน 16S rRNA

เลี้ยงแอดดีโนแบคทีเรียในอาหารเหลว Glucose yeast extract (GYE) บ่มแบบเขย่าที่ความเร็ว 150 รอบต่อนาที อุณหภูมิ 28 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 วัน เก็บตะกอนเซลล์หลังการปั่นเหวี่ยงที่ความเร็ว 8,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที นำมาสกัดเอนโดตามวิธีดัดแปลงของ Také *et al.* (2015) นำดีเอ็นเอมาทำพีซีอาร์ (polymerase chain reaction; PCR) เพื่อเพิ่มปริมาณยีน 16S rRNA โดยใช้ไพรเมอร์ 1F (5'-TCACGGAGAGTGTGATCCTG-3') และ 1530R (5'-AAGGAGATCCAGCCGCA-3') (Kataoka *et al.*, 1997) โดยใช้สภาวะในการทำพีซีอาร์ตามที่ระบุโดย Mingma *et al.* (2014) กำจัดไพรเมอร์ออกจากผลิตภัณฑ์พีซีอาร์ด้วยชุดสกัดเจลและและพีซีอาร์สำเร็จรูป FavorPrep™ GEL/PCR Purification Kit (Favrogen, Taiwan) ตามคู่มือแนะนำ และส่งวิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทด์ (sequencing) นำข้อมูลลำดับนิวคลีโอไทด์ที่ได้มาเปรียบเทียบกับฐานข้อมูล EzBioCloud (Yoon *et al.*, 2017) เพื่อระบุชนิดของแอดดีโนแบคทีเรีย สร้างแผนภูมิต้นไม้ (phylogenetic tree) ด้วยวิธี Neighbor-Joining (Saitou & Nei, 1987) เพื่อดูความสัมพันธ์ทางวิวัฒนาการโดยใช้โปรแกรม MEGA 11.0 (Tamura *et al.*, 2021)

8. การวิเคราะห์ทางสถิติ

ข้อมูลถูกนำมาวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) โดยใช้ซอฟต์แวร์ R เวอร์ชัน 4.4.0 โดยข้อมูลในแต่ละการทดลองจะแสดงเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ ($n = 3$) และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ $p < 0.05$

ผลการทดลองและอภิปรายผล

1. ทดสอบการยับยั้งยีสต์แคนดิดาชั้นปฐมภูมิ

จากการศึกษากิจกรรมการยับยั้งยีสต์ *C. albicans* CBS 562 ด้วยวิธี agar overlay พบว่าแอดดีโนแบคทีเรียจำนวน 17 ไอโซเลต จากทั้งหมด 20 ไอโซเลต (คิดเป็น 85 เปอร์เซ็นต์) สามารถยับยั้งยีสต์แคนดิดาได้ (Figure 1) มีแอดดีโนแบคทีเรียจำนวน 8 ไอโซเลต ให้ผลการยับยั้งยีสต์เมื่อเลี้ยงบนอาหาร SC โดยมีค่าความสามารถการยับยั้ง 1.27 ± 0.32 ถึง 4.10 ± 0.90 และมีแอดดีโนแบคทีเรียจำนวน 14 ไอโซเลต ให้ผลการยับยั้งยีสต์เมื่อเลี้ยงบนอาหาร GYM มีค่าความสามารถในการยับยั้ง 0.46 ± 0.06 ถึง 5.57 ± 0.15 (Table 1) ไอโซเลต 21N3 ให้ผลการยับยั้งยีสต์สูงที่สุดเมื่อเลี้ยงบนอาหาร SC แต่สูญเสียกิจกรรมการยับยั้งเมื่อเลี้ยงบนอาหาร GYM เช่นเดียวกับไอโซเลต 11A3 และ 41N6 ให้ผลการยับยั้งยีสต์บนอาหาร GYM สูงที่สุด แต่ไม่มีกิจกรรมการยับยั้งเมื่อเลี้ยงบนอาหาร SC มีแอดดีโนแบคทีเรียจำนวน 5 ไอโซเลต ยับยั้งยีสต์ได้บนอาหารทั้ง 2 ชนิดแต่ให้ผลการยับยั้งในระดับปานกลาง เช่น ไอโซเลต 21N2 และ 21N18 งานวิจัยของ Assou *et al.* (2023) ทดสอบกิจกรรมการยับยั้งจุลินทรีย์ก่อโรค พบว่าแอดดีโนแบคทีเรียไอโซเลต BS61 ยับยั้ง *Listeria innocua* ได้ดีเมื่อเลี้ยงบนอาหาร SC แต่สูญเสียกิจกรรมการยับยั้งเมื่อเลี้ยงบนอาหาร GYM และ Bennett's ไอโซเลต DS169 ยับยั้ง *C. albicans* เมื่อเลี้ยงบนอาหาร Bennett's และ SC และยับยั้ง *S. aureus* เฉพาะเมื่อเลี้ยงบนอาหาร Bennett's สอดคล้องกับงานวิจัยนี้ โดยไอโซเลต 21N3, 51N2 และ 21A2 พบการต้านยีสต์บนอาหาร SC แต่ไม่พบการต้านยีสต์บนอาหาร GYM และในขณะเดียวกัน พบมี 9 ไอโซเลต เช่น 41N6 ที่แสดงการต้านยีสต์บนอาหาร GYM เท่านั้น งานวิจัยของ Arasu *et al.* (2009) เลี้ยงแอดดีโนแบคทีเรียในอาหารที่มีน้ำตาลกลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอน พบว่าเชื่อว่าการผลิตสารที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพดีกว่าอาหารที่มีแป้งเป็นแหล่งคาร์บอน ทั้งนี้ นอกเหนือจากองค์ประกอบของอาหารเลี้ยงเชื้อที่เป็นปัจจัยสำคัญต่อการผลิตสารที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพของแอดดีโนแบคทีเรียแล้ว ยังขึ้นกับปัจจัยภายนอกอื่น ๆ ได้แก่ อุณหภูมิ ค่าความเป็นกรดด่าง และอัตราการกวนเป็นต้น (AL-Ghazali & Omran, 2017; Evangelista-Martínez *et al.*, 2023)

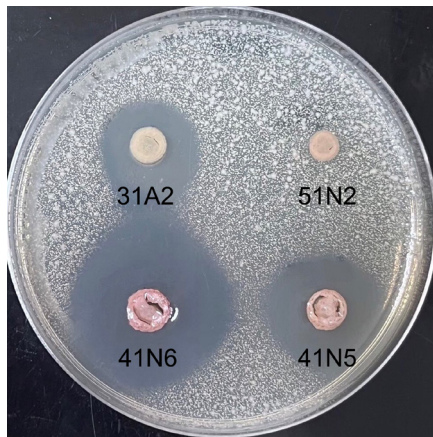


Figure 1 Selected representative examples of actinobacteria isolates showing anticandidal activities.

Table 1 Anticandidal activity of actinobacteria on SC and GYM agar medium for 7 days at 28 °C.

Isolate	Inhibition capacity (IC)	
	SC	GYM
21N2	1.68 ± 0.11^{cd}	0.46 ± 0.06^d
21N3	4.10 ± 0.90^a	-
21N12	-	2.39 ± 0.55^{bcd}
21N18	1.84 ± 0.15^{bcd}	4.11 ± 3.08^{ab}
31N1	2.50 ± 0.30^b	1.71 ± 0.34^{cd}
31N2	-	1.81 ± 0.92^{cd}
41N5	-	2.33 ± 0.45^{bcd}
41N6	-	5.53 ± 0.12^a
51N2	1.67 ± 0.02^{cd}	-
11A3	-	5.57 ± 0.15^a
21A2	1.90 ± 0.19^{bcd}	-
31A2	2.05 ± 0.28^{bc}	3.97 ± 1.10^{ab}
51A2	-	1.63 ± 0.08^{cd}
42N4	-	1.30 ± 0.20^{cd}
52A4	1.27 ± 0.32^d	1.49 ± 0.17^{cd}
52A10	-	2.65 ± 1.19^{bc}
43A1	-	1.74 ± 0.66^{cd}

Note: -, no activity. The level of inhibition was calculated from the ratio between the diameter of the inhibition zone and actinobacterial colony (3 replicates). Different superscript letters within the same column indicate statistically significant differences at $p < 0.05$ according to Duncan's Multiple Range test.

2. การทดสอบฤทธิ์ทางชีวภาพของสารสกัดหยาบในการยับยั้งยีสต์ *C. albicans* CBS 562

คัดเลือกแอคติโนแบคทีเรียที่ให้ผลการยับยั้งยีสต์ดีที่สุดจำนวน 2 ไอโซเลต คือ 11A3 และ 41N6 นำมาศึกษาฤทธิ์ทางชีวภาพของสารสกัดหยาบต่อการยับยั้งยีสต์ *C. albicans* CBS 562 ด้วยวิธี agar well diffusion พบว่าสารสกัดหยาบจาก 11A3 และ 41N6 สามารถยับยั้งยีสต์ *C. albicans* โดยมีเส้นผ่านศูนย์กลางโซนยับยั้งเท่ากับ 1.90 ± 0.20 และ 1.77 ± 0.12 เซนติเมตร (Table 2) ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าสารสกัดหยาบเอทิลอะซิเตทสามารถยับยั้งยีสต์ได้ดี โดยมีฤทธิ์ต้าน *C. albicans* มากกว่า 50 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับยาปฏิชีวนะไนสแตติน

งานวิจัยของ Sarika *et al.* (2021) ทดสอบกิจกรรมการยับยั้ง *C. albicans* ของสารสกัดหยาบที่สกัดด้วยเอทิลอะซิเตทจากแอคติโนแบคทีเรียที่แยกจากดินในประเทศอินเดีย ด้วยวิธี agar well diffusion พบมีจำนวน 21 จาก 28 ไอโซเลตแสดงกิจกรรมการยับยั้งได้ คิดเป็น 75 เปอร์เซ็นต์โดยไอโซเลต BHPL-KSKU5 มีกิจกรรมยับยั้งสูงสุดโดยมีโซนยับยั้งเท่ากับ 1.60 ± 0.40 เซนติเมตร

งานวิจัยของ Wei *et al.* (2020) พบว่าสารสกัดหยาบที่สกัดด้วยเมทานอลจาก *Streptomyces* sp. YYS-7 ที่แยกจากดินรอบรากพืชในประเทศจีน มีกิจกรรมในการยับยั้งเชื้อราก่อโรคในพืชได้หลายชนิดอย่างมีประสิทธิภาพ เช่น *Fusarium oxysporum*, *Colletotrichum fragariae*, *Colletotrichum gloeosporioides* และ *Colletotrichum acutatum* จากงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าแอคติโนแบคทีเรียที่แยกจากดินสามารถยับยั้งเชื้อยีสต์แคนดิดารวมถึงราเส้นใยอื่น ๆ ได้

Table 2 Anticandidal activity of crude ethyl acetate extracts of 11A3 and 41N6

Crude extract	Zone of inhibition (cm)
11A3	1.90 ± 0.20^b
41N6	1.77 ± 0.12^b
Nystatin (50 mg mL ⁻¹)	3.48 ± 0.03^a
Dimethyl sulfoxide	-

Note: -, no activity

The level of growth inhibition was assessed by the average zone of inhibition diameter recorded (3 replicates). Different superscript letters within the same column indicate statistically significant differences at $p < 0.05$ according to Duncan's Multiple Range test.

3. การหาค่าความเข้มข้นที่ต่ำที่สุดที่ยับยั้งและฆ่าเชื้อจุลินทรีย์

หาค่า MIC ของสารสกัดหยาบด้วยวิธี broth microdilution โดยใช้ตัวบ่งชี้คือการเปลี่ยนสีของรีซารูริน (7-hydroxy-3H-phenoxazin-3-one 10-oxide) ในเพลท 96 หลุม รีซารูรินนิยมใช้เป็นตัวบ่งชี้ความมีชีวิตของเซลล์ โดยรีซารูรินมีสีน้ำเงินเมื่อทำปฏิกิริยากับเอนไซม์ในไมโทคอนเดรีย เช่น เอนไซม์ NADPH dehydrogenase ซึ่งพบในเซลล์ยีสต์ที่มีชีวิต จะถูกเปลี่ยนเป็นสารรีโซรูฟิน (resorufin) ซึ่งมีสีชมพู (O'Brien *et al.*, 2000) ดังนั้นเมื่อผสมรีซารูรินกับเซลล์แขวนลอย หากสารละลายเปลี่ยนเป็นสีชมพูบ่งชี้ว่าการเจริญของยีสต์เนื่องจากมีกิจกรรมของเอนไซม์ในไมโทคอนเดรีย แต่หากสารละลายไม่เปลี่ยนสี แสดงว่าไม่มีการเจริญของยีสต์

ผลการทดลองพบว่าสารสกัดหยาบ 11A3 และ 41N6 มีค่า MIC เท่ากันที่ 3.125 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร (Figure 2) สังเกตจากการเปลี่ยนแปลงของรีซารูรินในคอลัมน์ที่ 3 (3.125 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร) เทียบกับคอลัมน์ที่ 11 (negative control) คืออาหารเลี้ยงเชื้อที่ไม่มียีสต์ทดสอบ โดยค่า MIC นั้นมีการผันแปรอันเนื่องมาจากหลายปัจจัย เช่น ชนิดของจุลินทรีย์ ความไวต่อสารที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพของจุลินทรีย์ ความเข้มข้นและชนิดของสารที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพ องค์ประกอบของอาหารเลี้ยงเชื้อ เวลา และอุณหภูมิที่ใช้ในการเพาะเลี้ยง จุลินทรีย์ล้วนแล้วแต่เป็นปัจจัยที่มีผลต่อค่า MIC ทั้งสิ้น (Vangadeesh *et al.*, 2011) จากการหาความเข้มข้นที่ต่ำที่สุดของสารสกัดหยาบที่ฆ่าเชื้อราหรือค่า MFC พบว่าสารสกัดหยาบ 11A3 และ 41N6 มีค่า MFC เท่ากับ 6.250 และ 3.125 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ (Figure 3)

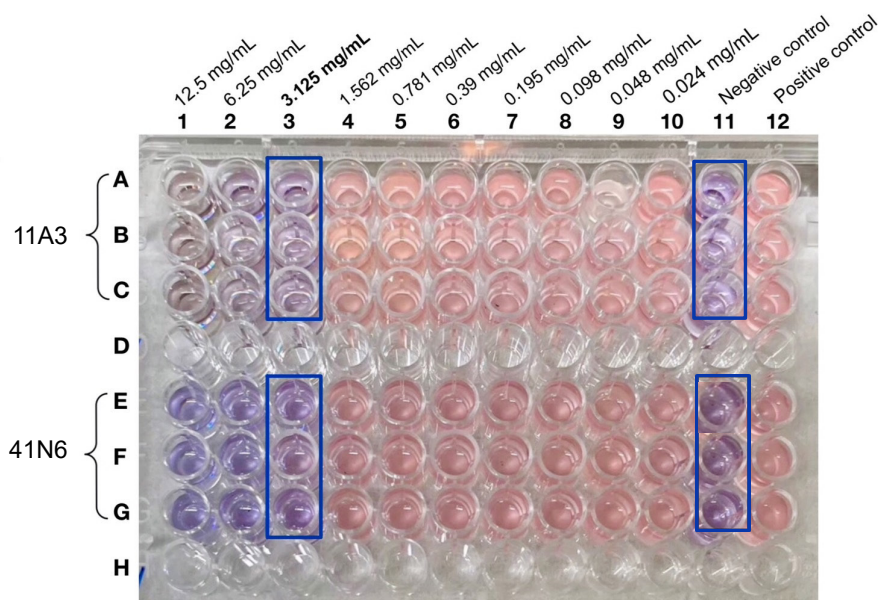


Figure 2 The 96 well plate broth microdilution method using Resazurin dye for the determination of the MIC of the actinobacterial extracts 11A3 and 41N6 against *Candida albicans* CBS 562.

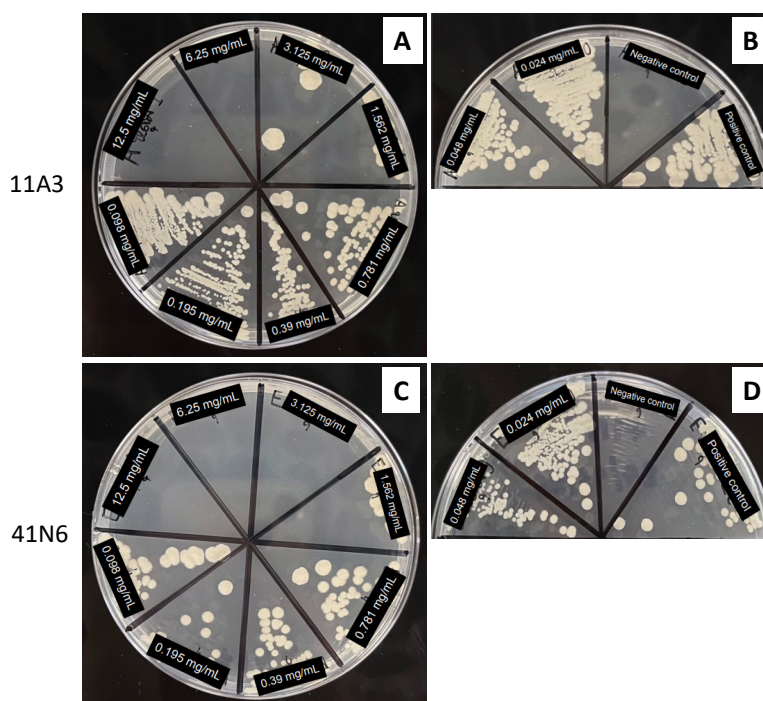


Figure 3 Plates for determining the minimum fungicidal concentration (MFC) of crude extracts from isolates 11A3 (A-B) and 41N6 (C-D) against *Candida albicans* CBS 562.

4. การศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของแอคติโนแบคทีเรีย

จากการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาของไอโซเลต 11A3 และ 41N6 บนอาหาร ISP 3 โดยวิธีการลากเชื้อแบบตัดกัน (cross streak) พบว่าทั้ง 2 ไอโซเลตมีลักษณะโคโลนีแตกต่างกัน โดยไอโซเลต 11A3 สร้างสปอร์สีน้ำตาลกระจาย

เป็นวงรอบโคโลนี เมื่อส่องภายใต้กล้องจุลทรรศน์ที่กำลังขยายภาพ 1000 เท่า พบเส้นใยและสายสปอร์ขนาดเล็กที่มีลักษณะขดเป็นเกลียว ส่วนไอโซเลต 41N6 สร้างสปอร์สีน้ำตาลอ่อน พบเส้นใยและสายสปอร์ที่มีลักษณะขดเป็นเกลียว (Figure 4) บ่งชี้ให้เห็นว่าทั้ง 2 ไอโซเลตจัดอยู่ในสกุล *Streptomyces*

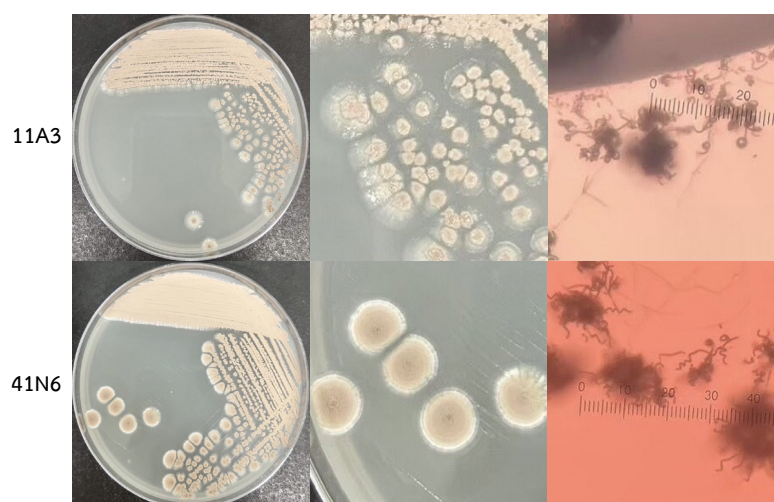


Figure 4 Morphological characterization and microscopic observation of actinobacteria isolates 11A3 and 41N6 grown on ISP 3 medium after incubation at 28 °C for 7 days.

5. การจัดจำแนกแอกติโนแบคทีเรียด้วยเทคนิคทางโมเลกุลโดยการวิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทด์บางส่วนของยีน 16S rRNA

จากการระบุชนิดของแอกติโนแบคทีเรียโดยการวิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทด์บางส่วนของยีน 16S rRNA พบว่าไอโซเลต 11A3 และ 41N6 จัดอยู่ในสกุล *Streptomyces* (Figure 5) โดยมีความคล้ายคลึงกับ *Streptomyces murinus* NBRC 12799^T (AB184155) 99.54 เปอร์เซ็นต์ และ *Streptomyces malaysiense* MUSC 136^T (LBDA02000093) 99.37 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (Table 3) สอดคล้องกับหลายงานวิจัยที่พบว่าแอกติโนแบคทีเรียในสกุล *Streptomyces* ที่แยกจากดินมีการแสดงกิจกรรมทางชีวภาพในการยับยั้งจุลินทรีย์อื่น

มากกว่าแอกติโนแบคทีเรียในสกุลอื่น (Charousová *et al.*, 2017; Daquiaoag & Penuliar, 2021; Jeffrey *et al.*, 2011; Sengupta *et al.*, 2015; Teo *et al.*, 2021; Tongtoht *et al.*, 2024) งานวิจัยของ Teo *et al.* (2021) ศึกษากิจกรรมการยับยั้งเชื้อราของแอกติโนแบคทีเรียที่แยกจากดินป่าพรุคันธุลี จังหวัดสุราษฎร์ธานี พบว่าแอกติโนแบคทีเรียในสกุล *Streptomyces* มีกิจกรรมทางชีวภาพในการยับยั้งเชื้อราได้หลายชนิดอย่างมีประสิทธิภาพ โดยสกุล *Streptomyces* มีรายงานผลิตสารประกอบออกฤทธิ์ทางชีวภาพประมาณ 100,000 ชนิด ซึ่งคิดเป็น 70–80 เปอร์เซ็นต์ ของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพตามธรรมชาติทั้งหมดที่มีการใช้งานทางเภสัชกรรมและการเกษตร (Abdel-Razek *et al.*, 2020; Bubici, 2018; Harir *et al.*, 2018)

Table 3 Identification of actinobacteria based on 16S rRNA gene sequences.

Isolate	Accession number of 16S rRNA gene	Closely related taxa identified by using the EzBioCloud server database (http://eztaxon-e.ezbiocloud.net)	Sequence similarity (%) of 16S rRNA gene	Difference / total nucleotide
11A3	PQ144678	<i>Streptomyces murinus</i> NBRC 12799 ^T (AB184155)	99.54	5/1080
41N6	PQ144677	<i>Streptomyces malaysiense</i> MUSC 136 ^T (LBDA02000093)	99.37	7/1113

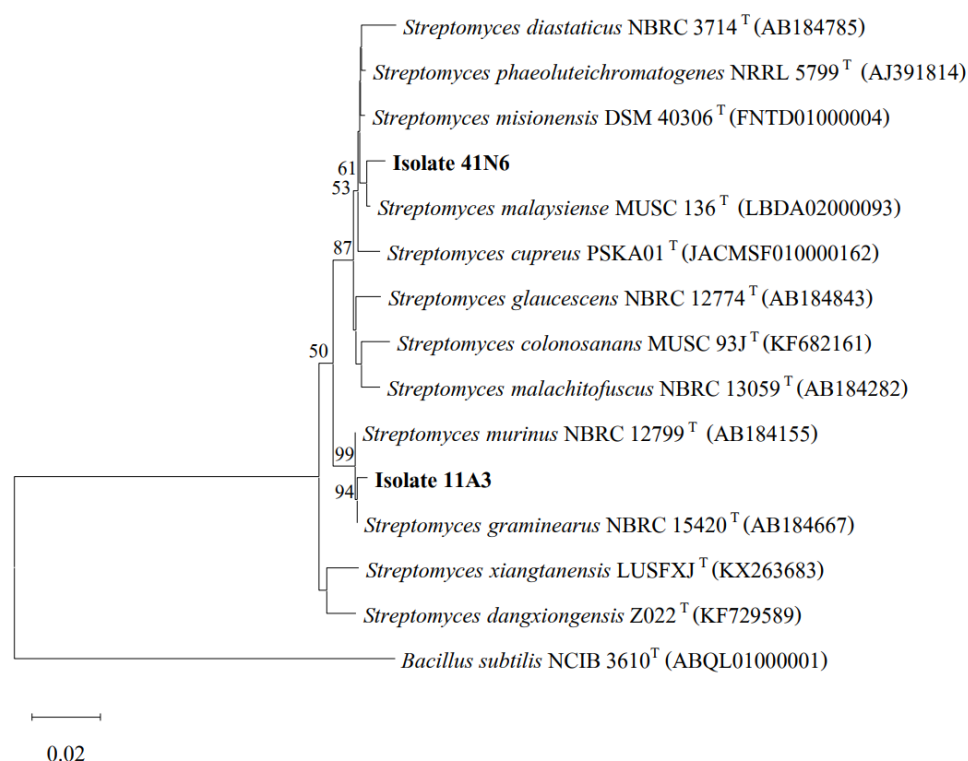


Figure 5 Phylogenetic tree based on 16S rRNA gene sequences obtained by the neighbor-joining (NJ) method showing the phylogenetic relationships among two actinobacterial phylotypes of this study (shown in boldface) and related actinobacteria. Numbers at nodes indicate levels of bootstrap support (%) based on a NJ analysis of 1,000 resampled datasets; only values greater than 50 % are shown.

สรุปผลการทดลอง

จากการศึกษากิจกรรมการยับยั้งยีสต์ *C. albicans* CBS 562 ด้วยวิธี agar overlay บนอาหารแข็ง GYM และ SC ของแอคติโนแบคทีเรียทั้งหมด 20 ไอโซเลต ที่แยกจากดินป่าพรุ พบว่ามี 17 ไอโซเลต สามารถยับยั้งยีสต์ *C. albicans* CBS 562 โดยส่วนใหญ่แสดงกิจกรรมการยับยั้งยีสต์บนอาหารเลี้ยงเชื้อ GYM มากกว่า SC ทำการคัดเลือกแอคติโนแบคทีเรียที่ให้ผลการยับยั้งยีสต์ดีที่สุดจำนวน 2 ไอโซเลต คือ 11A3 และ 41N6 มาทำการสกัดสารสกัดหยาบด้วยเอทิลอะซิเตท พบว่าสารสกัดหยาบจากไอโซเลต 11A3 และ 41N6 มีฤทธิ์ยับยั้งการเจริญของยีสต์แคนดิดา โดยมีความกว้างโซนยับยั้งเท่ากับ 1.90 ± 0.20 และ 1.77 ± 0.12 เซนติเมตร ตามลำดับ

จากการหาค่าความเข้มข้นต่ำสุดของสารสกัดหยาบที่ยับยั้งยีสต์ (MIC) และความเข้มข้นต่ำสุดที่ฆ่ายีสต์ (MFC) พบว่าสารสกัดหยาบจากไอโซเลต 11A3 และ 41N6 มีค่า MIC เท่ากันที่ 3.125 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร และมีค่า MFC เท่ากับ 6.250 และ 3.125 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ตามลำดับ จากการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาและวิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทด์บางส่วนของยีน 16S rRNA พบว่าทั้ง 2 ไอโซเลต จัดอยู่ในสกุล *Streptomyces* sp. โดยไอโซเลต 11A3 มีความคล้ายคลึงมากที่สุดกับ *Streptomyces murinus* NBRC 12799^T (99.54 เปอร์เซ็นต์) และไอโซเลต 41N6 มีความคล้ายคลึงมากที่สุดกับ *Streptomyces malaysiense* MUSC 136^T (99.37 เปอร์เซ็นต์) งานวิจัยนี้บ่งชี้ให้เห็นว่าแอคติโนแบคทีเรียจากดินป่าพรุในประเทศไทยมีศักยภาพในการยับยั้งยีสต์ *C. albicans* ที่ดี

ข้อเสนอแนะ

จากการศึกษาพบว่าสารสกัดหยาบมีฤทธิ์ยับยั้งยีสต์แคนดิดา ดังนั้นสามารถนำมาศึกษาต่อเพื่อระบุชนิดและโครงสร้างของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ รวมถึงทดสอบความเป็นพิษต่อเซลล์ (cytotoxicity) เพื่อเป็นแนวทางในการนำมาประยุกต์ใช้ทางด้านเทคโนโลยีชีวภาพและเภสัชกรรมต่อไปในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

Abdel-Razek, A. S., El-Naggar, M. E., Allam, A., Morsy, O. M., & Othman, S. I. (2020). Microbial natural products in drug discovery. *Processes*, 8(4), 470.

Ait Assou, S., Anissi, J., Sendide, K., & El Hassouni, M. (2023). Diversity and antimicrobial activities of actinobacteria isolated from mining soils in Midelt

region, Morocco. *Scientific World Journal*, 2023, 6106673.

- AL-Ghazali, L. H., & Omran, R. (2017). Optimization production conditions of antibacterial metabolite from *Streptomyces* sp. *Optimization*, 10(9), 386–391.
- Arasu, M. V., Duraipandiyan, V., Agastian, P., & Ignacimuthu, S. (2009). In vitro antimicrobial activity of *Streptomyces* spp. ERI-3 isolated from Western Ghats rock soil (India). *Journal de Mycologie Médicale*, 19(1), 22–28.
- Basmaciyan, L., Bon, F., Paradis, T., Lapaquette, P., & Dalle, F. (2019). *Candida albicans* interactions with the host: Crossing the intestinal epithelial barrier. *Tissue Barriers*, 7(2), 1612661.
- Berdy, J. (2005). Bioactive microbial metabolites. *The Journal of Antibiotics*, 58(1), 1–26.
- Berkow, E. L., & Lockhart, S. R. (2017). Fluconazole resistance in *Candida* species: A current perspective. *Infection and Drug Resistance*, 10, 237–245.
- Bubici, G. (2018). *Streptomyces* spp. as biocontrol agents against *Fusarium* species. *CABI Reviews*, 13, 1–15.
- Chantavorakit, T., Klayabun, C., & Duangmal, K. (2021). *Streptomyces acididurans* sp. nov., isolated from peat swamp forest soil. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 71(7), 004849.
- Charousová, I., Medo, J., Halenářová, E., & Javoreková, S. (2017). Antimicrobial and enzymatic activity of actinomycetes isolated from soils of coastal islands. *Journal of Advanced Pharmaceutical Technology & Research*, 8(2), 46–51.
- Chen, H., Zhou, X., Ren, B., & Cheng, L. (2020). The regulation of hyphae growth in *Candida albicans*. *Virulence*, 11(1), 337–348.
- Daquioag, J. E. L., & Penuliar, G. M. (2021). Isolation of actinomycetes with cellulolytic and antimicrobial activities from soils collected from an urban green space in the Philippines. *International Journal of Microbiology*, 2021, 1–14.
- Duddu, M. K., & Guntuku, G. (2015). Isolation and partial characterization of actinomycetes from mangrove sediment sample. *Journal of Global Biosciences*, 4(7), 2921–2929.

- Evangelista-Martínez, Z., Ríos-Muñiz, D. E., Gómez-Cano, J., Montoya-Hidalgo, A. C., & Ochoa-Solórzano, R. E. (2023). Anti-bacterial activity of *Streptomyces* sp. Y15 against pathogenic bacteria and evaluation of culture media for antibiotic production. *TIP Revista Especializada en Ciencias Químico-Biológicas*, 25(1), 1–12.
- Harir, M., Bendif, H., Bellahcene, M., Fortas, Z., & Pogni, R. (2018). *Streptomyces* secondary metabolites. *Basic Biology and Applications of Actinobacteria*, 6, 99–122.
- Jamal, M. T., & Satheesh, S. (2022). Antibiofilm activity of secondary metabolites of sponge-associated bacterium *Alcanivorax* sp. from the Red Sea. *Frontiers in Marine Science*, 9, 980418.
- Jeffrey, L., Norzaimawati, A., & Rosnah, H. (2011). Prescreening of bioactivities from actinomycetes isolated from forest peat soil of Sarawak. *Journal of Tropical Agriculture and Food Science*, 39(2), 245–253.
- Jose, P. A., & Jha, B. (2016). New dimensions of research on actinomycetes: Quest for next generation antibiotics. *Frontiers in Microbiology*, 7, 1295.
- Kataoka, M., Ueda, K., Kudo, T., Seki, T., & Yoshida, T. (1997). Application of the variable region in 16S rDNA to create an index for rapid species identification in the genus *Streptomyces*. *FEMS Microbiology Letters*, 151(2), 249–255.
- Küster, E., & Williams, S. (1964). Selection of media for isolation of streptomycetes. *Nature*, 202(4935), 928–929.
- Lipun, K., Chantavorakit, T., Mingma, R., & Duangmal, K. (2020). *Streptomyces acidicola* sp. nov., isolated from a peat swamp forest in Thailand. *The Journal of Antibiotics*, 73(7), 435–440.
- Mingma, R., Pathom-aree, W., Trakulnaleamsai, S., Thamchaipenet, A., & Duangmal, K. (2014). Isolation of rhizospheric and roots endophytic actinomycetes from Leguminosae plant and their activities to inhibit soybean pathogen, *Xanthomonas campestris* pv. *glycine*. *World Journal of Microbiology and Biotechnology*, 30, 271–280.
- Morad, H. O., Wild, A.-M., Wiehr, S., Davies, G., Maurer, A., Pichler, B. J., & Thornton, C. R. (2018). Pre-clinical imaging of invasive candidiasis using immunoPET/MR. *Frontiers in Microbiology*, 9, 1996.
- Niyasom, C., Boonmak, S., & Meesri, N. (2015). Antimicrobial activity of acidophilic actinomycetes isolated from acidic soil. *Current Applied Science and Technology*, 15(2), 62–69.
- O'Brien, J., Wilson, I., Orton, T., & Pognan, F. (2000). Investigation of the Alamar Blue (resazurin) fluorescent dye for the assessment of mammalian cell cytotoxicity. *European Journal of Biochemistry*, 267(17), 5421–5426.
- Saitou, N., & Nei, M. (1987). The neighbor-joining method: A new method for reconstructing phylogenetic trees. *Molecular Biology and Evolution*, 4(4), 406–425.
- Sarika, K., Sampath, G., Govindarajan, R. K., Ameen, F., Alwakeel, S., Al Gwaiz, H. I., Komuraiah, T. R., & Ravi, G. (2021). Antimicrobial and antifungal activity of soil actinomycetes isolated from coal mine sites. *Saudi Journal of Biological Sciences*, 28(6), 3553–3558.
- Sengupta, S., Pramanik, A., Ghosh, A., & Bhattacharyya, M. (2015). Antimicrobial activities of actinomycetes isolated from unexplored regions of Sundarbans mangrove ecosystem. *BMC Microbiology*, 15, 1–16.
- Shirling, E. T., & Gottlieb, D. (1966). Methods for characterization of *Streptomyces* species. *International Journal of Systematic Bacteriology*, 16(3), 313–340.
- Shrestha, B., Nath, D. K., Maharjan, A., Poudel, A., Pradhan, R. N., & Aryal, S. (2021). Isolation and characterization of potential antibiotic-producing actinomycetes from water and soil sediments of different regions of Nepal. *International Journal of Microbiology*, 2021, 5586165.
- Také, A., Matsumoto, A., Omura, S., & Takahashi, Y. (2015). *Streptomyces lactacystinicus* sp. nov. and *Streptomyces cyslabdanicus* sp. nov., producing lactacystin and cyslabdan, respectively. *The Journal of Antibiotics*, 68(5), 322–327.

- Tamura, K., Stecher, G., & Kumar, S. (2021). MEGA11: Molecular Evolutionary Genetics Analysis version 11. *Molecular Biology and Evolution*, 38(7), 3022–3027.
- Teo, W. F. A., Muangham, S., Lipun, K., & Duangmal, K. (2021). Effect of rice seeds germination bioprimered with actinomycetes isolated from peat swamp forest. *Chiang Mai Journal of Science*, 48(4), 996–1008.
- Thawai, C., Tanasupawat, S., Pongpech, P., & Suwanborirux, K. (2000). Antibiotic-producing actinomycetes from peat swamp forest soils in Trang. *The Thai Journal of Pharmaceutical Sciences*, 24, 40.
- Tongtoht, J., Wongchawalit, J., & Mingma, R. (2024). Antimicrobial activities against pathogenic bacteria of marine actinobacteria isolated from mangrove sediments at Klong Khon mangrove forest, Thailand. *Science Essence Journal*, 40(1), 74–87.
- Vangadeesh, S., Sundarmurthi, C., Karthic, K., & Selvaraju, K. (2011). Production and evaluation of antibiotics from soil isolated actinomycetes. *International Journal of Institutional Pharmacy and Life Sciences*, 1(1), 138–152.
- Wei, Y., Zhao, Y., Zhou, D., Qi, D., Li, K., Tang, W., Chen, Y., Jing, T., Zang, X., Xie, J., & Wang, W. (2020). A newly isolated *Streptomyces* sp. YYS-7 with a broad-spectrum antifungal activity improves the banana plant resistance to *Fusarium oxysporum* f. sp. cubense tropical race 4. *Frontiers in Microbiology*, 11, 1712.
- Yoon, S.-H., Ha, S.-M., Kwon, S., Lim, J., Kim, Y., Seo, H., & Chun, J. (2017). Introducing EzBioCloud: A taxonomically united database of 16S rRNA gene sequences and whole-genome assemblies. *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, 67(5), 1613–1617.

สารสกัดใบสาบเสือและน้ำนมราชสีห์ยับยั้งการเจริญเติบโตของเซลล์มะเร็งลำไส้และมะเร็งท่อน้ำดี

Leaf extracts from *Chromolaena odorata* and *Euphorbia hirta* suppress the growth of colorectal and bile duct cancer cells

พรประภาวีร์ ดันติเมตตา¹, นิชาธิศม์ ไชยเมธีเวช², จัญจนก อุไรรัตน์², ดิสทัต ยงประเดิม², ธนกฤต รัตนอาชาไนย¹, สมภาพ แซ่เฮง¹ และสุมาลี อบเชย^{1,3*}

Phonprapavee Tantimettha¹, Nicharas Chaimeteveeth², Chatkanok Urairat², Dissathut Yongpraderm², Thanakrit Rattanaarchanai¹, Sompop Saeheng¹ and Sumalee Obchoei^{1,3*}

Received: 1 May 2025 ; Revised: 25 July 2025 ; Accepted: 8 August 2025

บทคัดย่อ

ปัจจุบันมีความสนใจในการใช้พืชสมุนไพรเป็นทางเลือกใหม่ในการรักษาโรคลหหลายชนิดรวมถึงโรคมะเร็ง เนื่องจากพืชสมุนไพรมีสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพที่หลากหลาย และมีความเชื่อว่าอาจมีความเป็นพิษต่ำกว่ายาเคมีสังเคราะห์บางชนิด งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาฤทธิ์ยับยั้งเซลล์มะเร็งลำไส้ (Caco-2) และเซลล์มะเร็งท่อน้ำดี (KKU-213A) ของสารสกัดจากใบสาบเสือ (*Chromolaena odorata*) และใบน้ำนมราชสีห์ (*Euphorbia hirta*) โดยใช้ตัวทำละลายน้ำและเอทานอล ทำให้ได้สารสกัด 4 ชนิด ได้แก่ Ch.o-W, Ch.o-EtOH, Eu.h-W และ Eu.h-EtOH ผลการวิเคราะห์พบว่าปริมาณสารฟีนอลิกรวมแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญระหว่างสารสกัดทั้งสี่ชนิด ($P < 0.05$) โดย Ch.o-EtOH มีปริมาณสารฟีนอลิกรวมสูงที่สุด (7.18 ± 0.39 mg GAE/g DW) ตามด้วย Eu.h-EtOH (4.16 ± 0.20 mg GAE/g DW), Ch.o-W (3.16 ± 0.43 mg GAE/g DW) และ Eu.h-W (1.95 ± 0.09 mg GAE/g DW) สารสกัดทั้ง 4 ชนิดแสดงฤทธิ์ยับยั้งเซลล์มะเร็งในลักษณะขึ้นกับความเข้มข้น (dose-dependent) โดยมีค่า IC_{50} ต่อเซลล์ Caco-2 อยู่ระหว่าง 0.58–1.51 mg/mL และต่อเซลล์ KKU-213A อยู่ระหว่าง 0.65–1.42 mg/mL ส่วนค่า IC_{50} ต่อเซลล์เยื่อช่องปากปกติ (NOK-SI) อยู่ในช่วง 1.03 ถึง >2.5 mg/mL โดยสรุป สารสกัดจากใบสาบเสือและใบน้ำนมราชสีห์แสดงฤทธิ์ยับยั้งเซลล์มะเร็งลำไส้และท่อน้ำดี และมีแนวโน้มแสดงความเป็นพิษต่อเซลล์มะเร็งมากกว่าเซลล์ปกติ โดยประสิทธิภาพในการยับยั้งเซลล์มะเร็งแตกต่างกันตามชนิดของตัวทำละลาย ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นถึงศักยภาพเบื้องต้นของสารสกัดทั้งสองชนิดในการเป็นแหล่งของสารออกฤทธิ์ที่อาจนำไปสู่การพัฒนาสารต้านมะเร็งในอนาคต อย่างไรก็ตาม ควรมีการปรับปรุงกระบวนการสกัด การแยกและระบุสารออกฤทธิ์สำคัญ ศึกษากลไกการออกฤทธิ์ในระดับโมเลกุล ตลอดจนการทดสอบในสัตว์ทดลองและในทางคลินิก เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความปลอดภัยในการนำไปใช้จริง

คำสำคัญ: พืชสมุนไพร, สาบเสือ, น้ำนมราชสีห์, มะเร็งลำไส้, มะเร็งท่อน้ำดี

Abstract

There is growing interest in the use of medicinal plants as alternative treatments for various diseases, including cancer, due to their diverse bioactive compounds and a perception of potentially lower toxicity compared to some synthetic drugs. This study aimed to evaluate the anticancer activity of extracts from *Chromolaena odorata* and *Euphorbia hirta* leaves against colorectal cancer (Caco-2) and bile duct cancer (KKU-213A) cell lines. Water and

¹ ภาควิชาชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

² โรงเรียนหาดใหญ่วิทยาลัย อำเภหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา

³ ศูนย์วิจัยความเป็นเลิศทางชีวเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

¹ Department of Biochemistry, Faculty of Science, Prince of Songkla University

² Hatyaiwittayalai School, Hatyai District, Songkhla Province

³ Center of Excellence for Biochemistry, Faculty of Science, Prince of Songkla University

* Corresponding author: Sumalee Obchoei, E-mail: sumalee.o@psu.ac.th

ethanol were used as extraction solvents, resulting in four types of extracts: Ch.o-W, Ch.o-EtOH, Eu.h-W, and Eu.h-EtOH. The total phenolic content differed significantly among the four extracts ($P < 0.05$), with Ch.o-EtOH showing the highest total phenolic content (7.18 ± 0.39 mg GAE/g DW), followed by Eu.h-EtOH (4.16 ± 0.20 mg GAE/g DW), Ch.o-W (3.16 ± 0.43 mg GAE/g DW), and Eu.h-W (1.95 ± 0.09 mg GAE/g DW). All extracts exhibited dose-dependent cytotoxic effects. The IC_{50} values for Caco-2 ranged from 0.58 to 1.51 mg/mL and for KKU-213A from 0.65 to 1.42 mg/mL. For the normal oral keratinocyte cell line (NOK-SI), IC_{50} values ranged from 1.03 to >2.5 mg/mL. In conclusion, extracts from *C. odorata* and *E. hirta* demonstrated inhibitory effects on colorectal cancer and bile duct cancer cells and tended to exhibit greater cytotoxicity toward cancer cells than normal cells, with differences in inhibitory activity depending on the extraction solvent. These findings suggest that both plant extracts have potential as sources of bioactive compounds for the development of anticancer agents. However, further studies are warranted to optimize extraction processes, identify key active compounds, elucidate mechanisms of action, and validate efficacy and safety through *in vivo* and clinical studies.

Keywords: Medicinal plants, *Chromolaena odorata*, *Euphorbia hirta*, colorectal cancer, bile duct cancer

บทนำ

ในยุคที่ความก้าวหน้าทางการแพทย์สมัยใหม่ยังคงต้องเผชิญกับความท้าทายด้านประสิทธิภาพ การเกิดผลข้างเคียงที่รุนแรง และค่าใช้จ่ายการรักษาที่สูง กระแสการกลับสู่ธรรมชาติเพื่อแสวงหาทางเลือกการรักษาจากพืชสมุนไพรจึงได้รับความสนใจมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง (Dervendzi, 1992; Petrovska, 2012; Thomson, 1978) ไม่เพียงเป็นความหวังใหม่ด้านสุขภาพ แต่ยังสะท้อนถึงความพยายามในการบูรณาการภูมิปัญญาดั้งเดิมเข้ากับวิทยาศาสตร์สมัยใหม่ พืชสมุนไพรนับเป็นองค์ประกอบสำคัญของการแพทย์แผนโบราณที่มีการสืบทอดองค์ความรู้และการใช้ประโยชน์มาตั้งแต่สมัยโบราณ ในหลายภูมิภาคทั่วโลก รวมถึงประเทศไทย เนื่องจากหาได้ง่ายในท้องถิ่น มีต้นทุนต่ำ และมีคุณสมบัติในการส่งเสริมสุขภาพและรักษาโรคต่าง ๆ ปัจจุบันสมุนไพรได้รับความสนใจเพื่อใช้เป็นแหล่งของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (bioactive compounds) ที่มีศักยภาพในการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ยาใหม่ โดยเฉพาะเมื่อเปรียบเทียบกับยาเคมีสังเคราะห์ซึ่งมักมีผลข้างเคียง (Abdallah *et al.*, 2023; Elendu, 2024)

อย่างไรก็ดี การประยุกต์ใช้สมุนไพรในการรักษาโรคมะเร็งยังคงมีข้อจำกัด โดยเฉพาะในด้านกลไกการออกฤทธิ์ ความจำเพาะต่อเซลล์มะเร็ง และความปลอดภัยต่อเซลล์ปกติ ซึ่งยังต้องการการศึกษาเพิ่มเติมอย่างเป็นระบบ

ปัจจุบันโรคมะเร็งยังคงเป็นปัญหาสาธารณสุขระดับโลก โดยองค์การอนามัยโลก (WHO) รายงานว่าในปี พ.ศ. 2565 มีผู้ป่วยมะเร็งรายใหม่กว่า 20 ล้านคนทั่วโลก และมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้น (Bray *et al.*, 2024) จากการเปลี่ยนแปลงทางสิ่งแวดล้อมและพฤติกรรมการดำเนินชีวิต สำหรับประเทศไทย มะเร็งลำไส้และมะเร็งท่อน้ำดีเป็นชนิดของมะเร็งที่มีอุบัติการณ์

สูงและแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยมีมะเร็งลำไส้สัมพันธ์กับพฤติกรรมการบริโภคและปัจจัยทางพันธุกรรม (Dekker *et al.*, 2019) ส่วนมะเร็งท่อน้ำดีพบมากในภาคตะวันออกเฉียงเหนือของไทย มีความเชื่อมโยงกับการติดเชื้อพยาธิใบไม้ตับ และการบริโภคอาหารหมักดองที่ปนเปื้อนสารก่อมะเร็ง (Banales *et al.*, 2020; Sripa & Pairojkul, 2008) แม้การรักษาในปัจจุบัน เช่น เคมีบำบัดและรังสีรักษา จะช่วยยืดอายุผู้ป่วยได้บางส่วน แต่การดื้อยาและผลข้างเคียงจากการรักษา ยังคงเป็นอุปสรรคสำคัญต่อการควบคุมโรคมะเร็งในระยะยาว ดังนั้น ความพยายามในการค้นหาสารออกฤทธิ์ต้านมะเร็งชนิดใหม่ที่มีประสิทธิภาพสูง จำเพาะต่อเซลล์มะเร็ง และมีความปลอดภัยจึงเป็นเรื่องเร่งด่วน

สาบเสือ (*Chromolaena odorata*) หรือที่รู้จักกันทั่วไปในชื่อ "siam weed" เป็นไม้พุ่มที่เติบโตเร็วและแพร่กระจายได้ดี พบได้ในเขตร้อน เช่น ประเทศไทยและเวียดนาม (Akinmutimi & A, 2006; King & Robinson, 1970) ในทางการแพทย์แผนโบราณส่วนที่นิยมใช้ของสาบเสือคือ ใบ โดยใช้ในรูปแบบตำสดหรือสกัดน้ำ เพื่อนำมาใช้ห้ามเลือด รักษาบาดแผล แผลไฟไหม้ และการติดเชื้อที่ผิวหนัง ส่วนของ ราก และ ดอก แม้มีการใช้บ้างในบางภูมิภาค แต่มีการรายงานน้อยกว่า (Olawale *et al.*, 2021) ในทางเภสัชวิทยา ใบของสาบเสือก็มีส่วนที่มีการศึกษามากที่สุด โดยมีการสกัดด้วยตัวทำละลายหลายชนิด เช่น เมทานอล เอทานอล และ น้ำ ซึ่งพบว่าใบมีองค์ประกอบออกฤทธิ์สำคัญจำนวนมาก ได้แก่ ฟลาโวนอยด์ (เช่น kaempferide, sinensetin, scutellarein) และ กรดฟีนอลิก (เช่น protocatechuic acid, ferulic acid) (Olawale *et al.*, 2021) พืชชนิดนี้แสดงฤทธิ์ทางชีวภาพที่หลากหลาย เช่น มีฤทธิ์สมานแผล (Ling *et al.*, 2007; M. N. Vaisakh &

Pandey, 2012; Raina *et al.*, 2008) ยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย (Irobi, 1992; Suksamrarn *et al.*, 2004) ด้านการอักเสบ (Hanh *et al.*, 2011; Subramoniam *et al.*, 2012; Villegas *et al.*, 2001) เสริมภูมิคุ้มกัน (Taleb-Contini *et al.*, 2006) และต้านมะเร็ง เช่น มะเร็งปากมดลูก และ มะเร็งเต้านม (Harun *et al.*, 2012; Kouamé *et al.*, 2013; Nanasombat & Teckchuen, 2009)

นํ้านมราชสีห์ (*Euphorbia hirta*) เป็นพืชสมุนไพรที่มีการใช้อย่างแพร่หลายในทางการแพทย์แผนโบราณ โดยเฉพาะในแถบเอเชียและแอฟริกา ส่วนที่นิยมใช้มากที่สุดคือ ส่วนเหนือดิน ได้แก่ ใบและลำต้น เพื่อรักษาโรคต่าง ๆ เช่น โรคหอบหืด การติดเชื้อทางเดินหายใจ ความผิดปกติของระบบทางเดินอาหาร โรคผิวหนัง และ บาดแผลซึ่งมักเตรียมในรูปของน้ำต้ม น้ำคั้น หรือพอกเฉพาะที่ ยางจากต้นถูกนำมาใช้รักษาแผลและโรคตา ส่วนรากนิยมใช้ในรูปแบบต้มดื่มหรือบดใช้ภายนอก เพื่อบำรุงหญิงหลังคลอด (Kumar *et al.*, 2010; Sharma *et al.*, 2014) จากเอกสารวิชาการในฐานข้อมูลระดับโลกพบว่า พืชชนิดนี้มีองค์ประกอบทางพฤกษเคมีที่หลากหลาย ส่วนที่มีการศึกษามากที่สุดคือใบและทั้งต้น ซึ่งพบว่ามีองค์ประกอบทางเคมีที่สำคัญหลายชนิด เช่น ฟลาโวนอยด์ (เช่น quercitrin, rutin, afzelin), tannins, triterpenoids, polyphenols, phytosterols, gallic acid, kaempferol และ protocatechuic acid (Kumar *et al.*, 2010) ซึ่งเกี่ยวข้องกับฤทธิ์ทางชีวภาพที่หลากหลายของพืชชนิดนี้ เช่น ฤทธิ์ต้านจุลชีพ (Kumari & Pandey, 2017; Rajeh *et al.*, 2010) ต้านอนุมูลอิสระ (Asha *et al.*, 2016; Basma *et al.*, 2011) ลดการอักเสบ (Chen *et al.*, 2015; Lanhers *et al.*, 1991; Das *et al.*, 2010; Vázquez *et al.*, 1999) ด้านเชื้อมาลาเรีย (Liu *et al.*, 2007) และ ต้านมะเร็งหลายชนิด เช่น มะเร็งเม็ดเลือดขาว มะเร็งตับ มะเร็งผิวหนัง และ มะเร็งปอด (Sharma *et al.*, 2014; Sidambaram *et al.*, 2011; Vijaya *et al.*, 1995)

ถึงแม้จะมีการศึกษาฤทธิ์ของสารสกัดของพืชทั้งสองชนิดนี้อย่างแพร่หลายแต่ข้อมูลเกี่ยวกับการออกฤทธิ์ต่อเซลล์มะเร็งลำไส้และมะเร็งท่อน้ำดียังมีจำกัด การศึกษาครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินฤทธิ์ยับยั้งเซลล์มะเร็งของสารสกัดจากใบสาบเสือและนํ้านมราชสีห์ในเซลล์มะเร็งลำไส้ (Caco-2) และเซลล์มะเร็งท่อน้ำดี (KKU-213A) โดยเปรียบเทียบกับเซลล์เยื่อบุช่องปากปกติ (NOK-SI) เพื่อประเมินความเป็นพิษจำเพาะ (selective toxicity) ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญต่อการพัฒนาเป็นยาหรือผลิตภัณฑ์เสริมการรักษาที่ปลอดภัยและมีประสิทธิภาพในการต้านมะเร็งชนิดใหม่ในอนาคต

การทดลอง

1. การเตรียมสารสกัด

ใบของสาบเสือ (*Chromolaena odorata*) และนํ้านมราชสีห์ (*Euphorbia hirta*) ถูกนำมาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่น จากนั้นนำไปอบแห้งในตู้อบลมร้อน (hot air oven) ที่อุณหภูมิ 60°C เป็นเวลา 72 ชั่วโมง เมื่อตัวอย่างแห้งสนิทแล้วจึงนำมาบดให้ละเอียด และใช้สำหรับการสกัดด้วยตัวทำละลายน้ำหรือตัวทำละลายเอทานอล ในขั้นตอนการสกัด ชั่งผงแห้งของพืชแต่ละชนิดจำนวน 200 กรัม เติมน้ำกลั่น 1 ลิตร และ 80% เอทานอล 1 ลิตร แล้วกวนผสมบนเครื่องกวนแม่เหล็ก (magnetic stirrer) เป็นเวลา 16 ชั่วโมง จากนั้นกรองด้วยกระดาษกรองเพื่อแยกสารละลายออกจากกากพืช นำสารสกัดที่ได้ไปทำให้เข้มข้นด้วยเครื่องระเหยสารแบบหมุน (Buchi Rotavapor® R-134, Büchi Labortechnik AG, Switzerland) และนำไปทำแห้งด้วยเครื่องแช่แข็งแห้ง (Heto Drywinner Freeze Dryer, Heto Lab Equipment, Denmark) เพื่อให้ได้สารสกัดในรูปแบบผงแห้งแล้วเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ -20°C จนกว่าจะนำมาใช้ในการทดลอง ก่อนทำการทดลองนำผงแห้งของสารสกัดมาชั่งแล้วเตรียมเป็นสารละลายตั้งต้น (stock solution) ความเข้มข้น 200 mg/mL โดยละลายในน้ำกลั่น ซึ่งในขั้นตอนนี้จะได้สารสกัด 4 ชนิด ได้แก่ Ch.o-W (สาบเสือสกัดด้วยน้ำ), Ch.o-EtOH (สาบเสือสกัดด้วยเอทานอล), Eu.h-W (นํ้านมราชสีห์สกัดด้วยน้ำ) และ Eu.h-EtOH (นํ้านมราชสีห์สกัดด้วยเอทานอล)

2. การวัดปริมาณสารฟีนอลิกรวม

ในการประเมินปริมาณสารประกอบฟีนอลรวม (Total Phenolic Content, TPC) นำสารสกัดใบสาบเสือและนํ้านมราชสีห์มาละลายในเอทานอล 70% และเก็บไว้ที่อุณหภูมิ 4°C เป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยมีการเขย่าเป็นระยะ จากนั้นทำการวัดปริมาณฟีนอลรวมในไมโครเพลต 96 หลุม ตามวิธีที่มีการรายงานไว้ก่อนหน้านี้ (Ainsworth & Gillespie, 2007) โดยมีการปรับเปลี่ยนบางส่วนตามความเหมาะสม วิธีการโดยย่อในแต่ละปฏิกิริยาจะเติมสารสกัด 20 µL ตามด้วยสารละลาย 10% Folin-Ciocalteu (Loba Chemie Pvt. Ltd., India) 100 µL และสารละลาย 7.5% โซเดียมคาร์บอเนต (Na₂CO₃) 80 µL จากนั้นบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 1 ชั่วโมง โดยใช้เอทานอล 70% เป็นกลุ่มควบคุม (blank) และใช้สารมาตรฐาน gallic acid (Merck Co., Germany) ที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เพื่อสร้างกราฟมาตรฐาน เมื่อบ่มครบเวลา นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 765 nm ด้วยเครื่องอ่านไมโครเพลต (Spark Multimode Microplate Reader, Tecan, Switzerland) และ

รายงานผลในหน่วย มิลลิกรัมเทียบเท่า gallic acid ต่อน้ำหนักแห้งสารสกัด 1 กรัม (mg GAE/g DW)

3. การเพาะเลี้ยงเซลล์

เซลล์มะเร็งลำไส้ (Caco-2) และเซลล์มะเร็งท่อน้ำดี (KKU-213A) เพาะเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเซลล์ Dulbecco's Modified Eagle Medium (DMEM) ชนิดกลูโคสสูง ที่เติม 10% Fetal bovine serum (FBS) และ 1% penicillin-streptomycin ตามสภาวะมาตรฐานในตู้เพาะเลี้ยงเซลล์ที่อุณหภูมิ 37°C, 5% CO₂ และควบคุมความชื้นที่ประมาณ 90-95% โดยจะทำการเปลี่ยนอาหารเลี้ยงเซลล์ทุก 2-3 วัน ส่วนเซลล์ Normal Oral Keratinocytes-Spontaneously Immortalized (NOK-SI) เพาะเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเซลล์ Keratinocyte ชนิดปราศจากซีรัม (Keratinocyte-SFM) ในสภาวะมาตรฐานเช่นเดียวกัน

4. การทดสอบการอยู่รอดของเซลล์ด้วยวิธี MTT

การทดสอบการอยู่รอดของเซลล์ (cell viability assay) ด้วยเทคนิค MTT อาศัยหลักการที่ว่า เซลล์ที่มีชีวิตจะมีเอนไซม์ในไมโทคอนเดรียที่ทำงานได้ปกติซึ่งสามารถรีดิวซ์สาร MTT (3-(4,5-Dimethylthiazol-2-yl)-2,5-Diphenyltetrazolium Bromide) ซึ่งเป็นเกลือเตตระโซเลียมสีเหลืองให้เปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ฟอร์มazan (formazan) สีม่วง ปริมาณผลิตภัณฑ์ฟอร์มazan ที่เกิดขึ้นจะแปรผันตรงกับจำนวนเซลล์ที่มีชีวิตรอด วิธีการทดลอง หลังจากทำการเพาะเลี้ยงเซลล์ให้เจริญเติบโตได้ประมาณ 70-80% ของพื้นที่ผิวภาชนะเพาะเลี้ยงแล้ว จะทำให้เซลล์หลุดด้วยวิธีย่อยด้วยเอนไซม์ทริปซิน (trypsinization) แล้วนับเซลล์ด้วยเครื่อง hemocytometer และทำการย้ายเซลล์ไปเพาะเลี้ยงในจาน 96 หลุม ที่มีความหนาแน่นเซลล์ประมาณ 3×10^3 เซลล์/หลุม หลังจากปล่อยให้เซลล์ยึดเกาะเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำการเติมสารสกัด Ch.o-W, Ch.o-EtOH, Eu.h-W และ Eu.h-EtOH ที่ความเข้มข้น 0.625, 1.25, และ 2.5 mg/mL และบ่มเป็นเวลา 24 ชั่วโมง กลุ่มควบคุมผลลบคือเซลล์ที่เลี้ยงในอาหารปราศจากสารสกัดและยา กลุ่มควบคุมผลบวก คือเซลล์ที่บ่มกับยาเคมีบำบัด 5-fluorouracil (Sigma-Aldrich, MO, USA) ความเข้มข้น 25 μ M (~3.25 μ g/mL) เมื่อบ่มครบเวลาแล้ว จะทำการเติมสาร MTT ลงในแต่ละหลุมที่ความเข้มข้น 0.5 mg/mL แล้วบ่มในตู้เพาะเลี้ยงเซลล์ต่ออีก 2 ชั่วโมง แล้วทำการดูดเอาสาร MTT ส่วนที่เหลือทิ้ง ละลาย

ผลิตภัณฑ์ฟอร์มazanด้วย Dimethyl sulfoxide (DMSO) ปริมาตร 100 μ L/หลุม แล้วนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 nm ด้วยเครื่องอ่านไมโครเพลต ค่าร้อยละการรอดชีวิตของเซลล์ (% cell viability) คำนวณจากสูตร

$$\% \text{ Cell viability} = \left(\frac{A_{\text{Test}}}{A_{\text{Control}}} \right) \times 100$$

5. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ข้อมูลทั้งหมดแสดงเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean $\pm$ SD) จากการทดลองอิสระ 3 ครั้ง (three independent biological replicates) โดยแต่ละการทดลองประกอบด้วยการทำซ้ำทางเทคนิคอย่างน้อย 3 ซ้ำ (technical replicates) การเปรียบเทียบปริมาณสารฟีนอลิกรวม (TPC) วิเคราะห์ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบสองปัจจัย (two-way ANOVA) ตามด้วยการเปรียบเทียบรายคู่ที่ปรับค่า P ด้วยวิธี Sidák ส่วนข้อมูลการทดสอบความมีชีวิตของเซลล์ วิเคราะห์ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (one-way ANOVA) แยกตามชนิดสารสกัดและความเข้มข้น ตามด้วย Dunnett's multiple comparisons test โดยเปรียบเทียบเซลล์มะเร็งแต่ละชนิดกับเซลล์ปกติ NOK-SI ที่ความเข้มข้นเดียวกัน กำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ $P < 0.05$

ผลการทดลองและอภิปรายผล

1. ปริมาณสารฟีนอลิกรวม

จากการวิเคราะห์สารสกัดทั้งสี่ชนิด พบว่ามีปริมาณสารฟีนอลิกรวมแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) โดยสารสกัด Ch.o-EtOH มีปริมาณสูงที่สุด (7.18 ± 0.39 mg GAE/g DW) รองลงมาคือ Eu.h-EtOH (4.16 ± 0.20), Ch.o-W (3.16 ± 0.43), และ Eu.h-W (1.95 ± 0.09) ตามลำดับ ดังแสดงใน Table 1 ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยในอดีตที่รายงานว่าสารสกัดด้วยเอทานอลสามารถดึงสารฟีนอลิกออกมาได้มากกว่าการสกัดด้วยน้ำ (Ainsworth & Gillespie, 2007; Benjamaa *et al.*, 2024) สารฟีนอลิกจัดเป็นกลุ่มหลักของสารเมแทบอลิต์ทุติยภูมิ ที่มีหมู่ไฮดรอกซิลเป็นองค์ประกอบสำคัญซึ่งกำหนดคุณสมบัติทางชีวเคมีของสารกลุ่มนี้ เช่นฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ด้านการอักเสบ และต้านมะเร็ง (Abdallah *et al.*, 2023; Sharma *et al.*, 2014) ความแตกต่างของปริมาณสารฟีนอลิกนี้น่าจะเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อความแรงของฤทธิ์ยับยั้งเซลล์มะเร็งของสารสกัดแต่ละชนิดในภายหลัง

Table 1 Total phenolic content (TPC)

Extracts	TPC (mg GAE/g DW)
Ch.o-W	3.16 ± 0.43 ^b
Ch.o-EtOH	7.18 ± 0.39 ^d
Eu.h-W	1.95 ± 0.09 ^a
Eu.h-EtOH	4.16 ± 0.20 ^c

Values are expressed as mean ± SD from three independent biological replicates. Different superscript letters (a–d) indicate statistically significant differences among extracts according to Šídák-adjusted pairwise comparisons following two-way ANOVA ($P < 0.05$).

2.ฤทธิ์ยับยั้งเซลล์มะเร็ง

เมื่อทำการทดสอบฤทธิ์ยับยั้งเซลล์มะเร็งของสารสกัดใบสาบเสือและใบน่านมราชสีห์ด้วยวิธี MTT ผลการทดลองพบว่าสารสกัดใบสาบเสือทั้งชนิดที่สกัดด้วยน้ำ (Ch.o-W) และสกัดด้วยเอทานอล (Ch.o-EtOH) มีฤทธิ์ยับยั้งเซลล์มะเร็งลำไส้ (Caco-2) และมะเร็งท่อน้ำดี (KKU-213A) แบบขึ้นกับระดับความเข้มข้น (dose-dependent) และมีฤทธิ์ในเซลล์มะเร็งมากกว่าเซลล์ปกติ (NOK-SI) ดังแสดงใน Figure 1 และ Table 2 โดย Ch.o-EtOH มีฤทธิ์มากกว่า Ch.o-W และสอดคล้องกับปริมาณสารฟีนอลิกรวมที่สูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญ (Table 1) เมื่อพิจารณาฤทธิ์ต่อเซลล์ NOK-SI ซึ่งใช้เป็นตัวแทนของเซลล์ปกติพบว่า Ch.o-W มีฤทธิ์ยับยั้ง NOK-SI เซลล์น้อยมาก ในขณะที่ Ch.o-EtOH แม้จะมีฤทธิ์ต่อเซลล์มะเร็งสูงแต่ก็ยับยั้งเซลล์ปกติในระดับที่สูงขึ้นด้วยเช่นกัน กล่าวคือ Ch.o-W มีความจำเพาะต่อเซลล์มะเร็งมากกว่า Ch.o-EtOH ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้ที่พบว่าสารสกัดใบสาบเสือมีฤทธิ์ต้านเซลล์มะเร็งและความจำเพาะต่อเซลล์มะเร็งในระดับที่แตกต่างกันขึ้นกับชนิดสารสกัดและเซลล์เป้าหมาย (Kouamé *et al.*, 2013; Yusuf *et al.*, 2023)

Table 2 Half-maximal inhibitory concentrations (IC_{50}) of *Chromolaena odorata* extracts

Cell lines	IC_{50} (mg/mL)	
	Ch.o-W	Ch.o-EtOH
NOK-SI	> 2.5	1.03 ± 0.01
Caco-2	1.23 ± 0.06	0.58 ± 0.22
KKU-213A	1.42 ± 0.07	0.65 ± 0.09

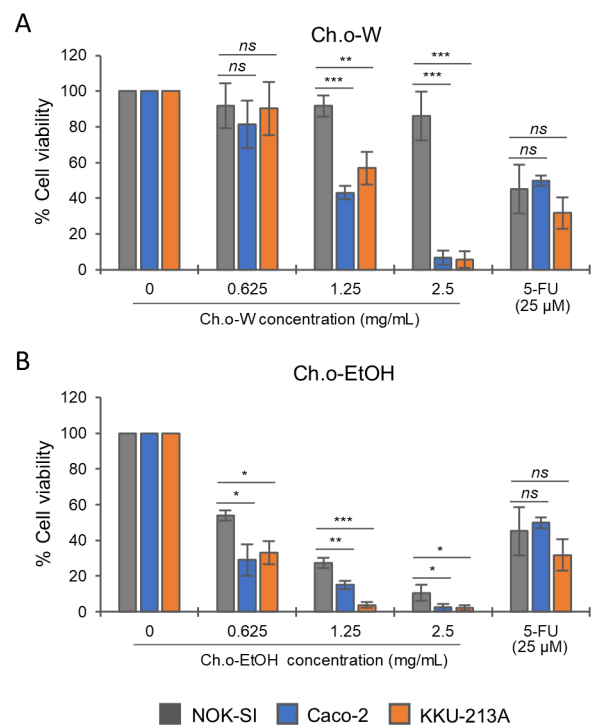


Figure 1 Effect of *Chromolaena odorata* extracts on cell viability. (A) Cells treated with Ch.o-W. (B) Cells treated with Ch.o-EtOH. Significant differences between each cancer cell line and the normal cell line (NOK-SI) at the same extract concentration were determined by one-way ANOVA followed by Dunnett's multiple comparisons test. * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$; ns, not significant.

การทดสอบฤทธิ์ของสารสกัดใบน่านมราชสีห์พบว่าทั้งส่วนที่สกัดด้วยน้ำ (Eu.h-W) และสกัดด้วยเอทานอล (Eu.h-EtOH) มีฤทธิ์ยับยั้งเซลล์มะเร็งทั้งสองชนิดแบบ dose-dependent และสารสกัดทั้งสองส่วนมีฤทธิ์ใกล้เคียงกันในการยับยั้งเซลล์ Caco-2 และ KKU-213A อย่างไรก็ดีเมื่อพิจารณาฤทธิ์ต่อเซลล์ NOK-SI พบว่า Eu.h-EtOH มีฤทธิ์ต่ำหมายถึงมีความจำเพาะต่อเซลล์มะเร็งมากกว่า Eu.h-W ดังแสดงใน Figure 2 และ Table 3

Table 3 Half-maximal inhibitory concentrations (IC_{50}) of *Euphorbia hirta* extracts

Cell lines	IC_{50} (mg/mL)	
	Eu.h-W	Eu.h-EtOH
NOK-SI	2.36 $\pm$ 0.61	> 2.5
Caco-2	1.51 $\pm$ 0.12	1.37 $\pm$ 0.01
KKU-213A	1.19 $\pm$ 0.10	1.36 $\pm$ 0.01

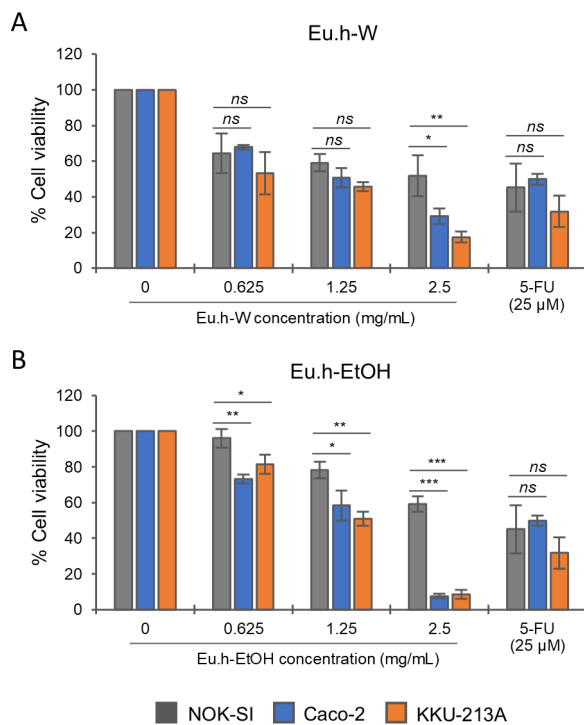


Figure 2 Effect of *Euphorbia hirta* extracts on cell viability. (A) Cells treated with Eu.h-W. (B) Cells treated with Eu.h-EtOH. Significant differences between each cancer cell line and the normal cell line (NOK-SI) at the same extract concentration were determined by one-way ANOVA followed by Dunnett's multiple comparisons test. * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$; ns, not significant.

ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าสารสกัดใบสาบเสือและใบนํานมราชสีห์ทั้งในรูปแบบสารสกัดด้วยน้ำและเอทานอลมีฤทธิ์ยับยั้งเซลล์มะเร็งแบบ dose-dependent โดยการลดลงของควมมีชีวิตของเซลล์มะเร็งเมื่อเทียบกับเซลล์ปกติ (NOK-SI) มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในหลายระดับความเข้มข้น (Figure 1 และ Figure 2) นอกจากนี้ Ch.o-EtOH ให้ค่า IC_{50} ต่ำกว่า Ch.o-W ซึ่งบ่งชี้ถึงฤทธิ์ยับยั้ง

เซลล์มะเร็งที่สูงกว่า ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับผลการวัดปริมาณสารฟีนอลิกรวมที่พบว่า Ch.o-EtOH มีปริมาณสารฟีนอลิกรวมสูงกว่า Ch.o-W ประมาณ 2.27 เท่า (Table 1) อย่างไรก็ตาม Ch.o-W มีความจำเพาะต่อเซลล์มะเร็งสูงกว่าเห็นได้จากมีฤทธิ์ต่อเซลล์ปกติ (NOK-SI) ในระดับต่ำ ผลการศึกษาเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการศึกษาก่อนหน้าที่พบว่า สารสกัดใบสาบเสือโดยใช้ ethyl acetate สามารถยับยั้งการเจริญของเซลล์มะเร็งเต้านม ชนิด MCF-7 และ T47D แบบ dose-dependent โดยมีค่า IC_{50} 218.78 μ g/mL และ 307.61 μ g/mL สำหรับ เซลล์ MCF-7 และ T47D ตามลำดับ และมีฤทธิ์ต่อเซลล์ Vero ซึ่งไม่ใช่เซลล์มะเร็งต่ำกว่า (Yusuf *et al.*, 2023) ในการศึกษาครั้งนี้เราพบว่าค่า IC_{50} ของสารสกัดจากใบสาบเสือในมะเร็งลำไส้และมะเร็งท่อน้ำดีสูงกว่าการศึกษาก่อนหน้านี้ค่อนข้างมาก (อยู่ในช่วง 0.58 $\pm$ 0.22 - 1.42 $\pm$ 0.07 mg/mL) แต่อาจจะเปรียบเทียบโดยตรงไม่ได้เนื่องจากใช้ตัวทำละลายที่แตกต่างกันและศึกษาในเซลล์ต่างชนิดกัน

ในทำนองเดียวกัน สารสกัดใบนํานมราชสีห์ทั้ง Eu.h-W และ Eu.h-EtOH แสดงฤทธิ์ยับยั้งเซลล์มะเร็งทั้งสองชนิดในลักษณะ dose-dependent และมีฤทธิ์ต่อเซลล์ปกติน้อยกว่าเซลล์มะเร็ง โดย Eu.h-EtOH มีความเป็นพิษต่อเซลล์ปกติ NOK-SI ต่ำกว่า Eu.h-W ซึ่งบ่งชี้ถึงค่าความจำเพาะต่อเซลล์มะเร็งที่ดีกว่า ผลการศึกษานี้เป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการศึกษาในมะเร็งชนิดอื่นเช่น มะเร็งเม็ดเลือดขาว มะเร็งตับ มะเร็งผิวหนัง และ มะเร็งปอด (Sharma *et al.*, 2014; Sidambaram *et al.*, 2011; Vijaya *et al.*, 1995) ทั้งในแง่ฤทธิ์ยับยั้งเซลล์มะเร็งและมีความจำเพาะต่อเซลล์มะเร็งในระดับที่ดี โดยมีผลกระทบต่อเซลล์ปกติน้อยกว่าหรืออยู่ในระดับที่ยอมรับได้ที่น่าสนใจคือ พืชทั้งสองชนิด ได้แก่ *C. odorata* และ *E. hirta* มีองค์ประกอบทางพฤกษเคมีบางชนิดที่ เหมือนกัน หรืออยู่ใน กลุ่มสารชนิดเดียวกัน ซึ่งอาจเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้ทั้งสองพืชแสดงฤทธิ์ต้านมะเร็งในลักษณะคล้ายกัน โดยเฉพาะในกลุ่ม ฟลาโวนอยด์ และ กรดฟีนอลิก เช่น protocatechuic acid ซึ่งพบในทั้งสองชนิด และสารอื่นในกลุ่มเดียวกัน เช่น kaempferol, rutin และ quercitrin ที่มีรายงานใน *E. hirta* สารเหล่านี้มีรายงานว่าเกี่ยวข้องกับฤทธิ์ทางชีวภาพหลายด้าน ได้แก่ ฤทธิ์ต้านมะเร็ง การยับยั้งการเจริญของเซลล์มะเร็ง การชักนำให้เซลล์มะเร็งเกิด apoptosis รวมถึง ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ และฤทธิ์ต้านการอักเสบ ดังนั้น ความคล้ายคลึงกันขององค์ประกอบทางเคมีบางส่วนในพืชทั้งสองชนิดนี้ อาจช่วยอธิบายผลการทดลองที่พบฤทธิ์ยับยั้งเซลล์มะเร็งของสารสกัดได้บางส่วน (Kumar *et al.*, 2010; Olawale *et al.*, 2021)

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

กล่าวโดยสรุป ผลการศึกษานี้ร่วมกับรายงานการศึกษาในอดีต ชี้ให้เห็นถึงศักยภาพของสารสกัดจากใบสามเสือและใบน่านมราชสีห์ ในการพัฒนาต่อยอดเป็นสารต้านมะเร็งทางเลือก อย่างไรก็ตาม เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพและความปลอดภัยในการใช้ ควรมีการปรับปรุงและเพิ่มความหลากหลายของกระบวนการสกัด โดยทดลองใช้ตัวทำละลายหลายชนิด ศึกษาในเซลล์มะเร็งและเซลล์ปกติที่หลากหลาย รวมทั้งการวิเคราะห์เพื่อแยกและระบุสารออกฤทธิ์สำคัญที่เป็นองค์ประกอบในสารสกัด และศึกษาประสิทธิภาพและความปลอดภัยในสัตว์ทดลองและในทางคลินิกต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิทยาศาสตร์สุขภาพและวิทยาศาสตร์ประยุกต์ (หลักสูตรชีวเคมี) คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ ที่ได้สนับสนุนเครื่องมือ อุปกรณ์ต่าง ๆ ในงานวิจัยในครั้งนี้ และ นางสาวพรประภาวีร์ ดันติเมตตา ได้รับทุนบัณฑิตศึกษาสงขลานครินทร์ (PSU_PHD2565-002)

เอกสารอ้างอิง

- Abdallah, E. M., Alhatlani, B. Y., de Paula Menezes, R., & Martins, C. H. G. (2023). Back to nature: Medicinal plants as promising sources for antibacterial drugs in the post-antibiotic era. *Plants*, 12(17), Article 3077. <https://doi.org/10.3390/plants12173077>
- Ainsworth, E. A., & Gillespie, K. M. (2007). Estimation of total phenolic content and other oxidation substrates in plant tissues using Folin-Ciocalteu reagent. *Nature Protocols*, 2(4), 875–877. <https://doi.org/10.1038/nprot.2007.365>
- Akinmutimi, A. H., & A, A. (2006). The effect of graded levels of dietary inclusion of siam weed (*Chromolaena odorata*) leaf meal in grower rabbits diet in a tropical environment. *Journal of Animal and Veterinary Advances*, 5, 707–711.
- Asha, S., Thirunavukkarasu, P., Mani, V. M., & Sadiq, A. M. (2016). Antioxidant activity of *Euphorbia hirta* Linn leaves extracts. *European Journal of Medicinal Plants*, 14(1), 1–14. <https://doi.org/10.9734/EJMP/2016/24185>
- Banales, J. M., Marin, J. J. G., Lamarca, A., Rodrigues, P. M., Khan, S. A., Roberts, L. R., Cardinale, V., Carpino, G., Andersen, J. B., Braconi, C., Calvisi, D. F., Perugorria, M. J., Fabris, L., Boulter, L., Macias, R. I. R., Gaudio, E., Alvaro, D., Gradilone, S. A., Strazzabosco, M., . . . Gores, G. J. (2020). Cholangiocarcinoma 2020: The next horizon in mechanisms and management. *Nature Reviews Gastroenterology & Hepatology*, 17(9), 557–588. <https://doi.org/10.1038/s41575-020-0310-z>
- Basma, A. A., Zakaria, Z., Latha, L. Y., & Sasidharan, S. (2011). Antioxidant activity and phytochemical screening of the methanol extracts of *Euphorbia hirta* L. *Asian Pacific Journal of Tropical Medicine*, 4(5), 386–390. [https://doi.org/10.1016/S1995-7645\(11\)60113-X](https://doi.org/10.1016/S1995-7645(11)60113-X)
- Benjamaa, R., Elbouny, H., Errati, H., Moujanni, A., Kaushik, N., Gupta, R., Ennibi, O., Nasser, B., Choi, E. H., Kaushik, N. K., & Essamadi, A. (2024). Comparative evaluation of antioxidant activity, total phenolic content, anti-inflammatory, and antibacterial potential of *Euphorbia*-derived functional products. *Frontiers in Pharmacology*, 15, Article 1345340. <https://doi.org/10.3389/fphar.2024.1345340>
- Bray, F., Laversanne, M., Sung, H., Ferlay, J., Siegel, R. L., Soerjomataram, I., & Jemal, A. (2024). Global cancer statistics 2022: GLOBOCAN estimates of incidence and mortality worldwide for 36 cancers in 185 countries. *CA: A Cancer Journal for Clinicians*, 74(3), 229–263. <https://doi.org/10.3322/caac.21834>
- Chen, J., Er, H. M., Mohamed, S. M., & Chen, Y. S. (2015). In vitro anti-inflammatory activity of fractionated *Euphorbia hirta* aqueous extract on rabbit synovial fibroblasts. *Biomedical Journal*, 38(4), 301–306. <https://doi.org/10.1016/j.bj.2014.07.004>
- Das, P., Mekap, S., Pani, S., Sethi, R., & Nayak, P. (2010). Pharmacological evaluation of anti-inflammatory activity of *Euphorbia hirta* against carrageenan induced paw edema in rats. *Der Pharmacia Lettre*, 2(2), 151–154.
- Dekker, E., Tanis, P. J., Vleugels, J. L. A., Kasi, P. M., & Wallace, M. B. (2019). Colorectal cancer. *The Lancet*, 394(10207), 1467–1480. [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(19\)32319-0](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(19)32319-0)

- Dervendzi, V. (1992). *Contemporary treatment with medicinal plants*. Tabernacle.
- Elendu, C. (2024). The evolution of ancient healing practices: From shamanism to Hippocratic medicine: A review. *Medicine*, 103(28), Article e39005. <https://doi.org/10.1097/MD.00000000000039005>
- Hanh, T. T., Hang, D. T., Van Minh, C., & Dat, N. T. (2011). Anti-inflammatory effects of fatty acids isolated from *Chromolaena odorata*. *Asian Pacific Journal of Tropical Medicine*, 4(10), 760–763. [https://doi.org/10.1016/S1995-7645\(11\)60187-6](https://doi.org/10.1016/S1995-7645(11)60187-6)
- Harun, F. B., Syed Sahil Jamalullail, S. M., Yin, K. B., Othman, Z., Tilwari, A., & Balaram, P. (2012). Autophagic cell death is induced by acetone and ethyl acetate extracts from *Eupatorium odoratum* in vitro: Effects on MCF-7 and vero cell lines. *The Scientific World Journal*, 2012, Article 439479. <https://doi.org/10.1100/2012/439479>
- Irobi, O. N. (1992). Activities of *Chromolaena odorata* (compositae) leaf extract against *Pseudomonas aeruginosa* and *Streptococcus faecalis*. *Journal of Ethnopharmacology*, 37(1), 81–83. [https://doi.org/10.1016/0378-8741\(92\)90044-6](https://doi.org/10.1016/0378-8741(92)90044-6)
- King, R., & Robinson, H. (1970). Studies in the Eupatorieae (Compositae). XXIX. The genus *Chromolaena*. *Phytologia*, 20(3).
- Kouamé, P. B., Jacques, C., Bedi, G., Silvestre, V., Loquet, D., Barillé-Nion, S., Robins, R. J., & Tea, I. (2013). Phytochemicals isolated from leaves of *Chromolaena odorata*: Impact on viability and clonogenicity of cancer cell lines. *Phytotherapy Research*, 27(6), 835–840. <https://doi.org/10.1002/ptr.4795>
- Kumar, S., Malhotra, R., & Kumar, D. (2010). *Euphorbia hirta*: Its chemistry, traditional and medicinal uses, and pharmacological activities. *Pharmacognosy Reviews*, 4, 58–61.
- Kumari, I., & Pandey, R. (2017). Antibacterial activity of *Euphorbia hirta* L. In *Applications of biotechnology for sustainable development*.
- Lanthers, M. C., Fleurentin, J., Dorfman, P., Mortier, F., & Pelt, J. M. (1991). Analgesic, antipyretic and anti-inflammatory properties of *Euphorbia hirta*. *Planta Medica*, 57(3), 225–231. <https://doi.org/10.1055/s-2006-960074>
- Ling, S. K., Pissar, M. M., & Man, S. (2007). Platelet-activating factor (PAF) receptor binding antagonist activity of the methanol extracts and isolated flavonoids from *Chromolaena odorata* (L.) King and Robinson. *Biological and Pharmaceutical Bulletin*, 30(6), 1150–1152. <https://doi.org/10.1248/bpb.30.1150>
- Liu, Y., Murakami, N., Ji, H., Abreu, P., & Zhang, S. (2007). Antimalarial flavonol glycosides from *Euphorbia hirta*. *Pharmaceutical Biology*, 45(4), 278–281. <https://doi.org/10.1080/13880200701213038>
- Nanasombat, S., & Teckchuen, N. (2009). Antimicrobial, antioxidant and anticancer activities of Thai local vegetables. *Journal of Medicinal Plants Research*, 3, 443–449.
- Olawale, F., Olofinson, K., & Iwaloye, O. (2021). Biological activities of *Chromolaena odorata*: A mechanistic review. *South African Journal of Botany*, 144, 44–57. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2021.08.031>
- Petrovska, B. B. (2012). Historical review of medicinal plants' usage. *Pharmacognosy Reviews*, 6(11), 1–5. <https://doi.org/10.4103/0973-7847.95849>
- Rajeh, M. A., Zuraini, Z., Sasidharan, S., Latha, L. Y., & Amutha, S. (2010). Assessment of *Euphorbia hirta* L. leaf, flower, stem and root extracts for their antibacterial and antifungal activity and brine shrimp lethality. *Molecules*, 15(9), 6008–6018. <https://doi.org/10.3390/molecules15096008>
- Raina, R., Prawez, S., Verma, P., & Pankaj, N. K. (2008). Medicinal plants and their role in wound healing. *VetScan*, 3.
- Sharma, N., Samarakoon, K. W., Gyawali, R., Park, Y. H., Lee, S. J., Oh, S. J., Lee, T. H., & Jeong, D. K. (2014). Evaluation of the antioxidant, anti-inflammatory, and anticancer activities of *Euphorbia hirta* ethanolic extract. *Molecules*, 19(9), 14567–14581. <https://doi.org/10.3390/molecules190914567>
- Sidambaram, R. R., Dinesh, M., & Jayalakshmi, E. (2011). An in vitro study of cytotoxic activity of *Euphorbia*

- hirta* on Hep2 cells of human epithelioma of larynx. *International Journal of Pharmacy and Pharmaceutical Sciences*, 3(3), 101–103.
- Sripa, B., & Pairojkul, C. (2008). Cholangiocarcinoma: Lessons from Thailand. *Current Opinion in Gastroenterology*, 24(3), 349–356. <https://doi.org/10.1097/MOG.0b013e3282bf38c>
- Subramoniam, A., Asha, V. V., Nair, S. A., Sasidharan, S. P., Sureshkumar, P. K., Rajendran, K. N., Karunakaran, D., & Ramalingam, K. (2012). Chlorophyll revisited: Anti-inflammatory activities of chlorophyll a and inhibition of expression of TNF- α gene by the same. *Inflammation*, 35(3), 959–966. <https://doi.org/10.1007/s10753-011-9399-0>
- Suksamrarn, A., Chotipong, A., Suavansri, T., Boongird, S., Timsuksai, P., Vimuttipong, S., & Chuaynugul, A. (2004). Antimycobacterial activity and cytotoxicity of flavonoids from the flowers of *Chromolaena odorata*. *Archives of Pharmacal Research*, 27, 507–511. <https://doi.org/10.1007/BF02980112>
- Taleb-Contini, S. H., Kanashiro, A., Kabeya, L. M., Polizello, A. C., Lucisano-Valim, Y. M., & Oliveira, D. C. (2006). Immunomodulatory effects of methoxylated flavonoids from two *Chromolaena* species: Structure-activity relationships. *Phytotherapy Research*, 20(7), 573–575. <https://doi.org/10.1002/ptr.1914>
- Thomson, W. A. R. (1978). *Medicines from the earth: A guide to healing plants*. McGraw-Hill.
- Vaisakh, M. N., & Pandey, A. (2012). The invasive weed with healing properties: A review on *Chromolaena odorata*. *International Journal of Pharmaceutical Sciences and Research*, 3(1), 80–83.
- Vázquez, M. M., Apan, T. R., Lazcano, M. E., & Bye, R. (1999). Anti-inflammatory active compounds from the n-hexane extract of *Euphorbia hirta*. *Journal of the Mexican Chemical Society*, 43, 103–105.
- Vijaya, K., Ananthan, S., & Nalini, R. (1995). Antibacterial effect of theaflavin, polyphenon 60 (*Camellia sinensis*) and *Euphorbia hirta* on *Shigella* spp.—A cell culture study. *Journal of Ethnopharmacology*, 49(2), 115–118. [https://doi.org/10.1016/0378-8741\(95\)01311-Q](https://doi.org/10.1016/0378-8741(95)01311-Q)
- Villegas, L. F., Marçalo, A., Martin, J., Fernández, I. D., Maldonado, H., Vaisberg, A. J., & Hammond, G. B. (2001). (+)-epi-Alpha-bisabolol is the wound-healing principle of *Peperomia galioides*: Investigation of the in vivo wound-healing activity of related terpenoids. *Journal of Natural Products*, 64(10), 1357–1359. <https://doi.org/10.1021/np010260t>
- Yusuf, H., Novia, H., & Fahriani, M. (2023). Cytotoxic activity of ethyl acetate extract of *Chromolaena odorata* on MCF7 and T47D breast cancer cells. *Narra J*, 3(3), Article e326. <https://doi.org/10.52225/narra.v3i3.326>

การจำแนกข่าวโควิด-19 โดยใช้อัลกอริทึมความคล้ายคลึงของโคไซน์

COVID-19 news classification using cosine similarity algorithm

อุกฤษฏ์วิวัฒน์ พิมพ์พา¹, สุธิดา ชัยชมชื่น² และวาทีนี นัยเพียร²

Aukkritthiwat Phimpha¹, Suthida Chaichomchuen² and Vatinee Nuijian²

Received: 18 February 2025 ; **Revised:** 21 April 2025 ; **Accepted:** 18 August 2025

บทคัดย่อ

สถานการณ์การแพร่ระบาดของโรคโควิด-19 ที่ผ่านมามีทำให้เกิดความเสียหายในหลากหลายมิติ ผู้คนทั่วโลกต้องเผชิญกับผลกระทบอย่างร้ายแรงของโรคระบาดดังกล่าว ภายใต้ความไม่ชัดเจนของแนวทางการปฏิบัติที่เหมาะสมจากหน่วยงานรัฐที่เกี่ยวข้องผนวกกับคุณลักษณะสำคัญของยุคดิจิทัลที่เปิดโอกาสให้บุคคลทั่วไปสามารถนำเสนอข้อมูลข่าวสารต่าง ๆ ผ่านช่องทางอย่างสื่อสังคมออนไลน์ได้อย่างเสรี ทำให้ข้อมูลข่าวสารเกี่ยวกับการรับมือต่อสถานะการระบาดเต็มไปด้วยข้อมูลแนวทางที่หลากหลายและมีการส่งต่อข้อมูลข่าวสารแบบไร้ระเบียบ โดยงานวิจัยนี้นำเสนอการวัดความคล้ายคลึงของโคไซน์ เพื่อมาใช้ในการจัดหมวดหมู่ระหว่างข่าวด้านสุขภาพ และข่าวที่เกี่ยวข้องกับ โควิด-19 ซึ่งจะช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถเข้าใจถึงสถานการณ์ดังกล่าวได้เพิ่มขึ้น และสามารถนำข้อมูลมาใช้ประโยชน์ในการบรรเทาความรุนแรงที่อาจเกิดขึ้นจากสถานการณ์โรคระบาดของคนไทย โดยพิจารณาจากความถูกต้องในการทำนาย สำหรับการประเมินประสิทธิภาพงานวิจัยนั้น ได้ใช้ชุดข้อมูล เว็บไซต์ข่าวสด มติชน อสมท ซึ่งผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการสร้างแบบจำลองการจำแนกบทความข่าวโดยใช้ความคล้ายคลึงของโคไซน์มีความแม่นยำสูงสุดถึง 82.50 เปอร์เซ็นต์

คำสำคัญ: การจำแนกประเภทข้อความ, เหมืองข้อความ, ความคล้ายคลึงของโคไซน์, โควิด-19

Abstract

The COVID-19 pandemic caused severe, multifaceted global impacts. Amidst unclear guidelines from government agencies, the digital age has allowed individuals to freely disseminate information via social media, leading to a flood of diverse and unregulated content regarding pandemic management. This research presents the use of cosine similarity to categorize health news and COVID-19-related news. This classification assists users in better understanding the situation and utilizing information to mitigate potential pandemic-related risks in Thailand. The research effectiveness was assessed using datasets from news websites such as Khaosod, Matichon, and MCOT. Experimental results demonstrate that the classification model using cosine similarity achieved an accuracy of up to 82.50%.

Keywords: Text classification, text mining, cosine similarity, COVID-19

¹ ภาควิชาคอมพิวเตอร์ศึกษา, คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

² อาจารย์, ภาควิชาคอมพิวเตอร์ศึกษา, คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

¹ Department of Computer Education, Faculty of Technical Education, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

² Lecturer, Department of Computer Education, Faculty of Technical Education, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

* Corresponding author: Aukkritthiwat Phimpha, E-mail: s6202042910039@email.kmutnb.ac.th

บทนำ

ในยุคดิจิทัลที่ข้อมูลข่าวสารมีจำนวนมากและเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว การเข้าถึงและการคัดเลือกข่าวสารที่ตรงกับความต้องการของผู้ใช้งานเป็นเรื่องที่ทำหาย เทคโนโลยีและอัลกอริทึมการคาดการณ์ที่มีประสิทธิภาพจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง การวิเคราะห์ความคล้ายคลึงของเนื้อหาข่าวสารเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ในจำแนกและแนะนำข่าวสารที่เกี่ยวข้องกับความสนใจของผู้ใช้งานได้อย่างแม่นยำจากการติดเชื้อไวรัสโคโรนา 2019 หรือโรคโควิด-19 ที่มีการระบาดในประเทศไทยและทั่วโลก (เอกพล ดวงศรี, 2566) ซึ่งประเทศไทยได้ออกประกาศเป็นโรคติดต่ออันตราย ตามพระราชบัญญัติโรคติดต่อ พ.ศ. 2558 (กรมควบคุมโรค กระทรวงสาธารณสุข, 2563) โดยปีที่มีความรุนแรงพบอัตราป่วยตายด้วยสายพันธุ์เดลต้า สูงสุดช่วงปี 2564 ร้อยละ 0.98 และในปี 2565 พบผู้ป่วยสูงสุด 2,492,054 ราย ที่เกิดจากการระบาดของสายพันธุ์โอมิครอน (ดรุณี โพธิ์ศรี และคณะ, 2566) ซึ่งการแพร่ระบาดของเชื้อไวรัสทำให้เกิดผลกระทบต่อชีวิต สุขภาพ และความเป็นอยู่ของประชาชน จึงต้องมีการเผยแพร่ข่าวสารที่ถูกต้อง รัฐบาลจึงได้จัดตั้งศูนย์บริหารสถานการณ์โควิด-19 (ศบค.) เพื่อการสื่อสารข้อมูลและคำแนะนำเกี่ยวกับโควิด-19

ในยุคดิจิทัลเปิดโอกาสให้บุคคลทั่วไปสามารถนำเสนอข้อมูลข่าวสารผ่านสื่อสังคมออนไลน์ได้อย่างเสรี ทำให้รับมือต่อสภาวะการระบาดของโรคได้หลากหลายแนวทาง เนื่องจากการส่งต่อข้อมูลข่าวสารที่สร้างความเข้าใจผิดให้กับประชาชน (ทองพูล มุขรักษ์ และคณะ, 2566) เช่น การรักษาระยะห่างทางสังคม การกักตัว อาการของโรคที่เปลี่ยนไป

การนำความรู้เกี่ยวกับเทคนิคการทำเหมืองข้อความ (Text Mining) มาใช้ในการจำแนกและการพยากรณ์ในงานด้านต่าง ๆ ไม่ว่าจะเป็น รัชพิชญ์ ชำนาญกิจ และจิรติรัตน์ ศิริบรรรัตนกุล (2565) งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาระบบต้นแบบที่เข้าถึงง่ายและสามารถตรวจสอบได้อย่างรวดเร็วว่าข้อความหรือบทความภาษาไทยใด ๆ เป็นข่าวปลอม หรือบทความปลอมหรือไม่ ระบบที่พัฒนาขึ้นอาศัยฐานข้อมูล Google BigQuery ที่รวบรวมข่าวปลอมภาษาไทยจากเว็บไซต์และสื่อออนไลน์ที่เกี่ยวข้องกับการแจ้งเตือนข่าวปลอม โดยใช้เทคนิคในการตัดแบ่งคำ วิเคราะห์โครงสร้าง และแยกชนิดของคำเพื่อสกัดคุณลักษณะสำคัญของข่าวปลอม ระบบนี้ได้รับอินพุตเป็นข้อความจากผู้ใช้ ซึ่งจะถูกนำไปเปรียบเทียบกับฐานข้อมูลข่าวปลอมโดยใช้วิธีการจับคู่คุณลักษณะ ข้อมูลที่มีความคล้ายคลึงกันมากที่สุดสามอันดับแรกจะแสดงผลเป็นผลลัพธ์ เพื่อให้ผู้ใช้สามารถพิจารณาข่าวที่ใกล้เคียงกับอินพุตได้ จากผลการทดลองในชุดข้อมูลทดสอบ ซึ่งประกอบด้วยข่าวจริงและ

ข่าวปลอมรวม 120 ข่าว ระบบสามารถระบุข่าวปลอมได้อย่างถูกต้อง โดยมี ค่า precision เท่ากับ 91.84% และ recall เท่ากับ 75.00%

องอาจ อุ่นนันต์ และพยุ่ง มีสัจ (2563) สร้างแบบจำลองการจำแนกความน่าเชื่อถือของเว็บไซต์แหล่งข่าวภาษาไทย มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาข้อมูลปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับความน่าเชื่อถือของเว็บไซต์ และเปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลองที่ใช้ในการจำแนกประเภท โดยการรวบรวมข้อมูลปัจจัยทางเทคนิคของเว็บไซต์แหล่งข่าวและสื่อสังคมออนไลน์ของแหล่งข่าวแล้วทำการจัดกลุ่มข้อมูลเว็บไซต์แหล่งข่าวเพื่อกำหนดป้ายกำกับกลุ่มของแหล่งข่าว โดยจัดกลุ่มที่มีประสิทธิภาพดีที่สุดแบ่งออกเป็น 5 กลุ่ม จากนั้นทำการวิเคราะห์ข้อมูลด้วยเทคนิคการจำแนกประเภทประกอบด้วย 5 เทคนิค ดังนี้ Decision Tree (C4.5), Naïve Bayes, K-NN, Multilayer Perceptron และ Support Vector Machine (SVM) แล้วเปรียบเทียบค่าประสิทธิภาพพบว่าเทคนิค K-NN ที่มีค่า K เท่ากับ 5, 6 และ 7 มีค่าประสิทธิภาพมากที่สุดเท่ากัน (Accuracy=96.03%, Precision=0.962, Recall=0.960, F-measure=0.959)

กชกร เทียมทัด (2565) นำเสนอการตรวจจับข่าวปลอมภาษาไทยด้วยกระบวนการเรียนรู้ของเครื่องสามแบบ จำลองได้แก่ Naïve Bayes, Neural Network และ SVM โดยเก็บข้อมูลข่าวภาษาไทยจากเว็บไซต์ศูนย์ต่อต้านข่าวปลอม (ประเทศไทย) ในช่วงเดือนกันยายน 2561 ถึงเดือนกันยายน 2565 ข้อมูลข่าวผ่านกระบวนการเลือกคุณลักษณะ การแปลงค่าคุณลักษณะ การแบ่งค่าข้อมูลเป็นช่วง และการปรับช่วงของค่าข้อมูลให้อยู่ในช่วงเดียวกัน นอกจากนี้ยังผ่านกระบวนการสุ่มเกินเพื่อทำให้ข้อมูลข่าวมีจำนวนข่าวจริงและข่าวปลอมเท่ากัน ผลการวิจัยพบว่า แบบจำลอง SVM มีความถูกต้องร้อยละ 94 มากกว่าค่าความถูกต้องของแบบจำลอง Naïve Bayes และ Neural Network

การใช้ความคล้ายคลึงของโคไซน์เป็นเครื่องมือที่มีความสำคัญในหลายงานวิจัย เช่น การค้นหาข้อมูล ใช้ในการจัดอันดับเอกสารที่เกี่ยวข้องกับคำค้นหา (Nakata & Nezu, 2013) การจัดหมวดหมู่เอกสารหรือบทความข่าวตามความคล้ายคลึงกับหมวดหมู่ที่กำหนด (Kowsari *et al.*, 2019) การแนะนำเนื้อหาที่เกี่ยวข้อง เช่น การแนะนำบทความ ข่าว หรือผลิตภัณฑ์ให้กับผู้ใช้ตามความสนใจ (Nuipian & Chuaykhun, 2023) แม้ว่าอัลกอริทึมความคล้ายคลึงของโคไซน์จะถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายในงานวิจัยต่าง ๆ แต่ยังคงงานวิจัยที่ประเมินผลการใช้งานในบริบทของภาษาไทย ซึ่งมีลักษณะเฉพาะที่แตกต่างจากภาษาอื่น ๆ เช่น ลักษณะเฉพาะของภาษาไทย การไม่มีการเว้นวรรคระหว่างคำ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแบบจำลองสำหรับจำแนกบทความข่าวภาษาไทย โดยประยุกต์ใช้เทคนิคการวัดความคล้ายคลึงของโคไซน์ (Cosine Similarity) ซึ่งเป็นกระบวนการหนึ่งในงานประมวลผลภาษาธรรมชาติและเหมืองข้อความ เทคนิคดังกล่าวช่วยให้สามารถประเมินระดับความคล้ายคลึงกันของเนื้อหาข่าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ และสามารถประยุกต์ใช้ในการค้นหา จัดหมวดหมู่ข่าว แนะนำเนื้อหาที่เกี่ยวข้อง และดึงข้อมูลที่ตรงตามบริบท เพื่อสนับสนุนการสื่อสารข้อมูลที่ถูกต้อง ลดการเผยแพร่ข้อมูลที่บิดเบือนในยุคดิจิทัล และเพิ่มความสามารถในการเข้าถึงข่าวสารที่น่าเชื่อถือ เพื่อประเมินความเหมาะสมของเทคนิค Cosine Similarity ในบริบทของภาษาไทย งานวิจัยนี้จึงได้เปรียบเทียบประสิทธิภาพกับ Jaccard Similarity ซึ่งเป็นอัลกอริทึมพื้นฐานที่มักใช้กับการวัดความคล้ายคลึงของคำในรูปแบบเซต (set-based comparison) โดยงานวิจัยก่อนหน้านี้ เช่น Chaudhary and Khurana (2021) แสดงให้เห็นว่า Cosine Similarity มักให้ผลลัพธ์ที่แม่นยำกว่า Jaccard ในงานวิเคราะห์ข้อความ โดยเฉพาะเมื่อนำมาใช้กับข้อมูลที่มีโครงสร้างภาษาเฉพาะเช่นภาษาไทย ผู้วิจัยจึงมุ่งศึกษาประสิทธิภาพของ Cosine และ Jaccard Similarity ในบริบทของการจำแนกข่าวเกี่ยวกับโรคโควิด-19 เพื่อหาข้อเสนอนี้ในการเลือกเทคนิคที่เหมาะสมต่อไป

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อพัฒนาแบบจำลองการจำแนกข่าวโควิด-19 โดยอัลกอริทึมการวัดความคล้ายคลึงของโคไซน์

วิธีดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนการสร้างแบบจำลองประกอบไปด้วย การรวบรวมข้อมูล การทำความสะอาดข้อมูล การประมวลผลข้อความ การคัดเลือกคำสำคัญ การคำนวณค่าความคล้ายคลึงของโคไซน์ การสร้างแบบจำลอง และการประเมินประสิทธิภาพแบบจำลอง ดัง Figure 1

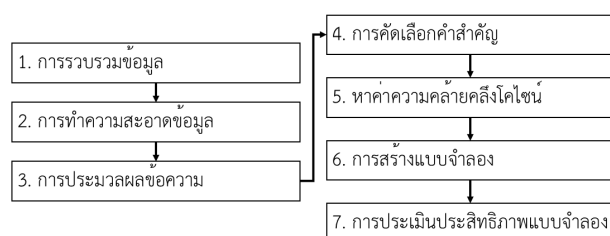


Figure 1 Research Process.

1. การรวบรวมข้อมูล (Data Collection)

งานวิจัยฉบับนี้ได้รับรวบรวมข่าวโรคโควิด-19 บนเว็บไซต์ข่าวสด มติชน อสมท ตั้งแต่วันที่ 26 ตุลาคม 2564 ถึงวันที่ 31 มกราคม 2566 จำนวน 20,000 ข่าว โดยใช้ Web Scraper ซึ่งเป็นส่วนเสริมของ Google Chrome การกำหนดหมวดหมู่ของข่าวในงานวิจัยนี้อ้างอิงจากหมวดหมู่ที่เว็บไซต์ข่าวต้นทางได้จัดไว้แล้ว ซึ่งมีอยู่ในเว็บไซต์ข่าวสด มติชน และอสมท โดยระบบจัดการเนื้อหา (Content Management System) ของแต่ละเว็บไซต์จะมีการจัดกลุ่มเนื้อหาข่าวตามหัวข้อที่เกี่ยวข้อง จากนั้นผู้วิจัยได้ตรวจสอบข่าวแต่ละบทความเพิ่มเติมเพื่อยืนยันความถูกต้องของหมวดหมู่ โดยพิจารณาจากเนื้อหาหลักของข่าวว่ามีการกล่าวถึงโรคโควิด-19 โดยตรงหรือไม่ เพื่อให้ได้ชุดข้อมูลที่มีความถูกต้องและสอดคล้องกับวัตถุประสงค์ของการวิจัย

2. การทำความสะอาดข้อมูล (Data Cleansing)

ขั้นตอนนี้เป็นเตรียมข้อมูลให้สะอาดและมีความสมบูรณ์ก่อนนำไปใช้กับแบบจำลอง โดยการลบข่าวที่ซ้ำซ้อน และกำจัดอักขระที่ไม่จำเป็น เช่น การลบสัญลักษณ์ และอักขระพิเศษ ด้วย Regular Expression การลบลิงก์ URL HTML tag และอีโมจิ

3. การประมวลผลข้อความ

3.1 การตัดคำ (Word Segmentation)

ใช้ไลบรารีของ PyThaiNLP เลือกใช้เอ็นจิน (Engine) แบบ newmm (Phatthiyaphaibun *et al.*, 2023) เป็นการอ้างอิงจากพจนานุกรมโดยใช้เทคนิค Maximal Matching Algorithm และ Thai Character Cluster (TCC) ร่วมกับพจนานุกรมที่กำหนดเอง (Custom Dictionary) ผลลัพธ์ใน Figure 2

News content
กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์,แถลงข่าวการเฝ้า, ระวัง, เชื้อ,โควิด-19,กลายพันธุ์,พบ,เชื้อ, ...
โควิด-19,::ผวจ,จังหวัด,ชัยนาท,สั่ง,ปิด,ชุมชน,สุขใจ,หลัง,พบ,คลัสเตอร์,ใหม่,ตรวจ,พบ,เชื้อ,...
คลัสเตอร์,โรงพัก,โคราชลาม,ไม่,หยุด,ติด,เชื้อ,เพิ่ม,อีก,3,ราย,รวม,แล้ว,33,ราย,ไม่,เร่ง,ด่วน,ขอ,ให้,งด,ติดต่อ,ราชการ,...

Figure 2 Example of the result of word cutting.

3.2 การลบคำหยุด (Stop Word Removal)

ใช้ไลบรารีของ PyThaiNLP ที่มีการสร้างคลังคำหยุดสำหรับภาษาไทย เช่น คำว่า “ที่” “ถึง” และ “นั้น” เป็นต้น รวมทั้งคำที่มีอักขระตัวเดียว เช่น “ก” “ข” และ “ด” เป็นต้น

3.3 น้ำหนักคำของคำ (Term Weighting)

การให้น้ำหนักคำตามความถี่คำ – ความถี่ผกผันของคำในเอกสาร (Term frequency-inverse document frequency : TF-IDF) เป็นหนึ่งในคุณลักษณะ (Feature) ที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลาย ซึ่ง TF-IDF เป็นวิธีการทางสถิติที่ใช้ในการประเมินความสำคัญของคำต่อเอกสาร ความสำคัญของคำเป็นสัดส่วนโดยตรงกับจำนวนครั้งที่คำคำนั้นปรากฏในเอกสารนั้น คำนวณได้จากสมการที่ 1 (Manning *et al.*, 2008) คำ TF-IDF ที่แสดงใน Figure 3 คือคำ TF-IDF ของคำในเอกสารทั้งหมดที่มีค่ามากที่สุด 50 คำ

$$TF - IDF_{(t,d)} = f_{(t,d)} \times \log\left(\frac{N}{df_t}\right)$$

เมื่อ

$f_{(t,d)}$ = จำนวนครั้งที่คำ t ปรากฏในเอกสาร d

N = จำนวนเอกสารทั้งหมดในคลังข้อมูล

df_t = จำนวนเอกสารที่มีคำ t ปรากฏ

คำ	TF-IDF	คำ	TF-IDF
ติดเชื้อ	0.087	โดส	0.029
โควิด	0.087	เดินทาง	0.029
คน	0.079	สถานการณ์	0.028
วัคซีน	0.072	ล้าน	0.027
จำนวน	0.064	ข้อมูล	0.027
ผู้ป่วย	0.064	บ้าน	0.027
วันที่	0.063	เดือน	0.024
โรงพยาบาล	0.060	ที่จะ	0.024
ตรวจ	0.054	เรื่อง	0.024
ไทย	0.054	แพร่ระบาด	0.024
ประเทศ	0.053	เวลา	0.023
จังหวัด	0.049	ทำ	0.023
โรค	0.049	ระบบ	0.023
ประชาชน	0.047	ป้องกัน	0.022
ฉีดวัคซีน	0.045	เสี่ยง	0.022
พื้นที่	0.045	สะสม	0.021
เข็ม	0.042	อายุ	0.021
ปี	0.040	ดูแล	0.020
เชื้อ	0.037	ควบคุม	0.020
อาการ	0.036	บริการ	0.020
กล่าวว่า	0.036	ระบาด	0.020
สำหรับ	0.034	ยา	0.019
ฉีด	0.033	รายงาน	0.019
นพ.	0.032	รักษา	0.019
มาตรการ	0.031	เสียชีวิต	0.019

Figure 3 Word Weights by frequency.

4. การคัดเลือกคำสำคัญ

นำคำที่ได้จาก Figure 3 ซึ่งผ่านการคำนวณค่าความถี่ และการกรองคำที่ไม่สำคัญแล้วมาพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างคำแต่ละคู่โดยใช้หลักการ co-occurrence หรือการพบคำร่วมกันในข่าวเดียวกัน เกณฑ์ที่ใช้ในการคัดเลือกคำคู่สำคัญ คือ คู่คำใดที่มีค่านับสนับสนุน (Support) หรือความถี่ในการปรากฏร่วมกันสูงกว่า 6,000 ครั้ง จะถือว่าคู่นั้นมีความสัมพันธ์ในเชิงความสำคัญ ซึ่งแสดงให้เห็นถึงความเกี่ยวข้องระหว่างคำทั้งสองคำ มีผลใน Figure 4

ลำดับ	คู่คำ	ค่าสหสัมพันธ์
1	ฉีดวัคซีน, เข็ม	16,783
2	เข็ม, โดส	15,291
3	จำนวน, เข็ม	10,807
4	ติดเชื้อ, วันที่	10,554
5	ประชากร, เข็ม	10,342
6	ฉีดวัคซีน, โดส	9,634
7	จำนวน, ฉีดวัคซีน	7,671
8	วัคซีน, เข็ม	7,131
9	จำนวน, โดส	6,957
10	ผู้ป่วย, โรงพยาบาล	6,687
11	ฉีดวัคซีน, วัคซีน	6,604
12	ติดเชื้อ, อายุ	6,129
13	ติดเชื้อ, โรงพยาบาล	6,048

Figure 4 The effects of common words in COVID-19 news.

5. ความคล้ายคลึงของโคไซน์

เป็นแนวคิดทางคณิตศาสตร์ที่ใช้วัดความคล้ายคลึงระหว่างเวกเตอร์สองตัวในพื้นที่ n มิติ โดยพิจารณาจากมุมระหว่างเวกเตอร์ (Angle) มากกว่าความยาวของเวกเตอร์ (Magnitude) เทคนิคนี้นิยมใช้ในหลากหลายสาขา เช่น การประมวลผลภาษาธรรมชาติ การทำเหมืองข้อมูล การค้นคืนข้อมูล และระบบแนะนำ (Schütze *et al.*, 2008)

การคำนวณค่าจากความต่างของมุม 2 มุม ดัง Figure 5 และในสมการที่ 2 ซึ่งผลลัพธ์จะมีค่าอยู่ระหว่าง 0 ถึง 1 เท่านั้น หากมีค่าเท่ากับ 0 แปลว่าคู่มิมีความคล้ายคลึงกัน แต่หากค่าเท่ากับ 1 แปลว่าคู่มิเหมือนกันทุกประการ (Chaudhary & Khurana, 2021)

$$\text{Cosine similarity} = \frac{A \cdot B}{||A|| ||B||} \quad (2)$$

เมื่อ

A และ B คือเวกเตอร์สองตัวที่ต้องการวัดความคล้ายคลึง $A \cdot B$ คือ ผลคูณจุด (dot product) ระหว่างเวกเตอร์ทั้งสอง สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 3

$$A \cdot B = \sum_{i=1}^n A_i \cdot B_i \quad (3)$$

$||A||$ และ $||B||$ คือความยาว (magnitude) ของเวกเตอร์ A และ B สามารถคำนวณได้จากสมการที่ 4 และสมการที่ 5

$$||A|| = \sqrt{\sum_{i=1}^n A_i^2} \quad (4)$$

$$||B|| = \sqrt{\sum_{i=1}^n B_i^2} \quad (5)$$

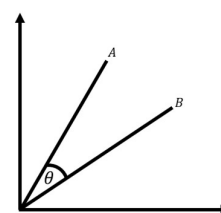


Figure 5 Similarity of cosine between A and B.

6. การสร้างแบบจำลอง

ในการสร้างแบบจำลองสำหรับการทดลองครั้งนี้ ชุดข้อมูลจำนวน 20,000 ข่าว ได้รับการประเมินโดยใช้เทคนิค 5-fold cross-validation เพื่อให้ผลการประเมินมีความน่าเชื่อถือ และสามารถสะท้อนประสิทธิภาพของแบบจำลองในเชิงทั่วไป (generalization) ได้ดียิ่งขึ้น (Kohavi, 1995) ผู้วิจัยได้นำค่าที่มีค่าสนับสนุนสูง จาก Figure 4 มาสร้างกฎความสัมพันธ์ จำนวนทั้งสิ้น 13 กฎ โดยแต่ละค่าจะถูกใช้ในการคำนวณค่าความคล้ายคลึงของโคไซน์ (Cosine Similarity) หากผลรวมของค่าความคล้ายคลึงทั้งหมดมากกว่า Threshold = 0.5 ซึ่งเป็นค่ามาตรฐานที่นิยมใช้ในงานจำแนกประเภทแบบไบนารี (Sebastiani, 2002) บทความข่าวนั้นจะถูกจัดเป็นข่าวที่เกี่ยวข้องกับโควิด-19 แบบจำลองได้รับการพัฒนาโดยใช้ภาษา Python ร่วมกับแพลตฟอร์ม Google Colab ในการพัฒนาและทดสอบประสิทธิภาพอย่างเป็นระบบ

7. การประเมินประสิทธิภาพแบบจำลอง (Evaluation model)

การประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองสำหรับการวิจัยใช้เครื่องมือที่ชื่อว่าตาราง Confusion matrix ดัง Table 1 ประเมินผลลัพธ์ของการทำนาย โดยประกอบไปด้วยการประเมินค่าความถูกต้อง ค่าความแม่นยำ ค่าความระลึก ค่าความสมดุล (Alpaydin, 2021)

Table 1 Confusion matrix.

	Actually Positive (1)	Actually Negative (0)
Predicted Positive (1)	True Positives (TP)	False Positives (FP)
Predicted Negative (0)	False Negative (FN)	True Negative (TN)

เมื่อ

TP = True Positive คือ คลาสเป้าหมายเท่ากับ Yes และพยากรณ์ว่า Yes

TN = True Negative คือ คลาสเป้าหมายเท่ากับ Yes และพยากรณ์ว่า No

FP = False Positive คือ คลาสเป้าหมายเท่ากับ No และพยากรณ์ว่า No

FN = False Negative คือ คลาสเป้าหมายเท่ากับ No และพยากรณ์ว่า Yes

ค่าความถูกต้อง (Accuracy) คำนวณจากสัดส่วนของจำนวนการทำนายที่ถูกต้องต่อจำนวนตัวอย่างทั้งหมดในชุดข้อมูล ดังสมการที่ 6

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + FP + TN + FN} \quad (6)$$

ค่าความแม่นยำ (Precision) คือ การทำนายคลาสบวกอย่างถูกต้อง โดยคำนวณจากสัดส่วนของจำนวนการทำนายที่ถูกต้องเมื่อเปรียบเทียบกับจำนวนทั้งหมดที่แบบจำลองทำนายเป็นบวก ดังสมการที่ 7

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (7)$$

ค่าความระลึก (Recall) คือ เป็นค่าที่บ่งบอกว่า แบบจำลองที่ทำนายถูกต้องมีกี่ค่า ซึ่งสามารถหาได้จากสมการดังสมการที่ 8

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (8)$$

ค่าความสมดุล (F1-Score) คือ ค่าความสมดุลระหว่างความแม่นยำในการทำนายในกลุ่มเป้าหมาย และค่าความระลึก ซึ่งสามารถหาดังสมการที่ 9

$$F1 - Score = \frac{2 \times (Precision \times Recall)}{Precision + Recall} \quad (9)$$

ผลการทดลองและวิจารณ์

หลังจากพัฒนาแบบจำลองจึงดำเนินการประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองโดยใช้เทคนิค 5-fold cross-validation เพื่อให้ผลลัพธ์มีความน่าเชื่อถือและลดอคติที่อาจเกิดจากการแบ่งข้อมูลเพียงครั้งเดียว ผลการทดลองสรุปได้ว่าแบบจำลองที่ใช้ Cosine Similarity ให้ค่าความถูกต้องเฉลี่ย 87.20%

News	Cosine	Class	Prediction
The Department of Disease Control (DDC) reported that Thailand ranked 26th worldwide in cumulative COVID-19 cases, with a cumulative vaccination coverage of 41.6%. The DDC stated that 19 deaths were reported, including 1 case in Bangkok, 2 in Nakhon Ratchasima, 2 in Yasothon, 2 in Udon Thani, 1 in Khon Kaen, 1 in Kamphaeng Phet, 1 in Chanthaburi, 1 in Phitsanulok, 1 in Nakhon Si Thammarat, 1 in Chumphon, 2 in Rayong, 1 in Chanthaburi, 1 in Nakhon Nayok, 1 in Prachin Buri, 1 in Suphan Buri, and 1 in Phetchaburi. Among the fatalities, 13 were male and 6 were female. Thirteen individuals were 60 years of age or older, while six were under 60 years of age. Six had underlying medical conditions, whereas none had a documented history of chronic disease. The DDC also reported that, as of 13 June, a total of 15,350 vaccine doses had been administered. Since 28 February 2021, cumulative vaccinations reached 138,713,285 doses, comprising 56,860,010 first doses (81.7% of the population), 52,923,673 second doses (76.1%), and 28,929,602 third doses (41.6%).	0.758	COVID-19	COVID-19
The first four countries in the world have officially declared COVID-19 an endemic disease, while Thailand is still considering the transition. The Ministry of Public Health is preparing guidelines for classifying COVID-19 as endemic. On 15 June, the Ministry of Public Health stated that the Omicron BA.2 variant generally causes milder symptoms, with declining infection and mortality rates, although infections among high-risk groups continue to increase. Dr. Opas Kamkawinpong, Director-General of the Department of Disease Control, emphasized the importance of receiving a booster (third) vaccine dose. For the current situation, 23,618 new RT-PCR-confirmed cases were reported, with an additional 42,138 positive ATK results, bringing the total number of new cases to 65,756. Among these patients, 1,131 developed pneumonia and 325 required mechanical ventilation. Cumulative confirmed cases reached 734,727, with 18,939 patients hospitalized, 543,184 cumulative recoveries (since 1 January), 223,414 patients still receiving treatment, and 49 new deaths.	0.713	COVID-19	COVID-19

Figure 6 Results from forecasting COVID-19 news data and other health news.

ค่าความแม่นยำ 85.40% ค่าความระลึก 89.10% และค่าความสมดุล 87.20% แบบจำลองที่ใช้ Jaccard Similarity ค่าความถูกต้องเฉลี่ย 78.20% ค่าความแม่นยำ 74.10% ค่าความระลึก 85.20% และค่าความสมดุล 79.30% สามารถแสดงตัวอย่างดัง Figure 6

หลังจากทดสอบประสิทธิภาพแบบจำลองแล้วจึงนำข้อมูลข่าวจำนวน 200 ข่าว ซึ่งเป็นข้อมูลใหม่ที่ไม่เคยใช้ในการพัฒนาแบบจำลอง (Unseen Data) โดยแบ่งเป็นข่าวที่เกี่ยวข้องกับโควิด-19 จำนวน 100 ข่าว ข่าวอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง กับสุขภาพจำนวน 100 ข่าว เพื่อนำมาเปรียบเทียบ ประสิทธิภาพระหว่าง Cosine Similarity กับ Jaccard Similarity และตรวจสอบความถูกต้อง

การทดสอบกับแบบจำลองทำการวัดค่าความถูกต้อง ค่าความแม่นยำ ค่าความระลึก และค่าความสมดุล ซึ่งผลจากหาประสิทธิภาพ พบว่า แบบจำลองให้ Cosine Similarity ค่าความถูกต้อง 82.50% ค่าความแม่นยำ 80.40% ค่าความระลึก 86.00% และค่าความสมดุล 83.10% แบบจำลองให้ Jaccard Similarity ค่าความถูกต้อง 70.00% ค่าความแม่นยำ 64.90% ค่าความระลึก 87.00% และค่าความสมดุล 74.40% ดัง Table 2

Table 2 Results of model performance evaluation.

Confusion Matrix for Cosine Similarity				
	Covid-19		Health	
Covid-19	86		14	
Health	21		79	
Confusion Matrix for Jaccard Similarity				
	Covid-19		Health	
Covid-19	79		21	
Health	33		67	
	Accuracy	Precision	Recall	F1-score
Cosine	0.825	0.804	0.860	0.831
Jaccard	0.700	0.649	0.870	0.744

สรุปผลและข้อเสนอแนะ

สำหรับจำแนกข่าวโควิด-19 โดยกระบวนการเริ่มตั้งแต่การรวบรวมข้อมูลจากเว็บไซต์ข่าวจำนวน 20,000 ข่าว การทำความสะอาดข้อมูล การประมวลผลข้อความ และการ

สร้างแบบจำลองผ่านการวิเคราะห์ความคล้ายคลึงของข้อความ ใน Figure 6 พบว่าข่าวที่เกี่ยวข้องกับโรคโควิด-19 แต่คำว่า “โควิด” กลับไม่ปรากฏเป็นคำที่พบบ่อยที่สุดในลำดับต้น ๆ ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงลักษณะเฉพาะของการใช้ภาษาไทยที่ใช้ในงานข่าว ในกรณีของโรคระบาดที่มีการใช้คำหลากหลายเพื่ออ้างถึงสิ่งเดียวกัน ในข่าวมักใช้คำศัพท์ที่หลากหลายในการกล่าวถึงโควิด-19 เช่น “ไวรัส”, “โรคระบาด”, “โคโรนา”, “โคโรนาไวรัส”, “โควิด-19” หรือ “COVID-19” แบบจำลองที่พัฒนาขึ้นในงานวิจัยนี้ไม่อาศัยเพียงการตรวจสอบคำหลัก (Keyword Matching) อย่างคำว่า “โควิด” เท่านั้น แต่พิจารณาความสัมพันธ์เชิงเนื้อหาโดยรวมของข่าว ซึ่งช่วยให้สามารถเข้าใจและจัดประเภทข่าวจาก บริบทและความหมายร่วมของคำทั้งชุด มากกว่าการพึ่งพาคำใดคำหนึ่งเพียงอย่างเดียว ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าแบบจำลองสามารถจำแนกข่าวได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยผลลัพธ์การประเมินประสิทธิภาพมีค่าความถูกต้องตอนสร้างแบบจำลองอยู่ที่ 87.20% และ 82.50% ในชุดข้อมูลใหม่ที่ไม่เคยใช้ในการพัฒนาแบบจำลอง

นอกจากนี้ เมื่อนำมาทดสอบเปรียบเทียบระหว่าง Cosine Similarity กับ Jaccard Similarity แบบจำลองที่พัฒนาจากความคล้ายคลึงของโคไซน์นั้นมีประสิทธิภาพที่ดีกว่าราว ๆ 12.5% ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ ปรีนทร์ วงษ์ทอง (2568) ได้เปรียบเทียบระหว่าง Cosine Similarity และ Jaccard Similarity ในระบบแนะนำรายวิชาสำหรับการเทียบโอน พบว่า Cosine Similarity ให้ค่าความแม่นยำ (Precision) และค่าความสมดุล (F1-score) สูงกว่า Jaccard อย่างมีนัยสำคัญ

ผลการทดลองชี้ให้เห็นว่า Cosine Similarity เป็นเครื่องมือที่มีประสิทธิภาพในการจัดหมวดหมู่ข่าวสารด้านสุขภาพ และสามารถประยุกต์ใช้เป็นเครื่องมือในการคัดกรองหรือแนะนำข่าวที่เกี่ยวข้องได้อย่างมีประสิทธิภาพในยุคข้อมูลข่าวสารที่แพร่กระจายรวดเร็ว ลดความเสี่ยงจากข่าวปลอมหรือข้อมูลที่บิดเบือน ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อการสื่อสารข้อมูลสาธารณสุขอย่างถูกต้องและแม่นยำ

ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยในอนาคตควรมีการวิเคราะห์เพิ่มเติม เช่น การสร้างกราฟ ROC Curve เพื่อประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองในเชิงลึก และการทดสอบ sensitivity analysis เพื่อค้นหาค่า threshold ที่เหมาะสมที่สุดในบริบทของภาษาไทย

นอกจากนี้ ควรพัฒนาแบบจำลองให้สามารถจำแนกข่าวได้หลากหลายหมวดหมู่มากยิ่งขึ้น หรือขยายขอบเขตของชุดข้อมูลให้ครอบคลุมข่าวเกี่ยวกับโรคอื่น ๆ เช่น โรคไข้หวัดใหญ่สายพันธุ์ใหม่, RSV, หรือโรคระบบทางเดินหายใจอื่น ๆ

ที่มีลักษณะของการรายงานข่าวคล้ายกับโรคโควิด-19 เพื่อประเมินความสามารถของแบบจำลองในการแยกแยะเนื้อหาข่าวที่มีบริบทใกล้เคียงกัน และนำไปประยุกต์ใช้ในระบบการจัดการข่าวสารด้านสุขภาพที่มีความแม่นยำ ครอบคลุม และตอบสนองต่อสถานการณ์ปัจจุบันได้ดียิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณภาคีวิชาคอมพิวเตอร์ศึกษา คณะครุศาสตร์อุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือที่อำนวยความสะดวกสถานที่ ห้องปฏิบัติการ และอำนวยความสะดวกต่าง ๆ จนทำให้การวิจัยครั้งนี้เสร็จสมบูรณ์ตามเป้าประสงค์ของนักวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- กรมควบคุมโรค กระทรวงสาธารณสุข. (2563). คู่มือเจ้าหน้าที่รับมือภาวะฉุกเฉินด้านสุขภาพจากการระบาดของโรคโควิด-19 ในประเทศไทย. <https://ddc.moph.go.th/viralpneumonia/>
- กษกร เทียมทัต. (2565). การตรวจจับข่าวปลอมภาษาไทยโดยใช้แบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่อง [วิทยานิพนธ์วิทยาศาสตร์มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์].
- ดรุณี โพธิ์ศรี, เอกลักษณ์ เอี่ยมประดิษฐ์ และเอกพล เสมอชัย. (2566). การเฝ้าระวังและควบคุมโรคโควิด-19: การมีส่วนร่วมของทุกภาคส่วนในการจัดการสถานการณ์ฉุกเฉินด้านสาธารณสุขในจังหวัดนครปฐม. *วารสารวิทยาศาสตร์สุขภาพแห่งประเทศไทย*, 32(ภาคผนวก 1), S49–S60.
- รัชพิชญ์ ข่านาญกิจ และจิตติรัตน์ ศิริบรรณรัตน์กุล. (2565). การตรวจสอบข่าวปลอมภาษาไทยด้วยเทคนิคการประมวลผลภาษาธรรมชาติ. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.*, 45(2), 275–287.
- ทองพูล มุขรักษ์, บำรุง ศรีนวลปาน, ชวัลรัตน์ ศรีนวลปาน และกรกฎ จำเริญ. (2566). จริยธรรมและจรรยาบรรณของสื่อในสังคมไทยในการนำเสนอข่าวยุคดิจิทัล กรณีศึกษา: การกราดยิงหนองบัวลำภู, คดีน้องชมพู่ และคดีแดงโม ความท้าทายที่ยังมีปัญหา. *วารสารวิชาการบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช*, 1(1), 54–67.
- ปรินทร์ วงษ์ทอง, อนเนก พุทธิเดช และสุวิทย์ สมสุภาพรุ่งยศ. (2568). การพัฒนาระบบแนะนำการเทียบโอนรายวิชาโดยหาค่าความเหมือนของข้อความ. *เอกสารประกอบการประชุมวิชาการระดับชาติด้านเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสารแห่งประเทศไทย (NCCIT 2025)*, 317–324. มหาวิทยาลัยเชียงใหม่.

- องอาจ อุ่นอนันต์ และพญง มีสัง. (2563). การจำแนกความน่าเชื่อถือของเว็บไซต์แหล่งข่าวภาษาไทยโดยใช้เทคนิคการทำเหมืองข้อมูล. *วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเซีย ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี*, 14(2), 101–116.
- เอกพล ดวงศรี. (2566). สงคราม (โรค) โควิด-19: อุปลักษณะเชิงมโนทัศน์ของสังคมไทยและโลกที่สะท้อนผ่านหนังสือพิมพ์ไทยออนไลน์. *วารสารมนุษยศาสตร์มหาวิทยาลัยเชียงใหม่*, 24(1), 226–251.

- Alpaydin, E. (2021). *Machine learning*. MIT Press.
- Chaudhary, K., & Khurana, S. (2021). Performance evaluation of text similarity measures using cosine similarity in document clustering. *International Journal of Computer Applications*, 183(1), 25–30.
- 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)*, 14(2), 1137–1145.
- Kowsari, K., Jafari Meimandi, K., Heidarysafa, M., Mendu, S., Barnes, L., & Brown, D. (2019). Text classification algorithms: A survey. *Information*, 10(4), 150. <https://doi.org/10.3390/info10040150>
- Manning, C. D., Raghavan, P., & Schütze, H. (2008). *Introduction to information retrieval*. Cambridge University Press.
- Nakata, T., & Nezu, M. (2013). An overview of information retrieval. In *Information retrieval and hypertext* (pp. 1–16). Springer.
- Nuipian, V., & Chuaykhun, J. (2023, December). Book recommendation system based on course descriptions using cosine similarity. *Proceedings of the 2023 7th International Conference on Natural Language Processing and Information Retrieval* (pp. 273–277).
- Phatthiyaphaibun, W., Chaovavanich, K., Polpanumas, C., Suriyawongkul, A., Lowphansirikul, L., Chormai, P., & Udomcharoenchaikit, C. (2023). PyThaiNLP: Thai natural language processing in Python. *Journal of Open Source Software*, 8(1), Article 23456. <https://doi.org/10.5281/zenodo.123456>
- Schütze, H., Manning, C. D., & Raghavan, P. (2008). *Introduction to information retrieval* (Vol. 39). Cambridge University Press.
- Sebastiani, F. (2002). Machine learning in automated text categorization. *ACM Computing Surveys*, 34(1), 1–47.

การพัฒนาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโมเดลภาษาขนาดใหญ่สำหรับการสร้างกรณีทดสอบอัตโนมัติในงานทดสอบซอฟต์แวร์ระบบธนาคาร

Development and comparative evaluation of large language models for automated test case generation in banking software testing

หทัยรัตน์ เจนวิทยา¹ และรัฐศิลป์ รานอกphanuwat^{1*}

Hathairat Janwittaya¹ and Ratthaslip Ranokphanuwat^{1*}

Received: 4 August 2025 : Revised: 25 September 2025 : Accepted: 21 October 2025

บทคัดย่อ

1) การทดสอบซอฟต์แวร์หรือการสร้างกรณีทดสอบ (Test Case) เป็นขั้นตอนสำคัญที่ใช้เวลาและต้องอาศัยความเชี่ยวชาญ โดยเฉพาะในระบบที่ซับซ้อนและมีความเสี่ยงสูง เช่น ระบบธุรกรรมทางการเงินของธนาคาร เนื่องจากการสร้างกรณีทดสอบใช้เวลานานและอาจเกิดข้อผิดพลาด จึงมีความจำเป็นต้องประยุกต์ใช้เทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์เพื่อเพิ่มความรวดเร็วและครอบคลุมในการสร้างกรณีทดสอบ 2) งานวิจัยพัฒนาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ Large Language Models (LLMs) จำนวน 4 โมเดล ได้แก่ LLaMA3.2-3B, Typhoon2-8b, Gemma-3-4b และ Qwen3-8B สำหรับการสร้างกรณีทดสอบอัตโนมัติในงานทดสอบซอฟต์แวร์ 3) วิธีการดำเนินงานวิจัยประกอบด้วย 4 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ 3.1) ชุดข้อมูลกรณีทดสอบ 20,000 รายการ ครอบคลุมกรณี Positive 15,763 รายการ และ Negative 4,237 รายการ ในบริบทธุรกรรมธนาคาร 3.2) ปรับแต่งโมเดลด้วยเทคนิค LoRA และเฟรมเวิร์ก LangChain เชื่อมต่อกับฐานข้อมูลเวกเตอร์ ChromaDB ผ่านสถาปัตยกรรม Retrieval-Augmented Generation (RAG) 3.3) ประเมินผลใช้ตัวชี้วัดเชิงเวกเตอร์ ได้แก่ Cosine Distance, Euclidean Distance และ Manhattan Distance 3.4) ประเมินความครอบคลุมของ Test Case ใช้ตัวชี้วัด Test Coverage, Functional Coverage และ Requirement Coverage ร่วมกับความพึงพอใจจากผู้เชี่ยวชาญด้านการทดสอบซอฟต์แวร์ 4) ผลการวิจัยพบว่า Qwen3-8B มีค่า Loss ต่ำสุด (0.1558) มีความแม่นยำในการเรียนรู้สูงสุด ขณะที่ Gemma-3-4b มีค่า Euclidean Distance (0.5494) และ Manhattan Distance (11.8533) ต่ำสุด แสดงถึงความใกล้เคียงกับข้อมูลจริงมากที่สุด ในด้านความครอบคลุมพบว่า Gemma-3-4b มีค่า Test Coverage สูงสุด (93%) และ Functional Coverage (91%) ส่วน Qwen3-8B มี Requirement Coverage สูงสุด (92%) และจากการประเมินผู้เชี่ยวชาญพบว่า Gemma-3-4b ได้คะแนนเฉลี่ยสูงสุด (43.2) คิดเป็นร้อยละ (86.4%) สรุปผลการศึกษาการใช้ LLM ในการสร้าง Test Case สามารถเพิ่มความครอบคลุม ความแม่นยำ และประสิทธิภาพในงานทดสอบซอฟต์แวร์ได้อย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้งยังสามารถประยุกต์ใช้งานผ่านระบบแชทบอทเพื่อสร้างกรณีทดสอบ จากข้อกำหนดความต้องการซอฟต์แวร์ได้โดยอัตโนมัติ ซึ่งมีศักยภาพสูงสำหรับการใช้งานจริงในกระบวนการพัฒนาซอฟต์แวร์ในอุตสาหกรรม

คำสำคัญ: โมเดลภาษาขนาดใหญ่, การทดสอบซอฟต์แวร์, การสร้างกรณีทดสอบ, ตัวชี้วัดความครอบคลุมในการทดสอบ, การฝังเวกเตอร์

Abstract

1) Software testing and test case generation are critical steps that require significant time and expertise, especially in complex and high-risk environments such as banking transaction systems. Since creating test cases is time-consuming and prone to errors, it is essential to apply artificial intelligence technologies to accelerate the process and enhance test coverage. 2) This research develops and compares the performance of four Large Language Models (LLMs):

¹ หลักสูตรวิศวกรรมศาสตรมหาบัณฑิต, สาขาวิชาวิศวกรรมคอมพิวเตอร์, วิทยาลัยวิศวกรรมศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยบูรพา

¹ Department of Computer Engineering, College of Engineering and Technology, Dhurakij Pundit University

* Corresponding author: Ratthaslip Ranokphanuwat, Email: ratthaslip.ran@dpu.ac.th

LLaMA3.2-3B, Typhoon2-8b, Gemma-3-4b, and Qwen3-8B, for automated test case generation in software testing.

3) The research methodology consists of four main steps: 3.1) Utilizing a dataset of 20,000 test cases, which covers 15,763 positive and 4,237 negative cases within the banking transaction domain. 3.2) Fine-tuning the models using the LoRA technique and the LangChain framework, integrated with the ChromaDB vector database through a Retrieval-Augmented Generation (RAG) architecture. 3.3) Evaluating performance using vector-based metrics, including Cosine Distance, Euclidean Distance, and Manhattan Distance. 3.4) Assessing test case coverage using Test Coverage, Functional Coverage, and Requirement Coverage, combined with evaluations from software testing experts. 4) The results indicate that Qwen3-8B achieved the lowest loss (0.1558), demonstrating the highest learning accuracy, while Gemma-3-4b obtained the lowest Euclidean Distance (0.5494) and Manhattan Distance (11.8533), indicating the closest similarity to the ground-truth data. In terms of coverage, Gemma-3-4b achieved the highest Test Coverage (93%) and Functional Coverage (91%), whereas Qwen3-8B achieved the highest Requirement Coverage (92%). Furthermore, expert evaluations revealed that Gemma-3-4b received the highest average score of 43.2, equivalent to 86.4%. In conclusion, the study demonstrates that employing LLMs for test case generation can significantly improve the coverage, accuracy, and efficiency of software testing. Additionally, these models can be seamlessly integrated into chatbot systems to automatically generate test cases based on software requirements, highlighting their high practical potential for real-world applications in the software development industry.

Keywords: Large language models, software testing, test case generation, test coverage metrics, vector embedding

บทนำ

ที่มาและความสำคัญ

ในกระบวนการพัฒนาซอฟต์แวร์ การสร้างกรณีทดสอบ Test Case สำหรับการทดสอบแบบ Manual Testing ถือเป็นภารกิจสำคัญของ Software Tester และ Software QA เพื่อรับรองคุณภาพ ความถูกต้อง และความครบถ้วนของระบบ โดยเฉพาะในระบบขนาดใหญ่ที่มีข้อกำหนดซับซ้อน การสร้าง Test Case ที่ครอบคลุมและแม่นยำต้องอาศัยเวลา ความชำนาญ และแรงงานคนเป็นจำนวนมาก ส่งผลให้เกิดข้อจำกัดด้านความเร็วและความครอบคลุมของการทดสอบ อาจนำไปสู่ความผิดพลาดที่หลุดรอดหลังการส่งมอบงาน

ปัจจุบันความก้าวหน้าของเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์ โดยเฉพาะโมเดลภาษาขนาดใหญ่ (LLMs) ได้แสดงศักยภาพในการเข้าใจข้อกำหนดเชิงลึกและสร้างข้อความที่มีโครงสร้างซับซ้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและประยุกต์ใช้ LLMs ในการสร้างกรณีทดสอบสำหรับ Functional Testing แบบ Manual Testing เพื่อเพิ่มความครอบคลุม ความแม่นยำ และลดภาระงานของผู้ทดสอบ

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

1. พัฒนาเครื่องมือที่ใช้ LLM สำหรับการสร้าง Test Case ในระดับ Functional Testing จาก Software Requirements

2. พัฒนาและปรับแต่ง Fine-tune โมเดล LLaMA3.2-3B, Typhoon2-8b, Gemma-3-4b และ Qwen3-8B เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการสร้าง Test Case

3. ออกแบบระบบ Retrieval-Augmented Generation (RAG) เชื่อมต่อ LLM กับฐานข้อมูลผ่าน Lang Chain Framework เพื่อสร้าง Test Case ที่แม่นยำและสอดคล้องกับข้อกำหนด

4. ประเมินความครอบคลุม Test Case ด้วย Test Coverage, Functional Coverage และ Requirement Coverage พร้อมทั้งประเมินความพึงพอใจของผู้เชี่ยวชาญด้าน Software Testing

ขอบเขตการวิจัย

1. สร้างกรณีทดสอบกรณีปกติ Positive Test Cases และกรณีผิดพลาด Negative Test Cases ข้อกำหนดซอฟต์แวร์

2. พัฒนาโมเดล และปรับแต่ง Fine-tuning โมเดล LLaMA3.2-3B, Typhoon2-8b, Gemma-3-4b และ Qwen 3-8B ร่วมกับ LangChain Framework เพื่อสร้างและปรับปรุง Test Case โดยใช้แนวคิด Retrieval-Augmented Generation (RAG)

3. ชุดข้อมูลสำหรับการสร้าง Test Cases ที่เกี่ยวข้องกับกระบวนการฝากถอนเงินของธนาคาร โดยเน้นธุรกรรมการเงินเป็นระบบที่ต้องการความแม่นยำและความ

ปลอดภัยสูงจึงถูกออกแบบให้ครอบคลุมทั้งกรณี Positive Cases และ Negative Cases รูปแบบ Manual Testing จำนวน 20,000 Test Case เพื่อให้สามารถทดสอบระบบได้อย่างมีประสิทธิภาพ

4. ประเมินประสิทธิภาพของโมเดล ค่า Loss จาก Vector Embedding, ความครอบคลุมของ Test Case Coverage และความพึงพอใจของผู้เชี่ยวชาญด้าน Software Testing

5. เครื่องมือสร้าง Test Case สำหรับ Functional Testing แบบ Manual Testing พร้อมการประเมินประสิทธิภาพของแต่ละโมเดล

6. ผลลัพธ์ที่ได้จากการวิจัยนี้คือเครื่องมือสำหรับสร้างกรณีทดสอบ Test Case สำหรับ Functional Testing แบบ Manual Testing พร้อมการประเมินประสิทธิภาพของแต่ละโมเดล

ประโยชน์ที่คาดว่าจะได้รับ

1. พัฒนาเพื่อช่วยลดภาระงานของนักทดสอบ Tester, QA ในการสร้าง Test Cases แบบ Manual Testing ทำให้ประหยัดเวลาในกระบวนการทดสอบซอฟต์แวร์

2. เพิ่มความครอบคลุมของการทดสอบ Test Coverage, Functional Coverage และ Requirement Coverage โมเดลที่พัฒนาสามารถสร้างกรณีทดสอบที่ครอบคลุมทั้ง Positive และ Negative Cases ช่วยลดโอกาสที่ข้อผิดพลาดจะไปถึงผู้ใช้งาน

3. ระบบรองรับการโต้ตอบแบบ ChatBot ช่วยให้ผู้ใช้สามารถป้อนข้อกำหนดความต้องการและรับผลลัพธ์ได้ทันที โดยไม่จำเป็นต้องมีความรู้ด้านการพัฒนาระบบหรือการเขียน Test Case

แนวคิดทฤษฎี และงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

แนวคิดและทฤษฎีที่เกี่ยวข้อง

1. Large Language Models ใช้โครงสร้างแบบ Transformer ผ่านการฝึกเบื้องต้น Pre-training โดยเรียนรู้จากบริบทของข้อความเพื่อทำนายปรับแต่ง Fine-tuning ด้วยชุดข้อมูลเฉพาะด้าน Loss Function สำหรับ LLMs อาศัย Loss Function เพื่อวัดว่าผลลัพธ์ของโมเดล สูตรคำนวณที่ใช้ใน LLM ค่า Loss Function สำหรับ LLMs เพื่อวัดว่าผลลัพธ์ของโมเดลแตกต่างจากค่าจริงมากหรือน้อย Loss Function ที่นิยมใช้ใน LLMs คือ Cross-Entropy Loss ซึ่งคำนวณ (Radford et al., 2019) ใช้สำหรับวัดความแตกต่างระหว่างผลลัพธ์ที่โมเดลคาดการณ์ และค่าความจริง โดยอาศัยฟังก์ชัน Cross-

Entropy Loss ซึ่งนิยมใช้ในงานประมวลผลภาษาธรรมชาติ โดยแสดงดังสมการ 1

$$L = - \sum_{i=1}^N y_i \log(\hat{y}_i) \quad (1)$$

2. LoRA (Low-Rank Adaptation) เทคนิคการปรับแต่งโมเดล Fine-tuning ที่เน้นลดการใช้ทรัพยากรคำนวณและหน่วยความจำ โดยทำงานผ่านการ freeze พารามิเตอร์หลักของโมเดล และ low-rank matrices เพื่อเรียนรู้การเปลี่ยนแปลงสำหรับงานช่วยให้สามารถปรับโมเดลขนาดใหญ่ได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่ต้องปรับพารามิเตอร์ทั้งหมด แนวคิดและหลักการเพื่อจัดการกับปัญหาการปรับแต่งโมเดลขนาดใหญ่ที่ต้องใช้พารามิเตอร์จำนวนมากและใช้ทรัพยากรสูงในการอัปเดตน้ำหนักของโมเดล วิธีนี้ใช้แนวคิด Low-Rank Decomposition ซึ่งช่วยลดจำนวนพารามิเตอร์ที่ต้องปรับแต่งให้น้อยลง โดยใช้เมทริกซ์ที่มีลำดับชั้นต่ำ low-rank matrix แทนการอัปเดตโดยตรงของพารามิเตอร์โมเดลเดิมโดยใช้วิธีที่เป็นรูปแบบหนึ่งของ Matrix Low-Rank Matrix (Hu et al., 2021) โดยแสดงดังสมการ 2

$$\Delta W = A \times B \quad (2)$$

โดยที่ A และ B จะต้องเป็น Low-Rank Matrix ซึ่งจะเป็น matrix ที่ขนาดเล็กกว่าเมื่อเทียบกับ weight ของโมเดล LLMs ที่จะทำการปรับแต่ง โดยจะทำให้จำนวนพารามิเตอร์ที่ใช้ในการฝึกมีขนาดลดลงและ ΔW จะเป็นค่า weight ที่เปลี่ยนแปลงไปจากโมเดลเดิม

3. Embedding เป็นเทคนิคที่ใช้แปลงข้อมูลที่อยู่ในรูปแบบของข้อความให้กลายเป็นเวกเตอร์ตัวเลขในเชิงคณิตศาสตร์ ช่วยให้โมเดลเรียนรู้ความหมายเชิงลึกของข้อมูล การใช้ Embedding ในงานประมวลผลภาษาธรรมชาติ ซึ่งมีจุดมุ่งหมายเพื่อให้เวกเตอร์ที่ได้สะท้อนความหมายของคำหรือประโยคอย่างถูกต้องในเชิงบริบทในแนวทางการประเมินความถูกต้องหรือความเหมาะสมของการจับคู่ข้อมูล เช่น การจับคู่คำถามกับคำตอบ หรือ Test Case กับคำตอบของโมเดล Predicted Answer จากโมเดล Transformer Contextual Embedding ประกอบด้วย Token Embedding ของคำ, บอกลำดับคำ และ แยกกลุ่มประโยค เมื่อนำทั้งหมดมาบวกเข้าด้วยกันแล้ว Transformer จะได้ Contextual Embedding ของโทเคน ซึ่งสะท้อนความหมายตามบริบทในประโยคนั้น ๆ ได้ดียิ่งขึ้น (Devlin et al., 2019) แสดงดังสมการ 3

$$\text{Embedding}(w_i) = \text{Transformer}(E_{token_i} + E_{position_i} + E_{segment_i}) \quad (3)$$

4. Cosine Distance ตัวชี้วัดเชิงเวกเตอร์ที่ใช้ประเมินความแตกต่างความไม่คล้ายคลึงกันระหว่างเวกเตอร์สองตัวโดยพิจารณามุมระหว่างเวกเตอร์ คำนวณจากค่า Cosine Similarity ซึ่งเป็นค่าความคล้ายคลึงเชิงมุมระหว่างเวกเตอร์โดยค่าอยู่ในช่วง 0,1 ค่าที่ใกล้ 0 หมายถึงเวกเตอร์มีทิศทางคล้ายกันมาก ในขณะที่ค่าที่ใกล้ 1 หมายถึงมีทิศทางต่างกันมาก จุดเด่นของ Cosine Distance คือไม่ไวต่อขนาดของเวกเตอร์ length-invariant ทำให้เหมาะกับข้อมูลมิติสูงและเวกเตอร์ที่มีความบาง เช่น ข้อมูลเอกสารแบบ TF-IDF หรือเวกเตอร์ฝังความหมาย embeddings ของประโยคใช้อย่างแพร่หลายในงานด้าน Information Retrieval (IR) และ Natural Language Processing (NLP) เนื่องจากให้ผลลัพธ์ที่สอดคล้องกับความคล้ายเชิงความหมายของข้อมูลในเชิงภาษาธรรมชาติ โดยเฉพาะในกรณีที่ใช้ร่วมกับการทำ L2-normalization ของเวกเตอร์ (Dhillon *et al.*, 2002) โดยคำนวณจากมุมระหว่างเวกเตอร์ และ ซึ่ง หมายถึงคอตโปรดัคต์ และ คือค่า L2 norm ของเวกเตอร์แต่ละตัว ค่าที่ได้จะอยู่ในช่วง 0 – 1 โดยค่าที่ใกล้ศูนย์หมายถึงเวกเตอร์มีทิศทางใกล้เคียงกันมาก ในขณะที่ค่าที่ใกล้หนึ่งสะท้อนถึงความแตกต่างสูง (Schütze *et al.*, 2008) แสดงดังสมการ 4

$$d_{cos}(A, B) = 1 - \frac{A \cdot B}{\|A\| \|B\|} \quad (4)$$

5. Euclidean Distance การวัดระยะทางจริงระหว่างจุดสองจุดในพื้นที่ n มิติเหมือนใช้ไม้บรรทัดวัดระยะทางระหว่างสองจุด ใช้วัดว่าเวกเตอร์ A และ B โดยพิจารณาค่าผลต่างยกกำลังสองในแต่ละมิติแล้วนำมารวมและถอดรากที่สอง ค่า และ แทนค่าของเวกเตอร์ในแต่ละมิติ ผลลัพธ์จึงสะท้อนระยะทางตรง straight-line distance ระหว่างสองจุดอยู่ห่างกันแค่ไหนในเชิงพิกัดนำค่าของแต่ละมิติมาหา “ผลต่างยกกำลังสอง” แล้วถอดราก เหมาะกับกรณีที่ต้องการวัดระยะทางเชิงปริมาณอย่างแท้จริง เช่น การวัดความแตกต่างของคำตอบที่ได้จากโมเดลกับคำตอบจริง การจัดกลุ่มข้อมูล Clustering และงานด้าน Computer Vision เป็นเครื่องมือที่ได้รับความนิยมในหลายสาขาวิชา เช่น การจัดกลุ่มข้อมูล Clustering การวิเคราะห์รูปแบบ Pattern Recognition และการวัดความคล้ายคลึงของข้อมูล Similarity Measurement โดยเฉพาะในอัลกอริทึม K-means ซึ่งใช้ระยะทางนี้ในการวัด

ระยะห่างระหว่างจุดข้อมูลและศูนย์กลางของกลุ่ม Centroid F (Cheng, 2024) โดยแสดงดังสมการ 5

$$\text{Euclidean}(A, B) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (A_i - B_i)^2} \quad (5)$$

6. Manhattan Distance การวัดระยะทางระหว่างเวกเตอร์สองตัวโดยรวมระยะทางของแต่ละแกนโดยไม่ยกกำลังหรือถอดราก วัดตามแนวแกน เหมือนการเดินทางตามถนนในลักษณะ Grid เหมาะสำหรับข้อมูลที่อยู่ในตาราง grid-based data ข้อมูลที่มีลักษณะไม่ต่อเนื่อง หรือกรณีที่ต้องการลดผลกระทบจากค่าที่สูงเกินไปในบางมิติ outlier-sensitive (Gao & Li, 2016) โดยการรวมผลของแต่ละมิติ โดยไม่ถอดรากหรือยกกำลัง จึงคล้ายการคำนวณระยะทางที่เดินไปตามเส้นทางกริด (grid-based path) มากกว่าการวัดระยะตรงแสดงดังสมการ 6

$$\text{Manhattan}(A, B) = \sum_{i=1}^n |A_i - B_i| \quad (6)$$

7. LangChain เฟรมเวิร์กโอเพนซอร์สที่ได้รับการออกแบบมาเพื่อรองรับการพัฒนาแอปพลิเคชันที่ใช้โมเดลภาษาขนาดใหญ่ LLMs โดยเฉพาะโดยมีวัตถุประสงค์หลักในการเพิ่มขีดความสามารถของ LLM ให้สามารถโต้ตอบกับแหล่งข้อมูลภายนอกเครื่องมือภายนอกหน่วยความจำ และระบบเวิร์กโฟลว์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ LangChain มีโครงสร้างการทำงานแบบองค์รวมที่เชื่อมโยงองค์ประกอบต่าง ๆ เข้าไว้ด้วยกันได้แก่ Prompts, LLM, Chains, Agents, Tools, Memory และ Retrieval System การประมวลผลเริ่มต้นจากการป้อน Requirement เข้าไปในระบบ จากนั้น LangChain จะใช้ PromptTemplate สร้างคำสั่งที่เหมาะสมเพื่อส่งให้ LLM ทำการสรุปข้อมูลเชิงความเข้าใจระบบจะใช้ Retrieval Chain ดึงข้อมูลที่เกี่ยวข้องจากคลังข้อมูลภายนอกผ่านเทคนิคการฝังข้อมูล Embedding ลงใน Vector Store เพื่อให้ได้บริบทที่เกี่ยวข้องมากที่สุดหลังจากนั้น Agent จะวิเคราะห์สถานการณ์และเลือกใช้เครื่องมือ Tools ที่เหมาะสม เช่น การสร้าง Test Case การวิเคราะห์สาเหตุ หรือการถามกลับเพื่อขอข้อมูลเพิ่มเติม Agent สามารถทำงานแบบ Reason Act ได้โดยใช้แนวคิด ReAct Prompting ซึ่งช่วยให้ LLM สามารถตัดสินใจเลือกเครื่องมือได้อย่างอัตโนมัติ (Guan & Fang, 2025)

8. Software Testing Life Cycl กระบวนการกำหนดขั้นตอนสำหรับการทดสอบซอฟต์แวร์ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้การทดสอบเป็นไปอย่างมีประสิทธิภาพและช่วยเพิ่มความครอบคลุมของการทดสอบ test coverage ลดความเสี่ยงในการส่งมอบซอฟต์แวร์ที่มีข้อบกพร่อง และเพิ่มความเชื่อมั่นต่อคุณภาพของระบบงานที่พัฒนา STLC ยังการประเมินคุณภาพซอฟต์แวร์โดยสามารถเชื่อมโยงกรณีทดสอบกับข้อกำหนดและฟังก์ชันของระบบเพื่อประเมิน Requirement Coverage ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (Masuda *et al.*, 2020)

9. Test Coverage การวัดสัดส่วนของระบบระหว่างการทดสอบโดยมีจุดประสงค์เพื่อประเมินว่ากรณีทดสอบที่สร้างขึ้นสามารถตรวจสอบโค้ดได้ครอบคลุมมากเพียงใด ตัวอย่างเช่น การวัดจำนวนที่ทดสอบแล้วเมื่อเทียบกับทั้งหมดในระบบช่วยยืนยันว่าการทดสอบสามารถครอบคลุมส่วนประกอบของโปรแกรมได้มากที่สุด ลดโอกาสการเกิดบั๊กที่ไม่ได้ตรวจพบ (Cheng *et al.*, 2016) โดยแสดงดังสมการ 7

$$Test\ Coverage(\%) = \frac{TC_{exe}}{TC_{des}} \times 100 \quad (7)$$

10. Functional Coverage การวัดสัดส่วนของฟังก์ชันการทำงานของระบบที่ได้รับการทดสอบเมื่อเทียบกับจำนวนฟังก์ชันทั้งหมดที่ระบุไว้ในเอกสารข้อกำหนดซอฟต์แวร์โดยมุ่งเน้นประเมินว่ากรณีทดสอบครอบคลุมฟังก์ชันทั้งหมดของระบบช่วยตรวจสอบว่าการทดสอบครอบคลุมทุกฟีเจอร์หลักของระบบตามที่ออกแบบไว้ ลดความเสี่ยงในการขาดการทดสอบฟังก์ชันสำคัญ (Nazi *et al.*, 2022) โดยแสดงดังสมการ 8

$$Fuctional\ Coverage(\%) = \frac{\sum_{j=1}^m w_j 1[f_j covered]}{\sum_{j=1}^m w_j} \times 100 \quad (8)$$

11. Requirement Coverage เป็นการวัดสัดส่วนของข้อกำหนดที่มีกรณีทดสอบครอบคลุมเมื่อเทียบกับข้อกำหนดทั้งหมดในระบบ เป็นตัวชี้วัดสำคัญว่ากรณีทดสอบตอบสนองต่อความต้องการของผู้ใช้ครบถ้วนหรือไม่ (Wang *et al.*, 2025; Omar, 2013) แสดงดังสมการ 9

$$Requirement\ Coverage(\%) = \frac{\sum_{i=1}^n w_i 1[r_i covered]}{\sum_{i=1}^n w_i} \times 100 \quad (9)$$

งานวิจัยที่เกี่ยวข้อง

1. การสร้างชุดทดสอบอัตโนมัติสำหรับแอปพลิเคชันมือถือด้วย LLM

(Hoffmann & Frister, 2024) นำเสนอการประยุกต์ใช้โมเดลภาษาขนาดใหญ่ที่ผ่านการปรับแต่งแบบ Supervised Fine-Tuning (SFT) เพื่อสร้างกรณีทดสอบอัตโนมัติสำหรับแอปพลิเคชันมือถือที่พัฒนาด้วยภาษา Dart โดยใช้ชุดข้อมูลจาก GitHub ซึ่งประกอบด้วยคู่มือโค้ดและไฟล์ทดสอบจำนวน 16,252 คู่ แบ่งเป็นข้อมูลฝึก 90% และข้อมูลทดสอบ 10% ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าโมเดล Test Gen – Dart v0.2 ที่ผ่านการปรับแต่งมีประสิทธิภาพเหนือกว่าโมเดลพื้นฐาน Code Llama 13B 4-bit โดยเพิ่ม Syntactic Correctness ได้ 15.38% และ Functional Correctness ได้ 16.67% เมื่อเทียบกับโมเดลดั้งเดิม

2. การสร้างชุดทดสอบสำหรับโปรเซสเซอร์ด้วย LLM Deng

(Wang *et al.*, 2024) เสนอแนวทาง LLM-TG สำหรับสร้างชุดทดสอบอัตโนมัติในกระบวนการตรวจสอบความถูกต้องของการออกแบบโปรเซสเซอร์ (Design Verification) โดยใช้โมเดล GPT-4 ผ่าน 4 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ 1) การสร้างชุดทดสอบด้วย Prompt 2) การปรับแต่งชุดทดสอบ 3) การใช้ผลลัพธ์การทดสอบเพื่อสร้างชุดทดสอบเพิ่มเติม และ 4) การสร้าง Prompt Library ผลการทดลองกับโปรเซสเซอร์ RV64GC (Xuantie-C910) พบว่า LLM-TG สามารถเพิ่ม Block Coverage ได้ 8.34% และ Expression Coverage ได้ 5.8% เมื่อเทียบกับวิธีดั้งเดิม เช่น RISC-V-DV และ LLM4DV นอกจากนี้ยังแสดงให้เห็นว่า LLM-TG ช่วยลดภาระงานและเพิ่มประสิทธิภาพในการสร้างชุดทดสอบสำหรับโปรเซสเซอร์

3. การสร้าง Unit Test อัตโนมัติด้วย Generative AI (Bhatia *et al.*, 2024) นำเสนอการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของเครื่องมือสร้าง Unit Test อัตโนมัติที่ใช้ ChatGPT กับเครื่องมือ Search-Based Software Testing (SBST) ที่ได้รับความนิยมอย่าง Pynguin โดยมุ่งเน้นการสร้างชุดทดสอบสำหรับโค้ดภาษา Python ทั้งในรูปแบบ Procedural, Function-based และ Class-based ผลการทดลองพบว่า ChatGPT สามารถสร้างชุด Unit Test ที่มีค่า coverage ใกล้เคียงกับเครื่องมือ Pynguin และในบางกรณียังสามารถให้ค่า coverage ที่สูงกว่า โดยเฉพาะอย่างยิ่งเมื่อมีการประยุกต์ใช้เทคนิค prompt engineering แบบ iterative โดยการป้อนข้อมูลของ statement ที่ยังไม่ถูกทดสอบ (missed statements) กลับไปยังโมเดล เพื่อกระตุ้นให้สร้าง Test Case เพิ่มเติม

สำหรับส่วนที่ขาดหาย ส่งผลให้ coverage โดยรวมของโค้ดเพิ่มสูงขึ้น สะท้อนให้เห็นถึง ศักยภาพของการผสาน LLM และ SBST ในการสร้าง Unit Test ที่มีคุณภาพสูง ครอบคลุมมากขึ้น และช่วยลดภาระของผู้พัฒนาในกระบวนการสร้างชุดทดสอบด้วยตนเอง

จากงานวิจัยข้างต้นแสดงให้เห็นถึงแนวโน้มการนำ LLM มาประยุกต์ใช้ในการสร้างชุดทดสอบอัตโนมัติในหลากหลายบริบท ทั้งในระดับ Mobile Application, Processor Verification และ Unit Testing โดยแต่ละงานเน้นเทคนิคการปรับแต่งโมเดลและการออกแบบกระบวนการสร้างชุดทดสอบที่เหมาะสมกับลักษณะของระบบเป้าหมาย โดยงานวิจัยนี้เป็นการต่อยอดแนวคิดดังกล่าว โดยเน้นการพัฒนาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ LLM สำหรับการสร้างกรณีทดสอบ Functional Testing แบบ Manual Testing ด้วยเทคนิค Retrieval-Augmented Generation เพิ่มความครอบคลุมและความแม่นยำในการทดสอบซอฟต์แวร์ในระบบธนาคารที่มีความซับซ้อนสูง

การทดลอง

ภาพรวมของระบบ

สถาปัตยกรรมของระบบที่นำเสนอเน้นการผสมผสานความสามารถของ LLM กับ RAG framework ผ่านโครงสร้างการสืบค้นข้อมูลแบบ similarity search บนฐานข้อมูลเวกเตอร์ รวมทั้งการจัดการ prompt สำหรับ LLM ด้วย LangChain เพื่อให้การสร้าง Test Case มีบริบทที่ถูกต้อง แม่นยำ และตรงตามความต้องการของซอฟต์แวร์ในหลากหลายมิติ การสร้าง Test Case อัตโนมัติ เริ่มจากผู้ใช้ป้อนข้อกำหนดซอฟต์แวร์ จากนั้น AI Agent (LLMChain GPT-4.1 mini) จะทำการวิเคราะห์และประสานงานกับเครื่องมือค้นหาข้อมูลเชิงบริบทในฐานข้อมูล ChromaDB (ฐานข้อมูลเวกเตอร์) ด้วย similarity search ผ่าน LangChain จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาสร้าง Prompt ส่งให้โมเดล LLM ที่ผ่าน Fine-Tuning ทำการสร้าง Test Case ทั้งแบบ Positive และ Negative จากข้อกำหนดซอฟต์แวร์ที่ให้ และส่งผลลัพธ์กลับให้ผู้ใช้ สำหรับสถาปัตยกรรมการทำงาน แสดงใน Figure 1

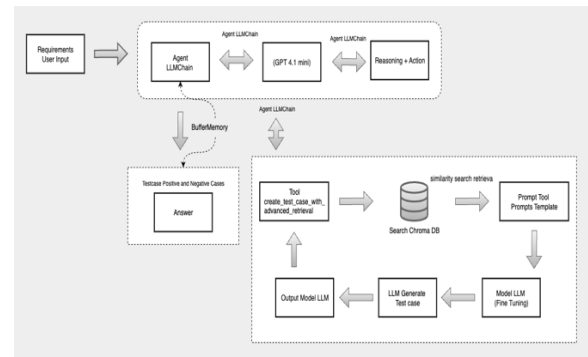


Figure 1 System Architecture

การออกแบบการวิจัย

1. ส่วนคำถาม (Input Stage) ระบบจะรับข้อกำหนดความต้องการซอฟต์แวร์ จากผู้ใช้ผ่านทาง Web Interface ที่พัฒนาด้วย Streamlit
2. ส่วนการวิเคราะห์ถึงบริบท (Context Analysis with RAG) ระบบนำข้อกำหนดความต้องการที่ได้รับมาเข้าสู่กระบวนการวิเคราะห์เชิงบริบท โดยใช้โมเดล LLM และเชื่อมต่อกับระบบ RAG และการดึงบริบทใช้ Vector Search ผ่านฐานข้อมูลเวกเตอร์ ChromaDB ที่ใช้การแปลงข้อความเป็น Vector embedding แล้วค้นหาจากฐานข้อมูลด้วย semantic similarity
3. ส่วนการประมวลผล (Processing & Test Case Generation) จะนำบริบทและข้อกำหนดความต้องการที่สรุปได้เข้าสู่โมเดล GPT-4.1 mini และโมเดล LLM ที่ทำ Fine-Tuned แล้ว เพื่อให้ระบบทำการวิเคราะห์สร้าง Test Case
4. ส่วนการตอบคำถาม (Answer Generation & Memory Storage) การประมวลผลจะถูกส่งกลับให้ผู้ใช้ในรูปแบบคำตอบครอบคลุมทั้ง Positive และ Negative Test Cases และเก็บประวัติการใช้งานเพื่อใช้ต่อยอดการสนทนา (Tiwari et al., 2022)

การเก็บรวบรวมข้อมูล

การดำเนินการวิจัยครั้งนี้ได้จัดเตรียมชุดข้อมูลที่ประกอบด้วย ข้อกำหนดซอฟต์แวร์ และ กรณีทดสอบ (Test Cases) โดยครอบคลุมการทำงานหลักของระบบธนาคารได้แก่ การฝากเงิน, การถอนเงิน, การแสดงรายการเดินบัญชี e-Statement, การปรับวงเงิน การลงทะเบียนด้วยชื่อผู้ใช้และรหัสผ่าน และการยืนยันตัวตนด้วยการสแกนใบหน้า ประกอบด้วยข้อมูลทั้งหมดจำนวน 20,000 รายการ โดยแบ่งเป็น Positive Cases จำนวน 15,763 รายการ (78.82%) และ Negative Cases จำนวน 4,237 รายการ (21.18%) โดยชุดข้อมูลทั้งหมดจัดเก็บในรูปแบบไฟล์ CSV โครงสร้างข้อมูลแสดงใน Figure 2

Test Case ID	Requirement Text	Test Case Description	Test Steps	Expected Result	Test Case Type	Label	Automation Status	Priority
TC-0001	System shall allow user to login with valid email and password.	User can login with valid email and password.	1. Enter valid email in the email field. 2. Enter valid password in the password field. 3. Click the login button.	User is redirected to the dashboard page.	Positive	1	Manual	Medium
TC-0002	System shall allow user to login with valid email and password.	User can login with valid email and password.	1. Enter valid email in the email field. 2. Enter valid password in the password field. 3. Click the login button.	User is redirected to the dashboard page.	Positive	1	Manual	Medium
TC-0003	System shall allow user to login with valid email and password.	User can login with valid email and password.	1. Enter valid email in the email field. 2. Enter valid password in the password field. 3. Click the login button.	User is redirected to the dashboard page.	Positive	1	Manual	Medium
TC-0004	System shall allow user to login with valid email and password.	User can login with valid email and password.	1. Enter valid email in the email field. 2. Enter valid password in the password field. 3. Click the login button.	User is redirected to the dashboard page.	Positive	1	Manual	Medium
TC-0005	System shall allow user to login with valid email and password.	User can login with valid email and password.	1. Enter valid email in the email field. 2. Enter valid password in the password field. 3. Click the login button.	User is redirected to the dashboard page.	Positive	1	Manual	Medium
TC-0006	System shall allow user to login with valid email and password.	User can login with valid email and password.	1. Enter valid email in the email field. 2. Enter valid password in the password field. 3. Click the login button.	User is redirected to the dashboard page.	Positive	1	Manual	Medium
TC-0007	System shall allow user to login with valid email and password.	User can login with valid email and password.	1. Enter valid email in the email field. 2. Enter valid password in the password field. 3. Click the login button.	User is redirected to the dashboard page.	Positive	1	Manual	Medium
TC-0008	System shall allow user to login with valid email and password.	User can login with valid email and password.	1. Enter valid email in the email field. 2. Enter valid password in the password field. 3. Click the login button.	User is redirected to the dashboard page.	Positive	1	Manual	Medium
TC-0009	System shall allow user to login with valid email and password.	User can login with valid email and password.	1. Enter valid email in the email field. 2. Enter valid password in the password field. 3. Click the login button.	User is redirected to the dashboard page.	Positive	1	Manual	Medium
TC-0010	System shall allow user to login with valid email and password.	User can login with valid email and password.	1. Enter valid email in the email field. 2. Enter valid password in the password field. 3. Click the login button.	User is redirected to the dashboard page.	Positive	1	Manual	Medium
TC-0011	System shall allow user to login with valid email and password.	User can login with valid email and password.	1. Enter valid email in the email field. 2. Enter valid password in the password field. 3. Click the login button.	User is redirected to the dashboard page.	Positive	1	Manual	Medium
TC-0012	System shall allow user to login with valid email and password.	User can login with valid email and password.	1. Enter valid email in the email field. 2. Enter valid password in the password field. 3. Click the login button.	User is redirected to the dashboard page.	Positive	1	Manual	Medium
TC-0013	System shall allow user to login with valid email and password.	User can login with valid email and password.	1. Enter valid email in the email field. 2. Enter valid password in the password field. 3. Click the login button.	User is redirected to the dashboard page.	Positive	1	Manual	Medium
TC-0014	System shall allow user to login with valid email and password.	User can login with valid email and password.	1. Enter valid email in the email field. 2. Enter valid password in the password field. 3. Click the login button.	User is redirected to the dashboard page.	Positive	1	Manual	Medium
TC-0015	System shall allow user to login with valid email and password.	User can login with valid email and password.	1. Enter valid email in the email field. 2. Enter valid password in the password field. 3. Click the login button.	User is redirected to the dashboard page.	Positive	1	Manual	Medium
TC-0016	System shall allow user to login with valid email and password.	User can login with valid email and password.	1. Enter valid email in the email field. 2. Enter valid password in the password field. 3. Click the login button.	User is redirected to the dashboard page.	Positive	1	Manual	Medium
TC-0017	System shall allow user to login with valid email and password.	User can login with valid email and password.	1. Enter valid email in the email field. 2. Enter valid password in the password field. 3. Click the login button.	User is redirected to the dashboard page.	Positive	1	Manual	Medium
TC-0018	System shall allow user to login with valid email and password.	User can login with valid email and password.	1. Enter valid email in the email field. 2. Enter valid password in the password field. 3. Click the login button.	User is redirected to the dashboard page.	Positive	1	Manual	Medium
TC-0019	System shall allow user to login with valid email and password.	User can login with valid email and password.	1. Enter valid email in the email field. 2. Enter valid password in the password field. 3. Click the login button.	User is redirected to the dashboard page.	Positive	1	Manual	Medium
TC-0020	System shall allow user to login with valid email and password.	User can login with valid email and password.	1. Enter valid email in the email field. 2. Enter valid password in the password field. 3. Click the login button.	User is redirected to the dashboard page.	Positive	1	Manual	Medium

Figure 2 Example of Test Case Data

จาก Figure 2 โครงสร้างข้อมูล ประกอบด้วย 9 คอลัมน์ ได้แก่

- Test Case ID: รหัสเฉพาะของแต่ละกรณีทดสอบ
- Requirement Text: ข้อความข้อกำหนดซอฟต์แวร์ที่เกี่ยวข้อง
- Test Case Description: คำอธิบายภาพรวมของกรณีทดสอบ
- Test Steps: ขั้นตอนการทดสอบที่ต้องดำเนินการ
- Expected Result: ผลลัพธ์ที่คาดหวังจากการทดสอบ
- Test Case Type: ประเภทของกรณีทดสอบ (Positive หรือ Negative)
- Label: หมวดหมู่ที่เกี่ยวข้อง
- Automation Status: สถานะการทำงาน
- Priority: ระดับความสำคัญของกรณีทดสอบ

ในการจัดลำดับความสำคัญของ Test Cases ประกอบด้วย ระดับ Medium จำนวน 18,432 รายการ (92.16%) ระดับ High จำนวน 975 รายการ (4.88%) ระดับ Critical จำนวน 274 รายการ (1.37%) และระดับ Low จำนวน 319 รายการ (1.60%) เพื่อการพัฒนาและประเมินโมเดล ชุดข้อมูลถูกแบ่งเป็น 2 ส่วน ได้แก่ Training set และ Validation set ซึ่งใช้วิธีการสุ่มแบบ Stratified ตามประเภท Test Case แสดงดัง Table 1

Table 1 Test Case Data Sets

Dataset	Percentage	Test Case
Training Set	80%	16,000
Validation Set	20%	4,000

เครื่องมือและเทคโนโลยีที่ใช้

1. โมเดลภาษาขนาดใหญ่ (LLMs) ใช้ LLaMA 3.2-3B, Typhoon2-8b, Gemma-3-4b และ Qwen3-8B ในกระบวนการปรับปรุงโมเดล

2. การพัฒนา Backend ใช้ภาษา Python และเฟรมเวิร์ก LangChain สำหรับบริหารจัดการการเชื่อมต่อระหว่างโมเดล LLMs กับข้อมูลจากระบบ RAG และฐานข้อมูลเวกเตอร์

3. Agent ใช้แบบ ReAct Agent ที่สามารถตัดสินใจเลือกเครื่องมือให้เหมาะสมกับ Intent ของผู้ใช้ ส่งผลให้ระบบมีความยืดหยุ่นในการตอบสนองและเลือก pipeline การประมวลผลอย่างเหมาะสม

4. Memory Conversation ระบบจัดการเก็บบริบทการสนทนา (BufferMemory) เพื่อเก็บบริบทการสนทนาในแต่ละ session ซึ่งช่วยให้ LLMs สามารถอ้างอิงถึงบทสนทาก่อนหน้า ทำให้การตอบคำถามมีความต่อเนื่องและมีความเข้าใจบริบท

5. ฐานข้อมูล ChromaDB ระบบใช้สำหรับเก็บ embedding vectors ของเอกสารหรือบริบทที่เกี่ยวข้องกับงานทดสอบซอฟต์แวร์เพื่อใช้ในการสร้างคำตอบโดย LLMs

6. LangChain เป็นไลบรารีหลักที่ใช้ในการสร้าง Agent, Chain, Tool, PromptTemplate และ Memory โดยเฉพาะอย่างยิ่งเหมาะกับงานที่ต้องเชื่อมต่อ LLM กับข้อมูลภายนอกเข้าด้วยกันใน Chain เดียว

7. OpenAI API ใช้สำหรับเรียกใช้โมเดล GPT-4.1-mini ซึ่งมีประสิทธิภาพสูงในการสรุป วิเคราะห์ และประเมินผล

8. การพัฒนา Frontend โดยใช้ Streamlit เป็นเครื่องมือสำหรับสร้าง Chatbot ซึ่งเป็นโอเพนซอร์สสร้างแอปพลิเคชันเว็บเชิงโต้ตอบ

การพัฒนาโมเดล

การออกแบบ Prompt เพื่อสร้าง Test Case ของโมเดล LLMs โดยโครงสร้างของ Prompt แบ่งออกเป็น 3 ส่วน ประกอบด้วย

System Prompt กำหนดให้โมเดลมีบทบาทเป็น Software Tester มืออาชีพ ที่มีหน้าที่สร้าง Test Case โดยพิจารณาทั้งด้าน Functional, Positive / Negative, Security และ Performance Testing

User Prompt Requirement ข้อความที่ผู้ใช้ระบุ “ความต้องการของระบบ” เพื่อให้โมเดลสร้าง Test Case ตามบริบท

Expected Output Format เป็นส่วนคำตอบจากโมเดล เพื่อให้การสร้าง Test Case โดยอัตโนมัติ

การปรับแต่งโมเดลเทคนิค LoRA

การปรับแต่งโมเดล เน้นการลดภาระด้านการประมวลผล และหน่วยความจำ ในขณะที่ยังสามารถปรับแต่งโมเดลให้เหมาะสมกับงานเฉพาะด้านได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยการฝึกโมเดลจะผ่านฟังก์ชัน FastLanguageModel.get ซึ่งเป็นการเรียกใช้งานจากไลบรารี Parameter - Efficient Fine-Tuning ที่รองรับ LoRA layer ตามที่กำหนด และการตั้งค่าพารามิเตอร์เทคนิค LoRA ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ แสดงดัง Table 2

Table 2 LoRA Technique Parameter Settings

Parameter	Value	Description
R	32	LoRA rank higher=more capacity/better fit, but more VRAM/time
lora_alpha	64	Scaling factor adjusts the updates to match the value of r
target_module	"q_proj", "k_proj", "v_proj", "o_proj", "gate_proj", "up_proj", "down_proj"	Layers where LoRA adapters are applied (Attention + MLP) for broad adaptation. Layers where LoRA adapters are applied Attention + MLP for broad adaptation
lora_dropout	0.05	Dropout on LoRA paths to reduce overfitting disabled at inference
Bias	none	Reduce the number of parameters and model complexity

Parameter	Value	Description
gradient_checkpointing	unsloth	Recomputes activations to save VRAM slight training slowdown
random_state	42	Constant value for reproducible randomization

เทคนิคนี้ช่วยให้สามารถปรับแต่งโมเดลขนาดใหญ่ได้ โดยไม่จำเป็นต้องอัปเดตพารามิเตอร์ทั้งหมด ส่งผลให้โมเดลสามารถเรียนรู้ลักษณะเฉพาะของงานสร้าง Test Case ได้อย่างแม่นยำ สามารถประหยัดเวลาและทรัพยากรในกระบวนการปรับแต่งได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การปรับแต่งโมเดล (Fine-tuning)

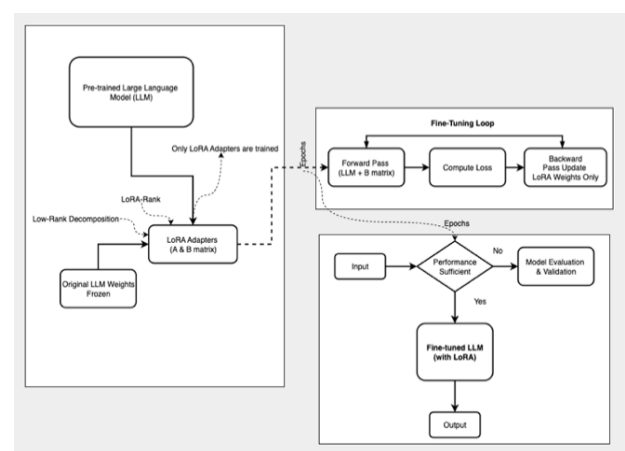


Figure 3 Fine-tuning Data Data Process

กระบวนการของเทคนิค Low-Rank Adaptation (LoRA) แสดงดัง Figure 3 ซึ่งเป็นกระบวนการ Fine-tuning Data สำหรับการปรับแต่งโมเดล LLMs อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเริ่มจากโมเดล Pre-trained LLM ซึ่งมี Original LLM Weights ที่ถูก Frozen ระหว่างกระบวนการปรับแต่ง (Low-Rank Decomposition) เพื่อสร้าง LoRA Adapters ที่ประกอบด้วยเมทริกซ์ A และ B โดยกระบวนการปรับแต่งเกิดขึ้นใน Fine-Tuning Loop ที่ประกอบด้วย ขั้นตอน Forward Pass โดยใช้ LLM บวกกับเมทริกซ์ B การคำนวณ Loss และขั้นตอนการส่งผ่านกลับ Backward Pass ระบบจะทำการประเมินประสิทธิภาพ เป็นระยะ ๆ และดำเนินการฝึกจนกว่าจะได้โมเดลที่ปรับแต่งที่สามารถให้ผลลัพธ์ที่ต้องการ ซึ่งการปรับแต่งโมเดลด้วยเทคนิคนี้ สามารถลดจำนวนพารามิเตอร์

ที่ต้องฝึกอย่างมาก ช่วยประหยัดหน่วยความจำและเวลาในการฝึก ในขณะที่ยังคงรักษาประสิทธิภาพของโมเดลไว้ได้ใกล้เคียงกับการปรับแต่งแบบเต็มรูปแบบ

การตั้งค่าพารามิเตอร์ สำหรับการปรับแต่งโมเดล LLaMA3.2-3B, Typhoon2-8b, Gemma-3-4b และ Qwen3-8B ระหว่างการฝึกโมเดลที่เหมาะสม (Hu *et al.*, 2024) แสดงดัง Table 3

Table 3 Model Training Parameter Settings

Parameter	Value	Description
per_device_train_batch_size	1	Number of training samples per GPU
gradient_accumulation_steps	2	Number of gradient accumulation steps suitable for the value of r
warmup_steps	5	Number of steps to increase the learning rate
num_train_epochs	2	Number of epochs the model will train on the data
learning_rate	2e-4	Learning rate used during training
logging_steps	1	Logging frequency
optim	adamw_8bit	High performance with lower memory usage
weight_decay	0.01	Weight decay rate to prevent overfitting
lr_scheduler_type	linear	Linear decay after warmup

กระบวนการวัดความคล้ายคลึงระหว่างเวกเตอร์

การวัดความคล้ายคลึงระหว่างเวกเตอร์ เป็นขั้นตอนสำคัญในการตรวจสอบคุณภาพของคำตอบที่ได้จากโมเดล โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อวัดระดับความสอดคล้องหรือความใกล้เคียงระหว่างคำตอบที่โมเดลสร้างขึ้นกับคำตอบจริง โดยงานวิจัยนี้ได้เลือกใช้เมตริกเชิงเวกเตอร์ 3 ประเภทได้แก่

- 1) **Cosine Distance** ใช้วัดความคล้ายคลึงเชิงมุมระหว่างเวกเตอร์ของสองข้อความโดยมีค่าระหว่าง 0 - 1 เมื่อแปลงเป็น Cosine Distance ค่ายิ่งน้อยแสดงถึงความใกล้เคียงสูง
- 2) **Euclidean Distance** ใช้วัดระยะห่างเชิงเรขาคณิตระหว่างเวกเตอร์สองจุดในพื้นที่หลายมิติ ค่ายิ่งน้อยแสดงว่าคำตอบอยู่ใกล้กับคำตอบจริง
- 3) **Manhattan Distance** เมตริกที่ใช้วัดระยะห่างระหว่างเวกเตอร์สองจุดในพื้นที่หลายมิติค่ายิ่งใกล้ 0 เวกเตอร์ทั้งสองใกล้เคียงหรือเหมือนกันมาก ยิ่งค่าสูงมากเวกเตอร์ทั้งสองแตกต่างกันมาก เพื่อประเมินความคล้ายคลึงระหว่างคำตอบที่โมเดลสร้างขึ้นกับคำตอบที่ถูกต้องโดยใช้โมเดล Alibaba-NLP/gte-multilingual-base (Abbad *et al.*, 2016; Srikaewsiew *et al.*, 2022; Zhang *et al.*, 2022)

กระบวนการทำงานของ Lang Chain

- 1. การออกแบบ Agent ด้วยแนวคิด ReAct (Reasoning + Acting) ใน LangChain ช่วยให้ Agent ที่ขับเคลื่อนด้วย LLMs เช่น GPT 4.1mini สามารถวิเคราะห์ปัญหาและเลือกใช้เครื่องมือ ทำให้ระบบมีความยืดหยุ่นและตอบสนองได้อย่างชาญฉลาด (Jacob *et al.*, 2024)
- 2. การสร้าง Chains เพื่อควบคุมลำดับขั้นตอนอัตโนมัติ โดย LangChain จะใช้โครงสร้าง Chain เพื่อเชื่อมโยงการทำงาน
- 3. Memory เก็บบริบทการสนทนา (Conversation Buffer Memory) ซึ่งเป็นรูปแบบ Short Term Memory เป็นหน่วยความจำระยะสั้นของแชทบอทโดยจะบันทึกคำถามและคำตอบก่อนหน้า
- 4. การเชื่อมต่อระบบ RAG โดยกำหนดเป็น Retrieval QChain หรือกำหนด Custom Chain ที่เชื่อมกับฐานข้อมูลเวกเตอร์ Chroma DB ในงานวิจัยนี้ใช้การแปลงข้อกำหนดความต้องการของผู้ใช้งานให้เป็นเวกเตอร์ฝังตัว (Embedding) และนำไปใช้ค้นหาริบทหรือข้อมูลที่เกี่ยวข้องจากฐานข้อมูลเวกเตอร์ดังกล่าว ก่อนจะประมวลผลเพื่อนำเสนอคำตอบที่เหมาะสมต่อไป (Bag *et al.*, 2024)
- 5. การนำ Prompt Template มาใช้ในการสร้าง Prompt ที่สามารถกำหนดตัวแปรสำคัญ เช่น requirement และ context ได้อย่างยืดหยุ่น ช่วยให้โมเดลสามารถรับข้อมูลข้อกำหนดความต้องการและบริบทที่เกี่ยวข้องในแต่ละกรณีได้อย่างถูกต้องแม่นยำยิ่งขึ้น
- 6. การจัดการเครื่องมือ Agent Tool ในระบบ จะดำเนินการโดยการเลือกเครื่องมือ และชุดกระบวนการประมวลผลหรือ Chain ที่เหมาะสมสำหรับแต่ละภารกิจ

ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพ

การทดสอบจำนวน 4 โมเดล ประกอบด้วย LLaMA 3.2-3B, Typhoon2-8b, Gemma-3-4b และ Qwen3-8B บน Testing Set เพื่อประเมินประสิทธิภาพของเครื่องมือที่พัฒนาขึ้น โดยใช้ค่า Loss เป็นเกณฑ์ในการประเมิน แสดงดัง Table 4

Table 4 Performance Evaluation Using Loss

Model	Average Training Loss
LLaMA3.2-3B	0.1946
Typhoon2-8b	0.1703
Gemma-3-4b	0.2529
Qwen3-8B	0.1558

จาก Table 4 แสดงผลการประเมินประสิทธิภาพของโมเดลภาษาขนาดใหญ่ 4 โมเดล โดยใช้เกณฑ์ Average Training Loss เป็นตัวชี้วัดสำคัญในการประเมินความสามารถในการเรียนรู้ของโมเดล จากผลการทดลองพบว่า Qwen3-8B แสดงประสิทธิภาพสูงสุดด้วยค่า Average Training Loss ที่ต่ำที่สุด (0.1558) แสดงความสามารถในการเรียนรู้จากข้อมูลฝึกอบรมได้อย่างมีประสิทธิภาพ ตามด้วย Typhoon2-8b (0.1703) และ LLaMA3.2-3B (0.1946) ตามลำดับ ในขณะที่ Gemma-3-4b แสดงค่า Average Training Loss สูงสุด (0.2529) ซึ่งอาจสะท้อนให้เห็นถึงกระบวนการเรียนรู้ของโมเดล การที่ Qwen3-8B และ Typhoon2-8b ซึ่งเป็นโมเดลขนาด 8 พันล้านพารามิเตอร์แสดงประสิทธิภาพที่ดีกว่าโมเดลขนาดเล็กกว่าเป็นไปตามคาดการณ์ แต่การที่ Gemma-3-4b แสดง Loss สูงกว่าแม้จะมีขนาดกลางระหว่าง LLaMA3.2-3B และโมเดล 8B อาจเป็นผลมาจากปัจจัยด้านสถาปัตยกรรม โมเดลการฝึกโมเดล หรือลักษณะของข้อมูลที่ใช้ในการฝึก

ผลการประเมินโดยใช้ชุดข้อมูลทดสอบ

การประเมินผลจะใช้เมตริกหลัก 3 รายการ ได้แก่ ค่าเฉลี่ย Cosine Distance, Euclidean Distance และ Manhattan Distance เปรียบเทียบเวกเตอร์ Embedding ระหว่างคำตอบจากโมเดลกับคำตอบจริง โดยใช้โมเดล Alibaba-NLP/gte-multilingual-base แสดงดัง Table 5

Table 5 Evaluation Using Test Dataset

Model	Cosine Distance	Euclidean Distance	Manhattan Distance
LLaMA3.2-3B	0.1738	0.5514	11.9051
Typhoon2-8b	0.1746	0.5524	11.9234
Gemma-3-4b	0.1736	0.5494	11.8533
Qwen3-8B	0.1765	0.5624	12.1406

การประเมินความใกล้เคียงระหว่างคำตอบ

การประเมินความใกล้เคียงระหว่างคำตอบที่ได้โดยพิจารณาจาก 3 เมตริกหลัก ได้แก่ Cosine Distance, Euclidean Distance และ Manhattan Distance การวิเคราะห์เปรียบเทียบลักษณะการแจกแจงระยะห่างโดยใช้ข้อมูลตัวอย่างจำนวน 4,000 รายการวิเคราะห์ความแตกต่างอย่างชัดเจนในลักษณะการแจกแจงของแต่ละวิธี

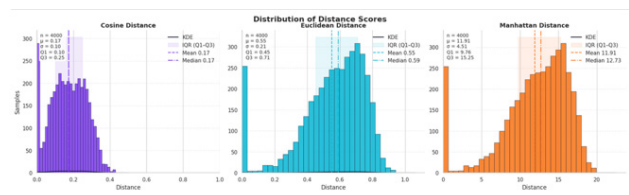


Figure 4 Average Similarity Score of Model LLaMA3.2-3B

Model LLaMA3.2-3B ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นความแตกต่างลักษณะการแจกแจงโดย Cosine Distance มีการแจกแจงที่มีลักษณะใกล้เคียงกับการแจกแจงปกติแต่เบ้ขวาเล็กน้อย ด้วยค่าเฉลี่ย (μ) และค่ามัธยฐานที่เท่ากับ 0.17 และมี Interquartile Range (IQR) ที่แคบเพียง 0.15 ($Q1 = 0.10$, $Q3 = 0.25$) สะท้อนถึงการกระจุกตัวของข้อมูลในช่วงค่าที่ค่อนข้างต่ำ ในทางตรงกันข้าม Euclidean Distance แสดงการแจกแจงแบบปกติที่สมมาตรมากขึ้น ด้วยค่าเฉลี่ย 0.55 และค่ามัธยฐาน 0.59 และมี IQR เท่ากับ 0.26 ($Q1 = 0.45$, $Q3 = 0.71$) ซึ่งแสดงถึงการกระจายตัวที่สมดุลงบค่ากลาง ส่วน Manhattan Distance มีการแจกแจงที่เบ้ขวาอย่างเด่นชัด ด้วยค่าเฉลี่ย 11.91 ที่ต่ำกว่าค่ามัธยฐาน 12.73 และมี IQR ที่กว้างมาก คือ 8.52 ($Q1 = 9.76$, $Q3 = 15.25$) สะท้อนถึงการกระจายตัวที่หลากหลาย

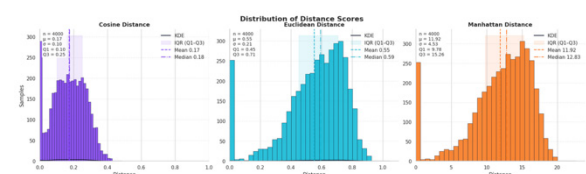


Figure 5 Average Similarity Score of Model Typhoon2-8b

Model Typhoon2-8b ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นลักษณะการแจกแจงและคุณสมบัติทางสถิติ Cosine Distance มีการแจกแจงที่เบ้ขวาอย่างเด่นชัด ด้วยค่าเฉลี่ย (μ) 0.17 ที่ใกล้เคียงกับค่ามัธยฐาน 0.18 และมี Interquartile Range (IQR) ที่แคบเพียง 0.15 ($Q1 = 0.10$, $Q3 = 0.25$) การกระจุกตัวของข้อมูลในช่วงค่าที่ค่อนข้างต่ำและมีการกระจายตัวที่จำกัด ในทางตรงกันข้าม Euclidean Distance แสดงการแจกแจงแบบปกติที่สมมาตรมากที่สุด ด้วยค่าเฉลี่ย 0.55 และค่ามัธยฐาน 0.59 ที่ใกล้เคียงกันและมี IQR เท่ากับ 0.26 ($Q1 = 0.45$, $Q3 = 0.71$) แสดงการกระจายตัวที่สมดุลและสมมาตรรอบค่ากลาง Manhattan Distance มีการแจกแจงที่เบ้ขวาอย่างเด่นชัดที่สุด ด้วยค่าเฉลี่ย 11.92 ที่ต่ำกว่าค่ามัธยฐาน 12.83 และมี IQR ที่กว้างมาก คือ 5.48 ($Q1 = 9.78$, $Q3 = 15.26$) สะท้อนถึงการกระจายตัวที่หลากหลาย

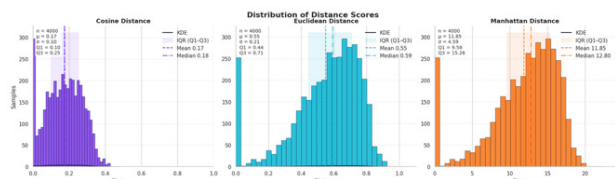


Figure 6 Average Similarity Score of Model Gemma-3-4b

Model Gemma-3-4b ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นความแตกต่างลักษณะการแจกแจงโดย Cosine Distance มีการแจกแจงที่เบ้ขวาอย่างเด่นชัด ด้วยค่าเฉลี่ย (μ) 0.17 และค่ามัธยฐาน 0.18 ที่ใกล้เคียงกัน พร้อมด้วย Interquartile Range (IQR) ที่แคบเพียง 0.15 ($Q1 = 0.10$, $Q3 = 0.25$) สะท้อนถึงการกระจุกตัวของข้อมูลในช่วงค่าที่ค่อนข้างต่ำและมีการกระจายตัวที่จำกัด ในทางตรงกันข้าม Euclidean Distance แสดงการแจกแจงแบบปกติที่สมมาตรมากที่สุด ด้วยค่าเฉลี่ย 0.55 และค่ามัธยฐาน 0.59 ที่ใกล้เคียงกัน และมี IQR เท่ากับ 0.26 ($Q1 = 0.45$, $Q3 = 0.71$) แสดงถึงการกระจายตัวที่สมดุลและสมมาตรรอบค่ากลาง ส่วน Manhattan Distance มีการแจกแจงที่เบ้ซ้ายอย่างเด่นชัด ด้วยค่าเฉลี่ย 11.85 ที่ต่ำกว่าค่ามัธยฐาน 12.80 อย่างชัดเจน และมี IQR ที่ 5.71 ($Q1 = 9.55$, $Q3 = 15.26$) สะท้อนถึงการกระจายตัวที่หลากหลายและมีความไม่สมมาตรสูง โดยพบว่ามีข้อมูลจำนวนมากที่มีค่าสูงกว่าค่ากลางของการแจกแจง

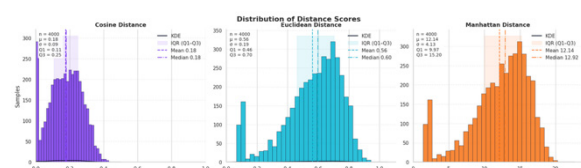


Figure 7 Average Similarity Score of Model Qwen3-8B

Model Qwen3-8B ผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นความแตกต่างลักษณะการแจกแจงโดย Cosine Distance มีการแจกแจงที่เบ้ขวาอย่างเด่นชัด ด้วยค่าเฉลี่ย (μ) และค่ามัธยฐานที่เท่ากับ 0.18 และมีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (σ) ที่ต่ำเพียง 0.09 พร้อมด้วย Interquartile Range (IQR) ที่แคบเท่ากับ 0.16 ($Q1 = 0.09$, $Q3 = 0.25$) การกระจุกตัวของข้อมูลในช่วงค่าที่ค่อนข้างต่ำและมีความแปรผันที่จำกัดในทางตรงกันข้าม Euclidean Distance แสดงการแจกแจงที่เข้าใกล้แบบปกติมากที่สุด ด้วยค่าเฉลี่ย 0.56 และค่ามัธยฐาน 0.60 ที่ใกล้เคียงกัน มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน 0.19 และ IQR เท่ากับ 0.24 ($Q1 = 0.46$, $Q3 = 0.70$) แสดงถึงการกระจายตัวที่สมดุลและสมมาตร Manhattan Distance มีการแจกแจงลักษณะเบ้ซ้ายเล็กน้อย ด้วยค่าเฉลี่ย 12.14 ที่ต่ำกว่าค่ามัธยฐาน 12.92 อย่างเด่นชัด มีค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานสูงที่ 4.13 และ IQR ที่กว้าง 5.23 ($Q1 = 9.97$, $Q3 = 15.20$) สะท้อนถึงการกระจายตัวที่หลากหลายและมีความไม่สมมาตร โดยพบว่ามีข้อมูลจำนวนมากที่มีค่าสูงกว่าค่ากลางของการแจกแจง

ผลการวิเคราะห์ความครอบคลุม Coverage Analysis

โดยการวิเคราะห์ครอบคลุม 3 ด้าน Test Coverage, Functional Coverage, Requirement Coverage โดยกำหนดข้อกำหนดความต้องการมีทั้งหมด 50 ข้อ เนื้อหาเกี่ยวกับระบบในธนาคารและระบบทั่วไป (Non-Banking) ทำการทดสอบทั้ง 4 โมเดล ได้แก่ LLaMA3.2-3B, Typhoon2-8b, Gemma-3-4b และ Qwen3-8B (Laplante & Kassab, 2022) แสดงดัง Table 6

Table 6 Coverage Analysis

Model	Test Coverage	Functional Coverage	Requirement Coverage
LLaMA3.2-3B	87%	85%	86%
Typhoon2-8b	91%	90%	89%
Gemma-3-4b	93%	91%	90%
Qwen3-8B	90%	89%	92%

จาก Table 6 แสดงผลการวิเคราะห์ความครอบคลุมของโมเดลภาษาขนาดใหญ่ 4 โมเดล จากผลการทดลองพบว่า Gemma-3-4b แสดงประสิทธิภาพสูงสุดในด้าน Test Coverage (93%) Functional Coverage (91%) และ Requirement Coverage สูงสุด (90%) ตามด้วย Qwen3-8B ที่มี Requirement Coverage สูงสุด (92%) แต่มี Test Coverage ที่ (90%) และ Functional Coverage ที่ (89%) ใน

ขณะที่ Typhoon2-8b แสดงประสิทธิภาพในระดับกลางโดย Requirement Coverage สูงสุด (89%) Test Coverage ที่ (91%) และ Functional Coverage ที่ (90%) ตามด้วย LLaMA3.2-3B แสดงประสิทธิภาพต่ำสุดในทุกเกณฑ์การประเมิน ด้วยค่าความครอบคลุมอยู่ในช่วง Test Coverage (87%) Functional Coverage (85%) และ Requirement Coverage สูงสุด (86%) การเปรียบเทียบนี้สะท้อนให้เห็นว่าโมเดลที่มีพารามิเตอร์มากกว่าไม่จำเป็นต้องแสดงประสิทธิภาพที่ดีกว่าในทุกด้าน โดย Gemma-3-4b ที่มีขนาดเล็กกว่ากลับแสดงประสิทธิภาพในการทดสอบและฟังก์ชันการทำงาน ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการออกแบบสถาปัตยกรรมที่เหมาะสมและกระบวนการฝึกที่มีประสิทธิภาพ

ผลการประเมินผลโดยผู้เชี่ยวชาญ Expert Review

ประเมินผลความถูกต้องของ Test Case ที่สร้างโดยโมเดลตรงกับข้อกำหนดซอฟต์แวร์ ทั้งในด้าน Input, Process และ Expected Output โดยผู้เชี่ยวชาญด้านการทดสอบซอฟต์แวร์ ได้แก่ Software Tester และ QA จำนวน 5 คน ตำแหน่ง Software Tester, QA ซึ่งมีประสบการณ์ในการทดสอบระบบซอฟต์แวร์โดยหัวข้อประเมินมีทั้งหมด 10 หัวข้อ เกณฑ์ประเมินมาตราส่วน 5 ระดับแสดงดัง Table 7 ผู้เชี่ยวชาญให้

คะแนนประเมินในแต่ละหัวข้อ ตั้งแต่ระดับ 1 ต่ำที่สุด ถึงระดับ 5 สูงที่สุด โดยมีคะแนนรวมเต็ม 50 คะแนน ผลการประเมินนี้แสดงให้เห็นถึงคุณภาพของ Test Case ที่สร้างจากโมเดลในมุมมองของผู้ปฏิบัติงานจริง ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการพิจารณาความเหมาะสมของการประยุกต์ใช้โมเดลในการสร้างกรณีทดสอบสำหรับงานทดสอบซอฟต์แวร์ (Ammann & Offutt, 2017) และผลการทดลองแสดง Figure 8

Table 7 Criteria and Operational Definitions for Satisfaction Ratings

Satisfaction	Description
5 - Very satisfied	Fully meets the criteria clear and practically applicable.
4 - Satisfied	Meets most criteria with good detail.
3 - Moderately satisfied	Adequately meets the criteria but needs improvement.
2 - Somewhat	Meets some criteria lacks completeness.
1 - Very dissatisfied	Does not meet the criteria not directly usable.

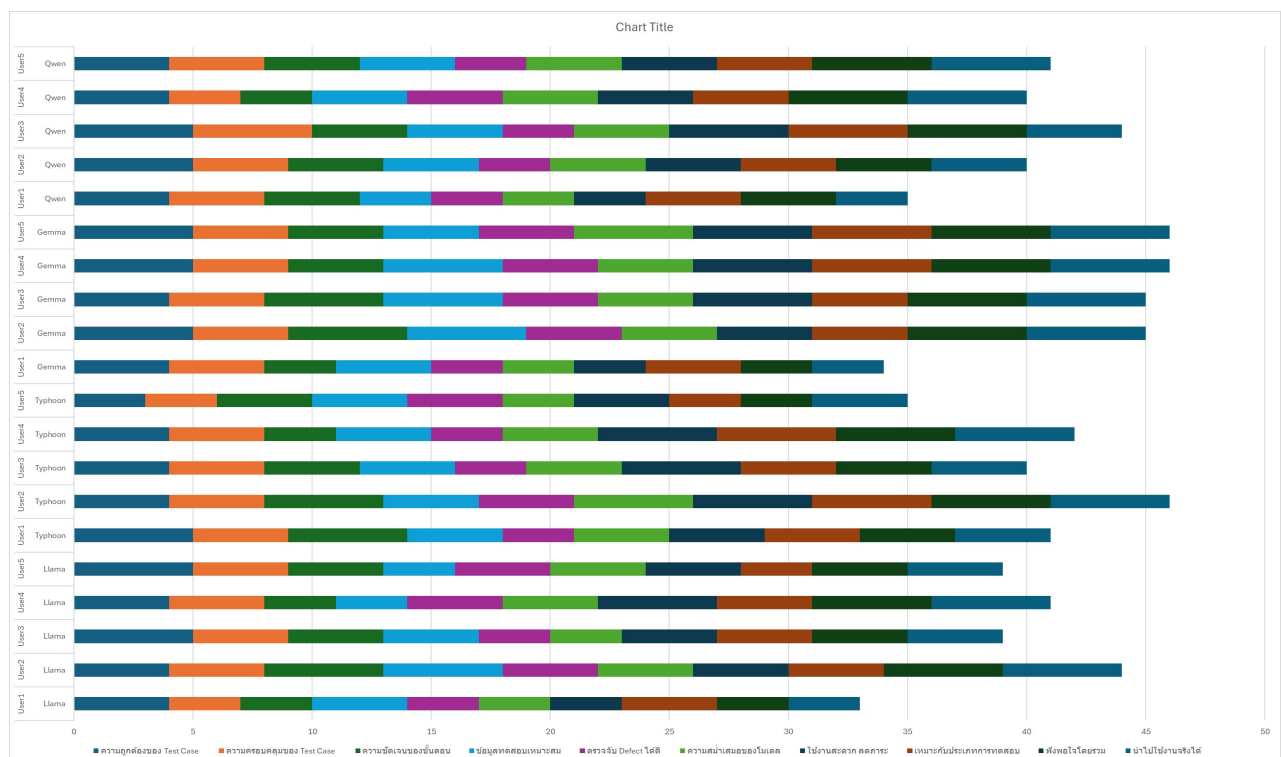


Figure 8 Graph Showing Quality Evaluation Results of Test Cases

จาก Figure 8 จากผลการประเมินความพึงพอใจของผู้เชี่ยวชาญด้านการทดสอบซอฟต์แวร์ต่อกรณีทดสอบ (Test Case) ที่สร้างโดยโมเดล พบว่าโมเดล Gemma-3-4B มีประสิทธิภาพโดดเด่นที่สุด โดยได้รับ คะแนนเฉลี่ย 43.2 คะแนน คิดเป็นร้อยละ 86.4% เป็นคะแนนสูงสุดในแทบทุกหัวข้อการประเมิน สะท้อนให้เห็นถึงความสามารถของโมเดลในการสร้าง Test Case ที่มีความครอบคลุมมีขั้นตอนที่ชัดเจนและสอดคล้องกับข้อกำหนดของระบบ Requirement รองลงมาคือโมเดล Typhoon2-8B คะแนนเฉลี่ย 40.8 คะแนน คิดเป็นร้อยละ 81.6% แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพที่ดีในหลายด้าน โดยเฉพาะด้านความถูกต้องและความครอบคลุมของกรณีทดสอบซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญในการประเมินคุณภาพ Test Case โมเดล Qwen3-8B คะแนนเฉลี่ย 40 คะแนน คิดเป็นร้อยละ 80% และ LLaMA-3.2-3B คะแนนเฉลี่ย 39.2 คะแนน คิดเป็นร้อยละ 78.4% พบว่ามีผลการประเมินใกล้เคียงกันตามลำดับ แม้จะมีคะแนนเฉลี่ยต่ำกว่าโมเดลอื่น แต่ยังคงอยู่ในระดับที่สามารถยอมรับได้สำหรับการสร้าง Test Case เพื่อการทดสอบซอฟต์แวร์ทุกโมเดลมีจุดแข็งและจุดอ่อนที่แตกต่างกันในแต่ละหัวข้อการประเมิน สะท้อนให้เห็นถึงศักยภาพของโมเดลในการสร้าง Test Case ที่มีคุณภาพเพียงพอสำหรับการประยุกต์ใช้ในงานทดสอบซอฟต์แวร์จริง ในการปรับปรุงประสิทธิภาพ เช่น การเพิ่มความครอบคลุมเชิงลึกของกรณีทดสอบ (Depth of Coverage), การสร้างกรณีเชิงลบ (Negative Case) และการเพิ่มความหลากหลายของสถานการณ์ทดสอบ

การใช้งานระบบ Chatbot

ในงานวิจัยนี้ได้พัฒนาระบบสร้างกรณีทดสอบอัตโนมัติโดยใช้โมเดลภาษาขนาดใหญ่เพื่อรองรับการโต้ตอบผ่านระบบ Chatbot ซึ่งช่วยให้ผู้ใช้งานสามารถป้อนข้อกำหนดความต้องการของระบบ (Requirement) และรับกรณีทดสอบที่สอดคล้องกับเงื่อนไขดังกล่าวได้โดยอัตโนมัติผ่านอินเทอร์เฟซ

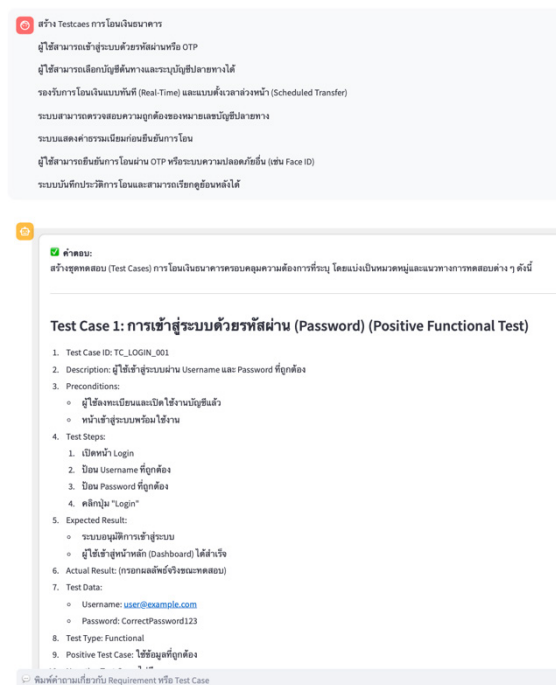


Figure 9 Chatbot User Interface Display

จาก Figure 9 แสดงตัวอย่างการใช้งานระบบสร้าง Test Case อัตโนมัติด้วยโมเดล LLM ในบริบทของระบบธนาคาร ผ่านธนาคาร เพื่อจำลองกรณีการใช้งานจริงของผู้ใช้ที่เข้าสู่ระบบด้วยรหัสผ่านอย่างถูกต้อง แสดงให้เห็นกรณีการเข้าสู่ระบบด้วยรหัสผ่านที่ถูกต้อง ซึ่งเป็นหนึ่งใน Positive Functional Test ของระบบธนาคารผ่านธนาคาร โดยผู้ใช้งานใส่ Requirement ที่ต้องการ เช่น “เข้าสู่ระบบด้วยรหัสผ่าน” ระบบจะสร้าง Test Case ที่ประกอบด้วย Testcase, Test Steps, Expected Result และข้อมูลตัวอย่าง Test Data อย่างครบถ้วน เพื่อให้สามารถนำไปใช้ทดสอบระบบได้จริง

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

1. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโมเดล LLM ในการสร้าง Test Case

การประเมินและเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโมเดลภาษาขนาดใหญ่ จำนวน 4 โมเดล ได้แก่ LLaMA3.2-3B, Typhoon2-8b, Gemma-3-4b และ Qwen3-8B โดยมุ่งเน้นการประเมินความสามารถของแต่ละโมเดลในการสร้างกรณีทดสอบจากข้อกำหนดความต้องการของซอฟต์แวร์ โดยใช้ตัวชี้วัดหลัก 4 ตัว ได้แก่ ค่า Loss, Cosine Distance, Euclidean Distance และ Manhattan Distance ผลการเปรียบเทียบพบว่า

โมเดล Qwen3-8B มีค่า Loss ต่ำที่สุดที่ (0.1558) ซึ่งสะท้อนถึงความสามารถในการเรียนรู้ของข้อมูล, โมเดล

Typhoon2-8b (0.1703), โมเดล LLaMA3.2-3B (0.1946) และ โมเดล Gemma-3-4b (0.2529) บ่งชี้ว่าโมเดล Qwen3-8B มีความแม่นยำในการสร้าง Test Case มากที่สุด ในขณะที่ Gemma-3-4b มีความคลาดเคลื่อนของผลลัพธ์สูงสุด เมื่อพิจารณาความใกล้เคียงเชิงเวกเตอร์พบว่า Gemma-3-4b ให้ผลลัพธ์ที่ใกล้เคียงกับข้อมูลจริงมากที่สุด โดยมีค่า Euclidean Distance ต่ำสุดที่ (0.5494) และ Manhattan Distance ต่ำสุดที่ (11.8533) สะท้อนข้อมูลเวกเตอร์ที่โมเดลสร้างขึ้นมีการกระจายตัวใกล้เคียงกับข้อมูลจริง ในทางกลับกัน Qwen3-8B แม้จะมีค่า Loss ต่ำที่สุดแต่กลับมีค่า Euclidean (0.5624) และ Manhattan (12.1406) สูงที่สุด ซึ่งชี้ให้เห็นว่าข้อมูลที่สร้างอาจมีการกระจายตัวในเชิงมิติสูงกว่ากลุ่มอื่น ตัวชี้วัด Cosine Distance พบว่า Typhoon2-8b มีค่าสูงสุดที่ (0.1746) และ Qwen3-8B มีค่าใกล้เคียงที่ (0.1765) แสดงถึงความใกล้เคียงของทิศทางเวกเตอร์กับข้อมูลจริง ขณะที่ Cosine Distance ของโมเดล LLaMA3.2-3B (0.1738) และ Gemma-3-4b (0.1736) อยู่ในระดับใกล้เคียงกัน การประเมินในครั้งนี้สะท้อนให้เห็นความแตกต่างด้านจุดแข็งและจุดอ่อนของแต่ละโมเดลอย่างชัดเจน โดย Qwen3-8B มีความโดดเด่นด้านความแม่นยำของการสร้าง Test Case (Loss ต่ำ) แต่มีการกระจายเชิงเวกเตอร์ค่อนข้างสูง ในขณะที่ Gemma-3-4b มีความใกล้เคียงเชิงเวกเตอร์สูงแต่ความแม่นยำต่ำกว่า ส่วน Typhoon2-8b มีจุดเด่นด้านทิศทางเวกเตอร์ที่ใกล้เคียงข้อมูลจริง และ LLaMA3.2-3B มีความสมดุลในทุกตัวชี้วัด การเปรียบเทียบนี้ชี้ให้เห็นว่าการเลือกใช้โมเดล LLM สำหรับการสร้าง Test Case ควรพิจารณาจากหลายตัวชี้วัดร่วมกัน ไม่ควรพิจารณาเพียงค่าใดค่าหนึ่งเพื่อสะท้อนประสิทธิภาพของโมเดลได้อย่างรอบด้าน ผลลัพธ์ยังบ่งชี้ว่าแต่ละโมเดลเหมาะสมกับการประยุกต์ใช้ในบริบทที่ต่างกัน ขึ้นอยู่กับความต้องการด้านความแม่นยำหรือความใกล้เคียงเชิงเวกเตอร์ของระบบทดสอบซอฟต์แวร์ที่ต้องการพัฒนา

2. การประเมินความครอบคลุมของ Test Case

การวัดความครอบคลุมโดยใช้ตัวชี้วัดหลัก 3 ประเภท ได้แก่ Test Coverage, Functional Coverage และ Requirement Coverage ผลการประเมินพบว่า

โมเดล Gemma-3-4b มีค่าความครอบคลุมสูงที่สุดในด้าน Test Coverage (93%) และ Functional Coverage (91%) พร้อมทั้งมีค่า Requirement Coverage อยู่ที่ 90% ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงความสามารถในการสร้างกรณีทดสอบที่ครอบคลุมทั้งในระดับฟังก์ชันและข้อกำหนด

โมเดล Qwen3-8B มีค่า Requirement Coverage สูงสุดที่ 92% และมีค่า Test Coverage 90% กับ Functional Coverage 89% ซึ่งแม้จะต่ำกว่า Gemma-3-4b เล็กน้อยในด้าน Test และ Functional Coverage แต่มีจุดแข็งด้านการครอบคลุมข้อกำหนดซอฟต์แวร์

โมเดล Typhoon2-8b พบว่ามีค่าความครอบคลุม Requirement Coverage 89%, Test Coverage 91% และ Functional Coverage 90% ซึ่งแสดงถึงความสมดุลระหว่างการครอบคลุมข้อกำหนดและฟังก์ชันของระบบ

โมเดล LLaMA3.2-3B มีค่าความครอบคลุมน้อยที่สุด โดยมี Requirement Coverage 86%, Test Coverage 87% และ Functional Coverage 85% ส่งผลให้การสร้าง Test Case ไม่ครอบคลุมทุกรายละเอียดของระบบเงื่อนไขที่ซับซ้อน

ผลการประเมินชี้ให้เห็นว่าโมเดล **Gemma-3-4b** มีศักยภาพโดดเด่นในการสร้างกรณีทดสอบที่ครอบคลุมในทุกมิติของระบบมากที่สุด รองลงมาคือ Qwen3-8B และ Typhoon2-8b ซึ่งมีค่าความครอบคลุมใกล้เคียงกันและอยู่ในระดับสูง ส่วน LLaMA3.2-3B แม้จะมีความสามารถในระดับที่เหมาะสม แต่มีค่าความครอบคลุมต่ำกว่าโมเดลอื่น โดยภาพรวมผลการประเมินนี้สะท้อนว่าโมเดลที่สามารถทำความเข้าใจบริบทของข้อกำหนดและฟังก์ชันได้ดีจะมีแนวโน้มสร้าง Test Case ที่ครอบคลุมได้มากกว่า

3. ผลการประเมินจากผู้เชี่ยวชาญ

จากผลการประเมินความพึงพอใจของผู้เชี่ยวชาญด้านการทดสอบซอฟต์แวร์ต่อกรณีทดสอบ Test Case ที่สร้างโดย 4 โมเดล พบว่า

โมเดล **Gemma-3-4b** มีประสิทธิภาพโดยรวมดีที่สุด ได้คะแนนเฉลี่ย **43.2 คะแนน** คิดเป็นร้อยละ 86.4 ซึ่งเป็นคะแนนสูงสุดทุกหัวข้อ การประเมินแสดงให้เห็นถึงความสามารถของโมเดลในการสร้าง Test Case ที่มีความครอบคลุม มีความชัดเจนในขั้นตอนและมีความสอดคล้องกับข้อกำหนดของระบบ Requirement

โมเดล Typhoon2-8B คะแนนเฉลี่ย 40.8 คะแนน คิดเป็นร้อยละ 81.6 มีจุดเด่นด้านความถูกต้อง และความครอบคลุมของกรณีทดสอบ โดยเฉพาะในการสร้างกรณีทดสอบที่สามารถตรวจจับข้อผิดพลาดได้อย่างเหมาะสม

โมเดล Qwen3-8B คะแนนเฉลี่ย 40 คะแนน คิดเป็นร้อยละ 80 แสดงศักยภาพที่ดีในหลายด้าน โดยเฉพาะความชัดเจนและความสม่ำเสมอของรูปแบบ Test Case

โมเดล LLaMA3.2-3B คะแนนเฉลี่ย 39.2 คะแนน คิดเป็นร้อยละ 78.4 มีคะแนนเฉลี่ยต่ำสุดเมื่อเทียบกับโมเดล

อื่น แต่ยังคงถือว่าอยู่ในระดับที่สามารถสร้าง Test Case เพื่อการทดสอบซอฟต์แวร์จุดเด่นด้าน ความเร็วในการประมวลผลและการใช้ทรัพยากรที่ต่ำจึงเหมาะสำหรับการนำไปใช้ในสภาพแวดล้อมที่มีข้อจำกัดด้านหน่วยประมวลผล

4. การพัฒนาระบบ Chatbot

ระบบที่พัฒนาขึ้นรองรับการใช้งานผ่านเว็บไซต์ โดยผู้ใช้สามารถป้อนข้อกำหนดซอฟต์แวร์และรับ Test Case ที่สร้างโดย LLM ระบบนี้สามารถนำไปใช้จริงในองค์กรเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานของ Software Tester และ QA ได้อย่างมีนัยสำคัญ

5. สรุป

จากผลการวิจัยสรุปได้ว่า การประยุกต์ใช้โมเดลภาษาขนาดใหญ่ในการสร้าง Test Case สำหรับ Functional Testing แบบ Manual Testing เป็นแนวทางที่มีศักยภาพสูงสามารถเพิ่มคุณภาพ ความครอบคลุม และความยืดหยุ่นในการทดสอบซอฟต์แวร์ อีกทั้งยังรองรับการใช้งานจริงผ่านระบบ Chatbot ที่พัฒนาไว้ เมื่อรวมกับข้อเสนอแนะในการพัฒนาต่อ ระบบนี้มีศักยภาพในการต่อยอดเป็นเครื่องมือสำคัญสำหรับอุตสาหกรรมซอฟต์แวร์ในอนาคต

6. ข้อเสนอแนะ

ควรมีการขยายขอบเขตของชุดข้อมูลที่ใช้ในการฝึกและประเมินโดยเพิ่มความหลากหลายของโดเมนข้อกำหนดความต้องการ ให้ครอบคลุมบริบทที่หลากหลายมากขึ้น เช่น ด้านอุตสาหกรรม เพื่อประเมินศักยภาพของโมเดลในการสร้างกรณีทดสอบในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน โมเดลจะประยุกต์ใช้กับระบบที่มีความซับซ้อนหลากหลาย นอกจากนี้พัฒนาระบบให้สามารถแปลงกรณีทดสอบในรูปแบบสคริปต์สำหรับการทดสอบอัตโนมัติได้โดยตรง เพื่อให้สามารถเชื่อมต่อกับเครื่องมือทดสอบซอฟต์แวร์ที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรม เช่น Selenium สำหรับการทดสอบส่วนติดต่อผู้ใช้ (UI Testing), pytest สำหรับการทดสอบแบบ (Unit/Integration Testing) และ Postman สำหรับการทดสอบ API โดยสามารถจัดเตรียมชุดข้อมูลแบบคู่ขนาน ที่ประกอบด้วยคำอธิบาย Test Case ควบคู่กับ Test Script ภาษา Python หรือ JavaScript เพื่อสอนให้โมเดลเรียนรู้จากขั้นตอนเชิงข้อความไปเป็นโค้ดอัตโนมัติได้อย่างถูกต้องแม่นยำ ทั้งนี้ การประยุกต์ใช้เทคนิค Instruction Fine-Tuning ช่วยให้โมเดลสามารถสลับโหมดการทำงานระหว่างการสร้าง Test Case และการสร้าง Test Script ซึ่งจะทำให้ระบบสามารถดำเนินการ

ทดสอบได้ครบวงจร ตั้งแต่การสร้าง Test Case การแปลงเป็น Test Script ไปจนถึงการรันทดสอบและประเมินผลโดยอัตโนมัติ ช่วยเพิ่มศักยภาพของระบบให้สามารถประยุกต์ใช้ได้จริง

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่เอื้อเฟื้อเครื่องมือ อุปกรณ์ ที่จำเป็นต่อการดำเนินงานวิจัยครั้งนี้เป็นอย่างดี ทั้งนี้ ขอขอบพระคุณผู้เชี่ยวชาญด้านการทดสอบซอฟต์แวร์ที่ได้กรุณาสละเวลาให้คำปรึกษา ให้ข้อเสนอแนะ และแนวทางในการพัฒนาระบบอย่างสร้างสรรค์ รวมถึงผู้ที่มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่ให้ความร่วมมือและสนับสนุนอย่างเต็มที่ตลอดระยะเวลาการทําริวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- Abbad, A., Abbad, K., & Tairi, H. (2016). Face recognition based on city-block and Mahalanobis cosine distance. In *2016 13th International Conference on Computer Graphics, Imaging and Visualization (CGIV)* (pp. 112–114). IEEE.
- Ammann, P., & Offutt, J. (2017). *Introduction to software testing* (2nd ed.). Cambridge University Press.
- Bag, S., Gupta, A., Kaushik, R., & Jain, C. (2024). RAG beyond text: Enhancing image retrieval in RAG systems. In *Proceedings of the 2024 International Conference on Electrical, Computer and Energy Technologies (ICECET)* (pp. 310–315).
- Bhatia, S., Gandhi, T., Kumar, D., & Jalote, P. (2024). Unit test generation using generative AI: A comparative performance analysis of autogeneration tools. In *Proceedings of the 2024 International Workshop on Large Language Models for Code (LLM4Code '24)* (pp. 1–8). ACM.
- Cheng, F. (2024). A comparative study of the performance of Spark-based k-means algorithm based on Euclidean distance and Manhattan distance. In *Proceedings of the 3rd International Conference on Computer Communication and Artificial Intelligence (CCAI)* (pp. 224–229).
- Cheng, Y., Wang, M., Xiong, Y., Hao, D., & Zhang, L. (2016). Empirical evaluation of test coverage for functional programs. In *2016 IEEE International*

- Conference on Software Testing, Verification and Validation (ICST)* (pp. 255–265). IEEE.
- Devlin, J., Chang, M. W., Lee, K., & Toutanova, K. (2019). BERT: Pre-training of deep bidirectional transformers for language understanding. In *Proceedings of the 2019 Conference of the North American Chapter of the Association for Computational Linguistics: Human Language Technologies (NAACL-HLT)* (pp. 4171–4186).
- Dhillon, I. S., Guan, Y., & Kogan, J. (2002). Refining clusters in high-dimensional text data. In *Proceedings of the Workshop on Clustering High Dimensional Data and its Applications at the Second SIAM International Conference on Data Mining* (pp. 71–82). SIAM.
- Gao, X., & Li, G. (2016). A KNN model based on Manhattan distance to identify the SNARE proteins. *Computational and Mathematical Methods in Medicine, 2016*, Article 6480195. <https://doi.org/10.1155/2016/6480195>
- Guan, W., & Fang, Y. (2025). *Optimizing web-based AI query retrieval with GPT integration in LangChain: A CoT-enhanced prompt engineering approach*. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2503.12345>
- Hoffmann, J., & Frister, D. (2024). Generating software tests for mobile applications using fine-tuned large language models. In *Proceedings of the 45th International Conference on Software Engineering (ICSE)* (pp. 1234–1245).
- Hu, E., Shen, Y., Wallis, P., Allen-Zhu, Z., Li, Y., Wang, L., & Chen, W. (2021). LoRA: Low-rank adaptation of large language models. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2106.09685>
- Hu, J., Liao, X., Gao, J., Qi, Z., Zheng, H., & Wang, C. (2024). *Optimizing large language models with an enhanced LoRA fine-tuning algorithm for efficiency and robustness in NLP tasks*. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2403.10567>
- Jacob, T. P., Bizotto, B. L. S., & Sathiyarayanan, M. (2024). Constructing the ChatGPT for PDF files with LangChain – AI. In *Proceedings of the 2024 International Conference on Inventive Computation Technologies (ICICT)* (pp. 78–85).
- Laplante, P. A., & Kassab, M. (2022). *Requirements engineering for software and systems*. Auerbach Publications.
- Masuda, S., Nishi, Y., & Suzuki, K. (2020). Complex software testing analysis using international standards. In *2020 IEEE International Conference on Software Testing, Verification and Validation Workshops (ICSTW)* (pp. 241–246). IEEE.
- Nazi, A., Huang, Q., Shojaei, H., Esfeden, H. A., Mirhosseini, A., & Ho, R. (2022). Adaptive test generation for fast functional coverage closure. In *DVCON USA*.
- Omar, S. F. (2013). *A software traceability approach to support requirement-based test coverage analysis* [Doctoral dissertation, Universiti Teknologi Malaysia].
- Radford, A., Wu, J., Child, R., Luan, D., Amodei, D., & Sutskever, I. (2019). *Language models are unsupervised multitask learners*. arXiv. <https://arxiv.org/abs/1905.00546>
- Schütze, H., Manning, C. D., & Raghavan, P. (2008). *Introduction to information retrieval*. Cambridge University Press.
- Srikaewsiew, T., Khianchainat, K., Tharatipyakul, A., Pongnumkul, S., & Kanjanawattana, S. (2022). A comparison of the instructor-trainee dance dataset using cosine similarity, Euclidean distance, and angular difference. In *2022 26th International Computer Science and Engineering Conference (ICSEC)* (pp. 235–240). IEEE.
- Tiwari, D., Zhang, L., Monperrus, M., & Baudry, B. (2022). Production monitoring to improve test suites. *IEEE Transactions on Reliability*, 71(3), 1381–1397. <https://doi.org/10.1109/TR.2022.3149480>
- Wang, Z., Guo, X., & Tsuchiya, T. (2025). Graph-centric approaches for coverage optimization in software requirement testing. In *2025 IEEE 49th Annual Computers, Software, and Applications Conference (COMPSAC)* (pp. 1270–1280). IEEE.
- Wang, Z., Liu, K., Li, G., & Jin, Z. (2024). HITS: High-coverage LLM-based unit test generation via method slicing. In *Proceedings of the 38th IEEE/ACM International Conference on Automated Software Engineering (ASE)* (pp. 45–56).

Zhang, J., Wang, F., Ma, F., & Song, G. (2022). Text similarity calculation method based on optimized cosine distance. In *2022 International Conference on Electronics and Devices, Computational Science (ICEDCS)* (pp. 37–39). IEEE.

การเปรียบเทียบสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของขุยมะพร้าวและเส้นใยมะพร้าวต่อการเป็นเชื้อเพลิงแข็งในโรงไฟฟ้าชีวมวล

Physicochemical properties comparison of sugarcane bagasse pith and fiber as solid fuel for biomass power plants

จารุณี เข้มพิล่า และภูมินทร์ คงโต^{2*}

Jarunee Khempila¹ and Pumin Kongto^{2*}

Received: 25 March 2025 ; Revised: 18 July 2025 ; Accepted: 20 August 2025

บทคัดย่อ

ขุยมะพร้าวเป็นเชื้อเพลิงหลักในโรงไฟฟ้าชีวมวล แต่ขุยมะพร้าวมีองค์ประกอบเป็นขุยมะพร้าวถึง 1 ใน 3 ส่วนและมีโครงสร้างที่แตกต่างจากเส้นใยมะพร้าวซึ่งส่งผลกระทบต่อสมบัติด้านเชื้อเพลิงโดยรวมของขุยมะพร้าว ดังนั้นวัตถุประสงค์การวิจัยคือเปรียบเทียบสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของขุยมะพร้าวกับเส้นใยมะพร้าวสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้าชีวมวล การศึกษาเริ่มต้นจากแยกขุยมะพร้าวออกจากเส้นใยมะพร้าวด้วยวิธีทางกล แล้ววิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณและละเอียด ค่าความร้อน การสลายตัวทางความร้อน การหลอมของแก้ว องค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลและแก้ว พบว่า เส้นใยมะพร้าวมีปริมาณคาร์บอนคงตัว สารระเหย คาร์บอน ไฮโดรเจนสูงกว่าขุยมะพร้าว (ร้อยละ 14.4 84.7 48.4 และ 5.8 ตามลำดับ) ส่งผลให้มีค่าความร้อนสูงกว่าขุยมะพร้าว (19.53 และ 14.28 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ตามลำดับ) อีกทั้งมีปริมาณเถ้าน้อยกว่าขุยมะพร้าวถึงร้อยละ 22.8 ขุยมะพร้าวมีสารอนินทรีย์สูงกว่าเส้นใยมะพร้าวอย่างมีนัยสำคัญในเกือบทุกองค์ประกอบ โดยเฉพาะซิลิกอนที่มีปริมาณร้อยละ 21.15 ซึ่งมากกว่าเส้นใยมะพร้าวถึง 19 เท่า เถ้าจากขุยมะพร้าวไม่เกิดการหลอมแม้ที่อุณหภูมิ 1,500 องศาเซลเซียส เนื่องจากมีองค์ประกอบ SiO_2 สูงถึงร้อยละ 89.89 ขณะที่เถ้าจากเส้นใยมะพร้าวเริ่มหลอมที่อุณหภูมิต่ำกว่า (1,100 องศาเซลเซียส) ผลวิจัยสรุปว่า เส้นใยมะพร้าวมีสมบัติเป็นเชื้อเพลิงดีกว่าขุยมะพร้าว การศึกษานี้บ่งชี้ว่าควรพิจารณาแยกขุยมะพร้าวออกก่อนนำส่วนที่เหลือไปใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้า เพื่อลดปัญหาการจัดการเถ้าและช่วยปรับปรุงสมบัติด้านความร้อนของการใช้ขุยมะพร้าวเป็นเชื้อเพลิง ส่วนขุยมะพร้าวควรพิจารณานำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมกระดาษและบรรจุภัณฑ์ เป็นวัตถุดิบในการผลิตวัสดุก่อสร้างหรือใช้เป็นวัสดุปรับปรุงดินในภาคการเกษตร

คำสำคัญ: ขุยมะพร้าว, องค์ประกอบเถ้า, โรงไฟฟ้าชีวมวล, เส้นใยมะพร้าว, สมบัติด้านเชื้อเพลิง

Abstract

Sugarcane bagasse is the primary fuel used in biomass power plants. However, bagasse contains pith, which is one-third of its composition and has a structure that differs from fiber, which impacts the overall fuel properties of bagasse. Therefore, this research aimed to compare the physicochemical properties of bagasse pith and fiber for use as fuel in biomass power plants. The study began by mechanically separating the bagasse pith from the fiber, followed by analyzing both proximate and ultimate compositions, heating values, thermal decomposition, ash melting behavior, and the chemical composition of the biomass and ash. The results indicated that bagasse fiber contains higher percentages of fixed carbon, volatile matter, carbon, and hydrogen than pith (14.4, 84.7, 48.4, and 5.8%, respectively). This led to higher heating values for bagasse fiber than pith (19.53 and 14.28 MJ/kg, respectively). Additionally,

¹ สาขาวิชาฟิสิกส์, คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี, มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม

² ศูนย์วิจัยพลังงานและสิ่งแวดล้อมเพื่อความยั่งยืน, หลักสูตรเทคโนโลยีพลังงาน, ภาควิชาวิศวกรรมสหวิทยาการ, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

¹ Physics Program, Faculty of Science and Technology, Rajabhat MahaSarakhm University

² Research Center for Energy and Environmental Sustainability (RCEES), Energy Technology Program, Department of Interdisciplinary Engineering, Faculty of Engineering, Prince of Songkla University

* Corresponding author: PuminKongto, Email: pumin.k@hotmail.com

bagasse fiber had 22.8% less ash content than pith. Bagasse pith contained significantly higher inorganic content than sugarcane fiber in almost all components, especially silicon, which comprised 21.15%, approximately 19 times higher than fiber. Ash from bagasse pith did not melt even at 1,500 °C due to its high SiO₂ content of 89.89%, whereas ash from bagasse fiber began to melt at a lower temperature (1,100 °C). The research concludes that bagasse fiber has better fuel properties than pith. This study suggests that consideration should be given to separating the bagasse pith before using the remaining portion as fuel in power plants to reduce ash management issues and improve the thermal properties of bagasse as a fuel. Bagasse pith should be considered for utilization in the paper and packaging industries, as raw material for construction material production, or as soil amendment material in the agricultural sector.

Keywords: Sugarcane pith, ash composition, biomass power plants, sugarcane fiber, fuel property

บทนำ

ตามแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2561-2580 (PDP2018) และนโยบายของรัฐบาลที่แถลงต่อรัฐสภา เมื่อวันที่ 11 กันยายน พ.ศ. 2566 มุ่งเน้นการจัดหาพลังงานไฟฟ้าให้เพียงพอต่อความต้องการและการเติบโตทางเศรษฐกิจ โดยมีนโยบายสำคัญ 3 ประการ คือ การส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร การพัฒนาสาธารณูปโภคพื้นฐานด้านพลังงาน และการยกระดับโครงข่ายระบบไฟฟ้าให้มีความมั่นคง ทั้งนี้การส่งเสริมการใช้พลังงานทดแทนจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรเป็นนโยบายสำคัญที่ต้องขับเคลื่อนจากปัจจุบันจนกระทั่งสิ้นสุดแผนพัฒนาในปี พ.ศ. 2580 โดยการไฟฟ้าฝ่ายผลิต (กฟผ.) เป็นหน่วยงานรัฐวิสาหกิจที่รับผิดชอบส่วนผู้ผลิตภาคเอกชนแบ่งเป็น 3 ส่วนคือ ผู้ผลิตจากต่างประเทศ ผู้ผลิตเอกชนรายใหญ่ (Independent Power Producer, IPP) และผู้ผลิตเอกชนรายเล็ก (Small Power Producer, SPP) ซึ่งมีกำลังการผลิตไฟฟ้าคิดเป็นสัดส่วนร้อยละ 19.15 52.27 และ 28.58 ตามลำดับ (กองบริหารสื่อองค์กร, 2566) โดยพลังน้ำและถ่านหินลิกไนต์คือแหล่งพลังงานหลักที่นำมาใช้ผลิตกำลังไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้าในกลุ่มจากต่างประเทศ ได้แก่ สาธารณรัฐประชาธิปไตยประชาชนลาวและโครงการสายส่งเชื่อมโยง ไทย-มาเลเซีย (HVDC) ผู้ผลิตเอกชนรายใหญ่ใช้แหล่งพลังงานจากก๊าซธรรมชาติ น้ำมันดีเซล และถ่านหินบิทูมินัส ส่วนผู้ผลิตเอกชนรายเล็กใช้พลังงานจาก 2 รูปแบบ คือ (1) ระบบ cogeneration ใช้ถ่านหินและก๊าซธรรมชาติ และ (2) พลังงานหมุนเวียน ได้แก่ พลังงานลม พลังงานแสงอาทิตย์ พลังน้ำ กากอ้อย ขยะ แกลบ เศษไม้ยางพารา น้ำมันยางดำ ก๊าซเหลือทิ้ง ทะลายปาล์ม ก๊าซธรรมชาติจากการผลิตน้ำมันดิบ และชีวมวลอื่นๆ โดยกากอ้อยเป็นชีวมวลที่ถูกนำมาใช้มากที่สุดในภาคเอกชน (กองบริหารสื่อองค์กร, 2566)

จากข้อมูลการผลิตไฟฟ้าและปริมาณการจำหน่ายไฟฟ้าตามสัญญาขายไฟฟ้าของผู้ผลิตไฟฟ้าเอกชนประจำ

เดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2566 พบว่ามีกำลังผลิตจากชีวมวล 6 ชนิด รวม 939.64 เมกะวัตต์ โดยกำลังผลิตไฟฟ้าจากกากอ้อยมีปริมาณ 576.09 เมกะวัตต์ คิดเป็นร้อยละ 18.99 ของการใช้พลังงานหมุนเวียนทั้งหมด หรือร้อยละ 61.31 จากการใช้ชีวมวลทั้งหมด ขณะที่แกลบ เศษไม้ยางพารา และทะลายปาล์มถูกนำมาใช้เพียงร้อยละ 3.45 2.04 และ 0.29 ตามลำดับ ชานอ้อยเป็นชีวมวลที่สร้างทดแทนได้ทุกปี ในปีเพาะปลูก 2565/66 มีอ้อยเข้าหีบ 93.89 ล้านตัน เกิดเศษเหลือเป็นกากน้ำตาล 3.36 ล้านตัน และชานอ้อย 27.22 ล้านตัน (พิจารณาบนฐานของค่า residue-to-product ratio (RPR) ของชานอ้อยเท่ากับ 0.302) (Suttibak, 2017) โดยชานอ้อยที่ออกจากลูกหีบชุดสุดท้ายส่วนใหญ่ถูกนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้และเป็นวัตถุดิบผลิตกระดาษ

ชานอ้อยประกอบด้วย 3 ส่วนสำคัญคือ ขุยมอ้อย เนื้ออ้อย และเปลือกอ้อย โดยเนื้ออ้อยประกอบด้วยมัดเส้นใยร้อยละ 50 ของน้ำหนักตันอ้อยอบแห้ง มัดเส้นใยมีลักษณะซึ่งมีค่าความร้อน 23.26–25.58 เมกะจูลต่อกิโลกรัม (Demirbas, 2001) ใกล้เคียงกับค่าความร้อนของถ่านหิน (29.27 เมกะจูลต่อกิโลกรัม) (Cheng *et al.*, 2020) ทำให้ชานอ้อยที่มีเนื้ออ้อยในปริมาณมากนั้นเหมาะสำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิง แต่เมื่อพิจารณาส่วนของขุยมอ้อยซึ่งมีปริมาณคิดเป็นร้อยละ 30 ของน้ำหนักตันอ้อยอบแห้ง พบว่าขุยมอ้อยไม่มีลักษณะของเส้นใยจึงมีองค์ประกอบของลิกนินอยู่ในขุยมอ้อยเพียงเล็กน้อยขณะที่มีเถ้าเป็นองค์ประกอบในปริมาณสูง (Chambon *et al.*, 2018) ส่งผลโดยตรงต่อค่าความร้อนที่ลดลง อีกทั้งขุยมอ้อยมีสมบัติดูดซับความชื้นได้สูงกว่าเส้นใย (Lois-Correa, 2012) ดังนั้นเชื้อเพลิงที่มีความชื้นสูงส่งผลให้ค่าความร้อนลดลงเช่นกัน (Demirbas, 2002)

ชานอ้อยใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้าชีวมวลโดยเผาไหม้ในเตาเผาที่อุณหภูมิประมาณ 950 องศาเซลเซียส เพื่อถ่ายโอนความร้อนให้น้ำในหม้อไอน้ำกลายเป็นไอน้ำแรงดันสูงไปหมุนกังหันไอน้ำของเครื่องกำเนิดไฟฟ้า ส่วนที่เผาไหม้ไม่

ได้ภายหลังการเผาไหม้สมบูรณ์เรียกว่าเถ้า ซึ่งหากมีปริมาณมากจะทำให้ค่าความร้อนขณะเผาไหม้มีค่าต่ำลง (Demirbas, 2002) เถ้าที่เกิดขึ้นมีทั้งเถ้าหนักและเถ้าลอย จำเป็นต้องกำจัดให้ถูกต้องตามกฎหมาย เช่น ฟังกลบตามหลักสุขาภิบาล ฟังกลบอย่างปลอดภัยเมื่อทำการปรับเสถียรเพื่อทำลายฤทธิ์และให้อยู่ในรูปที่คงตัว ใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนในเตาเผาปูนซีเมนต์ หรือนำกลับมาใช้ประโยชน์ เช่น ทำอิฐบล็อกประสาน หรือสารปรับสภาพดิน (Nayak *et al.*, 2022) วิธีการกำจัดเถ้ามีต้นทุนที่หลีกเลี่ยงไม่ได้ นอกจากนี้เถ้าออกไซด์ที่มีฤทธิ์เป็นเบส (Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O) เมื่อหลอมตัวจะเกาะเป็นคราบเหนียวตามผนังห้องเผาไหม้ หากมีฝุ่นมาจับจะเกิดเป็นตะกรันหนาขึ้น ทำให้ประสิทธิภาพการแลกเปลี่ยนความร้อนลดลง (Zhang *et al.*, 2016) การลดปริมาณเถ้าก่อนนำมาเป็นเชื้อเพลิงจึงช่วยลดมลพิษ ฝุ่นควัน ลดการซ่อมบำรุงเตาเผา และลดต้นทุนการกำจัดเถ้าที่กระบวนการตั้งต้น เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณเถ้าลอยจากการเผาพืชชีวมวล 3 ชนิด ได้แก่ กากอ้อย แกลบ และ เส้นใยปาล์ม พบว่ากากอ้อยก่อให้เกิดเถ้าลอยมากที่สุด (53.8 มิลลิกรัม/อนุภาคต่อกรัมเชื้อเพลิง) เนื่องจากมีปริมาณสารอินทรีย์หรือแร่ธาตุในกากอ้อย โดยเถ้ามีอนุภาคขนาดเล็กกว่า 1.1 ไมครอน (8.84 มิลลิกรัม/อนุภาค/กรัมเชื้อเพลิง) และอนุภาคขนาด 0.07–0.43 ไมครอน (14.28 มิลลิกรัม/อนุภาค/กรัมเชื้อเพลิง) ซึ่งสูงกว่าแกลบและเส้นใยปาล์ม เถ้าลอยที่มีขนาดเล็กและละเอียดมากนี้จะปลิวไปกับก๊าซร้อนออกจากปล่องควัน ก่อให้เกิดมลภาวะทางอากาศ (Rozhina *et al.*, 2021)

จากผลการศึกษา Palma *et al.* (2021) พบว่า เถ้าของชานอ้อยมีปริมาณออกไซด์ของธาตุสูงที่สุด 3 อันดับแรก ได้แก่ ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) และ เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) และการมีซิลิกอนไดออกไซด์ในปริมาณสูงมักส่งผลให้เถ้ามีอุณหภูมิหลอมตัวสูงขึ้น นอกจากนี้ Yunaidi *et al.* (2020) ยังพบว่า SiO_2 ของชานอ้อยมีค่าสูงถึงร้อยละ 74.99 และส่วนประกอบอัลคาไลน์ (Alkali content) อันได้แก่ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) และฟอสฟอรัสเพนทอกไซด์ (P_2O_5) มีค่ารวมร้อยละ 17.33 ซึ่งองค์ประกอบของเถ้าเหล่านี้ไม่ส่งผลอย่างมีนัยสำคัญต่อการเกิดตะกรัน แต่ด้วยเถ้าที่มีปริมาณมากจึงมีโอกาสในการเกิดปัญหาเหล่านี้ได้ Garcia-Maraver *et al.* (2017) ศึกษาค่าดัชนีชี้วัดการเกิดตะกรันในห้องเผาไหม้ของหม้อไอน้ำ (slagging) และตะกรันที่เกิดในผิวท่อของหม้อไอน้ำ (fouling) ของชานอ้อย จากดัชนีต่างๆได้แก่ ปริมาณ SiO_2 (ร้อยละ 46.79) บ่งชี้ว่ามีโอกาสเกิดตะกรันในระดับสูง เมื่อพิจารณา

ดัชนี basic to acidic oxides (B/A), ash fusibility index (AFI), fouling index (Fu), slag viscosity index (Sr), initial decomposition temperature (IDT) ซึ่งมีค่า 0.52 1285.20 4.46 69.44 และ 1256 องศาเซลเซียส ตามลำดับ พบว่ามีโอกาสเกิดตะกรันในระดับกลาง และเมื่อพิจารณาดัชนีตามปริมาณ chlorine content (Cl) และค่า Babcock index (Rs) ซึ่งมีค่าเท่ากันพบว่า มีโอกาสเกิดตะกรันในระดับต่ำ

ผู้วิจัยเห็นปัญหาเชื้อเพลิงฟอสซิลที่กำลังลดลงและจะหมดไปในอนาคตจึงให้ความสำคัญกับพลังงานทดแทนอีกทั้งชานอ้อยเป็นชีวมวลที่มีศักยภาพสูงของประเทศไทย จากข้อมูลพยากรณ์ปริมาณชานอ้อยและการผลิตไฟฟ้าตามแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย พ.ศ. 2561-2580 ชี้ให้เห็นว่าชานอ้อยเป็นเชื้อเพลิงชีวมวลทางเลือกที่มีศักยภาพทั้งในปัจจุบันและอนาคต อย่างไรก็ตาม ชานอ้อยมีองค์ประกอบหลักเป็นขุยมะพร้าวประมาณ 1 ใน 3 ส่วน อาจส่งผลกระทบต่อตรงต่อสมบัติด้านเชื้อเพลิงของชานอ้อยเนื่องจากความแตกต่างทางโครงสร้างของชีวมวลทั้งสองส่วน ส่งผลต่อค่าความร้อน องค์ประกอบธาตุองค์ประกอบและปริมาณสารอินทรีย์ (เถ้า) ผู้วิจัยจึงมุ่งศึกษาเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางด้านเชื้อเพลิง ตลอดจนอุณหภูมิการหลอมของเถ้า องค์ประกอบทางเคมีของเถ้าที่อาจส่งผลต่อการเกิดตะกรันของการใช้ชีวมวลเป็นเชื้อเพลิงผลิตความร้อนในโรงไฟฟ้าชีวมวล และเพื่อให้เกิดประโยชน์สูงสุดในการใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้าชีวมวล สอดคล้องกับนโยบายภาครัฐที่ส่งเสริมโรงไฟฟ้าชีวมวลพระราชบัญญัติ 120 เมกะวัตต์ และโรงไฟฟ้าชีวมวลชุมชน 600 เมกะวัตต์ ตามแผนพัฒนากำลังผลิตไฟฟ้าของประเทศไทย

การทดลอง

1. กระบวนการเตรียมชีวมวลตัวอย่าง

นำตัวอย่างชานอ้อยที่ได้รับการสนับสนุนจากบริษัทน้ำตาลวังขนาย จำกัด (มหาสารคาม) มาทำการแยกขุยมะพร้าวและเส้นใยอ้อย โดยใช้วิธีการแยกแบบแห้ง (Dry depithing) ดังรายละเอียดต่อไปนี้

นำชานอ้อยที่ได้รับจากโรงงานไปผ่านกระบวนการลดความชื้นด้วยความร้อนจากพลังงานแสงอาทิตย์ จนกระทั่งมีความชื้นประมาณหรือต่ำกว่าร้อยละ 10

ซึ่งมวลชานอ้อย 2,000 กรัมของมวลอ้อยอบแห้งแล้วร่อนแยกขุยมะพร้าวและเส้นใยอ้อย โดยผ่านตะแกรง 40 mesh (ช่องเปิดขนาด 0.4 มิลลิเมตร) จะสามารถแยกตัวอย่างออกเป็น 2 ส่วน คือ ส่วนที่ 1 จะเป็นมัดเส้นใยรวมเปลือกอ้อยค้างอยู่บนตะแกรง ส่วนที่ 2 จะเป็นขุยมะพร้าวละเอียดที่ลอดผ่าน

ช่องตะแกรง โดยในการศึกษานี้จะเรียกชีวมวลซึ่งผ่านการแยกชุยออกแล้ว (Depithed bagasse) ในส่วนที่ 1 ว่า “เส้นใยอ้อย” และชีวมวลในส่วนที่ 2 เรียกว่า “ชุยอ้อย” แสดงดัง Figure 1 นำตัวอย่างชีวมวลทั้ง 2 ส่วนเข้าตู้อบลมร้อนโดยให้ความร้อนอย่างต่อเนื่องที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วปล่อยให้เย็นลงที่อุณหภูมิห้องภายในโถดูดความชื้น เก็บบรรจุใส่ถุงกันความชื้น (Ziplock) เพื่อนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติต่างๆ ต่อไป



Figure 1 (a) Bagasse fiber (b) bagasse pith.

2. การวิเคราะห์องค์ประกอบและสมบัติของตัวอย่างชีวมวล

2.1 องค์ประกอบแบบประมาณ

การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ (Proximate analysis) ประกอบด้วย ความชื้น (Moisture content, MC) สารระเหยได้ (Volatile matter, VM) คาร์บอนคงตัว (Fixed carbon, FC) และ เถ้า (Ash) ด้วยเครื่อง Macro thermogravimetric analyzer รุ่น TGA 701 (LECO, USA) ตามมาตรฐาน ASTM E1756-08, E1755-01 และ E872-82 โดยทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำต่อตัวอย่าง กระบวนการทดสอบเริ่มจากการให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส เพิ่มขึ้นด้วยอัตรา 6 องศาเซลเซียสต่อนาที ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจนจนถึง 107 องศาเซลเซียส และคงที่นาน 15 นาที เพื่อวิเคราะห์ความชื้น จากนั้นเพิ่มอุณหภูมิถึง 950 องศาเซลเซียส ด้วยอัตรา 50 องศาเซลเซียสต่อนาที คงที่ไว้นาน 7 นาที เพื่อวิเคราะห์ปริมาณสารระเหย แล้วปล่อยให้เย็นลงถึง 600 องศาเซลเซียส ภายใต้บรรยากาศไนโตรเจน ก่อนเพิ่มอุณหภูมิถึง 750 องศาเซลเซียส ด้วยอัตรา 3 องศาเซลเซียสต่อนาที และคงที่ไว้นาน 15 นาที ภายใต้บรรยากาศออกซิเจนที่ 650 องศาเซลเซียส เพื่อวิเคราะห์ปริมาณเถ้า ส่วนปริมาณคาร์บอนคงตัวได้จากการคำนวณดังสมการที่ 1 และรายงานผลเป็นร้อยละโดยน้ำหนัก (wt.%, dry basis)

$$FC = 100 - (\%MC + \%VM + \%Ash) \quad (1)$$

เมื่อ %MC คือ ร้อยละของปริมาณความชื้น
 %VM คือ ร้อยละของปริมาณสารระเหย
 %Ash คือ ร้อยละของปริมาณเถ้า

2.2 องค์ประกอบแบบละเอียด

การวิเคราะห์องค์ประกอบแบบละเอียด (Ultimate analysis) ในตัวอย่างชีวมวล ได้แก่ คาร์บอน (Carbon, C) ไฮโดรเจน (Hydrogen, H) ไนโตรเจน (Nitrogen, N) และ กำมะถัน (Sulfur, S) โดยใช้เครื่องวิเคราะห์ปริมาณธาตุ CHNS/O รุ่น Flash 2000 ผลิตในประเทศอิตาลี ดำเนินการวิเคราะห์ตามมาตรฐาน ASTM D4239 กระบวนการวิเคราะห์เริ่มจากการเผาสารตัวอย่างในบรรยากาศออกซิเจน ทำให้เกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ แก๊สไนโตรเจนออกไซด์ และไอน้ำ โดยแก๊สไนโตรเจนออกไซด์จะถูกรีดิวส์ให้เป็นแก๊สไนโตรเจน และตรวจวัดโดยใช้หัววัดชนิดอินฟราเรดเซลล์ (Infrared cells) และนำค่าไปคำนวณเป็นปริมาณไนโตรเจน ส่วนปริมาณของคาร์บอนและไฮโดรเจนคำนวณจากปริมาณของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์และไอน้ำ และในส่วนของปริมาณออกซิเจนได้จากการคำนวณ ผลการทดสอบแสดงในรูปร้อยละโดยน้ำหนัก (wt.%, dry basis) ทำการวิเคราะห์ 3 ซ้ำต่อตัวอย่างทดสอบ โดยดำเนินการที่สำนักเครื่องมือวิทยาศาสตร์และการทดสอบมหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

2.3 ค่าความร้อนสูงและค่าความร้อนต่ำ

ค่าความร้อนสูง (Higher heating value, HHV) และค่าความร้อนต่ำ (Lower heating value, LHV) ของตัวอย่างชีวมวล ได้จากการคำนวณโดยอาศัยผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบละเอียด อ้างอิงตามสมการของ Ozyuguran *et al.* (2018) ดังสมการที่ 2 และ 3

$$HHV = -4.9140 + 0.2611N + 0.4114C + 0.6114H + 0.3888S + 0.02097O \quad (2)$$

$$LHV = -5.5232 + 0.2373N + 0.4334C + 0.2360H + 0.3732S + 0.000838O \quad (3)$$

เมื่อ	C	คือ	ร้อยละของปริมาณคาร์บอน
	H	คือ	ร้อยละของปริมาณไฮโดรเจน
	S	คือ	ร้อยละของปริมาณซัลเฟอร์
	N	คือ	ร้อยละของปริมาณไนโตรเจน
	O	คือ	ร้อยละของปริมาณออกซิเจน

2.4 การสลายตัวทางความร้อนของชีวมวล

ศึกษาการสลายตัวทางความร้อนของชีวมวลชุยอ้อยและเส้นใยอ้อยโดยวิธีวิเคราะห์พฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อน/พฤติกรรมทางความร้อนแบบนอนไอโซเทอร์มอลด้วยเครื่องวิเคราะห์เชิงอุณหภูมิกความร้อน รุ่น TGA 701 ยี่ห้อ

LECO ประเทศสหรัฐอเมริกา ภายใต้สภาวะบรรยากาศของก๊าซไนโตรเจน ในช่วงอุณหภูมิ 50–850 องศาเซลเซียส ที่อัตราการให้ความร้อนคงที่ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที แล้วสร้างกราฟการเปลี่ยนแปลงมวลเมื่อเทียบกับอุณหภูมิ (TGA) และกราฟอัตราการเปลี่ยนแปลงเมื่อเทียบกับอุณหภูมิ (DTG)

2.5 อุณหภูมิการหลอมของเถ้าชีวมวล

โดยเตรียมตัวอย่างเถ้าจากการเผาที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วให้ความร้อนสูงขึ้นถึง 815 องศาเซลเซียส คงที่ไว้ 5 ชั่วโมง (Horák *et al.*, 2019) จากนั้นวิเคราะห์หาค่าอุณหภูมิหลอมเหลวของเถ้า (Ash fusion temperature) จากชีวมวลด้วยเครื่องตรวจวัดการหลอมเหลวของเถ้า (AF700, Leco, USA) ซึ่งจะบันทึกอุณหภูมิการเปลี่ยนของเถ้ารูปกรวยเถ้าโดยอัตโนมัติ อ้างอิงตามมาตรฐาน ASTM D1857-87 มีการบันทึกอุณหภูมิเปลี่ยนรูปเริ่มต้น Deformation temperature, IDT) และอุณหภูมิหลอมเหลว (Flow temperature, FT) อ้างอิงตามการศึกษาก่อนหน้านี้ (Fang & Jia, 2012)

2.6 องค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลและเถ้าของชีวมวล

วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของชีวมวลและเถ้าจากชีวมวลด้วยเครื่อง X-ray fluorescence spectrometry (XRF) รุ่น Zetium ยี่ห้อ PANalytical ประเทศเนเธอร์แลนด์ โดยเตรียมตัวอย่างเถ้าจากการเผาที่อุณหภูมิ 250 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง แล้วให้ความร้อนสูงขึ้นถึง 815 องศาเซลเซียส คงที่ไว้ 5 ชั่วโมง (Horák *et al.*, 2019) นำตัวอย่างเถ้าที่ได้มาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีซึ่งประกอบด้วยอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) แคลเซียมออกไซด์ (CaO) เหล็กออกไซด์ (Fe_2O_3) แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) โซเดียมออกไซด์ (Na_2O) และไทเทเนียมไดออกไซด์ (TiO_2) และวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุของชีวมวลได้แก่ ซิลิคอน (Si) โพแทสเซียม (K) แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) เหล็ก (Fe) ฟอสฟอรัส (P) อลูมิเนียม (Al) คลอรีน (Cl) และแมงกานีส (Mn) และนำไปคำนวณความเสี่ยงของการเกาะตัวของเถ้าหรือตะกรัน โดยพิจารณาจากดัชนี Alkali index (AI) ซึ่งค่าที่ต่ำกว่า 0.17 หมายถึงมีความเป็นไปได้น้อยมากที่จะเกิดการเกาะตัวของเถ้าหรือตะกรัน ขณะที่หากมีค่าที่สูงกว่า 0.34 หมายถึงมีความเป็นไปได้สูงมากที่จะเกิดการเกาะตัวของเถ้า ซึ่งคำนวณได้จากสมการที่ 4 (Elbersen *et al.*, 2017)

$$\text{AI} = (\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}) / (\text{HHV}) \quad (4)$$

ผลการทดลองและอภิปรายผล

1. ผลการศึกษาองค์ประกอบแบบละเอียด

จากการพิจารณาผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบละเอียดของตัวอย่างชีวมวลจากช่อดอกและเส้นใยอ้อย (Figure 2) พบความแตกต่างที่มีนัยสำคัญในองค์ประกอบทางเคมีซึ่งจะส่งผลต่อพฤติกรรมการเผาไหม้คือ ตัวอย่างเส้นใยอ้อยมีปริมาณคาร์บอนร้อยละ 48.40 ซึ่งสูงกว่าช่อดอกที่มีปริมาณคาร์บอนเพียงร้อยละ 38.50 ปริมาณคาร์บอนที่สูงกว่าบ่งชี้ว่า เส้นใยอ้อยจะให้ค่าความร้อนที่สูงกว่าช่อดอกเนื่องจากคาร์บอนเป็นธาตุหลักที่ให้พลังงานในการเผาไหม้ ค่าความร้อนมีความสำคัญอย่างยิ่งในการประเมินศักยภาพของชีวมวลสำหรับการใช้งานเป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการแปรรูปพลังงาน โดยค่าความร้อนสูง (HHV) จะแสดงถึงพลังงานความร้อนทั้งหมดที่ปลดปล่อยจากการเผาไหม้ โดยค่าความร้อนสูงของเส้นใยอ้อย (19.53 เมกะจูลต่อกิโลกรัม) มีค่าสูงกว่าช่อดอก (14.28 เมกะจูลต่อกิโลกรัม) ขณะที่ค่าความร้อนต่ำ (LHV) จะสะท้อนถึงพลังงานความร้อนที่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้จริงในทางปฏิบัติ ซึ่งค่าความร้อนต่ำของเส้นใยอ้อย (16.90 เมกะจูลต่อกิโลกรัม) มีค่าสูงกว่าช่อดอก (12.23 เมกะจูลต่อกิโลกรัม) เช่นกันดัง Figure 3 ซึ่งความแตกต่างของค่าความร้อนของชีวมวลทั้งสองส่วนนี้มีความสำคัญต่อการออกแบบและปรับปรุงประสิทธิภาพการเผาไหม้ในส่วนห้องเผาไหม้ของโรงไฟฟ้าชีวมวล

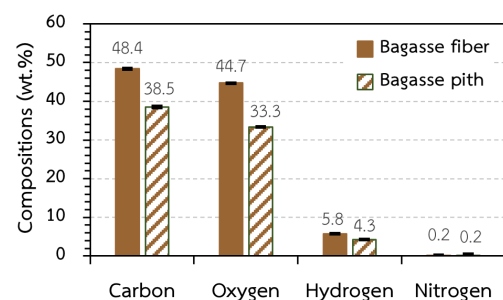


Figure 2 Ultimate analysis (%wt. of dry matter) of the bagasse fiber and pith.

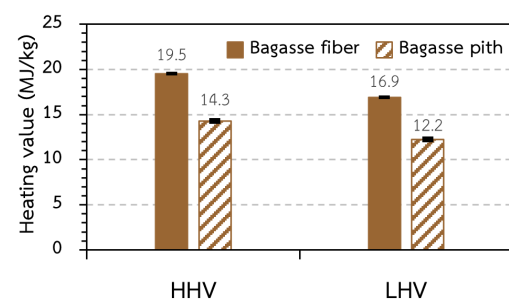


Figure 3 Higher and lower heating value of the bagasse fiber and pith.

อีกทั้งเส้นใยอ้อยมีปริมาณไฮโดรเจนร้อยละ 5.80 ซึ่งสูงกว่าในชุ่ยอ้อย (ร้อยละ 4.30) ปริมาณไฮโดรเจนที่สูงกว่าจะช่วยเพิ่มค่าความร้อนและช่วยในการติดไฟได้ดี เนื่องจากไฮโดรเจนให้ความร้อนต่อหน่วยน้ำหนักสูง ส่งผลให้เส้นใยอ้อยมีประสิทธิภาพสูงกว่าเมื่อใช้เป็นเชื้อเพลิงในกระบวนการเผาไหม้ ซึ่งคาร์บอนและไฮโดรเจนจะทำปฏิกิริยากับออกซิเจนเกิดเป็น CO_2 และ H_2O พร้อมปลดปล่อยพลังงานความร้อน ยิ่งมีองค์ประกอบเหล่านี้มากยิ่งปลดปล่อยพลังงานต่อหน่วยมวลมากขึ้น เช่นเดียวกันกับออกซิเจนในเส้นใยอ้อยมีปริมาณร้อยละ 44.70 ซึ่งสูงกว่าชุ่ยอ้อย (ร้อยละ 33.33) ออกซิเจนที่มีอยู่ในชีวมวลช่วยให้เผาไหม้ได้ดี ซึ่งอาจช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการเผาไหม้ แต่ปริมาณที่สูงเกินไปอาจลดค่าความร้อนของเชื้อเพลิง ขณะที่ปริมาณไนโตรเจนของทั้งเส้นใยอ้อยและชุ่ยอ้อยมีปริมาณต่ำคือร้อยละ 0.15 และ 0.23 ตามลำดับ ซึ่งช่วยลดปัญหามลพิษทางอากาศจาก NO_x ในกระบวนการเผาไหม้ ขณะที่ตรวจไม่พบกำมะถันจากทั้งสองตัวอย่าง ทำให้ไม่เกิดมลพิษจาก SO_x

นอกจากนี้ยังพบข้อสังเกตคือ อัตราส่วนคาร์บอนต่อออกซิเจน (C/O) ของเส้นใยอ้อยและชุ่ยอ้อยมีค่าแตกต่างกัน โดยเส้นใยอ้อยและชุ่ยอ้อยมีอัตราส่วน C/O เท่ากับ 1.07 และ 1.18 ตามลำดับ อัตราส่วน C/O บ่งบอกถึงความสำเร็จของการเผาไหม้ซึ่งมีความสำคัญในการควบคุมกระบวนการเผาไหม้เมื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิง อัตราส่วน C/O ที่เหมาะสมจะช่วยให้เกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ ค่า C/O ต่ำ บ่งชี้ว่าออกซิเจนมีปริมาณมากช่วยให้การเผาไหม้สมบูรณ์และหากค่า C/O สูงหมายถึงปริมาณออกซิเจนน้อยส่งผลให้การเผาไหม้ไม่สมบูรณ์เกิดเขม่ามากขึ้น รวมทั้งสารมลพิษอื่นๆ และแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ (Takehara *et al.*, 2005) ดังนั้นอัตราส่วน C/O ที่สูงกว่าในตัวอย่างชุ่ยอ้อยจึงอาจสื่อได้ถึงปริมาณแก๊สที่แตกต่างกันของตัวอย่างทั้งสอง นอกจากนี้ปริมาณสารอินทรีย์โดยรวม (C+H+O) ที่สูงกว่าในตัวอย่างเส้นใยอ้อย บ่งชี้ว่าอาจมีปริมาณแก๊สต่ำกว่าตัวอย่างชุ่ยอ้อย เนื่องจากสารอินทรีย์เป็นส่วนที่เผาไหม้ได้ในชีวมวล เมื่อวัสดุมีสัดส่วนของสารอินทรีย์สูงจะมีสัดส่วนของสารอนินทรีย์ต่ำ ดังนั้นเส้นใยอ้อยจึงมีแนวโน้มที่จะมีปริมาณแก๊สต่ำกว่าชุ่ยอ้อย

เมื่อพิจารณาอัตราส่วน C/H ของเส้นใยอ้อยและชุ่ยอ้อยพบว่า มีค่า 8.34 และ 8.95 ตามลำดับ ซึ่งอัตราส่วน C/H บ่งบอกถึงโครงสร้างโมเลกุลของเชื้อเพลิง เชื้อเพลิงที่มีค่า C/H สูง (เช่น ถ่านหิน) มักมีจำนวนคาร์บอนมากกว่าไฮโดรเจน ส่วนเชื้อเพลิงที่มีค่า C/H ต่ำ (เช่น ก๊าซธรรมชาติ) มักมีสัดส่วนไฮโดรเจนสูง ซึ่งค่า C/H ต่ำ บ่งชี้ว่าเกิดการเผาไหม้ที่สะอาดกว่า (Winterbone & Turan, 2015) ขณะที่เมื่อเชื้อเพลิงมีค่า

C/H สูง นั่นคือปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์และเขม่ามากกว่าเชื้อเพลิงที่มีค่า C/H ต่ำ ส่งผลต่อค่าความร้อนมักให้พลังงานต่อหน่วยมวลสูง ซึ่งเส้นใยมีอัตราส่วน C/H ต่ำกว่าชุ่ยอ้อย นั่นคือ การเผาไหม้เส้นใยอ้อยเกิดการเผาไหม้ที่สะอาดและให้พลังงานต่อหน่วยมวลสูงกว่าชุ่ยอ้อย อีกทั้งปริมาณไนโตรเจนที่ต่ำและไม่พบกำมะถันในตัวอย่างเส้นใยอ้อย บ่งชี้ว่าจะให้ประสิทธิภาพการเผาไหม้ที่ดีกว่าและเป็นผลดีต่อสิ่งแวดล้อม

2. ผลการศึกษาองค์ประกอบแบบประมาณ

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบประมาณ ของตัวอย่างชุ่ยอ้อยและเส้นใยอ้อยแสดงดัง Figure 4 พบว่าชุ่ยอ้อยและเส้นใยอ้อยมีค่าความชื้นร้อยละ 3.56 และ 5.68 ลำดับเส้นใยอ้อยมีปริมาณคาร์บอนคงตัว ร้อยละ 14.40 ซึ่งสูงกว่าชุ่ยอ้อยเล็กน้อย (ร้อยละ 11.30) ส่งผลให้ค่าความร้อนสูงมีค่ามากกว่า อีกทั้งเส้นใยอ้อยมีปริมาณสารระเหย ร้อยละ 84.70 ซึ่งสูงกว่าชุ่ยอ้อยซึ่งมีปริมาณเพียงร้อยละ 64.90 บ่งชี้ว่าเส้นใยอ้อยจะมีการลุกติดไฟและการเผาไหม้ที่รวดเร็วกว่าชุ่ยอ้อย เนื่องจากสารระเหยเป็นส่วนที่เผาไหม้ได้ง่ายในเชื้อเพลิงแข็ง การมีสารระเหยสูงจะช่วยให้อุณหภูมิจุดติดไฟ (Ignition temperature) ต่ำ จึงเกิดการจุดติดและเผาไหม้ได้ง่ายขึ้น (Sha *et al.*, 2021) อย่างไรก็ตามก็อาจต้องการการควบคุมอากาศเข้าที่ดีเพื่อป้องกันการเผาไหม้ที่รวดเร็วเกินไปและความร้อนที่สูงเฉพาะจุด สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Camargo *et al.* (2021) ที่พบว่า คาร์บอนคงตัวของชานอ้อยอยู่ในช่วงร้อยละ 6.9–18 และสารระเหยอยู่ในช่วงร้อยละ 73–89 ซึ่งการเปลี่ยนแปลงของค่าเหล่านี้ อาจเกี่ยวข้องกับพันธุ์อ้อย ตลอดจนการมีอยู่ของสิ่งเจือปน ตัวอย่างเส้นใยอ้อยมีปริมาณสารระเหยและคาร์บอนคงตัวในปริมาณที่สูงกว่าชุ่ยอ้อยจึงส่งผลให้มีพลังงานความร้อนต่อหน่วยมวลที่สูงกว่า สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบละเอียดก่อนหน้านี้คือปริมาณคาร์บอนและไฮโดรเจนในเส้นใยอ้อยมีค่าสูงกว่าชุ่ยอ้อย

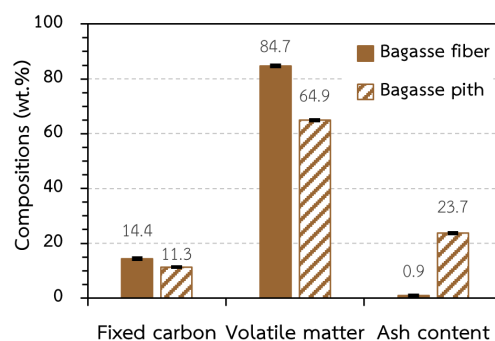


Figure 4 Proximate analysis (%wt. of dry matter) of the bagasse fiber and pith.

ความแตกต่างที่ชัดเจนคือ เส้นใยอ้อยมีปริมาณเถ้าเพียงร้อยละ 0.91 ซึ่งต่ำกว่าขุยมะพร้าวที่มีปริมาณเถ้าสูงอย่างมีนัยสำคัญถึงร้อยละ 23.70 ดังนั้นการมีปริมาณเถ้าที่สูงมากในขุยมะพร้าวจึงส่งผลให้การใช้ขุยมะพร้าวเป็นเชื้อเพลิงมีความเสี่ยงสูงที่จะเกิดปัญหา slagging และ fouling บนผนังเตาเผาและ fouling ในท่อแลกเปลี่ยนความร้อน เนื่องจากอนุภาคเถ้าลอย (Fly ash) จะเกาะติดบนพื้นผิวการถ่ายเทความร้อน (Kamara *et al.*, 2022) เถ้าปริมาณสูงจะลดค่าความร้อนของเชื้อเพลิงโดยรวมเนื่องจากเป็นส่วนที่ไม่ให้พลังงาน ในทางกลับกันอาจก่อปัญหาในการจัดการเถ้าจำนวนมากในระบบเผาไหม้ข้อเสนอแนะสำหรับการใช้งานในโรงไฟฟ้าชีวมวล คือเส้นใยอ้อยเหมาะสำหรับการใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้าชีวมวลโดยตรง หากแต่ต้องการการควบคุมอัตราส่วนอากาศต่อเชื้อเพลิงที่เหมาะสมเนื่องจากมีสารระเหยสูง ขณะที่ปริมาณเถ้าต่ำมาก ซึ่งจะช่วยลดปัญหาการจัดการเถ้าอย่างมีนัยสำคัญ ส่วนขุยมะพร้าวมีข้อจำกัดด้านปริมาณเถ้าที่สูง ซึ่งต้องการมาตรการพิเศษในการจัดการปัญหาเถ้า การเผาไหม้เชื้อเพลิงที่มีเถ้ามากเช่น ขุยมะพร้าว เหมาะกับระบบการเผาไหม้แบบตะกรับเคลื่อน (Traveling grate stoker) ที่มีการป้อนเชื้อเพลิงทางด้านบน (กระทรวงพลังงาน, 2559)

3. ผลการศึกษาการสลายตัวทางความร้อน

ผลการทดสอบการเปลี่ยนแปลงมวลของชีวมวลตัวอย่าง (Thermogravimetric analysis, TGA) โดยอาศัยสมบัติทางความร้อน และอัตราการสูญเสียมวลเทียบกับเวลา (Derivative thermogravimetric, DTG) ของตัวอย่างขุยมะพร้าว

และเส้นใยอ้อยแสดงดัง Figure 5 พบว่าทั้งสองตัวอย่างมีพฤติกรรมการสลายตัวทางความร้อนที่คล้ายคลึงกัน โดยเริ่มต้นที่มวลประมาณร้อยละ 95 และมีการสูญเสียมวลเล็กน้อยในช่วงที่ 1 ที่อุณหภูมิ 50–250 องศาเซลเซียส (ประมาณร้อยละ 5) ซึ่งเกิดจากการระเหยของความชื้นและสารระเหยเบา จากนั้นในช่วงที่ 2 จึงเกิดการสลายตัวขององค์ประกอบชีวมวลหลักในช่วงอุณหภูมิ 250–400 องศาเซลเซียส โดยมีการสูญเสียมวลอย่างรวดเร็วประมาณร้อยละ 60–70 ซึ่งสังเกตได้จากพีคหลักในกราฟ DTG ที่ประมาณ 350 องศาเซลเซียส โดยเส้นใยอ้อยมีอัตราการสลายตัวและเสถียรภาพทางความร้อนสูงกว่าขุยมะพร้าวเล็กน้อย (เริ่มสลายตัวที่อุณหภูมิสูงกว่า) แสดงถึงการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลสและเซลลูโลส หลังจากนั้นในช่วงที่ 3 อุณหภูมิ 400–850 องศาเซลเซียส ซึ่งในช่วงนี้จะเกิดการสลายตัวของลิกนิน การสลายตัวเกิดขึ้นอย่างช้าๆ เถ้าที่เหลือที่ 850 องศาเซลเซียส มีปริมาณใกล้เคียงกันจนกระทั่งน้ำหนักคงที่ที่ประมาณร้อยละ 15 โดยตัวอย่างขุยมะพร้าวมีอัตราการสลายตัวที่ช้ากว่าและมีปริมาณเถ้าที่สูงกว่าเล็กน้อย ในทั้งสองตัวอย่างพบพีครองในกราฟ DTG ช่วง 300–400 องศาเซลเซียส บ่งชี้ถึงลักษณะการสลายตัวแบบหลายขั้นตอน ซึ่งเกิดจากวัสดุองค์ประกอบที่ซับซ้อนเนื่องจากขุยมะพร้าวเป็นพอลิเมอร์ชนิดหนึ่งที่มี 3 องค์ประกอบหลัก คือเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนิน ซึ่งการสลายตัวของเฮมิเซลลูโลส เซลลูโลส และลิกนิน ส่วนใหญ่สลายตัวในช่วงอุณหภูมิ 220–315, 315–400 และ 160–900 องศาเซลเซียส ตามลำดับ (Yang *et al.*, 2007)

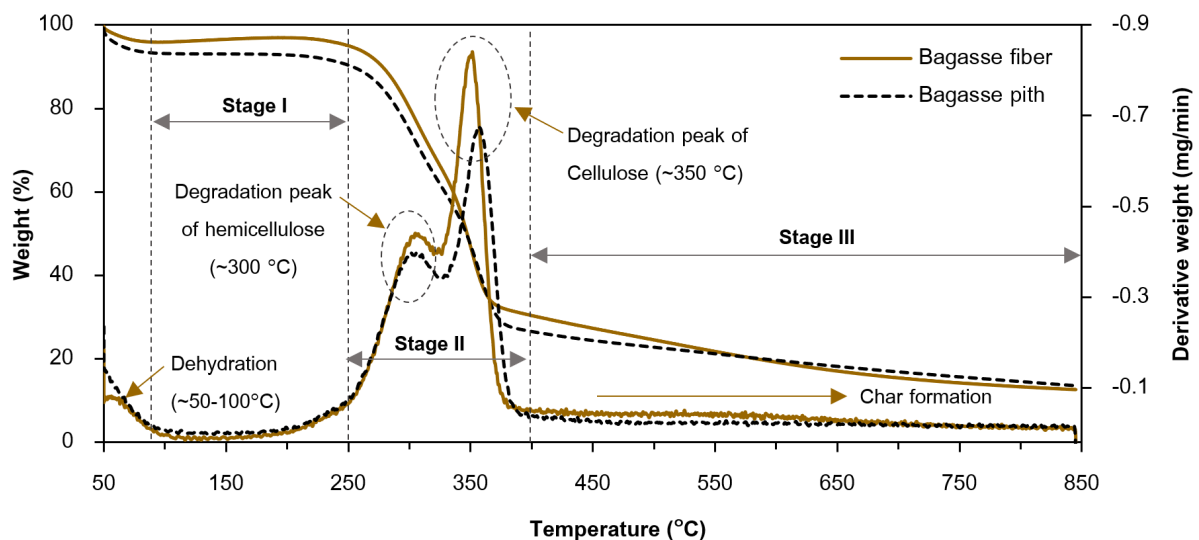


Figure 5 TGA and DTG curves for sugarcane bagasse pith and fiber.

4. ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบธาตุ

ผลการทดสอบองค์ประกอบธาตุ ได้แก่ ซิลิคอน (Si) โพแทสเซียม (K) แคลเซียม (Ca) แมกนีเซียม (Mg) เหล็ก (Fe) ฟอสฟอรัส (P) อลูมิเนียม (Al) คลอรีน (Cl) และแมงกานีส (Mn) ของตัวอย่างชุ่ยอ้อยและเส้นใยอ้อย แสดงดัง Figure 6 พบว่าตัวอย่างชุ่ยอ้อยมีสารอนินทรีย์สูงกว่าตัวอย่างเส้นใยอ้อยอย่างมีนัยสำคัญในเกือบทุกองค์ประกอบ โดยเฉพาะซิลิคอนที่มีปริมาณสูงถึงร้อยละ 21.15 ซึ่งมากกว่าเส้นใยอ้อยถึง 19 เท่า มีปริมาณเหล็ก (ร้อยละ 1.63) สูงกว่าในเส้นใยอ้อยถึง 15 เท่า มีปริมาณอลูมิเนียม (ร้อยละ 0.48) สูงกว่าในเส้นใยอ้อยประมาณ 12 เท่า รวมทั้งมีปริมาณโพแทสเซียมและแคลเซียม (ร้อยละ 0.52 และ 0.42 ตามลำดับ) ที่สูงกว่าเส้นใยอ้อยซึ่งมีปริมาณเพียงร้อยละ 0.32 และ 0.16 ตามลำดับ นอกจากนี้ ธาตุอื่นๆ เช่น แมกนีเซียม ฟอสฟอรัส คลอรีน และแมงกานีส ต่างมีแนวโน้มที่มีปริมาณสูงกว่าในเส้นใยอ้อยเช่นกัน สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Megawati *et al.* (2018) ที่พบว่าองค์ประกอบธาตุหลักของชานอ้อยคือ Si Fe Ca และ K โดยมีสัดส่วนร้อยละ 40.2 24.8 15.7 และ 9.4 ตามลำดับ ธาตุเหล่านี้พบได้ในชีวมวลประเภทต่างๆ เช่น ฟางข้าว ไม้ หญ้า และเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร โดยมีความสำคัญในด้านผลกระทบต่อกระบวนการเผาไหม้ มีผลต่อการเกิดตะกรันและการสะสมของเถ้าในเตาเผา มีผลต่อค่าความร้อนและสมบัติของเชื้อเพลิงชีวมวล และระหว่างการเผาไหม้อาจกลายเป็นสารประกอบที่ก่อให้เกิดมลพิษทางอากาศ เมื่อนำชีวมวลไปใช้เป็นเชื้อเพลิงหรือในกระบวนการแปรรูปอื่นๆ การควบคุมปริมาณโลหะอัลคาไลและอัลคาไลน์เอิร์ทจึงเป็นสิ่งสำคัญเพื่อป้องกันปัญหาที่อาจเกิดขึ้นกับอุปกรณ์

เมื่อพิจารณาผลกระทบต่อการใช้ slagging ซึ่งเป็นปรากฏการณ์การหลอมของเถ้าและเกาะติดบนพื้นผิวในบริเวณเตาเผาที่มีอุณหภูมิสูงพบว่า ค่าดัชนี AI ของเส้นใยอ้อยและชุ่ยอ้อยมีค่าเป็น 0.46 และ 0.15 ตามลำดับ ซึ่งค่าที่ต่ำกว่าเกณฑ์ (0.17) หมายถึง มีความเป็นไปได้น้อยมากที่จะเกิดการเกาะตัวของเถ้าหรือการเกิดตะกรัน ขณะที่หากมีค่าสูงกว่าเกณฑ์ (0.34) หมายถึงมีความเป็นไปได้สูงมากที่จะเกิดการเกาะตัวของเถ้า ดังนั้นหากพิจารณาตามค่าดัชนี AI จะพบว่าเส้นใยอ้อยมีแนวโน้มที่จะเกิดปัญหา slagging สูงกว่าชุ่ยอ้อย แต่เมื่อพิจารณาปริมาณสารอนินทรีย์สำคัญที่ส่งผลต่อการเกิดตะกรันหลายชนิดพบว่า ชุ่ยอ้อยมีปริมาณปัจจัยเหล่านั้นในปริมาณที่สูงกว่าเส้นใยอ้อย โดยเฉพาะโพแทสเซียม (ร้อยละ 0.52) ซึ่งเป็นธาตุที่มีจุดหลอมเหลวต่ำและสามารถทำหน้าที่

เป็นฟลักซ์ (Flux) ที่ทำให้เกิดการหลอมเหลวของเถ้าที่อุณหภูมิต่ำลง (Hrbek *et al.*, 2021) นอกจากนี้ชุ่ยอ้อยยังมีปริมาณเหล็ก (ร้อยละ 1.63) สูงกว่าเส้นใยอ้อยถึง 15 เท่า ซึ่งสามารถก่อตัวเป็นออกไซด์ที่มีจุดหลอมเหลวต่ำและส่งผลต่อการเกิดเฟสที่หลอมเหลวได้ง่ายของเถ้า (Wang *et al.*, 2021) รวมทั้งชุ่ยอ้อยมีปริมาณอลูมิเนียมที่สูงกว่าเส้นใยอ้อยถึง 12 เท่า (ร้อยละ 0.48 เทียบกับร้อยละ 0.04) ซึ่งอลูมิเนียมสามารถทำปฏิกิริยากับซิลิคอนเกิดเป็นอลูมิโนซิลิเกต (Aluminosilicate) ที่มีโครงสร้างอสัณฐาน (Amorphous) และมีจุดหลอมเหลวต่ำ (Tian *et al.*, 2017) เมื่อพิจารณาอัตราส่วนของซิลิคอนต่อผลรวมของโพแทสเซียมและแคลเซียมพบว่า ชุ่ยอ้อยยังคงมีปริมาณโพแทสเซียมและแคลเซียมสูงเพียงพอที่จะก่อให้เกิดสารประกอบที่มีจุดหลอมเหลวต่ำและนำไปสู่การเกิด slagging ได้ อย่างไรก็ตาม มีปัจจัยหนึ่งที่อาจช่วยลดความรุนแรงของปัญหาได้บางส่วนคือ ชุ่ยอ้อยมีปริมาณซิลิคอนที่สูงมากถึงร้อยละ 21.15 ซึ่งส่งผลให้เถ้าเกิดการหลอมเหลวที่อุณหภูมิสูงขึ้น (Suryana *et al.*, 2018) เนื่องจากซิลิคอนไดออกไซด์มีจุดหลอมเหลวสูงประมาณ 1,600 องศาเซลเซียส ขึ้นไป (Norsuraya *et al.*, 2017)

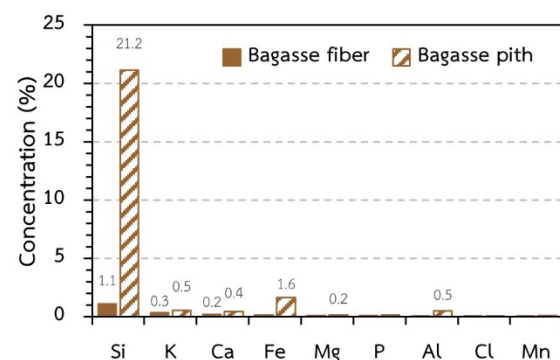


Figure 6 The amount of Si, K, Ca, Fe, Mg, P, Al, Cl and Mn in bagasse fiber and pith.

เมื่อพิจารณาถึงผลกระทบต่อการใช้ fouling ซึ่งเกี่ยวข้องกับการสะสมตัวของอนุภาคเถ้าบนพื้นผิวแลกเปลี่ยนความร้อนในบริเวณที่มีอุณหภูมิต่ำกว่า พบว่า หากใช้ชุ่ยอ้อยเป็นเชื้อเพลิงมีแนวโน้มที่จะเกิดปัญหา fouling สูงกว่าเส้นใยอ้อยอย่างมีนัยสำคัญด้วยปัจจัยหลายประการ โดยเฉพาะปริมาณโลหะอัลคาไลและอัลคาไลน์เอิร์ทสูง (เช่น K, Na, Ca, Mg) เนื่องจากธาตุเหล่านี้ส่งผลต่อการหลอมเหลวของเถ้าที่อุณหภูมิต่ำ ปริมาณโพแทสเซียมในชุ่ยอ้อย (ร้อยละ 0.52) มีค่าสูงกว่าในเส้นใยอ้อย (ร้อยละ 0.32) ซึ่งโพแทสเซียมสามารถหลอมเหลวในช่วงอุณหภูมิ 870–1,150 องศาเซลเซียส (Xiao *et al.*, 2024) และความหนาแน่นบนพื้นผิวที่เย็นกว่า ก่อให้เกิดการสะสม

ของเกลือที่นำไปสู่การเกิด fouling นอกจากนี้ แม้ว่าชีวมวลทั้งสองส่วนจะมีปริมาณคลอรีนที่ต่ำมาก แต่ขุยมั้ยังคงมีปริมาณคลอรีนที่สูงกว่าเส้นใย้อยเล็กน้อย (ร้อยละ 0.029 เทียบกับร้อยละ 0.021) ซึ่งสามารถทำปฏิกิริยากับโพแทสเซียมเกิดเป็นโพแทสเซียมคลอไรด์ (KCl) ที่มีจุดหลอมเหลวต่ำและระเหยง่าย เป็นสาเหตุสำคัญของการเกิด fouling อีกทั้งขุยมั้ยังมีปริมาณฟอสฟอรัสที่สูงกว่าเส้นใย้อย (ร้อยละ 0.12 เทียบกับร้อยละ 0.06) จึงสามารถก่อตัวเป็นฟอสเฟตที่มีจุดหลอมเหลวต่ำร่วมกับโพแทสเซียมและแคลเซียม

5. ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของเถ้า

ผลการทดสอบองค์ประกอบทางเคมีของเถ้าจากตัวอย่างขุยมั้ยและเส้นใย้อยแสดงดัง Figure 7 พบว่า เถ้าจากขุยมั้ยมีปริมาณซิลิกา (SiO_2) สูงถึงร้อยละ 89.89 ซึ่งมากกว่าเถ้าจากเส้นใย้อยที่มีเพียงร้อยละ 71.07 อย่างมีนัยสำคัญ แต่เมื่อพิจารณาโลหะอัลคาไล (Alkali) ในชีวมวล ซึ่งประกอบด้วย โซเดียม (Na) โพแทสเซียม (K) และโลหะอัลคาไลน์เอิร์ท (Alkaline earth) ที่ประกอบด้วย แมกนีเซียม (Mg) และ แคลเซียม (Ca) พบว่า เถ้าจากเส้นใย้อยมีองค์ประกอบของโลหะอัลคาไลและอัลคาไลน์เอิร์ทในปริมาณสูง โดยเฉพาะโพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O) มีปริมาณร้อยละ 8.54 ซึ่งสูงกว่ามากเมื่อเทียบกับเถ้าจากขุยมั้ยที่มีเพียงร้อยละ 2.05 นอกจากนี้เถ้าจากเส้นใย้อยยังมีปริมาณ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และแมกนีเซียมออกไซด์ (MgO) สูงกว่าเถ้าจากขุยมั้ยเช่นกัน โดยเถ้าจากเส้นใย้อยมีปริมาณ CaO และ MgO ร้อยละ 5.047 และ 3.39 ขณะที่เถ้าจากขุยมั้ยมีปริมาณ CaO และ MgO ร้อยละ 1.48 และ 0.88 ตามลำดับ

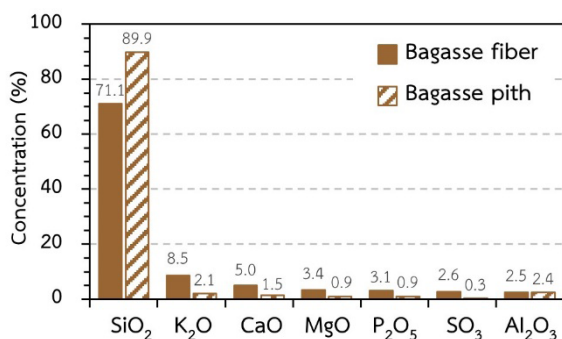


Figure 7 The main oxide content in ash of the bagasse fiber and pith.

นอกจากนี้ เส้นใย้อยยังมีปริมาณซัลเฟอร์ออกไซด์ (SO_3) สูงกว่าถึง 12.5 เท่า (ร้อยละ 2.59 เทียบกับร้อยละ 0.27) และมีปริมาณฟอสฟอรัสออกไซด์ (P_2O_5) สูงกว่าประมาณ 3.4

เท่า (ร้อยละ 3.13 เทียบกับร้อยละ 0.91) โดยมีเพียงปริมาณอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3) เท่านั้น ที่มีค่าใกล้เคียงกันในตัวอย่างชีวมวลทั้งสองชนิด (ประมาณร้อยละ 2.42–2.47) ซึ่งความแตกต่างเหล่านี้มีนัยสำคัญอย่างยิ่งต่อพฤติกรรมการเกิด slagging และ fouling เมื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงชีวมวลเนื่องจากสารประกอบของแร่ธาตุอนินทรีย์ที่เป็นองค์ประกอบในเถ้าและสะสมเป็นตะกอนที่ผนังเตาของหม้อไอน้ำได้แก่ SiO_2 , TiO_2 , Al_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , P_2O_5 , Mn_3O_4 , SO_3 , Fe_2O_3 (Kamara *et al.*, 2022)

เมื่อพิจารณาผลกระทบต่อการเกิด slagging ซึ่งเป็นปรากฏการณ์การก่อตัวของตะกอนหลอมเหลวบนพื้นผิวถ่ายเทความร้อนในบริเวณเตาเผา พบว่าเส้นใย้อยมีโอกาสนในการเกิดปัญหานี้สูงกว่าขุยมั้ยอย่างมีนัยสำคัญ เนื่องจากเส้นใย้อยมีองค์ประกอบของโลหะอัลคาไลโดยเฉพาะ K_2O ในปริมาณสูงซึ่งมากเป็นอันดับสองรองจาก SiO_2 อีกทั้ง K_2O มีคุณสมบัติในการลดอุณหภูมิหลอมเหลวของเถ้า ดังจะเห็นจากลำดับความสำคัญของออกไซด์ของธาตุที่ส่งผลให้จุดหลอมเหลวของเถ้ามีค่าสูงขึ้นคือ $\text{Al}_2\text{O}_3 > \text{MgO} > \text{CaO} > \text{P}_2\text{O}_5 > \text{Na}_2\text{O} > \text{K}_2\text{O}$ (Du *et al.*, 2014) ซึ่ง K_2O อยู่ลำดับท้ายบ่งบอกถึงความสำคัญน้อยที่สุดในการเพิ่มจุดหลอมเหลวของเถ้าเมื่อเทียบกับออกไซด์อื่นๆ ประกอบกับเส้นใย้อยมีปริมาณ P_2O_5 สูงกว่าขุยมั้ย ดังนั้นจึงมีแนวโน้มที่จะเกิดการหลอมเหลวของเถ้าที่อุณหภูมิต่ำกว่า (Horák *et al.*, 2019) ในทางตรงกันข้ามตัวอย่างขุยมั้ยมีโอกาสนในการเกิด slagging ต่ำกว่าเส้นใย้อยอย่างเห็นได้ชัดเนื่องจากมีปริมาณ SiO_2 สูงกว่าเส้นใย้อย ซึ่ง SiO_2 มีอุณหภูมิอ่อนตัวในช่วง 1,675–1,800 องศาเซลเซียส อีกทั้งอุณหภูมิการหลอมเหลวในช่วง 1,790–1,900 องศาเซลเซียส (Ringdalen & Tangstad, 2016) ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการเผาไหม้ในห้องเผาไหม้

6. ผลการศึกษาพฤติกรรมการหลอมของเถ้า

ผลการทดสอบการหลอมเหลวของเถ้า (Ash melting) จากตัวอย่างขุยมั้ยและเส้นใย้อยแสดงดัง Figure 8 พบว่า เถ้าจากเส้นใย้อยเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่อุณหภูมิ (Initial deformation temperature, IDT) 1,140 องศาเซลเซียส และเกิดการหลอมตัวจนแผ่ราบที่อุณหภูมิหลอมเหลว (Fluid Temperature, FT) 1,508 องศาเซลเซียส ในช่วงอุณหภูมินี้ เถ้าจากเส้นใย้อยมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างเห็นได้ชัดแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงจากรูปทรงแหลมสูงเป็นแบนราบ นั่นคือ เกิดการหลอมเหลวของเถ้า ขณะที่เถ้าจากขุยมั้ยเริ่มมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างที่อุณหภูมิ IDT 1,113 องศาเซลเซียส ซึ่งต่ำกว่าเถ้าจากเส้นใย้อยเล็กน้อย และเมื่อ

ถึงอุณหภูมิ FT คือ 1,498 องศาเซลเซียส ซึ่งใกล้เคียงกับตัวอย่างได้จากเส้นใยอ้อยพบว่า ถ้าจากชุ่ยอ้อยไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างในช่วงอุณหภูมิดังกล่าว สอดคล้องกับองค์ประกอบในชุ่ยอ้อยซึ่งออกไซด์ที่มีสัดส่วนสูงที่สุดคือ SiO_2 (ร้อยละ 89.89) ซึ่ง SiO_2 มีอุณหภูมิอ่อนตัวในช่วง 1,675–1,800 องศาเซลเซียสและอุณหภูมิการหลอมเหลวในช่วง 1,790–1,900 องศาเซลเซียส (Ringdalen & Tangstad, 2016) ซึ่งสูงกว่าอุณหภูมิที่ใช้ในการทดสอบการหลอมของถั่ว คือ 1,500 องศาเซลเซียส ดังนั้นชุ่ยอ้อยจึงไม่เกิดการอ่อนตัวหรือหลอมเหลวในช่วงของการทดสอบ สรุปได้ว่าถั่วจากเส้นใยอ้อยมีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อได้รับความร้อนสูงถึงอุณหภูมิหลอมเหลว (1,508 องศาเซลเซียส) แสดงถึงการมีองค์ประกอบที่หลอมเหลวได้ ส่วนถั่วจากชุ่ยอ้อยไม่มีการเปลี่ยนแปลงรูปร่างแม้ที่อุณหภูมิหลอมเหลว (1498 องศาเซลเซียส) บ่งชี้ถึงความทนทานต่อความร้อนสูงและมีแนวโน้มที่จะไม่เกิดปัญหาการเกาะติดหรือการสร้างตะกรันในระบบเผาไหม้

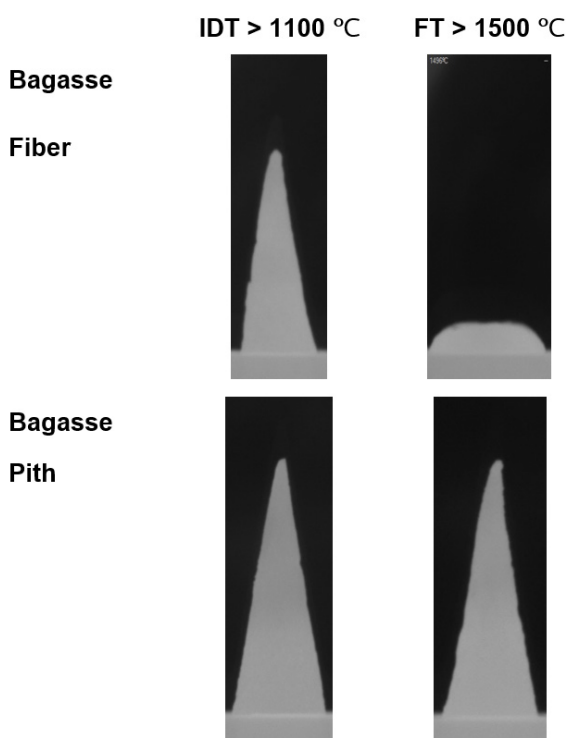


Figure 8 Photos taken during ash fusion test for bagasse fiber and pith ash.

ผลกระทบและข้อเสนอแนะสำหรับการประยุกต์ใช้โรงไฟฟ้าชีวมวล

จากการเปรียบเทียบสมบัติทางกายภาพและเคมีของเส้นใยอ้อยและชุ่ยอ้อยพบว่า เส้นใยอ้อยมีความเหมาะสมใน

การใช้เป็นเชื้อเพลิงหลักในโรงไฟฟ้าชีวมวลมากกว่าชุ่ยอ้อยอย่างชัดเจน โดยเส้นใยอ้อยให้ค่าความร้อนสูงกว่าชุ่ยอ้อยถึงร้อยละ 37 (19.5 เทียบกับ 14.3 เมกะจูลต่อกิโลกรัม) ซึ่งสามารถเปลี่ยนเป็นพลังงาน ได้มากขึ้นจากปริมาณเชื้อเพลิงเท่าเดิม นอกจากนี้เส้นใยอ้อยยังมีปริมาณเถ้าต่ำมาก (ร้อยละ 1 ของเส้นใยอ้อยเทียบกับ ร้อยละ 23 ของชุ่ยอ้อย) ซึ่งลดปัญหาการสะสมเถ้าในระบบเผาไหม้และลดความถี่ในการทำความสะอาดและบำรุงรักษาอุปกรณ์ ขณะที่ปริมาณสารระเหยของเส้นใยอ้อยมีค่าสูง (ร้อยละ 84 ของเส้นใยอ้อยเทียบกับ ร้อยละ 65 ของชุ่ยอ้อย) ทำให้การติดไฟและการเผาไหม้เกิดขึ้นได้ง่ายและสมบูรณ์มากขึ้น

ในส่วน of ชุ่ยอ้อยแนะนำให้นำไปใช้ประโยชน์ในอุตสาหกรรมอื่นมากกว่าการใช้เป็นเชื้อเพลิงในโรงไฟฟ้าชีวมวล เนื่องจากชุ่ยอ้อยให้ค่าความร้อนเพียง 14.3 เมกะจูลต่อกิโลกรัม ซึ่งต่ำกว่าเส้นใยอ้อยถึงร้อยละ 28 และมีปริมาณเถ้าสูง ทางเลือกที่ช่วยเพิ่มมูลค่าให้กับชุ่ยอ้อย คือการนำไปใช้ในอุตสาหกรรมกระดาษและบรรจุภัณฑ์ เนื่องจากมีเส้นใยสั้นที่เหมาะสมสำหรับผลิตกระดาษคุณภาพดี และปริมาณซิลิกาสูงช่วยเพิ่มความแข็งแรงของกระดาษ นอกจากนี้ยังสามารถนำไปใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตวัสดุก่อสร้าง เช่น แผ่นอัดหรือบอร์ดเส้นใย หรือใช้ในภาคเกษตรเป็นวัสดุปรับปรุงดินและวัสดุคลุมดิน

การแยกใช้ประโยชน์ตามความเหมาะสมโดยใช้เส้นใยอ้อยเป็นเชื้อเพลิงหลักในโรงไฟฟ้าและขายชุ่ยอ้อยให้อุตสาหกรรมกระดาษหรืออุตสาหกรรมอื่นจะให้ผลตอบแทนทางเศรษฐศาสตร์สูงขึ้น เนื่องจากโรงงานจะได้รับรายได้เพิ่มขึ้นจากการขายชุ่ยอ้อยที่มีมูลค่าเพิ่มสูงกว่าการใช้เป็นเชื้อเพลิง ขณะเดียวกันยังช่วยลดต้นทุนการบำรุงรักษาโรงไฟฟ้า เนื่องจากไม่ต้องจัดการกับปัญหาเถ้าจากชุ่ยอ้อย แนวทางนี้ยังสนับสนุนแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียนในอุตสาหกรรมน้ำตาล โดยการใช้ประโยชน์จากผลพลอยได้ทุกส่วนอย่างมีประสิทธิภาพสูงสุด และช่วยสร้างความยั่งยืนทางสิ่งแวดล้อมผ่านการลดของเสียและเพิ่มมูลค่าของวัตถุดิบที่มีอยู่ในท้องถิ่น อย่างไรก็ตามยังต้องศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องของต้นทุนที่เพิ่มขึ้นจากขั้นตอนการแยกชุ่ยอ้อย

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติทางด้านเชื้อเพลิงของชีวมวลชุ่ยอ้อยและเส้นใยอ้อย ตลอดจนอุณหภูมิการหลอมของถั่ว และองค์ประกอบทางเคมีของถั่วพบว่า เส้นใยอ้อยมีองค์ประกอบและสมบัติด้านเชื้อเพลิงดีกว่าชุ่ยอ้อยในแง่ของ ปริมาณคาร์บอนคงตัว สารระเหย คาร์บอน

ไฮโดรเจน และค่าความร้อน ขณะที่เส้นใยอ้อยมีปริมาณเถ้าเพียงร้อยละ 0.91 ซึ่งต่ำกว่าขุยมะพร้าวอย่างมีนัยสำคัญ โดยขุยมะพร้าวมีปริมาณเถ้าสูงถึงร้อยละ 23.70 เถ้าของขุยมะพร้าวมีองค์ประกอบมากที่สุดคือ SiO_2 (ร้อยละ 89.89) และสูงกว่าในเส้นใยอ้อย ทำให้เถ้าจากขุยมะพร้าวไม่เกิดการหลอมที่อุณหภูมิทดสอบ 1,500 องศาเซลเซียส ขณะที่เส้นใยอ้อยเกิดเถ้าหลอมที่อุณหภูมิต่ำกว่าขุยมะพร้าว (เถ้าเริ่มอ่อนตัวตั้งแต่ 1,100 องศาเซลเซียส) แต่ไม่ได้ส่งผลต่อการเกิด Slagging และ fouling การวิจัยในอนาคตควรศึกษาการแยกขุยมะพร้าวจากขานอ้อยเพื่อนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์ในด้านอื่น ซึ่งจะช่วยลดปัญหาปริมาณเถ้าที่สูงมากจากส่วนที่เป็นขุยมะพร้าวเมื่อนำขานอ้อยไปใช้งานเป็นเชื้อเพลิงเผาไหม้

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) จัดสรรงบประมาณผ่านกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ.2568 มหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม [เลขที่สัญญา: FF-RMU_043/2025] และบริษัท น้ำตาล วังขนาย จำกัด (มหาสารคาม) ที่สนับสนุนวัตถุดิบในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

กองบริหารสื่อองค์กร. (2566). *กำลังผลิตตามสัญญาของระบบ. การไฟฟ้าฝ่ายผลิตแห่งประเทศไทย.*

Camargo, J. M. de O., Ríos, J. M. G., Antonio, G. C., & Leite, J. T. C. (2021). Physicochemical properties of sugarcane industry residues aiming at their use in energy processes. In *Sugarcane—Biotechnology for biofuels*. IntechOpen.

Chambon, C. L., Mkhize, T. Y., Reddy, P., Brandt-Talbot, A., Deenadayalu, N., Fennell, P. S., & Hallett, J. P. (2018). Pretreatment of South African sugarcane bagasse using a low-cost protic ionic liquid: A comparison of whole, depithed, fibrous and pith bagasse fractions. *Biotechnology for Biofuels*, 11(1), 1–16.

Cheng, B.-H., Huang, B.-C., Zhang, R., Chen, Y.-L., Jiang, S.-F., Lu, Y., Zhang, X.-S., Jiang, H., & Yu, H.-Q. (2020). Bio-coal: A renewable and massively producible fuel from lignocellulosic biomass. *Science Advances*, 6(1), 1–8.

Demirbas, A. (2001). Relationships between lignin contents and heating values of biomass. *Energy Conversion and Management*, 42(2), 183–188.

Demirbas, A. (2002). Relationships between heating value and lignin, moisture, ash and extractive contents of biomass fuels. *Energy Exploration & Exploitation*, 20(1), 105–111.

Du, S., Yang, H., Qian, K., Wang, X., & Chen, H. (2014). Fusion and transformation properties of the inorganic components in biomass ash. *Fuel*, 117, 1281–1287.

Elbersen, W., Lammens, T. M., Alakangas, E. A., Annevelink, B., Harmsen, P., & Elbersen, B. (2017). Lignocellulosic biomass quality: Matching characteristics with biomass conversion requirements. In C. Panoutsou (Ed.), *Modeling and optimization of biomass supply chains* (pp. 55–78). Academic Press.

Fang, X., & Jia, L. (2012). Experimental study on ash fusion characteristics of biomass. *Bioresource Technology*, 104, 769–774.

Garcia-Maraver, A., Mata-Sanchez, J., Carpio, M., & Perez-Jimenez, J. A. (2017). Critical review of predictive coefficients for biomass ash deposition tendency. *Journal of the Energy Institute*, 90(2), 214–228.

Horák, J., Kuboňová, L., Dej, M., Laciok, V., Tomšejová, Š., Hopan, F., Krpec, K., & Koloničný, J. (2019). Effects of the type of biomass and ashing temperature on the properties of solid fuel ashes. *Polish Journal of Chemical Technology*, 21(2), 43–51.

Hrbek, J., Oberndorfer, C., Zanzinger, P., & Pfeifer, C. (2021). Influence of $\text{Ca}(\text{OH})_2$ on ash melting behaviour of woody biomass. *Carbon Resources Conversion*, 4, 84–88.

Kamara, B., Kallon, D. V. V., & Mashinini, P. M. (2022). Fouling and slagging investigation on ash derived from Sasol coal using ICP and XRF analytical techniques. *Applied Sciences*, 12(22), 1–11.

Lois-Correa, J. A. (2012). Depithers for efficient preparation of sugar cane bagasse fibers in pulp and paper industry. *Ingeniería, Investigación y Tecnología*, 13(4), 417–424.

- Megawati, Fardhyanti, D. S., Putri, R. D. A., Fianti, O., Simalango, A. F., & Akhir, A. E. (2018). Synthesis of silica powder from sugar cane bagasse ash and its application as adsorbent in adsorptive-distillation of ethanol-water solution. *MATEC Web of Conferences*, 237, 1–6.
- Nayak, D. K., Abhilash, P. P., Singh, R., Kumar, R., & Kumar, V. (2022). Fly ash for sustainable construction: A review of fly ash concrete and its beneficial use case studies. *Cleaner Materials*, 6, 1–35.
- Norsuraya, S., Norhasyimi, R., & Fazlena, H. (2017). Characterization of sodium silicate derived from sugarcane bagasse ash. *Malaysian Journal of Analytical Science*, 21(2), 512–517.
- Ozyuguran, A., Akturk, A., & Yaman, S. (2018). Optimal use of condensed parameters of ultimate analysis to predict the calorific value of biomass. *Fuel*, 214, 640–646.
- Palma, K. R. de, Tomaz, E., Soria-Verdugo, A., & Silva, M. A. (2021). The influence of the elemental and structural chemical composition on the ash fusibility of sugarcane bagasse and sugarcane straw. *Fuel*, 304, 1–14.
- Ringdalen, E., & Tangstad, M. (2016). Softening and melting of SiO₂, an important parameter for reactions with quartz in Si production. In R. G. Reddy, P. Chaubal, P. C. Pistorius, & U. Pal (Eds.), *Advances in molten slags, fluxes, and salts: Proceedings of the 10th International Conference on Molten Slags, Fluxes and Salts 2016* (pp. 43–51). Springer.
- Rozhina, E., Ishmukhametov, I., Nigamatzyanova, L., Akhatova, F., Batasheva, S., Taskaev, S., Montes, C., Lvov, Y., & Fakhrullin, R. (2021). Comparative toxicity of fly ash: An in vitro study. *Molecules*, 26(7), 1926.
- Sha, D., Li, Y., Zhou, X., Zhang, J., Zhang, H., & Yu, J. (2021). Influence of volatile content on the explosion characteristics of coal dust. *ACS Omega*, 6(41), 27150–27157.
- Suryana, R., Iriani, Y., Nurosyid, F., & Fasquella, D. (2018). Characteristics of silica rice husk ash from Mojogedang Karanganyar Indonesia. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 367(1), 012008.
- Suttibak, S. (2017). Influence of reaction temperature on yields of bio-oil from fast pyrolysis of sugarcane residues. *Engineering and Applied Science Research*, 44(3), 142–147.
- Takehara, H., Fujiwara, M., Arikawa, M., Diener, M. D., & Alford, J. M. (2005). Experimental study of industrial scale fullerene production by combustion synthesis. *Carbon*, 43(2), 311–319.
- Tian, S., Kang, Z., Chen, L., Fang, Y., Zhuo, Y., & Xu, H. (2017). Characterization of aluminosilicates in fly ashes with different melting points using 27Al magic-angle spinning nuclear magnetic resonance. *Energy & Fuels*, 31(9), 10068–10074.
- Wang, H., Cheng, L., Pu, J., & Zhao, J. (2021). Melting characteristics of coal ash and properties of fly ash to understand the slag formation in the shell gasifier. *ACS Omega*, 6(24), 16066–16075.
- Winterbone, D. E., & Turan, A. (2015). Effect of dissociation on combustion parameters. In D. E. Winterbone & A. Turan (Eds.), *Advanced thermodynamics for engineers* (2nd ed., pp. 295–305). Butterworth-Heinemann.
- Xiao, H., Shi, H., Li, X., Jiang, Y., & Li, J. (2024). Effect of potassium-containing sulfates on high-temperature mineral transformation and coal ash fusibility. *Energy Sources, Part A: Recovery, Utilization, and Environmental Effects*, 46(1), 12496–12511.
- Yang, H., Yan, R., Chen, H., Lee, D. H., & Zheng, C. (2007). Characteristics of hemicellulose, cellulose and lignin pyrolysis. *Fuel*, 86(12), 1781–1788.
- Yunaidi, Surahmanto, F., & Harnowo, S. (2020). The risk analysis of rice husk of co-firing fuel for boilers in sugar mills. *Journal of Physics: Conference Series*, 1446(1), 1–8.
- Zhang, Y., Li, Q., & Zhou, H. (2016). Effects of ash deposition and slagging on heat transfer. In Y. Zhang, Q. Li, & H. Zhou (Eds.), *Theory and calculation of heat transfer in furnaces* (pp. 173–191). Academic Press.

การพัฒนาเตาเผาถ่านมลพิษต่ำขนาด 200 ลิตร เพื่อผลิตถ่านชีวภาพและน้ำส้ม ควันไม้จากไม้ไผ่ : การเปรียบเทียบกับเตาเผาถ่านแบบดั้งเดิมสำหรับใช้ในชุมชน

Development of a low-emission 200-liter charcoal kiln for producing biochar and wood vinegar from bamboo: A comparison with traditional charcoal kilns for community use

ศรีกุลณัฐ นิลโนรี และศศิธร สรรพอคำ ^{2*}

Srikunath Nilnorie ¹ and Sasithorn Sunphorka ^{2*}

Received: 3 April 2025 ; Revised: 3 July 2025 ; Accepted: 22 July 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เกี่ยวกับการพัฒนาเตาเผาถ่านชีวภาพและผลิตน้ำส้มควันไม้ขนาด 200 ลิตร เพื่อใช้สำหรับการผลิตระดับครัวเรือน มีการเพิ่มประสิทธิภาพโดยการปรับปรุงชุดควบแน่นน้ำส้มควันไม้ให้สามารถนำแก๊สที่ปลดปล่อยจากกระบวนการไพโรไลซิสกลับมาใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วม รวมถึงเปรียบเทียบผลการทดสอบเตาเผาที่พัฒนาขึ้นกับเตาเผาแบบดั้งเดิมที่มีการใช้ในชุมชนเป้าหมาย รวมถึงสมบัติของถ่านชีวภาพและน้ำส้มควันไม้ที่ผลิตจากไม้ไผ่ด้วยเตาเผาถ่านทั้งสองประเภท จากการใช้งานพบว่าเตาเผาที่พัฒนาขึ้นนั้น สามารถผลิตถ่านชีวภาพที่มีค่าความร้อนเท่ากับ 29.06 เมกะจูลส์ต่อกิโลกรัม ซึ่งมากกว่าค่าความของถ่านชีวภาพจากเตาเผาแบบดั้งเดิม คือ 26.78 เมกะจูลส์ต่อกิโลกรัม เมื่อวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค FTIR พบว่าถ่านชีวภาพจากเตาเผาที่พัฒนาขึ้นปรากฏพีคของหมู่ -OH และหมู่ C-H ของอะโรมาติก แต่ไม่ปรากฏที่ถ่านชีวภาพจากเตาเผาถ่านแบบดั้งเดิม การวิเคราะห์พื้นที่ผิว ปริมาตรรูพรุน และภาพ SEM แสดงให้เห็นว่าถ่านชีวภาพจากเตาเผาแบบดั้งเดิมมีพื้นที่ผิวสูงกว่า แต่รูพรุนบางส่วนมีลักษณะอุดตันหรือแคบ สำหรับน้ำส้มควันไม้ นั้นพบว่าน้ำส้มควันไม้จากเตาเผาทั้งสองแบบมีลักษณะเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช. 659/2553 เมื่อนำน้ำส้มควันไม้มาวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเทคนิค GC/MS พบว่าองค์ประกอบหลักของน้ำส้มควันไม้มีความใกล้เคียงกัน อย่างไรก็ตาม น้ำส้มควันไม้จากเตาเผาที่พัฒนาขึ้น มีสีเข้มและมีน้ำมันหนามากกว่า เนื่องจากขนาดพื้นที่หน้าตัดและพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนของอุปกรณ์เก็บน้ำส้มควันไม้ของเตาเผาถ่านทั้งสองประเภทแตกต่างกัน เมื่อเปรียบเทียบการใช้งานพบว่าเตาเผาที่พัฒนาขึ้นใช้เวลาในการผลิตถ่านชีวภาพต่อการอบการผลิตน้อยกว่าเตาเผาแบบดั้งเดิมและช่วยลดปริมาณเชื้อเพลิง ชุมชนสามารถนำถ่านชีวภาพและน้ำส้มควันไม้ที่ผลิตขึ้นไปใช้ในพื้นที่เกษตรกรรมเพื่อลดการใช้สารเคมี ตลอดจนส่งเสริมการทำการเกษตรที่สอดคล้องกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน

คำสำคัญ: ถ่านชีวภาพ, น้ำส้มควันไม้, เตาเผา, เตาอิฐ, แก๊สเรือนกระจก

Abstract

This research aimed to develop a 200-liter charcoal kiln designed for household-level production of biochar and wood vinegar. The thermal efficiency was enhanced by modifying the condensation system to enable the reuse of pyrolysis gases as a co-fuel. The study comparatively analyzed the performance of the newly developed kiln and a traditional kiln commonly used in target communities. Furthermore, the properties of bamboo-derived biochar and wood vinegar produced by both kilns were evaluated.

¹ สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา, สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

² คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก เขตพื้นที่อุเทนถวาย

¹ School of Civil Engineering, Institute of Engineering, Suranaree University of Technology

² Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology, Uthen Thawai Area.

* Corresponding author: Sasithorn Sunphorka, Email: sasithorn_su@rmutto.ac.th

The results showed that the improved 200-liter kiln produced biochar with a higher calorific value (29.06 MJ/kg) compared to the traditional kiln (26.78 MJ/kg). Fourier-transform infrared (FTIR) spectroscopy revealed that biochar from the developed kiln exhibited -OH and aromatic C-H functional group peaks, which were absent in the traditional kiln's biochar. Brunauer–Emmett–Teller (BET) surface area, pore volume analyses, and scanning electron microscopy (SEM) images indicated that while the traditional kiln produced biochar with a higher surface area, some of its pores appeared clogged or narrow.

Regarding the wood vinegar, products from both kilns conformed to the Thai Community Product Standard (TCPS 659/2553). Gas chromatography-mass spectrometry (GC/MS) analysis demonstrated similar main constituents in both samples; however, the wood vinegar from the developed kiln was darker and contained a higher amount of tar oil. This difference was attributed to variations in the cross-sectional area and heat exchange surface of the condensation units. In terms of performance, the improved kiln required less time per production cycle and consumed less fuel. Ultimately, communities can utilize the resulting biochar and wood vinegar in agriculture to reduce chemical dependency and promote farming practices aligned with the Sustainable Development Goals (SDGs).

Keywords: Biochar, wood vinegar, charcoal kiln, brick kiln, greenhouse gases

บทนำ

การใช้ถ่านไม้ยังคงอยู่กับวิถีชีวิตของมนุษย์มายาวนาน ในแง่ของการพึ่งพาถ่านเป็นแหล่งพลังงานหลักในชีวิตประจำวัน โดยเฉพาะในพื้นที่ชนบทหรือในบางประเทศที่การเข้าถึงไฟฟ้ายังมีจำกัด การใช้ถ่านเป็นส่วนสำคัญในการดำรงชีวิต ทั้งในการปรุงอาหารและการให้ความร้อน ซึ่งการย่างหรือการทำอาหารในเตาถ่านนั้น เป็นที่ยอมรับกันว่าอาหารที่ปรุงได้มักมีรสชาติที่เป็นเอกลักษณ์และแตกต่างจากการใช้เตาแก๊สหรือเตาไฟฟ้า ถ่านเป็นวัสดุที่ผ่านกระบวนการให้ความร้อนจนเกิดการสลายตัวผ่านกระบวนการที่เรียกว่าคาร์บอนไนเซชัน (carbonization) ซึ่งเป็นกระบวนการที่วัสดุอินทรีย์ เช่น พืชหรือซากสิ่งมีชีวิตเป็นต้น ถูกเปลี่ยนแปลงให้กลายเป็นคาร์บอนหรือสารที่มีส่วนประกอบเป็นคาร์บอน วัสดุที่มีองค์ประกอบเป็นคาร์บอนสูงนี้ จะมีความคงทนและสามารถใช้ในการเผาไหม้เพื่อให้เกิดความร้อนได้ดี ซึ่งคาร์บอนไนเซชันนี้เป็นหนึ่งในกระบวนการสลายตัวทางความร้อนในพื้นที่จำกัดอากาศ หรือ กระบวนการไพโรไลซิส (pyrolysis) ดังนั้นการผลิตถ่านจึงต้องทำในเครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่สามารถควบคุมปริมาณอากาศหรือออกซิเจน หรือ เป็นอุปกรณ์ที่มีลักษณะปิดเกือบสมบูรณ์ในขณะที่ทำการผลิตถ่าน เพื่อให้ไม้หรือวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการผลิตถ่านนั้นเกิดการสลายตัวทางความร้อนอย่างสมบูรณ์โดยไม่เกิดปฏิกิริยากับอากาศหรือออกซิเจนและกลายเป็นถ่าน

เตาเผาถ่านที่มีการใช้งานตามพื้นที่ต่าง ๆ ของประเทศไทยหลายประเภท เช่น เตาลาน เตาดินเหนียว และเตาอิฐ เป็นต้น (Sangsuk *et al.*, 2023; Ruangsang, *et al.*, 2022) โดยในพื้นที่เป้าหมายในการทำการวิจัยนี้ คือ กลุ่มเกษตรกรธรรมชาติ ตำบลน้ำเป็น อำเภอลำทะเมนชัย จังหวัดระยอง

มีการใช้เตาเผาถ่านที่ผลิตจากถังเหล็ก 200 ลิตร แบบแนวนอน มีการก่ออิฐโดยรอบและใช้ดินทรายถมทับเพื่อเป็นฉนวนกันความร้อน แสดงดังรูปที่ 1 โครงสร้างของเตาเผาถ่านประกอบด้วย ด้านหน้าเตาเป็นส่วนที่ใช้ใส่เชื้อเพลิง ด้านในเตาใส่ไม้หรือวัตถุดิบสำหรับผลิตถ่าน ด้านหลังเตามีการต่อท่อสำหรับระบายแก๊สและเก็บน้ำส้มควันไม้ ซึ่งในงานวิจัยนี้จะเรียกเตาเผาใหม่ว่า “เตาเผาแบบดั้งเดิม” ขั้นตอนในการใช้เตาเผาถ่านแบบดั้งเดิม คือ (1) การเตรียมวัสดุ ซึ่งวัสดุส่วนใหญ่เป็นไม้ที่มีความชื้นไม่เกินร้อยละ 10 เพื่อให้เกิดการสลายตัวทางความร้อนอย่างสมบูรณ์ (2) การเรียงไม้ลงในเตาเผาถ่านใน เมื่อเรียงไม้เสร็จแล้ว นำฟามมาปิดเตาแล้วนำทรายมากลบไว้ โดยทรายนี้ทำหน้าที่เป็นฉนวนกันการสูญเสียความร้อน (3) การจุดไฟ โดยใช้เศษไม้เป็นเชื้อเพลิง โดยการใส่ไม้ที่เตาด้านหน้าและจุดไฟเพื่อให้ความร้อนกับไม้ที่อยู่ในเตาเผา (4) การเผาถ่าน หลังจากที่ได้จุดไฟที่เตาด้านหน้าแล้ว ไม้ที่อยู่ในเตาด้านในจะได้รับความร้อนแล้วเกิดการสลายตัวผ่านกระบวนการไพโรไลซิสซึ่งมีการปล่อยไอน้ำและแก๊สออกมา ขั้นตอนนี้ใช้เวลาประมาณ 2 – 4 วัน สำหรับเตาเผาแบบดั้งเดิม จากนั้นปิดท่อสำหรับระบายแก๊สและเก็บน้ำส้มควันไม้ที่อยู่ด้านหลัง โดยใช้ดินลูกรังผสมน้ำ กระบวนการนี้จำเป็นต้องทำด้วยความระมัดระวังเนื่องจากหากปิดปล่องไม่สนิทจะทำให้อากาศเข้าไปทำปฏิกิริยากับถ่านผ่านกระบวนการเผาไหม้ (combustion) จนกลายเป็นถ่านได้ ดังแสดงใน Figure 1 (right) (5) การลดอุณหภูมิเตาเผา ซึ่งทำหลังจากปิดปล่องเตาประมาณ 1 คืน เพื่อลดอุณหภูมิของเตาลง (6) การเก็บถ่าน เป็นขั้นตอนสุดท้ายของกระบวนการเผาถ่าน

ขั้นตอนการเผาถ่านดังกล่าวนี้เป็นวิธีชาวบ้านอย่างหนึ่งที่มีการทำสืบทอดกันมา โดยไม่จำกัดเฉพาะในการใช้งานเตาเผาแบบดั้งเดิมนี้เท่านั้น แต่ยังรวมถึงการใช้งานเตาเผาอื่น เช่น เตาดินเหนียวและเตาอิฐ อีกด้วย ซึ่งมีข้อจำกัดที่เกี่ยวข้องกับผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมจากการปล่อยแก๊สจากกระบวนการผลิตถ่าน แก๊สนี้มีองค์ประกอบ คือคาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ มีเทน และแก๊สเชื้อเพลิงอื่นๆ ซึ่งเป็นแก๊สเรือนกระจก โดยเฉพาะมีเทนมีค่า Global Warming Potential (GWP) หรือ ค่าศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อน ที่แสดงถึงคุณสมบัติสะสมพลังงานความร้อนได้ดีกว่า

คาร์บอนไดออกไซด์ถึง 28 เท่า ($28 \text{ kgCO}_2\text{-eq/kgCH}_4$) (Tsiklios *et al.*, 2025) นอกจากนี้ยังใช้เวลาในการผลิตถ่านนานประมาณ 3-7 วัน ต่อหนึ่งรอบการผลิต (Bureau of Environmental Health, Department of Health, Ministry of Public Health, 2012; Hamwong, 2024) รวมถึงต้องใช้ความร้อนระดับสูงในหลายขั้นตอนเพื่อให้ได้ถ่านที่มีคุณภาพเหมาะสม ไม่กลายเป็นเถ้า Figure 1 (right) ด้วยข้อจำกัดเหล่านี้ทำให้การใช้งานเตาเผาแบบดั้งเดิมในปัจจุบันได้รับความนิยมน้อยลงแม้ว่าจะยังมีความต้องการในการใช้ถ่านสำหรับในครัวเรือน หรือเพื่อการเกษตรอยู่ก็ตาม



Figure 1 traditional charcoal kiln (left), charcoal inside the traditional kiln (center) and charcoal covered by ash (right)

ปัจจุบันมีการพัฒนาเตาเผาขึ้นหลากหลายรูปแบบให้สะดวกต่อการใช้งานมากขึ้น ซึ่งเตาเผาที่เป็นที่นิยมและง่ายต่อการดัดแปลงเพื่อใช้งานในประเทศรายได้น้อยถึงปานกลางเป็นเตาเผาที่เรียกว่า “drum retort kiln” (Namaswa *et al.*, 2023) มีลักษณะเป็นถังทรงกระบอกมีการหมุนวนด้วยวัสดุต่างๆ เตาเผาลักษณะนี้ง่ายต่อการดัดแปลง โครงสร้างไม่ซับซ้อนและปรับให้สามารถเคลื่อนย้ายได้ นอกจากนี้ ยังมีการพัฒนาเตาเผาให้สามารถผลิตถ่านคุณภาพสูง และลดมลพิษจากกระบวนการผลิตถ่านบางส่วนได้ ในรูปแบบ “เตาเผาไร้ควัน” หรือ “เตาเผาผลพิษต่ำ” โดยมีการดัดแปลงถึง 200 ลิตรที่มักนำมาใช้เป็นเตาเผาถ่านในชุมชนให้มีท่อนำแก๊สเพื่อส่งแก๊สจากกระบวนการผลิตถ่านกลับมาเป็นเชื้อเพลิงในการเผาไหม้ รวมถึงการดัดแปลงให้สามารถเก็บผลิตภัณฑ์พลอยได้จำพวก น้ำส้มควันไม้ เพื่อใช้ในการทำการเกษตรอีกด้วย ศศิธร สรรพคำ และวุฒิชัย ยังสว่าง (Sunphorka & Yangsawang, 2023) พัฒนาเตาเผาผลพิษต่ำขนาด 200 ลิตร สำหรับผลิตถ่านชีวภาพและน้ำส้มควันไม้จากใบสับปะรด จากการวิเคราะห์สมบัติของถ่านชีวภาพที่ได้ มีคาร์บอนเป็นองค์ประกอบร้อยละ

70.49 มีค่าความร้อนสูงสุด 25.97 เมกะจูลส์ต่อกิโลกรัม น้ำส้มควันไม้มีส่วนประกอบของ 2-Methoxy-phenol (หรือ Guaiacol) ที่มีฤทธิ์เป็นสารต้านเชื้อราและสารต้านเชื้อแบคทีเรีย ต้นทุนของเตาเผาและเครื่องบดอัดถ่านชีวภาพประมาณเครื่องละ 5,000 บาท ปิยรัตน์ มุลศรี และ อาทิตย์ หูเต็ม (Moonsri & Hutem, 2018) ศึกษาการผลิตน้ำส้มควันไม้จากไม้มะขาม ไม้สะเดา ไม้กระถิน ไม้ไผ่ และไม้ยูคาลิปตัส โดยการศึกษาจากเตาเผาถ่านในพื้นที่อำเภอเขาค้อ อำเภอหล่มสัก และอำเภอเมือง จังหวัดเพชรบูรณ์ ทำการออกแบบและสร้างชุดเตาเผาถ่านที่สร้างจากถังน้ำมัน 200 ลิตร และท่อดักน้ำส้มควันไม้ที่มีการดัดแปลงระบบการแลกเปลี่ยนความร้อนภายในท่อ จากการทดลองสรุปได้ว่าการใช้ระบบการแลกเปลี่ยนความร้อนภายในท่อจะสามารถเก็บน้ำส้มควันไม้ได้ในปริมาณมากกว่า และมีค่าความถ่วงจำเพาะสูงกว่าการใช้ท่อแบบทั่วไป น้ำส้มควันไม้ที่ได้มีค่าพีเอชอยู่ในช่วง 2.5 – 3.4 และค่าความร้อนของถ่านประมาณ 13 – 18 เมกะจูลส์ต่อกิโลกรัม สมมาส แก้วล้วน และคณะ (Kaewluan *et al.*, 2021) ศึกษาหาปริมาณและคุณภาพของถ่านและน้ำส้มควันไม้ที่ได้จากไม้เลียง โดยใช้เตา

เผาถ่านแบบดั้งเดิมขนาด 200 ลิตร ที่มีส่วนฐานเชื่อมต่อกับชุดให้ความร้อนอุณหภูมิสูงจากเตาผลิตโดยสามารถป้อนแก๊สร้อนที่มีปริมาณออกซิเจนต่ำที่ระดับอุณหภูมิสูงถึง 1,000 องศาเซลเซียส และหัวเผาแก๊สเชื้อเพลิงสังเคราะห์เพื่อกำจัดแก๊สเหลือทิ้งที่ควมแน่นไม่หมด ส่วนบนของเตาเผาเชื่อมต่อกับชุดควบคุมแบบ Shell & Coil น้ำส้มควันไม้ดิบถูกแยกออกจากกันด้วยไฮโคลน และไหลเข้าสู่ถังเก็บ การทดลองเสร็จสิ้นเมื่อไม่มีน้ำส้มควันไม้ไหลออกจากเครื่องควบคุมแน่น ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการใช้ไม้ไผ่ที่มีความชื้นร้อยละ 27.78 กระบวนการคาร์บอนในเซชันจะเสร็จสิ้นในเวลา 350 นาที โดยให้มวลถ่านร้อยละ 22.38 และมวลน้ำส้มควันไม้ร้อยละ 59.25 ไม้ไผ่ที่มีความชื้นสูงใช้เวลาในการเผาถ่านนาน ให้ผลผลิตถ่านต่ำแต่ให้ปริมาณน้ำส้มควันไม้สูง คุณภาพของถ่านและน้ำส้มควันไม้ที่ได้มีสมบัติเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช.)

อย่างไรก็ตาม เมื่อศึกษารูปแบบเตาเผาต่างๆ โดยละเอียด พบว่าเตาเผาขนาด 200 ลิตรที่มีการพัฒนาขึ้นแล้วนั้นยังมีข้อเสียเปรียบบางประการ เช่น มีระบบการควบคุมที่ซับซ้อน ชุมชนไม่สามารถสร้างได้เองหรือไม่สามารถดัดแปลงจากอุปกรณ์ที่มีอยู่ตามท้องตลาดได้ รวมถึง ยังมีความจำเป็นต้องใช้พลังงานไฟฟ้าต่อเข้ากับอุปกรณ์บางส่วนของเตาเผาซึ่งไม่เหมาะสมต่อการนำไปใช้งานในพื้นที่เกษตร งานวิจัยนี้จึงมีการพัฒนาเตาเผาถ่านขึ้น โดยผลิตจากถังเหล็ก 200 ลิตร มีการต่อท่อระบายควันออกจากเตาเผาเพื่อเก็บน้ำส้มควันไม้และนำแก๊สชีวมวลหรือสารระเหยจากกระบวนการไพโรไลซิสที่ไม่สามารถควบคุมแน่นได้กลับไปเป็นเชื้อเพลิงร่วมในการให้ความร้อน ทำให้แก๊สมีเทนในแก๊สชีวมวลเกิดการเผาไหม้สมบูรณ์จนกลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ก่อนปลดปล่อยสู่บรรยากาศ มีการออกแบบท่อควบคุมแน่นให้ไม่ซับซ้อน และไม่จำเป็นต้องใช้อุปกรณ์ต่อพ่วงอื่นหรือไม่ต้องใช้พลังงานไฟฟ้า รวมถึงทดสอบคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์ ได้แก่ ถ่านชีวภาพจากไม้ไผ่ และน้ำส้มควันไม้ ที่ได้จากเตาเผาผลิตถ่านที่พัฒนาขึ้นเปรียบเทียบกับถ่านชีวภาพที่ได้จากเตาเผาถ่านแบบดั้งเดิม โดยมีการดำเนินการในพื้นที่ของกลุ่มเกษตรกรชุมชนตำบลน้ำเป็น อำเภอเขาชะเมา จังหวัดระยอง

การทดลอง

1. วัสดุที่ใช้ในงานวิจัย

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ ไม้ไผ่ขางหม่น (*Dendrocalamus sericeus* Munro) ตัดเป็นท่อนความยาว 10 – 15 เซนติเมตร ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 11 เชื้อเพลิงที่ใช้คือ ไม้ยาง (*Dipterocarpus alatus* Roxb.) ขนาดเส้นผ่าน

ศูนย์กลางน้อยกว่า 10 เซนติเมตร ตัดเป็นท่อนความยาว 30 – 40 เซนติเมตร ความชื้นเริ่มต้นร้อยละ 9 ไม้ทั้งสองชนิดมาจากพื้นที่ตำบลน้ำเป็น อำเภอเขาชะเมา จังหวัดระยอง

2. การพัฒนาเตาเผาผลิตถ่านและการผลิตถ่านด้วยเตาเผาผลิตถ่าน

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาเตาเผาถ่านขนาด 200 ลิตร โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อให้สามารถใช้ทดแทนเตาเผาแบบดั้งเดิมได้ สามารถผลิตถ่านคุณภาพสูงและน้ำส้มควันไม้ที่มีสมบัติตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน (มผช.659/2553) หรือมีคุณภาพไม่น้อยไปกว่าถ่านและน้ำส้มควันไม้ที่ผลิตได้จากเตาเผาแบบดั้งเดิม ชุมชนสามารถผลิตเตาเผาเองได้ ใช้ระยะเวลาในการผลิตถ่านสั้น และมีการปล่อยมลพิษน้อยลง Figure 2 แสดงโครงสร้างเตาเผาแบบดั้งเดิม (Figure 2a) โครงสร้างเตาเผาผลิตถ่านขนาด 200 ลิตร (Figure 2b) และภาพเตาเผาผลิตถ่านขนาด 200 ลิตร ที่ชุมชนสร้างขึ้นตามทีออกแบบ (Figure 2c) และนำมาใช้ในระดับภาคสนามในพื้นที่กลุ่มเกษตรกรชุมชนตำบลน้ำเป็น อำเภอเขาชะเมา จังหวัดระยอง เตาเผาทั้งสองแบบประกอบด้วย 3 ส่วนหลัก ได้แก่ ① เตาเผาไหม้เชื้อเพลิง เป็นส่วนล่างสุดของเตาเผาทำหน้าที่ป้อนเชื้อเพลิงเพื่อให้ความร้อนแก่ ② เตาเผาเพื่อผลิตถ่านชีวภาพซึ่งวางอยู่ด้านบนเตาเผาไหม้เชื้อเพลิง ผลิตจากถังเหล็กขนาด 200 ลิตร และ ③ ชุดท่อควบคุมแน่นน้ำส้มควันไม้

Figure 2(a) แสดงโครงสร้างเตาเผาแบบดั้งเดิมโดยส่วนที่ ① เป็นส่วนที่ใส่เชื้อเพลิงสร้างจากอิฐบลอค ส่วนที่ ② เป็นเตาเผาสำหรับผลิตถ่านชีวภาพสร้างจากถังเหล็กขนาด 200 ลิตร แนวนอน ด้านบนตัดเป็นช่องสี่เหลี่ยมสำหรับใส่ไม้และนำถ่านออก ส่วนที่ ③ เป็นชุดควบคุมแน่นน้ำส้มควันไม้สร้างจากเหล็กทอกลม เส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว ความยาวทั้งหมด 3 เมตร ต่อออกจากปลายด้านหนึ่งของถังเหล็ก และพาแก๊สจากด้านในถังเหล็กขนาด 200 ลิตร ปล่อยออกสู่บรรยากาศด้านบนดังรูป มีการก่ออิฐบลอคโดยรอบเตาเผาถ่านและปิดทับด้วยดินทรายเพื่อเป็นฉนวนความร้อน การเก็บน้ำส้มควันไม้จะกระทำบริเวณรอยต่อของท่อแนวตั้งและท่อเฉียงที่ซึ่งมีการเจาะรูไว้สำหรับเก็บน้ำส้มควันไม้

Figure 2(b) แสดงโครงสร้างเตาเผาขนาด 200 ลิตรที่พัฒนาขึ้น โดยส่วนที่ ② สร้างจากถังเหล็กขนาด 200 ลิตร แนวตั้ง ด้านบนมีฝาปิดพร้อมเข็มขัดล็อก สำหรับใส่ไม้และนำถ่านออก มีการหุ้มฉนวนเซรามิกใส่ไฟเบอร์โดยรอบ ตรงกลางมีเหล็กกล่องสี่เหลี่ยมเชื่อมผ่านจากด้านล่างเตาเผาเพื่อนำเปลวไฟจากส่วนที่ ① เตาเผาไหม้เชื้อเพลิง ไปจนถึงด้านบนของถังเหล็ก เพื่อให้ความร้อนกระจายในส่วนเตาเผาถ่านมาก

ชั้น ส่วนที่ ③ ชุดท่อหล่อเย็นนี้สร้างขึ้นเพื่อเก็บน้ำส้มควันไม้ และแก้ไขปัญหาการปลดปล่อยแก๊สมีเทนและแก๊สเชื้อเพลิงอื่น ออกสู่บรรยากาศ มีลักษณะเป็นท่อสองชั้น ท่อชั้นนอกใส่น้ำ สำหรับหล่อเย็น สร้างจากเหล็กกล่องสี่เหลี่ยมขนาด 4 นิ้ว ท่อชั้นในสำหรับระบายแก๊สที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาไพโรไลซิสออกจากเตาเผาเพื่อผลิตถ่านชีวภาพ สร้างจากเหล็กกล่องสี่เหลี่ยมขนาด 1 นิ้ว โดยชุดท่อควบแน่นดังกล่าวมีทั้งหมด 3 ชุด (ในรูปแสดงเพียงสองชุด) เมื่อแก๊สจากส่วนเตาเผาถ่านหรือถึง

เหล็ก 200 ลิตร ผ่านบริเวณท่อสองชั้น แก๊สบางส่วนจะควบแน่นกลายเป็นของเหลว หรือ น้ำส้มควันไม้ ส่วนแก๊สที่ไม่สามารถควบแน่นได้จะถูกป้อนเข้าไปยังเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงเพื่อทำหน้าที่เป็นแก๊สเชื้อเพลิง สำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วมในการให้ความร้อน กระบวนการนี้จะทำให้แก๊สมีเทนและแก๊สเชื้อเพลิงที่ไม่สามารถควบแน่นเป็นน้ำส้มควันไม้ได้ถูกเผาไหม้กลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ก่อนปลดปล่อยออกสู่บรรยากาศ

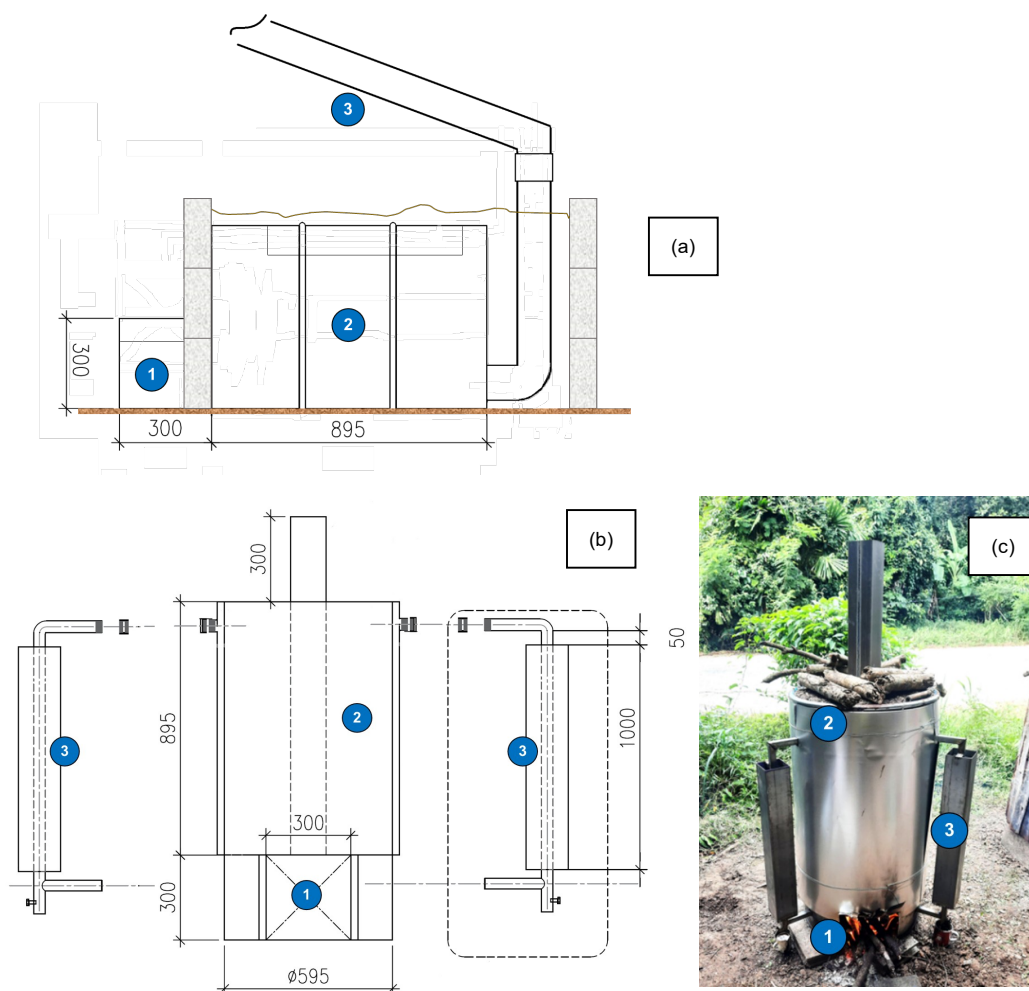


Figure 2 Schematic representation of traditional charcoal kiln (a) and 200-liter low-emission charcoal kiln (b) with actual 200-liter low-emission charcoal kiln (c)

การใช้งานเตาเผาผลิษดำที่พัฒนาขึ้นนี้ทำได้โดยการใส่ชีวมวลลงไปทีเตาเผาเพื่อผลิตถ่านชีวภาพ ปิดฝา และจุดไฟที่เตาเผาไหม้เชื้อเพลิงเพื่อให้ความร้อน ความร้อนที่เกิดขึ้นนี้จะแพร่สู่เตาเผาเพื่อผลิตถ่านชีวภาพที่อยู่ด้านบน จากนั้นเมื่อชีวมวลหรือไม้ไผ่ได้รับความร้อนจะค่อยๆ ปลดปล่อยความชื้นและสารระเหยออกมาในรูปของแก๊ส แก๊สที่เกิดขึ้นจะถูกระบายออกสู่ชุดท่อหล่อเย็น กลายเป็นน้ำส้มควันไม้และ

แก๊สเชื้อเพลิงตามกระบวนการที่กล่าวมาแล้วข้างต้น เชื้อเพลิงแข็งที่ใช้สำหรับให้ความร้อนในเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงจะใช้ปริมาณหนึ่งสำหรับการเพิ่มอุณหภูมิภายในเตาเผาไหม้เชื้อเพลิงช่วงแรก จากนั้นจะลดปริมาณการใช้ลงหลังจากเก็บน้ำส้มควันไม้เสร็จสิ้นแล้ว เนื่องจากแก๊สเชื้อเพลิงที่เกิดขึ้นจะมีปริมาณมากเพียงพอจนสามารถใช้เป็นเชื้อเพลิงทดแทนและลดปริมาณเชื้อเพลิงแข็งได้

การทดสอบประสิทธิภาพของเตาเผาแบบดั้งเดิมและเตาเผาผลพิษต่ำขนาด 200 ลิตรที่พัฒนานี้ มีการควบคุมชนิดของวัตถุดิบที่ใช้ผลิตถ่านและชีวมวลที่ใช้เป็นเชื้อเพลิง คือ ไม้ไผ่ และไม้ยาง ตามลำดับ ปริมาณไม้ไผ่เริ่มต้น 70 กิโลกรัม ปริมาณไม้ยางที่ใช้เป็นเชื้อเพลิงจะมีการชั่งน้ำหนักเพื่อเก็บข้อมูลตลอดกระบวนการผลิตถ่าน เนื่องจากปริมาณการใช้เชื้อเพลิงสำหรับเตาเผาสองประเภทไม่เท่ากัน มีการวัดอุณหภูมิของเตาเผา โดยวัดอุณหภูมิที่ปล่องกลางของเตาเผาผลพิษต่ำด้วยเครื่อง Dual-input K-type digital thermometer 6802II ซึ่งตลอดกระบวนการมีอุณหภูมิสูงที่สุดอยู่ในช่วง 550 – 600 องศาเซลเซียส สำหรับการวัดอุณหภูมิของเตาเผาแบบดั้งเดิมไม่สามารถทำได้โดยตรงเนื่องจากโครงสร้างของเตาเผาไม่รองรับอุปกรณ์จึงใช้อุณหภูมิอ้างอิงจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง การทดสอบเตาเผาทั้งสองชนิดมีการทำซ้ำสองครั้ง การเก็บตัวอย่างถ่านจากเตาเผาจะเก็บจากบริเวณที่อยู่ก้นเตาเพื่อหลีกเลี่ยงการเก็บตัวอย่างถ่านที่อาจเกิดปฏิกิริยาเผาไหม้กับอากาศขณะลดอุณหภูมิเตาเผา

3. การวิเคราะห์ผลิตภัณฑ์

1) การวิเคราะห์องค์ประกอบของถ่านชีวภาพ

วิเคราะห์องค์ประกอบโดยธาตุ (Ultimate analysis) ของถ่านชีวภาพด้วยเครื่อง THERMO FLASH 2000 CHN ANALYZERS วิเคราะห์ค่าความร้อนสูงสุดของถ่านชีวภาพด้วยเครื่อง Bomb Calorimeter Model: LECO AC500 วิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวของถ่านชีวภาพด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscope and Energy Dispersive X-ray Spectrometer - SEM-EDS) รุ่น JEOL JSM-IT300 วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันขององค์ประกอบบนพื้นผิวของถ่านชีวภาพโดยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโคปี (Fourier transform Infrared Spectroscopy - FTIR) รุ่น PERKIN ELMER Spectrum One ด้วยเทคนิค KBr-pellet ช่วงเลขคลื่น 4000 – 400 cm^{-1} วิเคราะห์พื้นที่ผิวและการกระจายตัวของรูพรุนด้วย NOVA 2200 gas sorption analyzer (Quantachrome, USA)

2) การวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำส้มควันไม้

วิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำส้มควันไม้จากไม้ไผ่ด้วยเครื่องแก๊สโครมาโทกราฟี-แมสสเปกโตรมิเตอร์ (GC-MS/MS TQ) รุ่น AGILENT 7890 GC/7000C GC/MS TRIPLE QUAD ใช้คอลัมน์ CP-Wax ก่อนนำน้ำส้มควันไม้ไปวิเคราะห์สามารถเตรียมตัวอย่างได้โดยการนำน้ำส้มควันไม้ปริมาตร 5 มิลลิลิตร ผสมกับแอมโมเนียมไฮดรอกไซด์ (Q ReC™

AMMONIA SOLUTION 28%) ปริมาตร 1.5 มิลลิลิตร เพื่อปรับ pH ให้มีค่าประมาณ 5 จากนั้นเติมไดคลอโรมีเทน (Fisher Chemical™ Dichloromethane) หรือ เอทิลแอซิเตต (RCI Labscan™ Ethyl Acetate 99.8%) ปริมาตร 3 มิลลิลิตร แล้วนำไปกรองเพื่อเตรียมสำหรับการวิเคราะห์องค์ประกอบ (Pimenta *et al.*, 2018)

ผลการทดลองและอภิปรายผล

การทดสอบประสิทธิภาพของเตาเผาแบบดั้งเดิมและเตาเผาที่พัฒนาขึ้นมีผลการทดสอบดัง Table 1 จะเห็นว่าเมื่อเปรียบเทียบจากการใช้ไม้ไผ่ปริมาณ 70 กิโลกรัม เท่ากัน เตาเผาแบบดั้งเดิมใช้เวลาในการให้ความร้อนนานกว่า โดยเตาเผาแบบดั้งเดิมใช้เวลา 2 วันในการให้ความร้อน โดยมีอุณหภูมิสูงที่สุด 500 องศาเซลเซียส (National Innovation Agency, 2019) ในขณะที่เตาเผาที่พัฒนาขึ้นใช้เวลาในการให้ความร้อน 5 ชั่วโมง โดยมีอุณหภูมิสูงที่สุดอยู่ในช่วง 550 – 600 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ยังพบว่า เตาเผาที่พัฒนาขึ้นใช้เชื้อเพลิงน้อยกว่าเตาเผาแบบดั้งเดิมประมาณ 20 กิโลกรัม ส่วนหนึ่งเนื่องมาจากการใช้ระยะเวลาสั้นในการผลิตถ่านชีวภาพ สาเหตุอีกประการหนึ่งเกิดจากเตาเผาที่พัฒนาขึ้นมีการนำแก๊สจากกระบวนการไพโรไลซิสที่ไม่สามารถควบแน่นได้มาใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วม ทำให้องค์ประกอบแก๊สส่วนที่เผาไหม้ได้ในแก๊สจากกระบวนการไพโรไลซิสซึ่งประกอบด้วยแก๊สคาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน มีเทน และสารระเหยอินทรีย์ (Thawon *et al.*, 2020; Sparrevik *et al.*, 2014) ถูกเผาไหม้กลายเป็นแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ ไอน้ำ และพลังงานความร้อนจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้องพบว่าแก๊สจากกระบวนการเผาถ่านที่ควบแน่นไม่ได้ ประกอบด้วยคาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน และมีเทน เท่ากับร้อยละ 13.4, 11.18, 7.35 และ 1.758 โดยปริมาตร เมื่อนำไปเผาไหม้เพื่อเป็นเชื้อเพลิง องค์ประกอบของแก๊สที่ได้ประกอบด้วย คาร์บอนไดออกไซด์ คาร์บอนมอนอกไซด์ ไฮโดรเจน และมีเทน เท่ากับร้อยละ 19.80, 0.06, 0.00 และ 0.409 โดยปริมาตร ตามลำดับ (Thawon *et al.*, 2020) ซึ่งจะเห็นว่าองค์ประกอบของแก๊สดังกล่าวมีศักยภาพในการทำให้เกิดภาวะโลกร้อนลดลงจากกระบวนการที่ปล่อยแก๊สจากกระบวนการไพโรไลซิสสู่บรรยากาศโดยตรง

เมื่อสิ้นสุดการให้ความร้อนสำหรับกระบวนการไพโรไลซิสแล้ว มีการปล่อยให้เตาเผาเย็นลงด้วยการตั้งทิ้งไว้ในบรรยากาศปกติ สำหรับเตาเผาแบบดั้งเดิมมีการใช้เวลาในขั้นตอนดังกล่าวประมาณ 2 วัน เนื่องจากมีการใช้ดินทรายกลบทั่วเตาเผาทำให้การระบายความร้อนจากภายในเตาเผาสู่ด้าน

นอกใช้เวลานาน ในขณะที่เตาเผาที่พัฒนาขึ้นใช้เวลาข้ามคืน หรือ 16 ชั่วโมง จึงนำถ่านชีวภาพออกจากเตาเผา จาก Table 1 เมื่อพิจารณาร้อยละผลได้ของแข็งและร้อยละผลได้ของเหลว จากการบวนการผลิตถ่านด้วยเตาเผาแบบดั้งเดิมและเตาเผาที่พัฒนาขึ้น พบว่าร้อยละผลได้ของแข็งและร้อยละผลได้ของเหลวจากเตาเผาที่พัฒนาขึ้น คือ ร้อยละ 21.43 และร้อยละ 6.43 ตามลำดับ ในขณะที่ร้อยละผลได้ของแข็งและร้อยละผลได้ของเหลวจากเตาเผาแบบดั้งเดิมมีค่าลดลง คือ ร้อยละ 14.29 และร้อยละ 1.71 ตามลำดับ อาจเนื่องมาจากการใช้ระยะเวลาในการให้ความร้อนนานจึงทำให้ปฏิกิริยาคาร์บอนในเซชันเกิดได้สมบูรณ์มากขึ้น องค์ประกอบที่เป็นสารระเหยถูกกำจัดออกจากโครงสร้างของชีวมวลได้มากขึ้น ซึ่งสามารถยืนยันได้จากการวิเคราะห์องค์ประกอบคาร์บอนของถ่านที่ได้จากเตาเผาสองประเภทนี้ ซึ่งจะอภิปรายในส่วนถัดไป

Figure 3 แสดงลักษณะภายนอกของถ่านชีวภาพที่ได้จากเตาเผาถ่านแบบดั้งเดิมและเตาเผาถ่านมลพิษต่ำ พบว่า ถ่านชีวภาพที่ได้จากเตาเผาถ่านแบบดั้งเดิมเฉพาะถ่านจากไม้ไผ่ที่อยู่บริเวณใกล้กับฝาเตา แต่ถ่านจากไม้ไผ่ที่อยู่บริเวณที่ห่างจากฝาเตามีผิวมันวาว คล้ายกับถ่านชีวภาพที่ได้จากเตาเผาถ่านมลพิษต่ำ

Table 1 Ultimate analysis and high heating values of biochars

Conditions/ Yields	Traditional	200-liter low-emis-
	kiln	sion kiln
Bamboo (kg)	70	70
Rubber tree (kg)	50	30
Total pyrolysis time	2 days	5 h
Total cooling time	2 day	16 h
Solid yield (wt.%)	14.29	21.43
Liquid yield (wt.%)	1.71	6.43



Figure 3 biochar from traditional charcoal kiln (left) and 200-liter low-emission charcoal kiln (right)

Table 2 Ultimate analysis and high heating values of biochars

Properties	Biochar	
	Traditional kiln	200-liter low-emission kiln
C (wt.%)	72.86	73.06
H (wt.%)	1.12	2.32
N (wt.%)	0.46	0.59
HHV (cal/g)	6,400.8	6,945.8
H/C ratio	0.18	0.38
BET Surface area (m ² /g)	93.46	41.60
Total pore volume (cm ³ /g)	0.054	0.025
Micropore area (m ² /g)	81.17	40.80
Micropore volume (cm ³ /g)	0.043	0.022
Average pore diameter (Å)	22.97	23.71

Table 2 แสดงผลการวิเคราะห์องค์ประกอบแบบแยกธาตุและค่าความร้อนของถ่านชีวภาพที่ได้จากเตาเผาถ่านแบบดั้งเดิมและเตาเผาที่พัฒนาขึ้น พบว่าปริมาณร้อยละคาร์บอน ไฮโดรเจน และไนโตรเจน ของถ่านชีวภาพทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน โดยปริมาณร้อยละคาร์บอนมีค่าเท่ากับ 72.86 และ 73.06 ปริมาณร้อยละไฮโดรเจนมีค่าเท่ากับ 1.12 และ 2.32 ปริมาณร้อยละไนโตรเจนมีค่าเท่ากับ 0.46 และ 0.59 สำหรับถ่านชีวภาพจากเตาเผาถ่านแบบดั้งเดิมและเตาเผาที่พัฒนาขึ้น ตามลำดับ องค์ประกอบที่คล้ายกันนี้ส่งผลให้ค่าความร้อนของถ่านชีวภาพทั้งสองมีค่าใกล้เคียงกัน คือ 6,400.8 และ 6,945.8 แคลลอรี่ต่อกรัม หรือ 26.78 และ 29.06 เมกะจูลส์ต่อกิโลกรัม ตามลำดับ ซึ่งค่าความร้อนของถ่านชีวภาพจากเตาเผาที่พัฒนาขึ้นมีค่ามากกว่าของถ่านชีวภาพจากเตาเผาแบบดั้งเดิมเล็กน้อย โดยมีค่าใกล้เคียงกับงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Chambers *et al.*, 2025; Shezi *et al.*, 2025) อย่างไรก็ตาม เมื่อพิจารณาอัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนต่อคาร์บอน พบว่า ถ่านจากเตาเผาแบบดั้งเดิมมีอัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนต่อคาร์บอนน้อยกว่าถ่านจากเตาเผาที่พัฒนาขึ้นประมาณสองเท่า เนื่องมาจากการใช้เวลาในการให้ความร้อน (total pyrolysis time) นานกว่า ตามผลการทดสอบประสิทธิภาพที่แสดงในตารางที่ 1 ทำให้เกิดปฏิกิริยาคาร์บอนในเซชันได้ดีขึ้น ส่งผลให้คาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้นและปริมาณสารระเหยที่ประกอบด้วยไฮโดรคาร์บอนเบาลดลง (Muoghalu *et al.*, 2025)

จากการวิเคราะห์พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนพบว่า พื้นที่ผิวของถ่านชีวภาพจากเตาเผาแบบดั้งเดิมและจากเตาเผาที่พัฒนาขึ้น เท่ากับ 93.46 m²/g และ 41.60 m²/g ในขณะที่

ที่ปริมาตรรูพรุนทั้งหมดของถ่านชีวภาพจากเตาเผาแบบดั้งเดิมและจากเตาเผาที่พัฒนาขึ้น เท่ากับ $0.054 \text{ cm}^3/\text{g}$ และ $0.025 \text{ cm}^3/\text{g}$ ตามลำดับ ซึ่งมีสมบัติอยู่ในช่วงของถ่านชีวภาพจากกระบวนการทั่วไปที่มีพื้นที่ผิวในช่วง $8\text{--}132 \text{ m}^2/\text{g}$ และปริมาตรรูพรุนทั้งหมดอยู่ในช่วง $0.016\text{--}0.083 \text{ cm}^3/\text{g}$ (Leng *et al.*, 2021) จะเห็นว่าถ่านชีวภาพจากเตาเผาแบบดั้งเดิมมี

พื้นที่ผิวและปริมาตรรูพรุนแบบไมโครพอร์ (<2nm) มากกว่าถ่านชีวภาพจากเตาเผาที่พัฒนาขึ้น เนื่องจากการใช้เวลาในการเกิดปฏิกิริยาที่มากกว่า ทำให้เร่งการปล่อยสารระเหยและส่งผลกระทบต่อพัฒนาโครงสร้างของรูพรุน สอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ลักษณะพื้นผิวด้วยเทคนิค SEM ดังแสดงภาพถ่ายดัง Figure 4

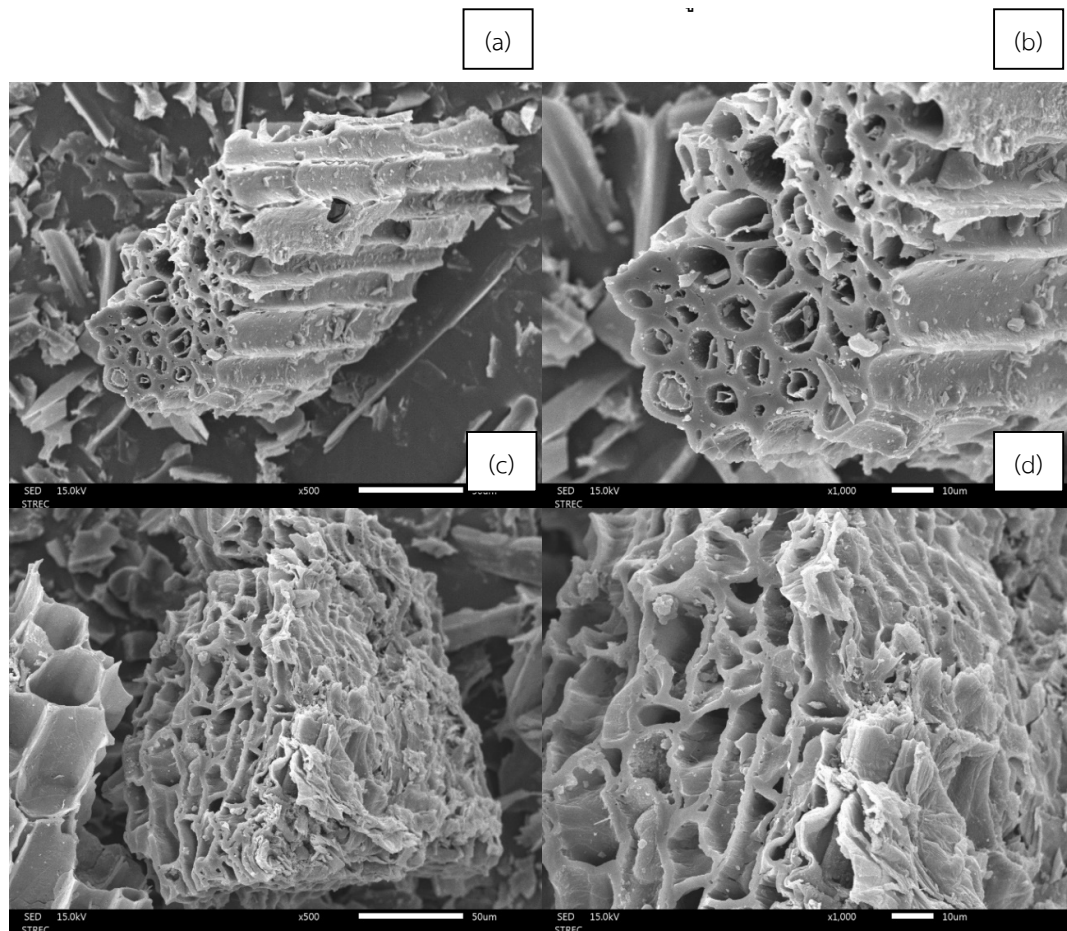


Figure 4 SEM images of biochar from traditional kiln (a and b) and 200-liter low-emission kiln (c and d) with magnitude $\times 500$ (a and c) and with magnitude $\times 1,000$ (b and d)

Figure 4 (a) และ 4 (b) แสดงให้เห็นภาพถ่าย SEM ของถ่านชีวภาพจากเตาเผาแบบดั้งเดิมที่กำลังขยาย 500 และ 1,000 เท่า ตามลำดับ และ Figure 4 (c) และ 4 (d) แสดงให้เห็นภาพถ่าย SEM ของถ่านชีวภาพจากเตาเผาที่พัฒนาขึ้นที่กำลังขยาย 500 และ 1,000 เท่า จะเห็นว่าลักษณะของรูพรุนของถ่านชีวภาพจากเตาเผาแบบดั้งเดิมมีการสังเกตเห็นความลึกของรูพรุนชัดเจน ต่างจากลักษณะของรูพรุนถ่านชีวภาพจากเตาเผาที่พัฒนาขึ้นที่มีความกว้างและสังเกตเห็นความลึกไม่ชัดเจน ตามลำดับอย่างไรก็ตามการใช้เวลานานและอุณหภูมิสูงอาจเกิดผลที่ตรงกันข้าม กล่าวคือ โครงสร้างของรูพรุนบาง

ส่วนถูกทำลาย (Leng *et al.*, 2021) จาก Figure 4 (b) พบว่ารูพรุนบางส่วนของถ่านชีวภาพที่ได้จากเตาเผาแบบดั้งเดิมมีลักษณะอุดตันหรือแคบ ทั้งนี้อาจเป็นผลจากการที่ถ่านจากเตาเผาถ่านแบบดั้งเดิมใช้อุณหภูมิสูงและระยะเวลาในการเผานาน แม้ว่าการใช้เวลานานจะทำให้เกิดปฏิกิริยาคาร์บอนไเซชันได้ดีขึ้นดังที่กล่าวไปแล้วข้างต้น แต่ก็มีแนวโน้มว่าการใช้เวลานานจะทำให้โครงสร้างรูพรุนของถ่านชีวภาพเสียหาย (Yavari *et al.*, 2015) จากการที่สารระเหยบางส่วนหลอมเหลวชั่วคราวและปิดรูพรุนของถ่านชีวภาพ

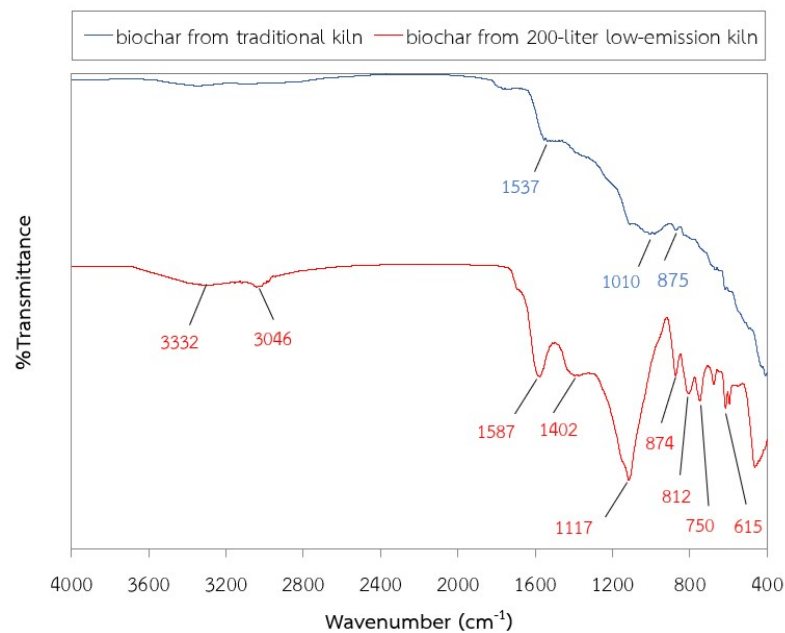


Figure 5 FTIR spectrum of biochar from traditional kiln and 200-liter low-emission kiln

Figure 5 แสดงสเปกตรัม FTIR ของถ่านทั้งสอง จากผลการวิเคราะห์แสดงให้เห็นว่า ถ่านชีวภาพจากเตาเผาขนาด 200 ลิตร ปรากฏพีคในช่วงความยาวคลื่น 3,550 – 3,200 cm^{-1} ซึ่งแสดงการสั่นของหมู่ -OH (แอลกอฮอล์ ฟีนอล หรือ กรดคาร์บอกซิลิก) พีคที่ความยาวคลื่น 1,587 cm^{-1} แสดงการสั่นของหมู่ C=C (วงแหวนอะโรมาติก, พันธะคู่สลับเดี่ยว) หมู่ C=O (พันธะคู่สลับเดี่ยว) และ/หรือพันธะ N-H รวมถึงพีคที่ความยาวคลื่น 874 cm^{-1} 812 cm^{-1} พีคที่ความยาวคลื่น 1,402 cm^{-1} แสดงการสั่นของหมู่ C-H (หมู่แอลเคน) และ/หรือหมู่ O-H (แอลกอฮอล์ ฟีนอล หรือ กรดคาร์บอกซิลิก) รวมถึง 750 cm^{-1} แสดงถึงพันธะ C-H (อะโรมาติก) ซึ่งผลการวิเคราะห์นี้มีแนวโน้มคล้ายกับถ่านชีวภาพจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Handiso *et al.*, 2024) ทั้งนี้ พบว่าพีคของถ่านชีวภาพที่ได้จากเตาเผาถ่านแบบดั้งเดิมมีความสูงน้อยกว่าพีคของถ่านชีวภาพที่ได้จากเตาเผาขนาด 200 ลิตร ซึ่งอาจเป็นผลจากปริมาณของหมู่ฟังก์ชันที่พบบนผิวของถ่านชีวภาพ นอกจากนี้ ถ่านที่ได้จากเตาเผาถ่านแบบดั้งเดิมไม่ปรากฏพีคที่ความยาวคลื่นมากกว่า 3,000 สำหรับหมู่ -OH และพีคที่ความยาวคลื่น 750 cm^{-1} สำหรับหมู่ C-H ของสารประกอบอะโรมาติก ซึ่งเป็นไปได้ว่าการใช้อุณหภูมิสูงเป็นเวลานานทำให้อะลิฟาติกไฮโดรคาร์บอน (aliphatic hydrocarbon) เปลี่ยนไปเป็นหมู่คาร์บอนิล (Muoghalu *et al.*, 2025) นอกจากนี้ ที่อุณหภูมิสูง โลหะแอลคาไลน์และโลหะแอลคาไลน์เอิร์ธ (alkali and alkaline earth metals; AAEM) และเกลือที่อยู่ในถ่านอาจจับหมู่ฟังก์ชันออกซิเจนบางตัวด้วยพันธะ AAEM-O-C linkages (Ganesan *et al.*, 2025)

Figure 6 แสดงลักษณะทางกายภาพของน้ำส้มควันไม้จากปฏิกิริยาไพโรไลซิสของไม้ไผ่ที่ได้จากเตาเผาถ่านแบบดั้งเดิมและเตาเผาขนาด 200 ลิตร ที่พัฒนาขึ้น โดยเป็นน้ำส้มควันไม้ที่ไม่ผ่านการกรอง และตั้งทิ้งไว้ประมาณ 60 วัน ส่วน Table 3 แสดงคุณสมบัติของน้ำส้มควันไม้ที่ได้จากเตาเผาทั้งสองประเภทเปรียบเทียบกับมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช. 659/2553 พบว่าน้ำส้มควันไม้จากเตาเผาทั้งสองประเภทมีลักษณะเป็นของเหลวใส ไม่แยกชั้น มีสีน้ำตาลแดงเข้ม มีกลิ่นคล้ายควันไฟ มีค่าพีเอชเท่ากับ 3 และมีค่าความถ่วงจำเพาะเท่ากับ 1.018 และ 1.024 สำหรับน้ำส้มควันไม้ที่ได้จากเตาเผาแบบดั้งเดิมและจากเตาเผาที่พัฒนาขึ้น ตามลำดับ ซึ่งเป็นไปตามมาตรฐานมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน

อย่างไรก็ตาม น้ำส้มควันไม้ที่ได้จากเตาเผาขนาด 200 ลิตร ที่พัฒนาขึ้น (Figure 6 right) มีสีเข้มกว่าน้ำส้มควันไม้จากเตาเผาแบบดั้งเดิมเล็กน้อย นอกจากนี้ น้ำส้มควันไม้ที่ได้จากเตาเผาถ่านแบบดั้งเดิมนั้นจะสังเกตเห็นสีที่ใสกว่าและมีน้ำมันาร์ปริมาณน้อย เนื่องจากกระบวนการควบแน่นด้วยการใช้อุปกรณ์ของเตาเผาถ่านแบบดั้งเดิมนั้นผ่านท่อกลมขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว มีความยาวเฉพาะส่วนที่แลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศภายนอกท่อเพื่อเก็บน้ำส้มควันไม้ 2 เมตร แสดงให้เห็นถึงพื้นที่หน้าตัดของท่อ ประมาณ 0.0079 ตารางเมตร และมีพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน 0.63 ตารางเมตร ในขณะที่การควบแน่นด้วยการใช้อุปกรณ์ของเตาเผาที่พัฒนาขึ้นผ่านท่อสี่เหลี่ยมขนาด 1 นิ้ว มีความยาวเฉพาะส่วนที่แลกเปลี่ยนความร้อนกับอากาศภายนอกท่อเพื่อเก็บน้ำส้มควันไม้ 1 เมตร มีชุดควบแน่นทั้งหมด 3 ชุด แสดงให้เห็นถึงพื้นที่หน้า

ตัดของท่อรวม 0.0019 ตารางเมตร และมีพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อน 0.30 ตารางเมตร ซึ่งน้อยกว่าอุปกรณ์ของเตาเผาแบบดั้งเดิม ดังนั้น สารระเหยจากกระบวนการไพโรไลซิสของเตาเผาแบบดั้งเดิมจึงใช้เวลาในกระบวนการควบแน่นมากกว่า ทำให้สารระเหยที่มีน้ำหนักเบาสามารถควบแน่นได้มาก นอกจากนี้ น้ำมันหัตถ์และตะกอนบางส่วนถูกกรองด้วยผิวด้านในอุปกรณ์ควบแน่น ในขณะที่อุปกรณ์ควบแน่นของเตาเผาที่พัฒนาขึ้นมีพื้นที่หน้าตัดและพื้นที่แลกเปลี่ยนความร้อนน้อย สารระเหยใช้เวลาในกระบวนการควบแน่นไม่นานก็ถูกปล่อยเข้าไปที่เตาเผาไหม้เชื้อเพลิง สารระเหยที่มีน้ำหนักมากสามารถควบแน่นได้ดี แต่สารระเหยที่มีน้ำหนักน้อยกว่าจะควบแน่นได้ไม่สมบูรณ์



Figure 6 Wood vinegar obtained from traditional kiln (left) and 200-liter low-emission kiln (right)

Table 3 Physical properties of wood vinegar

Properties	Thai Community Product Standards ^(a)	Traditional kiln	200-liter low-emission kiln
Characteristics	Clear and homogeneous liquid	Clear and homogeneous liquid	Clear and homogeneous liquid
Color	reddish brown or yellowish brown	reddish brown	reddish brown
Odor	Smells like smoke	Smells like smoke	Smells like smoke
pH ^(b)	2.0 - 3.0	2.5	2.8
Specific gravity ^(c)	1.010 – 1.025	1.018	1.024

^(a) Thai Community Product Standards no. 659/2553 (Office of Industrial Product Standards, 2010)

^(b) Analyzed by HM Digital pH meter PH-80

^(c) Analyzed by Brannan Density Hydrometer

Table 4 แสดงองค์ประกอบของน้ำส้มควันไม้ที่ได้จากปฏิกิริยาไพโรไลซิสของไม้ไผ่ในเตาเผาถ่านแบบดั้งเดิมและเตาเผาขนาด 200 ลิตร ด้วยเทคนิค GC/MS ซึ่งได้จากการนำน้ำส้มควันไม้มาสกัดด้วยตัวทำละลาย โดยในการทดลองนี้ได้นำเสนอผลการทดลองกรณีที่ใช้ไดคลอโรมีเทนเป็นตัวทำละลายและกรณีที่ใช้อีเธอร์เอทิลเป็นตัวทำละลาย จากนั้นวิเคราะห์องค์ประกอบที่ละลายในตัวทำละลายทั้งสองกรณีแล้วนำมาเปรียบเทียบกัน โดยพิจารณาเฉพาะองค์ประกอบที่แสดงพีคอย่างชัดเจน พบว่าองค์ประกอบของน้ำส้มควันไม้ที่ได้จากปฏิกิริยาไพโรไลซิสของไม้ไผ่ในเตาเผาถ่านแบบดั้งเดิมและเตาเผาขนาด 200 ลิตร มีความคล้ายกันมากกว่าร้อยละ 50 โดยเฉพาะองค์ประกอบสำคัญในน้ำส้มควันไม้ ได้แก่ ไกวอะคอล (guaiacol) หรือ 2-เมทอกซีฟีนอล (Phenol, 2-methoxy-) ที่แสดงในลำดับที่ 20 รวมถึงฟีนอล (แสดงในลำดับที่ 26) และอนุพันธ์ของฟีนอลอื่น ๆ เช่น พาราครีซอล (p-Cresol) 4-เอทิลฟีนอล (Phenol, 4-ethyl-)

2,6-ไดเมทอกซีฟีนอล (Phenol, 2,6-dimethoxy-) 3,5-ไดเมทอกซี-4-ไฮดรอกซีโทลูอีน (3,5-Dimethoxy-4-hydroxytoluene) และ 4-เอทิล-2,6-ไดเมทอกซีฟีนอล (4-Ethyl-2,6-dimethoxyphenol) เป็นต้น ต่างแสดงพีคที่ชัดเจนและพบได้ในน้ำส้มควันไม้จากเตาเผาทั้งสองแบบ ส่วนองค์ประกอบรองของน้ำส้มควันไม้มีความแตกต่างกันบางส่วน ซึ่งองค์ประกอบที่มีพื้นที่ใต้กราฟน้อย (area sum% น้อยกว่า 0.5) จะไม่ถูกวิเคราะห์ในการทดสอบดังกล่าว

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบของน้ำส้มควันไม้มีแนวโน้มคล้ายกับองค์ประกอบของน้ำส้มควันไม้ที่ได้จากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง (Gani *et al.*, 2024; Vinturelle *et al.*, 2024; Zhu *et al.*, 2020) โดยระบุว่าไกวอะคอลและแคทาคอล (catechols) มาจากการสลายตัวทางความร้อนของลิกนิน และยังพบว่าองค์ประกอบในน้ำส้มควันไม้สามารถยับยั้งแบคทีเรียบางชนิดได้

Table 4 Compositions of wood vinegar

No	Compound name	Traditional kiln						200-liter low-emission kiln					
		Dichloromethane			Ethyl acetate			Dichloromethane			Ethyl acetate		
		OC	RT	Area Sum %	OC	RT	Area Sum %	OC	RT	Area Sum %	OC	RT	Area Sum %
1	Pyridine		5.51	1.13		5.50	0.90	*	*	*	*	*	*
2	Pyridine, 2-methyl-		6.39	0.61		6.38	0.51	*	*	*	*	*	*
3	Decane, 2,4-dimethyl-		8.98	0.85	*	*	*	*	*	*	*	*	*
4	2-Cyclopenten-1-one		10.88	0.77		10.87	0.41		10.88	0.64		10.87	0.54
5	1-Hydroxy-2-butanone		11.65	1.02		11.64	0.57		11.65	0.53		11.64	0.47
6	Ethanone, 1-(2-furanyl)-		17.12	1.04		17.11	0.59		17.12	0.82		17.11	0.59
7	2-Cyclopenten-1-one, 3-methyl-		17.32	1.75		17.31	1.29		17.32	1.81		17.31	1.69
8	2-Cyclopenten-1-one, 2,3-dimethyl-		18.25	0.80		18.24	0.64		18.25	0.69		18.25	0.56
9	Pyridine, 3-methoxy-		20.23	1.78		20.23	1.46		20.23	1.62		20.22	1.44
10	Butyrolactone		22.09	0.82		22.08	0.57		22.15	1.20		22.08	1.27
11	2-Furanone, 2,5-dihydro-3,5-dimethyl		23.09	0.86		23.10	0.69		23.11	0.79		23.09	0.68
12	3-Furanmethanol		24.11	2.65		24.11	3.39		24.12	2.86		24.11	3.85
13	2(5H)-Furanone, 3-methyl-		25.92	0.56		25.91	0.43	*	*	*	*	*	*
14	3-n-Propyl-2-pyrazolin-5-one		26.30	0.98		26.29	0.66	*	*	*	*	*	*
15	2,4-Dimethyl-2-oxazoline-4-methanol	*	*	*	*	*	*		26.36	1.82		26.33	1.90
16	1-(Aminomethyl)-N,N-dimethylcyclopentanamine	*	*	*	*	*	*		27.94	0.76		27.92	0.80
17	Acetamide	*	*	*		28.37	0.78	*	*	*		28.35	0.56
18	2-Cyclopenten-1-one, 2-hydroxy-3-methyl-		30.78	2.21		30.79	2.38		30.81	4.14		30.79	3.94
19	2-Furanone, 2,5-dihydro-3,5-dimethyl	*	*	*	*	*	*		31.07	0.52	*	*	*
20	Phenol, 2-methoxy-		32.14	6.08		32.13	5.97		32.15	5.44		32.13	5.38
21	Cycloheptanone, 2-ethyl-		32.74	0.66		32.73	0.52	*	*	*	*	*	*
22	4-Methyl-5H-furan-2-one	*	*	*	*	*	*		32.76	0.70		32.73	0.62
23	2-Cyclopenten-1-one, 3-ethyl-2-hydroxy-		33.45	1.32		33.44	1.31		33.46	1.62		33.44	1.67
24	Hexadecane, 2,6,11,15-tetramethyl-		33.79	0.56	*	*	*	*	*	*	*	*	*
25	Creosol		35.95	1.95		35.95	1.79		35.95	1.82		35.95	1.67
26	Phenol		37.95	9.47		37.96	11.22		37.96	7.37		37.97	9.23
27	Phenol, 4-ethyl-2-methoxy-		38.82	1.40		38.82	1.17		38.82	1.75		38.81	1.22
28	p-Cresol		40.90	3.79		40.90	3.60		40.90	4.17		40.90	3.79
29	Phenol, 2,4-dimethyl-		*	*		*	*		40.98	0.53		40.90	0.51
30	Phenol, 3-methyl-		41.17	1.87		41.18	1.67		41.18	1.69		41.18	1.46
31	Phenol, 4-ethyl-		44.30	5.15		44.30	4.53		44.30	5.95		44.30	5.28
32	1H-Imidazole, 4-methyl-		45.41	0.59		45.45	0.58	*	*	*		45.42	0.74
33	2,3-Anhydro-d-mannosan	*	*	*	*	*	*	*	*	*		46.89	0.85
34	Phenol, 2,6-dimethoxy-		47.47	17.11		47.46	15.78		47.48	14.09		47.43	14.36
35	Phenol, 3,5-bis(1,1-dimethylethyl)-	*	*	*	*	*	*	*	*	*		49.55	0.77
36	3,5-Dimethoxy-4-hydroxytoluene		50.37	4.20		50.37	3.64		50.37	3.67		50.36	2.97

No	Compound name	Traditional kiln						200-liter low-emission kiln					
		Dichloromethane			Ethyl acetate			Dichloromethane			Ethyl acetate		
		OC	RT	Area Sum %	OC	RT	Area Sum %	OC	RT	Area Sum %	OC	RT	Area Sum %
37	1,4:3,6-Dianhydro-.alpha.-d-glu-copyranose	*	*	*	*	*	*		51.61	1.14		51.60	2.92
38	4-Ethyl-2,6-dimethoxyphenol		52.31	3.26		52.31	2.95		52.32	2.57		52.30	3.59
39	5-Oxotetrahydrofuran-2-carboxylic acid, ethyl ester	*	*	*	*	*	*	*	*	*		54.11	0.58
40	2,6-Dimethoxy-4-propylphenol		54.61	0.65		54.61	0.55		54.61	0.57	*	*	*
41	1,2-Benzenediol, 3-methoxy-	*	*	*		55.20	2.89	*	*	*	*	*	*
42	2-Propanone, 1-(4-hydroxy-3-methoxyphenyl)-		59.81	1.20		59.81	0.98		59.82	2.04		59.81	1.26
43	1,2-Benzenediol, 3-methyl-	*	*	*		60.36	1.18	*	*	*	*	*	*
44	Catechol		61.30	1.15		61.25	7.04	*	*	*	*	*	*
45	(E)-2,6-Dimethoxy-4-(prop-1-en-1-yl) phenol	*	*	*	*	*	*		62.33	0.57	*	*	*
46	1,2-Benzenediol, 4-methyl-		63.39	0.44		63.38	1.56	*	*	*	*	*	*
47	4-Ethylcatechol	*	*	*		66.26	0.79	*	*	*	*	*	*
48	Syringylacetone		70.32	1.23		70.32	0.73		70.32	1.87		70.32	0.94
49	Resorcinol	*	*	*		70.96	0.92	*	*	*		70.95	2.26
50	9-Octadecenamide, (Z)-		82.04	1.45		82.03	0.94		82.04	0.86		82.03	1.49

OC—Compound Occurrence : (positive occurrence—marked in green; negative occurrence—marked with an asterisk).
Compounds with area sum% less than 0.5 were not detected.

ถ่านชีวภาพและน้ำส้มควันไม้ที่ผลิตขึ้นนั้นสามารถนำไปใช้เพื่อการเกษตรกรรมได้ โดยน้ำส้มควันไม้สามารถนำไปใช้ในการส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช เพิ่มความหลากหลายของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในดิน และปรับปรุงคุณสมบัติทางเคมี ฟิสิกส์ และชีวภาพของดิน (Kumar *et al.*, 2025) ส่วนถ่านชีวภาพนั้นก็มีโครงสร้างรูพรุนที่นำไปสู่ศักยภาพที่เพิ่มขึ้นในการเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของโครงสร้างดิน (Yadav *et al.*, 2023) จึงมีการนำถ่านชีวภาพไปผสมกับดินปลูกในพื้นที่การเกษตร อาจใช้ร่วมกับน้ำส้มควันไม้เพื่อลดการพังพาสารเคมีทางการเกษตร และก้าวไปสู่เกษตรกรรมที่ยั่งยืนสอดคล้องกับเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable Development Goals: SDGs) ได้แก่ เป้าหมายที่ 2 ยุติความหิวโหย บรรลุความมั่นคงทางอาหารและยกระดับโภชนาการ และส่งเสริมเกษตรกรรมที่ยั่งยืน และเป้าหมายที่ 12 สร้างหลักประกันให้มีแบบแผนการผลิตและการบริโภคที่ยั่งยืน เป็นต้น สำหรับพื้นที่เป้าหมายของงานวิจัยนี้ นอกจากจะนำถ่านชีวภาพไปใช้ในพื้นที่การเกษตรแล้ว ยังมีการนำเตาเผาที่พัฒนาขึ้นมาผลิตเป็นถ่านชีวภาพจากมังคุดและแปรรูปเป็นกำยานหอมไว้ควันเพื่อจำหน่าย ดังแสดงใน Figure 7 ซึ่งจะมีการทดสอบคุณภาพของถ่านมังคุดเพื่อใช้เป็นถ่านตุ๊กตกลิ่นตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์

ชุมชน มพข.180/2546 และมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เอส มอก. เอส 250-2566 ต่อไป



Figure 7 Smokeless incense made from mangosteen biochar (left) and mangosteen biochar (right)

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

งานวิจัยนี้เป็นการพัฒนาเตาเผาถ่านชีวภาพและผลิตน้ำส้มควันไม้ด้วยกระบวนการไพโรไลซิส โดยสร้างจากถังเหล็กขนาด 200 ลิตร โดยมีการนำไปทดสอบประสิทธิภาพในพื้นที่เป้าหมาย คือ ตำบลน้ำเป็น อำเภอบางสะพาน จังหวัดระยอง และเปรียบเทียบผลการทดสอบกับเตาเผาแบบดั้งเดิมที่ใช้ในชุมชน เตาเผาที่พัฒนาขึ้นนี้มีการมีน้ำแก๊สที่ปลดปล่อยออกจากกระบวนการไพโรไลซิสในเตาเผามาควบแน่นเพื่อเก็บ

น้ำส้มควันไม้ และน้ำแก๊สส่วนที่ไม่สามารถควบแน่นได้มาใช้เป็นเชื้อเพลิงร่วม ทำให้ใช้เชื้อเพลิงน้อยลง และแก๊สเกิดการเผาไหม้สมบูรณ์ก่อนปลดปล่อยออกสู่อากาศ

จากการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการใช้งานระหว่างเตาเผาที่พัฒนาขึ้นกับเตาเผาแบบดั้งเดิม พบว่าเตาเผาที่พัฒนาขึ้นใช้เวลาการผลิตถ่านชีวภาพน้อยกว่า ในขณะที่ร้อยละผลได้ของแข็งและของเหลวจากเตาเผาที่พัฒนาขึ้นมีค่ามากกว่าจากการวิเคราะห์สมบัติของถ่านชีวภาพพบว่าถ่านจากเตาเผาที่พัฒนาขึ้นมีอัตราส่วนระหว่างไฮโดรเจนต่อคาร์บอนมากกว่าถ่านชีวภาพจากเตาเผาแบบดั้งเดิมประมาณสองเท่า เนื่องจากเตาเผาแบบดั้งเดิมมีระยะเวลาในการให้ความร้อนนานกว่าปฏิกิริยาคาร์บอนในเซชันเกิดได้ดีขึ้นและทำให้คาร์บอนคงตัวเพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามถ่านชีวภาพจากเตาเผาที่พัฒนาขึ้นมีค่าความร้อนสูงกว่าเล็กน้อย นอกจากนี้ยังพบว่าถ่านชีวภาพจากเตาเผาแบบดั้งเดิมมีพื้นที่ผิวมากกว่าแต่รูพรุนบางส่วนมีลักษณะแคบหรืออุดตัน แสดงถึงโครงสร้างรูพรุนที่เสียหายจากกระบวนการสลายตัวทางความร้อนที่ใช้เวลานาน

สำหรับการวิเคราะห์น้ำส้มควันไม้พบว่า น้ำส้มควันไม้จากเตาเผาทั้งสองประเภทเป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน มผช. 659/2553 จากการวิเคราะห์องค์ประกอบด้วยเทคนิค GC/MS พบว่าองค์ประกอบของน้ำส้มควันไม้จากเตาเผาทั้งสองประเภทใกล้เคียงกัน โดยมีองค์ประกอบของไกวอะคอลและอนุพันธ์ฟีนอลอื่นที่มีฤทธิ์ยับยั้งแบคทีเรียบางชนิดได้ ถ่านชีวภาพและน้ำส้มควันไม้ที่ผลิตจากเตาเผาที่พัฒนาขึ้นนี้สามารถนำไปใช้ในพื้นที่เกษตรกรรม เพื่อใช้ปรับปรุงดินและช่วยลดการพึ่งพาสารเคมี รวมถึงส่งเสริมการพัฒนาตามเป้าหมายการพัฒนาที่ยั่งยืน ทั้งนี้ การปรับปรุงเตาเผาและชุดท่อหล่อเย็นให้สามารถควบแน่นน้ำส้มควันไม้ได้อย่างสมบูรณ์ขึ้นนั้น จำเป็นต้องดำเนินการในขั้นตอนถัดไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ เป็นส่วนหนึ่งของโครงการวิจัยเรื่อง การปรับใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสมด้านเตาเผาผลิษถ่านชีวภาพและน้ำส้มควันไม้เพื่อยกระดับเศรษฐกิจด้วยเศรษฐกิจหมุนเวียนและผลิตภัณฑ์ชุมชน โดย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก ได้รับการสนับสนุนโดยกองทุนส่งเสริมววน. และหน่วย บพท. (รหัสโครงการ A11F670266) คณะผู้วิจัยขอขอบคุณผู้ประสานงานจากสถาบันวิจัยและพัฒนา และผู้ทรงคุณวุฒิที่ให้ความแนะนำในการดำเนินโครงการ ขอขอบคุณคณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ เขตพื้นที่อุเทนถวาย ที่ได้ให้ความอนุเคราะห์เครื่องมือและสถานที่ในการทำวิจัย รวมถึงบุคลากรสายสนับสนุนที่กรุณาช่วยเหลือด้าน

เอกสาร ขอขอบคุณกลุ่มเกษตรคุณธรรม ในพื้นที่ตำบลน้ำเป็นอำเภอเขาชะเมา จังหวัดระยอง ที่ให้ความอนุเคราะห์วัสดุและพื้นที่ในการดำเนินโครงการ ตลอดจนผู้เกี่ยวข้องที่ไม่ได้กล่าวนามทุกท่านที่ให้ความช่วยเหลือและสนับสนุนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้

เอกสารอ้างอิง

- Bureau of Environmental Health, Department of Health, Ministry of Public Health. (2012). *Academic manual on guidelines for business operations that are hazardous to health, Type: Charcoal burning or charcoal accumulation*. Office of Printing, War Veterans Organization of Thailand.
- Chambers, E., Hassall, M., Johnson, D., McGoran, C., Williams, O., Blair, A., Catlow, F., & Saha, B. (2025). From bamboo to biochar: A critical review of bamboo pyrolysis conditions and products with a focus on relevance to the developing world. *RSC Sustainability*. <https://doi.org/10.1039/D4SU00800F>
- Ganesan, A., Rezazgui, O., Langlois, S., Boussabbeh, C., & Barnabe, S. (2025). Pyrolytic conversion of construction, renovation, and demolition (CRD) wood wastes in Québec to biochar: Production, characterization, and identifying relevant stability indices for carbon sequestration. *Science of the Total Environment*, 965, Article 178650. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2025.178650>
- Gani, A., Adlim, M., Rahmayani, R. F., Hanum, L., & Nabila, R. (2024). Preparation and characterization of coconut shell liquid smoke and the properties of preserving tofu. *Kuwait Journal of Science*, 51(4). <https://doi.org/10.1016/j.kjs.2024.100289>
- Hamwong, W. (2024). *Information technology for agriculture* [Massive open online course]. Rajamangala University of Technology Isan. <https://natres.skcmrmuti.ac.th/elibrary/uploads/files/67c6cb5a281207.27297954.pdf>
- Handiso, B., Pääkkönen, T., & Wilson, B. P. (2024). Effect of pyrolysis temperature on the physical and chemical characteristics of pine wood biochar. *Waste Management Bulletin*, 281–287. <https://doi.org/10.1016/j.wmb.2024.11.008>

- Kaewluan, S., Sriromreun, P., Jansri, S. N., Asadamongkon, P., & Chuichulcherm, S. (2021). Charcoal and wood vinegar products from hedge bamboo by using 200 liters community charcoal kiln working with gasified biomass burner. *RaJabhat Chiang Mai Research Journal*, 22(2), 229–245.
- Kumar, S., Rahman, M., Chenari Bouket, A., Ahadi, R., Meena, M., Bhupenchandra, I., Singh, U. B., Arutselvan, R., Kumar, R., Singh, S. P., Kashyap, A. S., Tripathi, R., Gupta, S., Dutta, P., Harish, Singh, R., & Swapnil, P. (2025). Unravelling the multifarious role of wood vinegar made from waste biomass in plant growth promotion, biotic stress tolerance, and sustainable agriculture. *Journal of Analytical and Applied Pyrolysis*, 185, Article 106851. <https://doi.org/10.1016/j.jaap.2024.106851>
- Leng, L., Xiong, Q., Yang, L., Li, H., Zhou, Y., Zhang, W., Jiang, S., Li, H., & Huang, H. (2021). An overview on engineering the surface area and porosity of biochar. *Science of the Total Environment*, 763, Article 144204. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144204>
- Moonsri, P., & Hutem, A. (2018). Development of wood vinegar production from local wisdom in Phetchabun Province for organic agriculture utilization. *Journal of Science & Technology Phetchabun Rajabhat University*, 3(1), 13–31.
- Muoghalu, C., Kaboggoza, H. C., Semiyaga, S., & Manga, M. (2025). Adsorptive removal of organics and nutrients from septic tank effluent using oak wood chip biochar: Kinetic analysis and numerical modeling. *Cleaner Water*, 3. <https://doi.org/10.1016/j.clwat.2025.100073>
- Namaswa, T., Burslem, D. F., & Smith, J. (2023). Emerging trends in appropriate kiln designs for small-scale biochar production in low to middle income countries. *Bioresource Technology Reports*, 24. <https://doi.org/10.1016/j.biteb.2023.101641>
- National Innovation Agency. (2019). *Manual for constructing a 200-liter horizontal charcoal kiln*. <https://social.nia.or.th/>
- Office of Industrial Product Standards. (2010). *Community product standard: Wood vinegar (TCPS 659/2553)*.
- Pimenta, A. S., Fasciotti, M., Monteiro, T. V., & Lima, K. M. (2018). Chemical composition of pyroligneous acid obtained from Eucalyptus GG100 clone. *Molecules*, 23(2). <https://doi.org/10.3390/molecules23020426>
- Ruangsarn, K., Heman, A., Tasaroj, H., Reungrit, S., Kraisoda, P., Heman, W., & Ruangsarn, S. (2022). Development of wood charcoal for cooking retort with community product standards. *Kalasin University Journal of Science Technology and Innovation*, 1(1), 1–10. <https://doi.org/10.14456/ksti.2022.6>
- Sangsuk, S., Buathong, C., & Suebsiri, S. (2023). Modified Iwate kiln for production of good quality charcoal and high volume of wood vinegar. *Fuel Communications*. <https://doi.org/10.1016/j.jfueco.2023.100095>
- Shezi, M., & Kiambi, S. L. (2025). Isothermal pyrolysis of bamboo and pinewood biomass: Product characterization and comparative study in a fluidized bed reactor. *Bioengineering*, 12(2), Article 99. <https://doi.org/10.3390/bioengineering12020099>
- Sparrevik, M., Adam, C., Martinsen, V., Jubaedah, & Cornelissen, G. (2015). Emissions of gases and particles from charcoal/biochar production in rural areas using medium-sized traditional and improved “retort” kilns. *Biomass and Bioenergy*, 72, 65–73. <https://doi.org/10.1016/j.biombioe.2014.11.016>
- Sunphorka, S., & Yangsawang, W. (2023). Biochar and wood vinegar production from pineapple leaves using low-emission 200-liter kiln and the feasibility study of production. *Journal of Engineering and Digital Technology (JEDT)*, 1–13.
- Thawon, K., Sriromreun, P., & Kaewluan, S. (2020). Performance and emission study of 200 L charcoal kiln with gasifier burner. *Proceedings of the 13th Srinakharinwirot University Research Conference*.
- Tsiklios, C., Hermesmann, M., Stumm, P., & Müller, T. E. (2025). Comparative analysis of hydrogen vs. methane pipeline transport systems with integrated methane pyrolysis for low-carbon hydrogen supply. *Applied Energy*, 383. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2025.125276>
- Vinturelle, R., Cabral, T. d., Oliveira, P. C., Salles, J. P.,

- Faria, J. V., Teixeira, G. P., . . . Chagas, E. F. (2024). Slow pyrolysis of *Terminalia catappa* L. municipal solid waste and the use of the aqueous fraction produced for bovine mastitis control. *Biochemistry and Biophysics Reports*, 38, Article 101704. <https://doi.org/10.1016/j.bbrep.2024.101704>
- Yadav, S. P. S., Bhandari, S., Bhatta, D., Poudel, A., Bhattarai, S., Yadav, P., Ghimire, N., Paudel, P., Paudel, P., Shrestha, J., & Oli, B. (2023). Biochar application: A sustainable approach to improve soil health. *Journal of Agriculture and Food Research*, 11, Article 100498. <https://doi.org/10.1016/j.jafr.2023.100498>
- Yavari, S., Malakahmad, A., & Sapari, N. B. (2015). Biochar efficiency in pesticides sorption as a function of production variables—a review. *Environmental Science and Pollution Research*, 22, 13824–13841.
- Zhu, Y., Cheng, S., Wang, P., Chen, H., Zhang, X., Liu, L., Li, X., & Ding, Y. (2020). A possible environmental-friendly removal of *Microcystis aeruginosa* by using pyroligneous acid. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 205. <https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2020.111159>

ผนังดินอัดจากวัสดุท้องถิ่น จังหวัดกำแพงเพชร

Rammed earth from local materials of Kamphaeng Phet Province

เอกสิทธิ์ เทียนมาศ^{1*}, พัชรรัตน์ หารไชย¹, มานพ ตันเคน¹ และประภัสสร ห่อทอง²

Aekasit Thianmas^{1*}, Patchareerat HaraChai¹, Manop Tonken¹ and Prapatsara Hothong²

Received: 24 May 2025 ; Revised: 14 July 2025 ; Accepted: 5 August 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาคุณสมบัติของผนังดินอัดจากวัสดุท้องถิ่น จังหวัดกำแพงเพชร โดยใช้วัสดุเหลือทิ้ง 3 ชนิด ได้แก่ เศษศิลาแลง จากงานตกแต่ง ผงหินอ่อนจากอุตสาหกรรมเหมืองหินอ่อน และขี้เถ้าอ้อยจากโรงงานน้ำตาล กำหนดอัตราส่วนปูนซีเมนต์ต่อดินกับวัสดุท้องถิ่น เท่ากับ 1 : 5 จากนั้นจึงขึ้นรูปตัวอย่างเพื่อหาปริมาณความชื้นที่เหมาะสมที่สุดที่ทำให้ผนังดินอัดแต่ละประเภทมีความหนาแน่นสูงสุด และทำการทดสอบสมบัติทางวิศวกรรม ได้แก่ ลักษณะพื้นผิว ความหนาแน่น การดูดซึมน้ำ การทนต่อการชะล้าง และกำลังรับแรงอัด ผลการทดสอบ พบว่า ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมของผนังดินอัดจากศิลาแลง คือ ร้อยละ 12.00 ให้ความหนาแน่นสูงสุดที่ 2.17 ก./ลบ.ซม. ผนังดินอัดผสมผงหินอ่อนมีปริมาณความชื้นที่เหมาะสมร้อยละ 16.00 ให้ความหนาแน่นสูงสุดที่ 1.86 ก./ลบ.ซม. และผนังดินอัดผสมขี้เถ้าอ้อยมีปริมาณความชื้นที่เหมาะสมร้อยละ 18.00 ให้ความหนาแน่นสูงสุดที่ 1.49 ก./ลบ.ซม. ในด้านสมบัติทางกายภาพ ผนังดินอัดแต่ละประเภทมีสีและน้ำหนักแตกต่างกัน โดยผนังดินอัดจากศิลาแลงมีสีส้มแดงและมีน้ำหนักมากที่สุด ผนังดินอัดผสมผงหินอ่อนมีสีน้ำตาลอมขาว ส่วนผนังดินอัดผสมขี้เถ้าอ้อยมีสีดำ น้ำหนักเบา และมีผิวเรียบเนียนที่สุด สำหรับกำลังรับแรงอัด พบว่า ผนังดินอัดจากศิลาแลงมีกำลังรับแรงอัดสูงสุดที่ 70.50 ± 7.00 กก./ตร.ซม. ตามมาด้วยผนังดินอัดผสมผงหินอ่อนที่ 38.50 ± 2.63 กก./ตร.ซม. และผนังดินอัดผสมขี้เถ้าอ้อยมีกำลังอัดต่ำที่สุดที่ 22.50 ± 2.73 กก./ตร.ซม. อย่างไรก็ตาม การเลือกใช้ผนังดินอัดเป็นวัสดุก่อสร้างเชิงสถาปัตยกรรมยังคงขึ้นอยู่กับความพึงพอใจในความเป็นธรรมชาติ สีสัน ความสวยงาม และเสน่ห์เฉพาะตัวของวัสดุนั้นๆ

คำสำคัญ: ผนังดินอัด, วัสดุท้องถิ่น, ศิลาแลง, ผงหินอ่อน, ขี้เถ้าอ้อย

Abstract

This study investigates the properties of rammed earth made from local materials in Kamphaeng Phet Province by utilizing three types of waste materials: laterite from decorative applications, marble powder from the marble mining industry, and sugarcane bagasse ash from sugar factories. The cement-to-soil ratio was fixed at 1:5 with local materials. Samples were prepared to determine the optimum moisture content that yields the highest density for each type of rammed earth wall. Engineering properties including surface characteristics, density, water absorption, erosion resistance, and compressive strength were then tested. The results indicate that the optimum moisture content for rammed earth with laterite is 12.00%, producing a maximum density of 2.17 g/cm³. Rammed earth mixed with marble powder exhibited an optimum moisture content of 16.00%, with a maximum density of 1.86 g/cm³. Rammed earth mixed with sugarcane bagasse ash showed an optimum moisture content of 18.00%, with a maximum density of 1.49 g/cm³. Regarding physical properties, each type of rammed earth wall differed in color and weight: the laterite-based rammed earth exhibited a reddish-orange color and the highest weight, the marble powder mixture showed a brownish-white hue, and the sugarcane bagasse ash mixture was black, lightweight, and had the smoothest surface

¹ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร

² คณะมนุษยศาสตร์และสังคมศาสตร์, มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร

¹ Faculty of Industrial Technology, Kamphaeng Phet Rajabhat University

² Faculty of Humanities and Social Sciences, Kamphaeng Phet Rajabhat University

* Corresponding author: Aekasit Thianmas, E-mail: muznui33@gmail.com

texture. In terms of compressive strength, the laterite rammed earth wall attained the highest strength of 70.50 ± 7.00 kg/cm², followed by the marble powder mixture at 38.50 ± 2.63 kg/cm², and the sugarcane bagasse ash mixture with the lowest strength at 22.50 ± 2.73 kg/cm². Nevertheless, the selection of rammed earth as an architectural building material remains dependent on preferences for naturalness, color, aesthetic appeal, and the unique charm of each material.

Keywords: Rammed earth, local materials, laterite, marble powder, sugarcane bagasse ash

บทนำ

ในยุคปัจจุบันนี้การก่อสร้างในประเทศไทยโดยส่วนใหญ่มักใช้โครงสร้างที่เป็นคอนกรีตเสริมเหล็กและก่อผนังด้วยอิฐที่มาจากการผลิตของอุตสาหกรรม จึงควรมีทางเลือกอื่นของวัสดุและการก่อสร้างที่ลดต้นทุนในการผลิตและลดผลกระทบต่อสภาพแวดล้อม ดินจึงเป็นวัสดุอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถนำมาใช้ในการก่อสร้าง เนื่องจากเป็นวัสดุที่หาได้ในธรรมชาติ ถึงแม้ว่าดินจะมีคุณสมบัติที่แตกต่างกันไปตามแต่ละภูมิภาค ซึ่งในการก่อสร้างมักถูกใช้เพื่อสร้างผนังรับน้ำหนักที่มีความแข็งแรงทนทานโดยไม่ต้องผ่านกระบวนการเผา และเมื่อหมดอายุในการใช้งานแล้วก็สามารถที่จะย่อยสลายกลับคืนสู่ธรรมชาติได้ดีกว่าวัสดุอุตสาหกรรมที่มีอยู่ในท้องตลาด

ผนังดินอัดเป็นการก่อสร้างผนังบ้านหรืออาคารด้วยวัสดุที่มีส่วนผสมของดินซึ่งนำมาใช้แทนอิฐทั่วไปที่มาจากการผลิตของอุตสาหกรรม ซึ่งข้อดีของการใช้ดินอัดนั้นเป็นการช่วยลดมลพิษทางอากาศได้เนื่องจากอิฐต้องผ่านกระบวนการเผาด้วยเตาดินอัดสามารถนำมาใช้ได้โดยไม่ต้องผ่านกระบวนการเผาและดินเป็นวัสดุที่สามารถหาได้ง่ายตามท้องถิ่นที่อาศัย มีวิธีในการผลิตที่ไม่ยุ่งยาก อีกทั้งยังสามารถที่จะย่อยสลายได้ง่าย แต่อย่างไรก็ตามคุณสมบัติของดินแต่ละชนิดแต่ละภูมิภาคนั้นจะมีความแตกต่างกันจึงทำให้ดินอัดมีความแข็งแรงที่ต่างกันจึงต้องมีการทดสอบความประสิทธิภาพก่อนที่จะนำไปใช้ในการก่อสร้าง

จังหวัดกำแพงเพชรเป็นแหล่งรวมของวัสดุท้องถิ่นที่มีเอกลักษณ์โดดเด่นสะท้อนถึงภูมิปัญญาและทรัพยากรอันอุดมสมบูรณ์ของพื้นที่ หนึ่งในนั้น คือ ศิลาแลง ซึ่งเป็นดินที่มีสีส้มแดงอันเป็นเอกลักษณ์ มักถูกนำมาใช้ในการก่อสร้างโบราณสถาน แสดงถึงความคงทนและสุนทรีย์ภาพที่ผูกพันกับประวัติศาสตร์ หินอ่อน ที่พบมากในอำเภอพรานกระต่าย ที่มีความสวยงามและหลากหลาย เหมาะสำหรับการตกแต่งและงานประติมากรรม อย่างไรก็ตาม กระบวนการผลิตเหล่านี้มักก่อให้เกิดเศษวัสดุเหลือทิ้งจำนวนมาก ซึ่งหากไม่มีการจัดการที่ดี อาจกลายเป็นปัญหาต่อสิ่งแวดล้อมได้ การนำเศษวัสดุเหล่านี้มาใช้ประโยชน์ไม่เพียงแต่ช่วยลดปัญหาขยะอุตสาหกรรม

แต่ยังเป็นการสร้างนวัตกรรม สร้างอาชีพ และส่งเสริมเศรษฐกิจหมุนเวียนในท้องถิ่นได้อย่างยั่งยืน

ดังที่กล่าวมาข้างต้น ผู้วิจัยจึงมีความสนใจที่จะนำเศษวัสดุท้องถิ่นที่เหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมต่าง ๆ ในจังหวัดกำแพงเพชร ได้แก่ เศษศิลาแลง ผงหินอ่อน และเศษซีเมนต์เก่าอ้อยนำมาผ่านตะแกรง จากนั้นนำไปผสมกับดินปูนซีเมนต์ และน้ำ ด้วยอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการนำมาอัดให้เป็นก้อน จากนั้นนำดินอัดที่เป็นก้อนแล้วมาทดสอบความแข็งแรงเพื่อที่จะสามารถนำไปใช้ทำหน้าที่ได้เหมือนกับอิฐที่มาจากการผลิตของอุตสาหกรรมและมีมาตรฐาน รวมทั้งเป็นการลดต้นทุนในการผลิตและลดผลกระทบที่จะเกิดต่อสภาพแวดล้อม

การทดลอง

1. สํารวจเศษวัสดุท้องถิ่น จังหวัดกำแพงเพชร

ผู้วิจัยได้ลงพื้นที่สำรวจเศษวัสดุเหลือทิ้งในอุตสาหกรรมจังหวัดกำแพงเพชร โดยทำการคัดเลือกเศษวัสดุมาใช้ในการขึ้นรูป จำนวน 3 ประเภท ดังนี้

1) เศษศิลาแลง จากการตัดแต่งอิฐศิลาแลงในพื้นที่จังหวัดกำแพงเพชร โดยผู้วิจัยจะนำเศษศิลาแลงมาผ่านตะแกรงเบอร์ 4 (4.75 มิลลิเมตร) เศษศิลาแลงที่ใช้ในการทดสอบมีค่าความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 3.01 และพบสารประกอบ SiO₂ และ Fe₂O₃ เป็นหลัก (เอกสิทธิ์ เทียนมาศ และประภัศรา ห่อทอง, 2567)

2) เศษผงหินอ่อน ได้จากอุตสาหกรรมการตัดแต่งหินอ่อน อำเภอพรานกระต่าย โดยผู้วิจัยจะนำผงหินอ่อนมาอบให้แห้ง เศษผงหินอ่อนไม่ต้องทำการร่อนเนื่องจากมีความละเอียดค่อนข้างสูง เศษผงหินอ่อนที่ใช้ในการทดสอบมีค่าความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 2.92 และพบสารประกอบ CaCO₃ เป็นหลัก (เอกสิทธิ์ เทียนมาศ และคณะ, 2567)

3) เศษซีเมนต์เก่าอ้อย จากโรงงานน้ำตาล จังหวัดกำแพงเพชร เศษซีเมนต์เก่าอ้อยที่ใช้ในการทดสอบมีค่าความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 2.18 และพบสารประกอบ SiO₂ และ Al₂O₃ เป็นหลัก

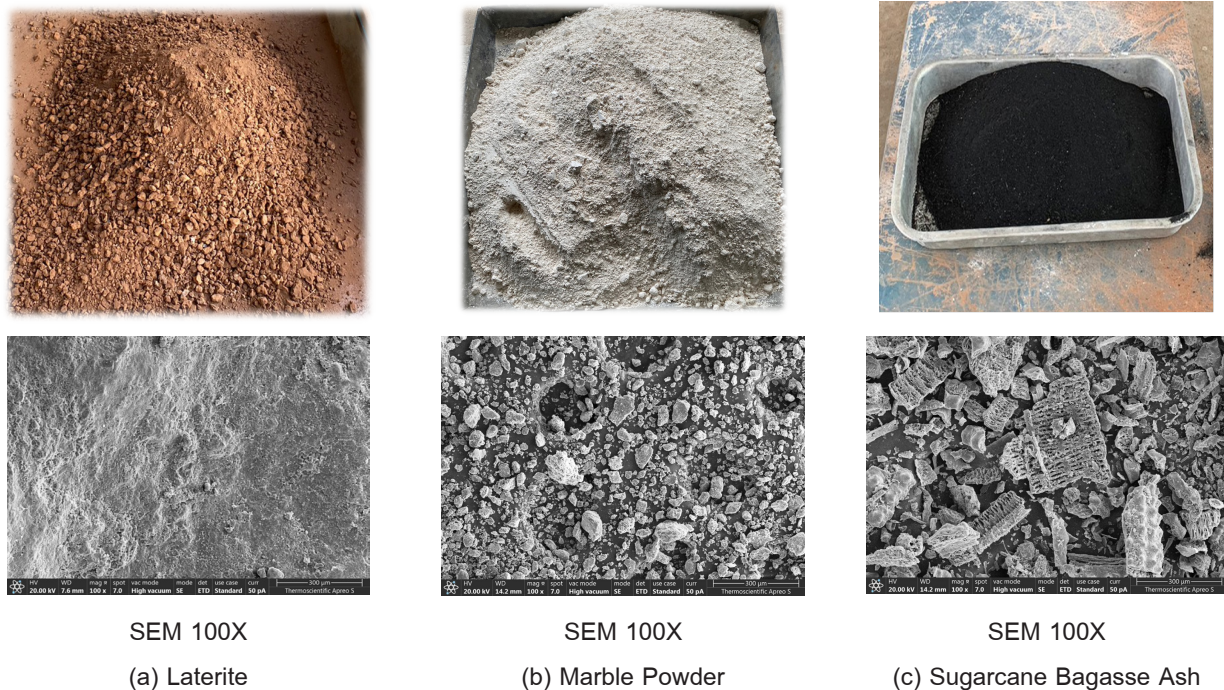


Figure 1 Local materials of Kamphaeng Phet Province

2. วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ

วัสดุที่ใช้ในการทดสอบ ได้แก่ ดิน ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ขาว น้ำสะอาด และเศษวัสดุท้องถิ่น 3 ประเภท คือ เศษศิลาแลง ผงหินอ่อน และซีเมนต์อ้อย

3. การเตรียมส่วนผสมและขึ้นรูปตัวอย่าง

1) ออกแบบส่วนผสม กำหนดส่วนผสม ปูนซีเมนต์ : ดินและวัสดุท้องถิ่น เท่ากับ 1 : 5 วีระวัฒน์ วรณกุล และคณะ (2566) ผังดินอัดจากดินลมหอบ ใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ : ดิน เท่ากับ 1 : 6 ; ภัทรนันท์ ทักขนันท์ (2549) ผังดินอัดจากเศษซากอาคาร ใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ : ดิน เท่ากับ 1 : 5 และ เอกสิทธิ์ เทียนมาศ และคณะ (2564) อีฐดินดิบผสมปูนซีเมนต์และใยมะพร้าว ใช้อัตราส่วนปูนซีเมนต์ : ดิน เท่ากับ 1 : 4) โดยปริมาตรน้ำเริ่มที่ 9 – 20 % ดัง Table 1 – 3

Table 1 Mix design for laterite rammed earth test specimens.

Sample	Soil (kg.)	Laterite (kg.)	White Portland Cement (kg.)	Water
A-1	-	5.00	1.00	9 %
A-2	-	5.00	1.00	10 %
A-3	-	5.00	1.00	11 %
A-4	-	5.00	1.00	13 %

Table 2 Mix design for marble powder rammed earth test specimens.

Sample	Soil (kg.)	Marble Powder (kg.)	White Portland Cement (kg.)	Water
D-1	3.00	2.00	1.00	11 %
D-2	3.00	2.00	1.00	13 %
D-3	3.00	2.00	1.00	15 %
D-4	3.00	2.00	1.00	17 %

Table 3 Mix design for sugarcane bagasse ash rammed earth test specimens.

Sample	Soil (kg.)	Sugarcane bagasse ash (kg.)	White Portland Cement (kg.)	Water
B-1	4.00	1.00	1.00	13 %
B-2	4.00	1.00	1.00	15 %
B-3	4.00	1.00	1.00	17 %
B-4	4.00	1.00	1.00	20 %

2) การเตรียมส่วนผสมและขึ้นรูปตัวอย่างทดสอบจากส่วนผสม Table 1 – 3 ทำการขึ้นรูปด้วยวิธีการตักจำนวน 3 ชั้น ๆ ละ 25 ครั้ง ตามมาตรฐานการบดอัดดิน (D 1140 - 54 Test Method for Laboratory Compaction

Characteristics of Soil Using Standard Effort) ให้ได้ตัวอย่างทดสอบ ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง (d) 10.00 ซม. ความสูง (h) 11.50 ซม. ทำการบ่มในอากาศเป็นระยะเวลา 28 วัน เพื่อรอการทดสอบต่อไป

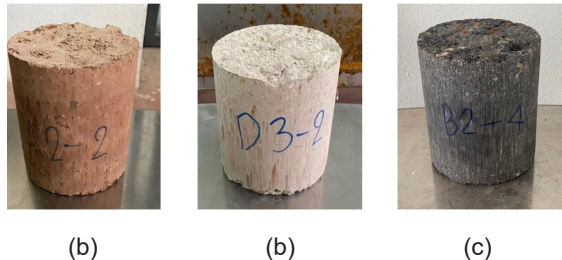


Figure 2 Rammed earth test specimens from local materials

(a) laterite rammed earth test specimens

(b) marble powder rammed earth test specimens

(c) sugarcane bagasse ash rammed earth test specimens

4. วิธีการทดสอบ

1) ความหนาแน่น (Density) สามารถหาได้จากการนำตัวอย่างทดสอบมาทำการวัดขนาด และชั่งหามวล ค่าความหนาแน่นคำนวณได้จากสมการ

$$\rho = m / V$$

เมื่อ ρ คือ ความหนาแน่น, กก./ลบ.ม.

m คือ มวล, กก.

V คือ ปริมาตรที่ได้จากการวัด, ลบ.ม.

2) การดูดซึมน้ำ (Absorption) สามารถบอกถึงความคงทนของตัวอย่างทดสอบ นำตัวอย่างทดสอบที่ได้มาแช่น้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากนั้นนำมาชั่งน้ำหนักเปียก แล้วนำไปอบแห้งเป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำมาชั่งน้ำหนักแห้งอบแห้ง ทำการคำนวณหาร้อยละการดูดซึมน้ำ อ้างอิงตามมาตรฐาน มอก.109-2517 และ ASTM C 140-70 (ASTM International, 2026a)

$$\text{ร้อยละการดูดซึมน้ำ} = \frac{W_w - W_s}{W_s} \times 100$$

เมื่อ W_w คือ น้ำหนักหลังแช่น้ำ, กก.

W_s คือ น้ำหนักที่อบแห้ง, กก.

3) ค่ากำลังต้านแรงอัด อ้างอิงมาตรฐาน ASTM C39 (ASTM International, 2026b) ทดสอบด้วยเครื่อง Universal Testing Machine สำหรับค่าความต้านแรงอัดสามารถหาได้จากอัตราส่วนระหว่างแรงอัดต่อพื้นที่รับแรง มีหน่วยเป็น กก./ตร.ซม. สามารถคำนวณได้จากสมการ

$$\sigma = P/A$$

เมื่อ σ คือ กำลังรับแรงอัด, กก./ตร.ซม

P คือ แรงอัดสูงสุด, กก.

A คือ พื้นที่รับแรงอัด, ตร.ซม.



Figure 3 Compressive strength test

4) การทดสอบชะล้าง ใช้เครื่องฉีดน้ำที่มีแรงดันน้ำ 80 บาร์ ระยะห่างในการยิงฉีดน้ำ 1 เมตร ระยะเวลาในการฉีดน้ำ 60 วินาที เพื่อตรวจสอบความคงทนของตัวอย่าง โดยรายงานผลเป็นค่าความสึกของพื้นผิวที่ถูกชะล้าง



Figure 4 Erosion resistance test

ผลการทดลองและอภิปรายผล

1) ปริมาณความชื้นที่เหมาะสมที่ทำให้ตัวอย่างทดสอบผนังดินอัดแต่ละประเภทมีค่าความหนาแน่นสูงที่สุด โดยใช้วิธีการทดสอบการบดอัดดินตามมาตรฐาน ได้ผลการทดสอบ ดังนี้

- ผนังดินอัดจากศิลาแลง ที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 12.00 ส่งผลให้ตัวอย่างทดสอบมีความหนาแน่นสูงที่สุด มีค่าเท่ากับ 2.17 กก./ลบ.ซม.

- ผนังดินอัดผสมผงหินอ่อน พบว่า ที่ปริมาณความชื้นร้อยละ 16.00 ส่งผลให้ตัวอย่างทดสอบมีความหนาแน่นสูงที่สุด มีค่าเท่ากับ 1.86 กก./ลบ.ซม.

- ผงดินอัดผสมซีเมนต์ย่อย พบว่า ที่ปริมาณความชื้น ร้อยละ 18.00 ส่งผลให้ตัวอย่างทดสอบมีความหนาแน่นสูงสุด มีค่าเท่ากับ 1.49 ก./ลบ.ซม.

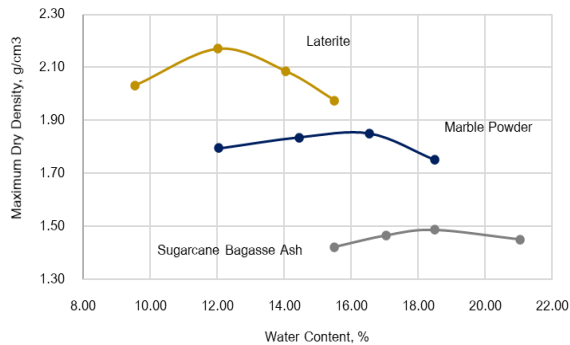


Figure 5 Optimum moisture content for specimens from local materials

2) สมบัติทางวิศวกรรมของผงดินอัดจากวัสดุท้องถิ่น

2.1 ลักษณะพื้นผิว เมื่อพิจารณาลักษณะทาง

กายภาพด้วยการสังเกต พบว่า ตัวอย่างทดสอบจะมีลักษณะพื้นผิวและสีที่แตกต่างกันอย่างชัดเจน เช่น ผงดินอัดจากศิลาแลงมีสีส้มแดง และมีน้ำหนักที่มากกว่าเมื่อเทียบกับตัวอย่างทดสอบอื่น ผงดินอัดผสมผงหินอ่อนมีสีน้ำตาลอมขาว เนื่องจากสีจากผงหินอ่อน ในขณะที่ผงดินอัดผสมซีเมนต์ย่อยมีสีดำน้ำหนักเบา และมีผิวที่เรียบเนียนกว่าตัวอย่างทดสอบอื่น ดังนั้น จะเห็นได้ว่าผงดินอัดจากวัสดุท้องถิ่นทั้ง 3 ประเภทมีความแตกต่างกันไปตามชนิดของวัสดุที่นำมาผสม ดัง Figure 6

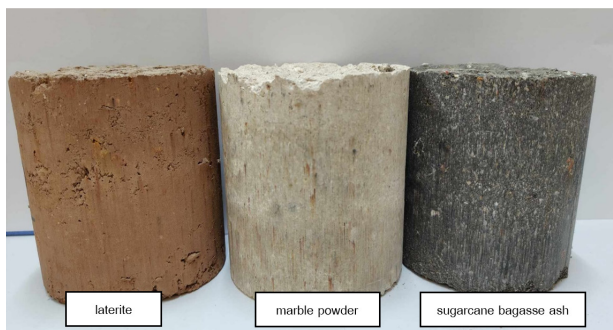


Figure 6 Rammed earth test specimens

2.2 ค่าความหนาแน่น ทำการทดสอบกลุ่มละ 3 ตัวอย่าง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย พบว่า ตัวอย่างทดสอบผงดินอัดจากศิลาแลง, ผงหินอ่อน และซีเมนต์ย่อย มีค่าความหนาแน่นเฉลี่ยเท่ากับ 2.15 ± 0.12 , 1.90 ± 0.05 และ 1.59 ± 0.04 ก./ลบ.ซม. ตามลำดับ จากผลการวิจัยจะเห็นได้ว่า ค่าความหนาแน่นของ

ตัวอย่างทดสอบมีค่าแตกต่างกัน เนื่องจากค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุที่ต่างกัน ซึ่งสอดคล้องกับค่าความถ่วงจำเพาะของวัสดุท้องถิ่นที่นำมาใช้ ดัง Figure 7

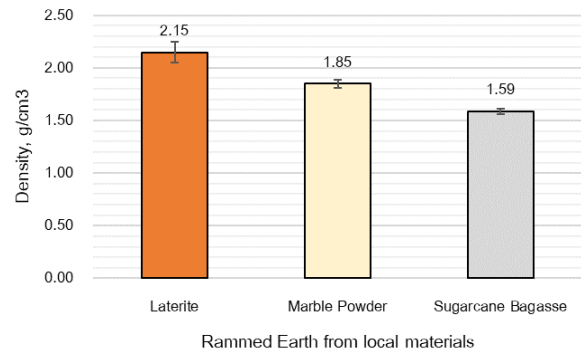


Figure 7 Density test for specimens from local materials

2.3 ความสามารถในการดูดซึมน้ำ ทำการ

ทดสอบกลุ่มละ 3 ตัวอย่าง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย พบว่า

ผงดินอัดจากศิลาแลงมีค่าต่ำสุด (ร้อยละ 7.16 ± 0.35) รองมาผงดินอัดผสมผงหินอ่อน (ร้อยละ 10.51 ± 0.57) ในขณะที่ตัวอย่างทดสอบผงดินอัดผสมซีเมนต์ย่อยมีการดูดซึมน้ำสูงที่สุด (ร้อยละ 17.65 ± 0.65) เนื่องจากผงดินอัดผสมซีเมนต์ย่อยมีอัตราส่วนช่องว่างและความหนาแน่นน้อยจึงดูดซึมน้ำได้มาก อีกทั้งซีเมนต์ย่อยจัดเป็นวัสดุธรรมชาติ มีองค์ประกอบประเภทอินทรีย์วัตถุที่ดูดซึมน้ำได้ดีจึงส่งผลให้ตัวอย่างทดสอบมีค่าดูดซึมน้ำมากตามไปด้วย (ภูษิต เลิศวัฒนารักษ์ และอัญชิสา สันติจิตโต, 2555; ภูษิต เลิศวัฒนารักษ์ และกนกวรรณ มะสุวรรณ, 2558) ดัง Figure 8

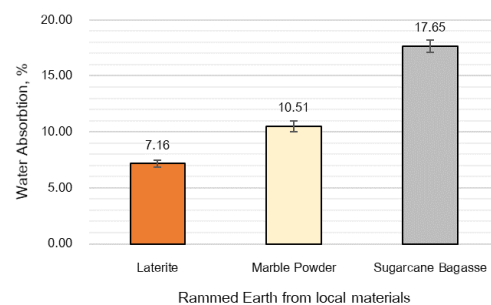


Figure 8 Water absorption test for specimens from local materials

เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน IS 1725 (Bureau of Indian Standards, 1982) กำหนดให้การดูดซึมน้ำไม่ควรเกินร้อยละ 15 ภายใน 24 ชั่วโมง พบว่า ผงดินอัดผสมซีเมนต์ย่อยมีค่าการดูดซึมน้ำที่สูงกว่ามาตรฐานซึ่งอาจทำให้วัสดุเสื่อม

สภาพเร็วขึ้น และส่งผลต่อการคงรูปและความแข็งแรง ในขณะที่พื้นดินอัดจากศิลาแลง และผงหินอ่อนมีค่าการดูดซึมน้ำที่ต่ำกว่าค่ามาตรฐานและถือว่าอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้

2.4 การทดสอบชะล้างด้วยน้ำ พบว่า ตัวอย่างทดสอบพื้นดินอัดจากศิลาแลง และพื้นดินอัดผสมผงหินอ่อนในทุกอัตราส่วนผสมมีการถูกชะล้างและสูญเสียเนื้อดินเพียงเล็กน้อย ในขณะที่ตัวอย่างทดสอบพื้นดินอัดผสมซีเมนต์อ้อยมีการสูญเสียเนื้อดินเป็นวงกว้าง ความลึกของเนื้อดินที่ถูกชะล้างลงไปต่างกันขึ้นกับความหนาแน่นของตัวอย่างทดสอบ โดยตัวอย่างที่มีความหนาแน่นมากการถูกชะล้างจะมีค่าน้อยตามไปด้วย ดัง Figure 9



Figure 9 Erosion resistance test for specimens from local materials

2.5 กำลังรับแรงอัด ทำการทดสอบกลุ่มละ 3 ตัวอย่าง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย พบว่า ตัวอย่างทดสอบพื้นดินอัดจากศิลาแลง สามารถรับกำลังอัดได้สูงที่สุด เท่ากับ 70.50 ± 7.00 กก./ตร.ซม. รองมาพื้นดินอัดผสมผงหินอ่อน เท่ากับ 38.50 ± 2.63 กก./ตร.ซม. ในขณะที่ตัวอย่างทดสอบพื้นดินอัดผสมซีเมนต์อ้อย สามารถรับกำลังอัดได้น้อยที่สุด เท่ากับ 22.50 ± 2.73 กก./ตร.ซม. ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบความหนาแน่น โดยตัวอย่างทดสอบที่มีความหนาแน่นมากกว่าจะมีความแข็งแรงและมีกำลังรับแรงอัดที่สูงกว่า เนื่องจากอนุภาคภายในวัสดุอยู่ใกล้กันมาก ส่งผลให้วัสดุมีความต้านทานต่อการถูกบีบอัดมากขึ้น ดัง Figure 10

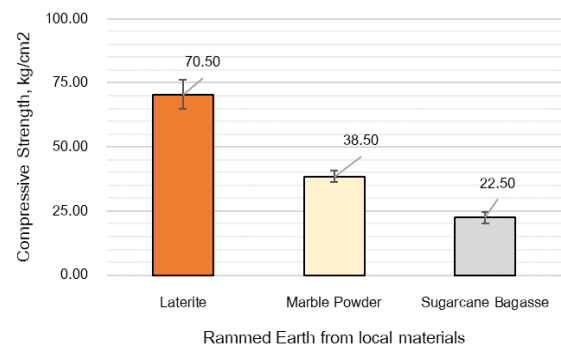


Figure 10 Compressive Strength Test for specimens from local materials

เมื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน IS 1725 (Bureau of Indian Standards, 1982) กำลังรับแรงอัดขั้นต่ำ 25.49 กก./ตร.ซม. พบว่า พื้นดินอัดจากศิลาแลง และผงหินอ่อนมีค่าสูงกว่ามาตรฐาน ในขณะที่พื้นดินอัดผสมซีเมนต์อ้อยมีค่าต่ำกว่ามาตรฐานเล็กน้อย ดังนั้น การเลือกใช้งานต้องพิจารณาให้เหมาะสมกับบริบทและข้อกำหนดต่อไป

3) การสำรวจความพึงพอใจต่อพื้นดินอัดจากวัสดุท้องถิ่น จังหวัดกำแพงเพชร ทำการขึ้นรูปพื้นดินอัดจากเศษวัสดุท้องถิ่น ขนาดความกว้าง 20 ซม. ความยาว 70 ซม. และความสูง 80 ซม. ดัง Figure 11

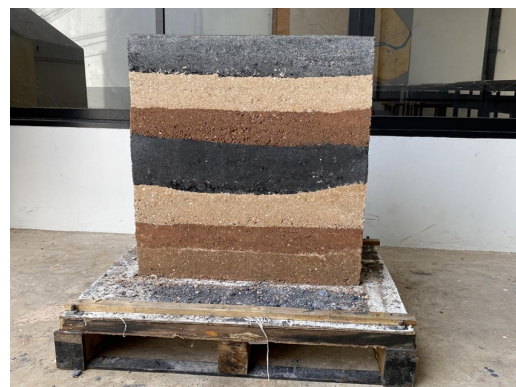


Figure 11 Rammed earth from local materials of Kamphaeng Phet Province.

จากผลการการสำรวจความพึงพอใจต่อพื้นดินอัดจากวัสดุท้องถิ่น จังหวัดกำแพงเพชร โดยทำการสำรวจจากนักวิชาการ สถาปนิก วิศวกร ผู้รับเหมา และบุคคลทั่วไป ได้ผลการศึกษาดัง Table 4 และ 5

Table 4 Please specify the status of the respondent

	Description	Frequency	%
1. Gender	☐ Male	36	72.00
	☐ Female	14	28.00
2. Age	☐ < 30 years	11	22.00
	☐ 31–40 years	26	52.00
	☐ 41–50 years	8	16.00
	☐ > 50 years	5	10.00
3. Occupation	☐ Academic	5	10.00
	☐ Engineer, Contractor, Architect, etc.	20	40.00
	☐ Others	25	50.00
4. Level of knowledge about rammed earth	☐ Low	28	56.00
	☐ Moderate	15	30.00
	☐ High	7	14.00

จาก Table 4 พบว่า ผู้ตอบแบบสอบถามส่วนใหญ่เป็นเพศชายร้อยละ 72 เพศหญิงร้อยละ 14 มีอายุระหว่าง 31-40 ปี เป็นกลุ่มบุคคลทั่วไปร้อยละ 50 รองมาเป็นกลุ่มวิศวกร ผู้รับเหมา สถาปนิก และช่าง ร้อยละ 40 และส่วนใหญ่ไม่มีความรู้เรื่องผนังดินอัด

Table 5 Survey results on satisfaction with rammed earth walls made from local materials in Kamphaeng Phet Province

No.	Satisfaction	Average	S.D.
1	The product has beautiful color and is attractive	4.56	0.50
2	The product is well-crafted with no cracks	4.00	0.55
3	The product is strong	4.50	0.55
4	The product is resistant to water erosion	4.38	0.53
5	The product is cost-effective	4.30	0.51
6	The product is reasonably priced	4.08	0.35
7	Overall satisfaction with rammed earth walls from local materials	4.23	0.65
	Summary	4.29	0.56

จากผลการสำรวจ พบว่า ความพึงพอใจโดยเฉลี่ยมีค่าเท่ากับ 4.29 ± 0.56 เมื่อพิจารณาในรายประเด็น พบว่าผลิตภัณฑ์มีสี ความสวยงาม และความดึงดูดใจ มีค่าความพึงพอใจสูงสุด เท่ากับ 4.56 ± 0.50 บ่งบอกถึงการออกแบบ

และรูปลักษณะเป็นจุดแข็งของผนังดินอัดจากวัสดุท้องถิ่น โดยอาจจะเป็นผลจากการใช้วัสดุท้องถิ่นที่มีลักษณะเฉพาะตัวและเป็นเอกลักษณ์ รองลงมา คือ ผลิตภัณฑ์ที่มีความแข็งแรง เท่ากับ 4.50 ± 0.55 ผลิตภัณฑ์ที่มีความคงทนต่อการชะล้างด้วยน้ำ เท่ากับ 4.38 ± 0.53 ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีความคุ้มค่าคุ้มทุน เท่ากับ 4.30 ± 0.51 ความพึงพอใจรวมต่อผนังดินอัดจากวัสดุท้องถิ่น เท่ากับ 4.23 ± 0.65 ผลิตภัณฑ์ที่ได้มีราคาเหมาะสม เท่ากับ 4.08 ± 0.35 และผลิตภัณฑ์ที่มีความประณีต ไม่มีรอยแตกร้าวค่าความพึงพอใจต่ำที่สุด เท่ากับ 4.00 ± 0.55 เนื่องจากตัวชิ้นงานที่ขึ้นรูปจริงยังมีลักษณะผิวบางส่วนที่ยังไม่ค่อยเรียบเนียน ถ้าปรับปรุง/พัฒนาส่วนนี้ได้ชิ้นงานจะมีความสมบูรณ์มากขึ้น อย่างไรก็ตามด้านความทนทานต่อการชะล้าง แม้คะแนนในด้านนี้จะค่อนข้างดี (4.38 ± 0.53) แต่สามารถพัฒนาให้ผนังมีความทนทานต่อสภาพอากาศที่รุนแรงได้มากขึ้น เช่น การใช้วัสดุหรือการเคลือบผิวที่ช่วยเพิ่มความทนทาน

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

สรุปผลการทดสอบสมบัติทางกายภาพและทางกลของผนังดินอัดจากวัสดุท้องถิ่น พบว่า การใช้วัสดุผสมเพิ่มที่แตกต่างกันส่งผลต่อสมบัติต่างๆ อย่างมีนัยสำคัญ โดยผนังดินอัดจากศิลาแลงมีสีส้มแดง และมีน้ำหนักที่มากกว่าเมื่อเทียบกับตัวอย่างทดสอบอื่น ผนังดินอัดผสมผงหินอ่อนมีสีน้ำตาลอมขาว เนื่องจากสีจากผงหินอ่อน ในขณะที่ผนังดินอัดผสมซีเมนต์มีสีเทา มีน้ำหนักเบา และมีผิวที่เรียบเนียนกว่าตัวอย่างทดสอบอื่น

เมื่อวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติในรูปแบบค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน พบว่าในด้านกำลังต้านทานแรงอัดตัวอย่างทดสอบผนังดินอัดจากศิลาแลง สามารถรับกำลังอัดได้สูงสุด โดยมีค่าเฉลี่ยอยู่ที่ 70.50 ± 7.00 กก./ตร.ซม. รองลงมาคือ ผนังดินอัดผสมผงหินอ่อน มีค่ากำลังอัดเฉลี่ย 38.50 ± 2.63 กก./ตร.ซม. ในขณะที่ผนังดินอัดผสมซีเมนต์มีค่ากำลังอัดเฉลี่ยต่ำที่สุดอยู่ที่ 22.50 ± 2.73 กก./ตร.ซม.

ในส่วนของความหนาแน่น ตัวอย่างทดสอบผนังดินอัดจากศิลาแลง มีค่าเฉลี่ยสูงสุดที่ 2.15 ± 0.12 ก./ลบ.ซม. และด้านการดูดซึมน้ำ ผนังดินอัดผสมซีเมนต์มีอัตราการดูดซึมน้ำสูงสุดที่ร้อยละ 17.65 ± 0.65 ข้อมูลทางสถิติดังกล่าวแสดงให้เห็นถึงการกระจายตัวของข้อมูลที่มีความเสถียร ซึ่งยืนยันได้ว่าผนังดินอัดจากศิลาแลงมีความสม่ำเสมอของเนื้อวัสดุและมีศักยภาพสูงที่สุดในการนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุก่อสร้างสำหรับงานโครงสร้างรับน้ำหนัก ในขณะที่ผนังดินอัดผสมซีเมนต์อาจเหมาะสมกับงานตกแต่งที่ไม่ได้เน้นการรับน้ำหนัก

Table 6 Summary of performance test results for local rammed earth

specimens	Density (g./cm ³)	Water absorption, (%)	Erosion Resistance	Compressive Strength (kg./cm ²)
Laterite 	2.15 ± 0.12	7.16 ± 0.35	- The specimen was tested without damage.	70.50 ± 7.00
Marble Powder 	1.90 ± 0.05	10.51 ± 0.57	- The specimen was tested and exhibited slight damage.	38.50 ± 2.63
Sugarcane Bagasse Ash 	1.59 ± 0.04	17.65 ± 0.65	- The specimen was tested and exhibited clear damage.	22.50 ± 2.73

เมื่อพิจารณาสมบัติของวัสดุท้องถิ่นที่ใช้ พบว่า ค่าความถ่วงจำเพาะมีความสำคัญในการกำหนดความหนาแน่นของวัสดุ ซึ่งมีผลโดยตรงต่อกำลังต้านทานแรงอัด วัสดุที่มีความถ่วงจำเพาะสูง เช่น เศษศิลาแลง จะช่วยเพิ่มความหนาแน่นและกำลังต้านทานแรงอัดได้ดีกว่าวัสดุอื่น ๆ นอกจากนี้ เศษศิลาแลงยังมีสารประกอบ SiO_2 และ Fe_2O_3 ซึ่งเป็นสารที่มีบทบาทสำคัญในการเสริมความแข็งแรงและความทนทานของผนังดินอัด ทำให้ผนังดินอัดจากเศษศิลาแลงมีความต้านทานต่อแรงอัดได้ดีที่สุด

โดยผนังดินอัดจากศิลาแลง และผนังดินอัดผสมผงหินอ่อน มีค่ากำลังต้านทานแรงอัด และการดูดซึมน้ำผ่านตามเกณฑ์มาตรฐาน IS 1725 (Bureau of Indian Standards, 1982) ในขณะที่ผนังดินอัดผสมซีเมนต์มีค่าต่ำกว่าเกณฑ์มาตรฐาน อย่างไรก็ตามการเลือกใช้ผนังดินอัดเป็นวัสดุก่อสร้างเชิงสถาปัตยกรรมยังคงขึ้นอยู่กับความพึงพอใจในความเป็นธรรมชาติ สีสน ความสวยงาม และเสน่ห์เฉพาะตัวของวัสดุนั้นๆ

การวิเคราะห์ด้านความยั่งยืนและสิ่งแวดล้อม พบว่าการผลิตผนังดินอัดจากวัสดุท้องถิ่น ช่วยลดผลกระทบต่อ

สิ่งแวดล้อม เนื่องจากการใช้วัสดุท้องถิ่นช่วยลดการขนส่งและการใช้พลังงานในการผลิต ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของการลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจกและการใช้ทรัพยากรอย่างยั่งยืน นอกจากนี้ การใช้วัสดุท้องถิ่นในกระบวนการผลิตยังช่วยลดการพึ่งพาวัสดุก่อสร้างที่มีต้นทุนสูงและการใช้พลังงานมาก เช่น อิฐที่ต้องผ่านกระบวนการผลิตที่ใช้พลังงานสูงและมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

ในด้านการก่อสร้างผนังดินอัด ไม่จำเป็นต้องใช้แรงงานที่มีความเชี่ยวชาญสูง เนื่องจากการผลิตและการติดตั้งสามารถทำได้ง่ายและไม่ซับซ้อน ต่างจากการก่อผนังด้วยอิฐที่ต้องการช่างผู้มีความชำนาญและทักษะเฉพาะทางในการเรียงอิฐอย่างมีคุณภาพ การลดความจำเป็นในการใช้แรงงานที่มีทักษะสูงสามารถช่วยลดต้นทุนการก่อสร้างและเพิ่มความสามารถในการเข้าถึงการสร้างที่อยู่อาศัยในพื้นที่ต่าง ๆ

การใช้ผนังดินอัดจากวัสดุท้องถิ่นจึงสอดคล้องกับแนวทางการพัฒนาความยั่งยืน ซึ่งมุ่งเน้นการใช้ทรัพยากรอย่างมีประสิทธิภาพ ลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และเพิ่มความสามารถในการเข้าถึงทรัพยากรในการก่อสร้างที่ยั่งยืนและมีต้นทุนต่ำในระยะยาว

อย่างไรก็ตามงานวิจัยชิ้นนี้จะสมบูรณ์ยิ่งขึ้นถ้ามีการศึกษาสมบัติต่าง ๆ เพิ่มเติมเพื่อให้ได้ผลการทดสอบที่ละเอียดมากยิ่งขึ้น เช่น การศึกษาอุณหภูมิและความชื้นเพื่อให้เหมาะสมกับสภาพภูมิอากาศในแต่ละท้องถิ่น สำหรับการศึกษาในระดับขั้นต่อไปควรมีการประเมินผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม เช่น การประเมินเปรียบเทียบคาร์บอนฟุตพริ้นท์ของการใช้เศษวัสดุท้องถิ่นในการสร้างผนังดินอัดกับวัสดุก่อสร้างทั่วไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์วิจัยและนวัตกรรม และสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร ที่สนับสนุนด้านทุนวิจัย ประเภททุนสนับสนุนงานมูลฐาน ปี 2566 และคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร ที่เอื้อเพื่ออุปกรณ์การทดสอบ เครื่องมือมือทดสอบ และสถานที่ทำการทดสอบตลอดระยะเวลาของการทำการวิจัย

ผู้วิจัยหวังเป็นอย่างยิ่งว่างานวิจัยนี้เป็นประโยชน์ในการพัฒนาวัสดุก่อสร้างต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- ภูษิต เลิศวัฒนารักษ์ และกนกวรรณ มะสุวรรณ. (2558). การศึกษาคุณสมบัติในการกันเสียงของแผ่นไฟเบอร์ซีเมนต์ผสมเส้นใยธรรมชาติ. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.*, 38(1), 71–86.
- ภูษิต เลิศวัฒนารักษ์ และอัญชิสา สันติจิตโต. (2555). คุณสมบัติของวัสดุไฟเบอร์ซีเมนต์ผสมเส้นใยธรรมชาติจากเส้นใยมะพร้าวและเส้นใยปาล์มเพื่อวัสดุก่อสร้าง. *วารสารวิจัยและสาระสถาปัตยกรรม/การผังเมือง*, 9(1), 113–124.
- ภัทรนันท์ ทักชนนท์. (2549). *โครงการวิจัยและพัฒนาวัสดุก่อสร้างจากเศษซากอาคาร* [รายงานวิจัย]. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์.
- วีระวัฒน์ วรรณกุล, อนุชาติ ลีอนันต์ศักดิ์ศิริ และวรวิทย์ โพธิ์จันทร์. (2566). การพัฒนาดินลมหอบผสมซีเมนต์สำหรับการก่อสร้างผนังดินอัด กรณีศึกษาในพื้นที่จังหวัดขอนแก่น. *วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์ สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี (เพื่อการพัฒนาท้องถิ่น)*, 18(2), 25–37.
- เอกสิทธิ์ เทียนมาศ และประภัสสร ห่อทอง. (2567). การพัฒนาวัสดุก่อสร้างจากเศษศิลาแลงจังหวัดกำแพงเพชร. *การประชุมวิชาการคอนกรีตประจำปี ครั้งที่ 18*, 111–116.
- เอกสิทธิ์ เทียนมาศ, มาณพ ดันเคน, พัชรรัตน์ หารไชย, ศิริวัฒน์ แสนธรรมา และประภัสสร ห่อทอง. (2567). กระเบื้องหินทรายเทียมจากผงหินอ่อนพรานกระต่าย จังหวัดกำแพงเพชร. *วารสารวิชาการเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและวิศวกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม*, 6(3), 288–301.
- เอกสิทธิ์ เทียนมาศ, มาณพ ดันเคน, ชนะชัย เขียวสด และปฏิภาณ ชัยพิทักษ์. (2564). การปรับปรุงสมบัติของอิฐดินดิบโดยใช้ปูนซีเมนต์และใยมะพร้าว. *การประชุมวิชาการและการนำเสนอผลงานวิจัยระดับชาติเครือข่ายบัณฑิตศึกษา มหาวิทยาลัยราชภัฏภาคเหนือ (GNRU) ครั้งที่ 21*, 149–163.
- ASTM International. (2026a). *ASTM C140/C140M-26: Standard test methods for sampling and testing concrete masonry units and related units*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0140_C0140M-26
- ASTM International. (2026b). *ASTM C39/C39M-26: Standard test method for compressive strength of cylindrical concrete specimens*. ASTM International. https://doi.org/10.1520/C0039_C0039M-26
- Bureau of Indian Standards. (1982). *IS 1725:1982. Specification for soil based blocks used in general building construction* (1st revision). Bureau of Indian Standards.

ศักยภาพของ *Alcaligenes faecalis* No.4 ในการบำบัด Bisphenol A และสารประกอบอินทรีย์ในน้ำเสียจากท่าอากาศยาน

The potential of *Alcaligenes faecalis* No.4 in the treatment of Bisphenol A and organic compounds in airport wastewater

ชญาณัฐ วิทยาภิรมย์¹, ปิยะรัตน์ ปรีย์มาโนช², และนารัตช์พร นวลสวรรค์^{3*}

Chayanid Witthayaphirom¹, Piyarat Premanoch², and Nararatchporn Nuansawan^{3*}

Received: 25 February 2025 ; Revised: 19 June 2025 ; Accepted: 15 July 2025

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินศักยภาพของ *Alcaligenes faecalis* No.4 (*A. faecalis* No.4) ร่วมกับตะกอนจุลินทรีย์ (Sludge) จากระบบกำจัดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสแบบชีวภาพ (BNR) ในการบำบัดน้ำเสียจากท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ โดยเปรียบเทียบ 4 ชุดการทดลอง ได้แก่ ชุดควบคุม ชุดเติมตะกอนจุลินทรีย์ ชุดเติม *A. faecalis* No.4 และชุดเติมทั้งตะกอนจุลินทรีย์ร่วมกับ *A. faecalis* No.4 วิเคราะห์คุณภาพน้ำ ได้แก่ ความเป็นกรด-ด่าง (pH), ออกซิเจนละลายน้ำ (DO), ของแข็งแขวนลอย (SS), ความต้องการออกซิเจนทางชีวเคมีของสารอินทรีย์ที่ละลายน้ำ (sBOD), ความต้องการออกซิเจนทางเคมี (COD), ไนโตรเจนเจลาห์ทั้งหมด (TKN), แอมโมเนีย (NH₃) และ บิสฟีนอล เอ (BPA) พร้อมวิเคราะห์ข้อมูลด้วย One-way ANOVA ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ $p < 0.05$ ผลการศึกษาพบว่า *A. faecalis* No.4 มีการเจริญเติบโตได้ดี โดยมีความเข้มข้นเริ่มต้น 4.4×10^{13} cells/mL และเมื่อใช้ร่วมกับตะกอนจุลินทรีย์สามารถเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัด sBOD, COD, NH₃ และ BPA ได้ดีกว่าการใช้เพียงจุลินทรีย์หรือตะกอนเพียงอย่างเดียว ค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งของการย่อยสลายสารอินทรีย์อยู่ในช่วง $0.02\text{--}0.03\text{ h}^{-1}$ ขณะที่อัตราการเจริญเติบโตของ *A. faecalis* No.4 และการใช้ร่วมกับตะกอนจุลินทรีย์มีค่าเท่ากับ 0.1267 h^{-1} และ 0.1463 h^{-1} ตามลำดับ และมีค่าคงที่การย่อยสลายทางชีวภาพอยู่ในช่วง $0.0110\text{--}0.3040\text{ h}^{-1}$ ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่า *A. faecalis* No.4 ร่วมกับตะกอนจุลินทรีย์มีศักยภาพในการเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียท่าอากาศยาน และมีความเหมาะสมสำหรับการพัฒนาและประยุกต์ใช้ในระบบบำบัดน้ำเสียในอนาคต

คำสำคัญ: *Alcaligenes faecalis* No.4, ตะกอนจุลินทรีย์, น้ำเสียท่าอากาศยาน, BPA, การย่อยสลายทางชีวภาพ

Abstract

This study evaluated the potential of *Alcaligenes faecalis* No.4 (*A. faecalis* No.4) in combination with activated sludge from the biological nutrient removal (BNR) process to enhance the treatment efficiency of airport wastewater. Four experimental treatments were investigated: a control, activated sludge alone, *A. faecalis* No.4 alone, and a combination of activated sludge and *A. faecalis* No.4. Water quality parameters, including pH, dissolved oxygen (DO), suspended solids (SS), soluble biochemical oxygen demand (sBOD), chemical oxygen demand (COD), total Kjeldahl nitrogen (TKN), ammonia (NH₃), and bisphenol A (BPA), were analyzed. Statistical differences among treatments were evaluated

¹ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สิ่งแวดล้อม, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยรามคำแหง

² ภาควิชาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, คณะวิศวกรรมศาสตร์, มหาวิทยาลัยรามคำแหง

³ ภาควิชาเทคโนโลยีวิศวกรรมโยธาและสิ่งแวดล้อม, วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม, มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ

¹ Department of Environmental Science, Faculty of Science, Ramkhamhaeng University

² Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Ramkhamhaeng University

³ Department of Civil and Environmental Engineering Technology, College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North Bangkok

* Corresponding author: Nararatchporn Nuansawan, Email: Nararatchporn.n@cit.kmutnb.ac.th

using one-way ANOVA at a significance level of $p < 0.05$. The results demonstrated that *A. faecalis* No.4 exhibited rapid growth with an initial cell concentration of 4.4×10^{13} cells/mL. The combined application of *A. faecalis* No.4 and activated sludge achieved higher removal efficiencies for sBOD, COD, NH_3 , and BPA than either treatment alone. The first-order degradation rate constant for organic matter ranged from 0.02 to 0.03 h^{-1} , while the microbial growth rates of *A. faecalis* No.4 alone and in combination with activated sludge were 0.1267 h^{-1} and 0.1463 h^{-1} , respectively. The biodegradation rate constants ranged from 0.0110 to 0.3040 h^{-1} , indicating enhanced biodegradation performance in the combined treatment. These findings suggest that the combined use of *A. faecalis* No.4 and activated sludge is a promising approach for improving airport wastewater treatment and has potential for application in full-scale biological treatment systems.

Keywords: *Alcaligenes faecalis* No.4, activated sludge, airport wastewater, biodegradation, bisphenol A (BPA)

บทนำ

น้ำเสียจากท่าอากาศยานเป็นแหล่งกำเนิดมลพิษที่มีองค์ประกอบซับซ้อน เนื่องจากกิจกรรมต่างๆ ภายในท่าอากาศยาน เช่น การซ่อมบำรุงอากาศยาน การล้างเครื่องบิน การดำเนินงานในคลังสินค้า สำนักงานโรงแรม ครุภัณฑ์อาคารผู้โดยสาร และบริการอาหาร ล้วนมีส่วนในสร้างมลพิษทางน้ำ น้ำเสียจากท่าอากาศยานประกอบด้วยสารมลพิษหลายประเภท รวมถึงสารอินทรีย์คาร์บอนในรูปสารอินทรีย์ที่สามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ (BOD) สารอินทรีย์ที่ต้องการออกซิเจนในการย่อยสลายทางเคมี (COD) สารอินทรีย์ไนโตรเจนในรูปของแอมโมเนีย (NH_3) และสารอินทรีย์ที่มีความคงทนสูง เช่น บิสฟีนอลเอ (BPA) จัดอยู่ในกลุ่มสารก่อกรณต่อมไร้ท่อที่ก่อให้เกิดมะเร็ง สามารถพบในพลาสติกผลิตภัณฑ์ปิโตรเคมีและอุปกรณ์อิเล็กทรอนิกส์ สามารถเข้าสู่ร่างกายจากกิจกรรมการล้างเครื่องบินและขยะ หากน้ำเสียเหล่านี้ไม่ได้รับการบำบัดอย่างเหมาะสม อาจส่งผลกระทบต่อแหล่งน้ำและระบบนิเวศโดยรอบ รวมถึงเป็นอันตรายต่อสุขภาพของมนุษย์และสิ่งมีชีวิตในแหล่งน้ำ

สำหรับการบำบัดน้ำเสียท่าอากาศยานในประเทศไทย เช่น ท่าอากาศยานสุวรรณภูมิใช้ระบบบำบัดแบบ Biological Nutrient Remover (BNR) เป็นระบบบำบัดทางชีวภาพ ซึ่งความสามารถในการบำบัดน้ำเสียเฉลี่ย $18,000 \text{ m}^3/\text{d}$ (Progress technology consultants, 2021) ระบบนี้ยังไม่สามารถบำบัดสารอาหารไนโตรเจนได้อย่างมีประสิทธิภาพตามเกณฑ์มาตรฐานที่กำหนด (Koeina, 2008) ทำให้จำเป็นต้องพัฒนาระบบบำบัดเพิ่มเติมเพื่อลดสารอินทรีย์ที่ซับซ้อน เช่น NH_3 และ BPA ที่มักไม่ถูกกำจัดได้อย่างสมบูรณ์ในระบบบำบัดแบบดั้งเดิม อย่างไรก็ตาม ประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพขึ้นอยู่กับองค์ประกอบของตะกอนจุลชีวะและชนิดของจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในระบบ การใช้ระบบตะกอนจุลชีวะร่วมกับจุลินทรีย์เฉพาะทาง เช่น *Alcaligenes faecalis* No. 4 (A.

faecalis No. 4) ซึ่งมีศักยภาพในการกำจัดสารอินทรีย์และไนโตรเจนสูง ได้รับความสนใจการศึกษาพร้อมกับระบบบำบัดน้ำเสีย *A. faecalis* No. 4 มีความสามารถในการทำปฏิกิริยาไนตริฟิเคชันและดีไนตริฟิเคชันแบบใช้ออกซิเจน (aerobic denitrification) ซึ่งช่วยลดปริมาณแอมโมเนีย (NH_3) และไนเตรท (NO_3^-) ในน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ แบคทีเรียชนิดนี้จึงมีศักยภาพในการแก้ปัญหาเพื่อกำจัดสารอินทรีย์โดยเฉพาะไนโตรเจน คาร์บอน รวมถึงบิสฟีนอลเอ (BPA) (Joo *et al.*, 2005; 2006; 2007; Nuansawan *et al.*, 2018; 2023a; 2023b) การศึกษานี้จึงมุ่งเน้นศักยภาพของ *A. faecalis* No. 4 เมื่อใช้ร่วมกับตะกอน (sludge) ในระบบบำบัดน้ำเสียของท่าอากาศยาน โดยคาดหวังว่าจะช่วยเพิ่มประสิทธิภาพในการกำจัดมลพิษในน้ำเสีย เช่น sBOD, COD, NH_3 , และ BPA ซึ่งเป็นสารมลพิษที่อาจมีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและสุขภาพมนุษย์ และจะเป็นประโยชน์ในการพัฒนาระบบบำบัดน้ำเสียให้มีประสิทธิภาพอย่างยั่งยืน

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการวิจัย

1. แหล่งตัวอย่างน้ำเสีย

น้ำเสียใช้น้ำเสียก่อนเข้าระบบบำบัดจากท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ

2. ตะกอน

ตะกอน (Sludge) จากระบบเดิมอากาศในกระบวนการ BNR ของท่าอากาศยานสุวรรณภูมิ (Figure 1) พบว่ามีลักษณะสีน้ำตาลเข้ม เมื่อตรวจสอบด้วยกล้องจุลทรรศน์พบว่าตะกอนมีการรวมตัวกันเป็นกลุ่มก้อนของจุลินทรีย์อย่างชัดเจน ซึ่งแสดงถึงการเกิดฟล็อก (floc formation) ได้ดี ภายในฟล็อกมีทั้งจุลินทรีย์ลักษณะเป็นเส้นใยและทรงกลม แสดงให้เห็นว่าสภาพน้ำในระบบมีสารอินทรีย์เพียงพอสำหรับการดำรงชีวิต

และการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ นอกจากนี้ยังพบว่าตะกอนกระจายตัวอย่างสม่ำเสมอ โดยไม่มีการจับตัวแน่นหรือหลวมจนเกินไป ซึ่งบ่งชี้ว่าสภาวะของระบบบำบัดน้ำเสียอยู่ในเกณฑ์สมดุลและมีประสิทธิภาพในการบำบัดที่ดี (Figure 2) โดยปกติลักษณะตะกอนที่ดีจะมีสีน้ำตาลเข้มคล้ายสีของช็อคโกแลต หากตะกอนมีสีดำนวล แสดงว่าขาดออกซิเจนจนเกิดการเน่า จำเป็นต้องเพิ่มการเติมอากาศ ในการทดลองได้นำตะกอนจากทำอากาศยานทำการเติมอากาศ เพื่อกระตุ้นตะกอนพร้อมสำหรับทำการทดลอง



Figure 1 Sludge from the treatment system of Suvarnabhumi Airport

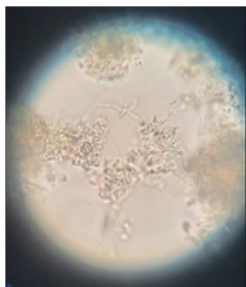


Figure 2 Sludge from the treatment system of Suvarnabhumi Airport (under a microscope)

3. ขั้นตอนและกระบวนการ

3.1 การเพาะเลี้ยง *A. faecalis* No.4

เพาะเชื้อ *A. faecalis* No.4 ในอาหารสังเคราะห์ ประกอบด้วย $C_6H_5Na_3O_7 \cdot 2H_2O$, $(NH_4)_2SO_4$, K_2HPO_4 , KH_2PO_4 , $MgSO_4 \cdot 7H_2O$ และสารละลายแร่ธาตุรองปริมาณ 2 มิลลิกรัมเป็นองค์ประกอบหลัก โดยสารละลายแร่ธาตุรองถูกเตรียมจาก $C_{10}H_{14}N_2NaO_8 \cdot 2H_2O$, $ZnSO_4 \cdot 7H_2O$, $CaCl_2 \cdot 2H_2O$, $MnCl_2 \cdot 4H_2O$, $FeSO_4 \cdot 7H_2O$, $(NH_4)_6Mo_7O_{24} \cdot 4H_2O$, $CuSO_4 \cdot 5H_2O$ และ $CoCl_2 \cdot 6H_2O$ โดยมีค่า pH เท่ากับ 6.0 อาหารสังเคราะห์ถูกฆ่าเชื้อด้วยหม้อนึ่งแรงดันไอน้ำที่อุณหภูมิ $121^\circ C$ เป็นเวลา 20 นาที ก่อนนำไปใช้ ขั้นตอนโดยละเอียดสามารถดูได้ในงานวิจัยของ Joo *et al.* (2006) โดยนำมาขยาย

ด้วยเครื่องเขย่าที่อุณหภูมิ $30^\circ C$ ความเร็วรอบ 100 rpm เป็นเวลา 72 h (Shoda, 2015) จากนั้นหาจำนวนเซลล์ *A. faecalis* No. 4 ในอาหารแข็ง ด้วยอาหารเลี้ยงเชื้อ L agar ซึ่งเตรียมจาก peptone, NaCl, yeast และ agar (pH 7.0) เทใส่จานเพาะเชื้อ นำเข้าตู้อบเชื้อที่อุณหภูมิ $30^\circ C$ เป็นเวลา 72 ชั่วโมง และทำการนับจำนวนโคโลนีของ *A. faecalis* No.4 ที่มีลักษณะจำเพาะทางสัณฐานวิทยาหลังจากการบ่ม การเจริญเติบโตของ *A. faecalis* No.4 ได้รับการยืนยันและพบว่าเป็นไปตามเส้นโค้งการเจริญเติบโตแบบเอ็กโปเนนเชียล (exponential growth curve) ตามที่ได้อธิบายไว้ ดังสมการที่ (1)

$$X_t = X_0 e^{\mu t} \quad (1)$$

เมื่อ X_0 คือความเข้มข้นเซลล์เริ่มต้น (0) X_t คือความเข้มข้นตามเวลา (t) และ μ คืออัตราการเจริญเติบโตจำเพาะ (h^{-1})

3.2 การศึกษาความเป็นไปได้ในการนำ *A. faecalis* No.4 ไปใช้กับน้ำเสียทำอากาศยาน

เตรียมน้ำเสียจากทำอากาศยานปริมาตร 100 mL ในขวดรูปชมพู่สำหรับแต่ละชุดการทดลอง โดยดำเนินการทดลองทั้งหมด 3 ซ้ำ (triplicates) การทดลองนี้ใช้ กรัมน้ำหนักแห้ง (gram of Dry Weight: g DW) เป็นเกณฑ์สำหรับปริมาณจุลินทรีย์ที่เติมเข้าไปในระบบ โดยแบ่งชุดทดลองออกเป็น 4 กลุ่มได้แก่

1. ชุดควบคุม (Control)
2. ชุดที่เติมสลัดจ์จากทำอากาศยาน 1 g DW (Sludge)
3. ชุดที่เติม *A. faecalis* No.4 ปริมาณ 1 g DW (No.4)
4. ชุดที่เติมทั้งสลัดจ์จากทำอากาศยานและ *A. faecalis* No. 4 อย่างละ 1 g DW (Mixed)

ขวดรูปชมพู่ของแต่ละชุดทดลองถูกนำไปเขย่าด้วยเครื่องเขย่า (shaker) ที่อุณหภูมิ $30^\circ C$ ด้วยความเร็ว 100 รอบต่อนาที (rpm) และเก็บตัวอย่างน้ำเสียที่เวลา 0, 24, 48 และ 72 ชั่วโมง เพื่อวิเคราะห์คุณภาพน้ำ สำหรับการวิเคราะห์จำนวนเซลล์ของ *A. faecalis* No.4 จะดำเนินการเฉพาะในช่วงเวลา 72 ชั่วโมง จากนั้นนำผลการวิเคราะห์คุณภาพน้ำมาพล็อตกราฟระหว่างค่า $\ln(C_t/C_0)$ กับเวลาในการย่อยสลายเพื่อศึกษาพฤติกรรมการย่อยสลายของสารมลพิษในน้ำเสียโดยสมมติให้กระบวนการย่อยสลายเป็นไปตามแบบจำลองปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง (First-order kinetic model) ดังสมการที่ (2):

$$\ln(C_t/C_0) = -kt \quad (2)$$

เมื่อ C_0 , C_t (mg/L or $\mu\text{g/L}$) คือความเข้มข้นของสารมลพิษในน้ำเสียเริ่มต้นและในแต่ละช่วงเวลา ตามลำดับ t (h) คือระยะเวลาที่ใช้ในการย่อยสลาย และ k_t (h^{-1}) คือค่าคงที่อัตราเร็วของปฏิกิริยาอันดับที่หนึ่ง

4. การวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

วิเคราะห์คุณภาพน้ำ ประกอบด้วยพารามิเตอร์ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ออกซิเจนละลายน้ำ (DO) ของแข็งแขวนลอย (SS) บีโอดีละลายน้ำ (sBOD) ซีโอดี (COD) ไนโตรเจนในรูปที่เคเอ็น (TKN) และแอมโมเนีย (NH_3) ตาม Standard Methods for Examination of Water and Wastewater, 23th Edition (APHA, 2017) สำหรับการวิเคราะห์ บิสฟีนอล เอ (BPA) ใช้วิธีสกัดด้วยเฟสของแข็ง (Solid Phase Extraction, SPE) ทำการปรับสภาพ SPE cartridges โดยเติม methanol 10 mL ตามด้วยน้ำกลั่น 10 mL จากนั้นนำตัวอย่างน้ำที่ผ่านการกรองด้วยกระดาษกรองใยแก้ว GC/F แล้วผ่านเข้า SPE cartridges จนหมดหลังจาก cartridges แห้งแล้วทำการชะ โดยเติม methanol: dichloromethane (1:4) 15 mL ในหลอดทดลอง ทำการระเหยตัวอย่างโดยการเป่าด้วยไนโตรเจนและปรับปริมาตรด้วยการเติม methanol 1 mL จากนั้นกรองตัวอย่างที่ได้ด้วย membrane filter ใส่ใน amber glass vial ขนาด 2 mL เก็บไว้ที่อุณหภูมิ -20°C จนกระทั่งนำไปวิเคราะห์ด้วยเครื่อง GC-MS (Witthayaphirom *et al.*, 2020)

5. วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (one-way ANOVA) เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างกลุ่มทดลอง ณ เวลา 72 ชั่วโมง และทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยภายหลังการวิเคราะห์ด้วยวิธี Tukey's HSD โดยกำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ $p < 0.05$ ด้วยโปรแกรม SPSS version 26.0

ผลการทดลองและวิจารณ์ผลการทดลอง

1. การเพาะเลี้ยงเชื้อ *A. faecalis* No.4

เมื่อทำการเพาะเลี้ยง *A. faecalis* No.4 เป็นระยะเวลา 72 ชั่วโมง พบว่าเชื้อมีลักษณะสีชมพู (Figure 3) และจากการสังเกตด้วยกล้องจุลทรรศน์ พบว่าเซลล์มีการเจริญเติบโตเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว จนกระจายตัวอย่างทั่วทั้งพื้นที่การมองเห็น (Figure 4) ซึ่งสอดคล้องกับผลการนับเซลล์เริ่มต้นบนอาหารเลี้ยงเชื้อแบบแข็ง โดยพบว่าเชื้อเริ่มต้นมีความเข้มข้นเท่ากับ 4.4×10^{13} cell/mL



Figure 3 *A. faecalis* No.4

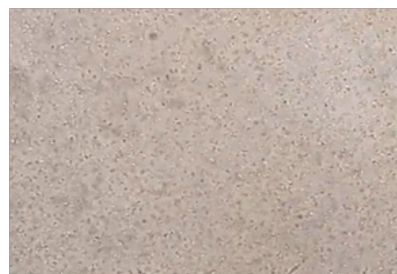


Figure 4 *A. faecalis* No.4 under the microscope.

2. ประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียท่าอากาศยาน

2.1 ลักษณะน้ำเสีย

ผลการตรวจวัดคุณลักษณะของน้ำเสียท่าอากาศยาน ก่อนเข้าระบบบำบัด แสดงดัง Table 1 พบว่าตัวอย่างน้ำเสียที่นำมาทดสอบค่า pH sBOD COD และ SS มีค่าต่ำกว่าค่ามาตรฐานที่ออกแบบไว้ แต่ ค่า TKN มีค่าเกินค่ามาตรฐานที่ออกแบบไว้

หลังจากนั้นนำมาศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดน้ำเสียท่าอากาศยาน โดยพารามิเตอร์ที่ทำการศึกษา ได้แก่ sBOD COD BPA และ NH_3 รวมถึงการเปลี่ยนแปลงของ DO และ pH ในน้ำเสียทั้ง 4 การทดลอง ดังนี้

Table 1 Preliminary data on wastewater from Suvarnabhumi Airport.

Parameters	Value of Untreated Wastewater	
	Standard (mg/L)	Characteristics (mg/L)
pH	6.5-9.5	6.7
DO	-	0.8
sBOD	400	296
COD	774	618
SS	300	272
TKN	70	89
NH_3	-	67
BPA*	-	45

หมายเหตุ * Unit $\mu\text{g/L}$

2.2 การบำบัดสารอินทรีย์

Biochemical Oxygen Demand (BOD) เป็นตัวชี้วัดภาระของสารอินทรีย์ในน้ำเสีย โดยแสดงค่าปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ต้องการใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ภายใต้สภาวะแอโรบิก (มีออกซิเจน) สำหรับ BOD₅ (5-day Biochemical Oxygen Demand) หมายถึงปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ต้องการในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย ภายใต้สภาวะควบคุมที่อุณหภูมิ 20°C เป็นระยะเวลา 5 วัน จาก Figure 5 แสดงค่าความเข้มข้นของ Soluble Biochemical Oxygen Demand (sBOD) ซึ่งเป็นค่าที่แสดงถึงปริมาณออกซิเจนที่จุลินทรีย์ใช้ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่อยู่ในรูปละลายน้ำ การแยกค่า sBOD ออกจาก BOD รวม (Total BOD) ช่วยให้สามารถประเมินภาระสารอินทรีย์ที่จุลินทรีย์สามารถย่อยสลายได้โดยตรงและทันทีได้อย่างแม่นยำยิ่งขึ้น เมื่อเปรียบเทียบผลการทดลองทั้ง 4 กลุ่ม พบว่าค่าความเข้มข้นของ sBOD ที่เวลา 0 และ 72 ชั่วโมง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยค่าความเข้มข้นเริ่มต้นเฉลี่ยอยู่ที่ประมาณ 220 mg/L และมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาการทดลอง ($p < 0.05$) (Table 2) ชุดทดลอง Control และ Sludge มีค่าความเข้มข้นของ sBOD ลดลงเหลือ 178 mg/L และ 51 mg/L ตามลำดับ หลังผ่านไป 72 ชั่วโมง คิดเป็นประสิทธิภาพการกำจัด 19.1% และ 76.8% ตามลำดับ

ในขณะที่ชุดทดลอง No.4 และ Mixed มีการลดลงของ sBOD อย่างรวดเร็วภายใน 24 ชั่วโมง โดยมีความเข้มข้นลดลงเหลือ 56 mg/L (คิดเป็น 74.5%) และ 76 mg/L (65.5%) ตามลำดับ และสามารถกำจัด sBOD ได้หมดภายในระยะเวลา 72 ชั่วโมง (100.0%) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า *A. faecalis* No.4 มีศักยภาพสูงในการเจริญเติบโตภายใต้สภาวะที่มีออกซิเจน และสามารถย่อยสลายสารอินทรีย์ประเภทคาร์บอนได้อย่างรวดเร็ว (Nuansawan *et al.*, 2023a; 2023b) นอกจากนี้ *A. faecalis* No.4 ยังสามารถทำงานร่วมกับตะกอนจุลินทรีย์จากระบบบำบัดน้ำเสียของท่าอากาศยานได้อย่างมีประสิทธิภาพ

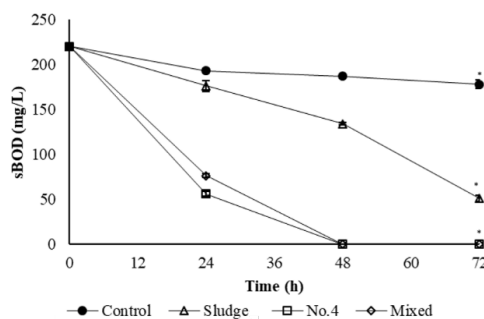


Figure 5 The reduction of sBOD under each condition

Note: * indicates a significant difference between the paired time (0 and 72 h) ($p < 0.05$)

Figure 6 แสดงการเปลี่ยนแปลงของความเข้มข้น COD ซึ่งมีค่าเริ่มต้นเฉลี่ยที่ 562 mg/L ภายในระยะเวลา 72 ชั่วโมง โดยเปรียบเทียบ 4 กลุ่มทดลอง (Control, Sludge, No.4 และ Mixed) พบว่าค่า COD ลดลงเหลือ 526 mg/L (ลดลง 10.3%), 452 mg/L (ลดลง 19.6%), 52 mg/L (ลดลง 90.8%) และ 37 mg/L (ลดลง 93.4%) ตามลำดับ ผลการทดลองชี้ว่าการทดลอง No.4 และ Mixed มีประสิทธิภาพในการลดค่า COD ได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับกลุ่ม Control และ Sludge ($p < 0.05$) (Table 2) แต่ไม่พบความแตกต่างระหว่างกลุ่ม No.4 และ Mixed ($p > 0.05$) (Table 2) ซึ่งแสดงให้เห็นว่า *A. faecalis* No.4 มีศักยภาพสูงในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสียท่าอากาศยานที่วัดในรูปของ COD การใช้ *A. faecalis* No.4 ร่วมกับ Sludge จากระบบบำบัดน้ำเสียยังช่วยส่งเสริมประสิทธิภาพของจุลินทรีย์พื้นถิ่นได้อย่างชัดเจน โดยเฉพาะในช่วงเวลาสั้น ๆ ทั้งนี้ *A. faecalis* No.4 เป็นจุลินทรีย์ที่มีการเจริญเติบโตได้ดีในสภาวะแอโรบิก และมีความสามารถในการย่อยสลายคาร์บอนอินทรีย์ได้อย่างรวดเร็ว (Nuansawan *et al.*, 2023a; 2023b) ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดลองในครั้งนี้

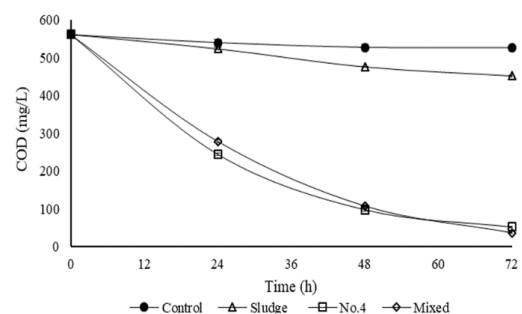


Figure 6 The reduction of COD under each condition

นอกจากนี้ ผลการบำบัด BPA (Figure 7) พบว่า โดยความเข้มข้นเริ่มต้นเฉลี่ยของ BPA เท่ากับ 45 µg/L และลดลงอย่างต่อเนื่องตลอดระยะเวลาการทดลอง 72 ชั่วโมง ทั้ง 4 การทดลอง Control เท่ากับ 41 µg/L (8.9%) Sludge เท่ากับ 30 µg/L (33.3%) 21 µg/L (53.3%) และ 17 µg/L (62.2%) ตามลำดับ โดยชุดทดลอง Mixed ให้ประสิทธิภาพการบำบัด BPA สูงที่สุด และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเปรียบเทียบกับชุด Control ($p < 0.05$) (Table 2) บ่งชี้ได้ว่า *A. faecalis* No.4 สามารถลดสาร BPA ได้ดีกว่า sludge และเมื่อนำมา Mixed ทำให้อัตราการบำบัด BPA ได้ดีกว่า sludge เพียงอย่างเดียว เมื่อเทียบอัตราการบำบัดของ *A. faecalis* No.4 และ Mixed กับ sludge พบว่าเพิ่มขึ้นถึง 1.60 เท่า และ 1.87 เท่า ตามลำดับ แสดงให้เห็นถึงความสามารถของ *A. faecalis* No.4

ช่วยสนับสนุน sludge ในระบบบำบัดน้ำเสียทำอากาศยานได้เป็นอย่างดี ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Shoda and Ishikawa (2015) และ Shoda and Ishikawa (2016) ที่ศึกษา *A. faecalis* No. 4 บำบัดน้ำเสียจากบริษัทเคมีภัณฑ์ และใช้ในการบำบัด น้ำเสียจากถ่านหิน (Coke Wastewater) เพื่อกำจัดฟีนอลที่มีความเข้มข้นสูง และ *A. faecalis* No.4 ร่วมกับ acclimated activated sludge (AS) สามารถบำบัด BPA ในน้ำสังเคราะห์ได้ 98.6% (Nuansawan *et al.*, 2023b)

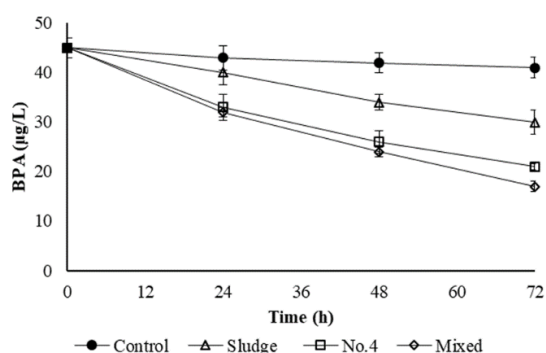


Figure 7 The reduction of BPA under each condition

2.3 การบำบัดแอมโมเนียในน้ำเสีย

Figure 8 ความเข้มข้นแอมโมเนีย (NH_3) เริ่มต้นเท่ากับ 55 mg/L พบว่าภายใน 72 ชั่วโมง Control และ Sludge เท่ากับ 54 mg/L ขณะที่ No.4 และ Mixed บำบัด NH_3 หมดอย่างรวดเร็วที่ 24 ชั่วโมง ($p < 0.05$) ซึ่ง Joo *et al.* (2007) ได้ศึกษาการบำบัด 290 mg/L ของแอมโมเนียม (NH_4^+) ด้วยการ mixed sludge กับ *A. faecalis* No.4 และ sludge พบว่าสามารถบำบัดได้ 100% และ 62% ตามลำดับ เนื่องจาก *A. faecalis* No.4 สามารถเกิดกระบวนการไนตริฟิเคชันแบบเฮเทอโรโทรฟิกและดีไนตริฟิเคชันแบบใช้ออกซิเจน (heterotrophic nitrification-aerobic denitrification) และช่วยเสริมให้แบคทีเรียบางสายพันธุ์ในตะกอนจุลินทรีย์ (sludge) สอดคล้องกับ Nuansawan *et al.* (2018) ที่พบว่า *A. faecalis* No.4 ช่วยเสริมการเติบโตของจุลินทรีย์ในน้ำเสีย นอกจากนี้ยังมี Joo *et al.* (2006) ได้ศึกษา *A. faecalis* No. 4 มาใช้เพื่อบำบัดน้ำเสียจากฟาร์มสุกรที่มี NH_4^+ สูงภายใต้สภาวะที่ใช้ ออกซิเจน พบว่า NH_4^+ ในน้ำเสียเกือบทั้งหมดถูกกำจัด และอัตราการกำจัด NH_4^+-N อยู่ที่ประมาณ 30 mg-N/L h ซึ่งสูงกว่าอัตราที่แบคทีเรียอื่นถึง 5–10 เท่า ในขณะที่การทดลองพบว่าอัตราการกำจัดอยู่ที่ 2.79 mg-N/L/h เนื่องจากการทดลองวัดทุก 24 h ดังนั้นหากทำการทดลองที่มี NH_3 น้อย ควรลดระยะเวลาการเก็บลงอีกจะได้ข้อมูลที่ละเอียดมากขึ้น และแบคทีเรียเป็นตัวการสำคัญในการลดไนโตรเจนในน้ำเสีย

(Yangen, 2003) ซึ่งงานวิจัยของ Sukhvibul (2022) ใช้น้ำเสียสังเคราะห์ความเข้มข้นแอมโมเนียในโตรเจนต่ำสามารถบำบัดแอมโมเนียให้หมดลงภายใน 4 ชั่วโมงและไม่พบไนโตรที่สะสมอยู่ในระบบตลอดการทดลอง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Desiredy *et al.* (2022) ทำการศึกษาอัตราการบำบัดน้ำเสียความเข้มข้นแอมโมเนียที่ 80 mg/L ในสภาวะค่า pH เท่ากับ 7 พบค่าอัตราการบำบัดเท่ากับ 6.22 mg-N/L/h เมื่อทำการทดลองอัตราการบำบัดน้ำเสียความเข้มข้นแอมโมเนียสูงพบว่าอัตราการบำบัดน้ำเสียความเข้มข้นแอมโมเนียที่ 200 mg/L มีค่าอัตราการบำบัดสูงเกือบ 2 เท่าของอัตราการบำบัดน้ำเสียความเข้มข้นแอมโมเนียที่ 50 mg/L สอดคล้องกับงานวิจัยของ Tarre and Green (2004) กล่าวว่าเมื่อความเข้มข้นของแอมโมเนียในโตรเจนสูงขึ้นจะส่งผลให้อัตราการบำบัดแอมโมเนียสูงขึ้นตาม โดยสามารถบำบัดแอมโมเนียในโตรเจนสูงให้เป็นไนเตรทได้ภายใน 8 ชั่วโมง ซึ่งหลังจาก 8 ชั่วโมง จะมีความเข้มข้นแอมโมเนียในโตรเจนเหลืออยู่เพียงเล็กน้อยจนสามารถบำบัดจนหมดไปได้ภายใน 2 วัน ซึ่งระบบบำบัดโดยทั่วไปแอมโมเนียเป็นอีกพารามิเตอร์ที่ระบบมีประสิทธิภาพในการกำจัดค่อนข้างต่ำและไม่สม่ำเสมอ เนื่องจากแอมโมเนียเกิดจากการย่อยสลายทางชีวภาพของสารอินทรีย์ในโตรเจน และเกิดจากการรีดิวซ์ของไนไตรท์ไปเป็นแอมโมเนียจากกระบวนการดีไนตริฟิเคชันในสภาวะไร้อากาศ (Tantulvet & Tantulvet, 2005)

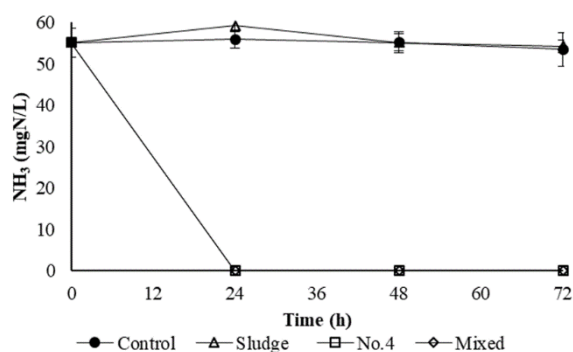


Figure 8 The reduction of ammonia under each condition

ทั้งนี้ ผลการศึกษาประสิทธิภาพการบำบัดสารอินทรีย์คาร์บอนและไนโตรเจนพบว่า กลุ่มที่ใช้ *A. faecalis* No.4 เพียงอย่างเดียว และกลุ่มที่ใช้ร่วมกับ sludge (Mixed) ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) (Table2) ซึ่งสะท้อนให้เห็นว่า *A. faecalis* No.4 มีศักยภาพสูงในการเร่งการย่อยสลายสารมลพิษโดยไม่จำเป็นต้องพึ่งพาจุลินทรีย์พื้นถิ่นใน sludge จุลินทรีย์สายพันธุ์นี้มีคุณสมบัติ

เฉพาะในการย่อยสลายสารอินทรีย์เชิงซ้อนหรือสารพิษบางชนิดที่จุลินทรีย์ในระบบดั้งเดิมไม่สามารถจัดการได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงไม่น่าแปลกใจที่การเติม *A. faecalis* No.4 ร่วมกับ sludge ไม่ได้ส่งผลต่อประสิทธิภาพโดยรวมของระบบอย่างชัดเจน แนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับแนวคิด “Microbial Synergy” ซึ่งการทำงานร่วมกันของจุลินทรีย์หลากหลายชนิดที่ส่งเสริมกันและกันในการย่อยสลายสารมลพิษ โดยจุลินทรีย์แต่ละชนิดทำหน้าที่เฉพาะ เช่น การย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ซับซ้อน หรือการเปลี่ยนสารที่มีความซับซ้อนให้เป็นสารที่ปลอดภัย ส่งผลให้กระบวนการบำบัดเกิดขึ้นได้รวดเร็วครอบคลุม และมีประสิทธิภาพสูงขึ้น

2.4 การเปลี่ยนแปลงออกซิเจนในน้ำเสีย

Figure 9 แสดงค่าออกซิเจนละลายน้ำ (Dissolved Oxygen: DO) เริ่มต้นเฉลี่ยที่ 0.8 mg/L โดยภายใน 72 ชั่วโมงพบว่าในกลุ่ม Control ค่า DO เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนถึง 2.2 mg/L ขณะที่กลุ่มทดลองที่เติม Sludge, *A. faecalis* No.4 และกลุ่ม Mixed มีพฤติกรรมที่แตกต่าง โดยค่า DO ลดลงหลังจากการเติมอากาศที่เวลา 24 ชั่วโมง และลดลงเหลือ 1.6 mg/L, 0.9 mg/L และ 1.1 mg/L ตามลำดับ การเปรียบเทียบทางสถิติระหว่างกลุ่ม Control กับกลุ่มทดลอง No.4 และ Mixed แสดงให้เห็นความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (Table 2) โดยเฉพาะกลุ่มที่ใช้ *A. faecalis* No.4 เพียงอย่างเดียวมีค่า DO ลดลงอย่างรวดเร็วที่สุด สาเหตุของการลดลงอย่างรวดเร็วของค่า DO เมื่อใช้ *A. faecalis* No.4 สามารถอธิบายได้จากกิจกรรมเมแทบอลิซึมของจุลินทรีย์ซึ่งเกิดขึ้นอย่างเข้มข้นในระยะเริ่มต้นของกระบวนการบำบัด โดยมีปัจจัยสนับสนุนที่สำคัญดังนี้

1) การใช้ออกซิเจนอย่างเข้มข้นในช่วงระยะเจริญเติบโตเริ่มต้น (Log Phase): *A. faecalis* No.4 เป็นแบคทีเรียแอโรบิกที่มีอัตราการเจริญเติบโตและการใช้พลังงานสูงภายในช่วง 24–48 ชั่วโมงแรก จึงมีการเผาผลาญสารอินทรีย์ เช่น คาร์โบไฮเดรตและกรดไขมันในอัตราสูง ส่งผลให้เกิดการใช้ออกซิเจนในปริมาณมาก ทำให้ค่า DO ลดลงอย่างชัดเจน

2) กระบวนการ Heterotrophic Nitrification และ Aerobic Denitrification: จุลินทรีย์สายพันธุ์นี้สามารถดำเนินกระบวนการเปลี่ยนรูปไนโตรเจนจากแอมโมเนียไปเป็นไนโตรเจนก๊าซ ผ่านการเปลี่ยนรูปเป็นไนไตรต์และไนเตรต โดยทุกขั้นตอนใช้ O_2 เป็นตัวรับอิเล็กตรอน ซึ่งส่งผลให้ปริมาณ DO ในระบบลดลงอย่างต่อเนื่อง

3) ความหนาแน่นของเซลล์ที่สูงในระบบ:

การเติมเชื้อ *A. faecalis* No.4 ในปริมาณมากหรือระบบที่มีสารอาหารเพียงพอ จะกระตุ้นให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตอย่างรวดเร็วและใช้ออกซิเจนพร้อมกันในปริมาณมาก ส่งผลให้ DO ลดลงอย่างรวดเร็ว และ 4) กระบวนการสร้างมวลชีวภาพ (Biomass Formation): ในระหว่างการเจริญเติบโต จุลินทรีย์ใช้ออกซิเจนเพื่อสังเคราะห์สารชีวโมเลกุล เช่น โปรตีน กรดนิวคลีอิก และไขมัน ทำให้ความต้องการ DO ในระบบเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ระดับออกซิเจนละลายน้ำลดลงตามลำดับ

โดยสรุป การลดลงของค่า DO อย่างรวดเร็วในระบบที่เติม *A. faecalis* No.4 สะท้อนให้เห็นถึงศักยภาพทางเมแทบอลิซึมของจุลินทรีย์สายพันธุ์นี้ในการเร่งการย่อยสลายสารอินทรีย์และแอมโมเนียในน้ำเสียอย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งจากการใช้ออกซิเจนเป็นแหล่งพลังงานในการหายใจเซลล์ และการสังเคราะห์มวลชีวภาพในช่วงแรกของกระบวนการบำบัด (Nuansawan *et al.*, 2018) ในการควบคุมระบบให้เหมาะสม ควรรักษาระดับ DO ให้อยู่ระหว่าง 1–2 mg/L และไม่ควรต่ำกว่า 0.5 mg/L เพื่อป้องกันการตายของจุลินทรีย์ที่ต้องใช้อากาศ โดยอาจอ้างอิงค่าประจุไฟฟ้าในระบบน้ำ (Oxidation Reduction Potential: ORP) ให้อยู่ในช่วง 50–100 mV (Pintong & Wanchoopring, 2024) นอกจากนี้ ค่าความต้องการออกซิเจนของระบบจะขึ้นอยู่กับอุณหภูมิภายในถังปฏิกิริยา โดยหากอุณหภูมิสูงขึ้นจะส่งผลให้จุลินทรีย์มีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้น แต่ความสามารถในการละลายของออกซิเจนในน้ำจะลดลง ทำให้ระบบต้องการออกซิเจนมากขึ้นในทางตรงกันข้าม ถ้าอุณหภูมิต่ำ ความต้องการออกซิเจนจะลดลงตาม (Department of Industrial Works, 2011)

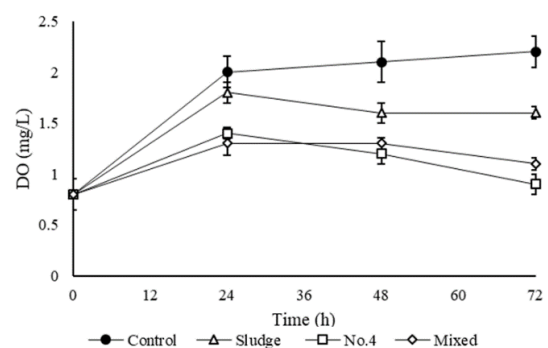


Figure 9 Oxygen concentration consumption under each condition

2.5 การเปลี่ยนแปลงพีเอชในน้ำเสีย

Figure 10 แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ภายในระบบบำบัดน้ำเสีย โดยพบว่า ค่า pH เริ่มต้นอยู่ในช่วง 6.6–

6.7 และเพิ่มขึ้นเป็นช่วง 7.4–7.9 ภายหลังการทดลองในทั้ง 4 กลุ่ม โดยไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) (Table 2) อย่างไรก็ตาม เมื่อเติม *A. faecalis* No.4 ลงในระบบ พบว่าค่า pH เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนระหว่างช่วงเวลา 48–72 ชั่วโมง โดยมีค่า pH สูงสุดอยู่ในช่วง 8.1–9.2 ซึ่งสะท้อนถึงการเปลี่ยนแปลงของกลไกเมแทบอลิซึมของจุลินทรีย์ที่มีผลต่อสมดุลกรด-ด่างของระบบ โดยในช่วงระยะแรกของการทดลอง (0–48 ชั่วโมง) *A. faecalis* No.4 อยู่ในระยะเจริญเติบโตอย่างรวดเร็ว (Log phase) โดยใช้คาร์โบไฮเดรตหรือสารอินทรีย์เชิงซ้อนเป็นแหล่งพลังงานหลัก ทำให้เกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ระยะกลาง เช่น อะซิเตต (acetate), โพรพิโอเนต (propionate) และบิวทิเรต (butyrate) เป็นผลผลิตจากกระบวนการหมัก ส่งผลให้ค่า pH ค่อนข้างคงที่หรือมีแนวโน้มลดลงเล็กน้อย ต่อมาเมื่อเข้าสู่ระยะ stationary phase หลัง 48 ชั่วโมง *A. faecalis* No.4 จะเริ่มเปลี่ยนแหล่งพลังงานไปใช้กรดไขมันระเหยง่าย (Volatile Fatty Acids: VFAs) ที่สะสมไว้ผ่านกระบวนการ β -oxidation ซึ่งให้พลังงานต่อเซลล์พร้อมกับการปล่อยคาร์บอนไดออกไซด์ (CO_2) และ ไบคาร์บอเนต (HCO_3^-) ที่มีคุณสมบัติเป็นด่างเข้าสู่ระบบ ส่งผลให้ปริมาณไฮโดรเจนไอออน (H^+) ลดลงและค่า pH เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ การย่อยโปรตีนหรือสารประกอบไนโตรเจนยังอาจทำให้เกิดแอมโมเนีย (NH_3) ซึ่งเป็นเบสอ่อนที่มีส่วนช่วยเพิ่มค่า pH ในระบบเพิ่มเติม การเปลี่ยนแปลงของค่า pH ดังกล่าวไม่ส่งผลกระทบต่อการทำงานของ *A. faecalis* No.4 หรือจุลินทรีย์ใน sludge อย่างชัดเจน อย่างไรก็ตาม หากระบบมีค่า pH ที่ไม่เหมาะสม อาจมีผลต่อโครงสร้างของตะกอนจุลินทรีย์ในระบบบำบัดได้ โดยจากรายงานของ Sukhvibul (2022) พบว่าที่ค่า pH ต่ำ ($\text{pH} \sim 4.0$) จะส่งเสริมการเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มรา ทำให้เกิดตะกอนปุยขนาดใหญ่ (~ 7 mm) ที่ไม่สามารถอัดตัวเป็นก้อนแน่นได้ ขณะที่ในช่วงค่า pH ที่เป็นกลาง (7.0–8.0) ส่งเสริมการสร้างตะกอนด้วยแบคทีเรียเป็นหลัก ขนาดเฉลี่ยประมาณ 4.8 mm ที่มีโครงสร้างแน่นและเสถียร นอกจากนี้ การรักษา ระบบให้อยู่ในช่วงค่า pH เป็นกลางยังสามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ชนิดเส้นใย (filamentous bacteria) ซึ่งเป็นสาเหตุหลักที่ทำให้ระบบบำบัดล้มเหลว ดังนั้น การควบคุมค่า pH ให้เหมาะสมจึงเป็นปัจจัยสำคัญต่อเสถียรภาพและประสิทธิภาพของกระบวนการบำบัดน้ำเสียโดยใช้จุลินทรีย์ (Yu *et al.*, 2014) สำหรับกลุ่ม Mixed ที่ไม่พบการเพิ่มขึ้นของค่า pH เหมือนกลุ่ม No.4 อาจเนื่องมาจากข้อจำกัดในการย่อยสลาย VFAs หรือแอมโมเนียอย่างสมบูรณ์ เมื่อมีจุลินทรีย์พื้นถิ่นใน sludge ร่วมด้วย ทั้งนี้ การเพิ่มประสิทธิภาพการบำบัด

อาจจำเป็นต้องมีจุลินทรีย์ชนิดอื่นร่วมอยู่ในระบบ (microbial consortium) เช่น กลุ่ม nitrifying bacteria, denitrifying bacteria หรือ fermentative bacteria เพื่อสนับสนุนการเปลี่ยนรูปไนโตรเจนและคาร์บอนให้สมบูรณ์มากขึ้น และรักษาสมาดุล pH ภายในระบบให้มีเสถียรภาพและประสิทธิภาพมากขึ้น

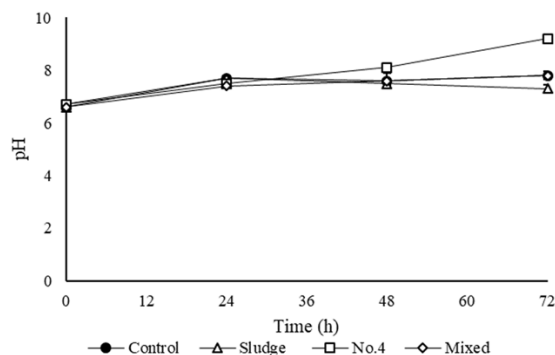


Figure 10 pH under each condition

Table 2 ภาพรวมเมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการทดลอง 72 ชั่วโมง *A. faecalis* No.4 และ Mixed แสดงประสิทธิภาพในการบำบัดสูงกว่า Control และ Sludge อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ซึ่งสามารถกำจัด sBOD และ NH_3 ได้อย่างสมบูรณ์ (ประสิทธิภาพการกำจัด 100%) ขณะที่ประสิทธิภาพการกำจัด COD สูงกว่า 90% นอกจากนี้ ประสิทธิภาพการกำจัด BPA ของ *A. faecalis* No.4 และ Mixed เท่ากับ 53.3% และ 62.2% ตามลำดับ ในทางตรงกันข้าม Control มีประสิทธิภาพการกำจัดค่อนข้างต่ำ โดยสามารถกำจัด sBOD, COD, BPA และ NH_3 ได้เพียง 19.1%, 10.3%, 8.9% และ 3.0% ตามลำดับ ผลการศึกษานี้ชี้ให้เห็นว่า No.4 และ Mixed สามารถส่งเสริมกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพ (biodegradation) และ/หรือการดูดซับ (adsorption) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ส่งผลให้มีสมรรถนะในการบำบัดสูงกว่า Control และ Sludge อย่างชัดเจน

Table 2 Residual pollutant concentrations and removal efficiencies after 72 h of batch treatment

Parameters	Control	Sludge	No.4	Mixed
pH	7.8	7.3	9.2	7.8
DO (mg/L)	2.2 ^{c,d}	1.6	0.9 ^a	1.1 ^a
sBOD (mg/L)	178 (19.1%) ^{c,d}	51 (76.8%) ^{c,d}	0 (100.0%) ^{a,b}	0 (100.0%) ^{a,b}
COD (mg/L)	526 (10.3%) ^{c,d}	452 (19.6%) ^{c,d}	52 (90.8%) ^{a,b}	37 (93.4%) ^{a,b}
BPA ($\mu\text{g/L}$)	41 (8.9%) ^{b,c,d}	30 (33.3%) ^a	21 (53.3%) ^a	17 (62.2%) ^a
NH_3 (mg/L)	65 (3.0%) ^{c,d}	66 (1.5%) ^{c,d}	0 (100.0%) ^{a,b}	0 (100.0%) ^{a,b}

Note: a, b, c or d denotes significant difference ($p<0.05$) between each pair of experiments

2.6 ค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งในการย่อยสลายสารอินทรีย์

Figure 11-12 และ Table 3 ค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในน้ำเสีย พบว่า การย่อยสลาย sBOD และ COD ของ No.4 และแบบ Mixed อยู่ในช่วง $0.291-0.362 \text{ h}^{-1}$ สูงกว่า Control และ Sludge ซึ่งน้ำเสียชุมชนทั่วไปมีค่าคงที่ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่งอยู่ในช่วง $0.12-0.46 \text{ h}^{-1}$ และค่าที่นิยมใช้มีค่าประมาณ 0.23 h^{-1} (Sirivittayapakorn, 2009) บ่งชี้ว่า *A. faecalis* No.4 ช่วยในการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้ดีและเมื่อผสมกับ sludge เป็นการสนับสนุนแบบเสริมฤทธิ์ของจุลินทรีย์ (Microbial Synergy) จุลินทรีย์หลายชนิดสามารถทำงานร่วมกันภายในระบบบำบัดน้ำเสียอย่างมีประสิทธิภาพมากกว่าการทำงานของจุลินทรีย์แต่ละชนิดเพียงลำพัง ซึ่งส่งผลให้ระบบบำบัดมีประสิทธิภาพสูงขึ้น สามารถย่อยสลายทั้งสารอินทรีย์คาร์บอนที่ย่อยสลายได้ง่ายและยากได้พร้อมกัน ประหยัดพลังงานและเวลา มีความยืดหยุ่นต่อสภาพแวดล้อมที่เปลี่ยนแปลง และช่วยเสริมเสถียรภาพของระบบบำบัดในระยะยาว นอกจากนี้ค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งในการย่อยสลาย BPA (Figure 13 และ Table 2) ของการทดลองทั้งหมดอยู่ช่วง $0.0014-0.0134 \text{ h}^{-1}$ ซึ่ง *A. faecalis* No.4 และแบบ Mixed สามารถบำบัดได้ดี เท่ากับ 0.011 h^{-1} และ 0.0134 h^{-1} ตามลำดับ สามารถย่อยสลาย BPA ได้ดีกว่า sludge เพียงอย่างเดียว แต่ค่าคงที่การย่อยสลายสารอินทรีย์ BPA น้อยกว่า Nuansawan *et al.* (2023b) ซึ่ง mixed sludge เท่ากับ 0.023 h^{-1} (Nuansawan *et al.*, 2023b) เนื่องจากความสามารถในการย่อยสลายของ *A. faecalis* No.4 อาจขึ้นกับลักษณะน้ำเสีย และความเข้มข้นของสารอินทรีย์ในน้ำเสีย หากความสกปรกมีความเข้มข้นสูง *A. faecalis* No.4 ก็สามารถย่อยสลายได้ดี อย่างไรก็ตามความสามารถการย่อยสลาย BPA ของ *A. faecalis* No.4 มีประสิทธิภาพในการบำบัดสารอินทรีย์ และเมื่อผสมร่วมกับ sludge ยังมีประสิทธิภาพในการบำบัดได้ดีขึ้น

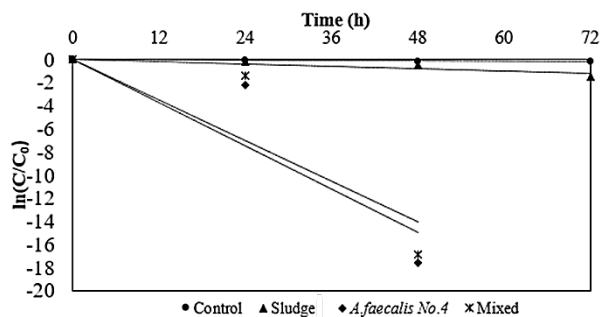


Figure 11 Kinetic of sBOD under each condition

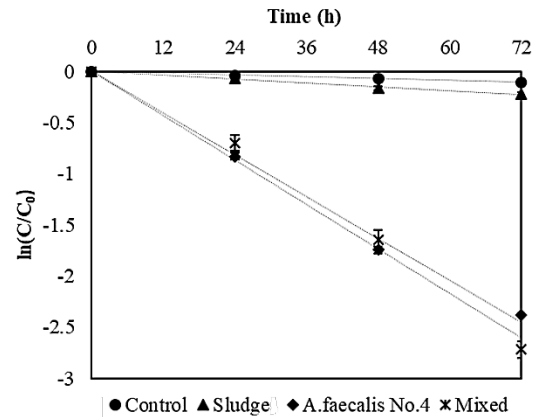


Figure 12 Kinetic of COD under each condition

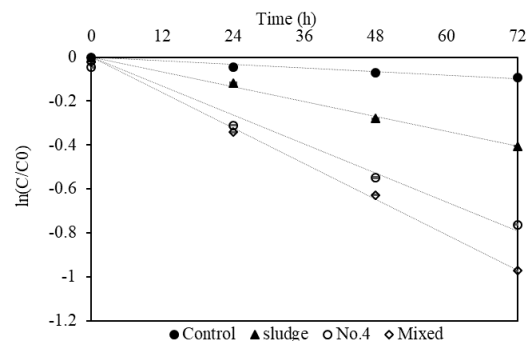


Figure 13 Kinetic of BPA under each condition

จากการศึกษานี้ได้ประเมินศักยภาพของ *A. faecalis* No.4 และตะกอนจุลินทรีย์ (sludge) จากกระบวนการบำบัดของทำอากาศยานสุวรรณภูมิในการกำจัดสารมลพิษ ได้แก่ sBOD, COD, NH_3 และ BPA ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า *A. faecalis* No.4 ทั้งในรูปแบบเดี่ยวและร่วมกับ sludge มีศักยภาพในการประยุกต์ใช้กับระบบบำบัดน้ำเสียในภาคอุตสาหกรรมหรือพื้นที่ต้นทางของสนามบิน ซึ่งมักมีภาระสารอินทรีย์ซับซ้อนและสารปนเปื้อนอุบัติใหม่ในระดับสูง การใช้ *A. faecalis* No.4 ร่วมกับ sludge ช่วยเพิ่มความหลากหลายของจุลินทรีย์ในระบบ ส่งผลให้กระบวนการย่อยสลายสารมลพิษเกิดขึ้นอย่างสมบูรณ์และมีประสิทธิภาพสูง เหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้ในระบบ bioaugmentation รวมถึงการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์จุลินทรีย์เชิงพาณิชย์ในอนาคต นอกจากนี้ค่าคงที่อัตราปฏิกิริยา (k) ที่ได้จากการศึกษา สามารถนำไปใช้ในการออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียทางชีวภาพ เช่น ถึงปฏิกิริยาแบบกวนผสม (Continuous Stirred Tank Reactor: CSTR) หรือถึงแบบไหลตามแนวท่อ (Plug Flow Reactor: PFR) เพื่อคำนวณขนาดถัง ระยะเวลาการกักเก็บ และประเมินประสิทธิภาพของระบบอย่างแม่นยำในระดับวิศวกรรม ทั้งนี้ แนวโน้มของค่า k ที่มีความชัดเจนในช่วงต้น

ของกระบวนการบำบัด ยังสามารถประยุกต์ใช้เป็นดัชนีสำหรับการควบคุมกระบวนการบำบัดแบบเรียลไทม์ (real-time monitoring) ซึ่งเป็นแนวทางที่มีศักยภาพในการพัฒนาไปสู่ระบบบำบัดน้ำเสียอัจฉริยะ (Smart Wastewater Treatment System) ที่สามารถตอบสนองต่อการเปลี่ยนแปลงของคุณภาพน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพและทันทั่วทั้งที่

Table 3 The first-order reaction constant for the degradation of organic matter in wastewater

สภาวะ	ค่าคงที่ปฏิกิริยา (h^{-1})		
	sBOD	COD	BPA
Control	0.0032	0.0015	0.0014
Sludge	0.0170	0.0031	0.0056
No.4	0.3040	0.0341	0.0110
Mixed	0.2910	0.0362	0.0134

2.7 การเจริญเติบโตของ *A. faecalis* No.4 ในน้ำเสีย

จากการทดลองพบว่าอัตราการเติบโตของ *A. faecalis* No.4 และ Mixed มีค่า $0.1267 h^{-1}$ และ $0.1463 h^{-1}$ ตามลำดับ จากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่า *A. faecalis* No.4 สามารถโตในอาหารเลี้ยงเชื้ออยู่ที่ $0.2 h^{-1}$ (Joo *et al.*, 2005; Nuansawan *et al.*, 2018) จึงเป็นไปได้ว่าในน้ำเสียอาจมีสารยับยั้งการเจริญเติบโตหรือสารอาหารอาจไม่เพียงพอต่อการเจริญเติบโต

สรุปผลการวิจัย

การศึกษานี้ได้ประเมินศักยภาพของ *A. faecalis* No.4 และตะกอนจุลินทรีย์ (sludge) ในการลดความสกปรกของ sBOD, COD, NH_3 และ BPA ออกจากน้ำเสียทำอากาศยาน ค่าคงที่ปฏิกิริยาอันดับหนึ่งในการย่อยสลายสารอินทรีย์อยู่ในช่วง $0.02-0.03 h^{-1}$ ทั้งนี้ค่าอัตราการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์ของ *A. faecalis* No.4 และ *A. faecalis* No.4 ร่วมกับตะกอนสลัดจ์ทำอากาศยานสุวรรณภูมิ มีค่าเท่ากับ $0.1267 h^{-1}$ และ $0.1463 h^{-1}$ ตามลำดับ โดยพบว่าการใช้ *A. faecalis* no.4 ร่วมกับ sludge สามารถเพิ่มประสิทธิภาพในการบำบัดมลสารทั้งหมดได้ดีขึ้นผ่านกระบวนการย่อยสลายทางชีวภาพที่มีอัตราอยู่ในช่วง $0.011-0.3040 h^{-1}$

ข้อเสนอแนะ

1. จากการทดลอง *A. faecalis* No.4 เหมาะสำหรับการใช้กับน้ำเสียที่มีไนโตรเจนสูงกว่ามาตรฐานซึ่งงานวิจัยนี้ความเข้มข้นไม่สูงมากนักเมื่อเทียบกับงานวิจัยก่อนหน้า ทำให้สารอาหารต่างๆ อาจยังไม่เหมาะสมกับศักยภาพของเชื้อที่

ควรจะเป็นไม่ว่าจะเป็นองค์ประกอบที่เป็นคาร์บอน/ไนโตรเจน รวมถึงธาตุอาหารอื่นๆ ที่นำไปใช้ในการสร้างเซลล์และอาหารสำหรับการเติบโต ทั้งนี้จึงควรนำไปศึกษาระดับ

ปฏิบัติการในระบบนำไปใช้งาน

2. การทดลองถัดไปควรศึกษาความคู่กับการเดินระบบโดยจำลองสภาวะเสมือนเดินระบบจริงเพื่อดูประสิทธิภาพ รวมถึงแนวทางการควบคุม DO และ pH และปริมาณสลัดจ์ที่เกิดขึ้นเพื่อให้ *A. faecalis* No.4 มีประสิทธิภาพเต็มที่

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยี พระจอมเกล้าพระนครเหนือ ตามสัญญาเลขที่ Res-CIT-NL031/2025

เอกสารอ้างอิง

- APHA. (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater* (23rd ed.). American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation.
- Department of Industrial Works. (2011). *Wastewater treatment* (Manual). Ministry of Industry and Thai Environmental Engineers Association.
- Desiredy, S., Madhavan, S., & Sabumon, P. C. (2022). Development and long-term operation of aerobic granular system for simultaneous removal of COD, nitrogen, and phosphorous in a conical SBR. *Environmental Engineering Research*, 28(3), 220–215. <https://doi.org/10.4491/eer.2022.015>
- Joo, H. S., Hirai, M., & Shoda, M. (2005). Characteristics of ammonium removal by heterotrophic nitrification-aerobic denitrification by *Alcaligenes faecalis* no. 4. *Journal of Bioscience and Bioengineering*, 100, 184–191. <https://doi.org/10.1263/jbb.100.184>
- Joo, H. S., Hirai, M., & Shoda, M. (2006). Piggery wastewater treatment using *Alcaligenes faecalis* strain No.4 with heterotrophic nitrification and aerobic denitrification. *Water Research*, 40, 3029–3036. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2006.06.021>
- Joo, H. S., Hirai, M., & Shoda, M. (2007). Improvement in ammonium removal efficiency in wastewater treatment by mixed culture of *Alcaligenes faecalis* no. 4 and L1. *Journal of Bioscience and Bioengineering*,

- 103, 66–73. <https://doi.org/10.1263/jbb.103.66>
- Koeina, T. (2008). *Wastewater management of Suvarnabhumi Airport* [Master's thesis, National Institute of Development Administration].
- Nuansawan, N., Chiemchaisri, C., Chiemchaisri, W., & Shoda, M. (2018). Treatment of concentrated leachate with low greenhouse gas emission in two-stage membrane bioreactor bio-augmented with *Alcaligenes faecalis* no. 4. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 68, 1378–1390. <https://doi.org/10.1080/10962247.2018.1516701>
- Nuansawan, N., Witthayaphirom, C., Sawasdee, A., Chiemchaisri, C., & Shoda, M. (2023a). Removals of endocrine disrupting compounds during landfill leachate treatment in two-stage aerobic sequential batch reactor: Effect of *Alcaligenes faecalis* no.4 bio-augmentation. *Emerging Contaminants*, 9, 100223. <https://doi.org/10.1016/j.emcon.2023.100223>
- Nuansawan, N., Witthayaphirom, C., Chiemchaisri, C., & Shoda, M. (2023b). Removals of emerging contaminants from municipal waste leachate by *Alcaligenes faecalis* no.4 and acclimated activated sludge cultures. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 100524. <https://doi.org/10.1016/j.cscee.2023.100524>
- Pintong, C., & Wanchoopring, T. (2024). The efficiency of chemical water quality treatment of the wastewater treatment system, Namon Hospital, Namon District, Kalasin province. *Journal of Environmental Education Medical and Health*, 9(4), 398–407. <https://so06.tcithaijo.org/index.php/hej/article/view/277570/187083>
- Progress Technology Consultants. (2021). *Suvarnabhumi Wastewater Treatment Plant, biological nutrient remover (BNR) system*. http://www.progress.co.th/html_th/WWTP/references_17-WWTP.html
- Shoda, M. (2015). Heterotrophic nitrification and aerobic denitrification of a wastewater from a chemical company by *Alcaligenes faecalis* No.4. *International Journal of Water and Wastewater Treatment*, 1(2), 1–5. <https://doi.org/10.16966/2381-5299.111>
- Shoda, M., & Ishikawa, Y. (2016). Removal of high-strength of ammonium and phenol from coking wastewater by *Alcaligenes faecalis* No.4. *Journal of Applied Biotechnology & Bioengineering*, 3, 1–4. <https://doi.org/10.15406/JABB.2016.01.00014>
- Sirivittayapakorn, S. (2009). *Wastewater technology* (2nd ed.). Department of Environmental Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University.
- Sukhvibul, S. (2022). *Treatment of high ammonium concentration wastewater using aerobic granular sludge* [Master's thesis, Chulalongkorn University].
- Tantulvet, M., & Tantulvet, M. (2005). *Water quality analysis manual* (5th ed.). Faculty of Engineering, Chulalongkorn University.
- Tarre, S., & Green, M. (2004). High-rate nitrification at low pH in suspended- and attached biomass reactors. *Applied and Environmental Microbiology*, 70(11), 6481–6487. <https://doi.org/10.1128/AEM.70.11.6481-6487.2004>
- Witthayaphirom, C., Chiemchaisri, C., & Chiemchaisri, W. (2020). Optimization of reactive media for removing organic micro-pollutants in constructed wetland treating municipal landfill leachate. *Environmental Science and Pollution Research*, 27, 24627–24638. <https://doi.org/10.1007/s11356-019-06010-3>
- Yangen, S. (2003). *The removal of ammonia from aquarium wastewater by volcanic rock filtration* [Master's thesis, Kasetsart University].
- Yu, X., Wan, C., Lei, Z., Liu, X., Zhang, Y., Tay, J. H., & Lee, D. J. (2014). Use of aerobic granules for treating synthetic high-strength ammonium wastewaters. *Environmental Technology*, 35(14), 1785–1790. <https://doi.org/10.1080/09593330.2014.882992>

การวิเคราะห์ปริมาณฟีนอลิกรวมและความสามารถในการต้านออกซิเดชันของเครื่องดื่มคอมบูชาจากการหมักชาดำร่วมกับแก่นตะวัน

Determination of total phenolic content and antioxidant capacity of Kombucha beverage fermented from black tea and *Helianthus tuberosus* L.

ธีรธาร คำสะอึง¹, ธีรภัทร โฆสิตกุล¹, พัฒนา ศรีพลากิจ² และอรสร สารพันโชติวิทยา^{3*}

Teeratan Khamsaing¹, Thirapat Kositkul¹, Pattana Sripalakit² and Aurasorn Saraphanchotiwiththaya^{3*}

Received: 18 April 2025 ; Revised: 20 June 2025 ; Accepted: 18 July 2025

บทคัดย่อ

คอมบูชาเป็นเครื่องดื่มชาหมักที่ได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายจากคุณค่าทางสุขภาพ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปริมาณสารฟีนอลิกและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของคอมบูชาที่ผลิตจากชาดำอัสสัม (*Camellia sinensis*) ร่วมกับแก่นตะวัน (*Helianthus tuberosus* L.) โดยใช้จุลินทรีย์กลุ่ม symbiotic culture of bacteria and yeast (SCOBY) ในกระบวนการหมักทำการทดลองโดยเตรียมคอมบูชาชาดำ-แก่นตะวัน (JT), คอมบูชาชาดำ (T), คอมบูชาแก่นตะวัน (J) เทียบกับกลุ่มควบคุมชาดำ-แก่นตะวันไม่เติม SCOBY (JTN) และซูโครสหมัก (S) ประเมินคุณสมบัติทางเคมีกายภาพ ปริมาณฟีนอลิกรวม และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี 2,2-di-phenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) และ Ferric-reducing antioxidant power (FRAP) หลังการหมักเป็นเวลา 14 วัน โดยรวมพบว่าสูตรที่เติม SCOBY มีความขุ่นมากขึ้น ทุกสูตรมีค่าพีเอช และปริมาณน้ำตาลลดลง ขณะที่ความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) สูตร JT มีปริมาณฟีนอลิกรวมสูงสุดเท่ากับ 1.69 ± 0.05 มิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อมิลลิลิตร ณ วันที่ 5 ซึ่งมีค่าสูงกว่าสูตร J แต่ต่ำกว่าสูตร T อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อประเมินฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH พบว่าสูตร JT มีค่าร้อยละการยับยั้งอนุมูลอิสระสูงสุด โดยมีค่าเท่ากับ 96.14 ± 0.15 ณ วันที่ 7 ซึ่งไม่แตกต่างจากสูตร T แต่สูงกว่าสูตร J อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) สำหรับการทดสอบด้วยวิธี FRAP พบว่าสูตร JT มีค่า FRAP สูงสุดเท่ากับ 24.12 ± 0.88 มิลลิกรัมสมมูลของเฟอร์รัสต่อมิลลิลิตร ณ วันที่ 7 ซึ่งไม่แตกต่างจากค่าสูงสุดของสูตร J แต่ต่ำกว่าสูตร T อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) สรุปได้ว่า การหมักชาดำร่วมกับแก่นตะวันโดยใช้ SCOBY ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติทางเคมีกายภาพ ปริมาณสารฟีนอลิกรวม และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของผลิตภัณฑ์ โดยสูตรคอมบูชาชาดำ-แก่นตะวัน (JT) ให้ปริมาณสารฟีนอลิกรวมและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระอยู่ในระดับสูงตลอดการหมัก สะท้อนถึงศักยภาพของแก่นตะวันในการใช้เป็นวัตถุดิบร่วมในการผลิตคอมบูชา และมีศักยภาพในการพัฒนาเป็นเครื่องดื่มฟังก์ชันในอนาคต

คำสำคัญ: คอมบูชา, ชาดำ, แก่นตะวัน, ฟีนอลิกรวม, ฤทธิ์ต้านออกซิเดชัน

Abstract

Kombucha is a popular fermented tea beverage widely recognized for its potential health benefits. This study aimed to investigate the total phenolic content and antioxidant activity of kombucha prepared from Assam black tea (*Camellia sinensis*) combined with Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.), using a symbiotic culture of bacteria and yeast (SCOBY) for fermentation. Kombucha samples were prepared from various formulations, including fermented black

¹ นิสิตเภสัชศาสตร์, ภาควิชาเทคโนโลยีเภสัชกรรม คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

² รองศาสตราจารย์, ภาควิชาเทคโนโลยีเภสัชกรรม คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

³ รองศาสตราจารย์, ภาควิชาเภสัชเคมีและเภสัชเวช คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร

¹ Pharm.D. student, Pharmaceutical Technology, Faculty of Pharmaceutical Sciences, Naresuan University

² Associate Professor, Pharmaceutical Technology, Faculty of Pharmaceutical Sciences, Naresuan University

³ Associate Professor, Pharmaceutical Chemistry and Pharmacognosy, Faculty of Pharmaceutical Sciences, Naresuan University

* Corresponding author: Aurasorn Saraphanchotiwiththaya, Email: aurasorns@nu.ac.th

tea with Jerusalem artichoke (JT), fermented black tea (T), fermented Jerusalem artichoke (J), unfermented tea with Jerusalem artichoke (JTN), and fermented sucrose (S). Physicochemical properties, total phenolic content, and antioxidant activity were evaluated using the 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) radical scavenging assay and ferric-reducing antioxidant power (FRAP) assay after 14 days of fermentation. The results revealed a significant decrease in pH, clarity, and sugar content, along with an increase in viscosity across all fermented samples. The JT formulation exhibited the highest total phenolic content of 1.69 ± 0.05 mg gallic acid equivalents/mL on day 5, which was slightly higher than J and significantly lower than T ($p < 0.05$). Antioxidant activity assessed by DPPH showed that JT had the highest percentage of inhibition of $96.14 \pm 0.15\%$ on day 7, comparable to T but significantly higher than J ($p < 0.05$). FRAP analysis demonstrated that JT exhibited the greatest ferric-reducing power of 24.12 ± 0.88 mg ferrous equivalents/mL on day 7, similar to J (day 14) but slightly lower than T (day 7) ($p < 0.05$). It can be concluded that fermentation of black tea and Jerusalem artichoke with SCOBY significantly affected the physicochemical characteristics, total phenolic content, and antioxidant activity of the beverages. The black tea-Jerusalem artichoke kombucha (JT) demonstrated high phenolic content and antioxidant activity during fermentation, indicating the potential of Jerusalem artichoke as an alternative substrate for the development of functional kombucha beverages.

Keywords: Kombucha, black tea, Jerusalem artichoke, total phenolic content, antioxidant activity

บทนำ

คอมบูชา (Kombucha) เป็นเครื่องดื่มหมักจากชาซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพที่ได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยทั่วไปนิยมใช้ชาดำหรือชาเขียวเป็นวัตถุดิบหลักในการหมักร่วมกับจุลินทรีย์ที่ทำงานร่วมกันในลักษณะพึ่งพาอาศัยกัน ที่เรียกว่า SCOBY (Symbiotic Culture of Bacterium and Yeast) ประกอบด้วยยีสต์หลายชนิดและแบคทีเรียกรดอะซิติก (acetic acid bacteria) ที่มีบทบาทร่วมกันในการเปลี่ยนน้ำตาลในน้ำชาให้เป็นสารต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ (Gaggia *et al.*, 2018; Kapp & Sumner, 2019) กระบวนการหมักคอมบูชามีส่วนช่วยเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการของผลิตภัณฑ์ โดยสามารถเพิ่มระดับของน้ำตาลบางชนิด แร่ธาตุ วิตามิน และกรดอินทรีย์ นอกจากนี้ ยังมีการผลิตสารที่มีฤทธิ์ชีวภาพ เช่น เอนไซม์ และสารเมแทบอลิต์ทุติยภูมิ โดยเฉพาะสารพอลิฟีนอล ซึ่งเป็นสารต้านอนุมูลอิสระที่สำคัญ และมีบทบาทในการส่งเสริมสุขภาพของผู้บริโภค ประวัติการบริโภคคอมบูชามีมาอย่างยาวนาน โดยมีแหล่งกำเนิดในประเทศแถบเอเชียตะวันออก ได้แก่ ญี่ปุ่น จีน และรัสเซีย และในช่วงหลายทศวรรษที่ผ่านมา คอมบูชาได้รับความนิยมอย่างแพร่หลายในประเทศตะวันตก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในสหรัฐอเมริกา (Jarrell *et al.*, 2000) ซึ่งสะท้อนให้เห็นถึงแนวโน้มความสนใจด้านสุขภาพของผู้บริโภคในระดับสากล

คอมบูชาเป็นเครื่องดื่มที่มีสรรพคุณต่างๆ มากมาย ที่ช่วยส่งเสริมสุขภาพ เช่น มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ต้านแบคทีเรีย ต้านอักเสบ ต้านมะเร็ง (Kitwetcharoen *et al.*, 2023) ส่งเสริมระบบภูมิคุ้มกัน ช่วยการทำงานของตับ และลด

ความเสี่ยงของโรคไม่ติดต่อเรื้อรัง เช่น เบาหวาน ความดันโลหิตสูง โรคหัวใจและหลอดเลือด (Khan & Mukhtar, 2018) อย่างไรก็ตาม คอมบูชาที่มีจำหน่ายทั่วไปมักมีรสชาติเปรี้ยวจืดจากการดองน้ำส้ม (acetic acid) ทำให้รับประทานได้ยาก อีกทั้งผลิตภัณฑ์คอมบูชาในท้องตลาดมีปริมาณน้ำตาลค่อนข้างสูงอาจไม่เหมาะกับผู้ป่วยเบาหวาน หรือผู้ที่ต้องการควบคุมน้ำหนัก และผู้บริโภคบางกลุ่มอาจต้องการเครื่องดื่มคอมบูชาที่มีปริมาณคาเฟอีนต่ำ ตัวอย่างแนวทางการพัฒนาคอมบูชาในปัจจุบัน ได้แก่ การใช้วัตถุดิบจากธรรมชาติ เช่น ผลไม้และสมุนไพร เพื่อช่วยปรับปรุงรสชาติ ลดปริมาณการเติมน้ำตาล และเพิ่มคุณค่าทางเภสัชวิทยาของผลิตภัณฑ์คอมบูชา การใช้สารตั้งต้นทางเลือก เช่น ผุ่นชา (tea dust) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากกระบวนการผลิตชา และกากน้ำตาลเข้มข้น (blackstrap molasses) ซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการผลิตน้ำตาล เพื่อช่วยลดปริมาณของเสียจากอุตสาหกรรมและเพิ่มความยั่งยืนในกระบวนการผลิตคอมบูชา (Selvaraj & Gurumurthy, 2024) สำหรับในประเทศไทย คอมบูชาที่วางจำหน่ายในปัจจุบันส่วนใหญ่ผลิตจากการหมักชาดำ หรือชาเขียวเป็นหลัก ขณะที่คอมบูชาที่ผสมสมุนไพรหรือวัตถุดิบท้องถิ่นอื่น ๆ ยังคงพบได้น้อยในเชิงพาณิชย์

แก่นตะวัน (Jerusalem artichoke; *Helianthus tuberosus* L.) เป็นพืชสมุนไพรในวงศ์ Asteraceae มีถิ่นกำเนิดในทวีปอเมริกาเหนือ เป็นพืชล้มลุก มีลำต้นสั้น ดอกสีเหลืองคล้ายดอกบัวตองหรือดอกทานตะวัน และมีหัวสะสมอาหารใต้ดิน มีการนำเข้ามาปลูกในพื้นที่ภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย (Niljantuk *et al.*, 2019)

ส่วนหัวใต้ดินของแก่นตะวันมีคุณค่าทางโภชนาการสูง อุดมไปด้วยคาร์โบไฮเดรตเชิงซ้อนและอินูลิน (inulin) ซึ่งเป็นพรีไบโอติก (prebiotic) ที่มีประโยชน์ต่อระบบทางเดินอาหารและช่วยส่งเสริมการเจริญของจุลินทรีย์ที่มีประโยชน์ในลำไส้ (Shao *et al.*, 2020) เครื่องดื่มสารสกัดจากแก่นตะวันมีรสชาติดี ช่วยปรับสมดุลของจุลินทรีย์ในลำไส้ และมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (Sawicka *et al.*, 2020) มีส่วนช่วยเพิ่มระบบภูมิคุ้มกัน และลดความเสี่ยงในการเกิดโรคหัวใจและหลอดเลือดได้ นอกจากนี้ยังพบสาร fructo-oligosaccharide ในหัวแก่นตะวันซึ่งให้รสหวานแต่มีค่าดัชนีน้ำตาลต่ำ เหมาะสำหรับผู้ป่วยเบาหวานหรือผู้ที่ต้องการควบคุมระดับน้ำตาลและไขมันในเลือด (Puttha & Charoenphun, 2020)

แนวคิดในการผสมผสานคอมบูชากับแก่นตะวัน เป็นแนวทางหนึ่งที่มีศักยภาพในการพัฒนาเครื่องดื่มสุขภาพที่มีคุณค่าทางโภชนาการและมีฤทธิ์ต้านออกซิเดชัน อย่างไรก็ตาม แม้ว่าจะมีรายงานการศึกษาการหมักคอมบูชาร่วมกับวัตถุดิบหลากหลายชนิด แต่ยังขาดข้อมูลเชิงลึกที่เปรียบเทียบปริมาณพอลิฟีนอลและความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของคอมบูชาที่หมักร่วมกับสมุนไพร โดยเฉพาะอย่างยิ่ง แก่นตะวันในลักษณะที่เป็นระบบและครอบคลุม

ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงปริมาณพีนอลรวม (total phenolic content) และความสามารถในการต้านออกซิเดชัน (antioxidant capacity) ของเครื่องดื่มคอมบูชาที่เตรียมจากชาดำหมักร่วมกับแก่นตะวัน อันจะนำไปสู่การพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มเพื่อสุขภาพทางเลือกที่มีคุณภาพ และตอบสนองต่อความต้องการของผู้บริโภคที่ใส่ใจในการดูแลสุขภาพ

การทดลอง

1. แผนการทดลอง

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design: CRD) ประกอบด้วย 5 สูตร ได้แก่ สูตร JT: คอมบูชาชาดำ-แก่นตะวัน, T: คอมบูชาชาดำ, J: คอมบูชาแก่นตะวัน และกลุ่มควบคุมสูตร JTN: ชาดำ-แก่นตะวันไม่เติม SCOBY และ สูตร S: ชูโครสเติม SCOBY แต่ละสูตรทำสามซ้ำ และทำการติดตามผลที่ระยะเวลาการหมัก 0, 5, 7 และ 14 วัน

2. แหล่งที่มาของวัตถุดิบ และสารเคมี

ใบชาชาดำอัสสัม และ commercial SCOBY (Symbiotic Culture of Bacterium and Yeast) ได้จากร้าน Nature Kombucha จังหวัดขอนแก่น หัวสดหรือลำต้นใต้ดินของแก่นตะวัน ได้จากไร่กสิวิวัฒนา อำเภอบ้านไผ่ จังหวัดขอนแก่น Trolox, gallic acid, 2, 2-diphenyl-1-picrylhydrazyl

(DPPH), 2, 4, 6-tripyridyl-s-triazine (TPTZ), Folin Ciocalteu reagent ได้จากบริษัท Sigma-Aldrich (Switzerland), ferrous sulfate และ sodium acetate trihydrate ได้จากบริษัท Kemaus (Australia), sodium carbonate และ ferric chloride ได้จากบริษัท Merck KgaA (Germany)

3. การเตรียมน้ำสกัดชาดำ

นำใบชาดำแห้งปริมาณ 12 กรัม ชงในน้ำร้อนอุณหภูมิ 90-100 องศาเซลเซียส ปริมาณ 1 ลิตร เป็นเวลา 7-10 นาที กรองด้วยผ้าขาวบาง แล้วทิ้งไว้ให้เย็นลง

4. การเตรียมน้ำสกัดแก่นตะวัน

นำหัวแก่นตะวันมาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำเปล่าลดขนาดโดยการหั่นให้มีขนาดประมาณ 2 เซนติเมตร นำไปต้มกับน้ำกลั่นในอัตราส่วน 1:1 โดยน้ำหนัก ณ อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 15 นาที กรองด้วยผ้าขาวบาง และกระดาศกรอง ทิ้งไว้ให้เย็นลง

5. การเตรียมคอมบูชาและกลุ่มควบคุม

เตรียมคอมบูชาและกลุ่มควบคุมจำนวน 5 สูตร สูตรละ 3 ฟลasks ดังนี้ (1) คอมบูชาสูตร JT: น้ำชาดำและน้ำสกัดแก่นตะวันอย่างละ 125 มิลลิลิตร (2) คอมบูชาสูตร T: น้ำชาดำ 250 มิลลิลิตร (3) คอมบูชาสูตร J: น้ำสกัดแก่นตะวัน 250 มิลลิลิตร โดยสูตร (1) – (3) เติม SCOBY ส่วนเนื้อที่ผ่านการตัดแบ่งเพื่อลดขนาด 8 กรัม และส่วนน้ำ 10 มิลลิลิตร และชูโครส 12.5 กรัม (4) กลุ่มควบคุมสูตร JTN: น้ำชาดำและน้ำสกัดแก่นตะวันอย่างละ 125 มิลลิลิตร ชูโครส 12.5 กรัม และน้ำ 18 มิลลิลิตร โดยไม่เติม SCOBY และ (5) กลุ่มควบคุมสูตร S: ชูโครส 12.5 กรัม น้ำ 250 มิลลิลิตร และ SCOBY ส่วนเนื้อ 8 กรัม และส่วนน้ำ 10 มิลลิลิตร ในการเตรียมแต่ละสูตรจะผสมน้ำชาดำ น้ำสกัดแก่นตะวัน และชูโครส ใน Erlenmeyer flask ขนาด 500 มิลลิลิตร โดยยังไม่เติม SCOBY ใช้สำลีและอลูมิเนียมฟอยล์ปิดปากฟลask นำไปทำให้ปราศจากเชื้อโดยการนึ่งฆ่าเชื้อ (autoclave) ณ อุณหภูมิ 121 องศาเซลเซียส ความดัน 15 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว เป็นเวลา 15 นาที ทิ้งไว้ให้เย็น แล้วจึงเติม SCOBY ด้วยเทคนิคปลอดเชื้อ (aseptic technique) จากนั้นทำการหมักเป็นเวลา 14 วัน ภายใต้สภาวะนิ่งโดยไม่มีการเขย่าระหว่างการหมักเพื่อจำลองกระบวนการหมักแบบดั้งเดิม เก็บที่อุณหภูมิห้อง (27 ± 2 °C) ในภาวะแสงปกติ หลีกเลี่ยงแสงแดดและความร้อน ดำเนินการเก็บตัวอย่างครั้งละ 5 มิลลิลิตร ด้วยเทคนิคปลอดเชื้อ ณ วันที่ 0, 5, 7 และ 14 ของการหมัก เพื่อนำไปทดสอบส่วนต่อไป

6. การประเมินคุณสมบัติทางกายภาพและเคมี

ประเมินคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของตัวอย่างทดสอบก่อนและหลังการหมัก ดังนี้ ประเมินสีโดยการสังเกตด้วยตาเปล่าร่วมกับการเทียบสีด้วย Munsell color chart ประเมินกลิ่นโดยการดมกลิ่น ประเมินความใส (clarity) โดยการสังเกตด้วยตาเปล่า และประเมินความหนืด (viscosity) โดยใช้เครื่อง Viscometer type cone and plate (DVNext Cone/Plate Rheometer, Brookfield Ametek, UK) ความเร็วรอบ 100 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 วินาที ณ อุณหภูมิห้อง (27 ± 2 องศาเซลเซียส) และวัดค่า pH ด้วย pH meter (pH700, Eutech, Singapore)

7. การวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาล

วิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลด้วยเครื่อง refractometer (RX-5000, Atago, Japan) ณ อุณหภูมิห้อง (27 ± 2 องศาเซลเซียส) เทียบกับ Brix chart

8. การเตรียมตัวอย่างทดสอบสำหรับการวิเคราะห์

ใช้ไมโครปิเปต (micropipette) ดูดตัวอย่างทดสอบปริมาณ 2 มิลลิลิตรใส่ลงในหลอดปั่นเหวี่ยง (centrifuge tube) นำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง (centrifuge) (3531 Microcentrifuge, Abbott, USA) ความเร็วรอบ 10,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที นำส่วนใส (supernatant) ที่ได้ไปทดสอบส่วนต่อไป

9. การวิเคราะห์ปริมาณฟีนอลิกรวม (total phenolic content; TPC)

เตรียมสารละลายต่างๆ ในการทดสอบ ได้แก่ gallic acid ความเข้มข้นสุดท้าย 2.5 - 40 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร, 10%w/v Folin-Ciocalteu reagent และ 1.5%w/v Na_2CO_3 ใช้ micropipette ดูดสารละลาย gallic acid แต่ละความเข้มข้นปริมาณ 20 ไมโครลิตร เติมนลงใน 96-well plate จากนั้นเติม Folin-Ciocalteu reagent 50 ไมโครลิตร และสารละลาย Na_2CO_3 80 ไมโครลิตร ตามลำดับ ผสมให้เข้ากัน จากนั้นนำไปบ่ม (incubate) ณ อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที หมั่นด้วยอัลูมิเนียมฟอยล์ แล้วบ่มทิ้งไว้ในที่มืดอีก 30 นาที นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 750 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง microplate reader (SynergyH1, BioTek, Norway) สร้างกราฟมาตรฐานของ gallic acid โดย plot ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง และความเข้มข้น เพื่อหาสมการเส้นตรงและค่า r^2 (Singleton *et al.*, 1999)

ทดสอบเช่นเดียวกันด้วยคอมบูชาและกลุ่มควบคุมวัดค่าการดูดกลืนแสง และคำนวณปริมาณฟีนอลิกรวมจากสมการเส้นตรงที่ได้จากกราฟมาตรฐาน gallic acid ในหน่วยมิลลิกรัมสมมูลของ gallic acid ต่อคอมบูชา 1 มิลลิลิตร (mg gallic acid equivalent (GAE)/mL)

10. การทดสอบฤทธิ์ต้านออกซิเดชันด้วยวิธี 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH)

เตรียมสารละลายต่างๆ ในการทดสอบ ได้แก่ DPPH 0.2 มิลลิโมลาร์ และ Trolox ความเข้มข้นสุดท้าย 10-40 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร ใช้ micropipette ดูดสารละลาย Trolox คอมบูชา หรือกลุ่มควบคุม ปริมาณ 50 ไมโครลิตร เติมนลงใน 96-well plate จากนั้นเติม DPPH 100 ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากันโดยการเขย่าเบาๆ แล้วบ่มไว้ในที่มืด 30 นาที นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 517 นาโนเมตร ด้วย microplate reader และคำนวณร้อยละในการต้านออกซิเดชัน (%Inhibition) เทียบกับ Trolox (Blois, 1958) ดังสมการต่อไปนี้

$$\% \text{Inhibition} = \left[\frac{(\text{Abs}_{\text{blank}} - \text{Abs}_{\text{sample}}) / \text{Abs}_{\text{blank}}}{\text{Abs}_{\text{blank}}} \right] \times 100$$

เมื่อ $\text{Abs}_{\text{blank}}$ คือค่าการดูดกลืนแสงของ blank (ไม่เติมสารทดสอบ) และ $\text{Abs}_{\text{sample}}$ คือค่าการดูดกลืนแสงของสารทดสอบ

11. การทดสอบฤทธิ์ต้านออกซิเดชันด้วยวิธี Ferric reducing antioxidant power (FRAP)

เตรียมสารละลายต่างๆ ในการทดสอบ ได้แก่ FRAP reagent (acetate buffer 300 มิลลิโมลาร์ pH 3.6, TPTZ 10 มิลลิโมลาร์ ใน 40 มิลลิโมลาร์ hydrochloric acid, ferric chloride 20 มิลลิโมลาร์ อัตราส่วน 10:1:1) และ ferrous sulphate ความเข้มข้นสุดท้าย 0.001-0.05 มิลลิโมลาร์ ใช้ micropipette ดูดสารละลาย FRAP reagent ปริมาณ 270 ไมโครลิตร เติมนลงใน 96-well plate จากนั้นเติม ferrous sulphate ปริมาณ 30 ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากันโดยการเขย่าเบาๆ แล้วบ่มไว้ในที่มืด 30 นาที นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 593 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง microplate reader สร้างกราฟมาตรฐานของ ferrous sulphate โดย plot ระหว่างค่าการดูดกลืนแสง และความเข้มข้น เพื่อหาสมการเส้นตรงและค่า r^2 (Benzie & Strain, 1996)

ทดสอบเช่นเดียวกันด้วยคอมบูชาและกลุ่มควบคุมวัดค่าการดูดกลืนแสง และคำนวณค่า FRAP จากกราฟมาตรฐานของ ferrous sulfate ในหน่วยมิลลิกรัมเฟอร์รัสต่อคอมบูชา 1 มิลลิลิตร (mg Fe^{2+} /mL)

12. การวิเคราะห์ทางสถิติ

ข้อมูลถูกวิเคราะห์ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) เพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างสูตร ณ ระยะเวลาการหมักเดียวกัน ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ $p < 0.05$ นอกจากนี้ ค่าที่แสดงการเปลี่ยนแปลงสูงสุดหรือต่ำสุดของแต่ละสูตรตลอดระยะเวลาการหมักถูกนำมาเปรียบเทียบกับค่าเริ่มต้น (Day 0) โดยใช้สถิติ Student's *t*-test ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ $p < 0.05$ ผลการทดลองแสดงในรูปค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean $\pm$ SD) จากการทดลองอิสระ 3 ซ้ำ ($n = 3$) และวิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรม IBM SPSS Statistics Version 26.0

ผลการทดลองและอภิปรายผล

1. คุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของคอมบูชา

1.1 สี (color) และกลิ่น (odor) ของคอมบูชา

จากการสังเกตสีของคอมบูชาสูตร JT, J และ T ตลอดจนกลุ่มควบคุมสูตร JTN และ S ที่เตรียมเสร็จใหม่ด้วยตาเปล่าร่วมกับการเทียบสีผ่าน Munsell color chart พบว่าคอมบูชาสูตร JT และกลุ่มควบคุมสูตร JTN มีสีน้ำตาล ซึ่งเกิดจากสีตามธรรมชาติของชาดำและแกนตะวัน สำหรับคอมบูชาสูตร T มีสีน้ำตาลเข้ม สูตร J มีสีน้ำตาลอมเหลือง และกลุ่มควบคุมสูตร S มีสีเหลืองอ่อน เมื่อหมักครบ 14 วัน พบว่าสีของสูตร JT (10YR 6/6) และ JTN (7.5YR 5/8) รวมทั้งสูตร T (7.5YR 4/6) และ J (2.5Y 6/4) มีสีอ่อนลง ต่างจากสูตร S (2.5Y 9/2) ที่มีสีเข้มขึ้นอย่างเห็นได้ชัด (Figure 1)

จากการประเมินกลิ่นหลังหมักครบ 14 วัน พบว่าสูตรที่เดิม SCOBY (JTN, JT, J) เกิดกลิ่นเปรี้ยวของกรดอะซิติก โดยสูตรคอมบูชาทั้งสามสูตรจะมีกลิ่นผสมผสานระหว่างกลิ่นกรดอะซิติก กลิ่นชา และแกนตะวันตามวัตถุดิบที่ใช้ในการหมัก ขณะที่กลุ่มควบคุมสูตร JTN มีเพียงกลิ่นของชาดำ และกลิ่นธรรมชาติของแกนตะวันเท่านั้น กลิ่นเปรี้ยวดังกล่าวเกิดจากกระบวนการหมักของแบคทีเรียกรดอะซิติก (acetic acid bacteria) ที่เปลี่ยนน้ำตาลในคอมบูชาให้กลายเป็นกรดอะซิติก สอดคล้องกับงานวิจัยของ Wang *et al.* (2022) ที่รายงานว่าหลังการหมักคอมบูชาเป็นเวลา 14 วัน จะพบปริมาณกรดอะซิติกเพิ่มขึ้น และค่า pH ลดลง โดยสีของคอมบูชาที่จางลงหลังการหมัก อาจสัมพันธ์กับระดับความเป็นกรดที่เพิ่มขึ้น Zou และคณะ (2021) กล่าวว่าสารแอนโทไซยานิน (anthocyanins) ซึ่งเป็นสารให้สีในพืชจะเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเมื่อค่า pH เปลี่ยนไป ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสีในเครื่องดื่มคอมบูชาอย่างมีนัยสำคัญ

1.2 ความหนืด (Viscosity) ของคอมบูชา

คอมบูชาทุกสูตร (JT, T, J) และกลุ่มควบคุม (JTN, S) มีค่าความหนืด ณ วันเริ่มต้น (day 0) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยมีค่าระหว่าง 1.05 – 1.50 cP โดยสูตรที่มีน้ำตาลกักเก็บตะวันเป็นส่วนผสม (JT, T และ JTN) จะมีความหนืดสูงกว่าสูตรที่ไม่มีน้ำตาลกักเก็บตะวัน (T และ S) อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยสูตร JT มีความหนืดเริ่มต้น 1.31 ± 0.03 cP ซึ่งไม่แตกต่างจากกลุ่มควบคุมสูตร JTN แต่ต่ำกว่าสูตร J และสูงกว่าสูตร T และกลุ่มควบคุม S อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

ระหว่างการหมัก 14 วัน พบว่าทุกสูตรมีความหนืดเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยเฉพาะอย่างยิ่งสูตร JT ซึ่งมีความหนืดสูงสุดเท่ากับ 2.06 ± 0.02 cP ณ วันที่ 7 ซึ่งสูงกว่าวันเริ่มต้น และสูงกว่าทุกสูตรอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) คาดว่าความหนืดที่เพิ่มขึ้นเกิดจากแป้งที่เป็นองค์ประกอบหลักของแกนตะวันและอินูลินซึ่งเป็นใยอาหารในกลุ่มโอลิโกแซ็กคาไรด์ (oligosaccharide) (Table 1 และ Figure 2a) สอดคล้องกับการศึกษาของ Watawana *et al.* (2016) และ Jakubczyk *et al.* (2020) ซึ่งรายงานว่าหลังการหมัก ความหนืดของคอมบูชามีแนวโน้มเพิ่มขึ้น ในขณะที่ Tomar *et al.* (2023) รายงานว่าความหนืดอาจเพิ่มขึ้นหรือลดลงได้จากผลของสารที่หมักร่วมกับชาหมักคอมบูชา

1.3 ความใส (Clarity) ของคอมบูชา

จากการสังเกตพบว่าคอมบูชาทุกสูตร (JT, T, J) และกลุ่มควบคุม (JTN, S) เริ่มต้น (day 0) มีความใสมาก เมื่อหมักเป็นเวลา 14 วัน พบว่าสูตรที่เดิม SCOBY (JT, T, J, S) มีความขุ่นมากขึ้น โดยสูตร JT และ T มีความขุ่นเพิ่มขึ้นมากที่สุด ตามด้วยสูตร J และ S ตามลำดับ Amarasinghe *et al.* (2018) สันนิษฐานว่าความใสที่ลดลงเกิดจากการที่เชื้อสร้างเซลลูโลส (cellulose) เพิ่มขึ้นระหว่างกระบวนการหมักสำหรับสูตรชาดำผสมแกนตะวันไม่หมัก (JTN) ยังคงมีความใสไม่แตกต่างจากเมื่อเตรียมเสร็จใหม่

1.4 ความเป็นกรด-ด่าง (pH) ของคอมบูชา

คอมบูชาทุกสูตร (JT, T, J) และกลุ่มควบคุม (JTN, S) มีค่า pH ณ วันเริ่มต้น (day 0) อยู่ในช่วง 5.08-6.52 โดยคอมบูชาสูตร JT มีค่า pH เท่ากับ 5.83 ± 0.06 ซึ่งไม่แตกต่างจากสูตร J และกลุ่มควบคุม JTN แต่สูงกว่าสูตร T และต่ำกว่ากลุ่มควบคุม S อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

ระหว่างการหมัก 14 วัน ค่า pH ของทุกสูตรมีแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่อง โดยสูตร JT มีค่า pH ลดลงเป็น

3.44±0.03 ณ วันที่ 14 ซึ่งต่ำกว่าค่าเริ่มต้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบ ณ วันที่เดียวกัน พบว่าสูตร JT มีค่า pH สูงกว่าสูตร T (2.73±0.04) แต่ต่ำกว่าสูตร J (3.74±0.05) อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ขณะที่กลุ่มควบคุม JTN มีค่า pH ลดลงเป็น 5.32±0.03 ณ วันที่ 14 ซึ่งเป็นการเปลี่ยนแปลงที่ค่อนข้างน้อยเมื่อเทียบกับสูตรที่ผ่านการหมักด้วย SCOBY (Table 2 และ Figure 2b)

ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับรายงานของ Jakubczyk *et al.* (2020) ที่พบว่าการลดลงของค่า pH ในคอมบูชาเกิดจากการสร้างกรดอินทรีย์ระหว่างกระบวนการหมัก โดยเฉพาะกรดอะซิติกซึ่งเป็นผลิตภัณฑ์เมแทบอลิซึมที่สำคัญของจุลินทรีย์ใน SCOBY ขณะที่กลุ่มควบคุม JTN ซึ่งไม่เติม SCOBY มีการลดลงของค่า pH เพียงเล็กน้อย สะท้อนให้เห็นว่าการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวมีความเกี่ยวข้องกับกิจกรรมของจุลินทรีย์ระหว่างกระบวนการหมักเป็นหลัก



Figure 1 Color of kombucha on day 14 of fermentation: (a) JTN – unfermented black tea with Jerusalem artichoke, (b) JT – fermented black tea with Jerusalem artichoke, (c) T – fermented black tea, (d) J – fermented Jerusalem artichoke, and (e) S – fermented sucrose.

1.5 ปริมาณน้ำตาล (Total sucrose contents) ในคอมบูชา

ผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลทั้งหมดโดยประมาณในคอมบูชาและกลุ่มควบคุมด้วยเครื่อง Brix refractometer พบว่า สูตรที่มีส่วนผสมของแก่นตะวัน (JT, J และ JTN) มีค่า %Brix ณ วันเริ่มต้น (day 0) สูงกว่าสูตรที่ไม่มีแก่นตะวัน (T และ S) โดยสูตร J มีค่า %Brix สูงสุดเท่ากับ 11.98±0.36% (Table 3) ขณะที่สูตร JT มีค่า %Brix ไม่แตกต่างจากกลุ่มควบคุม JTN แต่สูงกว่าสูตร T และกลุ่มควบคุม S อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

หลังการหมักเป็นเวลา 14 วัน ปริมาณน้ำตาลของคอมบูชาทุกสูตรมีแนวโน้มลดลง โดยสูตร JT มีค่า %Brix ลดลงจาก 8.34±0.54% เป็น 6.98±0.69% ซึ่งต่ำกว่าค่าเริ่มต้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) การลดลงของปริมาณน้ำตาลในสูตร JT สูงกว่ากลุ่มควบคุม JTN ซึ่งไม่เติม SCOBY ขณะที่สูตร T และ J แสดงแนวโน้มการลดลงในลักษณะเดียวกัน ส่วนกลุ่มควบคุม S มีค่า %Brix ลดลงเพียงเล็กน้อยและไม่แตกต่างจากค่าเริ่มต้นอย่างมีนัยสำคัญ (Table 3 และ Figure 2c)

หัวแก่นตะวันเป็นแหล่งของน้ำตาลธรรมชาติหลายชนิด ได้แก่ ฟรุคโตส กลูโคส และอินูลิน ซึ่งมีส่วนทำให้สูตรที่มีแก่นตะวันมีค่า %Brix เริ่มต้นสูงกว่าสูตรที่ไม่มีแก่นตะวัน นอกจากนี้ อินูลินซึ่งเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ในกลุ่มฟรุคแทน (fructan) ยังสามารถถูกย่อยสลายโดยจุลินทรีย์ระหว่างการหมักให้เป็นน้ำตาลฟรุคโตสได้ (Puttha & Charoenphun, 2020)

ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับรายงานของ Jakubczyk *et al.* (2020) ที่พบว่าปริมาณน้ำตาลในคอมบูชาลดลงอย่างต่อเนื่องระหว่างการหมัก เนื่องจากยีสต์ใน SCOBY ใช้น้ำตาลเป็นแหล่งพลังงานและเปลี่ยนเป็นเอทานอล ขณะที่แบคทีเรียกรดอะซิติกเปลี่ยนเอทานอลต่อไปเป็นกรดอะซิติกและกรดอินทรีย์ชนิดอื่น ส่งผลให้ปริมาณน้ำตาลคงเหลือลดลง โดย Wang *et al.* (2022) รายงานเพิ่มเติมว่าการใช้ประโยชน์จากน้ำตาลระหว่างการหมักมีความสัมพันธ์กับการสะสมของกรดอินทรีย์และการลดลงของค่า pH ซึ่งสอดคล้องกับผลการเปลี่ยนแปลงค่า pH ที่พบในการศึกษานี้ (Table 2 และ Table 3)

Table 1 Viscosity of various kombucha formulations during 14 days of fermentation.

Fermentation time (day)	Viscosity (centipoise; cP)				
	JTN	JT	T	J	S
0	1.31±0.01 ^{c,d,e}	1.31±0.03 ^{c,d,e}	1.08±0.01 ^{a,b,d,e}	1.50±0.01 ^{a,b,c,e}	1.05±0.01 ^{a,b,c,d}
5	1.65±0.02 ^{b,c,d,e}	1.77±0.02 ^{a,c,d,e}	1.18±0.01 ^{a,b,d,e,*}	1.93±0.02 ^{a,b,c,e}	1.11±0.01 ^{a,b,c,d}
7	1.97±0.02 ^{b,c,e,*}	2.06±0.02 ^{a,c,d,e,*}	1.14±0.01 ^{a,b,d,e}	1.96±0.01 ^{b,c,e,*}	1.11±0.01 ^{a,b,c,d}
14	1.75±0.02 ^{c,e}	1.80±0.03 ^{c,d,e}	1.14±0.00 ^{a,b,d,e}	1.76±0.02 ^{b,c,e}	1.18±0.01 ^{a,b,c,d,*}

Table 2 pH value of various kombucha formulations during 14 days of fermentation.

Fermentation time (day)	pH value				
	JTN	JT	T	J	S
0	5.90±0.08 ^{c,e}	5.83±0.06 ^{c,e}	5.08±0.04 ^{a,b,d,e}	5.90±0.04 ^{c,e}	6.52±0.03 ^{a,b,c,d}
5	5.62±0.03 ^{b,c,e}	3.93±0.10 ^{a,c,d,e}	3.41±0.04 ^{a,b,d,e}	5.64±0.05 ^{b,c,e}	2.96±0.04 ^{a,b,c,d}
7	5.51±0.02 ^{b,c,d,e}	3.59±0.04 ^{a,c,d,e}	2.92±0.03 ^{a,b,d}	3.81±0.04 ^{a,b,c,e}	2.85±0.03 ^{a,b,d}
14	5.32±0.03 ^{b,c,d,e,*}	3.44±0.03 ^{a,c,d,e,*}	2.73±0.04 ^{a,b,d,e,*}	3.74±0.05 ^{a,b,c,e,*}	2.55±0.05 ^{a,b,c,d,*}

Table 3 Total sugar content of various kombucha formulations during 14 days of fermentation.

Fermentation time (day)	Total sucrose content (%Brix)				
	JTN	JT	T	J	S
0	8.52±0.38 ^{c,d,e}	8.34±0.54 ^{c,d,e}	5.21±0.10 ^{a,b,d}	11.98±0.36 ^{a,b,c,e}	5.17±0.00 ^{a,b,d}
5	8.47±0.35 ^{c,e}	7.84±0.75 ^{c,e}	5.12±0.04 ^{a,b,d}	9.06±0.07 ^{c,e}	5.10±0.08 ^{a,b,d}
7	8.42±0.14 ^{b,c,e}	7.60±0.60 ^{a,c,e}	4.90±0.22 ^{a,b,d}	8.65±0.25 ^{c,e}	5.01±0.10 ^{a,b,d}
14	8.40±0.26 ^{b,c,e,*}	6.98±0.69 ^{a,c,d,e,*}	4.52±0.17 ^{a,b,d,*}	7.92±0.20 ^{b,c,e,*}	4.75±0.44 ^{a,b,d}

Note: Values are expressed as mean ± SD (n = 3). Different lowercase letters (a-e) within the same row indicate significant differences among formulations at the same fermentation time according to DMRT ($p < 0.05$). Asterisks (*) indicate significant differences between the baseline value (Day 0) and the highest or lowest response value observed within the same formulation, as determined by Student's *t*-test ($p < 0.05$).

2. Total phenolic contents (TPC) ในคอมบูชา

ผลการวิเคราะห์ปริมาณฟีนอลิกรวม (TPC) ด้วยวิธี Folin-Ciocalteu colorimetry (Table 4) พบว่า ณ วันเริ่มต้น (day 0) คอมบูชาสูตร JT และ T มีค่า TPC เท่ากับ 1.65 มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิกต่อมิลลิลิตร ซึ่งไม่แตกต่างจากกลุ่มควบคุมสูตร JTN แต่สูงกว่าสูตร J อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ขณะที่กลุ่มควบคุมสูตร S ซึ่งประกอบด้วยซูโครสและ SCOBY มีค่า TPC ต่ำที่สุด (0.03 ± 0.00 มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิกต่อมิลลิลิตร)

ระหว่างการหมัก พบว่าค่า TPC ของสูตร JT, T และ J มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงต้นของการหมักก่อนจะลดลงเล็กน้อยในช่วงปลายการหมัก โดยสูตร T มีค่า TPC สูงสุดเท่ากับ 1.76 ± 0.05 มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิกต่อมิลลิลิตร ณ วันที่ 5

ซึ่งสูงกว่าสูตร JT (1.69 ± 0.05 มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิกต่อมิลลิลิตร) และสูตร J (1.62 ± 0.01 มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิกต่อมิลลิลิตร) ณ วันเดียวกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) อย่างไรก็ตาม สูตร JT และ J ยังคงมีค่า TPC ในระดับสูงตลอดระยะเวลาการหมัก (Figure 3a)

การเพิ่มขึ้นของ TPC ในช่วงต้นของการหมักอาจเกิดจากกิจกรรมของจุลินทรีย์ใน SCOBY ที่ผลิตเอนไซม์หลายชนิด เช่น cellulase, glucanase, xylanase และ glucosidase ซึ่งช่วยย่อยสลายสารประกอบพอลิฟีนอลโมเลกุลใหญ่และปลดปล่อยสารฟีนอลิกที่จับอยู่กับผนังเซลล์พืช ทำให้ตรวจวัดปริมาณสารฟีนอลิกรวมได้เพิ่มขึ้น (Aditiwati & Kusnadi, 2003; Wang *et al.*, 2022) ในทางตรงกันข้าม การลดลงของ TPC ในช่วงปลายของการหมักอาจเกี่ยวข้องกับการเกิดพอลิเมอร์

เชชันหรือการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของสารฟีนอลิกบางชนิด ส่งผลให้ความสามารถในการตอบสนองต่อปฏิกิริยา Folin-Ciocalteu ลดลง (Romsomsa *et al.*, 2020)

ในใบชาสดประกอบด้วยสารพอลิฟีนอลจำนวนมาก โดยเฉพาะกลุ่ม flavanols ซึ่งมีคาเทชิน (catechins) เป็นองค์ประกอบหลักถึง 60–80% ของพอลิฟีนอลทั้งหมด โดยชนิดที่สำคัญ ได้แก่ (-)-Epigallocatechin-3-gallate (EGCG), (-)-Epigallocatechin (EGC), (-)-Epicatechin-3-gallate (ECG) และ (-)-Epicatechin (EC) (Zhen *et al.*, 2002) นอกจากนี้ Cardoso *et al.* (2020) ยังรายงานว่าสารฟีนอลิกหลักในคอมบูชาชาดำคือ flavonoids รองลงมาคือ phenolic acids, polyphenols, lignans และ stilbenes ส่วนแก๊นตะวันมีสารออกฤทธิ์หลัก ได้แก่ chlorogenic acid และ dicaffeoylquinic acid ซึ่งเป็นสารในกลุ่มฟีนอลิกเช่นกัน โดย Showkat *et al.* (2019) รายงานปริมาณ TPC ของผงแก๊นตะวันแห้งเท่ากับ 0.9-1.4 มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิกต่อกรัม ทั้งนี้ ค่า TPC ที่พบในงานวิจัยนี้มีแนวโน้มสูงกว่ารายงานก่อนหน้านี้ในคอมบูชาชาดำ ซึ่งมีค่าอยู่ในช่วงประมาณ 0.90 - 1.09 มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิกต่อมิลลิลิตร (Cardoso *et al.*, 2020; Hsieh *et al.*, 2021) ความแตกต่างดังกล่าวอาจเกิดจากชนิดของวัตถุดิบ สภาพการหมัก และองค์ประกอบของ SCOBY ที่ใช้ในแต่ละการศึกษา

สำหรับกลุ่มควบคุมสูตร S พบว่า ค่า TPC เพิ่มขึ้นจาก 0.03 ± 0.00 เป็น $0.32 - 0.39$ มิลลิกรัมสมมูลกรดแกลลิกต่อมิลลิลิตรภายหลังการหมัก แม้ว่าจะยังต่ำกว่าสูตรอื่นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) แต่ผลดังกล่าวสะท้อนให้เห็นว่ากระบวนการหมักและ SCOBY อาจมีส่วนในการสร้างหรือปลดปล่อยสารที่ตอบสนองต่อการทดสอบ Folin-Ciocalteu ได้ รวมทั้งสารเมแทบอไลต์ที่มีคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระ ซึ่งสนับสนุนบทบาทของ SCOBY ต่อการเพิ่มคุณค่าทางชีวภาพของคอมบูชา (Jakubczyk *et al.*, 2020; das Chagas *et al.*, 2024)

3.ฤทธิ์ต้านออกซิเดชันในคอมบูชา

ผลการประเมินฤทธิ์ต้านออกซิเดชันของคอมบูชาสูตรต่างๆ ด้วยวิธี DPPH radical scavenging (DPPH) และ Ferric Reducing Antioxidant Power (FRAP) พบว่า คอมบูชาสูตร JT, T และ J มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในระดับสูงตลอดระยะเวลาการหมัก และมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงต้นของการหมัก

ผลการทดสอบด้วยวิธี DPPH (Table 5, Figure 3b) พบว่า ณ วันเริ่มต้นการหมัก สูตร T มีค่า % inhibition สูงสุดเท่ากับ $93.55 \pm 0.89\%$ รองลงมาคือสูตร J, JT และ JTN ตาม

ลำดับ ขณะที่กลุ่มควบคุม S มีค่า % inhibition ต่ำที่สุด ($47.96 \pm 0.44\%$) ภายหลังการหมัก ค่า % inhibition ของสูตร JT, T และ J มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น โดยสูตร JT มีค่าสูงสุดเท่ากับ $96.14 \pm 0.15\%$ ณ วันที่ 7 ซึ่งไม่แตกต่างจากสูตร T ($95.71 \pm 0.53\%$) ณ วันที่เดียวกัน แต่สูงกว่าสูตร J และ JTN นอกจากนี้ยังมีค่าสูงกว่าสารมาตรฐาน Trolox ($94.54 \pm 0.49\%$, ณ ความเข้มข้น 40 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร) อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

ผลการศึกษาที่สอดคล้องกับรายงานของ Wang *et al.* (2022) ที่พบว่ากระบวนการหมักสามารถเพิ่มศักยภาพการต้านอนุมูลอิสระของคอมบูชาได้ โดยอาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงของสารประกอบฟีนอลิกและการเกิดสารเมแทบอไลต์ที่มีฤทธิ์ชีวภาพระหว่างการหมัก อย่างไรก็ตาม แนวโน้มดังกล่าวแตกต่างจากรายงานของ Romsomsa *et al.* (2020) ที่พบว่าค่า % inhibition ลดลงเมื่อระยะเวลาการหมักเพิ่มขึ้น ซึ่งอาจเป็นผลมาจากชนิดของวัตถุดิบ สภาพการหมัก และองค์ประกอบของจุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษา

สำหรับผลการทดสอบด้วยวิธี FRAP (Table 6, Figure 3c) พบว่า ณ วันเริ่มต้นการหมัก (day 0) สูตร JT, T และ JTN มีค่า FRAP เท่ากับ 23.24 ± 0.05 , 23.92 ± 1.20 และ 23.23 ± 2.90 มิลลิกรัมสมมูลเฟอร์รัสต่อมิลลิลิตรตามลำดับ โดยไม่พบความแตกต่างทางสถิติ ขณะที่ทั้งสามสูตรมีค่า FRAP สูงกว่าสูตร J และสูตร S อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ระหว่างการหมัก ค่า FRAP ของสูตร JT, T และ JTN มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในช่วงต้นของการหมัก แล้วลดลงในวันที่ 14 โดยสูตร T มีค่า FRAP สูงที่สุด เท่ากับ 25.73 ± 0.56 มิลลิกรัมสมมูลเฟอร์รัสต่อมิลลิลิตร ณ วันที่ 7 รองลงมาคือสูตร JTN และ JT ซึ่งมีค่าเท่ากับ 24.76 ± 1.32 และ 24.12 ± 0.88 มิลลิกรัมสมมูลเฟอร์รัสต่อมิลลิลิตร ณ วันที่เดียวกัน ตามลำดับ ขณะที่สูตร J มีค่า FRAP สูงสุดเท่ากับ 24.24 ± 0.59 มิลลิกรัมสมมูลเฟอร์รัสต่อมิลลิลิตร ณ วันที่ 14 ส่วนกลุ่มควบคุมสูตร S แม้ค่า FRAP จะเพิ่มขึ้นหลังการหมักแต่ยังคงต่ำกว่าสูตรอื่นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ตลอดการศึกษา

ค่า FRAP สะท้อนความสามารถของสารต้านอนุมูลอิสระในการรีดิวซ์เฟอร์ริกไอออน (Fe^{3+}) ให้เป็นเฟอร์รัสไอออน (Fe^{2+}) ดังนั้นค่า FRAP ที่สูงในสูตร JT, T และ J อาจสัมพันธ์กับการมีสารประกอบฟีนอลิกในชาดำและแก๊นตะวัน รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพภายใต้กิจกรรมของจุลินทรีย์ใน SCOBY ระหว่างการหมัก อย่างไรก็ตาม การลดลงของค่า FRAP ในสูตร JT และ T ช่วงปลายของการหมักอาจเกิดจากการเปลี่ยนแปลงองค์ประกอบหรือการเสื่อมสลายของสารต้านอนุมูลอิสระบางชนิด ส่งผลให้ความสามารถในการรีดิวซ์ลดลง

กลุ่มควบคุม JTN มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในระดับสูง ตั้งแต่ก่อนการหมัก ทั้งจากผลการทดสอบ DPPH และ FRAP ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณสารฟีนอลิกรวมที่ตรวจวัดได้ สะท้อนถึงบทบาทของชาดำและแก่นตะวันในฐานะแหล่งสำคัญของสารต้านอนุมูลอิสระ ขณะที่กลุ่มควบคุม S มีค่า % inhibition เพิ่มขึ้นอย่างชัดเจนระหว่างการหมัก แต่ยังคงมีค่า FRAP ต่ำกว่าสูตรอื่นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) แสดงให้เห็นว่ากระบวนการหมักและ SCOBY อาจก่อให้เกิดสารเมแทบอไลต์บางชนิดที่สามารถกำจัดอนุมูลอิสระ DPPH ได้ดี แต่มีความสามารถในการรีดิวซ์เฟอริกไอออนค่อนข้างจำกัด

Jakubczyk *et al.* (2020) รายงานว่าจุลินทรีย์ใน SCOBY สามารถผลิตสารที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระได้ เช่น lactic acid และ glucuronic acid ขณะที่ das Chagas *et al.* (2024) รายงานว่าใน SCOBY เป็นแหล่งของสารต้านอนุมูลอิสระที่สามารถสกัดและตรวจวัดฤทธิ์ได้ด้วยวิธี FRAP, ABTS และ ORAC ผลการศึกษาดังกล่าวสนับสนุนบทบาทของ SCOBY ในการเสริมสร้างคุณสมบัติต้านออกซิเดชันของคอมบูชา และอาจเกี่ยวข้องกับการปลดปล่อยสารฟีนอลิกหรือการสร้างสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพเพิ่มเติมระหว่างกระบวนการหมัก

เมื่อพิจารณาพร้อมกับผลการวิเคราะห์ปริมาณสารฟีนอลิกรวม พบว่าฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของคอมบูชาสูตร JT, T และ J มีความสัมพันธ์กับสารประกอบฟีนอลิกที่มีอยู่ในชาดำและแก่นตะวัน รวมถึงการเปลี่ยนแปลงของสารออกฤทธิ์ที่เกิดขึ้นระหว่างการหมัก โดยจุลินทรีย์ใน SCOBY อาจมีส่วนช่วยปลดปล่อยหรือสร้างสารที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระเพิ่มเติม ทำให้คอมบูชาทั้งสามสูตรมีศักยภาพในการต้านอนุมูลอิสระสูงตลอดระยะเวลาการหมัก

ทั้งนี้ ความแตกต่างที่พบระหว่างผลการทดสอบ DPPH และ FRAP สะท้อนถึงความแตกต่างของกลไกการทดสอบในแต่ละวิธี เนื่องจาก DPPH ประเมินความสามารถในการกำจัดอนุมูลอิสระ ขณะที่ FRAP ประเมินความสามารถในการรีดิวซ์สารออกซิไดซ์ ดังนั้นการใช้ทั้งสองวิธีร่วมกันจึงช่วยให้ประเมินศักยภาพต้านอนุมูลอิสระของคอมบูชาได้ครอบคลุมมากยิ่งขึ้น

แม้ว่าการศึกษานี้จะยังไม่สามารถประเมินค่า IC₅₀ ของแต่ละสูตรได้ แต่ค่า % inhibition ที่สูงของสูตร JT เมื่อเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน Trolox ภายใต้อาการทดลองเดียวกัน สะท้อนถึงศักยภาพในการต้านอนุมูลอิสระที่น่าสนใจ ทั้งนี้ การเปรียบเทียบประสิทธิภาพอย่างชัดเจนจำเป็นต้องอาศัยการคำนวณค่า IC₅₀ หรือค่าเทียบเท่า Trolox เพิ่มเติม

Table 4 Total phenolic contents of various kombucha formulations during 14 days of fermentation.

Fermentation time (day)	Total phenolic contents (mg GAE/mL Kombucha)				
	JTN	JT	T	J	S
0	1.65±0.01 ^{d,e}	1.65±0.00 ^{d,e}	1.65±0.00 ^{d,e}	1.59±0.00 ^{a,b,c,e}	0.03 ±0.00 ^{a,b,c,d}
5	1.65±0.03 ^e	1.69±0.05 ^{c,d,e}	1.76±0.0 ^{5b,d,e}	1.62±0.01 ^{b,c,e,*}	0.32±0.03 ^{a,b,c,d}
7	1.66±0.02 ^{b,d,e}	1.53±0.05 ^{a,e}	1.70±0.04 ^e	1.54±0.03 ^{a,e}	0.39±0.02 ^{a,b,c,d,*}
14	1.64±0.03 ^e	1.58±0.06 ^{c,d,e}	1.74±0.07 ^{b,d,e}	1.56±0.06 ^{b,c,e}	0.38±0.02 ^{a,b,c,d}

Table 5 Antioxidant activity of various kombucha formulations during 14 days of fermentation by DPPH assay.

Fermentation time (day)	% Inhibition				
	JTN	JT	T	J	S
0	88.81± 3.64 ^e	89.14±2.55 ^{d,e}	93.55±0.89 ^{d,e}	89.49 ±1.60 ^{b,c,e}	47.96 ±0.44 ^{a,b,c,d}
5	89.87±0.97 ^{b,c,e}	93.55±0.20 ^{a,d}	92.37±0.39 ^{d,e}	91.48 ±0.27 ^{b,c,e}	93.57 ±0.21 ^{a,c,d}
7	92.17±3.01	96.14±0.15 ^{d,e,*}	95.71±0.53 ^{d,*}	93.57 ±0.60 ^{b,c,e}	95.36 ±0.23 ^{b,d,*}
14	93.74±1.10	94.40±0.23	94.65±0.22	93.91 ±1.61 [*]	94.59 ±0.12

Table 6 Antioxidant activity of various kombucha formulations during 14 days of fermentation by FRAP assay.

Fermentation time (day)	FRAP value (mg Fe ²⁺ /mL)				
	JTN	JT	T	J	S
0	23.23±2.90 ^e	23.24±0.50 ^{d,e}	23.92±1.20 ^{d,e}	19.15±0.49 ^{b,c,e}	0.75±0.03 ^{a,b,c,d}
5	24.57±0.50 ^{d,e}	23.30±0.67 ^{d,e}	24.66±0.20 ^{d,e}	18.40±0.72 ^{a,b,c,e}	3.24±0.09 ^{a,b,c,d}
7	24.76±1.32 ^e	24.12±0.88 ^{c,e}	25.73±0.56 ^{b,d,e}	19.37±1.40 ^{c,e}	3.32±0.13 ^{a,b,c,d}
14	20.83±1.56 ^{d,e}	20.19±2.01 ^e	22.13±0.99 ^{d,e}	24.24±0.59 ^{a,c,e,*}	3.74±1.41 ^{a,b,c,d,*}

Note: Values are expressed as mean ± SD (n = 3). Different lowercase letters (a-e) within the same row indicate significant differences among formulations at the same fermentation time according to DMRT ($p < 0.05$). Asterisks (*) indicate significant differences between the baseline value (Day 0) and the highest or lowest response value observed within the same formulation, as determined by Student's *t*-test ($p < 0.05$).

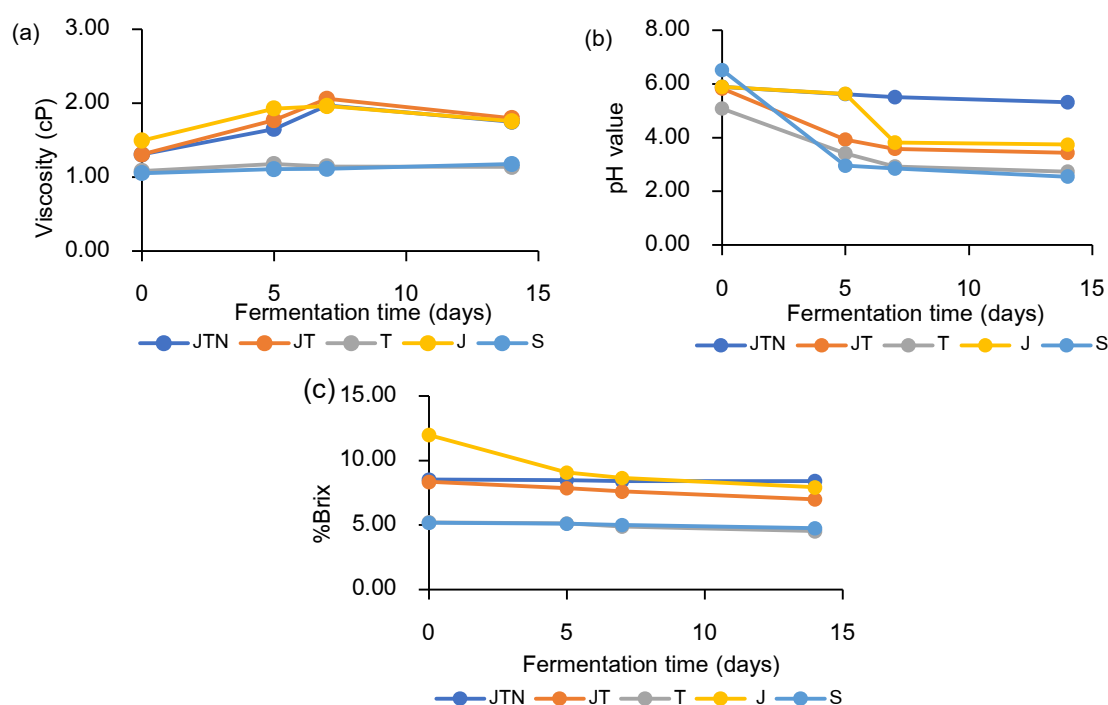


Figure 2 Changes in (a) Viscosity, (b) pH value and (c) Total sugar content for various kombucha formulations during 14-day of fermentation (JTN: unfermented black tea with Jerusalem artichoke, JT: fermented black tea with Jerusalem artichoke, T: fermented black tea, J: fermented Jerusalem artichoke, and S: fermented sucrose).

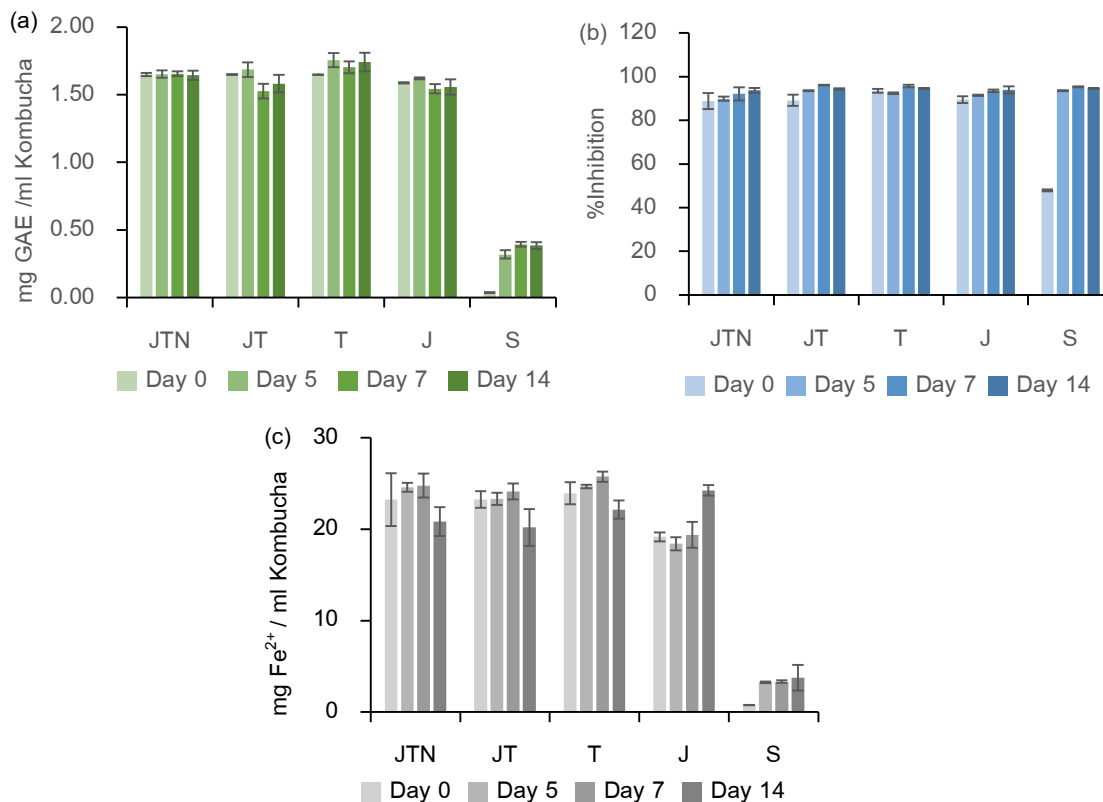


Figure 3 Changes in (a) total phenolic content, (b) anti-DPPH (%inhibition) and (c) FRAP value for various kombucha formulations during 14-day of fermentation.

สารต้านอนุมูลอิสระที่ตรวจพบในคอมบูชาส่วนใหญ่มีความสัมพันธ์กับสารประกอบพอลิฟีนอลที่พบในชาดำและแก่นตะวัน โดยเฉพาะสารในกลุ่ม flavonoids ซึ่งมีบทบาทสำคัญต่อการต้านอนุมูลอิสระ (Zhen *et al.*, 2002; Showkat *et al.*, 2019) ทั้งนี้ Cardoso *et al.* (2020) รายงานว่าคอมบูชาชาดำมี flavonoids เป็นองค์ประกอบหลักของสารฟีนอลิก ขณะที่ผลการศึกษานี้พบว่าคอมบูชาทุกสูตรมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในระดับสูง ซึ่งสอดคล้องกับปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวมที่ตรวจวัดได้ นอกจากนี้ ค่าฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่ได้จากการศึกษานี้ยังมีแนวโน้มสูงกว่าที่ Hsieh *et al.* (2021) รายงานไว้สำหรับคอมบูชาชาดำ ซึ่งอาจเป็นผลมาจากความแตกต่างของวัตถุดิบ สภาพการหมัก และองค์ประกอบของ SCOBY ที่ใช้ในการผลิต

โดยภาพรวม ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าการหมักด้วย SCOBY ช่วยคงหรือเพิ่มศักยภาพการต้านอนุมูลอิสระของคอมบูชาที่ผลิตจากชาดำและแก่นตะวันได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งยังสอดคล้องกับแนวโน้มการพัฒนาคอมบูชาเพื่อเป็นเครื่องดื่มฟังก์ชันที่มีคุณค่าทางโภชนาการและให้สารออกฤทธิ์ชีวภาพสูง อย่างไรก็ตาม การผลิตคอมบูชาควรดำเนินการภายใต้หลักสุขลักษณะที่เหมาะสมและแนวทางการผลิตที่ปลอดภัย

เพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์ที่มีคุณภาพและปลอดภัยต่อผู้บริโภค (Jakubczyk *et al.*, 2022; Kitwetcharoen *et al.*, 2023)

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าสามารถผลิตคอมบูชาจากชาดำผสมน้ำสกัดแก่นตะวัน (JT) โดยใช้ SCOBY เป็นหัวเชื้อหมักได้สำเร็จ การหมักเป็นเวลา 14 วันส่งผลให้สมบัติทางกายภาพและเคมีของผลิตภัณฑ์เปลี่ยนแปลงไป โดยเฉพาะการลดลงของค่า pH และการเปลี่ยนแปลงความหนืด ซึ่งสะท้อนถึงกระบวนการเมแทบอลิซึมของจุลินทรีย์ระหว่างการหมัก

คอมบูชาสูตร JT, T และ J มีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวมและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระในระดับสูงตลอดระยะเวลาการหมัก โดยสูตร JT แสดงศักยภาพด้านการต้านอนุมูลอิสระไม่แตกต่างจากสูตร T และ J ในภาพรวม แม้ว่าสูตร T จะมีปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวมและค่าความสามารถในการรีดิวซ์สูงที่สุดในบางช่วงของการหมักก็ตาม ผลการทดสอบด้วยวิธี DPPH และ FRAP แสดงให้เห็นว่าการใช้น้ำสกัดแก่นตะวันร่วมกับชาดำสามารถคงคุณสมบัติการต้านอนุมูลอิสระของคอมบูชาไว้ได้

เมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุมที่ไม่ผ่านการหมัก (JTN) พบว่ากระบวนการหมักมีส่วนสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงคุณสมบัติของผลิตภัณฑ์และฤทธิ์ชีวภาพ นอกจากนี้ กลุ่มควบคุมสูตร S ยังมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้นภายหลังการหมัก แม้จะยังต่ำกว่าสูตรที่มีชาดำหรือแก่จนวันเป็นส่วนประกอบ สะท้อนว่ากระบวนการหมักโดย SCOBY อาจมีส่วนในการสร้างสารเมแทบอไลต์ที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระบางชนิด โดยสรุป น้ำสกัดแก่จนวันสามารถใช้ทดแทนชาดำบางส่วนในการผลิตคอมบูชาได้โดยไม่ส่งผลกระทบต่อศักยภาพการต้านอนุมูลอิสระของผลิตภัณฑ์ อีกทั้งยังอาจเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการจากอินูลินและช่วยลดปริมาณชาดำในสูตร จึงมีศักยภาพในการพัฒนาเป็นเครื่องดื่มฟังก์ชันเพื่อสุขภาพในอนาคต ทั้งนี้ ควรมีการศึกษาเพิ่มเติมเกี่ยวกับองค์ประกอบของสารออกฤทธิ์ชีวภาพ ปริมาณแอลกอฮอล์ สัดส่วนที่เหมาะสมระหว่างชาดำและแก่จนวัน การพัฒนาสูตรคอมบูชา น้ำตาลต่ำ ความคงตัวระหว่างการเก็บรักษา และการยอมรับของผู้บริโภค เพื่อสนับสนุนการพัฒนาและการประยุกต์ใช้ผลิตภัณฑ์ในระดับอุตสาหกรรมต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนการวิจัยจากคณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร และหน่วยปฏิบัติการเทคโนโลยีชีวภาพเภสัชกรรม คณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยนเรศวร จังหวัดพิษณุโลก

เอกสารอ้างอิง

Aditiwati, P., & Kusnadi. (2003). Mixed culture and environmental factors involved in tea-cider fermentation. *Journal of Mathematical and Fundamental Sciences*, 35(2), 147–162. <https://doi.org/10.5614/itbj.sci.2003.35.2.5>

Amarasinghe, H., Weerakkody, N. S., & Waisundara, V. Y. (2018). Evaluation of physicochemical properties and antioxidant activities of kombucha “Tea Fungus” during extended periods of fermentation. *Food Science & Nutrition*, 6(3), 659–665.

Benzie, I. F. F., & Strain, J. J. (1996). The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of antioxidant power: The FRAP assay. *Analytical Biochemistry*, 239, 70–76.

Blois, M. S. (1958). Antioxidant determinations by the use of a stable free radical. *Nature*, 181, 1199–1200.

Cardoso, R. R., Neto, R. O., dos Santos D’Almeida, C. T., do Nascimento, T. P., Pressete, C. G., Azevedo, L., *et al.* (2020). Kombuchas from green and black teas have different phenolic profile, which impacts their antioxidant capacities, antibacterial and antiproliferative activities. *Food Research International*, 128, 108782.

das Chagas, E. G. L., Zamarian, F. C., de Souza, H. F., *et al.* (2024). Extraction of polyphenols and antioxidant compounds from SCOBY, as a by-product of Kombucha, using different types of extraction. *Discover Food*, 4, 54.

Gaggia, F., Baffoni, L., Galiano, M., Nielsen, D. S., Jakobsen, R. R., Castro-Mejía, J. L., *et al.* (2018). Kombucha beverage from green, black and rooibos teas: A comparative study looking at microbiology, chemistry and antioxidant activity. *Nutrients*, 11(1), 1–22.

Hsieh, Y., Chiu, M., & Chou, J. (2021). Efficacy of the kombucha beverage derived from green, black, and Pu’er teas on chemical profile and antioxidant activity. *Journal of Food Quality*, 2021, 1735959.

Jakubczyk, K., Kaldunska, J., Kochman, J., & Janda, K. (2020). Chemical profile and antioxidant activity of the kombucha beverage derived from white, green, black and red tea. *Antioxidants*, 9(5), 1–15.

Jakubczyk, K., Kupnicka, P., Melkis, K., Mielczarek, O., Walczyńska, J., Chlubek, D., & Janda-Milczarek, K. (2022). Effects of fermentation time and type of tea on the content of micronutrients in kombucha fermented tea. *Nutrients*, 14(22), 4828.

Jarrell, J., Altman, T., & Bennett, J. (2000). The kombucha consortia of yeasts and bacteria. *Mycologist*, 14, 166–170.

Kapp, J. M., & Sumner, W. (2019). Kombucha: A systematic review of the empirical evidence of human health benefit. *Annals of Epidemiology*, 30, 66–70.

Khan, N., & Mukhtar, H. (2018). Tea polyphenols in promotion of human health. *Nutrients*, 11(1), 1–16.

Kitwetcharoen, H., Phung, L. T., Klanrit, P., Thanonkeo, S., Tippayawat, P., Yamada, M., & Thanonkeo, P. (2023). Kombucha healthy drink—recent advances

- in production, chemical composition and health benefits. *Fermentation*, 9(1), 48.
- Niljantuk, N., Chuekram, S., Kangkuntod, S., Oonmetta-aree, J., & Singthong, J. (2019). Prebiotic activities of Jerusalem artichoke. *Science and Technology Research Journal Nakhon Ratchasima Rajabhat University*, 4(2), 18–28.
- Puttha, R., & Charoenphun, N. (2020). Planting techniques of Jerusalem artichoke in Thailand and guidelines for utilization of Jerusalem artichoke tubers in the food industry. *Thai Science and Technology Journal (TSTJ)*, 29(6), 919–940.
- Romsomsa, N., Pornsanthia, J., Rimlumduan, T., & Vechklang, K. (2020). The biological activities of Kombucha during fermentation process. *Naresuan Phayao Journal*, 14(1), 75–87.
- Sawicka, B., Skiba, D., Pszczółkowski, P., Aslan, I., Sharifi-Rad, J., & Krochmal-Marczak, B. (2020). Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) as a medicinal plant and its natural products. *Cellular and Molecular Biology (Noisy-le-grand)*, 66(4), 160–177.
- Selvaraj, S., & Gurumurthy, K. (2024). Metagenomic, organoleptic profiling, and nutritional properties of fermented kombucha tea substituted with recycled substrates. *Frontiers in Microbiology*, 15, 1367697.
- Shao, T., Yu, Q., Zhu, T., Liu, A., Gao, X., Long, X., et al. (2020). Inulin from Jerusalem artichoke tubers alleviates hyperglycaemia in high-fat-diet-induced diabetes mice through the intestinal microflora improvement. *British Journal of Nutrition*, 123(3), 308–318.
- Showkat, M. M., Falck-Ytter, A. B., & Strætkvern, K. O. (2019). Phenolic acids in Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.): Plant organ dependent antioxidant activity and optimized extraction from leaves. *Molecules*, 24(18), 3296.
- Singleton, V. L., Orthofer, R., & Lamuela-Raventos, R. M. (1999). Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent. *Methods in Enzymology*, 299, 152–178.
- Tomar, O. (2023). Determination of some quality properties and antimicrobial activities of kombucha tea prepared with different berries. *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*, 47(2), 252–262.
- Wang, B., Rutherford-Markwick, K., Zhang, X.-X., & Mutukumira, A. N. (2022). Kombucha: Production and microbiological research. *Foods*, 11(21), 3456.
- Wang, X., Wang, D., Wang, H., Jiao, S., Wu, J., Hou, Y., Sun, J., & Yuan, J. (2022). Chemical profile and antioxidant capacity of kombucha tea by the pure cultured kombucha. *LWT*, 168, 113931.
- Watawana, M. I., Jayawardena, N., Gunawardhana, C. B., & Waisundara, V. Y. (2016). Enhancement of the antioxidant and starch hydrolase inhibitory activities of king coconut water (*Cocos nucifera* var. *aurantiaca*) by fermentation with kombucha 'tea fungus'. *International Journal of Food Science & Technology*, 51, 490–498.
- Zhen, Y., Chen, Z., Chen, S., & Chen, M. (2002). *Tea: Bioactivity and therapeutic potential*. Taylor & Francis.

การศึกษาเบื้องต้นเพื่อออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ถ่ายภาพหลอดเลือดดำแบบเรียลไทม์ต้นทุนต่ำด้วยคลื่นอินฟราเรดช่วงใกล้

Preliminary study on designing and developing a low-cost, real-time vein visualization device utilizing near-infrared technology

กรุณา จันทุม¹, สามารท สินทร² และณัฐจิรา เมืองมูล³

Karuna Chuntum¹, Samart Sinton² and Nuttanicha Muangmool³

Received: 3 April 2025 ; Revised: 14 July 2025 ; Accepted: 14 August 2025

บทคัดย่อ

ผู้ป่วยที่อยู่ในภาวะวิกฤตและไม่สามารถช่วยเหลือตนเองได้มักต้องได้รับยาและสารอาหารผ่านทางหลอดเลือดดำเพื่อการรักษา และการมีชีวิตรอด การเจาะเลือดจากหลอดเลือดดำเป็นหัตถการทางการแพทย์ที่ใช้บ่อยในการตรวจสุขภาพหรือการบริจาคเลือด ปัจจุบัน อุปกรณ์ถ่ายภาพหลอดเลือดดำซึ่งช่วยระบุตำแหน่งในการแทงเข็มที่มีการผลิตออกมาจำหน่ายเชิงพาณิชย์นั้นมีราคาแพง ในการวิจัยครั้งนี้ จึงมุ่งเน้นไปที่การออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ถ่ายภาพหลอดเลือดดำแบบเรียลไทม์ต้นทุนต่ำโดยใช้คลื่นอินฟราเรดช่วงใกล้

การวิจัยนี้ดำเนินการภายใต้กรอบแนวคิดการพัฒนานวัตกรรมของ วิธนา จิระแพทย์ (2552) โดยประกอบด้วยขั้นตอนต่าง ๆ ได้แก่ 1) วิเคราะห์ปัญหาความไม่เพียงพอของอุปกรณ์สำหรับการจัดการกระบวนการเรียนการสอน 2) ประเมินความต้องการเพื่อหาแนวทางจัดหาสิ่งสนับสนุนสำหรับหลักสูตรสาธารณสุขศาสตร์ กลุ่มวิชาตรวจประเมินและบำบัดโรคเบื้องต้น 3) สร้างความร่วมมือและทีมงานโดยขอความร่วมมือจากคณาจารย์และนักศึกษาในสาขาวิชา 4) กำหนดประเด็นการพัฒนาอุปกรณ์ถ่ายภาพหลอดเลือดดำเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ 5) ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ถ่ายภาพหลอดเลือดดำอย่างเป็นระบบ 6) สังเคราะห์ข้อมูลความรู้จากวรรณกรรมที่มีคุณภาพ 7) ออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ 8) วางแผนวิธีการวัดผล 9) กำหนดแนวทางการใช้ 10) ทดลองใช้อุปกรณ์ถ่ายภาพหลอดเลือดดำกับอาสาสมัคร 11) ประเมินผลการใช้งานอุปกรณ์ 12) บันทึกผลการดำเนินงานพร้อมระบุแหล่งอ้างอิงที่เกี่ยวข้องในการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ 13) เผยแพร่อุปกรณ์ถ่ายภาพหลอดเลือดดำเพื่อนำไปใช้จริง กลุ่มตัวอย่างเป็นนักศึกษาและบุคลากรชายและหญิง อายุ 19-59 ปี จากมหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ ขนาดตัวอย่างกำหนดด้วยโปรแกรม G*power 3.1.9.7 โดยมีค่าอำนาจการทดสอบ = 0.80 ค่าความเชื่อมั่น = 0.05 และค่าขนาดอิทธิพล = 0.90 ได้ขนาดตัวอย่าง 10 คน สุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง เครื่องมือวิจัยคือ แบบบันทึกข้อมูลและอุปกรณ์ถ่ายภาพหลอดเลือดดำ ตรวจสอบคุณภาพของแบบบันทึกข้อมูลได้ค่า IOC ระหว่าง 0.87-1.00 วิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติพรรณนา เช่น จำนวน ร้อยละ ค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ผลการศึกษาได้พบอุปกรณ์ถ่ายภาพหลอดเลือดดำที่ถ่ายภาพได้ในที่มีแสงปกติและถ่ายภาพหลอดเลือดดำได้ผิวหนึ่งได้ชัดเจน มีคุณลักษณะของอุปกรณ์ดังนี้ 1) พื้นที่ขนาดภาพที่ถ่ายได้ใกล้ที่สุดถึงพื้นที่ขนาดภาพที่ถ่ายได้ไกลที่สุด 6 x 6 เซนติเมตร ถึง 6 x 10 เซนติเมตร 2) ระยะจากผิวหนึ่งถึงกล้องประมาณ 14 เซนติเมตร ถึง 34 เซนติเมตร 3) ภาพที่ได้มีขนาด 800 x 480 pixel

ทั้งนี้การศึกษายังเพิ่มเติมเกี่ยวกับประสิทธิภาพของอุปกรณ์ว่าจะมีความแม่นยำในการฝึกทักษะการเจาะเลือดและให้สารน้ำทางหลอดเลือดดำแก่นักศึกษาด้านวิทยาศาสตร์สุขภาพและบุคลากรทางการแพทย์

คำสำคัญ: อุปกรณ์ถ่ายภาพหลอดเลือดดำ, คลื่นอินฟราเรดช่วงใกล้, การประมวลผล, นวัตกรรม, การเจาะเลือด

¹ ผู้ช่วยศาสตราจารย์, สาขาสาธารณสุขศาสตร์, คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ

² อาจารย์, สาขาวิทยาการคอมพิวเตอร์, คณะศิลปศาสตร์และวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ

³ นักวิจัยอิสระ, สาขาวิทยาศาสตร์ข้อมูลชีวการแพทย์, คณะวิทยาศาสตร์, มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

¹ Assistant Professor, Public Health, Faculty of Arts and Sciences, Chaiyaphum Rajabhat University

² Lecturer, Computer Science, Faculty of Arts and Sciences, Chaiyaphum Rajabhat University

³ Biomedical data science, Faculty of Sciences, Kasetsart University

* Corresponding author: Karuna Chuntum, E-mail: karuna.ch@cpru.ac.th

Abstract

Critically ill patients who are unable to care for themselves often require the intravenous administration of medication and nutrients for treatment and survival. Additionally, blood sampling from veins is a common medical procedure employed for health screening or blood donation. Currently, commercially available vein imaging devices designed to facilitate the identification of needle insertion sites are prohibitively expensive. Therefore, this research focuses on designing and developing a low-cost, real-time vein imaging device utilizing near-infrared (NIR) technology.

This research was conducted under the innovation development framework by Veena Jirapathet (2009), which consists of the following steps: (1) analyzing the inadequacy of equipment for teaching and learning; (2) assessing the needs for supporting materials in the Public Health program (Basic Health Assessment and Treatment course group); (3) establishing collaboration and a working team involving faculty members and students; (4) determining development issues to enhance the device's efficiency; (5) systematically reviewing related literature on designing and building vein imaging devices; (6) synthesizing knowledge from high-quality literature; (7) designing and developing the device; (8) planning evaluation methods; (9) establishing usage guidelines; (10) trialing the device with volunteers; (11) evaluating the device's usability; (12) documenting performance with relevant references used in the design and construction; and (13) disseminating the device for practical application.

The sample consisted of 10 male and female students and personnel aged 19-59 years from Chaiyaphum Rajabhat University. The sample size was determined using the G*Power 3.1.9.7 program, with a statistical power of 0.80, a significance level of 0.05, and an effect size of 0.90. Participants were selected using purposive sampling. The research instruments included a data recording form and the vein imaging device. The content validity of the data recording form yielded an Item-Objective Congruence (IOC) index ranging from 0.87 to 1.00. Data were analyzed using descriptive statistics, including frequency, percentage, mean, and standard deviation.

The study successfully developed a vein imaging device capable of capturing clear images of subcutaneous veins under normal ambient lighting. The device's specifications are as follows: (1) an image capture area ranging from 6 × 6 cm to 6 × 10 cm; (2) an effective operating distance from the skin to the camera of approximately 14-34 cm; and (3) an image resolution of 800 × 480 pixels.

Future research should further investigate the device's efficacy and accuracy in training venipuncture and intravenous administration skills for health science students and medical professionals.

Keywords: Vein imaging device, near-infrared, image processing, innovation, venipuncture

บทนำ

ผู้ป่วยที่อยู่ในภาวะวิกฤตที่ไม่สามารถช่วยเหลือตนเองได้เป็นจำนวนมากอีกทั้งยังมีความจำเป็นที่ต้องรับยาหรือสารอาหารผ่านทางหลอดเลือดดำเพื่อการรักษาและเพื่อการมีชีวิตรอด การเจาะเลือดจากหลอดเลือดดำเป็นหัตถการทางการแพทย์ที่ใช้บ่อยในการตรวจสุขภาพหรือการบริจาคเลือด (Giavarina & Lippi, 2017; Meng *et al.*, 2015) แม้ว่าแผลที่เกิดขึ้นจะมีขนาดเล็ก แต่การเจาะเลือดก็ยังเป็นขั้นตอนที่อาจทำให้ผู้ป่วยเจ็บปวดและไม่สบายตัว และอาจเกิดข้อผิดพลาดทางการแพทย์ที่แก้ไขไม่ได้ซึ่งคุกคามชีวิตของผู้ป่วยได้ (Hotta, 2016; Nettar & Maas, 2012; Park & Barmettler, 2021; Qian *et al.*, 2021) ส่งผลให้เกิดการบาดเจ็บทั้งทางตรงและทางอ้อม

ในบางกรณีอาจมีความรุนแรงถึงชีวิตได้ (Jacobson & Winslow, 2005; Nafiu *et al.*, 2010; Kaddoum *et al.*, 2012) การเลือกตำแหน่งเจาะเลือดจะพิจารณาจากประสบการณ์ของแพทย์เป็นหลัก ผู้ป่วยบางรายที่มีหลอดเลือดบางหรือมองเห็นได้ยาก เช่น เด็ก คนอ้วน และผู้ป่วยที่มีผิวคล้ำ อาจพบปัญหา ระหว่างขั้นตอนการเจาะเลือดและทำให้เกิดอาการเจ็บปวดเพิ่มขึ้น (Pan *et al.*, 2019; Ialongo & Bernardini, 2016; Shahzad *et al.*, 2014) ความผิดพลาดระหว่างการทำหัตถการก่อให้เกิดความเจ็บปวดและภาวะแทรกซ้อนหลายประการ เช่น หลอดเลือดทะลุ จุดห้อเลือด หลอดเลือดดำอักเสบ การมีเลือดออกและซึมเข้าใต้ผิวหนังบริเวณที่แทงเข็มรวมถึงการมีสารน้ำซึมออกนอกหลอดเลือด (Buowari, 2013) ดังนั้นหาก

มีวิธีที่ช่วยให้มองเห็นโครงสร้างหลอดเลือดดำที่หลังมือหรือแขนได้ชัดเจนขึ้น มีประโยชน์ในการหาตำแหน่งที่เหมาะสมของหลอดเลือดสำหรับการแทงเข็ม จะช่วยลดผลข้างเคียงและความเสี่ยงที่อาจเกิดขึ้นจากข้อผิดพลาดในการเจาะเลือด รวมถึงลดเวลาและความผิดพลาดที่ใช้ในการเจาะเลือดลดลง

ในปัจจุบันมีอุปกรณ์ต่างๆ มากมายที่ช่วยให้บุคลากรทางการแพทย์ระบุตำแหน่งหลอดเลือดได้ และการสร้างภาพเป็นหนึ่งในวิธีการที่ตรงไปตรงมาและมีประสิทธิภาพที่สุด มีการใช้งานอย่างกว้างขวางสำหรับการถ่ายภาพหลอดเลือดด้วยข้อดีที่มีขนาดกะทัดรัดและพกพาได้ง่าย (Juric *et al.*, 2014) มีการศึกษาอย่างแพร่หลายเกี่ยวกับการถ่ายภาพหลอดเลือดด้วยอุปกรณ์ถ่ายภาพหลอดเลือดดำ อุปกรณ์เหล่านี้มีแหล่งกำเนิดแสงเป็นคลื่นอินฟราเรดช่วงใกล้ (Near infrared; NIR) เป็นแสงที่นิยมนำไปถ่ายภาพหลอดเลือดดำใต้ผิวหนังเนื่องจากสามารถทะลุผ่านชั้นผิวหนังได้ลึก 1-5 มิลลิเมตร (Sharp *et al.*, 2007; Jung *et al.*, 2015) เพราะแสง NIR เป็นแสงที่สามารถทะลุผ่านผิวหนังและเนื้อเยื่อได้ดีกว่าแสง visible light นอกจากนี้ฮีโมโกลบินที่เป็นส่วนประกอบเม็ดเลือดมีค่าการดูดกลืนแสงในช่วง NIR แตกต่างจากเนื้อเยื่อโดยรอบมากกว่าแสงในช่วงความยาวคลื่นที่ตามองเห็น ทำให้แสงอินฟราเรดช่วงใกล้สามารถถ่ายภาพหลอดเลือดใต้ผิวหนังได้ดีและลึกกว่าแสงที่ตามองเห็น (Haff *et al.*, 2013; Wang *et al.*, 2011) นอกจากนี้ยังพบการนำเทคโนโลยีมาช่วยค้นหาตำแหน่งของหลอดเลือดที่ชัดเจนเพื่อการเจาะหลอดเลือดดำโดยการทำให้หลอดเลือดมองเห็นได้เด่นชัดขึ้น (Pan *et al.*, 2019; Mukai *et al.*, 2020) อีกทั้งยังสามารถระบุตำแหน่งรวมถึงทิศทางของหลอดเลือดในร่างกายได้ (Chen *et al.*, 2011) ด้วยความก้าวหน้าของเทคโนโลยีที่กล่าวไปแล้วข้างต้น หลักการทำงานของอุปกรณ์เพื่อทำให้มองเห็นหลอดเลือดชัดเจนมีทั้งการใช้คลื่นแสง คลื่นแม่เหล็กไฟฟ้า การเปลี่ยนแปลงค่าความดันบริเวณกล้ามเนื้อ ซึ่งมีการใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์เพื่อปรับปรุงข้อมูลภาพถ่ายของหลอดเลือดให้มีความชัดเจนเพื่อให้บอกตำแหน่งของหลอดเลือดได้แม่นยำขึ้น

การใช้คลื่นแสงอินฟราเรดเป็นแหล่งกำเนิดแสงสำหรับอุปกรณ์ถ่ายภาพหลอดเลือดใต้ผิวหนัง เพื่อส่องหาโครงสร้างของหลอดเลือด ด้วยคุณลักษณะของคลื่นแสงอินฟราเรดที่ถูกเนื้อเยื่อของร่างกายดูดซับได้แตกต่างกัน โดยที่ไม่ก่อให้เกิดอันตรายต่อเนื้อเยื่อ (Al-Saadi *et al.*, 2021) รังสีอินฟราเรดมีความยาวคลื่น 750-1,000 นาโนเมตร แบ่งช่วงความยาวคลื่นเป็น 3 ช่วง คือ รังสีอินฟราเรดคลื่นใกล้ (Near Infrared; NIR) ความยาวคลื่น 750 ถึง 1,500 นาโนเมตร ใช้ในการถ่ายภาพความร้อนและเป็นช่วงรังสีที่ทะลุผ่าน

ชั้นผิวหนังลึกที่สุด รังสีอินฟราเรดคลื่นกลาง (Medium Infrared; MIR) ความยาวคลื่น 1,500 ถึง 5,600 นาโนเมตร ประยุกต์ใช้กับระบบนำวิถีของจรวด และรังสีอินฟราเรดคลื่นไกล (Far Infrared; FIR) ความยาวคลื่น 5,600 นาโนเมตรขึ้นไป มีพลังงานความร้อนไม่มากนักนิยมใช้ในการบำบัดผู้ป่วยด้านกายภาพบำบัดเพื่อช่วยลดอาการปวดเรื้อรัง การศึกษาวิจัยที่ผ่านมาเกี่ยวกับการสร้างอุปกรณ์ถ่ายภาพหลอดเลือดดำ นักวิจัยใช้วิธีที่ไม่ต้องรุกราน (invasive) เข้าไปในร่างกายมนุษย์ 2 วิธี คือการถ่ายภาพด้วยรังสีอินฟราเรดคลื่นใกล้ และรังสีอินฟราเรดคลื่นไกล (Wang & Leedham, 2006) จากผลการศึกษาของ Walus (2017) พบว่ารังสีอินฟราเรดคลื่นใกล้ที่มีช่วงความยาวคลื่น 875-890 นาโนเมตร (Walus *et al.*, 2017) เป็นช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสมที่สุดในการถ่ายภาพหลอดเลือดดำในร่างกายมนุษย์ได้อย่างมีคุณภาพ เพราะทนต่อการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิและความชื้น (Chen *et al.*, 2011)

อุปกรณ์สำหรับถ่ายภาพหลอดเลือดใต้ผิวหนังด้วยคลื่นแสงอินฟราเรด มีวางจำหน่ายอยู่แล้ว อุปกรณ์ออกแบบมาเพื่อช่วยแพทย์ พยาบาล รวมถึงบุคลากรทางการแพทย์ระบุตำแหน่งการฉีดยา เจาะเลือดหรือให้น้ำเกลือ เช่น เครื่อง Vein Viewer ของบริษัท Christie Medical ใช้แหล่งกำเนิดแสง NIR ระบุตำแหน่งหลอดเลือดดำใต้ผิวหนังได้ลึกประมาณ 10-15 มิลลิเมตร จัดแสงแบบสะท้อน แสดงผลผ่านจอรับภาพแบบเรียลไทม์ ขนาดพกพา ราคาประมาณ 700,000 บาท ส่วนเครื่อง ACCuVein ของบริษัท Avant Medical ใช้ NIR จัดแสงแบบสะท้อน แสดงผลภาพบริเวณผิวหนังของผู้ป่วย อุปกรณ์ขนาดเล็กพกพาง่าย ราคาประมาณ 60,000 บาท เครื่อง Vasculuminator บริษัท De Koningh Medical (www.dkmp.nl) ใช้แหล่งกำเนิดแสงช่วง NIR แต่จัดแสงแบบทะลุผ่านผ่านแสดงผลออกหน้าจอคอมพิวเตอร์ ราคาประมาณ 300,000 บาท และเครื่อง Veinsite บริษัท VueTek Scientific ใช้ NIR ระบุตำแหน่งหลอดเลือดดำใต้ผิวหนัง จัดแสงแบบทะลุผ่านผ่านแสดงผลออกหน้าจอ VGA ราคาประมาณ 150,000 บาท เมื่อพิจารณาประเด็นเรื่องราคาอุปกรณ์ถ่ายภาพหลอดเลือดดำที่วางจำหน่ายในปัจจุบันราคาประมาณ 60,000-700,000 บาท อุปกรณ์ดังกล่าวมีหลักการทำงานโดยใช้ NIR ระบุตำแหน่งของหลอดเลือดดำใต้ผิวหนัง ใช้การจัดแสงทั้งการจัดแสงแบบสะท้อน การจัดแสงแบบทะลุผ่าน โดยมีการแสดงผลภาพผ่านจอรับภาพแบบ real time

อุปกรณ์ถ่ายภาพหลอดเลือดดำ สำหรับช่วยระบุตำแหน่งในการแทงเข็มที่มีการผลิตออกมาจำหน่ายเชิงพาณิชย์มีราคาแพง งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะพัฒนาอุปกรณ์ถ่ายภาพหลอดเลือดดำแบบเรียลไทม์ต้นทุนต่ำขึ้นมาเอง โดย

ใช้กล้อง Raspberry Pi Camera Module 2 NoIR เป็นอุปกรณ์รับภาพ สามารถนำไปใช้สนับสนุนกระบวนการจัดการเรียนการสอนของสาขาสาธารณสุขศาสตร์ กลุ่มวิชาตรวจประเมินและบำบัดโรคเบื้องต้น เนื่องจากหลอดเลือดดำอยู่ไม่ลึกมาก อีกทั้งสามารถพัฒนาให้มีขนาดกะทัดรัดใช้งานได้ง่ายขึ้นในอนาคต

วัตถุประสงค์การวิจัย

เพื่อออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ถ่ายภาพหลอดเลือดดำแบบเรียลไทม์ต้นทุนต่ำด้วยคลื่นอินฟราเรดช่วงใกล้

วิธีการศึกษา

รูปแบบการวิจัย

การวิจัยนี้ เป็นการวิจัยและพัฒนานวัตกรรม (Innovative research and development) เพื่อสนับสนุนกระบวนการจัดการเรียนการสอนของสาขาสาธารณสุขศาสตร์ กลุ่มวิชาตรวจประเมินและบำบัดโรคเบื้องต้น ดูแลช่วยเหลือฟื้นฟูสภาพและการส่งต่อผู้ป่วย ได้รับการรับรองจากคณะกรรมการพิจารณาจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ของมหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ เลขที่ HE 66-1-022 ลงวันที่ 4 ตุลาคม 2566 ดำเนินการวิจัยตามกรอบแนวคิดการพัฒนาวัตกรรมการ วิจัย จิระแพทย์ (2552) ดังนี้ 1) การมองเห็นปัญหาความไม่เพียงพอของอุปกรณ์จัดการกระบวนการจัดการเรียนการสอน 2) การประเมินความต้องการเพื่อแสวงหาวิธีการได้มาซึ่งสิ่งสนับสนุนกระบวนการจัดการเรียนการสอนของสาขาสาธารณสุขศาสตร์ กลุ่มวิชาตรวจประเมินและบำบัดโรคเบื้องต้น 3) สร้างแนวร่วมและทีมงานโดยขอความร่วมมือจากคณาจารย์ในสาขาวิชาและนักศึกษา 4) กำหนดประเด็นการพัฒนาอุปกรณ์ถ่ายภาพหลอดเลือดดำให้มีประสิทธิภาพ 5) ทบทวนวรรณกรรมที่เกี่ยวข้องกับการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ถ่ายภาพหลอดเลือดดำอย่างเป็นระบบ 6) สังเคราะห์ความรู้จากการทบทวนวรรณกรรมที่มีคุณภาพ 7) ออกแบบและสร้างอุปกรณ์ 8) กำหนดวิธีการวัดผล 9) กำหนดวิธีการใช้ 10) ทดลองใช้อุปกรณ์ถ่ายภาพหลอดเลือดดำในอาสาสมัคร 11) ประเมินผลอุปกรณ์ถ่ายภาพหลอดเลือดดำ 12) บันทึกผลพร้อมแหล่งอ้างอิงที่ใช้ในการออกแบบและสร้างอุปกรณ์ 13) การเผยแพร่อุปกรณ์ถ่ายภาพหลอดเลือดดำให้สามารถนำไปใช้จริงรายละเอียดดังนี้

ผู้วิจัยดัดแปลงให้เหมาะสมกับการวิจัยครั้งนี้ แบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอน (วิภา จิระแพทย์, 2552) ได้แก่ 1. การศึกษาหลักการทำงานของอุปกรณ์ 2. การออกแบบและสร้างอุปกรณ์ 3. การทดสอบคุณลักษณะอุปกรณ์ และ 4. การทดลองใช้อุปกรณ์กับอาสาสมัคร

ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง เนื่องจากอุปกรณ์ต้นแบบยังไม่เคยใช้กับผู้ป่วย การศึกษาครั้งนี้จึงทดลองใช้กับผู้ที่มีสุขภาพดีภายในสถาบัน

ประชากร คือนักศึกษาและบุคลากรในมหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ ทั้งชายและหญิง

กลุ่มตัวอย่าง นักศึกษาและบุคลากรมหาวิทยาลัยราชภัฏชัยภูมิ ชายและหญิง อายุ 19-59 ปี

กำหนดขนาดตัวอย่าง ด้วยโปรแกรม G*power 3.1.9.7 กำหนดค่าอำนาจการทดสอบ = 0.80 ค่าความเชื่อมั่น = 0.05 และค่าขนาดอิทธิพล = 0.90 ได้ขนาดตัวอย่าง 10 คน

สุ่มตัวอย่างแบบเจาะจง เพื่อใช้ทดสอบอุปกรณ์ที่ออกแบบและพัฒนา โดยมีเกณฑ์คัดเข้า คือผู้ไม่มีปัญหาด้านสุขภาพ ไม่มีความพิการหรือพยาธิสภาพบริเวณแขนและมือทั้งด้านซ้ายและขวา และเกณฑ์คัดออก คือไม่สามารถเข้าร่วมการเก็บข้อมูล ได้แก่ ใช้แบบสัมภาษณ์และร่วมทดสอบอุปกรณ์ฯ ครอบคลุมระยะเวลาที่กำหนด (15-30 นาที)

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัย

1. **เครื่องมือที่ใช้เก็บรวบรวมข้อมูล** ได้แก่ แบบสอบถาม ประกอบด้วย 2 ส่วน คือส่วนที่ 1 ข้อมูลทั่วไปของอาสาสมัคร จำนวน 6 ข้อ ส่วนที่ 2 ข้อมูลผลการทดสอบอุปกรณ์ จำนวน 2 ข้อ

2. **เครื่องมือในการทดลอง** ได้แก่ อุปกรณ์ถ่ายภาพหลอดเลือดดำแบบเรียลไทม์ต้นทุนต่ำ ใช้กรอบแนวคิดการพัฒนาวัตกรรมการ วิจัย จิระแพทย์ (2552) ดัดแปลงให้เหมาะสมกับการวิจัยนี้ 4 ขั้นตอน ดังนี้

ขั้นตอนที่ 1 การศึกษาหลักการทำงานของอุปกรณ์ อุปกรณ์มีหลักการทำงานโดยการฉายแสงอินฟราเรดความยาวคลื่น 850 นาโนเมตร ลงบนผิวหนัง Hemoglobin ในหลอดเลือดดำจะดูดกลืนแสงแล้วสะท้อนแสงเข้ามาที่กล้องรับภาพ จากนั้นกล้องรับภาพจะส่งข้อมูลภาพไปยังบอร์ด Raspberry Pi 4 เพื่อประมวลผลภาพ และแสดงภาพที่จอแสดงผลแบบ Real-time ทำให้มองเห็นหลอดเลือดได้อย่างชัดเจน (Figure 1)

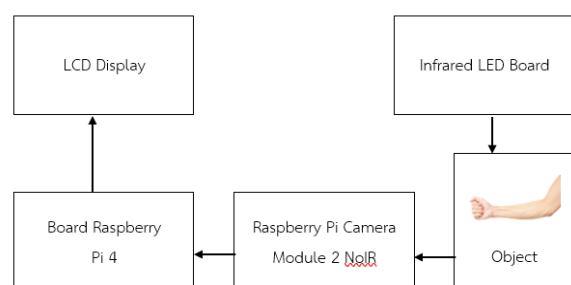


Figure 1 Diagram illustrating the operation of the device

ขั้นตอนที่ 2 การออกแบบและสร้างอุปกรณ์ ผู้วิจัยสร้างอุปกรณ์โดยเลือกวัสดุในการออกแบบ 7 รายการ ได้แก่ Board Raspberry Pi 4, Raspberry Pi Camera Module 2 NoIR, Infrared LED Board, LCD Display, Raspberry Pi Camera Cable, Adapter 12 V 1A และโคมไฟ (Figure 2) นำอุปกรณ์แต่ละรายการประกอบเข้าด้วยกัน (Figure 3) ได้อุปกรณ์ถ่ายภาพหลอดเลือดดำ ดัง Figure 3E (Figure 4)

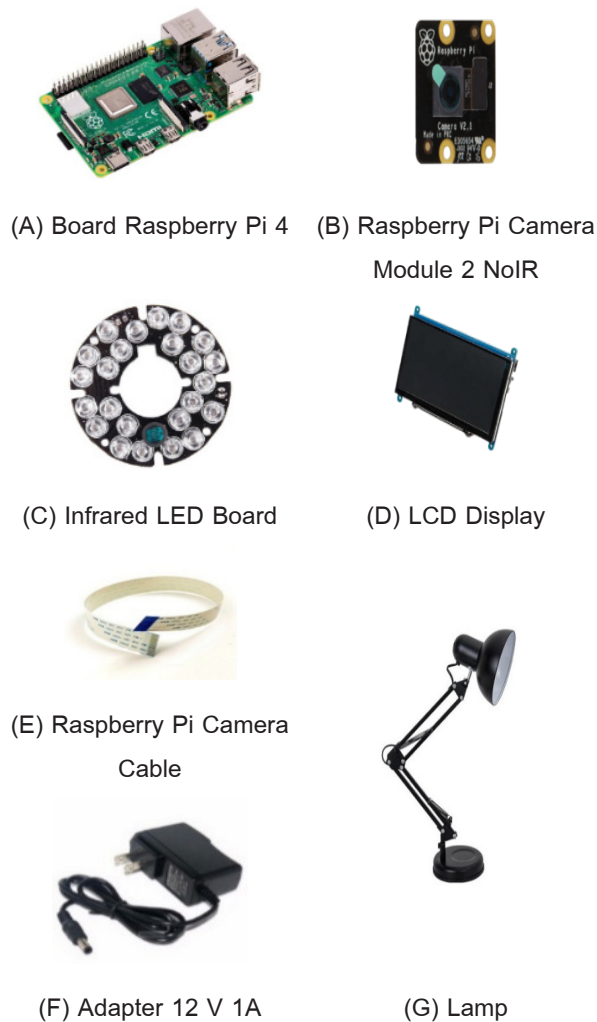


Figure 2 Materials Utilized in Equipment Design

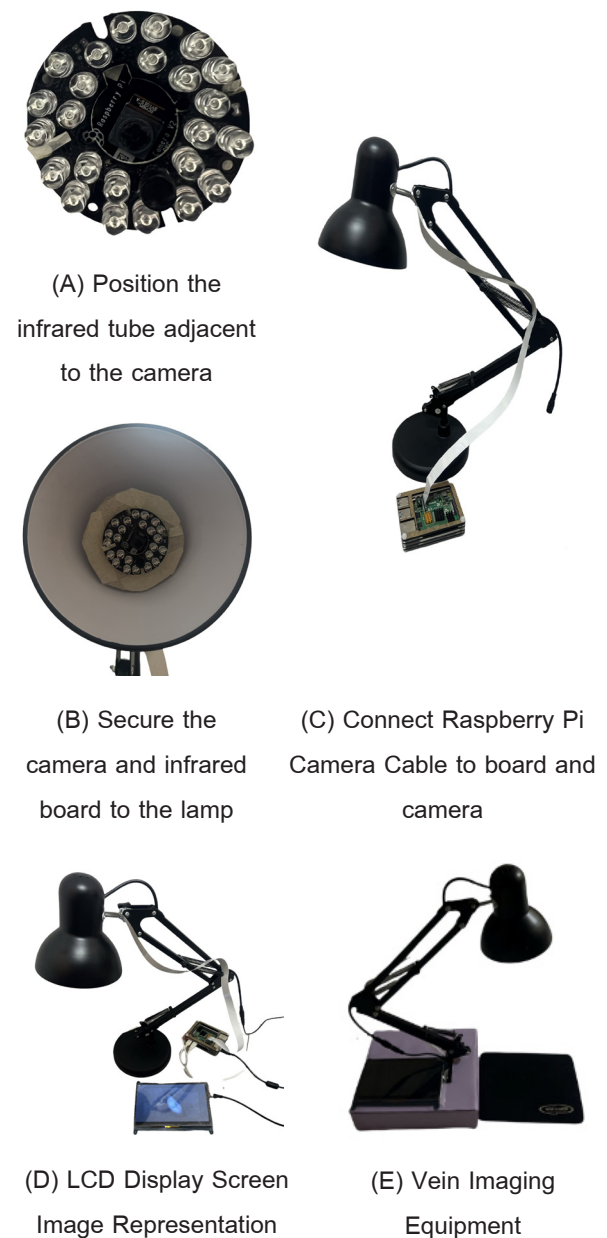


Figure 3 Assembly of Equipment.

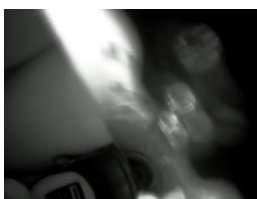
ขั้นตอนที่ 3 การทดสอบคุณลักษณะของอุปกรณ์ถ่ายภาพหลอดเลือดดำ ขั้นตอนนี้เป็นการจัดทำทางและการโฟกัสภาพเพื่อการใช้งานอุปกรณ์ โดยการจัดตำแหน่งของอุปกรณ์ถ่ายภาพหลอดเลือดดำให้ตั้งฉากกับวัตถุหรือบริเวณที่จะถ่ายภาพ (ทำมุม 90 องศา) และหาระยะทางที่โฟกัสภาพสำหรับอุปกรณ์ถ่ายภาพหลอดเลือดดำจากตำแหน่งที่เป็นเป้าหมาย เพื่อให้ได้ตำแหน่งและระยะทางที่เหมาะสมสำหรับการถ่ายภาพ (Figure 4) เมื่อสิ้นสุดกระบวนการจะได้อุปกรณ์ถ่ายภาพหลอดเลือดดำที่สามารถถ่ายภาพหลอดเลือดดำได้ผิวหนังได้ชัดเจน (Figure 5)



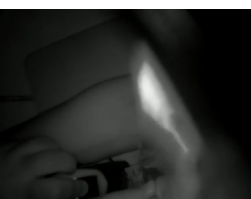
(A) Accurately measure the image area within nearest range



(B) Measure the image area at the maximum range



(C) Determining the distance from the camera to both the nearest and farthest points of the skin



(D) Evaluation of device features through photography under standard lighting conditions

Figure 4 Testing for characterization of vein imaging devices



Figure 5 Diagram illustrating the operational principle of the device

ขั้นตอนที่ 4 ทดลองใช้อุปกรณ์กับอาสาสมัคร โดยเก็บข้อมูลทั่วไปด้วยแบบสัมภาษณ์และทดลองใช้อุปกรณ์ถ่ายภาพหลอดเลือดดำถ่ายภาพกลุ่มตัวอย่าง จำนวน 10 คน รายละเอียดดังนี้

1. การเก็บรวบรวมข้อมูลเชิงปริมาณด้วยแบบสัมภาษณ์ โดยแบบสัมภาษณ์เป็นข้อมูลลักษณะบุคคล ได้แก่ เพศ อายุ อาชีพ น้ำหนัก ส่วนสูง ค่าดัชนีมวลกาย
2. การทดลองถ่ายภาพด้วยอุปกรณ์ถ่ายภาพหลอดเลือดดำที่ออกแบบและสร้างขึ้น กำหนดบริเวณถ่ายภาพ 2 จุด คือบริเวณหลังมือและแขน ภาพถ่ายที่ได้บันทึกเป็นไฟล์ข้อมูลดิจิทัล กำหนดชื่อไฟล์ข้อมูลเป็นหมายเลขที่ไม่ระบุตัวตน ภาพถ่ายเป็นไฟล์ภาพชนิด BMP ซึ่งเป็นไฟล์รูปแบบมาตรฐานที่ใช้ในระบบปฏิบัติการ Window และ DOS ขนาดภาพ 800x480 pixel

การตรวจสอบคุณภาพเครื่องมือ

ผู้วิจัยตรวจสอบคุณภาพเครื่องมือเก็บรวบรวมข้อมูลเสนอผู้ทรงคุณวุฒิ 3 คน เป็นอาจารย์พยาบาล 2 คน และอาจารย์วิศวกรรมเครื่องกล 1 คน เพื่อตรวจสอบความตรงตามเนื้อหา (Content validity) ใช้วิธีหาค่าดัชนีความสอดคล้อง (Index of Objective-Item Congruence: IOC) คำถามแต่ละข้อค่าดัชนีความสอดคล้องอยู่ระหว่าง 0.87-1.00

การเก็บรวบรวมข้อมูล

1. ผู้วิจัยติดประกาศรับสมัครกลุ่มตัวอย่างผ่านบอร์ดประชาสัมพันธ์ของคณะ และส่งจดหมายอิเล็กทรอนิกส์ถึงบุคลากรและนักศึกษาร่วมทดลองอุปกรณ์ถ่ายภาพหลอดเลือดดำ กระบวนการประชาสัมพันธ์ได้ขออนุญาตผู้บริหารสถาบัน เมื่อได้กลุ่มตัวอย่างครบตามจำนวนผู้วิจัยพบกลุ่มตัวอย่างก่อนการศึกษาก็แจ้งวัตถุประสงค์ อธิบายลักษณะงานวิจัย ขั้นตอนวิธีการเข้าร่วมวิจัย กิจกรรม เปิดโอกาสให้ซักถามจนเข้าใจและให้ความยินยอม

2. เก็บรวบรวมข้อมูลทั่วไปด้วยแบบสัมภาษณ์และทดลองใช้อุปกรณ์ ก่อนเก็บรวบรวมข้อมูล ผู้วิจัยอธิบายและแสดงการทำงานของอุปกรณ์ที่สร้างขึ้น โดยการทดลองกำหนดบริเวณถ่ายภาพ 2 จุด คือบริเวณหลังมือและแขนกับกลุ่มตัวอย่าง 10 คน ภาพถ่ายจะบันทึกเป็นไฟล์ข้อมูลดิจิทัล กำหนดชื่อไฟล์เป็นหมายเลขที่ไม่ระบุตัวตน

การวิเคราะห์ข้อมูล ข้อมูลลักษณะส่วนบุคคล เช่น เพศ อายุ ส่วนสูง น้ำหนัก ด้วยสถิติพรรณนา ได้แก่ จำนวน ค่าร้อยละ ค่าเฉลี่ย และค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ผลการศึกษา

1. ผลการออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ถ่ายภาพหลอดเลือดดำแบบเรียลไทม์ต้นทุนต่ำ

ผลการออกแบบและพัฒนาได้อุปกรณ์ถ่ายภาพหลอดเลือดดำแบบเรียลไทม์ต้นทุนต่ำ ที่ถ่ายภาพหลอดเลือดดำใต้ผิวหนังได้ชัดเจนมีรายละเอียดดังนี้ ภาพที่ได้จากการศึกษาวิจัยนี้มีขนาด 800 x 480 pixel พื้นที่ขนาดภาพที่ถ่ายได้ใกล้ที่สุดถึงพื้นที่ขนาดภาพที่ถ่ายได้ไกลที่สุด 6 x 6 เซนติเมตร ถึง 6 x 10 เซนติเมตร ระยะจากผิวหนังถึงกล้องประมาณ 14-34 เซนติเมตร คุณลักษณะดังกล่าวทำให้อุปกรณ์ถ่ายภาพได้ในที่มีแสงปกติ

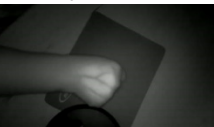
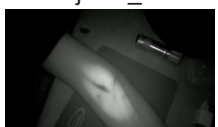
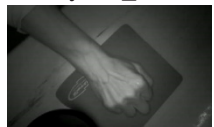
2. ผลการทดลองใช้อุปกรณ์ถ่ายภาพหลอดเลือดดำแบบเรียลไทม์ต้นทุนต่ำ

เก็บข้อมูลทั่วไปของกลุ่มตัวอย่าง (Table 1) จากนั้นใช้อุปกรณ์ถ่ายภาพหลอดเลือดดำแบบเรียลไทม์ต้นทุนต่ำทดลองถ่ายภาพจากกลุ่มตัวอย่างทั้ง 10 คน บริเวณหลังมือและแขน (Table 2)

Table 1 Characteristics of the participants (n=10)

ID	Gender	Age (years)	BMI	Interpretation
1	Female	23	18.28	Underweight
2	Male	28	17.35	Underweight
3	Female	32	18.35	Underweight
4	Male	42	23.88	Normal
5	Female	45	30.85	Obese
6	Male	46	30.07	Obese
7	Female	47	19.48	Normal
8	Female	54	24.76	Overweight
9	Male	56	20.01	Normal
10	Female	58	24.24	Overweight

Table 2 Photographs of the participants (n=10)

Subject ID / Figure	
Subject1_Palm	Subject1_Arm
	
Subject2_Palm	Subject2_Arm
	
Subject3_Palm	Subject3_Arm
	
Subject4_Palm	Subject4_Arm
	
Subject5_Palm	Subject 5_Arm
	
Subject6_Palm	Subject6_Arm
	
Subject7_Palm	Subject7_Arm
	
Subject8_Palm	Subject8_Arm
	
Subject9_Palm	Subject9_Arm
	
Subject10_Palm	Subject10_Arm
	

ผู้วิจัยปรับขนาดภาพให้มีขนาดเท่ากับหน้าจอ LCD โดยกำหนดให้ภาพมีขนาด 800x480 pixel กำหนด frame rate ที่ 60 กำหนดค่า brightness ให้พอดีกับการถ่ายภาพหลอดเลือดดำ ถ้ากำหนดค่า brightness มากเกินไปภาพจะสว่างจนไม่เห็นหลอดเลือดดำ ถ้ากำหนดค่า brightness น้อยเกินไป ภาพถ่ายหลอดเลือดดำจะมีมืด ดังนั้นจึงกำหนดให้ค่า brightness = 39 ซึ่งมีค่าความสว่างเหมาะสมกับการถ่ายภาพ ทำการปรับค่า contrast = 42 เป็นค่าที่ทำให้เห็นหลอดเลือดดำได้ผิวหนังชัดเจนที่สุดในการวิจัยครั้งนี้

อภิปรายผล

ผลการศึกษาวิจัยพบว่าอุปกรณ์ต้นแบบมีราคาประมาณ 6,000-7,000 บาท พัฒนาจากอุปกรณ์ 7 รายการ ได้แก่ Board Raspberry Pi 4, Raspberry Pi Camera Module 2 NoIR, Infrared LED Board, LCD Display, Raspberry Pi Camera Cable, Adapter 12 V 1A และโคมไฟ แหล่งกำเนิดแสงเป็นรังสีอินฟราเรดคลื่นใกล้ความยาวคลื่น 850 นาโนเมตร โดยใช้การจัดแสงแบบสะท้อน

การวิจัยครั้งนี้ใช้การจัดแสงแบบสะท้อน เป็นการวางกล้องรับภาพกับแหล่งกำเนิดแสงในตำแหน่งที่ใกล้กันและอยู่ด้านบนของวัตถุที่ต้องการถ่ายภาพ ภาพหลอดเลือดดำที่ผิวหนังที่บันทึกได้คือส่วนของแสงที่สะท้อนจากผิวหนังโดยตรง (Specular reflection) และอีกส่วนหนึ่งเป็นแสง NIR ที่ทะลุผ่านผิวหนังแล้วกระเจิงแสง (Backscattered light) ได้ภาพหลอดเลือดดำที่ผิวหนัง สอดคล้องกับการศึกษาวิจัยหลายเรื่อง ที่เสนอวิธีการจัดแสงที่เหมาะสมกับการถ่ายภาพหลอดเลือดดำได้ผิวหนังแต่ละบริเวณ เช่น บริเวณมือ (Kumar & Prathyusha, 2009; Wang *et al.*, 2014; Jung *et al.*, 2015; Crisan *et al.*, 2010) บริเวณส่วนปลายแขน (Wang *et al.*, 2013; Zharov *et al.*, 2004) บริเวณขา (Rao *et al.*, 2017) ภาพหลอดเลือดดำที่ผิวหนังที่บันทึกได้ประกอบด้วยแสง 2 ส่วน ส่วนแรกคือส่วนของแสงสะท้อนจากผิวหนังโดยตรง (Specular reflection) และอีกส่วนหนึ่งเป็นแสง NIR ที่ทะลุเข้าไปในผิวหนังแล้วกระเจิงแสงกลับออกมา (Backscattered light) แสงที่ทำให้ได้ภาพหลอดเลือดดำที่ผิวหนังได้ คือ Backscattered light การจัดแสงแบบสะท้อนมีการจัดอุปกรณ์ที่ง่ายปลอดภัยและสะดวกในการถ่ายภาพ แต่ภาพหลอดเลือดดำที่ผิวหนังที่บันทึกได้มีขนาดเล็ก 3-5 มิลลิเมตร (Zharov *et al.*, 2004) ขึ้นอยู่กับขนาดของหลอดเลือด เนื่องจากแสง Specular reflection เข้ามารบกวนภาพหลอดเลือด เช่น เมื่อความเข้มแสง NIR สูงขึ้นแสงที่ทะลุผ่านผิวหนังจะทะลุลงไปใต้ลึกขึ้นจึงสามารถถ่ายภาพหลอดเลือดที่อยู่ลึกขึ้นได้ ถึงแม้ว่าการจัด

แสงแบบสะท้อนถ่ายภาพเส้นเลือดใต้ผิวหนังได้ไม่ลึกมาก แต่ภาพหลอดเลือดใต้ผิวหนังที่ได้ก็เพียงพอต่อการนำไปใช้ประโยชน์ เช่น ระบุตัวบุคคลด้วยหลอดเลือดที่หลังมือ (Wang *et al.*, 2014) การทำหัตถการทางการแพทย์ เช่น การแทงเข็มเจาะเลือด การแทงเข็มเพื่อให้น้ำเกลือในเด็ก (Kaddoum *et al.*, 2012) การใช้เลเซอร์เพื่อรักษาหลอดเลือด (Miyake *et al.*, 2006) การวินิจฉัยโรคเส้นเลือดดำโป่งท้อ (Rao *et al.*, 2017) อุปกรณ์ถ่ายภาพหลอดเลือดดำที่มีการพัฒนาขึ้นด้วยวิธีการใช้รังสีอินฟราเรดคลื่นใกล้ มีการวางจำหน่ายอยู่แล้วในท้องตลาด แต่พบว่าราคาค่อนข้างแพง การใช้งานมีความยุ่งยาก ไม่สะดวกในการเคลื่อนย้ายอุปกรณ์ การออกแบบและแผนผังการทำงานใช้เทคโนโลยีที่ทันสมัยส่งผลต่อราคาของอุปกรณ์ (Ahmed *et al.*, 2017) เมื่อเปรียบเทียบจุดเด่น-จุดด้อยกับอุปกรณ์ถ่ายภาพหลอดเลือดดำที่ออกแบบและพัฒนาในการศึกษานี้ ราคาไม่แพงเมื่อเทียบกับอุปกรณ์ที่วางขายในท้องตลาด ส่วนความชัดเจนของภาพต้องมีการพัฒนาต่อไปในส่วนของการโปรแกรมที่ใช้เขียนคำสั่ง และประเด็นของการใช้งานต้องมีการจัดวางอุปกรณ์ในพื้นที่เหมาะสมเป็นสัดส่วน เพราะหากมีการเคลื่อนย้ายอุปกรณ์ ผู้ใช้งานต้องมีการกำหนดพื้นที่ถ่ายภาพให้เหมาะสมตามผลการทดสอบคุณลักษณะอุปกรณ์ถ่ายภาพหลอดเลือดดำ ที่ได้กำหนดไว้จากการศึกษาวิจัยครั้งนี้ คือ 1) พื้นที่ขนาดภาพที่ถ่ายได้ใกล้ที่สุดถึงพื้นที่ขนาดภาพที่ถ่ายได้ไกลที่สุด 6 x 6 เซนติเมตร ถึง 6 x 10 เซนติเมตร 2) ระยะจากผิวหนังถึงกล้องประมาณ 14 เซนติเมตร ถึง 34 เซนติเมตร 3) ภาพที่ได้มีขนาด 800 x 480 pixel

เมื่อผู้วิจัยนำอุปกรณ์มาทดสอบถ่ายภาพกับกลุ่มตัวอย่าง เพื่อให้ได้ภาพที่ชัดเจนมองเห็นหลอดเลือดดำชัดเจน ต้องมีการปรับค่าการสะท้อนแสงของเลือดกับเนื้อเยื่อ และปรับขนาดภาพให้มีขนาดเท่ากับหน้าจอ LCD กำหนด frame rate ที่ 60 กำหนดค่า brightness ให้พอดีกับการถ่ายภาพหลอดเลือดดำ ถ้ากำหนดค่า brightness มากเกินไปภาพจะสว่างจนไม่เห็นหลอดเลือดดำ ถ้ากำหนดค่า brightness น้อยเกินไป ภาพถ่ายหลอดเลือดดำจะมีมืด ดังนั้นจึงกำหนดให้ค่า brightness = 39 ซึ่งมีค่าความสว่างเหมาะสมกับการถ่ายภาพ เป็นค่าที่ทำให้เห็นหลอดเลือดดำที่ผิวหนังชัดเจน อย่างไรก็ตามความชัดเจนของภาพถ่ายขึ้นอยู่กับปัจจัยด้านอื่นด้วย อาทิเช่น คุณสมบัติของโครงสร้างชั้นผิวหนังที่มีความแตกต่างของสีผิวและความลึกของหลอดเลือดใต้ผิวหนัง (Kimori *et al.*, 2015) แต่ในทางปฏิบัติพบว่าสีผิวของคนไข้และความหนาของชั้นไขมันใต้ผิวหนังเป็นอุปสรรคต่อการมองเห็นโครงสร้างหลอดเลือดดำใต้ผิวหนัง (Jacobson & Winslow, 2005; Nafiu *et al.*, 2010; Kaddoum *et al.*, 2012) เมื่อพิจารณาโครงสร้าง

ผิวหนังมนุษย์ หนาประมาณ 3 มิลลิเมตร ชั้นนี้จะมีเส้นเลือดเส้นประสาท และหลอดน้ำเหลือง ส่วนประกอบของเนื้อเยื่อมีผลต่อการเกิดภาพ คือเมลานิน ฮีโมโกลบิน ไชมันและน้ำ (Bashkatov *et al.*, 2005) งานวิจัยที่ผ่านมาศึกษาและวัดค่าการดูดกลืนแสงของเนื้อเยื่อ พบว่าเมลานินและฮีโมโกลบินมีค่าการดูดกลืนแสงลดลงเมื่อความยาวคลื่นสูงขึ้น ดังนั้นแสงที่มีความยาวคลื่นสูงมีโอกาสดูทะลุผ่านชั้นหนังแท้ได้ แต่แสงความยาวคลื่นที่สูงขึ้นมีค่าการดูดกลืนแสงของน้ำเพิ่มขึ้น (Denstedt *et al.*, 2014) จากคุณสมบัติทางแสงของเนื้อเยื่อจะเห็นว่าแสงความยาวคลื่น NIR สามารถทะลุผ่านผิวหนังและเนื้อเยื่อได้ดีกว่าแสง Visible light (380-780 นาโนเมตร) เพราะเมลานิน และฮีโมโกลบินมีการดูดกลืนแสงช่วง NIR ต่ำกว่า นอกจากนี้ยังมีค่าความแตกต่างของการดูดกลืนแสงระหว่างเลือดกับเนื้อเยื่อโดยรอบสูงกว่า Visible light ส่งผลให้ค่า Contrast ของแสงในช่วง NIR สูงกว่า ทำให้ช่วงความยาวคลื่นที่เหมาะสมในการถ่ายภาพ อยู่ในช่วง 700-1000 นาโนเมตร นอกจากนี้ภาพที่ได้จากแสงช่วง NIR ขึ้นกับสีผิวของบุคคล น้อยกว่าความยาวคลื่นแสงช่วง Visible light ข้อมูลคุณสมบัติทางแสงระหว่างเส้นเลือดกับเนื้อเยื่อโดยรอบที่มีระดับสีผิวต่างกันแสดงให้เห็นว่าภาพที่ถ่ายได้ของคนผิวขาวให้ภาพเส้นเลือดที่ชัดกว่าคนผิวสีเข้ม (Cuper *et al.*, 2013)

ข้อจำกัดในการใช้งานของอุปกรณ์ถ่ายภาพหลอดเลือดดำที่พัฒนาจากงานวิจัยนี้ คือ ไม่เหมาะสำหรับการแสดงภาพเพื่อวินิจฉัยหรือรักษาทางการแพทย์ และไม่ควรถูกใช้ใกล้เครื่องมือหรืออุปกรณ์ที่มีการกระจายสนามแม่เหล็ก อุปกรณ์นี้ไม่สามารถใช้ตรวจวินิจฉัยโรคหรือภาวะทางการแพทย์ต่าง ๆ ได้ นอกจากนี้ อุปกรณ์ยังไม่เหมาะสมสำหรับการใช้งานในที่โล่งหรือบริเวณที่มีแสงแดดโดยตรง การใช้งานไฟของอุปกรณ์สามารถเลือกใช้ได้ทั้งแบบไฟฟ้า AC และแบตเตอรี่ โดยสายไฟ AC ที่ใช้ต้องมีคุณสมบัติเหมาะสมกับอุปกรณ์ที่ได้รับการออกแบบและพัฒนา

สรุปผลการทดลอง

การออกแบบและพัฒนาอุปกรณ์ถ่ายภาพหลอดเลือดดำครั้งนี้ เริ่มจากการทบทวนวรรณกรรมและ ศึกษาความเป็นไปได้ในการออกแบบจากอุปกรณ์ที่มีการวางจำหน่ายในท้องตลาด และนำข้อมูลมาออกแบบและพัฒนาด้วยกระบวนการวิจัยและพัฒนาควบคู่ไปกับการใช้กรอบแนวคิดการพัฒนานวัตกรรมของ วิชา จิระแพทย์ (2552) ได้อุปกรณ์ถ่ายภาพหลอดเลือดดำที่สามารถถ่ายภาพได้ในแสงปกติ

แต่ในการวิจัยครั้งนี้ยังไม่ดำเนินการศึกษาประสิทธิภาพของอุปกรณ์ว่าจะมีความแม่นยำในการฝึกทักษะการเจาะเลือด และให้สารนำทางหลอดเลือดดำแก่นักศึกษาด้านวิทยาศาสตร์สุขภาพ และบุคลากรทางการแพทย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพหรือไม่ รวมถึงความเป็นไปได้ของการนำอุปกรณ์ไปใช้งาน ถึงแม้ว่าอุปกรณ์จะมีขนาดที่สามารถติดตั้งได้ง่าย แต่อาจพบข้อจำกัดของการใช้งานสำหรับบุคลากรที่ไม่เชี่ยวชาญด้านเทคโนโลยี หากมีการนำอุปกรณ์ไปใช้งานจริงต้องมีการแนะนำการใช้งานเบื้องต้นแก่ผู้ใช้งานรวมถึงอุปสรรคที่อาจเกิดขึ้นจากการใช้งาน อีกทั้งผลการศึกษารังนี้้นนอกจากจะได้อุปกรณ์ถ่ายภาพหลอดเลือดดำแบบเรียลไทม์ต้นทุนต่ำที่สามารถถ่ายภาพหลอดเลือดดำได้ มีข้อดีในเรื่องของราคาที่ไม่แพงเกินไป อุปกรณ์หาได้ในประเทศ ขั้นตอนการประกอบและทดสอบคุณสมบัติของอุปกรณ์สามารถทำได้ด้วยตนเอง

อย่างไรก็ตาม อาจต้องศึกษาเพิ่มเติมในเรื่องของโปรแกรมที่ใช้ในการแสดงผลผ่านจอภาพเพื่อประมวลผลภาพให้มีความชัดเจนเพิ่มขึ้น รวมทั้งควรศึกษาเปรียบเทียบกับอุปกรณ์ที่ผลิตจากต่างประเทศและวางจำหน่ายในท้องตลาดในปัจจุบัน ทั้งนี้ผู้สนใจสามารถนำไปประยุกต์ใช้และพัฒนาอุปกรณ์ให้มีความเหมาะสมกับการใช้งานได้

ข้อเสนอแนะ

ผู้วิจัยพบปัญหาและข้อจำกัดในการสร้างอุปกรณ์ถ่ายภาพหลอดเลือดดำคือ อุปกรณ์ที่ออกแบบและพัฒนาสามารถถ่ายภาพหลอดเลือดดำได้ภาพออกมาเป็นสีม่วง สาเหตุเกิดจากอินฟราเรดมองไม่เห็น วิธีการแก้ไขปัญหาคือทำให้ภาพที่ถ่ายได้เป็นสีเทา โดยใส่คำสั่งในโค้ดให้ภาพถ่ายที่ได้เป็น grayscale ประกอบกับแสงสะท้อนเข้ากล้องทำให้ภาพที่ถ่ายได้มีมุมที่แคบ วิธีการแก้ไขทำได้โดยปรับมุมแสงและกล้องให้ได้ภาพถ่ายที่ต้องการ

เอกสารอ้างอิง

- วิชา จิระแพทย์. (2552). *สารสนเทศทางการแพทย์และทางสุขภาพ*. จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย.
- Ahmed, K. I., Habaebi, M. H., Islam, M. R., & Zainal, N. A. B. (2017). Enhanced vision-based vein detection system. In *2017 IEEE 4th International Conference on Smart Instrumentation, Measurement and Application (ICSIMA)* (pp. 1–6). IEEE.
- Al-Saadi, S. F., Karimi Moonaghi, H., Al-Fayyadh, S., & Bakhshi, M. (2021). Vein visualization using near infrared (NIR) vein finder technology in nursing care:

- A review of the benefits and shortcomings. *Medical Education Bulletin*, 2(2), 213–220.
- Bashkatov, A. N., Genina, E. A., Kochubey, V. I., & Tuchin, V. V. (2005). Optical properties of human skin, subcutaneous and mucous tissues in the wavelength range from 400 to 2000 nm. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 38(15).
- Buwari, O. Y. (2013). Complications of venepuncture. *Advances in Bioscience and Biotechnology*, 4(1), 126–128.
- Chen, L., Huang, D., Chiheb, H., & Amar, C. B. (2011). Increasing the distinctiveness of hand vein images by oriented gradient maps. In *BIOSIG 2011—Proceedings of the Biometrics Special Interest Group* (pp. 227–234). Gesellschaft für Informatik eV.
- Crisan, S., Tarnovan, I. G., & Crisan, T. E. (2010). Radiation optimization and image processing algorithms in the identification of hand vein patterns. *Computer Standards & Interfaces*, 32(3), 130–140.
- Cuper, N. J., Klaessens, J. H., Jaspers, J. E., de Roode, R., Noordmans, H. J., de Graaff, J. C., & Verdaasdonk, R. M. (2013). The use of near-infrared light for safe and effective visualization of subsurface blood vessels to facilitate blood withdrawal in children. *Medical Engineering & Physics*, 35(4), 433–440.
- Denstedt, M., Bjorgan, A., Milanič, M., & Randeberg, L. L. (2014). Wavelet based feature extraction and visualization in hyperspectral tissue characterization. *Biomedical Optics Express*, 5(12), 4260–4280.
- Giavarina, D., & Lippi, G. (2017). Blood venous sample collection: Recommendations overview and a checklist to improve quality. *Clinical Biochemistry*, 50(10–11), 568–573.
- Haff, R. P., Saranwong, S., Thanapase, W., Janhira, A., Kasemsumran, S., & Kawano, S. (2013). Automatic image analysis and spot classification for detection of fruit fly infestation in hyperspectral images of mangoes. *Postharvest Biology and Technology*, 86, 23–28.
- Hotta, T. A. (2016). Understanding the anatomy of the upper face when providing aesthetic injection treatments. *Plastic and Aesthetic Nursing*, 36(3), 104–109.
- Ialongo, C., & Bernardini, S. (2016). Phlebotomy, a bridge between laboratory and patient. *Biochemia Medica*, 26(1), 17–33.
- Jacobson, A. F., & Winslow, E. H. (2005). Variables influencing intravenous catheter insertion difficulty and failure: An analysis of 339 intravenous catheter insertions. *Heart & Lung*, 34(5), 345–359.
- Jung, Y. J., Gonzalez, J., & Godavarty, A. (2015). Functional near-infrared imaging reconstruction based on spatiotemporal features: Venous occlusion studies. *Applied Optics*, 54(13), D82–D90.
- Juric, S., Flis, V., Debevc, M., Holzinger, A., & Zalik, B. (2014). Towards a low-cost mobile subcutaneous vein detection solution using near-infrared spectroscopy. *The Scientific World Journal*, 2014(1), 365902.
- Kaddoum, R. N., Anghelescu, D. L., Parish, M. E., Wright, B. B., Trujillo, L., Wu, J., . . . Burgoyne, L. L. (2012). A randomized controlled trial comparing the AccuVein AV300 device to standard insertion technique for intravenous cannulation of anesthetized children. *Pediatric Anesthesia*, 22(9), 884–889.
- Kimori, K., Sugama, J., Nakatani, T., Nakayama, K., Miyati, T., & Sanada, H. (2015). An observational study comparing the prototype device with the existing device for the effective visualization of invisible veins in elderly patients in Japan. *SAGE Open Medicine*, 3, 2050312115615365.
- Kumar, A., & Prathyusha, K. V. (2009). Personal authentication using hand vein triangulation and knuckle shape. *IEEE Transactions on Image Processing*, 18(9), 2127–2136.
- Meng, G. C., Shahzad, A., Saad, N. M., Malik, A. S., & Meriaudeau, F. (2015). Prototype design for wearable veins localization system using near infrared imaging technique. In *2015 IEEE 11th International Colloquium on Signal Processing & Its Applications (CSPA)* (pp. 112–115). IEEE.
- Miyake, R. K., Zeman, H. D., Duarte, F. H., Kikuchi, R., Ramacciotti, E., Lovhoiden, G., & Vrancken, C. (2006). Vein imaging: A new method of near infrared imaging, where a processed image is projected onto the skin for the enhancement of vein treatment.

- Dermatologic Surgery*, 32(8), 1031–1038.
- Mukai, K., Nakajima, Y., Nakano, T., Okuhira, M., Kasashima, A., Hayashi, R., . . . Nakatani, T. (2020). Safety of venipuncture sites at the cubital fossa as assessed by ultrasonography. *Journal of Patient Safety*, 16(1), 98–105.
- Nafiu, O. O., Burke, C., Cowan, A., Tutuo, N., Maclean, S., & Tremper, K. K. (2010). Comparing peripheral venous access between obese and normal weight children. *Pediatric Anesthesia*, 20(2), 172–176.
- Nettar, K., & Maas, C. (2012). Facial filler and neurotoxin complications. *Facial Plastic Surgery*, 28(3), 288–293.
- Pan, C. T., Francisco, M. D., Yen, C. K., Wang, S. Y., & Shiue, Y. L. (2019). Vein pattern locating technology for cannulation: A review of the low-cost vein finder prototypes utilizing near infrared (NIR) light to improve peripheral subcutaneous vein selection for phlebotomy. *Sensors*, 19(16), 3573.
- Park, S. S., & Barnettler, A. (2021). Vision loss secondary to facial and periorbital steroid injection: A systematic review. *Ophthalmic Plastic & Reconstructive Surgery*, 37(6), 511–521.
- Qian, H., Ling, Y., Zhang, M., Lenahan, C., Wang, C., Zheng, Z., . . . Zhang, J. (2021). Massive cerebral infarction following facial injection of autologous fat: A case report and review of the literature. *Frontiers in Human Neuroscience*, 15, 610945.
- Rao, H., Zhang, P., & Sun, C. (2017). Contrast enhancement for the infrared vein image of leg based on the optical angular spectrum theory. *Signal, Image and Video Processing*, 11, 423–429.
- Shahzad, A., Saad, M. N., Walter, N., Malik, A. S., & Meriaudeau, F. (2014). Hyperspectral venous image quality assessment for optimum illumination range selection based on skin tone characteristics. *Biomedical Engineering Online*, 13, 1–13.
- Sharp, R., Adams, J., Machiraju, R., Lee, R., & Crane, R. (2007). Physics-based subsurface visualization of human tissue. *IEEE Transactions on Visualization and Computer Graphics*, 13(3), 620–629.
- Waluś, M., Bernacki, K., & Konopacki, J. (2017). Impact of NIR wavelength lighting in image acquisition on finger vein biometric system effectiveness. *Opto-Electronics Review*, 25(4), 263–268.
- Wang, F., Behrooz, A., Morris, M., & Adibi, A. (2013). High-contrast subcutaneous vein detection and localization using multispectral imaging. *Journal of Biomedical Optics*, 18(5), 050504.
- Wang, J., Nakano, K., & Ohashi, S. (2011). Nondestructive evaluation of jujube quality by visible and near-infrared spectroscopy. *LWT-Food Science and Technology*, 44(4), 1119–1125.
- Wang, L., & Leedham, G. (2006). Near-and far-infrared imaging for vein pattern biometrics. In *2006 IEEE International Conference on Video and Signal Based Surveillance* (p. 52). IEEE.
- Wang, Y., Zhang, K., & Shark, K. (2014). Personal identification based on multiple keypoint sets of dorsal hand vein images. *IET Biometrics*, 3(4), 234–245.
- Zharov, V. P., Ferguson, S., Eidt, J. F., Howard, P. C., Fink, L. M., & Waner, M. (2004). Infrared imaging of subcutaneous veins. *Lasers in Surgery and Medicine*, 34(1), 56–61.

อิทธิพลกลุ่มเพื่อนของนักดื่มหน้าใหม่ที่มีต่อตัวแบบคณิตศาสตร์การระบาดของโรคติดสุรา

The influence of new drinkers' peer groups on a mathematical model of alcoholism epidemics

กันญารัตน์ หนูชุม^{1*} และปริญญญาณ์ วิสุทธีศิริ¹

Kanyarat Noochum^{1*} and Purinchaya Wisutsiri¹

Received: 28 February 2025 ; Revised: 16 July 2025 ; Accepted: 25 August 2025

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและวิเคราะห์ตัวแบบคณิตศาสตร์การระบาดของโรคติดสุราของนักดื่มหน้าใหม่โดยใช้วิธีมาตรฐานในการศึกษาได้แบ่งประชากรคนออกเป็น 5 กลุ่ม ประกอบด้วยกลุ่มที่เสี่ยงต่อการเป็นนักดื่มสุรา (S) กลุ่มที่เป็นนักดื่มหน้าใหม่ (D) กลุ่มที่เป็นนักดื่ม (H) กลุ่มที่ได้รับการบำบัดโรคติดสุรา (T) และกลุ่มที่หายจากโรคติดสุรา (R) ซึ่งแบบจำลองที่ได้อยู่ในรูปของระบบสมการเชิงอนุพันธ์สามัญไม่เชิงเส้น และวิเคราะห์แบบจำลองโดยใช้วิธีมาตรฐาน หาค่าจุดสมดุล คำนวณค่าระดับการติดเชื้อ (R_0) โดยใช้วิธีรันดัดไป และ Spectral Radius วิเคราะห์เสถียรภาพของจุดสมดุลโดยใช้เกณฑ์ของ Routh – Hurwitz criteria และหาคำตอบเชิงตัวเลขเพื่อสนับสนุนผลลัพธ์ที่ได้ พบว่าผลเฉลยเชิงตัวเลขของระบบเข้าสู่จุดสมดุลที่ไม่มีผู้ดื่มแอลกอฮอล์ $E_0(1.45, 0, 0, 0, 0)$ เป็น Local Asymptotically Stable เมื่อกำหนดให้ $\alpha_1 = 0.01$, $\alpha_2 = 0.5$ และ $\alpha_3 = 0.01$ จะได้ $R_0 = 0.08787878786 < 1$ และจุดสมดุลที่มีผู้ดื่มแอลกอฮอล์ $E_1(1.20339, 0.01511, 0.00548, 0.04876, 0.17732)$ เป็น Local Asymptotically Stable เมื่อกำหนดให้ $\alpha_1 = 0.5$, $\alpha_2 = 0.01$ และ $\alpha_3 = 0.5$ จะได้ $R_0 = 1.106870229 > 1$ ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าอิทธิพลกลุ่มเพื่อนของนักดื่มหน้าใหม่มีผลต่อตัวแบบคณิตศาสตร์การระบาดของโรคติดสุรา ดังนั้นควรลดอัตราการมีปฏิสัมพันธ์กับเพื่อนกลุ่มที่เป็นนักดื่มเพื่อทำให้การระบาดของโรคลดลง

คำสำคัญ : ตัวแบบคณิตศาสตร์, การระบาดของโรคติดสุรา, จุดสมดุล, ค่าระดับการติดเชื้อ

Abstract

The objective of this research is to develop and analyze a mathematical model of the alcohol addiction epidemic among new drinkers using standard methods. In this study, the population is divided into five compartments: susceptible drinkers (S), new drinkers (D), heavy drinkers (H), drinkers in treatment (T), and recovered drinkers (R). The formulated model is in the form of a system of nonlinear ordinary differential equations and is analyzed using standard methods. We obtained the equilibrium points and calculated the basic reproduction number (R_0) using the next-generation matrix method and spectral radius. The stability of the equilibrium points is analyzed using the Routh-Hurwitz criteria, and numerical solutions are provided to support the results. It was found that the numerical solution of the system converges to the alcohol-free equilibrium point, $E_0(1.45, 0, 0, 0, 0)$, which is locally asymptotically stable when given $\alpha_1 = 0.01$, $\alpha_2 = 0.5$, and $\alpha_3 = 0.01$, yielding $R_0 = 0.08787878786 < 1$. Furthermore, the alcohol-present equilibrium point, $E_1(1.20339, 0.01511, 0.00548, 0.04876, 0.17732)$, is locally asymptotically stable when given $\alpha_1 = 0.5$, $\alpha_2 = 0.01$, and $\alpha_3 = 0.5$, yielding $R_0 = 1.106870229 > 1$. The research results demonstrate that the influence of new drinkers' peer groups affects the mathematical model of the alcoholism epidemic. Therefore, reducing the rate of interaction with peer groups of drinkers will help decrease the alcoholism epidemic.

Keywords: Mathematical model, alcoholism epidemic, equilibrium point, basic reproduction number

¹ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี

¹ Faculty of Science and Technology, Suratthani Rajabhat University

* Corresponding author: Kanyarat Noochum, Email: kanyarat.noo@sru.ac.th

Introduction

It is well known that alcohol consumption leads to various negative consequences, including a range of health issues such as liver diseases, heart and cardiovascular conditions, cancer, and mental health disorders (World Health Organization, 2018; Assanangkornchai & Chittrakan, 2019; Wichaidit et al., 2019). Furthermore, alcohol consumption contributes to road accidents when individuals consume alcohol and then drive. It also leads to conflicts, violence, and physical harm. Despite these risks, a considerable number of people in Thailand still favor alcohol consumption. According to the report on alcohol consumption in each province in 2021, the prevalence of alcohol consumption in the Thai population is 28.0%, which means nearly 3 out of 10 individuals aged 15 and above have consumed alcohol within the past 12 months. Specifically, among adolescents, the prevalence of alcohol consumption is 9.0% (Vichitkunakorn & Tanaree, 2022). Moreover, a significant number of new drinkers, representing 5.93% of the Thai population aged 15 and above, started drinking alcohol for the first time within the past 3 years prior to the survey in 2021 (Center for Alcohol Studies, 2023; National Statistical Office, 2021).

New drinkers are a population group that requires close attention in each survey round because they might transition into regular drinkers, heavy drinkers, alcohol-dependent individuals, or even quit drinking. If there is a significant increase in the number of new drinkers during a certain period without a corresponding decrease in previous drinkers, the prevalence of current drinkers will also rise. Based on the trend analysis of alcohol consumption behavior among the Thai population, the prevalence of new drinkers aged 15 and above has been increasing since 2011 until 2021. Specifically focusing on new drinkers among adolescents, it was found that the prevalence has notably increased in the 2021 survey (Chirapradispol et al., 2020; Vichitkunakorn & Tanaree, 2022). Moreover, the study on the initiation of alcohol consumption found that the main reasons for starting drinking were being influenced by friends or peer pressure (38.85%), curiosity (29.12%), and socialization (20.82%),

with other reasons accounting for 11.21% (Wichaidit et al., 2019). It is evident that the most influential factor is peer pressure (Noiphon, 2017; Hashim et al., 2017; Gutiérrez et al., 2022), especially among adolescents who tend to seek peer approval. Therefore, they often follow the drinking behavior of their peers. Given this context, addressing the issue of alcohol consumption among current youth and adolescents is essential as they are at high risk of alcohol-related problems and consequences. Consequently, strategies for controlling the expansion of alcohol consumption and minimizing economic and social losses, particularly among adolescents, are necessary (Hashim et al., 2017).

Mathematical modeling regarding alcohol consumption has been frequently conducted, employing the principles and approaches used in infectious and contagious diseases (Poonpanang et al., 2015; Sharma & Samanta, 2015; Khajji et al., 2020; Reyes, 2020). Alcohol consumption behavior is considered a “disease” that can spread through peer influence. The interconnection of consumption patterns typically follows a sequence of transfer: current drinkers, at-risk drinkers, harmful drinkers, and recovering drinkers, with the possibility of transitioning back or being removed depending on interventions (Gutiérrez et al., 2022). For instance, Sharma and Samanta (2015) developed a mathematical model of alcohol dependence by categorizing the student population into four classes: moderate and occasional drinkers, heavy drinkers, treatment drinkers, and recovered drinkers. The researchers calculated the basic reproduction number (R_0) and examined the stability of equilibrium points. The study found that when $R_0 > 1$, the epidemic of alcohol consumption reaches an equilibrium point. Reyes (2020) used a mathematical model to analyze and explain the trend of alcohol consumption among university students in Colombia. The population was divided into three classes: regular drinkers, at-risk drinkers, and current alcohol-dependent individuals. The researchers found that when the transmission rate exceeds $R_0 > 1$, the epidemic of alcohol consumption reaches an equilibrium point.

In this study, we aim to examine the spread of alcohol dependence among new drinkers using a mathematical model. We analyze the causes and factors resulting from the influence of peers, which drive the formulation of control measures to monitor and prevent the spread of alcohol dependence.

Mathematical Model and Basic Properties

In this section we have developed a mathematical model of alcohol abuse.

1. Mathematical Model

This model is developed based on the framework proposed by Sharma and Samanta (2015), in which the population is divided into four compartments: moderate and occasional drinkers, heavy drinkers, treatment drinkers, and recovered drinkers. However, recent literature has emphasized the significant role of peer influence in the initiation of alcohol consumption, particularly among adolescents and young adults (Gutierrez et al., 2022; Chirapradispol et al., 2020).

Accordingly, the present model introduces an additional compartment representing new drinkers, comprising individuals who have downgraded from the heavy drinker group by reducing their alcohol intake. This behavioral transition is governed by the parameter α_2 , which denotes the proportion of heavy drinkers who shift to new drinkers without undergoing formal treatment. At the same time, peer influence from existing heavy drinkers is modeled through the parameter α_1 , representing the rate at which susceptible individuals are encouraged to initiate alcohol consumption and enter the heavy drinker class. Importantly, individuals in the new drinker class are not yet considered fully recovered and remain vulnerable to relapse. This risk is captured by the parameter α_3 , which quantifies the transition rate from new drinkers back to heavy drinking due to social, psychological, or environmental triggers.

As a result, the human population in this model is divided into five distinct classes: susceptible drinkers (S), heavy drinkers (H), new drinkers (D), treatment drinkers (T) and recovered drinkers (R). The transitions

among these groups, driven by peer influence, behavioral downgrading, and relapse dynamics, are illustrated in Figure 1.

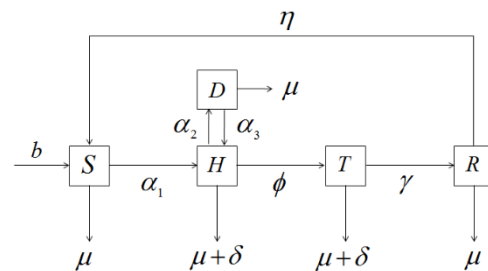


Figure 1 The schematic diagram of the alcohol abuse model

The model can be presented by the following set of ordinary differential equations:

$$\begin{aligned}
 \frac{dS}{dt} &= b + \eta R - \alpha_1 SH - \mu S \\
 \frac{dH}{dt} &= \alpha_1 SH + \alpha_3 DH - \alpha_2 H - (\phi + \mu + \delta)H \\
 \frac{dD}{dt} &= \alpha_2 H - \alpha_3 DH - \mu D \\
 \frac{dT}{dt} &= \phi H - (\gamma + \mu + \delta)T \\
 \frac{dR}{dt} &= \gamma T - (\eta + \mu)R
 \end{aligned} \tag{1}$$

with initial densities

$$S(0) > 0, H(0) > 0, D(0) > 0, T(0) > 0, R(0) > 0.$$

$$\text{So } N(t) = S(t) + H(t) + D(t) + T(t) + R(t).$$

denotes the total number of high-risk human population at time t .

The model parameters are described below:

- b : natural birth rate of the human population
- μ : Natural death rate of each population class
- δ : Drinking related death rate of heavy drinkers
- η : The proportion of recovered class who re-enter into susceptible drinkers
- α_1 : The transmission coefficient from susceptible drinkers to heavy drinkers
- α_2 : The proportion of the heavy drinker class who re-enter into new drinkers
- α_3 : The transmission coefficient from new drinkers to heavy drinkers

ϕ : The proportion of heavy drinkers who enter new in treatment

γ : Recovery rate of drinkers in treatment

The model is based on the following assumptions :

(i) The natural birth rate and death rate of the human population are assumed to be constant, denoted by b and μ , respectively.

(ii) Individuals who cease alcohol consumption enter the recovered drinkers class. A fraction of these individuals may relapse into the susceptible class due to waning immunity, occurring at a rate denoted by η (immune loss rate).

From system (1), by adding all equation, we get

$$\frac{dN}{dt} = b - \mu N - \delta H - \delta T \quad \text{as } t \rightarrow +\infty. \text{ So, the total}$$

population is $N = \frac{b - \delta(H + T)}{\mu}$, which is not constant. Let us scale the state variables with respect to the total population. Then system (1) becomes :

$$\begin{aligned} \frac{dN}{dt} &= b - \mu N - \delta H - \delta T \\ \frac{dH}{dt} &= \alpha_1 (N - H - D - T - R)H + \alpha_3 DH - \alpha_2 H - (\phi + \mu + \delta)H \\ \frac{dD}{dt} &= \alpha_2 H - \alpha_3 DH - \mu D \end{aligned} \quad (2)$$

$$\frac{dT}{dt} = \phi H - (\gamma + \mu + \delta)T$$

$$\frac{dR}{dt} = \gamma T - (\eta + \mu)R$$

where $S = N - H - D - T - R$.

2. Basic Properties

It is assumed by the model that all the state variables are non-negative at time $t = 0$. It then follows from the differential equations of system (1) that the variables are non-negative for all $t \geq 0$. That result can be summarized in the theorem 1.

Theorem 1 Let (S, H, D, T, R) be the solution of the system (1) with initial conditions $S(0) > 0$, $H(0) > 0$, $D(0) > 0$, $T(0) > 0$ and $R(0) > 0$.

$$\text{Then } \Omega = \left\{ \begin{array}{l} S(t), H(t), D(t), T(t) \in \mathbb{R}_+^5, \\ S(t) + H(t) + D(t) + T(t) \leq \frac{b}{\mu} \end{array} \right\} \text{ is a positively}$$

invariant and attracting under the flow described by the system (1)

Proof By the Lyapunov function (Bacciotti & Rosier, 2001) Let $S(t), H(t), D(t), T(t)$ and $R(t)$ are non-negative with $N = S + H + D + T + R$.

The time derivative of this equation is given by:

$$\begin{aligned} \frac{dN}{dt} &= b - \mu N - \delta H - \delta T \\ &\leq b - \mu N. \end{aligned}$$

$$\text{Since } \frac{dN}{dt} + \mu N \leq b,$$

we obtained $0 \leq N(t) \leq \frac{b}{\mu} (1 - e^{-\mu t}) + N(0)e^{-\mu t}$. where $N(0)$ represents the initial values of the total population.

$$\text{Then } \lim_{t \rightarrow \infty} \text{Sup } N(t) = \frac{b}{\mu}.$$

Thus Ω is positively - invariant and attracting under $[0, \infty)$.

Results

1. Basic Reproduction Number

In the following, we will find the basic reproduction number (R_0) of system (2) with the next generation matrix method formulation (Driessche & Watmough, 2002).

Let $x = (N, H, D, T, R)$, then the system (2) can be written as

$$\frac{dx}{dt} = F(x) - V(x)$$

$$= \begin{bmatrix} 0 \\ \alpha_1 (N - H - D - T - R)H + \alpha_3 DH \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \mu N + \delta H + \delta T - b \\ \alpha_2 H + (\phi + \mu + \delta) H \\ -\alpha_2 H + \alpha_3 D H + \mu D \\ (\gamma + \mu + \delta) T - \phi H \\ (\eta + \mu) R - \gamma T \end{bmatrix}$$

where $F(x)$ is the new infection terms, $V(x)$ is the other terms. The corresponding linearized matrices of $F(x)$ and $V(x)$ evaluated at disease-free equilibrium

$$E_0(N, H, D, T, R) = \left(\frac{b}{\mu}, 0, 0, 0, 0 \right) \text{ are respectively.}$$

$$F = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ \alpha_1 H & \alpha_1 \begin{pmatrix} N- \\ H- \\ D- \\ T- \\ R \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} -\alpha_1 H + \\ \alpha_3 H \end{pmatrix} & -\alpha_1 H & -\alpha_1 H & -\alpha_1 H \\ \alpha_3 D & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

and

$$V = \begin{bmatrix} \mu & \delta & 0 & \delta & 0 \\ 0 & \alpha_2 + \phi + \mu + \delta & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\alpha_2 + \alpha_3 D & \alpha_3 H + \mu & 0 & 0 \\ 0 & -\phi & 0 & \gamma + \mu + \delta & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\gamma & \eta + \mu \end{bmatrix}$$

Now,

$$FV^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{\alpha_1 b}{\begin{pmatrix} \alpha_2 + \\ \phi + \\ \mu + \\ \delta \end{pmatrix} \mu} & \frac{-\alpha_1 \alpha_2 b}{\begin{pmatrix} \alpha_2 + \\ \phi + \\ \mu + \\ \delta \end{pmatrix} \mu^2} & 0 & 0 \\ & & \begin{pmatrix} \gamma + \\ \mu + \delta \end{pmatrix} (\eta + \mu) & & \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

is the next generation matrix of system (2) and basic reproduction number of the system will be the spectral radius of matrix FV^{-1} denoted and defined as :

$$R_0 = \rho(FV^{-1}) = \frac{\alpha_1 b}{\mu(\alpha_2 + \phi + \mu + \delta)} > 0$$

2. Equilibrium Points

In this section, we will study the existence of equilibrium points of system (2). It has mainly two equilibrium points:

1) Alcohol- Free Equilibrium (AFE) :

$$E_0(N, H, D, T, R) = \left(\frac{b}{\mu}, 0, 0, 0, 0 \right)$$

2) Alcohol- Present Equilibrium (APE) :

$$E_1(N^*, H^*, D^*, T^*, R^*) = \left(\frac{b + \delta H^* (1 - a_1)}{\mu}, H^*, \frac{\alpha_2 H^*}{\alpha_3 H^* + \mu}, a_1 H^*, \frac{\gamma a_1 H^*}{a_2} \right)$$

where $a_1 = \frac{\phi}{\gamma + \mu + \delta}$ and $a_2 = \eta + \mu$

Theorem 2 System (2) has an alcohol - free

equilibrium $E_0\left(\frac{b}{\mu}, 0, 0, 0, 0\right)$ and if $R_0 > 1$, then it admits an alcohol-present equilibrium $E_1(N^*, H^*, D^*, T^*, R^*)$.

Proof Let $E_1(N^*, H^*, D^*, T^*, R^*)$ is alcohol-present equilibrium. At equilibrium, all derivatives in System (2) are equal to zero, and the system satisfies the following set of algebraic equations :

$$b - \mu N^* - \delta H^* - \delta T^* = 0 \quad (2a)$$

$$\alpha_1(N^* - H^* - D^* - T^* - R^*)H^* + \alpha_3 D^* H^* -$$

$$\alpha_2 H^* - (\phi + \mu + \delta)H^* = 0 \quad (2b)$$

$$\alpha_2 H^* - \alpha_3 D^* H^* - \mu D^* = 0 \quad (2c)$$

$$\phi H^* - (\gamma + \mu + \delta)T^* = 0 \quad (2d)$$

$$\gamma T^* - (\eta + \mu)R^* = 0 \quad (2e)$$

From (2c) and (2d), we obtain

$$D^* = \frac{\alpha_2 H^*}{\alpha_3 H^* + \mu} \quad (3)$$

$$T^* = \frac{\phi H^*}{\gamma + \mu + \delta} = a_1 H^* \quad (4)$$

Substituting (4) into (2a) and (2e) yields

$$N^* = \frac{b - \delta H^* (1 + a_1)}{\mu} \quad (5)$$

$$R^* = \frac{\gamma a_1 H^*}{\eta + \mu} = \frac{\gamma a_1 H^*}{a_2} \quad (6)$$

Then, substituting (3) – (6) into (2b), we have a cubic equation of H^* as follows:

$$a_4 H^{*3} + a_5 H^{*2} + a_6 H^* = 0 \quad (7)$$

where

$$a_1 = \frac{\phi}{\gamma + \mu + \delta},$$

$$a_2 = \eta + \mu,$$

$$a_3 = \phi + \mu + \delta,$$

$$a_4 = \alpha_1 \alpha_3 a_2 \delta - a_1 a_2 \alpha_1 \alpha_3 \delta - a_1 a_2 \mu \alpha_1 \alpha_3 - a_1 \gamma \mu \alpha_1 \alpha_3,$$

$$a_5 = \alpha_1 \alpha_3 a_2 b - a_2 \alpha_1 \delta \mu - a_1 a_2 \alpha_1 \delta \mu - a_2 \alpha_1 \alpha_2 \mu - a_1 a_2 \alpha_1 \mu^2 - \gamma a_1 \alpha_1 \mu^2 - a_2 a_3 \alpha_3 \mu,$$

$$a_6 = b \mu a_2 \alpha_1 - a_2 \alpha_2 \mu^2 - a_2 a_3 \mu^2.$$

Obviously, $a_4 < 0$ and $a_6 < 0$ holds naturally when $R_0 > 1$. Hence (7) has a positive solution, we can get

positive solutions N^*, H^*, D^*, T^* and R^* , respectively.

So, System (2) has an alcohol-present equilibrium

$$E_1(N^*, H^*, D^*, T^*, R^*) \text{ if } R_0 > 1.$$

3. Stability Analysis

In this section, we analyze the local stability of system (2) at the alcohol-free equilibrium and the alcohol-present equilibrium.

The Jacobian matrix of this system is

$$J = \begin{bmatrix} -\mu & -\delta & 0 & -\delta & 0 \\ \alpha_1 H & c_1 & c_2 & -\alpha_1 H & -\alpha_1 H \\ 0 & c_3 & c_4 & 0 & 0 \\ 0 & \phi & 0 & -(\gamma + \mu + \delta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \gamma & -(\eta + \mu) \end{bmatrix} \quad (8)$$

where $c_1 = \alpha_1(N - H - D - T - R) - \alpha_2 + \alpha_3 D - (\phi + \mu + \delta)$,

$c_2 = -\alpha_1 H + \alpha_3 H$, $c_3 = \alpha_2 - \alpha_3 D$ and $c_4 = -\alpha_3 H - \mu$.

3.1 Local Stability of E_0

Theorem 3 The alcohol-free equilibrium E_0 is locally asymptotically stable if $R_0 < 1$ and unstable if $R_0 > 1$.

Proof From (8), the Jacobian matrix corresponding to E_0 is given by

$$J(E_0) = \begin{bmatrix} -\mu & -\delta & 0 & -\delta & 0 \\ 0 & C & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_2 & -\mu & 0 & 0 \\ 0 & \phi & 0 & -(\gamma + \mu + \delta) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \gamma & -(\eta + \mu) \end{bmatrix} \quad (9)$$

where $C = \alpha_1 \left(\frac{b}{\mu} \right) - \alpha_2 - (\phi + \mu + \delta)$.

So, eigenvalue of the characteristic equation of $J(E_0)$ are $\lambda_{1,2} = -\mu, \lambda_3 = C, \lambda_4 = -(\gamma + \mu + \delta)$ and $\lambda_5 = -(\eta + \mu)$.

It is evident that $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_4$ and λ_5 are real and negative due to the positivity of all parameters. Now, E_0 is stable

if $\lambda_3 < 0$, $\alpha_1 \left(\frac{b}{\mu} \right) < \alpha_2 + \phi + \mu + \delta$, $R_0 < 1$. Therefore,

the system (2) is locally asymptotically stable at E_0 if $R_0 < 1$ and unstable if $R_0 > 1$.

3.2 Local Stability of E_1

Theorem 4 If $R_0 > 1$, the alcohol-present equilibrium E_1 is locally asymptotically stable.

Proof From (8), the Jacobian matrix corresponding to E_1 is given by

$$J(E_1) = \begin{bmatrix} D_1 & D_2 & 0 & D_2 & 0 \\ D_3 & D_4 & D_5 & D_6 & D_6 \\ 0 & D_7 & D_8 & 0 & 0 \\ 0 & D_9 & 0 & D_{10} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & D_{11} & D_{12} \end{bmatrix} \quad (10)$$

where $D_1 = -\mu$, $D_2 = -\delta$, $D_3 = \alpha_1 H^*$,

$$D_4 = \alpha_1 \left(\frac{b + \delta H^* (1 - a_1)}{\mu} - \frac{\alpha_2 H^*}{\alpha_3 H^* + \mu} - \frac{a_1 H^* - \frac{\gamma a_1 H^*}{a_2}}{\alpha_2} \right),$$

$$\alpha_2 + \frac{\alpha_2 H^*}{H^* + \mu} - (\phi + \mu + \delta)$$

$D_5 = -\alpha_1 H^* + \alpha_3 H^*$, $D_6 = -\alpha_1 H^*$, $D_7 = \alpha_2 - \frac{\alpha_2 H^*}{H^* + \mu}$,
 $D_8 = -\alpha_3 H^* - \mu$, $D_9 = \phi$, $D_{10} = -(\gamma + \mu + \delta)$, $D_{11} = \gamma$
 and $D_{12} = -(\eta + \mu)$.

The characteristic equation of system (2) at E_1 is $\det(\lambda I_5 - J_1) = 0$, where I_5 is the identity matrix of size 5 and λ is the eigenvalue of matrix J_1 .

The eigenvalue of matrix J_1 is given by

$$\lambda^5 + H_1 \lambda^4 + H_2 \lambda^3 + H_3 \lambda^2 + H_4 \lambda + H_5 = 0 \quad (11) \text{ where}$$

$$H_1 = D_1 + D_4 + D_8 + D_{10} + D_{12},$$

$$H_2 = (D_5 D_7 + D_6 D_9 + D_2 D_3) -$$

$$\left(D_1 D_4 + D_1 D_8 + D_1 D_{10} + D_1 D_{12} + D_4 D_8 + D_8 D_{12} + D_4 D_{12} + D_{10} D_{12} + D_8 D_{10} + D_4 D_{10} \right),$$

$$H_3 = \left(D_1 D_4 D_8 + D_1 D_8 D_{12} + D_1 D_4 D_{12} + D_1 D_{10} D_{12} + D_1 D_8 D_{10} + D_1 D_4 D_{10} + D_4 D_8 D_{12} + D_4 D_8 D_{10} + D_8 D_{10} D_{12} + D_4 D_{10} D_{12} + D_6 D_9 D_{11} + D_2 D_3 D_8 + D_2 D_3 D_{10} + D_2 D_3 D_{12} \right) -$$

$$\left(D_1 D_5 D_7 + D_1 D_6 D_9 + D_5 D_7 D_{12} + D_5 D_7 D_{10} + D_6 D_8 D_9 + D_6 D_9 D_{12} \right),$$

$$H_4 = \left(D_1 D_5 D_7 D_{12} + D_1 D_5 D_7 D_{10} + D_1 D_6 D_8 D_9 + D_1 D_6 D_9 D_{12} + D_2 D_3 D_8 D_{10} + D_2 D_3 D_8 D_{12} + D_2 D_3 D_{10} D_{12} + D_5 D_7 D_{10} D_{12} + D_6 D_8 D_9 D_{12} \right) -$$

$$\left(D_1 D_4 D_8 D_{12} + D_1 D_4 D_8 D_{10} + D_1 D_8 D_{10} D_{12} + D_1 D_4 D_{10} D_{12} + D_1 D_6 D_9 D_{11} + D_4 D_8 D_{10} D_{12} + D_6 D_8 D_9 D_{11} \right),$$

$$H_5 = D_1 D_4 D_8 D_{10} D_{12} - D_1 D_5 D_7 D_{10} D_{12} + D_1 D_6 D_8 D_9 D_{11} - D_1 D_6 D_8 D_9 D_{12} - D_2 D_3 D_8 D_{10} D_{12}$$

Thus, by Routh-Hurwitz Criterion (Kot, 2001), we obtain that all the eigenvalues of the characteristic Equation (11) have negative real parts if and only if the conditions:

(i) $H_i > 0$ for $i = 1, 2, 3, 4, 5$,

(ii) $H_1 H_2 - H_3 > 0$,

(iii) $H_1 H_2 H_3 - H_1 H_5 - H_1^2 H_4 - H_3^2 > 0$,

(iv) $\begin{pmatrix} H_1 H_2 H_3 H_4 - H_1 H_2 H_5 - H_1^2 H_4^2 - H_3^2 H_4 - H_2 H_5 - H_1 H_4 H_5 \end{pmatrix} > 0$.

Hence, the alcohol-present equilibrium E_1 of system (2) is local asymptotically stable if $R_0 > 1$.

4. Numerical Simulation

In this section, we present some numerical results of system (2), which are presented to support the analytic results obtained above. We have taken these based on the range provided in Table 1 and the different initial values for each variable of state.

Table 1 Values of the parameters used in the model.

Parameter	Values (Person/Day)	Reference
b	0.029	Bhunu and Mushayabasa (2012)
μ	0.02	
δ	0.035	
η	0.5	
ϕ	0.1	
γ	0.005	

First, we choose $\alpha_1 = 0.01$, $\alpha_2 = 0.5$ and $\alpha_3 = 0.01$, numerical simulation gives $R_0 = 0.08787878786 < 1$, then alcohol-free equilibrium $E_0(N, H, D, T, R) = E_0(1.45, 0, 0, 0, 0)$ is local asymptotically stable (Figure 2).

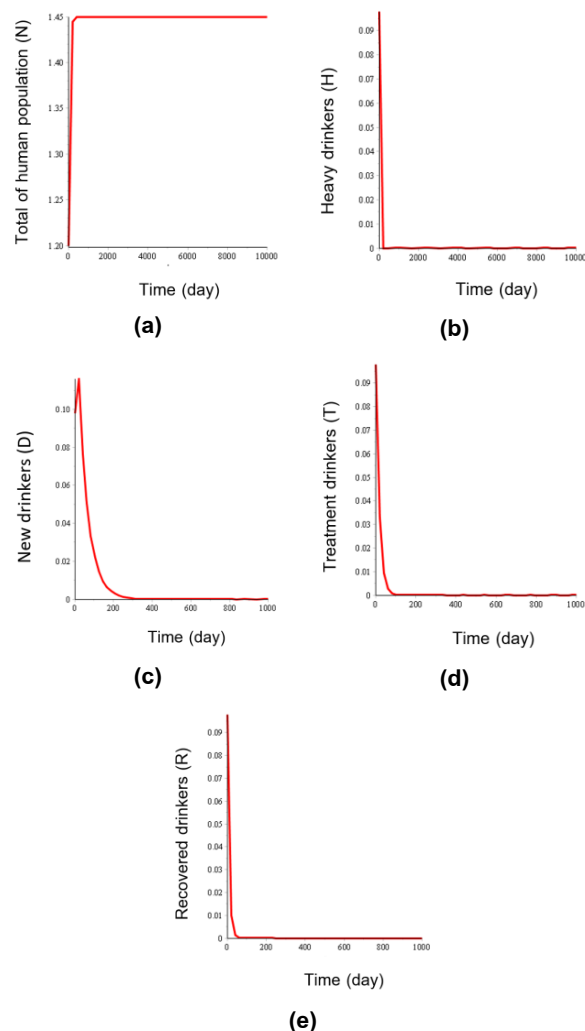


Figure 2 Time series of the (a) total of human population, (b) Heavy drinkers, (c) New drinkers, (d) Treatment drinkers and (e) Recovered drinkers. The state variable approach alcohol-free equilibrium.

From Figure 2(a)–2(e), the simulation results illustrate the temporal evolution of all population compartments under a specific parameter setting: the transmission rate from susceptible to heavy drinkers (α_1) is reduced to 1%, the proportion of heavy drinkers who transition to new drinkers (α_2) is increased to 50%, and the relapse rate from new drinkers back to heavy drinkers (α_3) is also reduced to 1%. Under these conditions, the system gradually evolves toward the alcohol-free equilibrium. In Figure 2(a), the total human population $N(t)$ increases due to natural demographic growth and stabilizes at approximately 1.45 million people after around 2,000 days (~5.5 years). Figures 2(b)–2(e) show that the subpopulations of drinkers including heavy drinkers (H), new drinkers (D), treatment drinkers (T) and recovered drinkers (R) gradually decline and converge to zero at approximately days 300, 500, 600 and 700, respectively. These results suggest that targeted interventions focusing on reducing peer influence and minimizing relapse can effectively eliminate alcohol use within a relatively short period, approximately two years highlighting the importance of early prevention policies and sustained rehabilitation efforts.

Second, we choose $\alpha_1 = 0.5$, $\alpha_2 = 0.01$ and $\alpha_3 = 0.5$, numerical simulation gives $R_0 = 1.106870229 > 1$, then alcohol presents an equilibrium

$$E_1(N^*, H^*, D^*, T^*, R^*) = E_1(1.20339, 0.01511, 0.00548, 0.04876, 0.17732)$$

is local asymptotically stable (Figure 3).

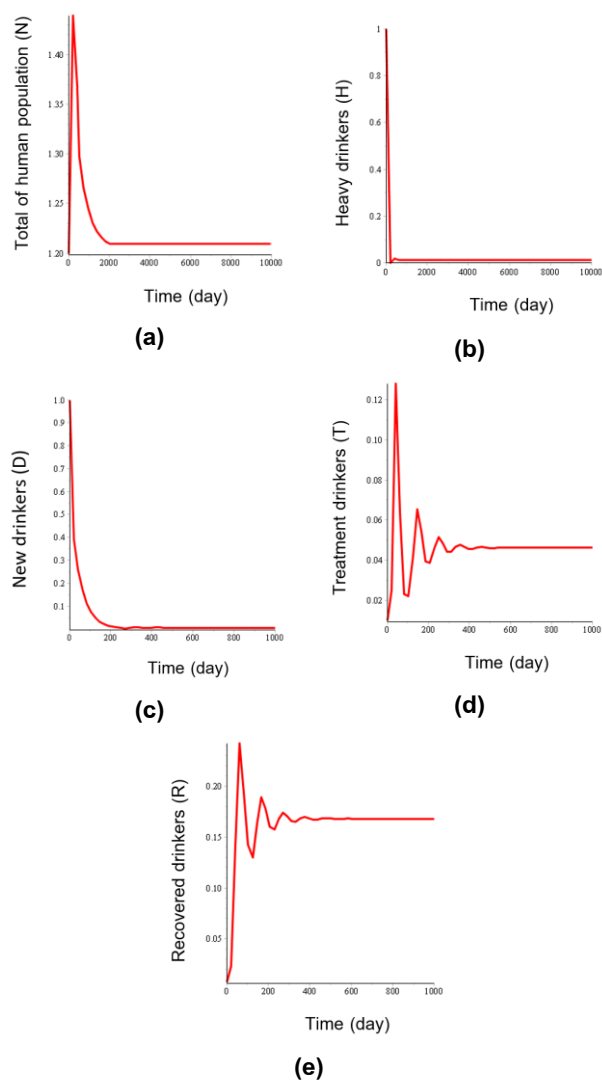


Figure 3 Time series of the (a) total of human population, (b) Heavy drinkers, (c) New drinkers, (d) Treatment drinkers and (e) Recovered drinkers. The state variables evolve toward the alcohol-present equilibrium.

Figure 3(a)–3(e) illustrates the population dynamics under an alcohol-present scenario. In this simulation, the transmission rate from susceptible individuals to heavy drinkers (α_1) is increased to 50%, the proportion of heavy drinkers who transition back into new drinkers (α_2) is reduced to 1%, and the relapse rate from new drinkers to heavy drinkers (α_3) is increased to 50%, representing a high-risk environment with frequent relapse, weak prevention, and sustained heavy drinking behavior. Figure 3(a) shows that the total human population $N(t)$ initially increases to about 1.45 million,

then declines and stabilizes around 1.20339 million after approximately 2,000 days (5.5 years), reflecting the cumulative effects of alcohol-related morbidity and mortality. Figures 3(b)–3(e) indicate that alcohol-related subpopulations gradually reach equilibrium: heavy drinkers (H) at 0.01511 (15,110 people), new drinkers (D) stabilize at 0.00548 (5,480 people), treatment group (T) at 0.04876 (48,760 people, and recovered individuals (R) at 0.17732 (117,320 people), assuming a total population of 1.45 million. These outcomes indicate that all drinking-related groups persist in the long term, suggesting that the system settles into an alcohol-present equilibrium mirroring real world contexts where insufficient intervention, frequent relapse, and lack of support systems lead to continued alcohol use. Targeted strategies addressing peer influence and relapse prevention are essential to shift the system away from this endemic state.

Discussion

This study developed a mathematical model to examine peer influence on alcohol addiction by introducing a new compartment for new drinkers (D). The analysis shows that the alcohol-free equilibrium is locally stable when $R_0 < 1$, but increases in peer influence (α_1) or relapse rate (α_3) may shift the system toward an alcohol-present equilibrium. Additionally, the model accounts for the downgrading of heavy drinkers to new drinkers (α_2), a behavioral transition that can delay or reverse addiction progression. Unlike earlier models such as Sharma and Samanta (2015), our model incorporates social dynamics, aligning with studies like Gutierrez et al. (2022) and Chirapradispol et al. (2020), which emphasized the critical role of peer and family influence in alcohol initiation among adolescents.

Key parameters such as α_1 (peer influence), α_2 (downgrading) and α_3 (relapse) reflect real-world social triggers. These findings align with Hashim et al. (2017), who identified peer exposure as a major predictor of youth alcohol use in Thailand. Our simulations indicate that while recovery mechanisms (ϕ, γ, η) are relevant, peer-driven initiation (α_1) becomes the dominant driver when

$R_0 > 1$. Under these conditions, the alcohol-present equilibrium is locally stable, suggesting that sustained peer influence and frequent relapse can maintain endemic levels of alcohol use. This supports findings by Reyes (2020), who demonstrated that peer dynamics reinforce long-term alcohol prevalence in university populations. Although the model assumes homogeneous mixing and constant rates, these assumptions can be relaxed in future work. Following Wichaidit et al. (2019) and National Statistical Office (2021), incorporating age structures, geographic factors, and behavioral seasonality would enhance realism. Policy implications include reducing α_1 through peer-led education, minimizing α_3 via long-term relapse prevention programs and enhancing α_2 by encouraging early-stage interventions that transition heavy drinkers to less severe stages. These strategies align with WHO (2018) recommendations. Future directions include adding a moderate drinker class, conducting sensitivity analysis, and validating the model with Thai national data. Most importantly, these results must be understood within the Thai socio-cultural context, where alcohol is embedded in festivals, family life, and peer activities, in order to guide effective and culturally sensitive interventions.

Conclusion

This study developed a compartmental mathematical model to examine the dynamics of alcohol consumption by incorporating peer influence (α_1), the downgrading of heavy drinkers to new drinkers (α_2) and relapse (α_3). Formulated a mathematical model by using the Routh-Hurwitz criteria and constructing Lyapunov functions. The model analysis revealed two non-negative equilibria: an alcohol-free equilibrium and an alcohol-present equilibrium. Numerical simulations showed that when $\alpha_1 = 0.01$, $\alpha_2 = 0.5$ and $\alpha_3 = 0.01$, the basic reproduction number $R_0 = 0.08787878786 < 1$, indicating that the alcohol-free equilibrium is locally asymptotically stable. In contrast, when $\alpha_1 = 0.5$, $\alpha_2 = 0.01$ and $\alpha_3 = 0.5$, the value $R_0 = 1.106870229 > 1$, confirming the local stability of the alcohol-present equilibrium. These findings confirm

that peer-driven initiation and relapse significantly influence the persistence of alcohol use in the population. The model underscores the critical role of minimizing peer influence and relapse in reducing alcohol prevalence. Achieving this objective necessitates the implementation of comprehensive public health strategies, including evidence-based educational campaigns, behavior modification interventions, and sustained relapse prevention programs. Such measures are essential to shift the population dynamics toward a stable alcohol-free equilibrium.

Acknowledgment

The authors would like to thank Suratthani Rajabhat University for research funding and support, which greatly facilitated the completion of this study.

References

- Assanangkornchai, S., & Chittrakan, S. (Eds.). (2019). *Facts and figures: Alcohol in Thailand 2016–2018*. Center for Alcohol Studies. <https://cas.or.th/content?id=53>
- Bacciotti, A., & Rosier, L. (2001). *Lyapunov functions and stability in control theory*. Springer-Verlag.
- Bhunu, C. P., & Mushayabasa, S. (2012). A theoretical analysis of smoking and alcoholism. *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms*, 11(2), 387–408. https://www.researchgate.net/publication/247938736_A_Theoretical_Analysis_of_Smoking_and_Alcoholism
- Center for Alcohol Studies. (2023). *Patterns and trends in alcohol consumption behavior of the Thai population*. <https://cas.or.th/content?id=36>
- Chirapradispol, R., Limthongkul, M., & Muchasheap, T. (2020). The influence of the family on the prevention of new drinkers in teenagers. *Sukhothai Thammarat Open University Journal*, 33(1), 6–17. <https://so05.tcithaijo.org/index.php/stouj/article/view/210808>
- Driessche, P. V. D., & Watmough, J. (2002). Reproduction numbers and sub-threshold endemic equilibria for compartmental models of disease transmission. *Mathematical Biosciences*, 180(1–2), 29–48. <https://>

- www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0025556402001086
- Gutiérrez, R., Vergaño-Salazar, J. G., Rojas-Jara, C., & Martínez-Jeraldo, N. (2022). Temporal dynamics of alcohol consumption patterns: The peer pressure and binge drinkers' role. *Revista de Modelamiento Matemático de Sistemas Biológicos*, 2(2), 27–39. <https://revistammsb.utem.cl/wp-content/uploads/sites/27/2022/08/c-MMSB-22-R-009.pdf>
- Hashim, S., Lerdsuwansri, R., & Srihera, R. (2017). Factors affecting senior high school alcohol drinking in Pathum Thani province. *Thai Journal of Science and Technology*, 6(1), 1–10. <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/tjst/article/view/75727>
- Khajji, B., Labzai, A., Balatif, O., & Rachik, M. (2020). Mathematical modeling and analysis of an alcohol drinking model with the influence of alcohol treatment centers. *International Journal of Mathematics and Mathematical Sciences*, 2020, 1–12. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1155/2020/4903168>
- Kot, M. (2001). *Elements of mathematical ecology*. Cambridge University Press.
- National Statistical Office. (2021). *The 2021 health behavior of population survey*. https://www.nso.go.th/nsoweb/storage/survey_detail/2023/20230505110449_84709.pdf
- Noiphon, W. (2017). Causal relationships among factors affecting new drinkers' alcohol drinking behavior. *Academic Psychiatry and Psychology Journal*, 33(2), 115–133. <https://he01.tci-thaijo.org/index.php/APPJ/article/view/72451>
- Poonpanang, W., Wisutsiri, P., & Naowarat, S. (2015). Stability analysis and qualitative behavior on the dynamics model of alcohol drinking. *Australian Journal of Basic and Applied Sciences*, 9(11), 973–980. <https://www.ajbasweb.com/old/ajbas/2015/May/973-980.pdf>
- Reyes, E. P. (2020). Mathematical modeling of the spread of alcoholism among Colombian college students. *Ingeniería y Ciencia*, 16(32), 195–223. <https://repository.eafit.edu.co/server/api/core/bitstreams/77c6d0ff-0411-4481-bc17-00fd24505898/content>
- Sharma, S., & Samanta, P. G. (2015). Analysis of a drinking epidemics model. *International Journal of Dynamics and Control*, 3(3), 288–305. <https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/s40435-015-01518.pdf>
- Vichitkunakorn, P., & Tanaree, A. (2022). *Provincial alcohol report 2021*. Sahamit Pattana Printing.
- Wichaidit, W., McNeil, E., Saingam, D., & Assanangkornchai, S. (2019). *Alcohol consumption in Thai society report 2017*. https://cas.or.th/?page_id=5564&paged=2
- World Health Organization. (2018). *Global status report on alcohol and health 2018*. <https://iris.who.int/bitstream/handle/10665/274603/9789241565639eng.pdf>

การพัฒนาคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศผสมขี้เถ้าแกลบและขวดแก้วรีไซเคิลตามแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน

Development of aerated lightweight concrete incorporating rice husk ash and recycled glass bottles under the circular economy approach

ธรรพร บุศย์น้ำเพชร^{1*} นิพนธ์ ตันไพบูลย์กุล¹ และธีรศิริ เกิดทอง¹

Tharaporn Budnumpetch^{1*} Nipon Tanpaiboonkul¹ and Thiansiri Kertthong

Received: 6 June 2025 ; Revised: 4 August 2025 ; Accepted: 2 September 2025

บทคัดย่อ

การเพิ่มขึ้นของวัสดุเหลือทิ้งจากภาคเกษตรกรรมและชุมชน เช่น ขี้เถ้าแกลบจากโรงไฟฟ้าชีวมวลและเศษแก้วจากของเสียชุมชนเมือง ส่งผลให้เกิดปัญหาทั้งด้านการจัดการของเสียและการใช้ทรัพยากรธรรมชาติอย่างสิ้นเปลือง งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาศักยภาพของวัสดุดังกล่าวในการพัฒนาเป็นองค์ประกอบของคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ โดยมุ่งเน้นการกำหนดอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานและองค์ประกอบที่เหมาะสม ผ่านการประเมินสมบัติเชิงกายภาพและกลของคอนกรีต ได้แก่ ค่ากำลังอัด ความหนาแน่น และการดูดซึมน้ำ ตัวแปรที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วย อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ที่ระดับ 0.4, 0.5, 0.6 และ 0.7 การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยขี้เถ้าแกลบในอัตรา 0, 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก การใช้ผงอลูมิเนียมในอัตรา 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์ และการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษแก้วบดในช่วง 0–100 เปอร์เซ็นต์ ของมวลรวมละเอียด

ผลการศึกษาพบว่าอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมที่สุดคือ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน 0.6 ขี้เถ้าแกลบ 30 เปอร์เซ็นต์ผงอลูมิเนียม 1.0 เปอร์เซ็นต์ และเศษแก้วบดแทนทราย 80 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของมวลรวมละเอียด โดยคุณสมบัติหลังบ่มตัวอย่าง 28 วันมีค่ากำลังอัดเท่ากับ 5.53 เมกะพาสคาล ซึ่งผ่านเกณฑ์ที่กำหนดในมาตรฐาน มอก. 2601-2556 สำหรับคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองชนิด C12 (≥ 2.5 MPa) ค่าความหนาแน่นเท่ากับ 1,070 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร อยู่ในช่วงที่กำหนดสำหรับคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองชนิด C12 (1,001–1,200 kg/m³) และค่าการดูดซึมน้ำเท่ากับ 24.97 เปอร์เซ็นต์ สูงกว่าเกณฑ์มาตรฐานเล็กน้อย (≤ 23 เปอร์เซ็นต์) แต่ยังคงอยู่ในระดับที่ใกล้เคียงและอาจยอมรับได้สำหรับการใช้งานทั่วไป โดยเฉพาะในบริบทที่ไม่เน้นการสัมผัสน้ำโดยตรง ดังนั้นผลการศึกษานี้สะท้อนถึงแนวทางการใช้วัสดุเหลือทิ้งเพื่อทดแทนทรัพยากรก่อสร้างธรรมชาติอย่างยั่งยืน ลดการพึ่งพาซีเมนต์และลดการปลดปล่อยก๊าซเรือนกระจก ตลอดจนสามารถต่อยอดสู่ผลิตภัณฑ์วัสดุก่อสร้างที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมได้ในอนาคต

คำสำคัญ: คอนกรีตมวลเบาเติมฟองอากาศ, ขี้เถ้าแกลบ, เศษแก้วบดรีไซเคิล, วัสดุก่อสร้างที่ยั่งยืน, เศรษฐกิจหมุนเวียน

Abstract

The increasing amount of agricultural and municipal waste, such as rice husk ash from biomass power plants and glass cullet from urban solid waste, raises concerns regarding waste management and the depletion of natural resources. This study aims to investigate the potential of these waste materials as components in aerated lightweight concrete by optimizing the water-to-binder ratio and mix proportions. The physical and mechanical properties evaluated include compressive strength, bulk density, and water absorption. The experimental design includes water-to-binder (w/b) ratios of 0.4, 0.5, 0.6, and 0.7; cement replacement with rice husk ash at 0, 10, 20, and 30% by weight; aluminum

¹ คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์, มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

¹ Faculty of Environment and Resource Studies, Mahasarakham University

* Corresponding author: Tharaporn Budnumpetch, Email: btharaporn.b@msu.ac.th

powder at 0.5, 1.0, 1.5, and 2.0%; and fine aggregate replacement with recycled glass cullet ranging from 0 to 100% by weight.

The optimal mix is identified as having a w/b ratio of 0.6, 30% rice husk ash, 1.0% aluminum powder, and 80% recycled glass cullet by weight of fine aggregate. After 28 days of curing, the mix achieves a compressive strength of 5.53 MPa, which exceeds the minimum requirement for Type C12 aerated concrete specified in TIS 2601-2556 (≥ 2.5 MPa). The bulk density is 1,070 kg/m³, which falls within the standard range for Type C12 (1,001–1,200 kg/m³). The water absorption is 24.97%, which slightly exceeds the standard limit ($\leq 23\%$) but remains within an acceptable range for practical use, particularly in applications without direct moisture exposure. Overall, the findings highlight the potential of utilizing agricultural and municipal waste as sustainable alternatives to conventional construction materials, contributing to cement reduction, greenhouse gas mitigation, and the development of environmentally friendly construction products.

Keywords: Aerated lightweight concrete, rice husk ash (RHA), recycled glass sand, sustainable construction materials, circular economy

บทนำ

อุตสาหกรรมก่อสร้างเป็นหนึ่งในภาคเศรษฐกิจที่ใช้ทรัพยากรธรรมชาติมากที่สุด และเป็นแหล่งกำเนิดก๊าซเรือนกระจกลำดับต้นของโลก โดยเฉพาะกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ซึ่งคิดเป็นสัดส่วนของการปล่อยคาร์บอน ประมาณ 7 เปอร์เซ็นต์ของโลก (Hasanbeigi *et al.*, 2024) ด้วยเหตุนี้จึงเกิดแนวโน้มในการพัฒนา “วัสดุก่อสร้างทางเลือก” โดยเฉพาะการประยุกต์ใช้วัสดุเหลือทิ้งจากอุตสาหกรรมการเกษตรเพื่อลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

แนวคิด BCG (Bio-Circular-Green Economy) ซึ่งเป็นนโยบายระดับชาติของไทยส่งเสริมการใช้ทรัพยากรชีวภาพอย่างมีประสิทธิภาพ การหมุนเวียนวัสดุ และการใช้ประโยชน์จากของเสีย โดยมีเป้าหมายในการยกระดับวัสดุเหลือใช้ให้สามารถนำไปใช้ในระดับอุตสาหกรรมได้อย่างยั่งยืน (ฝ่ายสื่อสารและภาพลักษณ์องค์กร, 2563) สำหรับแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) นั้นให้ความสำคัญกับการออกแบบกระบวนการผลิตโดยมุ่งเน้นการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่า ลดการใช้วัสดุใหม่ และเพิ่มการนำกลับมาใช้ใหม่ของวัสดุที่หมดอายุการใช้งาน แนวคิดนี้สามารถประยุกต์ใช้โดยเฉพาะในภาคการก่อสร้าง ผ่านการเลือกใช้วัสดุทดแทนจากของเสีย เช่น ขี้เถ้าแกลบซึ่งเป็นผลพลอยได้จากการผลิตพลังงานชีวมวล และเศษแก้วจากขยะชุมชนเมืองหรือวัสดุอื่นซึ่งหากนำวัสดุเหล่านี้กลับมาใช้แทนปูนซีเมนต์หรือทรายได้ก็สามารถลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ ลดการปล่อยก๊าซเรือนกระจก และบรรเทาผลกระทบจากการทำเหมืองและจากการขนส่งวัสดุใหม่ได้อย่างเป็นรูปธรรม งานวิจัยนี้จึงได้นำหลักการดังกล่าวมาประยุกต์ใช้ในการพัฒนาคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองที่มีความยั่งยืนทั้งด้านสิ่งแวดล้อมและการใช้ทรัพยากร

ในบริบทของประเทศไทยซึ่งเป็นหนึ่งในผู้ส่งออกข้าวรายสำคัญของโลก มีการผลิตแกลบและขี้เถ้าแกลบ (Rice Husk Ash: RHA) เป็นจำนวนมากจากกระบวนการสีข้าวและการเผาเพื่อผลิตพลังงานชีวมวล ขี้เถ้าแกลบที่ผ่านการเผาอย่างเหมาะสมจะมีปริมาณซิลิกาสูงกว่า 90 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก ซึ่งแสดงสมบัติปอซโซลานที่ดี (Ganesan *et al.*, 2008) ซึ่ง Endale (2023) รายงานว่าการใช้ขี้เถ้าแกลบ เป็นวัสดุทดแทนในคอนกรีต สามารถปรับปรุงคุณสมบัติเชิงกลและความทนทานของคอนกรีตได้ ช่วยเพิ่มความต้านทานแรงอัดและความทนทานของคอนกรีต ทศริยา กลิ่นขจร และคณะ (2565) สรุปว่าขี้เถ้าแกลบสามารถนำมาใช้ประโยชน์ได้ด้วยการเป็นวัตถุดิบผลิตอิฐมวลเบาและสัดส่วนของขี้เถ้าแกลบ 10 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก สามารถใช้ในการผลิตอิฐก่อผนังหรือกันห้องภายในอาคารได้ ขณะที่ ประชุม คำพุ่ม และทวีข กกล้าแท้ (2565) พบว่า การทำคอนกรีตบล็อกโดยมีขี้เถ้าแกลบเป็นส่วนผสมมีค่าผ่านเกณฑ์ มอก. 58-2533

เศษแก้วสามารถนำมาใช้ในงานคอนกรีตได้ทั้งในรูปของผงละเอียด (Glass Powder: GP) หรือเม็ดหยาบที่มีขนาดใกล้เคียงทรายธรรมชาติ โดยผงแก้วที่มีปริมาณซิลิกาสูงจะมีศักยภาพในการเกิดปฏิกิริยาปอซโซลาน Aliabdo *et al.* (2016) รายงานว่าผงแก้วสามารถใช้แทนปูนซีเมนต์บางส่วนได้โดยไม่ลดความทนทานของคอนกรีต ขณะที่ Nassar and Soroushian (2011) พบว่าผงแก้วที่บดละเอียดให้ผลด้านโครงสร้างในภาคสนามใกล้เคียงกับการใช้ปูนซีเมนต์ นอกจากการใช้แทนปูนซีเมนต์แล้วเศษแก้วที่ผ่านการบดยังสามารถใช้แทนทรายธรรมชาติได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดย Taha and Nounu (2008) พบว่าการแทนทรายด้วยเศษแก้วบดสามารถรักษาค่ากำลังอัดของคอนกรีตไว้ได้ และช่วยลดการดูดซึมน้ำ

เมื่อควบคุมขนาดการบดอย่างเหมาะสม ส่วน Muhedin and Ibrahim (2023) ระบุว่าการใช้เศษแก้วแทนทรายสามารถลดความหนาแน่นของคอนกรีตและยังคงสมบัติเชิงกลที่ดี เหมาะกับงานก่อสร้างที่ต้องการน้ำหนักเบา แม้ว่างานวิจัยส่วนหนึ่งจะเน้นการแทนที่ปูนซีเมนต์ แต่การใช้เศษแก้วทดแทนทรายโดยตรงก็ถือเป็นแนวทางที่ตอบโจทย์ของแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน ซึ่งช่วยลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติและลดผลกระทบจากกระบวนการผลิตขวดแก้วที่ใช้ความร้อนสูงและการขนส่งทรัพยากรได้

จากแนวโน้มดังกล่าว การใช้เศษแก้วบดละเอียดร่วมกับวัสดุปอซโซลาน เช่น ซีเมนต์กลบ หรือเศษแก้วบดขนาดเท่าทรายเพื่อทำเป็นมวลรวมในคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองอากาศจึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจ โดยเฉพาะเมื่อใช้ผงอลูมิเนียมเป็นตัวก่อฟองเพื่อลดความหนาแน่น (Van et al., 2019; ณรงค์ศักดิ์ เ็นประเสริฐ และอาทิมา ดวงจันทร์, 2564) โดยผงอลูมิเนียมทำหน้าที่เป็นสารก่อให้เกิดการขยายตัวอัตราการใช้ประมาณ 5-8 เปอร์เซ็นต์ โดยปริมาตร จึงกล่าวได้ว่าการนำวัสดุเหลือทิ้งที่มีสมบัติเหมาะสมนั้นสามารถประยุกต์ใช้ทดแทนวัสดุหลักได้ตามแนวทางการใช้วัสดุทดแทนในระบบเศรษฐกิจหมุนเวียนเพื่อความยั่งยืน สามารถประยุกต์ต่อยอดในการพัฒนามาตรฐานคอนกรีตมวลเบาได้ โดยทำให้เป็นไปตามข้อกำหนดของมาตรฐาน มอก. 2601-2556 ที่กำหนดระดับชั้นของคอนกรีตมวลเบาเพื่อความเหมาะสมต่อการนำไปใช้งาน (สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม, 2556) ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาศักยภาพของการใช้ซีเมนต์กลบร่วมกับเศษแก้วบดจากขยะรีไซเคิลเพื่อใช้แทนที่ทรายบางส่วนและผงอลูมิเนียมในคอนกรีตมวลเบา โดยเน้นการวิเคราะห์สมบัติเชิงกล ความหนาแน่น และการดูดซึมน้ำเพื่อสนับสนุนการพัฒนาวัสดุก่อสร้างที่ทั้งยั่งยืนและมีประสิทธิภาพทางวิศวกรรมต่อไปโดยอ้างอิงเกณฑ์ตามมาตรฐาน มอก. 2601-2556 สำหรับคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองชนิด C9-C12 เพื่อให้สามารถนำไปใช้ในงานก่อสร้างได้อย่างเหมาะสมต่อไป

การทดลอง

งานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การเตรียมวัสดุ การวิเคราะห์คุณสมบัติวัสดุเบื้องต้น การออกแบบอัตราส่วนผสม และการทดสอบสมบัติคอนกรีตมวลเบา ดังนี้

1. การเตรียมวัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการทดลองประกอบด้วยปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จากบริษัทปูนซีเมนต์นครหลวง จำกัด (มหาชน), ซีเมนต์กลบจากโรงไฟฟ้าชีวมวลในจังหวัดร้อยเอ็ด,

ขวดแก้วสีเขียวจากบรรจุภัณฑ์เครื่องดื่มแอลกอฮอล์ ปูนขาวจากโรงงานโกวิทปูนขาว จังหวัดสระบุรี, ทรายก่อสร้างในจังหวัดมหาสารคาม, ผงอลูมิเนียมจากบริษัท HIMEDIA และน้ำประปาจากการประปาส่วนภูมิภาค นำวัสดุหลักได้แก่ ทรายเศษขวดแก้วไปอบในเตาอบลมร้อนที่อุณหภูมิ $105 \pm 5^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ตามมาตรฐาน ASTM C511 จากนั้นทำการบดเศษแก้วให้มีขนาดเล็ก ร่อนซีเมนต์กลบผ่านตะแกรงเบอร์ 325 (ขนาด 45 ไมครอน) ส่วนทรายและเศษแก้วบดผ่านตะแกรงเบอร์ 35 (ขนาด 500 ไมครอน) ด้วยเครื่องร่อนแบบสันตามมาตรฐาน ASTM C136

2. การวิเคราะห์คุณสมบัติวัสดุ

การวิเคราะห์คุณสมบัติวัสดุเบื้องต้นประกอบด้วยการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของซีเมนต์กลบ เศษแก้วบด และทราย ด้วยเทคนิค X-ray Fluorescence (XRF) โดยใช้เครื่องรุ่น XGT-5200 ด้วยวิธี Standardless Method ณ ศูนย์เครื่องมือวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี สำหรับคุณสมบัติทางกายภาพ ได้ดำเนินการวัดค่าความถ่วงจำเพาะและความหนาแน่นตามมาตรฐาน มอก. 15 เล่ม 2-2521 โดยใช้เครื่องมือประเภท Pycnometer และวัดค่าการดูดซึมน้ำตามวิธีการของ ASTM C642 (ASTM International, 2021b) โดยแช่ตัวอย่างในน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และเปรียบเทียบกับน้ำหนักแห้ง นอกจากนี้ได้วิเคราะห์ขนาดคละของวัสดุและคำนวณค่าดัชนีความละเอียด (Fineness Modulus) ตามมาตรฐาน ASTM C136 (ASTM International, 2019a) และตรวจสอบลักษณะผิวของวัสดุด้วยกล้องจุลทรรศน์ชนิดแสงแบบตั้งโต๊ะ (upright light microscope) ของบริษัท Carl Zeiss (ประเทศเยอรมนี) รุ่น Axiostar Plus ซึ่งติดตั้งเลนส์วัตถุกำลังขยาย 100 เท่า ($100\times$ oil immersion) เพื่อศึกษาโครงสร้างจุลภาค

3. การออกแบบอัตราส่วนผสมคอนกรีตมวลเบา

การออกแบบอัตราส่วนผสมเพื่อพัฒนาคอนกรีตมวลเบาในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 3 ขั้นตอนย่อย ได้แก่

3.1 ขั้นตอนแรก ใช้อัตราส่วนพื้นฐานของวัสดุผสม

คอนกรีตมวลเบาที่ประกอบด้วยปูนซีเมนต์ 40, ปูนขาว 10 และทราย (มวลรวมละเอียด) 50 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก (ธพร บุศย์น้ำเพชร และนิพนธ์ ดันไพบลย์กุล, 2559) เพื่อศึกษาปริมาณน้ำต่อวัสดุประสาน (water-to-binder ratio, w/b) ที่ระดับ 0.4, 0.5, 0.6 และ 0.7 รวมถึงการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีเมนต์กลบในระดับ 0, 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน โดยควบคุมสัดส่วนของปูนขาวและ

ทรายไว้ที่ 10 และ 50 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ตัวอย่างคอนกรีตในขั้นตอนนี้ผสมด้วยเครื่องผสมมอร์ตาร์ขนาด 20 ลิตร ตามมาตรฐาน ASTM C305 (ASTM International, 2021a) เทลงแบบหล่อขนาด 50×50×50 มิลลิเมตร จากนั้นวางบนโต๊ะสั่น 1 นาทีเพื่อไล่ฟองอากาศ และทำการบ่มในห้องควบคุมความชื้นสัมพัทธ์มากกว่า 95 ที่อุณหภูมิ $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 7 วัน ก่อนนำมาทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C109 เพื่อคัดเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการศึกษาผลของอุณหภูมิในขั้นตอนถัดไป

3.2 ขั้นตอนที่สอง ศึกษาผลของการเติมผงอลูมิเนียมในระดับ 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน โดยใช้อัตราส่วนที่ได้จากขั้นตอนแรกและยังคงสัดส่วนของปูนขาวและทรายไว้ที่ 10 และ 50 เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ การผสมและขึ้นรูปตัวอย่างดำเนินการในลักษณะเดียวกันกับขั้นตอนแรก การทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7 วันใช้เพื่อประเมินผลของการเติมผงอลูมิเนียมที่มีต่อคุณสมบัติเชิงกล ก่อนเลือกอัตราส่วนที่เหมาะสมที่สุดสำหรับขั้นตอนต่อไป

3.3 ขั้นตอนที่สาม ศึกษาผลของการแทนที่ทรายด้วยเศษแก้วบดละเอียดในระดับ 0, 10, 20, 30, 40 และ 50 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของมวลรวมละเอียด โดยควบคุมให้ปริมาณรวมของมวลรวมละเอียด (ทราย + เศษแก้วบด) เท่ากับ 50 และคงสัดส่วนปูนขาวไว้ที่ 10 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก อัตราส่วนที่ใช้ในขั้นนี้ใช้ค่า w/b ปริมาณซีเมนต์แกลบ และปริมาณผงอลูมิเนียมที่เหมาะสมจากขั้นตอนที่ 1 และ 2 ตามลำดับ ก่อนนำไปขึ้นรูปเพื่อทดสอบกำลังอัดที่อายุ 7 วัน คัดเลือกอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมเพื่อนำไปทดสอบคุณสมบัติเชิงกล ความสามารถในการขึ้นรูป และความสอดคล้องกับเกณฑ์ มอก. 2601-2556 ที่อายุบ่ม 7 และ 28 วันต่อไป

4. การทดสอบสมบัติของคอนกรีตมวลเบา

การทดสอบสมบัติของคอนกรีตมวลเบาประกอบด้วยการทดสอบกำลังอัดตามมาตรฐาน ASTM C109/C109M (ASTM International, 2020) โดยใช้เครื่องทดสอบแรงอัด TTR รุ่น TTR-080G บริษัทไทยธำรง เอ็นจิเนียริ่ง จำกัด ขนาด 300 kN ความเร็วการโหลด 0.25 MPa/s มีหน่วยการวัดเป็นเมกะพาสคาล (MPa) การวัดค่าความหนาแน่นใช้วิธีการชั่งน้ำหนักตัวอย่างแห้งด้วยเครื่องชั่งดิจิทัลที่มีความละเอียด 0.01 กรัม และวัดขนาดตัวอย่างเพื่อใช้คำนวณปริมาตรด้วยเวอร์เนียร์คาลิเปอร์ โดยคำนวณความหนาแน่นจากสมการ 1

$$\text{Density}(\text{kg/m}^3) = \text{Mass}(\text{kg})/\text{Volume}(\text{m}^3) \quad (1)$$

การดูดซึมน้ำของตัวอย่างทดสอบดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM C642 (ASTM International, 2021b) โดยแช่ตัวอย่างในน้ำเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นอบในเตาอบที่อุณหภูมิ 105°C จนแห้ง แล้วชั่งน้ำหนักก่อนและหลังการแช่น้ำเพื่อคำนวณค่าการดูดซึมน้ำเป็นเปอร์เซ็นต์จากสมการที่ 2

$$\text{Water absorption (\%)} = ((w_s - w_d)/w_d) \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ: w_s = น้ำหนักตัวอย่างก่อนอบ

w_d = น้ำหนักตัวอย่างหลังอบ

ข้อมูลทั้งหมดจะถูกเปรียบเทียบกับเกณฑ์ตามมาตรฐาน มอก. 2601-2556 สำหรับคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองประเภท C9-C16 เพื่อนำมาคัดเลือกสูตรที่มีสมบัติเชิงกลและกายภาพที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการใช้งานจริง

ผลการทดลองและการอภิปรายผล

1. คุณสมบัติของวัสดุ

1.1 ค่าความถ่วงจำเพาะ ความหนาแน่น และการดูดซึมน้ำของวัสดุ

จากการศึกษาความถ่วงจำเพาะ ความหนาแน่น และการดูดซึมน้ำของวัสดุผสมคอนกรีตมวลเบา ได้แก่ ซีเมนต์แกลบ เศษแก้วบด และทราย ซึ่งผลการทดสอบแสดงใน Table 1

Table 1 Physical Properties of Raw Materials

Materials	Specific Gravity (g/cm ³)	Bulk Density (g/cm ³)	Water Absorption (percent)
Rice Husk Ash	1.58	1.57	4.23
Crushed Glass Waste	1.84	1.83	3.05
Fine Aggregate (Natural Sand)	2.28	2.27	1.75

จาก Table 1 พบว่า ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ 3.15 g/cm³ ซึ่งแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าหากมีการนำไปใช้เป็นส่วนผสมนั้นสามารถลดน้ำหนักของคอนกรีตได้ ขณะที่เศษแก้วบดมีความหนาแน่น 1.83 g/cm³ ทราาย 2.27 g/cm³ ถึงแม้แก้วบรรจุภัณฑ์ต่างๆ นั้นผลิตจากทรายแก้ว แต่ก็ผ่านกระบวนการหลอมและเปลี่ยนโครงสร้างทางเคมี จึงทำให้ความหนาแน่นของบรรจุภัณฑ์นั้นลดลง จึงมีแนวโน้มช่วยลดความหนาแน่นของคอนกรีตที่มีส่วนผสมนี้ได้ (Ibrahim, 2020) สำหรับค่าการดูดซึมน้ำพบว่า ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์มีความหนาแน่นสูงที่สุดสัมพันธ์กับลักษณะรูพรุนภายในที่เกิดจากการเผาไหม้ไม่สมบูรณ์ ซึ่งมีผลต่ออัตราส่วนน้ำต่อซีเมนต์และพฤติกรรมการแข็งตัวของ

คอนกรีต (Manjunath *et al.*, 2017; Ganesan *et al.*, 2008; ประชุม คำพุ่ม และทวิช กล้าแท้, 2565)

1.2 องค์ประกอบทางเคมีของวัสดุ

วัสดุที่ใช้ในการศึกษานี้ ได้รับการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยใช้เทคนิค X-ray Fluorescence (XRF) ด้วยเครื่องมือรุ่น XGT-5200 ซึ่งผลการวิเคราะห์แสดงใน Table 2 ที่พบว่า ซีเมนต์ปอร์ตแลนด์เป็นวัสดุปอซโซลานธรรมชาติที่มีปริมาณรวมของ SiO₂, Al₂O₃ และ Fe₂O₃ สูงกว่า 70 เปอร์เซ็นต์ ตามเกณฑ์ของ ASTM C618 (ASTM International, 2019b) และซิลิกาที่ได้จากการเผาในช่วง 500–800°C มีลักษณะเป็นอสัญฐานเกิดเป็นปฏิกิริยาปอซโซลานอย่างมีประสิทธิภาพ

Table 2 Chemical Composition of Materials (percent by weight)

Materials	SiO ₂	K ₂ O	CaO	Fe ₂ O ₃	TiO ₂	ZnO	SO ₃	CuO
Rice Husk Ash (RHA)	65.09	14.22	8.16	4.41	0.80	0.41	N.D.	N.D.
Crushed Glass Waste	42.86	1.04	39.39	9.44	1.41	0.08	0.14	0.08
Fine Aggregate (Natural Sand)	90.58	0.39	1.25	4.16	2.42	N.D.	N.D.	0.09

n.d. : not detected

(Bangwar *et al.*, 2017; Saad *et al.*, 2015) ส่วนเศษแก้วที่บดละเอียดมีคุณสมบัติเป็นปอซโซลานซึ่งจะสร้างเจลแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) เพื่อเพิ่มความแข็งแรงและทำให้ภายในคอนกรีตมีความหนาแน่นมากขึ้น (Poudel *et al.*, 2025; Zhou *et al.*, 2023)

1.3 ขนาดคลและโมดูลัสความละเอียดของมวลรวม

ทรายและเศษแก้วบดได้รับการวิเคราะห์ขนาดคลและค่าความหนาแน่นค่า Fineness Modulus (FM) โดยทรายมีค่า FM = 0.97 และเศษแก้วบด FM = 0.74 ซึ่งต่ำกว่าช่วงมาตรฐานของทรายทั่วไป (2.2–3.2) ค่า FM ต่ำแสดงถึงวัสดุที่ละเอียดมาก ซึ่งช่วยลดช่องว่างในโครงสร้างคอนกรีตทำให้อิทธิพลของ

มีความหนาแน่นและสม่ำเสมอมากขึ้น ส่งผลดีต่อความสามารถในการขึ้นรูปและลดการแยกชั้นของเนื้อวัสดุ (Ige *et al.*, 2024; บุรณัฏฐ์ จันตรีระ และคณะ, 2554)

1.4 ลักษณะทางจุลภาคของวัสดุ

ภาพถ่ายจากกล้องจุลทรรศน์กำลังขยาย 100 เท่าของซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ เศษแก้วบด และทราย แสดงให้เห็นลักษณะรูปร่างผิวที่แตกต่างกันดัง Figure 1 จากภาพอธิบายได้ว่าซีเมนต์ปอร์ตแลนด์(a) มีผิวเรียบมีขนาดขนาดใหญ่และต้องการการบดให้มีขนาดละเอียดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพปฏิกิริยาปอซโซลาน ในขณะที่เศษแก้วบด(b)มีลักษณะผิวหยาบ มีเหลี่ยมคม และทราย(c) มีเหลี่ยมคมน้อยกว่าเศษแก้วบด เมื่อวิเคราะห์ถึงรูป

ร่างและลักษณะของวัสดุตั้งกล่าวอาจส่งผลต่อค่ากำลังอัดของคอนกรีต มีการศึกษาจากนักวิจัยหลายท่านพบว่าวัสดุผิวหยาบ เช่น เศษแก้วบดนั้นมีผลต่อการเพิ่มแรงยึดเหนี่ยวกับซีเมนต์ทำให้คอนกรีตมีแนวโน้มเพิ่มความแข็งแรงได้มากขึ้น (Ichino *et al.*, 2024; Oluwasola *et al.*, 2020) ดังนั้นจากการวิเคราะห์คุณสมบัติของวัสดุของส่วนผสมทั้งซีเมนต์และเศษแก้วบดหากนำไปผสมในอัตราส่วนที่เหมาะสมจึงมีแนวโน้มของคุณสมบัติที่ดีได้ต่อไป

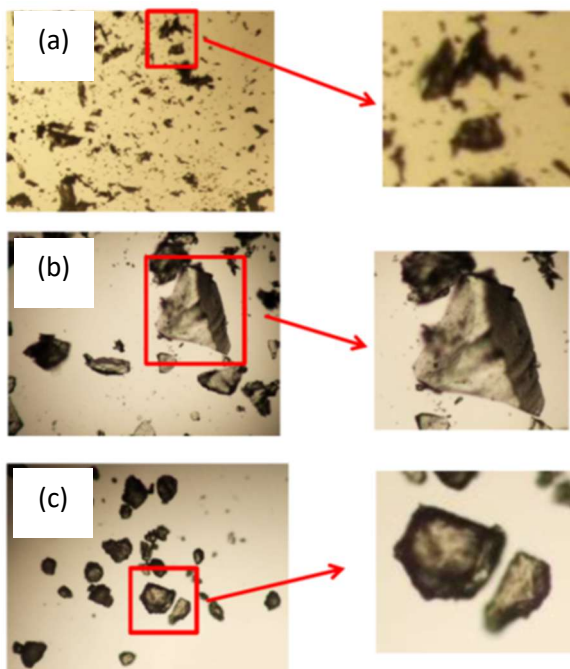


Figure 1 Microscopic images of (a) rice husk ash, (b) waste glass, and (c) sand at 100× magnification

2. การศึกษาค่ากำลังอัดเพื่อหาอัตราส่วนผสมที่เหมาะสมเบื้องต้น

2.1 ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีเมนต์และอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานต่อค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบา

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินอัตราส่วนที่เหมาะสมของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีเมนต์และ (RHA) ร่วมกับการพิจารณาอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) ที่เหมาะสมในการผลิตคอนกรีตมวลเบา โดยทดสอบค่ากำลังอัดของตัวอย่างที่อายุ 7 วัน ภายใต้ระดับการแทนที่ RHA ที่ 0, 10, 20 และ 30 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนัก และค่า w/b ที่ 0.4, 0.5, 0.6 และ 0.7 ตามลำดับ ดัง Figure 2

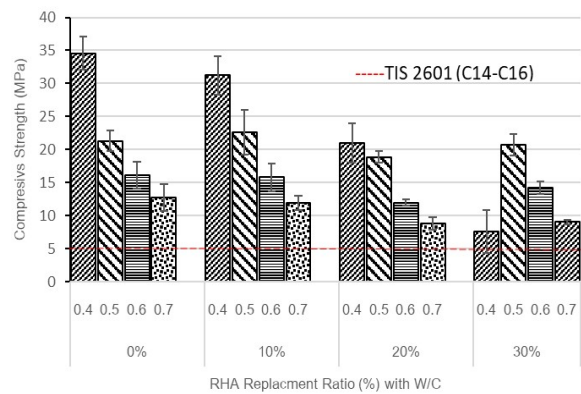


Figure 2 Compressive strength of lightweight concrete with varying rice husk ash (RHA) replacement ratios (0, 10, 20, and 30 by weight of cement) under different water-to-cement ratios at 7 days of curing.

ผลของการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีเมนต์และ (RHA) แสดงให้เห็นว่าเมื่ออัตราส่วนการแทนที่เพิ่มขึ้น ค่ากำลังอัดมีแนวโน้มลดลง เช่น ที่ w/b = 0.4 ค่ากำลังอัดลดลงจาก 34.54 ± 1.19 MPa (RHA 0) เหลือเพียง 7.59 ± 2.24 MPa (RHA 30) ซึ่งลดลงถึง 78 โดยเฉลี่ย และใน w/b = 0.6 ค่ากำลังอัดที่ RHA 30 ยังอยู่ที่ 14.20 ± 0.95 MPa แม้ว่าอัตราส่วนการแทนที่ 30 จะทำให้ค่ากำลังอัดลดลงเมื่อเทียบกับอัตราส่วนการแทนที่ที่ต่ำกว่า แต่ในทุกกรณียังคงมีค่ากำลังอัดสูงกว่าเกณฑ์ขั้นต่ำตาม มอก. 2601-2556 สำหรับคอนกรีตมวลเบาประเภทเติมฟอง (≥5 MPa สำหรับ C14-C16) โดยเฉพาะอัตราส่วนที่ w/b = 0.5 และ 0.6 ซึ่งมีค่ากำลังอัดที่ 20.71 ± 1.16 และ 14.20 ± 0.95 MPa ตามลำดับ ดังนั้น อัตราการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีเมนต์และสูงถึง 30 เปอร์เซ็นต์ อาจยังสามารถใช้ได้จริงในงานที่มุ่งเน้นการลดการใช้ปูนซีเมนต์เพื่อลดคาร์บอนฟุตพริ้นต์ แม้ว่าจะต้องแลกกับการลดลงของค่ากำลังอัด ทั้งนี้ควรเลือกใช้ค่า w/b ที่เหมาะสม (0.5–0.6) เพื่อรักษาสมดุลระหว่างความแข็งแรงและเป้าหมายด้านสิ่งแวดล้อม นอกจากนี้เมื่อพิจารณาผลของอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) พบว่าที่ระดับ RHA 30 เปอร์เซ็นต์ มีค่ากำลังอัดลดลงจาก 20.71 ± 1.16 MPa ที่ w/b 0.5 เป็น 14.20 ± 0.95 MPa และ 9.04 ± 0.36 MPa ที่ w/b 0.6 และ 0.7 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าแม้มีแนวโน้มลดลง แต่ค่าดังกล่าวยังเกินเกณฑ์ขั้นต่ำมาตรฐาน การลดลงของค่ากำลังอัดสามารถอธิบายได้จากการที่ w/b ที่สูงทำให้เกิดรูพรุนในเนื้อคอนกรีตมากขึ้นส่งผลต่อความหนาแน่นที่ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Park *et al.* (2024) และ Aliabdo *et al.* (2016) ที่ชี้ว่าการควบคุมปริมาณน้ำที่เหมาะสมมีผลอย่างยิ่งต่อโครงสร้างจุลภาคและค่ากำลังอัดของคอนกรีตที่ใช้

วัสดุพอลิโพรไพลีน เช่น RHA ในขณะที่การใช้ปริมาณน้ำที่น้อยเกินไปก็ส่งผลให้ค่ากำลังอัดลดลงเช่นกัน ดังเช่นจาก Figure 2 ค่ากำลังอัดที่ w/b 0.4 นั้นมีค่า 7.59 ± 2.24 MPa ซึ่ง โชคชัย ไตรยสุทธิ์ (2564) ได้รายงานว่าหากเนื้อคอนกรีตมีความแห้งเกินไปหรือมีน้ำไม่เพียงพอในส่วนผสมส่งผลให้ไม่สามารถเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันได้สมบูรณ์ทำให้ลดค่ากำลังอัดของคอนกรีตลงได้เช่นกัน ดังนั้นค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาทั้งจากการเปลี่ยนแปลง w/b และสัดส่วน RHA แสดงให้เห็นถึงความเหมาะสมในการนำไปใช้งานจริง โดยเฉพาะในอัตราส่วนที่ใช้ RHA สูงถึง 30 เปอร์เซ็นต์ ที่ w/b 0.5 หรือ 0.6 ซึ่งสามารถรักษาความแข็งแรงของคอนกรีตไว้ได้ในระดับมาตรฐานและสอดคล้องกับแนวคิด BCG Economy ในด้านการลดการใช้ปูนซีเมนต์แม้ว่าอัตราส่วน w/b = 0.7 จะยังให้ค่ากำลังอัดมากกว่าเกณฑ์ขั้นต่ำที่กำหนดใน มอก. 2601-2556 (≥ 5 MPa) แต่ค่ากำลังอัดที่ได้ต่ำกว่าค่าที่ได้จาก w/b = 0.5 และ 0.6 อย่างมีนัยสำคัญ (ลดลงประมาณ 42.25 และ 26.13 เปอร์เซ็นต์) อีกทั้งอัตราส่วนน้ำที่สูงเกินไปจะส่งผลให้เกิดโพรงอากาศและความพรุนที่มากขึ้น ซึ่งส่งผลให้ความสามารถในการรับแรงของคอนกรีตลดลง

2.2 ปริมาณผงอลูมิเนียมที่เหมาะสมสำหรับการผลิตคอนกรีตมวลเบา

จากผลการทดลองในหัวข้อ 2.1 ค้นพบว่าอัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) มีค่ากำลังอัดเหมาะสมคือ 0.5 และ 0.6 ร่วมกับการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีเถ้าแกลบ 30 เปอร์เซ็นต์ จึงนำอัตราส่วนดังกล่าวมาศึกษาพร้อมๆ กับปริมาณผงอลูมิเนียมที่ใช้ในอัตรา 0.5, 1.0, 1.5 และ 2.0 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน เพื่อวิเคราะห์ค่ากำลังอัดและค่าความหนาแน่นที่อายุบ่ม 7 วัน

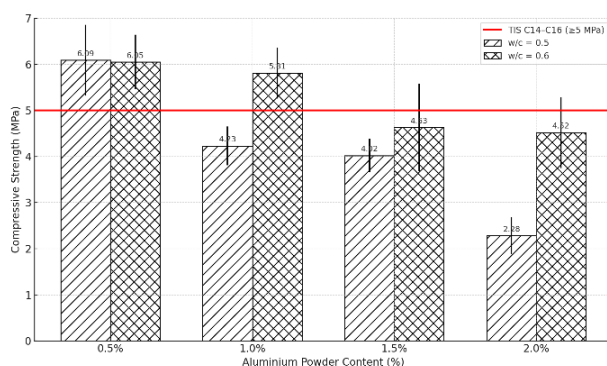


Figure 3 Compressive strength of lightweight concrete with aluminium powder contents of 0.5, 1.0, 1.5, and 2.0 at w/b ratios of 0.5 and 0.6 after 7 days of curing.

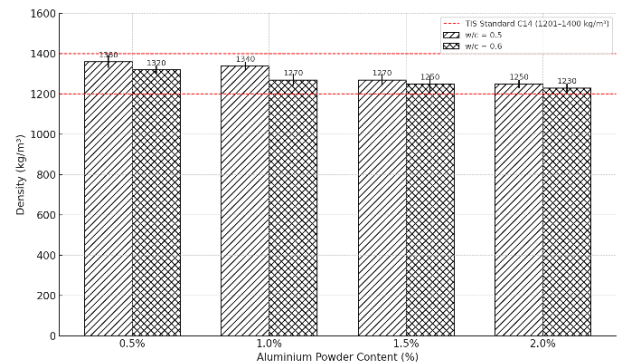


Figure 4 Density of lightweight concrete with aluminium powder contents of 0.5, 1.0, 1.5, and 2.0 at w/b ratios of 0.5 and 0.6 after 7 days of curing.

จาก Figure 3 แสดงค่ากำลังอัดของคอนกรีตมวลเบาที่ผสมผงอลูมิเนียมในช่วง 0.5–2.0 เปอร์เซ็นต์ โดยน้ำหนักของปูนซีเมนต์ ภายใต้ค่า w/b ที่ระดับ 0.5 และ 0.6 พบว่า ค่ากำลังอัดมีแนวโน้มลดลงอย่างชัดเจนตามปริมาณผงอลูมิเนียมที่เพิ่มขึ้น โดยที่ w/b เท่ากับ 0.5 ค่ากำลังอัดลดลงจาก 6.09 MPa ที่ 0.5 เปอร์เซ็นต์ เหลือเพียง 2.28 MPa ที่ 2.0 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเท่ากับลดลงประมาณ 62.6 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ที่ w/b เท่ากับ 0.6 กำลังอัดลดลงจาก 6.05 MPa เหลือ 4.52 MPa คิดเป็นการลดลงประมาณ 25.3 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นว่าผลกระทบจากผงอลูมิเนียมต่อกำลังอัดจะเด่นชัดขึ้นเมื่อค่า w/b ต่ำ การลดลงของกำลังอัดสามารถอธิบายได้จากปฏิกิริยาระหว่างผงอลูมิเนียมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในปูนซีเมนต์ ซึ่งจะปล่อยก๊าซไฮโดรเจนและทำให้เกิดฟองอากาศ ส่งผลให้ความพรุนในคอนกรีตเพิ่มขึ้น โครงสร้างอ่อนตัว และความแข็งแรงลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Islam *et al.* (2021) และ Ferhat *et al.* (2023) ที่พบว่าปริมาณผงอลูมิเนียมที่สูงทำให้ความพรุนเพิ่มขึ้นและส่งผลกระทบต่อกำลังอัด สำหรับกรณีค่า w/b ที่ 0.7 แม้ค่ากำลังอัดที่ได้ยังอยู่ในระดับที่สามารถยอมรับได้ (ตาม Figure 2) แต่กลับแสดงแนวโน้มลดลงอย่างต่อเนื่องเมื่อเทียบกับค่าที่ต่ำกว่า จึงไม่เหมาะที่จะเลือกเป็นสูตรผสมที่เหมาะสมที่สุด ทั้งนี้เป็นผลจากการใช้น้ำในปริมาณที่สูงเกินไป ซึ่งส่งผลให้เนื้อคอนกรีตมีโครงสร้างที่หลวมตัวและความสามารถในการรับแรงลดลง

จาก Figure 4 พบว่าความหนาแน่นของคอนกรีตมวลเบามีแนวโน้มลดลงเมื่อปริมาณผงอลูมิเนียมเพิ่มขึ้นจาก 0.5 เปอร์เซ็นต์ เป็น 2.0 เปอร์เซ็นต์ ทั้งในกรณีที่ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.5 และ 0.6 โดยที่ w/b = 0.5 ความหนาแน่นลดลงจาก 1,360 kg/m³ เหลือ 1,250 kg/m³ คิดเป็นการลดลงประมาณ 8.1 เปอร์เซ็นต์ ขณะที่ w/b = 0.6 ความหนาแน่นลดลงจาก 1,320 kg/m³ เหลือ 1,230 kg/m³

m³ หรือประมาณ 6.8 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นผลจากปฏิกิริยาเคมีระหว่างผงอลูมิเนียมกับแคลเซียมไฮดรอกไซด์ในซีเมนต์ ที่ก่อให้เกิดฟองก๊าซไฮโดรเจนจำนวนมากและสร้างโพรงอากาศภายใน ส่งผลให้เนื้อคอนกรีตมีความหนาแน่นลดลงอย่างชัดเจน ผลการทดลองนี้สอดคล้องกับรายงานของ Islam *et al.* (2021) และ Ferhat *et al.* (2023) ที่ระบุว่าความหนาแน่นของคอนกรีตเซลลูลาร์มีแนวโน้มลดลงตามปริมาณผงอลูมิเนียมที่เพิ่มขึ้น อย่างไรก็ตามความหนาแน่นของตัวอย่างคอนกรีตทั้งหมดในงานวิจัยนี้ยังคงอยู่ในช่วงมาตรฐานที่กำหนดโดย มอก. 2601-2556 สำหรับคอนกรีตมวลเบาชนิด C14 (1,201–1,400 kg/m³) จึงสามารถกล่าวได้ว่าการควบคุมปริมาณผงอลูมิเนียมให้อยู่ในช่วงที่เหมาะสมจะช่วยรักษาคุณสมบัติด้านน้ำหนักเบาได้โดยไม่กระทบต่อคุณภาพเชิงโครงสร้างของคอนกรีตและสอดคล้องกับเป้าหมายของคอนกรีตมวลเบาในการลดน้ำหนักโครงสร้างโดยไม่กระทบความสามารถในการรับแรงมากนัก

2.3 อัตราส่วนการแทนที่ทรายด้วยเศษแก้วบดสำหรับการผลิตคอนกรีตมวลเบาที่เหมาะสม

การทดลองนี้ศึกษาผลของการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษแก้วบดในระดับ 0, 20, 40, 60, 80 และ 100 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้อัตราส่วนผสมที่ได้จากการศึกษาเบื้องต้น ได้แก่ การแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีเมนต์เกรด 30 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.6 และเติมผงอลูมิเนียม 1.0 เปอร์เซ็นต์ จากการทดสอบกำลังอัดหลังบ่ม 7 วัน (Figure 5) พบว่า การเพิ่มปริมาณเศษแก้วบดจาก 0 เปอร์เซ็นต์ เป็น 60 เปอร์เซ็นต์ ทำให้ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นจาก 7.31 MPa เป็น 8.81 MPa หรือเพิ่มขึ้นประมาณ 20.5 เปอร์เซ็นต์ ก่อนจะลดลงเล็กน้อยที่ 80 เปอร์เซ็นต์ (7.91 MPa) และ 100 เปอร์เซ็นต์ (7.15 MPa) แต่ยังคงสูงกว่าเกณฑ์ขั้นต่ำที่กำหนดใน มอก. 2601-2556 สำหรับคอนกรีตประเภท C14-C16 (≥ 5.0 MPa) แนวโน้มการเพิ่มขึ้นของกำลังอัดในช่วง 20-60 เปอร์เซ็นต์ อาจเกิดจากอนุภาคของเศษแก้วที่มีขนาดเล็กเคียงทรายสามารถแทรกตัวและเติมเต็มช่องว่างในโครงสร้างคอนกรีตได้ดี ทำให้เกิดความหนาแน่นระดับจุลภาคที่สูงขึ้น และเกิดการอัดแน่นระหว่างอนุภาคโดยไม่รบกวนการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของปูนซีเมนต์ ซึ่งสอดคล้องกับ Taha and Nounu (2008) และ Nassar and Soroushian (2011) ที่รายงานว่า การใช้เศษแก้วบดแทนทรายสามารถปรับปรุงสมบัติเชิงกลของคอนกรีตได้อย่างมีประสิทธิภาพเมื่ออยู่ในระดับที่เหมาะสม อย่างไรก็ตามเมื่ออัตราการแทนที่ทรายเกิน 60 เปอร์เซ็นต์ ค่ากำลังอัดเริ่มลดลงราว 18.9 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับระหว่าง 60 เปอร์เซ็นต์ (8.81 MPa) กับ 100

เปอร์เซ็นต์ (7.15 MPa) ซึ่งอาจเกิดจากการเพิ่มขึ้นของวัสดุเฉื่อยที่ส่งผลให้เกิดการแยกตัวของวัสดุ และความพรุนของเนื้อคอนกรีตเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับ Muhedin and Ibrahim (2023) ที่ชี้ว่าการใช้เศษแก้วบดในระดับสูงอาจส่งผลต่อคุณสมบัติเชิงโครงสร้างหากไม่มีการควบคุมอนุภาคอย่างเหมาะสม

สำหรับค่าความหนาแน่น (Figure 6) มีแนวโน้มลดลงจาก 1,280 kg/m³ ที่ 0 เปอร์เซ็นต์ เป็น 1,150 kg/m³ ที่ 100 เปอร์เซ็นต์ หรือคิดเป็นการลดลง 10.2 เปอร์เซ็นต์ โดยค่าที่ระดับ 40 และ 60 เปอร์เซ็นต์ อยู่ที่ 1,240 และ 1,220 kg/m³ ตามลำดับ ซึ่งยังอยู่ใกล้เคียงหรือสูงกว่าเกณฑ์ขั้นต่ำของ มอก. 2601-2556 สำหรับคอนกรีตชนิด C12 (1,001–1,200 kg/m³) อย่างมีนัยสำคัญ ทั้งนี้ยังคงสะท้อนความสมดุลระหว่างน้ำหนักเบาและความแข็งแรงในระดับที่เหมาะสม จึงกล่าวโดยสรุปว่าการใช้เศษแก้วบดในช่วง 40 ถึง 60 เปอร์เซ็นต์ เป็นช่วงที่ให้สมดุลที่เหมาะสมระหว่างกำลังอัดและความหนาแน่นเหมาะสำหรับการประยุกต์ใช้ในงานก่อสร้างที่ต้องการวัสดุก่อสร้างมวลเบาซึ่งสอดคล้องกับงานของ Muhedin and Ibrahim (2023) ที่พบว่าการแทนที่ทรายด้วยเศษแก้วบดในปริมาณที่เหมาะสมสามารถเพิ่มกำลังอัดโดยไม่กระทบต่อความหนาแน่นมากนัก ขณะที่ Taha and Nounu (2008) รายงานว่าเมื่อใช้เศษแก้วบดเกินระดับ 50 เปอร์เซ็นต์ อาจเกิดผลกระทบต่อความหนาแน่นและคุณสมบัติเชิงกลหากไม่มีการควบคุมการกระจายอนุภาคที่เหมาะสม ซึ่งจากการศึกษาการแทนที่ทรายธรรมชาติด้วยเศษแก้วบดรีไซเคิลในคอนกรีตมวลเบาในทุกอัตราส่วนสามารถให้ค่ากำลังอัดสูงกว่ามาตรฐานขั้นต่ำที่กำหนด ใน มอก. 2601-2556 ทั้งชนิด C9-C12 และ C14-C16 ได้อย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งจะช่วยลดปริมาณการใช้ทรายธรรมชาติลงได้อย่างมีประสิทธิภาพโดยไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติเชิงกลต่อวัสดุที่ใช้ทำคอนกรีตมวลเบา

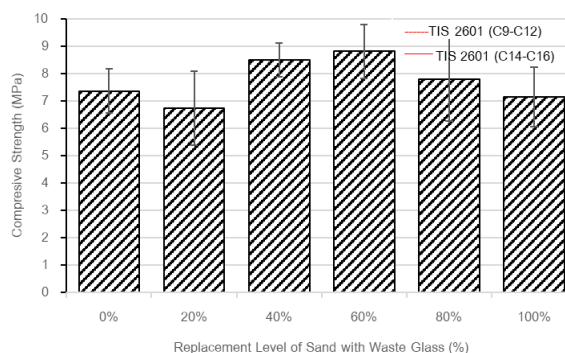


Figure 5 Compressive strength of lightweight concrete with varying levels of sand replacement by waste glass after 7 days of curing.

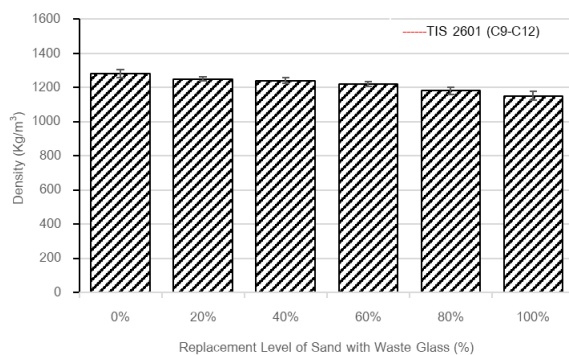


Figure 6 Density of lightweight concrete with varying levels of sand replacement by waste glass after 7 days of curing.

ดังนั้นผู้วิจัยจึงเลือกใช้วิธีการแทนที่ทรายด้วยเศษแก้วบดที่ระดับ 80 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถือเป็นจุดสมดุลระหว่างสมรรถนะทางวิศวกรรมและการใช้ทรัพยากรอย่างยั่งยืน โดยจุดสมดุลดังกล่าวหมายถึงการเลือกสูตรผสมที่สามารถรักษาค่ากำลังอัดให้อยู่ในระดับสูง (7.91 MPa ที่ 80 เปอร์เซ็นต์) ซึ่งมากกว่าค่ามาตรฐานขั้นต่ำตาม มอก. 2601-2556 และมีความหนาแน่นเหมาะสมสำหรับคอนกรีตมวลเบา (1,180 g/m³) ขณะเดียวกันสามารถลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติได้ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ จึงช่วยลดผลกระทบจากการหลอม การผลิตขวด และการขนส่งวัสดุใหม่ อีกทั้งยังเป็นการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือทิ้งในระบบจัดการของเสีย ส่งเสริมการใช้ทรัพยากรหมุนเวียนตามแนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy)

ทั้งนี้แม้ว่าการบดเศษแก้วให้มีขนาดละเอียดจะต้องใช้พลังงานไฟฟ้า แต่เมื่อพิจารณาจากมุมมองของเศรษฐกิจหมุนเวียนและการประเมินผลกระทบตลอดวัฏจักรชีวิต (Life Cycle Perspective) แล้ว การใช้เศษแก้วบดยังคงมีศักยภาพในการลดการใช้ทรัพยากรธรรมชาติ ลดปริมาณขยะที่ต้องกำจัด และลดผลกระทบจากการทำเหมืองทรายและการขนส่งได้ (Zhou *et al.*, 2023; Poudel *et al.*, 2025) โดยเฉพาะในกรณีที่ใช้แหล่งพลังงานหมุนเวียนหรือเชื่อมโยงกับระบบจัดการของเสียในพื้นที่ซึ่งจะช่วยลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมได้มากขึ้น

2.4 ผลของระยะเวลาการบ่มต่อคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบา

จากอัตราส่วนที่เหมาะสมสำหรับการผลิตคอนกรีตมวลเบาที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยซีเถ้าแกลบ 30 เปอร์เซ็นต์ อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสาน (w/b) เท่ากับ 0.6 ผง

อลูมิเนียม 1.0 เปอร์เซ็นต์ และการแทนที่ทรายด้วยเศษแก้วบด 80 เปอร์เซ็นต์ มาศึกษาผลของระยะเวลาการบ่มโดยเปรียบเทียบคุณสมบัติที่อายุ 7 วันและ 28 วัน ซึ่งแสดงไว้ใน Table 3

จากตารางพบว่า ค่ากำลังอัดเพิ่มขึ้นจาก 3.85 ± 0.22 MPa ที่อายุบ่ม 7 วัน เป็น 5.53 ± 0.33 MPa ที่ 28 วัน คิดเป็น 43.6 เปอร์เซ็นต์ แสดงให้เห็นถึงพัฒนาการของกำลังอัดที่ชัดเจนในช่วงเวลาบ่ม ซึ่งเป็นผลจากการดำเนินของปฏิกิริยาไฮเดรชันที่สมบูรณ์ยิ่งขึ้น ส่งผลให้เกิดการสร้างเจล C-S-H เพิ่มขึ้น ซึ่งเป็นสารยึดเหนี่ยวหลักของโครงสร้างคอนกรีตเป็นองค์ประกอบสำคัญในการเพิ่มความแข็งแรงของคอนกรีต แนวโน้มนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ Jantasuto *et al.* (2021) และ Akanbi *et al.* (2024) ซึ่งระบุว่ากำลังอัดของคอนกรีตจะเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วง 7 วันแรก และสามารถเพิ่มขึ้นได้อีกเนื่องจากได้รับการบ่มที่เหมาะสม

ค่าความหนาแน่นลดลงจาก $1,100 \pm 0.02$ kg/m³ ที่ 7 วัน เหลือ $1,070 \pm 0.07$ kg/m³ ที่ 28 วัน ลดลง 2.7 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งถือว่าการเปลี่ยนแปลงเล็กน้อยและไม่ส่งผลกระทบต่อความเป็นคอนกรีตมวลเบา แม้ไม่ถึงเกณฑ์ขั้นต่ำของ มอก. สำหรับ C12 แต่ยังคงอยู่ในระดับที่สามารถใช้งานได้ในพื้นที่เน้นน้ำหนักเบาเป็นหลักผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า ความหนาแน่นได้รับอิทธิพลจากชนิดและสัดส่วนของวัสดุผสมมากกว่าระยะเวลาการบ่ม ซึ่งเป็นลักษณะปกติของคอนกรีตมวลเบาที่เกิดจากการเติมฟองก๊าซในระหว่างกระบวนการผลิต

ค่าการดูดซึมน้ำเพิ่มขึ้นจาก 24.05 ± 0.60 เปอร์เซ็นต์ ที่ 7 วัน เป็น 24.97 ± 0.70 เปอร์เซ็นต์ ที่ 28 วัน เพิ่มขึ้น 3.8 เปอร์เซ็นต์ แม้ค่าที่วัดได้จะเกินเกณฑ์ของ มอก. สำหรับชนิด C9-C12 (≤ 23 เปอร์เซ็นต์) แต่ยังไม่เกินขีดจำกัดของชนิด C6-C8 (≤ 25 เปอร์เซ็นต์) ซึ่งถือว่าอยู่ในช่วงยอมรับได้สำหรับคอนกรีตมวลเบาที่มีความพรุนสูง ค่าที่เพิ่มขึ้นนี้อาจสะท้อนถึงโครงสร้างรูพรุนที่เปิดมากขึ้นเมื่อระยะเวลาการบ่มยาวนานขึ้น ซึ่งเอื้อต่อการซึมผ่านของน้ำ โดยเฉพาะเมื่อมีการใช้ผงอลูมิเนียมซึ่งก่อให้เกิดก๊าซไฮโดรเจนระหว่างปฏิกิริยากับปูนขาว และเมื่อรวมกับคุณสมบัติเฉพาะตัวของซีเถ้าแกลบซึ่งมีลักษณะพรุนสูง ก็ยิ่งทำให้คอนกรีตมีแนวโน้มดูดซึมน้ำมากขึ้น แนวโน้มดังกล่าวสอดคล้องกับงานวิจัยของ Islam *et al.* (2021) และ Ferhat *et al.* (2023) ที่รายงานว่าระยะเวลาการบ่มที่ยาวนานจะส่งผลให้โครงสร้างรูพรุนมีการเชื่อมต่อนกันมากขึ้น และสามารถดูดซึมน้ำได้มากขึ้น นอกจากนี้ Pachideh and Gholhaki (2019) ยังระบุว่าแม้วัสดุปอชโซลานอย่างซีเถ้า

แกลบอาจช่วยลดการดูดซึมน้ำในระดับหนึ่ง แต่ไม่สามารถลดผลกระทบจากรูพรุนที่เกิดจากฟองก๊าซได้อย่างสมบูรณ์

โดยสรุปแล้วปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของสมบัติคอนกรีตมวลเบาเมื่อระยะเวลาการบ่มเพิ่มขึ้น คือ ปฏิกริยาเคมีและโครงสร้างรูพรุนที่เกิดขึ้นจากการออกแบบส่วนผสม ซึ่งมีผลต่อทั้งกำลังอัดและการดูดซึมน้ำ ในขณะที่ความหนาแน่นได้รับอิทธิพลหลักจากองค์ประกอบวัสดุผสม

และชนิดของคอนกรีตเป็นสำคัญ

ดังนั้นเมื่อพิจารณาร่วมกันทั้งสามตัวแปร พบว่า อัตราส่วนผสมที่เลือกสามารถพัฒนากำลังอัดได้ดีเมื่อเวลาบ่มเพิ่มขึ้น โดยไม่ส่งผลกระทบต่อความหนาแน่นในระดับที่เกินขีดจำกัด และยังควบคุมการดูดซึมน้ำให้อยู่ในเกณฑ์ยอมรับได้ จึงถือว่ามีความศักยภาพในการนำไปใช้จริงในงานก่อสร้างที่ต้องการวัสดุเบาและยั่งยืน

Table 3 Properties of Lightweight Concrete with 80 Recycled Glass Sand Replacement Compared to TIS 2601–2013

Property	7 days	28 days	TIS 2601
Compressive Strength (MPa)	3.85 ± 0.22	5.53 ± 0.33	≥ 5.0 (C14–C16)
			≥ 2.5 (C9–C12)
Density (kg/m ³)	1,100 ± 0.02	1,070 ± 0.07	1001–1200 (C12)
			≤ 23.0 (C9–C12)
Water Absorption (percent)	24.05 ± 0.60	24.97 ± 0.70	(≤25%) (C6–C8)

สรุปผลการทดลองและข้อเสนอแนะ

วัตถุประสงค์ในการศึกษานี้เพื่อพัฒนาคอนกรีตมวลเบาแบบเติมฟองโดยประยุกต์ใช้ซีเมนต์แกลบและเศษแก้วรีไซเคิลภายใต้แนวคิดเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) โดยมุ่งเน้นการหาส่วนผสมที่เหมาะสมและประเมินสมบัติทางวิศวกรรม อันได้แก่ ค่ากำลังอัด ค่าความหนาแน่น และค่าการดูดซึมน้ำ เพื่อลดการพึ่งพาทรัพยากรธรรมชาติและลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

ผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า ซีเมนต์แกลบซึ่งมีความหนาแน่นต่ำ (1.57 g/cm³) และการดูดซึมน้ำสูง (4.23 เปอร์เซ็นต์) สามารถนำมาใช้แทนที่ปูนซีเมนต์ได้ถึง 30 เปอร์เซ็นต์ ที่อัตราส่วน w/b = 0.6 โดยให้ค่ากำลังอัดเฉลี่ยสูงถึง 14.20 MPa สูงกว่าเกณฑ์ขั้นต่ำตาม มอก. 2601–2556 สำหรับคอนกรีตทั้งชนิด C14–C16 (≥ 5 MPa) และชนิด C9–C12 (≥ 2.5 MPa) ในขณะเดียวกัน เศษแก้วบดสามารถใช้แทนทรายได้ถึง 80 เปอร์เซ็นต์ โดยค่ากำลังอัดยังคงสูงกว่าเกณฑ์ที่กำหนด (7.91 MPa) และสามารถลดค่าความหนาแน่นจาก 1,280 เป็น 1,180 kg/m³ ได้อย่างมีนัยสำคัญ

การเติมผงอลูมิเนียมในสัดส่วน 1.0 เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนักของวัสดุประสาน พบว่าให้ค่ากำลังอัดเฉลี่ย 5.81 MPa และค่าความหนาแน่นที่ต่ำที่สุด 1,270 kg/m³ ซึ่งยังคงอยู่

ภายในเกณฑ์มาตรฐานของคอนกรีตมวลเบา ชนิด C14 (1,201–1,400 Kg/m³)

เมื่อพิจารณาผลของระยะเวลาการบ่มร่วมกับอัตราส่วนที่คัดเลือกมา พบว่า การบ่ม 28 วันช่วยเพิ่มค่ากำลังอัดจาก 3.85 MPa (ที่ 7 วัน) เป็น 5.53 MPa ขณะที่ความหนาแน่นลดลงจาก 1,100 kg/m³ เป็น 1,070 kg/m³ ที่เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐานคอนกรีตมวลเบาชนิด C9–C12 ส่วนค่าการดูดซึมน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นจาก 24.05 เปอร์เซ็นต์ เป็น 24.97 เปอร์เซ็นต์ จัดอยู่ในเกณฑ์คอนกรีตมวลเบาชนิด C6–C8 (≤ 25 เปอร์เซ็นต์) แต่เกินเกณฑ์ที่กำหนดของชนิด C9–C12 (≤ 23 เปอร์เซ็นต์) เล็กน้อย

ดังนั้น การศึกษาแสดงให้เห็นถึงศักยภาพของซีเมนต์แกลบและเศษแก้วบดในการเป็นวัสดุทดแทนสำหรับคอนกรีตมวลเบาได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งในด้านคุณสมบัติทางวิศวกรรมและความยั่งยืน ซึ่งสอดคล้องกับเป้าหมายของแนวทาง BCG Economy ที่มุ่งเน้นการใช้ทรัพยากรอย่างคุ้มค่าควบคู่กับการลดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

ข้อเสนอแนะ

เพื่อพัฒนางานวิจัยอย่างต่อเนื่อง ควรศึกษาคุณสมบัติด้านความทนทาน (Durability) เช่น การซึมผ่านของคลอไรด์

การเปลี่ยนแปลงสมบัติภายใต้สภาวะเปียก-แห้งสลับ (Wet-Dry cycles) รวมถึงลักษณะจุลภาคของคอนกรีตมวลเบาเพิ่มเติมด้วยเทคนิค SEM หรือ XRD เพื่อให้เข้าใจกลไกภายในวัสดุอย่างลึกซึ้งยิ่งขึ้น นอกจากนี้ควรมีการพัฒนาผลิตภัณฑ์ต้นแบบเพื่อนำไปทดสอบภาคสนามและศึกษาการเปรียบเทียบวัสดุทดแทนจากแหล่งชีวมวลอื่น รวมถึงต้นทุนการผลิตเพื่อขยายศักยภาพการใช้วัสดุเหลือทิ้งในบริบทต่าง ๆ อย่างยั่งยืน

จากงานวิจัยในครั้งนี้ไม่มีตัวอย่างควบคุมที่ใช้เป็นวัสดุปกติ เนื่องจากผู้วิจัยออกแบบการทดลองเพื่อเปรียบเทียบกับมาตรฐาน มอก. โดยตรง อย่างไรก็ตาม เพื่อให้ผลการศึกษามีความชัดเจนยิ่งขึ้นจึงควรมีการจัดทำตัวอย่างควบคุมไว้เป็นข้อมูลเปรียบเทียบเพิ่มเติม

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้สำเร็จลงได้ด้วยความช่วยเหลือจากห้องปฏิบัติการของคณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ซึ่งให้การสนับสนุนเครื่องมืออุปกรณ์ และสถานที่ในการดำเนินการทดลองอย่างครบถ้วน และขอขอบคุณคณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ที่ให้ทุนอุดหนุนการวิจัยจากงบประมาณรายได้ ประจำปีงบประมาณ 2565 ซึ่งเป็นปัจจัยสำคัญที่ทำให้งานวิจัยนี้สามารถดำเนินไปได้อย่างราบรื่นและบรรลุเป้าหมายตามที่กำหนดไว้

เอกสารอ้างอิง

- โชคชัย ไตรยสุทธิ. (2564). การศึกษาระยะเวลาก่อตัว ความสามารถในการเทได้ และกำลังรับแรงอัดของคอนกรีตผสมน้ำยางพาราในการซ่อมผิวทาง. *วารสารวิชาการอุตสาหกรรมพระจอมเกล้าพระนครเหนือ*, 12(2), 91–101. <https://ojs.kmutnb.ac.th/index.php/jote/article/download/5453/3750>
- ณรงค์ศักดิ์ เย็นประเสริฐ และ อาทิตยา ดวงจันทร์. (2564). ศึกษาคุณสมบัติของคอนกรีตมวลเบาที่มีผงอะลูมิเนียมเป็นส่วนผสม. *วารสารวิชาการ มทร.สุวรรณภูมิ*, 9(1), 83–91. <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/rmtsb-sci/article/download/248711/171867>
- ทัศนียา กลิ่นขจร, สิริณญา กุลวงศ์, จิตภา ปัทม, สิทธิชัย ใจขาน, สมเจตน์ ทองดำรงธรรม และ ถนัดกิจ ชารีรัตน์. (2565). ผลของวัสดุปอชโซลานเก่าแก่กลบต่อสมบัติของอิฐมวลเบา. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีศึกษา*, 5(2), 182–190. <https://so04.tci-thaijo.org/index.php/JSSE/article/download/257255/176722>

- ธรรพร บุญน้ำเพชร และ นิพนธ์ ดันไพบูลย์กุล. (2559). สมบัติของคอนกรีตมวลเบาผสมยางรถยนต์ที่มีการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าลอยจากโรงไฟฟ้าถ่านหิน. *วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีมหาวิทยาลัยศิลปากร (Veridian E-Journal: Science and Technology Silpakorn University)*, 3(4), 62–75. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/VESTSU/article/view/71986>
- บุรณัตร์ จัตุรัสระ, เรวัตติ หน่ายมี และ ณัฐวิ มากล. (2554). สมบัติทางกลของคอนกรีตมวลเบาผสมหินฝุ่นแอนดิไซต์. *วารสารวิจัยและพัฒนา มจร.*, 34(4), 395–414. <https://www.thaiscience.info/journals/Article/KMIT/10830825.pdf>
- ประชุม คำพูน และ ทวีช กล้าแท้. (2565). คุณสมบัติของคอนกรีตบล็อกที่ใช้เถ้าแกลบแทนที่มวลรวมละเอียดบางส่วน. *วารสารวิศวกรรม มทร.ธัญบุรี*, 20(1), 81–91. <https://ph01.tci-thaijo.org/index.php/jermutt/article/download/248557/168684>
- ฝ่ายสื่อสารและภาพลักษณ์องค์กร. (2563). *โมเดลเศรษฐกิจใหม่ BCG*. สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ (สวทช.). https://www.nstda.or.th/home/knowledge_post/bcg-by-nstda/
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2556). *มอก. 2601-2556: คอนกรีตบล็อกมวลเบาแบบเติมฟองอากาศ*. กระทรวงอุตสาหกรรม. <https://www.tisi.go.th/data/service/tisistandard/2601-2556.pdf>
- สำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม. (2562). *มอก. 2752 เล่ม 2-2562: วิธีทดสอบปูนซีเมนต์ เล่ม 2 วิธีทดสอบความหนาแน่นของปูนซีเมนต์ไฮดรอลิก*. กระทรวงอุตสาหกรรม. https://www.tisi.go.th/data/standard/pdf_files/standards_development/5_TIS2752_2-2562.pdf
- Akanbi, T. Y., Habibu, A. S., Azare, A. A., & Okah, M. C. (2024). Evaluating the relationship between curing time and compressive strength in concrete: A statistical analysis. *FUOYE Journal of Engineering and Technology*, 9(2), 346–352. <https://doi.org/10.4314/fuoyej.v9i2.27>
- Aliabdo, A. A., Abd Elmoaty, A. E. M., & Aboshama, A. Y. (2016). Utilization of waste glass powder in the production of cement and concrete. *Construction and Building Materials*, 124, 866–877. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2016.08.016>

- ASTM International. (2019a). *ASTM C136/C136M-19: Standard test method for sieve analysis of fine and coarse aggregates*. https://doi.org/10.1520/C0136_C0136M-19
- ASTM International. (2019b). *ASTM C618-19: Standard specification for coal fly ash and raw or calcined natural pozzolan for use in concrete*. <https://doi.org/10.1520/C0618-19>
- ASTM International. (2020). *ASTM C109/C109M-20b: Standard test method for compressive strength of hydraulic cement mortars (using 2-in. or [50-mm] cube specimens)*. https://doi.org/10.1520/C0109_C0109M-20B
- ASTM International. (2021a). *ASTM C305-20: Standard practice for mechanical mixing of hydraulic cement pastes and mortars of plastic consistency*. <https://doi.org/10.1520/C0305-20>
- ASTM International. (2021b). *ASTM C642-21: Standard test method for density, absorption, and voids in hardened concrete*. <https://doi.org/10.1520/C0642-21>
- Bangwar, D. K., Saand, A., Keerio, M. A., Soomro, M. A., & Bhatti, N.-u.-K. (2017). Development of an amorphous silica from rice husk waste. *Engineering, Technology & Applied Science Research*, 7(6), 2184–2188. <https://etasr.com/index.php/ETASR/article/view/1534>
- Ferhat, A., Goual, M. S., Damene, Z., & Quéneudec, M. (2023). Experimental study on the effect of lime and aluminium content on porosity, introduced porosity, compressive strength and thermal conductivity of a lightweight cellular concrete based on limestone sand. *Construction and Building Materials*, 392, 131552. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.131552>
- Ganesan, K., Rajagopal, K., & Thangavel, K. (2008). Rice husk ash blended cement: Assessment of optimal level of replacement for strength and permeability properties of concrete. *Construction and Building Materials*, 22(8), 1675–1683. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.06.011>
- Hasanbeigi, A., Srinivasan, P., Chen, H., & Efram, N. (2024). *Adoption of limestone calcined clay cement and concrete in the U.S. market*. American Council for an Energy-Efficient Economy (ACEEE) & Global Efficiency Intelligence (GEI). <https://www.aceee.org/research-report/i2401>
- Ibrahim, K. (2020). Recycled waste glass [WG] in concrete. *Global Journal of Engineering Sciences*, 6(1). <https://doi.org/10.33552/GJES.2020.06.000627>
- Ichino, H., Kuwahara, N., Beppu, M., Williamson, E. B., & Himi, A. (2024). Effects of the shape, size, and surface roughness of glass coarse aggregate on the mechanical properties of two-stage concrete. *Construction and Building Materials*, 411, 134296. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.134296>
- Ige, J. A., Alabi, A. A., Adejumbi, A. O., Ayanlola, J. A., Ogunjinmi, M. O., & Odaliji, A. O. (2024). The effect of fineness modulus of fine aggregate on concrete compressive strength. *LAUTECH Journal of Civil and Environmental Studies*, 12(1), 27–33. https://laujoces.org/article_download/vol_12/issue_1/Paper_3.pdf
- Islam, M. M., Rashid, M. H., & Muntasir, M. A. (2021). Influence of aluminium and autoclaving temperature on the properties of autoclaved aerated concrete. *Journal of Engineering Science*, 12(3), 11–17. <https://doi.org/10.3329/jes.v12i3.57475>
- Jantasuto, O., Wiwattanachang, N., & Youngsukasem, N. (2021). Relationship between porosity & compressive strength of concrete with variable W/C ratio. *UTK Research Journal*, 15(1), 74–82. <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/rmutk/article/view/244227>
- Manjunath, N. K., Kumar, B. C. L., Annapurna, B. P., & Jogi, P. K. (2017). Effect of effective porosity and saturated water absorption on rice husk ash-filtered sand self-compacting concrete. *International Research Journal of Engineering and Technology (IR-JET)*, 4(3), 1218–1225. <https://www.irjet.net/archives/V4/i3/IRJET-V4I3290.pdf>
- Muhedin, D. A., & Ibrahim, R. K. (2023). Effect of waste glass powder as partial replacement of cement & sand in concrete. *Case Studies in Construction Materials*, 19, e02512. <https://doi.org/10.1016/j.cscm.2023.e02512>

- Nassar, R.-U.-D., & Soroushian, P. (2011). Field investigation of concrete incorporating milled waste glass. *The Journal of Solid Waste Technology and Management*, 37(4), 307–319. <https://doi.org/10.5276/JSWTM.2011.307>
- Oluwasola, E. A., Afolayan, A., Ipindola, O. O., Popoola, M. O., & Oginni, A. O. (2020). Effect of aggregate shapes on the properties of concrete. *LAUTECH Journal of Civil and Environmental Studies*, 5, Article 0110. [https://doi.org/10.36108/laujoces/0202/50\(0110\)](https://doi.org/10.36108/laujoces/0202/50(0110))
- Pachideh, G., & Gholhaki, M. (2019). Effect of pozzolanic materials on mechanical properties and water absorption of autoclaved aerated concrete. *Construction and Building Materials*, 222, 1–10. <https://doi.org/10.1016/j.job.2019.100856>
- Park, S. H., Ryu, H. S., & Park, W. J. (2024). Influence of unit water content control on concrete performance in the ready-mixed concrete production process. *Materials*, 17(4), 834. <https://doi.org/10.3390/ma17040834>
- Poudel, S., Bhetuwal, U., Kharel, P., Khatiwada, S., KC, D., Dhital, S., Lamichhane, B., Yadav, S. K., & Suman, S. (2025). Waste glass as partial cement replacement in sustainable concrete: Mechanical and fresh properties review. *Buildings*, 15(6), 857. <https://doi.org/10.3390/buildings15060857>
- Saad, S. A., Nuruddin, M. F., Shafiq, N., & Ali, M. (2015). Pozzolanic reaction mechanism of rice husk ash in concrete – A review. *Applied Mechanics and Materials*, 773–774, 1143–1147. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.773-774.1143>
- Taha, B., & Nounu, G. (2008). Properties of concrete contains mixed colour waste recycled glass as sand and cement replacement. *Construction and Building Materials*, 22(5), 713–720. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2007.01.019>
- Van, L. T., Kim, D. V., Xuan, N. H., Dinh, T. V., Bulgakov, B., & Bazhenova, S. (2019). Effect of aluminium powder on light-weight aerated concrete properties. *E3S Web of Conferences*, 97, 02005. <https://doi.org/10.1051/e3sconf/20199702005>
- Zhou, C., Li, M., Nguyen, Q. D., Lin, X., Castel, A., Pang, Y., Deng, Z., Shi, T., & Mai, C. (2023). Application of waste glass powder for sustainable concrete: Design, performance, perspective. *Materials*, 18(7), 734. <https://doi.org/10.3390/ma18070734>

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 แต่ละเรื่องจะต้องมีบทคัดย่อทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ การใช้ภาษาไทยให้ยึดหลักการใช้คำศัพท์การเขียนทับศัพท์ภาษาอังกฤษตามหลักของราชบัณฑิตยสถาน ให้หลีกเลี่ยงการเขียนภาษาอังกฤษรวมกับภาษาไทยในข้อความ 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 ของผู้พิมพ์ไว้เป็นเชิงอรรถของหน้าแรก 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 วิธีการเก็บข้อมูลการวิเคราะห์และการแปลผล

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) ระบุงานวิจัยได้รับการสนับสนุนงบประมาณ หรือสนับสนุนด้านอื่นๆ รวมถึงความช่วยเหลือจากองค์กรใดหรือผู้ใดบ้าง

เอกสารอ้างอิง (References) ระบุงานการเอกสารที่นำมาใช้อ้างอิงให้ครบถ้วนไว้ท้ายเรื่อง 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 ฐานะวุฒ. (2547). หัวใจใหม่-ชีวิตใหม่. ปิตีศึกษา.

2. บทความในวารสารอิเล็กทรอนิกส์

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

ตัวอย่าง:

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

3. รายงานการประชุมเชิงวิชาการ (Proceeding)

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

ตัวอย่าง:

พัชรภา ตันติชูเวช. (2553). การศึกษาทั่วไปกับคุณลักษณะบัณฑิตที่พึงประสงค์ในประเทศมาเลเซีย และสิงคโปร์ ศึกษา
โดยเปรียบเทียบกับประเทศไทย. ใน ศิริชัย กาญจนวาสี (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: 'สื่อพิพิธภัณฑ' 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.Peerarak 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 45 ฉบับที่ 4 กรกฎาคม - สิงหาคม 2569

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

JOURNAL OF SCIENCE AND TECHNOLOGY
MAHASARAKHAM UNIVERSITY
INDEXED IN

