



วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ Huachiew Chalermprakiet Science and Technology Journal

เรียนรู้เพื่อรับใช้สังคม

ปีที่ 12 ฉบับที่ 1 มกราคม-มิถุนายน 2569

ISSN 2985-1653 (Online)

Volume 12 No.1 January-June 2026



บทความวิจัย

- การพัฒนาเจลต้านการอักเสบจากสารสกัดไพลและดีปลี
- การพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาในรูปแบบผงสกัดขงดื่ม: การศึกษาเชิงคุณภาพและการเก็บรักษา
- การเปรียบเทียบข้อมูลเมตาโบโลมิกส์แบบไม่เจาะจงและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของชาแดงและชาหลวงที่ปลูกในจังหวัดสมุทรปราการ
- ผลของน้ำชาต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของหัวใจในหนูแรทเพศผู้
- ผลกระทบของ pH ต่อการสังเคราะห์หีลแวนจาก *Bacillus siamensis* ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบกะ
- การพัฒนาสูตรไอศกรีมกล้วยหอมทองลดไขมันโดยใช้อินูลินเป็นสารทดแทนไขมัน
- Assessment of Fungal Bioaerosols in Indoor and Outdoor Air Conditions of Child Development Centers of the Local Government in Northeast Thailand
- การศึกษาเปรียบเทียบสถาปัตยกรรม YOLO สำหรับการตรวจจับข้อบกพร่องบนรอยเชื่อมที่ซับซ้อนภายใต้ความกำกวมของป้ายกำกับ
- การตรวจจับพฤติกรรมผิดปกติของเหตุการณ์การเข้าถึงไฟล์บนระบบคลาวด์แบบเรียลไทม์โดยใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องแบบสตรีม
- การพยากรณ์ปริมาณน้ำฝนรายเดือนในจังหวัดแพร่โดยวิธีทางสถิติ



วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ

ปีที่ 12 ฉบับที่ 1 มกราคม – มิถุนายน 2569

ISSN 2985-1653 (Online)

วัตถุประสงค์

เพื่อเผยแพร่บทความวิจัยและบทความวิชาการทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ประกอบด้วยสาขาวิชา วิทยาศาสตร์ชีวภาพ วิทยาศาสตร์กายภาพ วิทยาศาสตร์สุขภาพ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร วิทยาการคอมพิวเตอร์ และเทคโนโลยีสารสนเทศ และอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง รวมทั้งเพื่อส่งเสริมให้เกิดความรู้ทางวิชาการแก่สังคมทั่วไป และสนับสนุนให้ คณาจารย์ นักวิชาการ ผู้ทรงคุณวุฒิในด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และนักศึกษาเสนอผลงานวิชาการ

กำหนดเผยแพร่ ปีละ 2 ฉบับ

ฉบับที่ 1 มกราคม-มิถุนายน

ฉบับที่ 2 กรกฎาคม-ธันวาคม

เจ้าของ

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ

ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร.อุไรพรรณ เจนวาณิชยานนท์

อาจารย์ ดร.จำรูญศรี พุ่มเทียน

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรสิริ วนรัฐกาล

รองหัวหน้ากองบรรณาธิการ

อาจารย์ ดร.สุกัญญา เพชรศิริเวทย์

กองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.บังอร ฉางทรัพย์

มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ

รองศาสตราจารย์ ดร.ประยูรศักดิ์ เปลื้องผล

มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ

อาจารย์ ดร.สุรีย์พร หอมวิเศษวงศา

มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ

อาจารย์ ดร.ชัชวาลย์ ช่างทำ

มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ

อาจารย์ ดร.นพมาศ อัครจันทโชติ

มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ

ศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ สุขสำราญ

มหาวิทยาลัยรามคำแหง

ศาสตราจารย์ ดร.ศิริรัตน์ เร่งพิพัฒน์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศาสตราจารย์ ดร.อรรพวรรณ ชัยลภากุล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศาสตราจารย์ ดร.พีรพรรณ ตันอารีย์

มหาวิทยาลัยมหิดล

ศาสตราจารย์ ดร.โกสุม จันทศิริ

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ศาสตราจารย์ ดร.อรษา สุตเธียรกุล

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ศาสตราจารย์ ดร.วราวุฒิ ครูส่ง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ศาสตราจารย์ ดร.วิไล รังสาดทอง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



รองศาสตราจารย์ ดร.วิมลยุตต์ วรรณสว่าง
รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ ภาวนันต์
รองศาสตราจารย์ ดร.จันทร์เพ็ญ วิวัฒน์
รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจภรณ์ ประภักดี
รองศาสตราจารย์ ดร.สิริธร สโมสร
รองศาสตราจารย์ ดร.สมฤดี สายหยุดทอง
รองศาสตราจารย์ ดร.มาลินี พงศ์เสวี
รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติพงศ์ ไชยนอก
รองศาสตราจารย์ ดร.จันทนา จันทราพรชัย
รองศาสตราจารย์ ดร.สุธาทิพย์ ศิริไพศาลพัฒน์
รองศาสตราจารย์ ดร.วราภา มหากาญจนกุล
รองศาสตราจารย์ ดร.ธิดิมา รุกขไชยศิริกุล
รองศาสตราจารย์ ดร.อุดมศิลป์ ปิ่นสุข
รองศาสตราจารย์ นพ.สมพล สงวนรังศิริกุล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชาดา จูอนุวัฒนกุล

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
สถาบันวิทยสิริเมธี
มหาวิทยาลัยมหิดล
มหาวิทยาลัยมหิดล
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
มหาวิทยาลัยรามคำแหง
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ฝ่ายพิสูจน์อักษรและตรวจการเขียนรายการอ้างอิง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัญชลี ชุ่มบัวทอง
อาจารย์ ดร.นพมาศ อัครจันทโชติ
อาจารย์ยุคลธร สถาปนศิริ

อาจารย์ ดร.สุรีย์พร หอมวิเศษวงศา
อาจารย์ ดร.สุกัญญา เพชรศิริเวทย์
อาจารย์ภัททิศา เลิศจริยพร

ฝ่ายเว็บไซต์และศิลปกรรมวารสาร

คุณอาคม สิมโสม

ฝ่ายการเงิน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรสิริ วนรวิภาล

คุณโสภี บุญทรัพย์

ฝ่ายสมาชิการสารและประชาสัมพันธ์

อาจารย์ตติภรณ์ ภัทรานุรักษ์โยธิน

เลขานุการกองบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กรรณิการ์ แก้วกิม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์จันเพ็ญ บางสำรวจ

อาจารย์ยุคลธร สถาปนศิริ

บทความในวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หัวใจเฉียวเฉลิมพระเกียรติเป็นความคิดเห็นของผู้เขียนโดยเฉพาะ
กองบรรณาธิการไม่มีส่วนกับความคิดเห็นในข้อเขียนเหล่านั้น



รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิกลั่นกรองบทความ (peer review)

ผู้ทรงคุณวุฒิกลั่นกรองบทความภายนอก

รองศาสตราจารย์ ดร.ศานต์ เศรษฐชัยมงคล	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ ดร.บุษราภรณ์ งามปัญญา	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.เกษรา รักษ์พงษ์ศิริ	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.วิยะดา มงคลธนารักษ์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.จันทิมา งามเงิน	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.สุทธิรัตน์ สิทธิศักดิ์	มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.พนมขวัญ ริยะมงคล	มหาวิทยาลัยนเรศวร
รองศาสตราจารย์ ดร.อริชัญญ์ กุมพล	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ ดร.รัชฎาพร อุ่นศิริไธย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.รัชฎาพร โชคชัยศิริ	มหาวิทยาลัยพะเยา
รองศาสตราจารย์ ดร.ณัฐินี ดีแท้	มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม
รองศาสตราจารย์ ดร.กฤษณพงศ์ สมสุข	มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ผกากรอง ทองดียิ่ง	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศนิ จิระสถิต	มหาวิทยาลัยบูรพา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประจักษ์ จิตเงินมะตัน	มหาวิทยาลัยบูรพา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุวรรณา เสมศรี	มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรัญ แสนราช	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณภัฏจันทร์ ด่านสวัสดิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาวิณี อารีศรีสม	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นุชนาถ แซ่มซ้อย	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เนาวรัตน์ ธาราทรัพย์	มหาวิทยาลัยรังสิต
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภรณ์ แดนดี	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ กานต์ลินญา บุญที	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ นิสา ไกรรักษ์	มหาวิทยาลัยบูรพา

ผู้ทรงคุณวุฒิกลั่นกรองบทความภายใน

อาจารย์ ดร.อลิษา สุนทรวัฒน์	ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุธีรา พิงสวัสดิ์
-----------------------------	--------------------------------------



บรรณาธิการแถลง

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ ในฐานะเป็นสื่อกลางสำคัญในการแลกเปลี่ยนความรู้ทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี รวมทั้งเผยแพร่บทความวิจัย บทความวิชาการของคณาจารย์ นักศึกษา นักวิจัย และนักวิชาการ เพื่อก่อให้เกิดการสร้างสรรคผลงานวิชาการทั้งทางด้านการศึกษาและการวิจัยให้ก้าวหน้าต่อไป วารสารฉบับนี้เป็นฉบับที่ 1 ของปี พ.ศ. 2569 (มกราคม - มิถุนายน) ซึ่งเป็นปีที่ 12 ของการดำเนินงานวารสาร มีจำนวนบทความวิจัยทั้งหมด 10 เรื่อง ซึ่งบทความเหล่านี้ได้ผ่านกระบวนการกลั่นกรองทางวิชาการจากผู้ทรงคุณวุฒิจำนวน 3 ท่าน ในแต่ละสาขาวิชาอย่างน้อยหนึ่งๆ เพื่อให้ได้คุณภาพและถูกต้องทางวิชาการ ตามเกณฑ์มาตรฐานของศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (Thai Journal Citation Index-TCI) โดยวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ ได้ผ่านการรับรองคุณภาพอยู่ในฐานข้อมูล TCI กลุ่มที่ 1 จากการประเมินคุณภาพวารสารวิชาการที่อยู่ในฐานข้อมูล TCI รอบที่ 5 พ.ศ. 2568-2572

กองบรรณาธิการวารสารจะยังคงรักษาคุณภาพและมาตรฐานของวารสาร โดยปรับปรุงการดำเนินงานของกองบรรณาธิการวารสารในทุกฝ่าย เพื่อให้สอดคล้องกับเกณฑ์การประเมินคุณภาพวารสารวิชาการที่อยู่ในฐานข้อมูล TCI โดยเฉพาะอย่างยิ่งบทความทุกบทความจะต้องผ่านการพิจารณาโดยผู้ทรงคุณวุฒิในการประเมินบทความ (Peer-review) ตรวจสอบบทความอย่างน้อย 3 ท่าน โดยไม่อยู่ในสังกัดเดียวกับผู้วิจัย วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ ได้รับความร่วมมือเป็นอย่างดีจากผู้ทรงคุณวุฒิที่กรุณาให้ข้อคิดเห็นและข้อเสนอแนะที่เป็นประโยชน์เพื่อควบคุมคุณภาพบทความของวารสารให้ได้มาตรฐานระดับสูง รวมทั้งผู้เขียนบทความในการแก้ไขบทความจนสำเร็จได้ด้วยดี จึงขอขอบคุณเป็นอย่างสูงมา ณ โอกาสนี้

กองบรรณาธิการหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวารสารฉบับนี้จะก่อให้เกิดประโยชน์ต่อผู้อ่านและผู้สนใจ เพื่อนำประโยชน์ไปใช้ในการอ้างอิง พัฒนางานวิจัย ตลอดจนสามารถนำมาปรับปรุงเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในชีวิตประจำวัน ทั้งนี้กองบรรณาธิการใคร่ขอเชิญชวนท่านผู้สนใจส่งบทความมาตีพิมพ์ที่วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ โดยสามารถส่งต้นฉบับตามรายละเอียดในท้ายเล่มนี้ หวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะได้รับความอนุเคราะห์จากท่าน ขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรสิริ วนรัฐกาล

บรรณาธิการวารสาร



สารบัญ

บทความวิจัย

- การพัฒนาเจลต้านการอักเสบจากสารสกัดไพลและดีปลี..... 1
Development of an Anti-inflammatory Gel of *Zingiber cassumunar* Roxb and *Piper retrofractum* Extracts
นิภาพร ไทยพัฒน์กิจ สายสุตา แสงกล้า ปิยวดี คำสวัสดิ์ พรรณนิภา แจ็กแดงพะเนาว์ จตุพร ประทุมเทศ
รัชฎาวรรณ อรรถนิมาตย์ และ ปราณี ศรีราช
- การพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มสมุนไพรเสริมสุขภาพสำหรับรับประทานในรูปแบบผงสกัดขงดื่ม: การศึกษาเชิงคุณภาพ..... 15
และการเก็บรักษา
Development of Lanna Health Supplement Herbal Drink Recipe in Instant Extract Powder Form: A Qualitative Study and Preservation
ทวีศักดิ์ หลีแก้วสาย จักรกฤษณ์ คณารีย์ วณิชชา ปันฟ้า พรพรรณ มณีวรรณ พรหทัย พุทธรวัน และ สมฤทัย ยังวรรณ
- การเปรียบเทียบข้อมูลเมตาโบโลมิกส์แบบไม่เจาะจงและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของชำแดงและชำหลวงที่ปลูก..... 31
ในจังหวัดสมุทรปราการ
Comparative Untargeted Metabolomics and Antioxidant Activities of *Alpinia siamensis* K. Schum. and *Alpinia galanga* (L.) Willd. Cultivated in Samut Prakan Province
ศรมณ สุทิน กรณิการ์ แก้วกิม ปิยนันท์ น้อยรอด และ กฤษกมล ณ จอม
- ผลของน้ำชาต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของหัวใจในหนูแรทเพศผู้..... 47
The Effect of Galangal (*Alpinia galanga*) Decoction on Cardiac Structural Changes in Male Rats
จันเพ็ญ บางสำรวง ทิพวรรณ นนทะน้า ศศิกันต์ เลิศนา สุภานัน พรเจริญ สุราษฎร์ สมพินิจ และ ระพีพันธุ์ ศิริเดช
- ผลกระทบของ pH ต่อการสังเคราะห์ลิแวนจาก *Bacillus siamensis* ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบกะ..... 59
The effect of pH on levan synthesis from *Bacillus siamensis* using batch bio-reactor
วิหวัศ แจ้งเอี่ยม สุภัค นาคทองคำ พงษ์ธร เพ็งน้อย ศุภศิลป์ ทวีศักดิ์ และโกสินทร์ ทีปักษ์พันธ์
- การพัฒนาสูตรไอศกรีมกล้วยหอมทองลดไขมันโดยใช้อินูลินเป็นสารทดแทนไขมัน..... 68
Development of a Reduced-Fat Hom Thong Banana Ice Cream Product using Inulin as a Fat Replacer
เพ็ญศิริ คงสิทธิ์
- Assessment of Fungal Bioaerosols in Indoor and Outdoor Air Conditions of Child Development..... 84
Centers of the Local Government in Northeast Thailand
Chontichar Jinapon, Pornchanok Boonlub, Patcharee Pansa, Bunliang Suphim, Napatsorn Wongpriaw, and Piyapong Choomsri
- การศึกษาเปรียบเทียบสถาปัตยกรรม YOLO สำหรับการตรวจจับข้อบกพร่องบนรอยเชื่อมที่ซับซ้อนภายใต้..... 96
ความกำกวมของป้ายกำกับ
Comparative Study of YOLO Architectures for Detecting Complex Weld Defects under Label Ambiguity
สุรเทพ แป้นเกิด และ ปิยะพงษ์ คำคุณ



- การตรวจจับพฤติกรรมผิดปกติของเหตุการณ์การเข้าถึงไฟล์บนระบบคลาวด์แบบเรียลไทม์..... 109
โดยใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องแบบสตรีม
Real-Time Anomaly Detection of Cloud File Access Events Using Streaming Machine Learning
Techniques
พงษ์พิชญ์ เลิศเจริญวุฒา เสกสรรค์ ศิวาลัย และ ธงรบ อักษร
- การพยากรณ์ปริมาณน้ำฝนรายเดือนในจังหวัดแพร่โดยวิธีทางสถิติ..... 120
Monthly Rainfall Forecasting in Phrae Province Using Statistical Methods
ยุทธชัย มิ่งขวัญ



การพัฒนาเจลต้านการอักเสบจากสารสกัดไพลและติปลี

Development of an Anti-inflammatory Gel of *Zingiber cassumunar* Roxb and *Piper retrofractum* Extractsนิภาพร ไทยพัฒน์กิจ¹ สายสุดา แสงกล้า¹ ปิยวดี คำสวัสดิ์² พรรณนิภา แจกแต่งพะเนา³จตุพร ประทุมเทศ¹ รัชฎาวรรณ อรรถนิมิต¹ และ ปราณี ศรีราช^{1*}¹สาขาวิชาแพทย์แผนไทย คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร

สกลนคร 47160

²กลุ่มงานการแพทย์แผนไทยและการแพทย์ทางเลือก โรงพยาบาลห้วยเกิ้ง อุดรธานี 41110³สาขาวิชาแพทย์แผนไทย คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏสุรินทร์ สุรินทร์ 33000

Nipaporn Thaipattanakit¹, Saisuda Saengkla¹, Piyawadee Khamsawat²,
Phannipha Chekdaengphanao³, Jatuporn Prathumtet¹, Ratchadawan Aukkanimart¹
and Pranee Sriraj^{1*}

¹Department of Traditional Medicine Faculty of Natural Resources Rajamangala University of
Technology ISAN Sakonnakhon Campus, Sakonnakhon 47160

²Thai Traditional and Alternative Medicine, Huaikoeng Hospital, Udon Thani Province, 41110

³Department of Thai Traditional Medicine, Faculty of Public Health, Surindra Rajabhat University,
Surin Province, 33000

*Corresponding author: pranee.si@rmuti.ac.th

Received: 4 October 2025/ Revised: 12 January 2026/ Accepted: 16 January 2026

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสารสำคัญ ฤทธิ์ทางชีวภาพ และพัฒนาเจลสมุนไพรรักษาแผลจากสารสกัดเหง้าไพล (*Zingiber cassumunar* Roxb.) และสารสกัดผลติปลี (*Piper retrofractum* Vahl.) มีการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GC-MS) พบว่าสารสกัดเหง้าไพลมีสาร (E)-4-(3,4-Dimethoxyphenyl)but-3-en-1-ol อยู่ในกลุ่มฟีนอลบิวทิโนยด์ ส่วนสารสกัดผลติปลีมีสาร Piperine อยู่ในกลุ่มอัลคาลอยด์ ซึ่งมีฤทธิ์ต้านการอักเสบ การทดสอบปริมาณสารสำคัญพบว่า สารสกัดเหง้าไพลมีค่าปริมาณสารฟีนอลิกรวมและสารฟลาโวนอยด์รวมสูงสุด 185.95 ± 23.29 mg GAE/g และ 217.80 ± 30.53 mg QCE/g ตามลำดับ ผลการทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ด้วยวิธีการทดสอบการกำจัดอนุมูลอิสระ DPPH และ ABTS พบว่าสารสกัดผลติปลีมีค่า IC_{50} เท่ากับ 109.04 ± 2.33 และ 102.61 ± 0.50 μ g/mL ตามลำดับ ขณะที่สารสกัดเหง้าไพลมีค่าการทดสอบความสามารถในการรีดิวซ์เหล็กด้วยวิธี FRAP สูงสุด 519.24 ± 10.47 mM Fe^{2+} /mg การทดสอบฤทธิ์ต้านการอักเสบพบว่าสารสกัดผลติปลีมีค่า IC_{50} ต่ำที่สุด 12.89 ± 0.61 μ g/mL สำหรับเจลสมุนไพรรักษาแผล 3 สูตร พบว่าเจลสารสกัดผลติปลีมีประสิทธิภาพกำจัด NO สูงสุด ทั้งก่อนและหลังการทดสอบความคงตัว ($IC_{50} = 16.18 \pm 1.02$ และ 15.05 ± 1.41 μ g/mL, $P > 0.05$) การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าสารสกัดผลติปลีมีศักยภาพในการต้านการ

อักเสบที่ดี และสารสกัดผสมไพลและติปลีทำให้มีฤทธิ์ด้านการอักเสบที่ดีขึ้นจากสารสกัดเหง้าไพลเดี่ยว จึงสามารถพัฒนาเป็นเจลสมุนไพรใช้ภายนอกเพื่อบรรเทาการอักเสบ รวมถึงเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการวิจัยทางคลินิกในอนาคต

คำสำคัญ: ไพล ติปลี ต้านอนุมูลอิสระ ด้านการอักเสบ เจลสมุนไพร

Abstract

This study aimed to identify bioactive compounds, evaluate biological activities, and develop herbal gels from crude extracts of *Zingiber cassumunar* Roxb. and *Piper retrofractum* Vahl. GC-MS analysis revealed that *Z. cassumunar* contained (E)-4-(3,4-Dimethoxyphenyl) but-3-en-1-ol(phenylbutenoid), while *P. retrofractum* contained piperine (alkaloid), both associated with anti-inflammatory activity. Phytochemical analysis showed that *Z. cassumunar* exhibited the highest total phenolic content (185.95 ± 23.29 mg GAE/g) and total flavonoid content (217.80 ± 30.53 mg QCE/g). Antioxidant assays indicated strong radical scavenging activity of *P. retrofractum* with IC_{50} values of 109.04 ± 2.33 μ g/mL (DPPH) and 102.61 ± 0.50 μ g/mL (ABTS), whereas *Z. cassumunar* had the highest reducing power (FRAP: 519.24 ± 10.47 mM Fe^{2+} /mg). Anti-inflammatory evaluation revealed that *P. retrofractum* had the lowest IC_{50} (12.89 ± 0.61 μ g/mL). Among three herbal gel formulations, the *P. retrofractum*-based gel demonstrated the strongest nitric oxide inhibition, maintaining stability after six heating-cooling cycles ($IC_{50} = 16.18 \pm 1.02$ and 15.05 ± 1.41 μ g/mL, $P > 0.05$). This study demonstrates that *P. retrofractum* fruit extract possesses strong anti-inflammatory potential. Moreover, a combined extract of *Z. cassumunar* and *P. retrofractum* produced enhanced anti-inflammatory activity compared with the *Z. cassumunar* extract alone. These findings suggest that the mixed herbal extract can be further developed into a topical herbal gel for external use to help alleviate inflammation. This study provides a foundation for future clinical research on herbal-based anti-inflammatory therapies.

Keywords: *Zingiber cassumunar* Roxb., *Piper retrofractum* Vahl., Antioxidant, Anti-inflammatory, Herbal gel

บทนำ

การอักเสบ (inflammation) มีสาเหตุจากกระบวนการทางสรีรวิทยาและพยาธิวิทยาที่หลากหลาย เป็นการตอบสนองทางภูมิคุ้มกันที่จำเป็นซึ่งช่วยให้สามารถมีชีวิตอยู่รอดได้ในระหว่างการติดเชื้อหรือการบาดเจ็บ [1] ทำให้เกิดการหลั่งของสารสื่อกลางในการอักเสบชนิดต่าง ๆ รวมทั้งไนตริกออกไซด์ (Nitric oxide) และโพรสตาแกลนดิน E2 (Prostaglandins E2) กระบวนการอักเสบแบ่งได้ 2 ชนิด คือ การอักเสบเฉียบพลัน (Acute Inflammation) และการอักเสบเรื้อรัง (Chronic Inflammation) ลักษณะเฉพาะของการอักเสบเฉียบพลัน จะพบเซลล์เม็ดเลือดขาวและเซลล์แมโครฟาจ ลักษณะทางคลินิกของการอักเสบโดยเฉพาะการอักเสบแบบเฉียบพลันในระดับเนื้อเยื่อการอักเสบจะมีลักษณะ ดังนี้ ปวด บวม แดง และร้อน [2] ไนตริกออกไซด์ (Nitric oxide; NO) เป็นโมเลกุลส่งสัญญาณภายในเซลล์และระหว่างเซลล์ที่สำคัญ มีความเกี่ยวข้องกับการตอบสนองทางภูมิคุ้มกันและการอักเสบ [3] นอกจากนี้ไนตริกออกไซด์ปริมาณมากในสภาวะอักเสบยังเหนี่ยวนำปฏิกิริยาที่เป็นพิษต่อเนื้อเยื่อต่าง ๆ ของร่างกาย [4] กระบวนการสร้างไนตริกออกไซด์ (Nitric oxide) สร้างจาก L-arginine โดยอาศัยการทำงานของเอนไซม์ Nitric Oxide Synthetase (NOS) ทำปฏิกิริยา deamination โดย NO ที่สร้างขึ้นจากกระบวนการดังกล่าวมีความสัมพันธ์กับการเกิดพยาธิสภาพของการอักเสบ NO ที่เพิ่มมากกว่าปกติจะทำปฏิกิริยากับ Superoxide anion radical ($O_2^{\bullet-}$) เกิดเป็น Peroxynitrite (ONOO-) ที่มีฤทธิ์รุนแรงฆ่าจุลชีพได้และยังสามารถทำลายเซลล์เนื้อเยื่อบริเวณที่เกิดการบาดเจ็บทำให้เกิดการอักเสบเพิ่มมากขึ้น [5] ดังนั้นการยับยั้งการทำงานของ NO นับเป็นแนวทางสำคัญในการควบคุมและบรรเทาการอักเสบ [6]



ในปัจจุบันโรคระบบกล้ามเนื้อเป็นปัญหาที่สำคัญทางด้านสุขภาพอีกประการหนึ่งของมนุษย์ คุณภาพชีวิตในผู้ใหญ่ของผู้ป่วยโรคกล้ามเนื้อลดลง มีความรุนแรงและการทำงานของโรคมีความสัมพันธ์อย่างมากกับการทำงานทางกายภาพและทางสังคม [7] มีรายงานอัตราผู้ป่วยนอกตามกลุ่มสาเหตุการป่วยกลุ่มโรคระบบกล้ามเนื้อเป็นอันดับ 3 ของประเทศไทย อาการปวดและอักเสบของกล้ามเนื้อและข้อ พบได้ประมาณร้อยละ 47 ของประชากร [8] ยาในการรักษาอาการเรื้อรังนี้ โดยทั่วไปมีการใช้ยาแก้ปวดเฉพาะที่ในรูปแบบยาแผนปัจจุบัน ยาสเตียรอยด์และยาที่ไม่ใช่สเตียรอยด์ เช่น ยาปฏิชีวนะ มักใช้ในการรักษาโรคอักเสบ ยาสังเคราะห์เหล่านี้มีผลข้างเคียงต่อสุขภาพมากมาย เช่น ปัญหาทางเดินอาหาร เกิดแผลในกระเพาะอาหาร [9] มีปัญหาดับหรือโต หรืออาจเกิดการแพ้ยาได้ เป็นต้น [10] และในทางการรักษาด้วยศาสตร์ทางการแพทย์แผนไทย นอกจากการนวดรักษา ประคบสมุนไพร หรือรับประทานยาสมุนไพรเพื่อลดอาการอักเสบ มีการใช้ครีมไหล [11] ลูกประคบที่มีส่วนผสมของกระท่อม [12] ตำรับยาสมุนไพรใช้ภายนอกลดอาการปวดถือได้ว่าได้รับความนิยมเป็นอย่างสูง

จากสรรพคุณของพืชสมุนไพรไทยที่ได้กล่าวมาข้างต้นในงานวิจัยนี้ได้สนใจทำการศึกษาสมุนไพรสองชนิดได้แก่ ไพล (*Zingiber cassumunar* Roxb.) และติปลี (*Piper retrofractum* Vahl.) ไพล เป็นพืชสมุนไพรที่สำคัญ ใช้รักษาอาการอักเสบ ปวด และปัญหาเกี่ยวกับระบบทางเดินหายใจ เนื่องจากเหง้าไพลที่นำมาใช้ทางการแพทย์ มีองค์ประกอบที่มีคุณสมบัติในการรักษา โดยไพลมีสารสำคัญหลัก ได้แก่ (E)-(3,4-dimethoxyphenyl)butadiene (DMPBD), (E)-1-(3,4-dimethoxyphenyl)but-3-en-1-ol (compound D), และ (E)-1-(3,4-dimethoxyphenyl)but-3-en-1-yl acetate (compound D acetate) อยู่ในกลุ่มฟีนอลบิวทีนอยด์ (Phenylbutenoids) และเคอร์คูมินอยด์ (Curcumin) [13] ในตำราสรรพคุณยาไทยรายงานว่าไพลมีรสเผ็ดร้อน ใช้ภายนอกโดยการทาถูลดอาการปวดกล้ามเนื้อและแก้เคล็ดขัดยอก การศึกษาพบว่าไพลมีสารกลุ่มมอโนเทอร์พีน (Monoterpene) เป็นหลัก ได้แก่ sabinene และ terpinen-4-ol [14] นอกจากนี้ไพลยังมีสารสีเหลืองเคอร์คูมิน (Curcumin) ที่มีฤทธิ์ด้านการอักเสบ ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ฤทธิ์รักษาแผลในกระเพาะอาหาร [15] ในขณะที่สรรพคุณทางการแพทย์แผนไทยของติปลี ตามตำรายาไทยพบว่า ผล มีรสเผ็ดร้อน นิยมใช้เป็นเครื่องเทศ เนื่องจากมีกลิ่นหอมฉุน บำรุงธาตุ ขับลมในลำไส้ ระบบย่อยอาหารทำงานได้ดีขึ้น ทำให้เจริญอาหาร [15] มีรายงานการศึกษาพบว่า น้ำมันหอมระเหยจากผลพบสารอัลคาลอยด์ (alkaloids) คือ ไพเพอรีน (piperine) เป็นสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพหลักซึ่งมีผลระงับปวด มีฤทธิ์ด้านการอักเสบ ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ด้านอาการซึมเศร้า กระตุ้นภูมิคุ้มกัน ด้านท้องเสีย และด้านพิษต่อตับ เป็นต้น [16]

จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ได้มีการศึกษาฤทธิ์ของสารสกัด แม้ในปัจจุบันจะมีผลิตภัณฑ์ไพลในรูปแบบครีมและมีรายงานการพัฒนาเจลไพลมาก่อน แต่ยังไม่มียาตำรับที่มุ่งพัฒนาสูตรผสมไพลร่วมกับติปลีในรูปแบบเจล เพื่อยกระดับฤทธิ์ทางเภสัชวิทยาให้เหมาะสมกับการใช้ภายนอก งานวิจัยนี้จึงนำสมุนไพรทั้ง 2 ชนิดมารวมกันเพื่อศึกษาฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ด้านการอักเสบในหลอดทดลอง และพัฒนาไปเป็นผลิตภัณฑ์ต้นแบบ “เจลด้านการอักเสบ” ซึ่งมีข้อดีด้านความสะดวกต่อการใช้งาน ช่วยให้สารออกฤทธิ์ตรงตำแหน่ง ลดการฟุ้งกระจายและอาการข้างเคียงของยาแผนปัจจุบัน รวมทั้งเป็นข้อมูลพื้นฐานสำคัญสำหรับการต่อยอดสู่การนำไปศึกษาทางคลินิกและการพัฒนาเชิงผลิตภัณฑ์ในอนาคตต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การสกัดสาร

นำสมุนไพร 2 ชนิด ได้แก่ เหง้าไพลและผลติปลี ได้จากร้านสมุนไพรท่าพระจันทร์ แขวงบางจาก เขตภาษีเจริญ กรุงเทพมหานคร เมื่อเดือน มกราคม พ.ศ. 2568 นำสมุนไพรแห้งไปบดให้ละเอียด แล้วชั่งสมุนไพรหัวแต่ละชนิด 3,000 g มาสกัดโดยใช้ 95% เอทานอล (Chemipan Corporation Co., Ltd., Thailand) เป็นตัวทำละลาย ในอัตราส่วน 1:2 คือสมุนไพร 1 ส่วน และเอทานอลอีก 2 ส่วน หมักทิ้งไว้เป็นเวลา 3 วัน แล้วกรองด้วยกระดาษ Whatman No.1 (CAT NO.1001-110, GE Healthcare Life Sciences, Thailand) นำส่วนของสารละลายที่ได้ไประเหยตัวทำละลายออกด้วยเครื่องระเหย Rotary Evaporator (SIAM INTERCORP CO., Ltd., Thailand) จนตัวทำละลายแห้งสนิทและเก็บไว้ที่อุณหภูมิ -20 องศาเซลเซียส จนกว่าจะนำมาทดสอบ

2. การวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีของสารสกัดเหง้าไพลและผลติปลี

การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสารสกัดเหง้าไพลและสารสกัดผลติปลีด้วยเทคนิค Gas Chromatography-Mass Spectrometry (GCMS-QP2020 Ultra, Shimadzu, Japan) เตรียมตัวอย่างสำหรับนำไปวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี โดยเตรียมสารสกัดความเข้มข้น $1 \mu\text{g/mL}$ ในเอทานอลผสมให้เข้ากัน จากนั้นเติม Sodium sulfate ปริมาตร 0.1 g นำไปเขย่าให้เข้ากันด้วยเครื่อง Vortex นาน 30 นาที แล้วนำไปกรองด้วย ไซริงค์ฟิลเตอร์ (Syringe Filter) ขนาด $0.45 \mu\text{m}$ จะได้ส่วนใสที่กรองได้ของสารสกัดนำไปวิเคราะห์ ส่วนของ GC ใช้การฉีดที่ปริมาตร $1 \mu\text{L}$ (split ratio เท่ากับ 5:1) โดยตั้งอุณหภูมิส่วนที่ฉีดสาร 250 องศาเซลเซียส ใช้คอลัมน์ คือ SH-Rtx-5MS capillary column ($30 \text{ m} \times 0.25 \text{ mm} \times 0.25 \mu\text{m}$) ตั้งอัตราการไหลของก๊าซฮีเลียมเข้าคอลัมน์เป็น 1.36 mL/min ส่วนอุณหภูมิคอลัมน์จะตั้งโปรแกรมโดยใช้อุณหภูมิเริ่มต้น 60 องศาเซลเซียส นาน 1 นาที จากนั้นเพิ่มขึ้นด้วยอัตราเร็ว 3 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส นาน 5 นาที แล้วเพิ่มขึ้นด้วยอัตราเร็ว 5 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส นาน 5 นาที ปรับอัตราเร็วเป็น 3 องศาเซลเซียสต่อนาที จนถึงอุณหภูมิ 260 องศาเซลเซียส ส่วนของ MS เป็น MS Quadrupole (mass selective detector) ที่ต่อกับ GC โดยตรง ใช้ ionization voltage เป็น 70 อิเล็กตรอนโวลต์ และอุณหภูมิของ ion source เป็น 280 องศาเซลเซียส ในระบบ Electron Impact Ionization (EI) โดยให้ผลแยกองค์ประกอบของสารสกัดเหง้าไพลและสารสกัดผลติปลีเป็น Total Ion Chromatogram (TIC) ในระบบ Scan Mode ใช้ช่วงของ Mass 35-400 AMU (Atomic Mass Unit) วิเคราะห์โครงสร้างทางเคมีของสารสกัดโดยการเปรียบเทียบค่า Retention time และ Mass spectrum กับค่ามาตรฐานที่มีใน NIST1 library database ที่มากกว่าหรือเท่ากับ 80% Quality match [17]

การวิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวม (Total Phenolic content; TPC) โดยใช้วิธี Folin-Ciocalteu colorimetric ใช้สารละลาย gallic acid (Cas No.50-81-7, RANKEM™, India) เป็นสารละลายมาตรฐาน โดยเตรียมสารมาตรฐาน gallic acid ที่ความเข้มข้น 7.8, 15.6, 31.25, 62.5, 125, 250 $\mu\text{g/mL}$ และเตรียมสารสกัด 1 mg/mL ปริมาตร $20 \mu\text{L}$ เติมนลงใน 96-Well plates เตรียมสาร Folin-Ciocalteu reagent (Loba Chemie, India) ปริมาตร $100 \mu\text{L}$ ผสมให้เข้ากัน จากนั้นเติม 75% (w/v) Sodium carbonate (Na_2CO_3) (Loba Chemie, India) ปริมาตร $80 \mu\text{L}$ ลงใน 96-Well plates โดยแต่ละหลุมจะมีปริมาตรของสารรวมทั้งหมด $200 \mu\text{L}$ ผสมให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ในที่มืดที่อุณหภูมิห้อง 30 นาที นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 700 nm ด้วยเครื่อง Microplate reader (Infinite® 200 pro, Tecan, Switzerland) บันทึกและวิเคราะห์ผล ทดลองซ้ำ 3 ครั้ง รายงานผลเป็นหน่วยมิลลิกรัมสมมูลกับกรดแกลลิกต่อกรัมของสารสกัดแห้ง ($\text{mg GAE/g dry extract}$) [18]

การวิเคราะห์หาปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์รวม (Total flavonoid content) โดยใช้สาร Quercetin (Sigma-Aldrich, USA) เป็นสารมาตรฐาน มีขั้นตอนโดยเตรียมสารสกัดที่ความเข้มข้น $1 \mu\text{g/mL}$ ปริมาตร $5 \mu\text{L}$ เติมนลงใน 96-Well plate จากนั้นเติมน้ำกลั่นปริมาตร $130 \mu\text{L}$ และ 5% Sodium nitrite (NaNO_2) (Loba Chemie, India) ปริมาตร $7.5 \mu\text{L}$ บ่มไว้ในที่มืด 5 นาที ครบเวลาเติม 10% Aluminum chloride (AlCl_3) (Loba Chemie, India) ปริมาตร $7.5 \mu\text{L}$ และบ่มไว้ในที่มืด 5 นาที ครบเวลา เติมน้ำกลั่น Sodium hydroxide (NaOH) (QReC, Newzealand) ที่ความเข้มข้น 1 M ปริมาตร $50 \mu\text{L}$ เติมนลงใน 96-Well plate โดยแต่ละหลุมจะมีปริมาณของสารรวมทั้งหมด $200 \mu\text{L}$ นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 510 nm ด้วยเครื่อง Microplate reader บันทึกและวิเคราะห์ผล ทดลองซ้ำ 3 ครั้ง โดยรายงานค่าในหน่วยมิลลิกรัมสมมูลของเคอซีตินต่อกรัมสารสกัด ($\text{mg QCE/g crude extract}$) [18]

3. การวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH assay, ABTS assay และ FRAP assay

การทดสอบฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH

เป็นการทดสอบเพื่อวัดค่าความเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ โดย DPPH จะไปทำปฏิกิริยากับสารต้านอนุมูลอิสระภายใน 10 – 30 นาที ซึ่งสารต้านอนุมูลอิสระที่ใช้เป็น positive control คือ กรดแอสคอร์บิก (Ascorbic acid) (Cas No. 30931-67-O, SIGMA-ALDRICH, USA) นิยมรายงานผลเป็นค่า IC_{50} ซึ่งหมายถึง ความเข้มข้นของสารต้านอนุมูลอิสระ ที่ทำให้ความเข้มข้นของอนุมูลอิสระลดลง 50% โดยมีขั้นตอนดังนี้ เตรียมสารมาตรฐานกรดแอสคอร์บิกที่ความเข้มข้น $25 \mu\text{g/mL}$ โดยใช้



เอทานอล 95 % เป็นตัวทำละลาย จากนั้นเจือจางสารให้ได้ความเข้มข้น 1-20 $\mu\text{g/mL}$ เตรียมตัวอย่างสารสกัดสมุนไพรที่ความเข้มข้น 100 $\mu\text{g/mL}$ โดยใช้เอทานอล 95% เป็นตัวทำละลาย จากนั้นเจือจางสารสกัดให้ได้ความเข้มข้นที่ 2-20 $\mu\text{g/mL}$ เตรียมสารละลาย DPPH ที่ความเข้มข้น 0.2 mM ใช้เอทานอล 95% เป็นตัวทำละลาย เติมสารละลายมาตรฐานกรดแอสคอร์บิกที่ความเข้มข้น 25 $\mu\text{g/mL}$ สารสกัดสมุนไพรที่ความเข้มข้น 100 $\mu\text{g/mL}$ ปริมาตร 100 μL และเติมสารละลาย DPPH ปริมาตร 100 μL ลงใน 96-well plate บ่มไว้ในที่มืดเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 517 nm วัดด้วยเครื่อง Microplate reader บันทึกและวิเคราะห์ผล ทดลองซ้ำ 3 ครั้ง โดยรายงานค่า IC_{50} [19]

การทดสอบฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี ABTS

การทดสอบฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี ABTS เป็นการวิเคราะห์ความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชัน (antioxidant capacity) โดยใช้ reagent คือ 2,2 - Azino-bis (3-ethybenzothiazoline-6-sulfonic acid) เป็น stable radical ใน aqueous solution โดยสารละลายนี้จะมีสีเขียว ก่อนนำไปใช้ทดสอบปฏิกิริยาการต้านอนุมูลอิสระ โดยมีขั้นตอนดังนี้ เตรียมสารละลาย ABTS (Cas No. 30931-67-O, SIGMA-ALDRICH, USA) โดยการชั่งสาร ABTS จำนวน 3.6 mg ละลายในน้ำกลั่น 1 mL เติมสารละลาย Potassium persulfate (QReC, Newzealand) 0.6 mg จากนั้นนำสารละลายทั้ง 2 มาผสมให้เข้ากัน ตั้งทิ้งไว้ในที่มืดที่อุณหภูมิห้อง เป็นเวลา 12-16 ชั่วโมง ก่อนนำไปใช้ เมื่อครบกำหนดเวลา เติมสารละลายที่เตรียมไว้ นำไปเจือจางด้วยน้ำกลั่น 40 mL และนำสารละลาย ABTS มาเจือจางด้วยเอทานอล ให้ได้สารละลายที่มีค่าดูดกลืนแสงในช่วง 0.70 ± 0.02 ที่ความยาวคลื่น 734 nm เตรียมตัวอย่างสารสกัดสมุนไพรและปิเปตต์สารละลายมาตรฐานกรดแอสคอร์บิกที่ความเข้มข้นต่าง ๆ 1-20 $\mu\text{g/mL}$ จากนั้นลงใน 96-Well plates เติมสารละลาย ABTS ปริมาตร 50 μL เติมสารละลาย ABTS ปริมาตร 100 μL บ่มทิ้งไว้ให้เกิดปฏิกิริยาในที่มืดที่อุณหภูมิห้อง 6 นาที ครบกำหนดนำไปอ่านด้วยเครื่อง Microplates reader วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 734 nm ทำการทดลอง 3 ซ้ำในแต่ละตัวอย่าง จากนั้นนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาความเข้มข้นของสารตัวอย่างในการต้านอนุมูลอิสระด้วยค่า IC_{50} ซึ่งหมายถึงความเข้มข้นของสารที่สามารถยับยั้งอนุมูลอิสระได้ 50% โดยใช้กรดแอสคอร์บิกเป็นสารมาตรฐาน (0.0125-0.1 mg/mL) บันทึกและวิเคราะห์ผล ทดลองซ้ำ 3 ครั้ง โดยรายงานค่า IC_{50} [20]

การทดสอบฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี FRAP

การทดสอบฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี FRAP เป็นวิธีการวิเคราะห์ความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชัน โดยอาศัยปฏิกิริยารีดอกซ์ และติดตามการเปลี่ยนแปลงสีของสารประกอบเชิงซ้อน (Fe^{3+} -TPTZ) ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงรูปเป็นสารประกอบเชิงซ้อน (Fe^{2+} -TPTZ) จากสารละลายสีเหลืองจะเปลี่ยนเป็นสารละลายสีน้ำเงินม่วง ปริมาณของ (Fe^{2+} -TPTZ) ที่เกิดขึ้นนี้คือ ความสามารถในการเป็นสารต้านออกซิเดชันที่แสดงออก ในรูป FRAP value เทียบกับสารมาตรฐานของ Ferrous sulfate heptahydrate ($\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$) โดยมีวิธีการดังนี้ เตรียม Acetate buffer ที่ความเข้มข้น 300 mM (pH = 3.6) ปริมาตร 500 mL โดยชั่ง Sodium acetate (QReC, Newzealand) 1.55 g เติม Glacial acid (RCI Labscan, Ireland) 8 mL แล้วเติมน้ำกลั่นให้ครบ 500 mL เตรียมสาร 2,4,6-tripyridyl-striazine (TPTZ) (Acros Organics, Belgium) ที่ความเข้มข้น 10 mM โดยชั่ง TPTZ 31 mL ละลายใน HCl 10 mL (เตรียมก่อนใช้ทุกครั้ง) เตรียมสาร Iron (III) chloride (FeCl_3) (Loba Chemie, India) โดยการชั่ง FeCl_3 จำนวน 54 mg ละลายในน้ำกลั่น 10 mL (เตรียมก่อนใช้ทุกครั้ง) นำสารละลาย Acetate buffer, สารละลาย TPTZ และสารละลาย Iron (III) chloride (FeCl_3) มาผสมกัน (ในอัตราส่วน 10:1:1) เตรียมสาร $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ ที่ความเข้มข้น 10 mM โดยการชั่งสาร $\text{FeSO}_4 \cdot 7\text{H}_2\text{O}$ จำนวน 1.7613 mg เติม 95% ethanol 10 mg โดยเตรียมเป็นความเข้มข้น 25-1,000 $\mu\text{g/mL}$ ทำเป็นกราฟมาตรฐาน นำสารสกัดแห้งโพลีและผลดีปัสที่ละลายใน 95% ethanol ที่ความเข้มข้น 100 $\mu\text{g/mL}$ เติมลงใน 96-Well plates ปริมาตร 20 μg เติมสารละลาย FRAP ปริมาตร 80 μL ตั้งทิ้งไว้ในที่มืดที่อุณหภูมิห้องนาน 4 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 593 nm นำไปอ่านผลด้วยเครื่อง Microplates reader บันทึกผลทดลองซ้ำ 3 ครั้ง จากนั้นนำไปวิเคราะห์หาความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระไปเปรียบเทียบเป็นกราฟมาตรฐาน FeSO_4 [21]

4. การศึกษาผลของสารสกัดเหง้าไพล สารสกัดผลติป्ली และสารสกัดผสมไพลและติป्ली ต่อศักยภาพในการต้านการอักเสบในระดับหลอดทดลอง

เพาะเลี้ยงเซลล์ RAW 264.7 (ATCC No. TIB-71) ซื้อมาจาก American Type Culture Collection (ATCC, Manassas, VA, USA) เพาะเลี้ยงเซลล์ในอาหารเลี้ยงเซลล์ in Dulbecco's modified Eagle's medium (DMEM) ประกอบด้วย L-glutamine, sodium pyruvate, 10% fetal bovine serum (FBS) (Thermo fisher, USA), and 1% antibiotic/antimycotic mixture (Sigma-Aldrich, USA) เลี้ยงที่ 5% CO₂ อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส [22]

ศึกษาความเป็นพิษของสารสกัดต่อเซลล์เพาะเลี้ยงมาโครฟาจ (RAW 264.7) ด้วยวิธี MTT assay การศึกษาความเป็นพิษของสารสกัดต่อเซลล์เพาะเลี้ยงมาโครฟาจ (RAW 264.7) ใช้สาร 3-(4,5-dimethylthiazol-2-yl)-2,5-diphenyltetrazolium bromide (MTT) (Thermo fisher, USA) ด้วยวิธี colorimetric assay เพาะเลี้ยง RAW 264.7 cell (1×10^5 cells/well) เลี้ยงในจานเพาะเลี้ยงเซลล์ 96 well plate ที่มีอาหารเลี้ยงเซลล์ DMEM ปริมาณ 100 μ L/ หลุม เป็นเวลา 24 ชั่วโมง หลังจากครบ 24 ชั่วโมง เปลี่ยนอาหารเลี้ยงเซลล์ชนิดเดิมออก และเปลี่ยนเป็นอาหารเลี้ยงเซลล์ที่มีสารสกัดละลายอยู่ในความเข้มข้นต่าง ๆ กัน (0.1-10,000 μ g/mL) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง กลุ่มควบคุม (vehicle) ได้เติมเฉพาะสาร DMSO (Thermo fisher, USA) (0.5% v/v) ที่ใช้เป็นตัวทำละลายสารสกัด เติมสารละลาย MTT ความเข้มข้น 0.5 mg/mL ปริมาณ 200 μ L นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง จากนั้นดูดอาหารเลี้ยงเซลล์ทิ้งและละลายผลึก formazan ด้วย DMSO จำนวน 200 μ L วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 570 nm โดย Microplate reader บันทึกและวิเคราะห์ผลทำการทดลองซ้ำ 3 ครั้ง โดยรายงานค่า IC₅₀

การศึกษามลของสารสกัดต่อการอักเสบ โดยวัดการยับยั้งการสร้าง Nitric oxide (NO) นำเซลล์มาโครฟาจ (RAW 264.7 cell line) จำนวน 1×10^5 cells/well เลี้ยงในอาหารเลี้ยงเซลล์ DMEM (10% fetal bovine serum (FBS), 1% penicillin-streptomycin) (Thermo fisher, USA) ใน 96 well plates 5% CO₂ บ่มที่ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดูดอาหารเลี้ยงเซลล์ออก 100 μ L จากนั้นเติมสารสกัดที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ (0.1-10,000 μ g/mL) ลงไปหลุมละ 100 μ L นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 2 ชั่วโมง ดูดอาหารเลี้ยงเซลล์ DMEM เก้าออก จากนั้นเติม DMEM ใหม่ที่มี lipopolysaccharide (LPS) (Sigma-Aldrich, USA) 100 μ g/mL ลงไปหลุมละ 100 μ L ยกเว้นหลุม control หลุม control เติม DMEM เท่านั้น บ่มที่ 37 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ดูด supernatant แต่ละหลุมมา 100 μ L ใส่ใน 96-well plates เติม Griess reagent (Promega, USA) หลุมละ 100 μ L วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 nm รายงานค่าปริมาณ NO โดยเทียบกับกราฟมาตรฐาน Sodium nitrite (NaNO₂) ทดสอบ 3 ซ้ำ [22]

5. การพัฒนาเจลสมุนไพรรักษาแผลจากสารสกัดเหง้าไพล สารสกัดผลติป्लीและสารสกัดผสมไพลและติป्ली

ส่วนประกอบของเจลสมุนไพรรักษาแผล ได้แก่ สารสกัดเหง้าไพลและสารสกัดผลติป्ली, Carbopol 940 (Chemipan Corporation Co., Ltd., Thailand), Methyl Paraben (Chemipan Corporation Co., Ltd., Thailand), Propylene Glycol (Chemipan Corporation Co., Ltd., Thailand), Triethanolamine (Phitsanuchemicals, Thailand) และ Distilled Water (From Pharmaceutical Chemistry Laboratory Room) การเตรียมเจลสมุนไพรรักษาแผล แบ่งออกเป็น 3 สูตร โดยมีการกำหนดความเข้มข้นของสารสกัดในตำรับเจล จากค่าความเข้มข้นในการยับยั้ง nitric oxide (IC₅₀) ซึ่งได้จากการศึกษาฤทธิ์ต้านการอักเสบในระดับหลอดทดลอง ซึ่งสารสกัดเหง้าไพล 248.9 mg สารสกัดผลติป्ली 0.015 mg และสารสกัดผสมไพลและติป्ली 102.9 mg ทุกสูตรเตรียม Carbopol 1.5 g ผสมในน้ำกลั่น 94 mL แล้วตีให้เข้ากันประมาณ 30 นาที แล้วปล่อยให้เจลพองตัว เติม Methyl Paraben 0.2 g, Propylene Glycol 5 mL คนให้เข้ากัน ค่อย ๆ เติม Triethanolamine (TEA) เพื่อปรับค่า pH ให้อยู่ระหว่าง 5.0-5.5 จากนั้นเติมสารสกัดเหง้าไพล สารสกัดติป्ली และสารสกัดผสมไพลและติป्लीในตำรับเจลแต่ละสูตร ผสมให้เข้ากันและบรรจุลงในหลอด [23]

การประเมินฤทธิ์ต้านการอักเสบของเจลสมุนไพรรักษาแผล โดยการวิเคราะห์ศักยภาพในการยับยั้งการสร้างไนตริกออกไซด์ ด้วยวิธี Griess method นำเจลสมุนไพรรักษาแผลมาละลายใน DMSO ปริมาตร 1-2 μ L เพื่อให้เจลไม่ข้นหนืดเกินไป จากนั้นปิเปตเจลปริมาตร 20 μ L ใส่ใน 96 well plate จากนั้นเติมโซเดียมไนโตรพรัสไซด์ (Sodium nitroprusside) ความเข้มข้น 10 mM



ปริมาตร 40 μL นำไปบ่มที่อุณหภูมิห้อง นาน 150 นาที แล้วเติม Griess reagent ที่ประกอบด้วย 1% ซัลฟานิลลาไมด์ และ 0.1% เอ็น-(1-แนฟทิล) เอทีลินไดอะมีนไดไฮโดรคลอไรด์ ในอัตราส่วน 1:1 ปริมาตร 100 μL นำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 nm ด้วยเครื่อง Microplate reader ทดสอบ 3 ซ้ำ โดยใช้เจลมาตรฐานที่มีส่วนผสมของ 1% ไดโคลฟีแนค เป็นกลุ่มควบคุมเชิงบวก และ เจลพื้นไม่มีส่วนผสมของสารสกัดเป็นกลุ่มควบคุม ฤทธิ์ด้านการอักเสบจะถูกรายงานเป็นเปอร์เซ็นต์การยับยั้งการสร้าง NO [22]

การประเมินฤทธิ์ด้านการอักเสบของเจลสมุนไพรเมื่อเตรียมเสร็จใหม่ ๆ และหลังจากการประเมินความคงตัวในสภาวะเร่งครบ 6 รอบ (ที่อุณหภูมิ 45 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง และ ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง /1 รอบ) [24]

6. การวิเคราะห์ข้อมูล

ผลการทดลองจะแสดงเป็นค่าเฉลี่ย (Mean) $\pm$ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard deviation, SD) นำมาวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติระหว่างกลุ่มโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-Way ANOVA) และการเปรียบเทียบค่าเปอร์เซ็นต์การยับยั้งของเจลสมุนไพรก่อนและหลังจากการประเมินความคงตัวในสภาวะเร่ง (Heating cooling cycle) โดยใช้สถิติ Paired-sample T-test ที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ $p\text{-value} < 0.05$ ($p < 0.05$) ด้วยโปรแกรม Statistical Package for the Social Science (SPSS) เวอร์ชัน 16.0 และสร้างกราฟโดยใช้โปรแกรม GraphPad Prism V. 10

ผลการวิจัย

1. ผลของการสกัดสาร

การสกัดสมุนไพรเหง้าไพลและผลดีป्ली ด้วยวิธีการหมักในเอทานอลร้อยละ 95 ได้สารสกัดหยาบแต่ละชนิดมีลักษณะทางกายภาพเป็นของเหลวหนืด สารสกัดเหง้าไพลมีสีน้ำตาลเหลือง สารสกัดผลดีป्लीมีสีน้ำตาลเหลืองส้ม พบปริมาณสารสกัดหยาบแตกต่างกันคิดเป็นร้อยละผลผลิต (%yield) มีค่าเท่ากับ 3.07 และ 5.04 ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ร้อยละของผลผลิตของสารสกัดเหง้าไพลและผลดีป्ली

สมุนไพร	น้ำหนักสมุนไพรแห้ง (กรัม)	ปริมาณสารสกัดที่ได้ (กรัม)	%Yield
<i>Zingiber cassumunar</i> Roxb.	3000	92.33	3.07
<i>Piper retrofractum</i> Vahl.	3000	151.32	5.04

2. ผลการวิเคราะห์สารประกอบทางเคมีของสารสกัดเหง้าไพลและสารสกัดผลดีป्ली

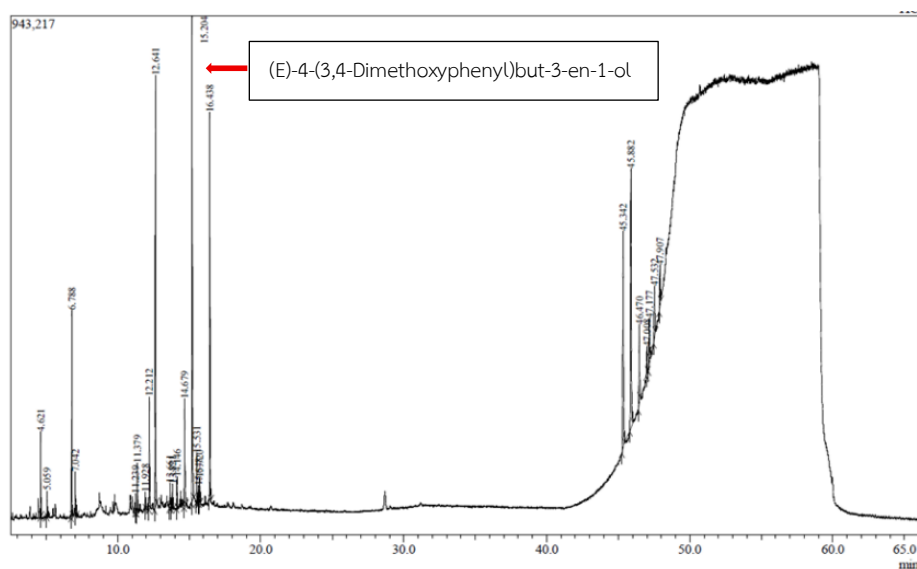
ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของสารสกัดเหง้าไพลและผลดีป्लीด้วยเทคนิค GC-MS พบว่าสารสกัดเหง้าไพลพบสารสำคัญ ได้แก่ (E)-4-(3,4-Dimethoxyphenyl)but-3-en-1-ol มี Retention Time: 15.20 ดังตารางที่ 2 และภาพที่ 1 และสารสกัดผลดีป्ली พบสารสำคัญ ได้แก่ Piperine มี Retention Time: 42.07 ดังตารางที่ 3 และภาพที่ 2

ตารางที่ 2 องค์ประกอบทางเคมีของสารสกัดเหง้าไพลที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GC-MS

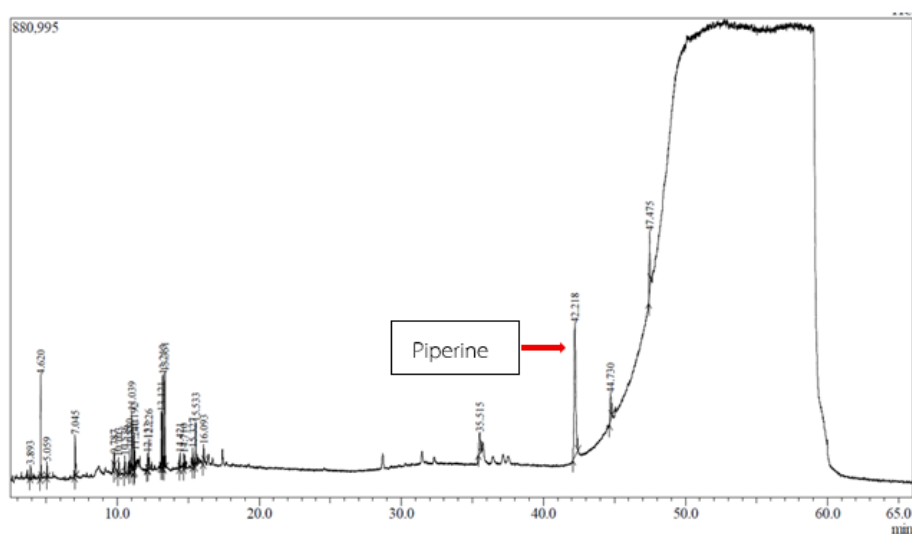
ลำดับ	Retention Time	ชนิดของสารสกัด	%Area	%Height
1	4.621	D-Limonene	1.87	2.96
2	5.059	gamma-Terpinene	0.58	0.91
3	6.745	3-Cyclohexen-1-ol, 4-methyl-1-(1-methyl)	4.92	7.22
4	7.042	Methyl salicylate	1.34	1.49
5	11.239	2,4-Di-tert-butylphenol	0.48	0.66
6	11.379	Cyclohexene, 3-(1,5-dimethyl-4-hexenyl)	1.43	1.71
7	11.928	Benzene, 4-(1E)-1,3-butadien-1-yl-1,2-dimethoxy	0.47	0.59



ลำดับ	Retention Time	ชนิดของสารสกัด	%Area	%Height
8	12.212	(E)-4-(But-1-en-1-yl)-1,2-dimethoxybenzene	3.53	3.90
9	12.641	Benzene, 4-(1E)-1,3-butadien-1-yl-1,2-dimethoxy	12.25	15.08
10	14.146	(E)-1-(2,4,5-Trimethoxyphenyl)but-1-ene	0.82	1.09
11	14.679	(E)-1-(2,4,5-Trimethoxyphenyl)buta-1,3-diene	3.56	3.73
12	15.204	(E)-4-(3,4-Dimethoxyphenyl)but-3-en-1-ol	15.22	16.98
13	15.720	Hexadecanoic acid, methyl ester	0.90	0.88
14	16.438	(E)-4-(3,4-Dimethoxyphenyl)but-3-en-1-yl acetate	11.64	13.52
15	45.342	trans-3-(3,4-Dimethoxyphenyl)-4-[(E)3',4'-dimethoxystyryl] cyclohex-1-ene	12.01	7.56
16	45.882	trans-3-(3,4-Dimethoxyphenyl)-4-[(E)3',4'-dimethoxystyryl] cyclohex-1-ene	14.44	9.07



ภาพที่ 1 โครมาโทแกรมขององค์ประกอบทางเคมีของสารสกัดเหง้าไพล



ภาพที่ 2 โครมาโทแกรมขององค์ประกอบทางเคมีของสารสกัดผลดีปลี



ตารางที่ 3 องค์ประกอบทางเคมีของสารสกัดผลดีปัสที่ได้จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค GC-MS

ลำดับ	Retention Time	ชนิดของสารสกัด	%Area	%Height
1	3.893	beta.-Pinene	0.66	1.31
2	4.620	D-Limonene	5.31	10.24
3	5.059	gamma.-Terpinene	0.76	1.53
4	7.045	Methyl salicylate	3.14	4.14
5	9.787	Tetradecane	0.73	1.35
6	10.103	Caryophyllene	1.03	1.65
7	10.536	Humulene	1.08	1.81
8	11.039	Pentadecane	4.28	5.93
9	11.240	2,4Di-tert-butylphenol	1.38	1.99
10	13.121	8-Heptadecene	3.49	5.56
11	13.170	8-Heptadecene	5.64	9.26
12	13.270	Nonadecane	6.10	9.50
13	14.385	Heneicosane	0.98	1.58
14	15.305	Z-5-Nonadecane	1.14	1.85
15	15.475	Lidocaine	3.72	1.85
16	35.425	Piperine	4.53	2.12
17	42.075	Piperine	35.12	13.23
18	44.650	(2E,4E,14E)-N-Isobutylicos-2,4,14-trienamide	4.10	2.65
19	47.475	Pipernonaline	6.64	5.92

ผลของสารสกัดเหง้าไพลและสารสกัดผลดีปัสต่อปริมาณสารฟีนอลิกรวม (Total Phenolic content; TPC) พบว่า ปริมาณสารฟีนอลิกรวมของสารสกัดสมุนไพรเดี่ยวเหง้าไพลและผลดีปัส และสารสกัดผสมสองชนิดนี้ อยู่ในช่วง 147.1–185.9 mg GAE/g dry extract ซึ่งสารสกัดเหง้าไพล มีปริมาณฟีนอลิกรวมสูงที่สุด เมื่อเทียบกับสารสกัดผสมไพลและดีปัสและสารสกัดผลดีปัส

ผลของสารสกัดเหง้าไพลและสารสกัดผลดีปัสต่อสารฟลาโวนอยด์รวม (Total flavonoid content; TFC) พบว่า ปริมาณสารฟลาโวนอยด์รวมของสารสกัดสมุนไพรเดี่ยวเหง้าไพลและผลดีปัส และสารสกัดผสมไพลและดีปัสนี้ อยู่ในช่วง 142.40 – 217.80 mg QCE/g crude extract ซึ่งสารสกัดเหง้าไพล มีปริมาณฟลาโวนอยด์รวมสูงที่สุด เมื่อเทียบกับสารสกัดผลดีปัส และสารสกัดผสมไพลและดีปัส ดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวมและสารฟลาโวนอยด์รวมของ สารสกัดเหง้าไพล สารสกัดผลดีปัส และสารสกัดผสมไพลและดีปัส

ชนิดของสารสกัด	TPC (mg GAE/g)	TFC (mg QCE/g)
สารสกัดเหง้าไพล	185.95 ± 23.29 ^b	217.80 ± 30.53 ^c
สารสกัดผลดีปัส	147.17 ± 18.75 ^a	142.40 ± 7.95 ^a
สารสกัดผสมไพลและดีปัส	181.82 ± 6.49 ^b	177.40 ± 6.54 ^b

หมายเหตุ: อักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็ก (^{a, b}) ที่แตกต่างกันในแนวดิ่ง หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

3. การวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH assay, ABTS assay และ FRAP assay

ผลการทดสอบฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระโดยใช้วิธี DPPH assay รายงานค่าเป็น IC_{50} เมื่อเปรียบเทียบกับสารสกัดแห้งโพล สารสกัดผลติปัสและสารสกัดผสมโพลและติปัส พบว่าสารสกัดผลติปัสมีฤทธิ์ยับยั้งอนุมูลอิสระ DPPH สูงที่สุด โดยมีค่า IC_{50} เท่ากับ $109.04 \pm 2.33 \mu\text{g/mL}$ เมื่อเทียบกับสารสกัดผสมโพลและติปัส และสารสกัดแห้งโพล

ผลการทดสอบฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระโดยใช้วิธี ABTS assay รายงานค่าเป็น IC_{50} เมื่อเปรียบเทียบกับสารสกัดแห้งโพล สารสกัดผลติปัสและสารสกัดผสมโพลและติปัส พบว่าสารสกัดผลติปัสมีฤทธิ์ยับยั้งอนุมูลอิสระ ABTS สูงที่สุด โดยมีค่า IC_{50} เท่ากับ $102.61 \pm 0.50 \mu\text{g/mL}$ เมื่อเทียบกับสารสกัดผสมโพลและติปัส สารสกัดแห้งโพล และสารสกัดผลติปัส สารสกัดผสมโพลทั้ง 3 ชนิดนี้มีฤทธิ์ยับยั้งอนุมูลอิสระ DPPH และ ABTS น้อยกว่าสารมาตรฐาน Trolox อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ดังตารางที่ 5

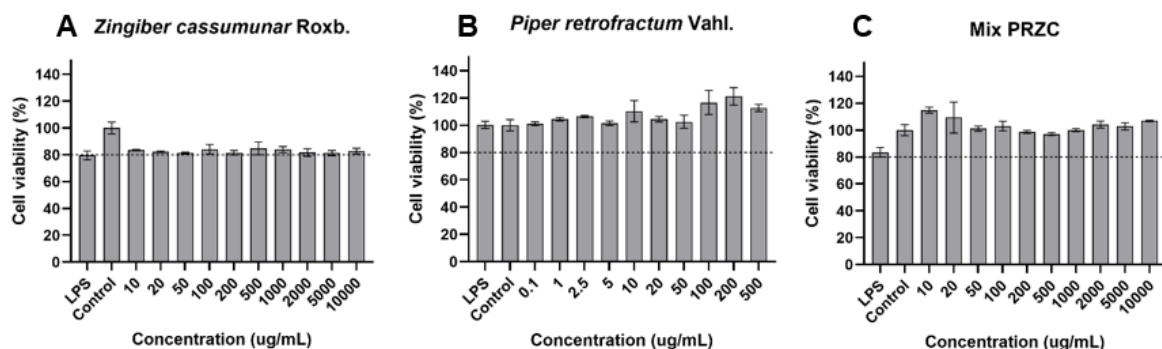
ตารางที่ 5 แสดงฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ DPPH assay, ABTS assay และ FRAP assay ของสารสกัดแห้งโพล สารสกัดผลติปัส และสารสกัดผสมโพลและติปัส

ชนิดของตัวอย่าง	ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ		
	DPPH	ABTS	FRAP
	(IC_{50} ; $\mu\text{g/mL}$)	(IC_{50} ; $\mu\text{g/mL}$)	(mM Fe^{2+} / mg)
Trolox	25.23 ± 2.86^a	26.19 ± 1.26^a	228.59 ± 8.38^a
สารสกัดแห้งโพล	257.47 ± 2.81^d	220.16 ± 2.03^d	519.24 ± 10.47^d
สารสกัดผลติปัส	109.04 ± 2.33^b	102.61 ± 0.50^b	382.36 ± 4.95^b
สารสกัดผสมแห้งโพลและผลติปัส	193.51 ± 3.00^c	195.74 ± 4.84^c	486.80 ± 8.22^c

หมายเหตุ: อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็ก (a, b, c, d) ที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

4. การศึกษาผลของสารสกัดแห้งโพล สารสกัดผลติปัส และสารสกัดผสมโพลและติปัสต่อศักยภาพในการต้านการอักเสบในระดับหลอดทดลอง

ผลการศึกษาความเป็นพิษของสารสกัดต่อเซลล์เพาะเลี้ยงมาโครฟาจ (RAW 264.7) ด้วยวิธี Cytotoxicity test (MTT assay) พบว่า %Cell viability มีค่ามากกว่า 80% ทุกค่า แสดงดังภาพที่ 3



ภาพที่ 3 แสดงเปอร์เซ็นต์การมีชีวิตรอดของเซลล์มาโครฟาจ RAW 264.7 (%Cell viability) ที่ถูกกระตุ้นด้วยไลโปโพลีแซ็กคาไรด์ (LPS) หลังได้รับสารสกัดแห้งโพลที่ความเข้มข้น 10 – 10,000 $\mu\text{g/mL}$ (A), สารสกัดผลติปัสที่ความเข้มข้น 0.1 – 500 $\mu\text{g/mL}$ (B) และสารสกัดผสมโพลและติปัสที่ความเข้มข้น 10 – 10,000 $\mu\text{g/mL}$ (C) เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

ผลการศึกษาผลของสารสกัดต่อการอักเสบ โดยวัดการยับยั้งการสร้าง Nitric oxide (NO) สารสกัดผลติปัสแสดงฤทธิ์ยับยั้ง NO ได้ดีที่สุด โดยมีค่า IC_{50} เท่ากับ $12.89 \pm 0.61 \mu\text{g/mL}$ เมื่อเทียบกับสารสกัดผสมโพลและติปัส และสารสกัดแห้งโพล ดังตารางที่ 6



ตารางที่ 6 แสดงฤทธิ์ยับยั้ง nitric oxide (NO) ของสารสกัดเหง้าไพล สารสกัดผลติป्ली และสารสกัดผสมไพลและติป्ली

ชนิดของสารสกัดสมุนไพร	ฤทธิ์ยับยั้ง NO (IC ₅₀ ; ug/ml)
สารสกัดผลติป्ली	12.89 ± 0.61 ^a
สารสกัดเหง้าไพล	2,489 ± 76.90 ^c
สารสกัดผสมไพลและติป्ली	1,029 ± 82.70 ^b

หมายเหตุ: อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็ก (^{a, b, c}) ที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

5. การพัฒนาเจลสมุนไพรจากสารสกัดเหง้าไพล สารสกัดผลติป्ली และสารสกัดผสมไพลและติป्ली

ผลการประเมินประสิทธิภาพด้านการต้านการอักเสบของสูตรตำรับเจลมีส่วนผสมของสมุนไพรจากสารสกัดเหง้าไพล สารสกัดผลติป्ली และสารสกัดผสมไพลและติป्ली พบว่าเจลจากสารสกัดติป्लीมีฤทธิ์ยับยั้ง NO ได้ดีที่สุด เมื่อเทียบกับเจลมาตรฐานไดโคลฟีแนลความเข้มข้น 1% มีการประเมินฤทธิ์ด้านการอักเสบของเจลสมุนไพรเมื่อเตรียมเสร็จใหม่ ๆ และหลังจากการประเมินความคงตัวในสภาวะเร่งครบ 6 รอบ มีค่า IC₅₀ ก่อนทดสอบ เท่ากับ 16.18 ± 1.02 ug/mL และ มีค่า IC₅₀ หลังทดสอบ เท่ากับ 15.05 ± 1.41 ug/mL ดังตารางที่ 7

ตารางที่ 7 แสดงผลการประเมินประสิทธิภาพด้านการต้านการอักเสบของสูตรตำรับเจลมีส่วนผสมของสมุนไพรจากสารสกัดเหง้าไพล สารสกัดผลติป्ली และสารสกัดผสมไพลและติป्ली

สูตรเจล	ฤทธิ์ยับยั้ง NO (IC ₅₀ ; ug/ml) Before	ฤทธิ์ยับยั้ง NO (IC ₅₀ ; ug/ml) After
สารสกัดผลติป्ली	16.18 ± 1.02 ^a	15.05 ± 1.41 ^a
สารสกัดเหง้าไพล	2,559.93 ± 338.74 ^d	3145.42 ± 181.35 ^d
สารสกัดผสมไพลและติป्ली	1,203.82 ± 160.16 ^c	1477.46 ± 54.38 ^c
1% Diclofenac gel	72.68 ± 3.51 ^b	74.21 ± 1.88 ^b

หมายเหตุ: อักษรภาษาอังกฤษพิมพ์เล็ก (^{a, b, c, d}) ที่แตกต่างกันในแนวตั้ง หมายถึง แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

เพื่อให้เข้าใจถึงศักยภาพของสารสกัดจากเหง้าไพลและผลติป्लीในการนำไปใช้พัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์สมุนไพร จึงได้มีการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ปริมาณสารสำคัญ และประเมินฤทธิ์ทางชีวภาพ ทั้งด้านการต้านอนุมูลอิสระและด้านการอักเสบ รวมถึงการประเมินความเป็นพิษของสารสกัดต่อเซลล์ จากนั้นจึงนำผลการทดสอบไปใช้ในการพัฒนาเจลสมุนไพรที่มีประสิทธิภาพด้านการอักเสบ

จากการรายงานของ Han และคณะ [25] และ Ozaki และคณะ [26] พบว่าสารกลุ่มฟีนิลบิวทีนอยด์ (Phenylbutenoids) และเคอร์คูมินอยด์ (Curcumin) จากไพลเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ใช้ในการบรรเทาอาการปวดและการอักเสบ ซึ่งสอดคล้องกับผลที่ได้ของการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย GC-MS ในงานวิจัยนี้ ซึ่งพบว่าสารสกัดเหง้าไพลมีสารสำคัญ (E)-4-(3,4-dimethoxyphenyl)but-3-en-1-ol (compound D) ซึ่งอยู่ในสารกลุ่มฟีนิลบิวทีนอยด์ (phenylbutenoids) เป็นกลุ่มสารที่มีรายงานว่าสามารถลดการอักเสบผ่าน MAPK pathways ได้แก่ p38, ERK และ Akt [27] ขณะเดียวกันผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย GC-MS ของสารสกัดติป्ली พบสารอัลคาลอยด์ (alkaloids) ชนิดไพเพอรีน (piperine) ซึ่งมีความสอดคล้องกับรายงานของ Takooree และคณะ [28] ว่าไพเพอรีน เป็นสารออกฤทธิ์สำคัญของติป्ली และงานของ Phan และคณะ [29] ที่อธิบายว่าไพเพอรีนสามารถยับยั้งการสร้างไนตริกออกไซด์ได้ ผ่านการยับยั้ง NF-KB pathway ทำให้การแสดงออกของ iNOS ลดลง จึงเชื่อมโยงได้ว่าการพบไพเพอรีนในสารสกัดติป्लीเป็นปัจจัยที่อธิบายฤทธิ์ด้านการอักเสบที่เด่นชัดของสารสกัดชนิดนี้ จากวรรณกรรมพบว่าผลติป्लीมีสารไพเพอรีน มีไอโซเมอร์หลายชนิด เช่น chavicine,

isopiperine และ isochavicine ส่วนการพบสารไพเพอรีน ที่แยกออก 2 Retention time นั้น อาจเกิดจากสารที่แตกตัวเป็น fragment ซึ่งไอโซเมอร์มักแตกตัวคล้ายกันมาก Library จึงระบุชื่อเหมือนกัน [30] และการแยกไอโซเมอร์กลุ่มสารไพเพอรีน สารบางชนิดในส่วน GC มีโอกาสเกิด isomerization จากความร้อนได้ [31]

ผลการศึกษาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวมและสารฟลาโวนอยด์รวม พบว่าสารสกัดเหง้าไพลมีปริมาณสารประกอบ ฟีนอลิกรวม (TPC) และสารประกอบฟลาโวนอยด์รวม (TFC) สูงที่สุด เมื่อเทียบกับสารสกัดผลดีปัสและสารสกัดผสมสองชนิดนี้ ซึ่งสัมพันธ์กับศักยภาพในการต้านอนุมูลอิสระ และช่วยลดการเกิด Oxidative stress ซึ่งเป็นตัวกระตุ้นสำคัญของกระบวนการอักเสบผ่าน NF- κ B pathway

จากผลฤทธิ์ทางชีวภาพ โดยการทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ พบว่าสารสกัดผลดีปัสมีค่า IC_{50} ของ DPPH และ ABTS เท่ากับ 109.04 ± 2.33 และ 102.61 ± 0.50 μ g/mL ตามลำดับ แสดงถึงความสามารถในการจับอนุมูลอิสระได้ดี ขณะที่สารสกัดเหง้าไพลมีค่า FRAP สูงสุด 519.24 ± 10.47 mM Fe^{2+} /mg สะท้อนถึงศักยภาพในการรีดิวซ์เหล็กและเป็นตัวให้โปรตอนที่มีประสิทธิภาพ

เมื่อนำสารสกัดเหง้าไพล สารสกัดผลดีปัส และสารสกัดผสมไพลและดีปัส มาทดสอบการศึกษาความเป็นพิษของสารสกัดต่อเซลล์เพาะเลี้ยงมาโครฟาจ (RAW 264.7) ด้วยวิธี Cytotoxicity test (MTT assay) พบว่า มากกว่า 80% แสดงว่าไม่มีความเป็นพิษต่อเซลล์เพาะเลี้ยงมาโครฟาจ (RAW 264.7) ซึ่งเป็นข้อบ่งชี้ว่าสารสกัดมีความปลอดภัยในระดับเซลล์ สามารถนำไปใช้ในการพัฒนาผลิตภัณฑ์ต่อไปได้ การทดสอบฤทธิ์ด้านการอักเสบ ผลการทดสอบการยับยั้งการสร้าง nitric oxide (NO) ในเซลล์ RAW 264.7 พบว่าสารสกัดผลดีปัสมีค่า IC_{50} ต่ำที่สุด รองลงมาคือ สารสกัดผสมไพลและดีปัส และสารสกัดเหง้าไพล นำค่า IC_{50} ที่ได้ไปพัฒนาเจลสมุนไพรต่อไป

จากผลการทดสอบฤทธิ์ทางชีวภาพ ได้นำสารสกัดที่มีประสิทธิภาพสูงสุดไปพัฒนาเป็นเจลสมุนไพร 3 สูตร พบว่าเจลสารสกัดผลดีปัสมีประสิทธิภาพการกำจัด NO สูงสุด ทั้งก่อนและหลังการทดสอบความคงตัว มีค่า IC_{50} ใกล้เคียงกัน (16.18 ± 1.02 และ 15.05 ± 1.41 μ g/mL, $P > 0.05$) แสดงถึงความคงตัวของฤทธิ์ทางชีวภาพของเจลสมุนไพรหลังการทดสอบความคงตัว

จากผลการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล แสดงให้เห็นว่าสารสกัดเหง้าไพลพบสารประกอบฟีนอลิกรวมและสารฟลาโวนอยด์รวมสูงที่สุด ซึ่งสะท้อนความสามารถรีดิวซ์ใน FRAP assay ที่สูงสุดเช่นกัน แสดงว่าเหง้าไพลอาจมีสารต้านอนุมูลอิสระที่เด่นในกลไกการให้ e^- หรือ reducing power มากกว่าการจับอนุมูลอิสระโดยตรง ขณะที่สารสกัดผลดีปัสไม่มี TPC/TFC ต่ำกว่า แต่กลับมีประสิทธิภาพสูงในการกำจัดอนุมูลอิสระ (DPPH/ABTS) และยับยั้งการสร้าง NO ซึ่งอาจเกิดจากสารออกฤทธิ์เฉพาะกลุ่มในดีปัสที่มีความสามารถในการจับ radical และเกี่ยวข้องกับ pathway การอักเสบได้ดี สารสกัดเหง้าไพลและสารสกัดผลดีปัส มีศักยภาพในการลดการอักเสบระดับเซลล์ ยับยั้ง MAPK pathways ลดการกระตุ้น NF- κ B pathway และลดการแสดงออกของเอนไซม์ iNOS จึงลดการสร้าง nitric oxide (NO) ได้อย่างมีประสิทธิภาพ อีกทั้งสมุนไพรทั้งสองยังมีระดับความปลอดภัยที่ดีในระดับเซลล์ และสามารถนำสารสกัดไปพัฒนาเป็นเจลสมุนไพรที่มีความคงตัวทางกายภาพและฤทธิ์ทางชีวภาพภายใต้สภาวะแรง นอกจากนี้สารสกัดจากสมุนไพรทั้ง 2 ชนิด เป็นวัตถุดิบจากสมุนไพรไทยที่มีความพร้อมเชิงวัตถุดิบสูง สามารถจัดหาได้ต่อเนื่อง สามารถสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับสมุนไพรไทย แสดงถึงความเป็นไปได้ในเชิงอุตสาหกรรมในการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์เจลสมุนไพรใช้ภายนอกสำหรับบรรเทาการอักเสบและอาการปวดในระดับผู้บริโภครจริง การที่เจลสมุนไพรมีความปลอดภัยในระดับเซลล์และคงประสิทธิภาพในการต้านการอักเสบได้ดี ช่วยสนับสนุนให้สามารถต่อยอดไปทดลองด้านการทดสอบเฉพาะที่ในผิวหนัง (Skin sensitization) อีกทั้งยังเป็นข้อมูลพื้นฐานสำหรับการศึกษาทางคลินิกในอนาคต เพื่อยืนยันประสิทธิผลในระดับผู้ใช้จริง

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษานี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยความอนุเคราะห์อุปกรณ์และสถานที่ในการดำเนินงาน จากคณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร



เอกสารอ้างอิง

1. Ferrero-Miliani L, Nielsen OH, Andersen PS, Girardin SE. Chronic inflammation: importance of NOD2 and NALP3 in interleukin-1 β generation. *Clin Exp Immunol* 2007;147(2):227-35.
2. Ricciotti E, FitzGerald GA. Prostaglandins and inflammation. *Arterioscler Thromb Vasc Biol* 2011;31(5):986-1000.
3. Clossa D, Folch-Puy E. Oxygen free radicals and the systemic inflammatory response. *IUBMB Life* 2004;56(4):185-91.
4. Nathan C, Xie QW. Regulation of biosynthesis of nitric oxide. *J Biol Chem* 1994;269(19):13725-8.
5. Van der Vliet A, Eiserich JP, Cross CE. Nitric oxide: a pro-inflammatory mediator in lung disease. *Respir Res* 2000;1(2):67-72.
6. Malinski T. Nitric oxide and nitroxidative stress in Alzheimer's disease. *J Alzheimers Dis* 2007;11(2):207-18.
7. Graham CD, Rose MR, Grunfeld EA, Kyle SD, Weinman J. A systematic review of quality of life in adults with muscle disease. *J Neurol* 2011;258(9):1581-92.
8. กระทรวงสาธารณสุข. สรุปรายงานการป่วย 2566. กลุ่มบริหารจัดการข้อมูลขนาดใหญ่กองยุทธศาสตร์และแผนงาน 2566. [อินเทอร์เน็ต]. 2566 [เข้าถึงเมื่อ 28 เม.ย. 2566]. เข้าถึงได้จาก: https://spd.moph.go.th/wp-content/uploads/2024/11/ill_2023_full_07112567.pdf
9. Laine L. Nonsteroidal anti-inflammatory drug gastropathy. *Gastrointest Endosc Clin N Am* 1996;6(3):489-504.
10. Muzamil A, Tahir M, Ali S, Liaqat I, Ali A, Summer M. Inflammatory Process and Role of Cytokines in Inflammation: An Overview. *Punjab Univ J Zool* 2022;36(2):237-252.
11. Manimmanakorn N, Manimmanakorn A, Boobphachart D, Thuwakum W, Laupattarakasem W, Hamlin MJ. Effects of Zingiber cassumunar (Plai cream) in the treatment of delayed onset muscle soreness. *J Integr Med* 2016;14(2):114-20.
12. Mahaprom K, Chokpaisarn J, Kunworarath N, Paduka W, Phoopa S, Limsuwan S, et al. In vivo analgesic, anti-inflammatory activities, and phytochemical profile of Thai herbal Kratom recipe, a traditional Thai herbal medicine for muscle pain relief. *J Ethnopharmacol* 2025;343:119442.
13. Jeenapongsa R, Yoovathaworn K, Sriwatanakul KM, Pongprayoon U, Sriwatanakul K. Anti-inflammatory activity of (E)-1-(3,4-dimethoxyphenyl) butadiene from Zingiber cassumunar Roxb. *J Ethnopharmacol* 2003;87(2):143-8.
14. Asasutjarit R, Sookdee P, Veeranondha S, Fuongfuchat A, Itharat A. Application of film-forming solution as a transdermal delivery system of piperine-rich herbal mixture extract for anti-inflammation. *Heliyon* 2020;6(6):e04139.
15. Chongmelaxme B, Srumsiri R, Dilokthornsakul P, Dhippayom T, Kongkaew C, Saokaew S, et al. Clinical effects of Zingiber cassumunar (Plai): A systematic review. *Complement Ther Med* 2017;35:70-7.
16. Alseekh S, Aharoni A, Brotman Y, Contrepolis K, D'Auria J, Ewald J, et al. Mass spectrometry-based metabolomics: a guide for annotation, quantification and best reporting practices. *Nature Methods* 2021;18(7):747-56.



17. Teles AM, Silva-Silva JV, Fernandes JMP, Abreu-Silva AL, Calabrese KDS, Mendes Filho NE, et al. GC-MS Characterization of Antibacterial, Antioxidant, and Antitrypanosomal Activity of *Syzygium aromaticum* Essential Oil and Eugenol. *Evid Based Complement Alternat Med* 2021;2021:6663255.
18. Nobossé P, Fombang E, Mbofung C. The Effect of Steam Blanching and Drying Method on Nutrients, Phytochemicals and Antioxidant Activity of Moringa (*Moringa oleifera* L.) Leaves. *Am J Food Sci Technol* 2017;5:53-60.
19. Sharma OP, Bhat TK. DPPH antioxidant assay revisited. *Food Chemistry* 2009;113(4):1202-5.
20. Re R, Pellegrini N, Proteggente A, Pannala A, Yang M, Rice-Evans C. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. *Free Radic Biol Med* 1999;26(9):1231-7.
21. Guo C, Yang J, Wei J, Li Y, Xu J, Jiang Y. Antioxidant activities of peel, pulp and seed fractions of common fruits as determined by FRAP assay. *Nutrition Research* 2003;23(12):1719-26.
22. Poteser M, Wakabayashi I. Serum albumin induces iNOS expression and NO production in RAW 267.4 macrophages. *Br J Pharmacol* 2004;143(1):143-51.
23. Sarukh VS, Nagoba SN, Hindole SS, Kaudewar KD, More DR. FORMULATION AND EVALUATION OF HERBAL GEL CONTAINING *Allium cepa* EXTRACT: FORMULATION AND EVALUATION OF HERBAL GEL CONTAINING *Allium cepa* EXTRACT. *J Drug Deliv Ther* 2019;9(4-s):492-6.
24. Sangkaew W, Sianglum W, Wunnoo S, Voravuthikunchai SP, Joycharat N. Bioactive substance contents and therapeutic potential for skin inflammation of an herbal gel containing *Derris reticulata* and *Glycyrrhiza glabra*. *Pharm Biol* 2024;62(1):648-58.
25. Han AR, Kim H, Piao D, Jung CH, Seo EK. Phytochemicals and Bioactivities of *Zingiber cassumunar* Roxb. *Molecules* 2021;26(8):2377
26. Ozaki Y, Kawahara N, Harada M. Anti-inflammatory effect of *Zingiber cassumunar* Roxb. and its active principles. *Chem Pharm Bull (Tokyo)* 1991;39(9):2353-6.
27. Gundom T, Sukketsiri W, Panichayupakaranant P. Phytochemical analysis and biological effects of *Zingiber cassumunar* extract and three phenylbutenoids: targeting NF- κ B, Akt/MAPK, and caspase-3 pathways. *BMC Complement Med Ther* 2025;25(1):180.
28. Takooree H, Aumeeruddy MZ, Rengasamy KRR, Venugopala KN, Jeewon R, Zengin G, et al. A systematic review on black pepper (*Piper nigrum* L.): from folk uses to pharmacological applications. *Crit Rev Food Sci Nutr* 2019;59(sup1):S210-s43.
29. Phan UTT, Nguyen HD, Nguyen TKO, Tran TH, Le TH, Tran TTP. Anti-inflammatory effect of *Piper longum* L. fruit methanolic extract on lipopolysaccharide-treated RAW 264.7 murine macrophages. *Heliyon* 2024;10(4):e26174.
30. Marutoiu C, Gogoasa I, Oprean I, Marutoiu O-F, Moise M-I, Tigae C, et al. Separation and Identification of Piperine and Chavicine in Black Pepper by TLC and GC-MS. *JPC* 2006;19(3):250-2.
31. Tiwari A, Mahadik KR, Gabhe SY. Piperine: A comprehensive review of methods of isolation, purification, and biological properties. *Med Drug Discov* 2020;7:100027.



การพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาในรูปแบบผงสกัดขงดื่ม:
การศึกษาเชิงคุณภาพและการเก็บรักษา

Development of Lanna Health Supplement Herbal Drink Recipe in Instant
Extract Powder Form: A Qualitative Study and Preservation

ทวีศักดิ์ หลีแก้วสาย¹ จักรกฤษณ์ คณารีย์¹ วนิษา ปันฟ้า¹ พรพรรณ มณีวรรณ¹ พรหทัย พุทธรวัน²
และ สมฤทัย ยังวรรณ^{1*}

¹วิทยาลัยการแพทย์พื้นบ้านและการแพทย์ทางเลือก มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย เชียงราย 57100

²สาขาเทคโนโลยีและนวัตกรรมอาหาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย เชียงราย 57100

Taweesak Leekaewsai¹, Chakkrit Khanaree¹, Wanisa Punfa¹, Pornphun Maneewan¹,
Pornhathai Putthawan² and Somruethai Yangwan^{1*}

¹School of Traditional and Alternative Medicine, Chiang Rai Rajabhat University, Chiang Rai, 57100

²Food Tech & Innovation Program, Faculty of Sciences and Technology, Chiang Rai Rajabhat University,
Chiang Rai, 57100

*Corresponding author: somruethai.yan@crru.ac.th

Received: 23 October 2025/ Revised: 1 March 2026/ Accepted: 9 March 2026

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องดื่มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาในรูปแบบผงสกัดขงดื่ม มีส่วนประกอบ 10 ชนิด เช่น กำแพงเจ็ดชั้น ผางเสน มะตูม เป็นต้น ผสมกับมอลโตเดกซ์ตรินและทำให้แห้งแบบพ่นฝอย ผลการศึกษาพบว่าสูตรที่ผสมมอลโตเดกซ์ตรินร้อยละ 5 และ 10 มีคุณสมบัติทางกายภาพใกล้เคียงกับเครื่องดื่มในรูปแบบสกัดพร้อมดื่ม มีสีส้มแดง pH เป็นกลางและมีความหนืดใกล้เคียงกัน การศึกษานี้เลือกสูตรผสมมอลโตเดกซ์ตรินร้อยละ 5 ซึ่งมีประสิทธิภาพและลดการใช้มอลโตเดกซ์ตริน โดยใช้ผงสกัด 9.36 กรัมต่อน้ำ 200 มิลลิลิตรต่อครั้ง การวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟีแบบชั้นบางพบว่าผงสกัดดังกล่าวมีลายพิมพ์นิ้วมือทางเคมีและค่า R_f ใกล้เคียงกัน และยังแสดงฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ชนิด DPPH และ ABTS มีค่า IC_{50} เท่ากับ $857.5 \pm 52.3 \mu\text{g/mL}$ และ $336.2 \pm 12.9 \mu\text{g/mL}$ เมื่อทดสอบการเก็บรักษาภายใต้สภาวะเร่งพบว่าสารดังกล่าวสามารถเก็บรักษาได้ที่อุณหภูมิ 35°C , 45°C และ 55°C เป็นเวลา 533, 385 และ 346 วันตามลำดับ โดยระยะเวลา 9 เดือน ไม่พบการปนเปื้อนเชื้อจุลินทรีย์เกินค่ามาตรฐาน การศึกษานี้สรุปได้ว่าการใช้เทคนิคทำแห้งแบบพ่นฝอยร่วมกับมอลโตเดกซ์ตรินสามารถพัฒนาเครื่องดื่มดังกล่าวในรูปแบบผงสกัดขงดื่มที่สะดวกต่อการบริโภค ยืดอายุการเก็บรักษาและมีสารออกฤทธิ์ทางยา

คำสำคัญ: เครื่องดื่มสมุนไพร เสริมสุขภาพ เครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย ผงสกัดขงดื่ม ผลิตภัณฑ์

Abstract

This study aimed to develop a Lanna Health Supplement Herbal Drink Recipe in instant powder form for brewing. The formulation consisted of 10 herbal ingredients, such as *Salacia chinensis*, *Caesalpinia sappan*, *Aegle marmelos* etc., combined with maltodextrin, and then dried using spray drying technology. Results showed that formulations with 5% and 10% maltodextrin yielded products with physical properties similar to ready-to-drink extracts, featuring an orange-red color, neutral pH, and comparable viscosity. The 5% maltodextrin formula was selected for its superior efficiency and reduced carrier use, requiring 9.36 g of powder per 200 mL of water per serving. Thin-layer chromatography (TLC) analysis confirmed that the powder retained the chemical fingerprint characteristics and similar R_f values. Bioactivity assays demonstrated DPPH and ABTS radical scavenging activities with IC_{50} values of $857.5 \pm 52.3 \mu\text{g/mL}$ and $336.2 \pm 12.9 \mu\text{g/mL}$, respectively. Accelerated storage testing under 35°C , 45°C , and 55°C revealed shelf lives of 533, 385, and 346 days, respectively. Over 9 months, no microbial contamination exceeded regulatory standards. In conclusion, spray drying combined with maltodextrin enabled the development of a convenient, long-shelf-life Lanna herbal beverage powder that preserves bioactive compounds.

Keywords: Herbal Drink, Health Supplement, Spray Dryer, Instant Extract Powder, Product

บทนำ

การดูแลสุขภาพด้วยวิธีธรรมชาติได้รับความนิยมเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง โดยเฉพาะการใช้สมุนไพรในรูปแบบผลิตภัณฑ์เพื่อส่งเสริมสุขภาพและป้องกันโรคในระดับบุคคล [1] หนึ่งในผลิตภัณฑ์ที่ได้รับความนิยมคือ เครื่องดื่มสมุนไพรสกัดพร้อมดื่ม [2] ซึ่งเป็นการนำสมุนไพรมาต้มเคี่ยวเพื่อนำสารสกัดมาใช้บริโภค รูปแบบดังกล่าวมีข้อดีในด้านความเรียบง่ายและสืบทอดมาจากภูมิปัญญาดั้งเดิม อย่างไรก็ตามยังมีข้อจำกัดเรื่องความไม่สะดวกในการเตรียม และอายุการเก็บรักษาที่สั้นหลังการต้มเคี่ยว ซึ่งอาจไม่ตอบโจทย์การบริโภคในวิถีชีวิตปัจจุบัน เพื่อแก้ไขข้อจำกัดดังกล่าว จึงมีแนวคิดพัฒนาเครื่องดื่มสมุนไพรในรูปแบบผงสกัดขงดื่ม ซึ่งสามารถลดปัญหาด้านการเตรียมและเพิ่มอายุผลิตภัณฑ์ การศึกษาครั้งนี้ใช้ “เครื่องดื่มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนา” เป็นต้นแบบ โดยเครื่องดื่มนี้มีสรรพคุณครอบคลุมการบำรุงและแก้ไขปัญหสุขภาพ อาทิ อาการปวด นอนไม่หลับ ท้องผูก เบื่ออาหาร และความอยากอาหารลดลง ส่วนประกอบสำคัญ ได้แก่ กำแพงเจ็ดชั้น ชะเอมเทศ ชุมเห็ดไทย ชุมเห็ดเทศ เดยหอม เถาว์ลัยเปรี้ยว ฝรั่งเสน มะเขือแจ้เครือ มะตูม และสะค้านแดง [3] มีวิธีการเตรียมคือ การนำสมุนไพรผสมรวมกันไปต้มกับน้ำ โดยการต้มเคี่ยว 3 ส่วน ให้เหลือ 1 ส่วน ปัจจุบันสูตรดั้งเดิมของเครื่องดื่มนี้สามารถเก็บรักษาได้ไม่เกิน 1 สัปดาห์ ที่อุณหภูมิห้องหรือ 2 สัปดาห์ ที่ 4°C องศาเซลเซียส ($^\circ\text{C}$)

จากข้อจำกัดของเครื่องดื่มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาในรูปแบบสกัดพร้อมดื่ม การศึกษานี้จึงสนใจที่จะพัฒนาเครื่องดื่มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาให้อยู่ในรูปแบบผงสกัดขงดื่ม โดยใช้วิธีผสมมอลโตเดกซ์ตริน (Maltodextrin) เป็นสารช่วยกักเก็บและลดการสูญเสียกลิ่นรสชาติ [4-6] พร้อมประยุกต์เทคโนโลยีการทำแห้งแบบพ่นฝอย (Spray Dryer) เพื่อให้ได้ผงสกัดที่มีคุณภาพ การศึกษานี้มุ่งพัฒนากระบวนการผลิต ตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพและเคมีของผลิตภัณฑ์ผงสกัดขงดื่ม เปรียบเทียบกับรูปแบบสกัดพร้อมดื่มและประเมินอายุการเก็บรักษาเพื่อสนับสนุนการใช้ประโยชน์เชิงพาณิชย์และเพิ่มโอกาสการเข้าถึงของผู้บริโภค



วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมวัตถุดิบและการเตรียมเครื่องต้มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาในรูปแบบสีกัดพร้อมดื่ม

สมุนไพรแต่ละชนิด ได้แก่ กำแพงเจ็ดชั้น ชะเอมเทศ ชุมเห็ดไทย ชุมเห็ดเทศ เตยหอม เถาวัลย์เปรียง ฝรั่งเสน มะเขือแจ้เครือ มะตูม และสะค้านแดง วัตถุดิบสมุนไพรได้มาจากแหล่งเพาะปลูกของกลุ่มเครือข่ายผลิตวัตถุดิบสมุนไพรของวิทยาลัยการแพทย์พื้นบ้านและการแพทย์ทางเลือก มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย จากนั้นนำเข้าสู่กระบวนการแปรรูปเบื้องต้นจนได้ขนาดที่เหมาะสมสำหรับการต้มเคี่ยวและทำให้แห้งจนมีความชื้นในช่วงร้อยละ 7-14 นำสมุนไพรที่ผ่านการเตรียมรวมกันตามสูตรเครื่องต้มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนา ซึ่งประกอบด้วย ชุมเห็ดไทย ชุมเห็ดเทศ มะเขือแจ้เครือ และสะค้านแดง อย่างละ 2 กรัม กำแพงเจ็ดชั้น เถาวัลย์เปรียง ฝรั่งเสน และมะตูม อย่างละ 3 กรัม เตยหอม 4 กรัม และชะเอมเทศ 6 กรัม รวมน้ำหนักทั้งหมด 30 กรัม บรรจุในห่อผ้าขาวและใส่ลงในหม้อต้มยาสมุนไพรอัตโนมัติ [7] (CONVERSANT TECHNOLOGY CO., LTD., Thailand) ที่อุณหภูมิ 100°C ในระบบปิดแบบสุญญากาศเป็นเวลา 45 นาที ใช้น้ำปริมาณ 2,100 มิลลิลิตร กระบวนการนี้ผลิตเครื่องต้มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาในรูปแบบสีกัดพร้อมดื่มปริมาณรวม 40 ลิตร จากนั้นแบ่งออกเป็น 4 ส่วน ส่วนละ 10 ลิตร ดังนี้

ส่วนที่ 1: เครื่องต้มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาในรูปแบบสีกัดพร้อมดื่ม (ไม่ผสมมอลโตเดกซ์ตริน)

ส่วนที่ 2: เครื่องต้มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนามผสมมอลโตเดกซ์ตรินร้อยละ 5 ของปริมาณทั้งหมด

ส่วนที่ 3: เครื่องต้มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนามผสมมอลโตเดกซ์ตรินร้อยละ 10 ของปริมาณทั้งหมด

ส่วนที่ 4: เครื่องต้มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนามผสมมอลโตเดกซ์ตรินร้อยละ 20 ของปริมาณทั้งหมด

2. การพัฒนากระบวนการผลิตผลิตภัณฑ์เครื่องต้มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาในรูปแบบผงสีกัดขงดื่มผสมกับมอลโตเดกซ์ตรินและทำให้แห้งโดยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย (Spray Dryer)

การพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องต้มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาในรูปแบบผงสีกัดขงดื่มครั้งนี้ใช้มอลโตเดกซ์ตรินเป็นสารช่วยกักเก็บสารสกัดสมุนไพร ทำหน้าที่ช่วยลดการสูญเสียกลิ่นและรสชาติให้คงตัว ลดการเสื่อมสลายขณะกระบวนการทำแห้งและช่วยเพิ่มเสถียรภาพของผงสมุนไพร [4-6] การศึกษานี้ได้เตรียมตัวอย่างเครื่องต้มสมุนไพรสีกัดพร้อมดื่มจำนวน 4 ส่วน โดยส่วนที่ 1 เป็นสารสกัดสมุนไพรแบบไม่ผสมมอลโตเดกซ์ตริน และส่วนที่ 2-4 เป็นสารสกัดที่ผสมมอลโตเดกซ์ตรินในสัดส่วนร้อยละ 5, 10 และ 20 (w/v) ตามลำดับ จากนั้นจึงนำตัวอย่างทั้ง 4 ส่วน เข้าสู่กระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอย (SPRAY DRYER SDE – 50 EURO 2, Thailand) ภายใต้เงื่อนไขอุณหภูมิเข้า 150°C อุณหภูมิขาออก 90°C และอัตราการป้อนสารละลาย 10 ลิตรต่อชั่วโมง โดยเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอยทำงานในระบบแรงดัน 10 บาร์ ซึ่งเป็นช่วงค่าที่เหมาะสมต่อการแปลงของเหลวให้เป็นผงที่มีคุณภาพและคงคุณสมบัติทางเคมี [8, 9]

ประสิทธิภาพการได้มาซึ่งสารสกัด (%Yield) ของผลิตภัณฑ์คำนวณตามสมการ

$$\text{จากสูตร } \%Yield = \frac{\text{น้ำหนักสารสกัดที่ได้}}{\text{น้ำหนักวัตถุดิบแห้งที่ใช้สกัด}} \times 100$$

สำหรับตัวอย่างที่ผสมมอลโตเดกซ์ตริน (ส่วนที่ 2-4) มีการปรับสมการคำนวณโดยหักน้ำหนักของมอลโตเดกซ์ตรินที่ผ่านการพ่นฝอยออก (มอลโตเดกซ์ตรินในสัดส่วนร้อยละ 5, 10 และ 20 มาผสมกับน้ำสะอาด) เพื่อให้ได้ค่าผลผลิตจริงของสารสกัดสมุนไพร ดังสมการ

$$\text{จากสูตร } \%Yield = \frac{\text{น้ำหนักสารสกัดที่ได้} - \text{น้ำหนักมอลโตเดกซ์ตรินหลังทำแห้ง}}{\text{น้ำหนักวัตถุดิบแห้งที่ใช้สกัด}} \times 100$$



3. การตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์เครื่องต้มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาในรูปแบบผงสกัดขงต้ม

ดำเนินการเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างผลิตภัณฑ์ที่ผสมมอลโตเดกซ์ตรินกับผลิตภัณฑ์สมุนไพรในรูปแบบสกัดพร้อมดื่ม โดยใช้วิธีการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพต่าง ๆ ดังนี้

- การละลายน้ำร้อน: ทำการเติมน้ำร้อนอุณหภูมิ 100°C ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ลงในผงสกัดสมุนไพรแต่ละตัวอย่าง เครื่องต้มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนามผสมมอลโตเดกซ์ตรินร้อยละ 5 ใช้ผงสกัดจำนวน 9.36 กรัม และเครื่องต้มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนามผสมมอลโตเดกซ์ตรินร้อยละ 10 ใช้ผงสกัดจำนวน 18.42 กรัม โดยเริ่มจับเวลาตั้งแต่ตอนเทน้ำร้อนจนผงสกัดละลายกลับจนหมด การทดสอบทำซ้ำ 3 ครั้ง และคำนวณค่าเฉลี่ย เพื่อบันทึกระยะเวลาการละลายของผลิตภัณฑ์ [10]

- การประเมินสี: ใช้การเปรียบเทียบกับแถบสีมาตรฐาน ตามหลักของ CMYK Colour Chart [11] (UK) เพื่อประเมินระดับความเข้มและโทนสีของสารสกัดสมุนไพรในรูปแบบสารละลาย [12]

- การตรวจวัดการตกตะกอน: นำสารละลายแต่ละตัวอย่างเทลงในภาชนะใส ตั้งทิ้งไว้ 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิห้อง และบันทึกผลการเกิดตะกอนตามลำดับชั้นความคงตัวของสารละลายด้วยวิธีการสังเกต

- การตรวจวัดความเป็นกรด-เบส (pH): ใช้เครื่องวัดค่า pH แบบตั้งโต๊ะ ยี่ห้อ Horiba รุ่น PH1500-S (Japan) เพื่อวัดค่าความเป็นกรด-ด่างของตัวอย่าง [13]

- การตรวจวัดค่าความถ่วงจำเพาะ: ใช้เครื่อง Hydrometer ยี่ห้อ Dichte Araometer (Germany) เพื่อวัดค่าความหนาแน่นสัมพัทธ์ของสารละลาย [14]

- การตรวจวัดค่าความหนืด (Viscosity): ใช้เครื่องวัดความหนืดแบบถ้วย ZAHN CUP เบอร์ 3 ยี่ห้อ SHEEN เบอร์ 3 (Nederland) โดยบันทึกเวลาที่สารละลายไหลออกจากปากถ้วยเป็นหน่วยวินาที/cSt [15, 16]

- การทดสอบปริมาณของแข็งละลายน้ำได้ทั้งหมด (Total soluble solid (TSS); °Brix): ใช้เครื่องวัดการหักเหของแสง (Refractometer) ยี่ห้อ Atago (Japan) [13]

- การวัดค่าความชื้น: ใช้เครื่องวัดความชื้น (Moisture Balance) ยี่ห้อ Denver Instrument รุ่น IR 35 (Germany) โดยกำหนดอุณหภูมิในการอบและเวลาวัดตามมาตรฐานวิธีของผู้ผลิตอุปกรณ์ [17]

ภายหลังการตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพทั้งหมด จะคัดเลือกผลิตภัณฑ์เครื่องต้มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาในรูปแบบผงสกัดขงต้มที่ให้ค่าคุณลักษณะเหมาะสมที่สุด เพื่อใช้ในการทดสอบคุณสมบัติทางเคมีและฤทธิ์ทางชีวภาพในขั้นตอนต่อไป

4. การตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีและฤทธิ์ทางชีวภาพของผลิตภัณฑ์เครื่องต้มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาในรูปแบบผงสกัดขงต้ม

การทดสอบในส่วนนี้มุ่งตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีและฤทธิ์ทางชีวภาพของผลิตภัณฑ์ทั้งในรูปแบบสกัดพร้อมดื่มและผงสกัดขงต้ม เพื่อใช้เปรียบเทียบคุณภาพของสารสำคัญและศักยภาพทางชีวภาพของผลิตภัณฑ์สมุนไพรที่ได้จากกระบวนการผลิตแบบต่าง ๆ โดยมีรายละเอียดของวิธีวิจัยดังนี้

4.1 การตรวจสอบลายพิมพ์นิ้วมือ (Fingerprint) ด้วยเทคนิค Thin Layer Chromatography (TLC)

นำผงเครื่องต้มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาในรูปแบบสกัดพร้อมดื่มและผงสกัดขงต้มมาสกัดด้วย 80% เอทานอล ปริมาตร 5 มิลลิลิตร เขย่า 10 นาที และตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นกรองด้วยกระดาษกรอง นำสารสกัด 0.01 มิลลิลิตร หยดบนแผ่น Silica gel (เฟสคงที่) และพัฒนาในระบบสารเคลื่อนที่ Toluene: Ethyl Acetate: Formic Acid (5 : 4 : 1) จากนั้นปล่อยให้แห้ง แล้วตรวจสอบภายใต้แสงธรรมชาติและ UV ที่ 254 และ 366 นาโนเมตร บันทึกลักษณะแถบสีและคำนวณค่า R_f เพื่อตรวจสอบลักษณะลายพิมพ์นิ้วมือเฉพาะของผลิตภัณฑ์ [18]

4.2 การตรวจวัดปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวม (Total Phenolic Content)

ละลายสารสกัดเครื่องต้มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาในรูปแบบผงสกัดขงต้มที่ความเข้มข้นต่าง ๆ นำมาทดสอบด้วยวิธี Folin-Ciocalteu โดยผสมสารละลาย 10% Folin-Ciocalteu เขย่าให้เข้ากัน ตามด้วยสารละลาย Na_2CO_3



เขย่าให้เข้ากันและแล้วทิ้งไว้ในที่มืด 30 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 765 นาโนเมตร ด้วย Microplate reader เทียบกับกราฟมาตรฐานกรดแกลลิก และรายงานค่าผลลัพธ์เป็น mg Gallic acid equivalent (GAE)/g extract การทดสอบทำซ้ำ 3 ครั้ง และคำนวณค่าเฉลี่ย [19]

4.3 การตรวจวัดปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์รวม (Total Flavonoid Content)

ละลายสารสกัดเครื่องดื่มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาในรูปแบบผงสกัดขงดื่มที่ความเข้มข้นต่าง ๆ ผสมตัวอย่างกับ 5% NaNO_2 หลังจากนั้น 5 นาที เติม 10% AlCl_3 และเติม 1 M NaOH ตั้งทิ้งไว้ 10 นาที จากนั้นเขย่าให้เข้ากันและวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 510 นาโนเมตร ด้วย Microplate reader ผลลัพธ์คำนวณเทียบกับกราฟมาตรฐาน Catechin และรายงานค่าเป็น mg Catechin equivalent (CE)/g extract การทดสอบทำซ้ำ 3 ครั้ง และคำนวณค่าเฉลี่ย [20]

4.4 การทดสอบความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระชนิด DPPH และ ABTS

ผสมสารสกัดเครื่องดื่มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาในรูปแบบผงสกัดขงดื่มที่ความเข้มข้นต่าง ๆ 20 μL กับสารละลาย 0.2 mM DPPH จำนวน 180 μL ใน 96-well plate บ่มในที่มืดที่อุณหภูมิห้อง 15 นาที แล้ววัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 517 นาโนเมตร ด้วย ELISA plate reader โดยใช้เมทานอลเป็นสารควบคุม ผลลัพธ์แสดงเป็นค่า IC_{50} (50% Inhibitory Concentration) การทดสอบจะทำซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง และหาค่าเฉลี่ย [20]

ผสมสารสกัดเครื่องดื่มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาในรูปแบบผงสกัดขงดื่มที่ความเข้มข้นต่าง ๆ เมทานอล 10 μL กับสารละลาย ABTS จำนวน 990 μL ตั้งทิ้งไว้ในที่มืด 6 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 734 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer โดยใช้ น้ำกลั่นเป็นสารอ้างอิง ผลลัพธ์แสดงเป็นค่า IC_{50} (50% Inhibitory Concentration) การทดสอบจะทำซ้ำทั้งหมด 3 ครั้ง และหาค่าเฉลี่ย [21]

5. การตรวจสอบอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาในรูปแบบผงสกัดขงดื่ม

5.1 การตรวจสอบการเสื่อมคุณภาพในสภาวะเร่ง

สภาวะเร่งเป็นการศึกษาการเปลี่ยนแปลงทางกายภาพหรือเคมีและสามารถประเมินอายุการเก็บ (Shelf life) ของผลิตภัณฑ์ได้ในเวลาสั้นลง โดยการเก็บตัวอย่างผลิตภัณฑ์ภายใต้สภาวะที่รุนแรงกว่าปกติ (เช่น อุณหภูมิสูง ความชื้นสูง หรือแสงจัด) วิธีการคือ นำเครื่องดื่มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาในรูปแบบผงสกัดขงดื่มมาบรรจุลงในอูมิเนียมฟอยล์ของละ 10 กรัม นำเข้าตู้บ่มควบคุมอุณหภูมิและความชื้น Climatic Chamber Binder รุ่น KBF 240 (Germany) ในสภาวะเร่งที่อุณหภูมิ 35°C, 45°C และ 55°C เป็นระยะเวลา 2 เดือน ทำการสุ่มตัวอย่างทุก ๆ สัปดาห์ มาประเมินค่าสี L^* คือ ค่าความสว่าง (0 = ดำ, 100 = ขาว) a^* คือ ค่าความเป็นสีแดงและเขียว (+แดง/-เขียว) และ b^* ค่าความเป็นสีเหลืองและน้ำเงิน (+เหลือง/-น้ำเงิน) ด้วยเครื่องวัดสี Reflection spectrometer Avantes (Netherlands) และค่าปริมาณน้ำอิสระด้วยเครื่อง Water activity รุ่น Dew Point Water Activity Meter 4TE (USA) จากนั้นนำไปประเมินอายุการเก็บรักษาตามปฏิกิริยาจลนพลศาสตร์ (Kinetic reaction) การพิจารณาว่าสารตั้งต้นเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ได้อย่างไร โดยมีการควบคุมปัจจัยอื่นที่มีผลต่ออัตราการเปลี่ยนแปลง [22]

5.2 การตรวจสอบการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์

ดำเนินการตรวจสอบการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ในผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาในรูปแบบผงสกัดขงดื่มทุกเดือนเป็นระยะเวลา 9 เดือน ด้วยวิธีตรวจนับจุลินทรีย์มาตรฐาน (Standard Plate Count) เพื่อบันทึกจำนวนโคโลนีของเชื้อแบคทีเรียและเชื้อรา สำหรับการตรวจจุลินทรีย์ที่เจริญเติบโตโดยใช้อากาศ (Aerobic plate count; APC) จะใช้อาหารเลี้ยงเชื้อชนิด Nutrient Agar และการตรวจยีสต์และรา (Total Yeast and Mold) จะใช้อาหารเลี้ยงเชื้อชนิด Potato Dextrose Agar [23] และตรวจสอบการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ก่อโรค 3 ชนิด ได้แก่ *Escherichia coli*, *Salmonella* spp. และ *Clostridium* spp. โดยมีวิธีการทดสอบอ้างอิงตามตำรามาตรฐานยาสมุนไพรไทย (Thai Herbal Pharmacopoeia, THP) ดังนี้ [24]

1) เตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ 3 ชนิด ได้แก่ อาหารเลี้ยงเชื้อ MacConkey Agar ใช้สำหรับ เลี้ยงเชื้อ *Escherichia coli* อาหารเลี้ยงเชื้อ Salmonella-Shigella Agar ใช้สำหรับเลี้ยงเชื้อ *Salmonella* spp. อาหารเลี้ยงเชื้อ Clostridial Agar ใช้สำหรับเลี้ยงเชื้อ *Clostridium* spp.

2) นำตัวอย่างเครื่องดื่มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาในรูปแบบผงสกัดขงดื่ม มาทำการเจือจางให้ได้ความเข้มข้น 10^{-1} , 10^{-2} และ 10^{-3} ตามลำดับ เพื่อนำมาทดสอบในอาหารเลี้ยงเชื้อ 3 ชนิด ที่เตรียมไว้ โดยใช้เทคนิค Spread plate จากนั้นทำการบ่มเชื้อในตู้บ่มเชื้อ (Incubator) ที่อุณหภูมิ 35°C เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง

3) เมื่อครบเวลา ทำการตรวจนับโคโลนี อ่านผลการทดลองที่ได้ โดยทำการเปรียบเทียบจำนวนโคโลนีของอาหารเลี้ยงเชื้อที่ไม่ได้ใส่ตัวอย่าง (ควบคุม) กับที่ใส่ตัวอย่าง และรายงานผลเป็นโคโลนีต่อกรัม หรือมิลลิลิตร (Colony Forming Units หรือ CFU/g หรือ mL) โดยเกณฑ์การปนเปื้อนต้องไม่เกินค่ามาตรฐานที่กำหนดตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข เรื่อง เกณฑ์มาตรฐาน ค่าความบริสุทธิ์ หรือคุณลักษณะอื่นอันมีความสำคัญต่อคุณภาพ สำหรับผลิตภัณฑ์สมุนไพร พ.ศ. 2568 [25]

6. การวิเคราะห์ทางสถิติ

ผลการทดลองเชิงปริมาณจะแสดงในรูปแบบค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าความเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Mean $\pm$ SD) การวิเคราะห์ความแตกต่างของกลุ่มตัวอย่างจะพิจารณาที่ระดับนัยสำคัญทางสถิติ 0.05 ($p < 0.05$) โดยใช้วิธีวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-way ANOVA) ที่มีการใช้ Post hoc test โดยใช้ Tukey's multiple comparisons test สำหรับการเปรียบเทียบกรณีที่มี 3 ตัวแปร ได้แก่ เครื่องดื่มสกัดพร้อมดื่ม เครื่องดื่มผสมมอลโตเดกซ์ตรินร้อยละ 5 และ 10 และ ใช้ t-test สำหรับเปรียบเทียบกรณีที่มี 2 ตัวแปร ได้แก่ เครื่องดื่มผสมมอลโตเดกซ์ตรินร้อยละ 5 และ 10 โดยใช้โปรแกรม GraphPad Prism Version 6

ผลการวิจัย

1. ปริมาณสารสกัด (%Yield) ของเครื่องดื่มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาในรูปแบบสีกัดพร้อมดื่มและผงสกัดขงดื่ม

ภายหลังจากนำเครื่องดื่มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาในรูปแบบสีกัดพร้อมดื่มปริมาณ 10 ลิตร เข้าสู่กระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอย (ภาพที่ 1) พบว่าสามารถให้ปริมาณสารสกัดเท่ากับ $13.57 \pm 1.68\%$ สำหรับเครื่องดื่มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาที่ผสมมอลโตเดกซ์ตรินในอัตราร้อยละ 5 และ 10 มีปริมาณสารสกัดเท่ากับ $21.06 \pm 0.93\%$ และ $19.58 \pm 1.10\%$ ตามลำดับ ในขณะที่สูตรผสมมอลโตเดกซ์ตรินร้อยละ 20 ไม่สามารถคำนวณปริมาณสารสกัดได้ เนื่องจากมีความหนืดสูง ทำให้ไม่สามารถแห้งเป็นผงละเอียดได้และสารสกัดที่ได้มีลักษณะเหนียวติดกับผนังภายในของเครื่องทำแห้งแบบพ่นฝอย จากผลดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการผสมมอลโตเดกซ์ตรินในสัดส่วนร้อยละ 5 และ 10 มีความเหมาะสมต่อการช่วยกักเก็บสารสกัดสมุนไพรได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นจึงเลือกสูตรที่มีมอลโตเดกซ์ตรินร้อยละ 5 และ 10 เพื่อตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพในขั้นตอนต่อไป



ภาพที่ 1 สารสกัดเครื่องดื่มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาที่ผ่านกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอย โดย (A) เครื่องดื่มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาในรูปแบบสีกัดพร้อมดื่ม (ไม่ผสมมอลโตเดกซ์ตริน) (B) เครื่องดื่มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาผสมมอลโตเดกซ์ตรินร้อยละ 5 (C) เครื่องดื่มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาผสมมอลโตเดกซ์ตรินร้อยละ 10 และ (D) มอลโตเดกซ์ตริน



2. การตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์เครื่องต้มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาในรูปแบบผงสกัดขงต้ม

สำหรับการตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพของผลิตภัณฑ์เครื่องต้มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาผสมมอลโตเดกซ์ตรินร้อยละ 5 และ 10 เทียบกับผลิตภัณฑ์เครื่องต้มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาในรูปแบบสกัดพร้อมต้มในคุณสมบัติต่าง ๆ โดยมีรายละเอียดดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 การตรวจสอบคุณสมบัติทางกายภาพของเครื่องต้มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาในรูปแบบผงสกัดขงต้ม เทียบกับผลิตภัณฑ์เครื่องต้มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาในรูปแบบสกัดพร้อมต้ม

ลำดับ	รายการทดสอบ	เครื่องต้มฯ สกัดพร้อมต้ม	ผลการทดสอบ	
			เครื่องต้มฯ ผสมมอลโตเดกซ์ตริน ร้อยละ 5	เครื่องต้มฯ ผสมมอลโตเดกซ์ตริน ร้อยละ 10
1	การละลายน้ำร้อน 100°C (min)	-	2.45±0.19	2.99±0.19 [†]
2	ค่าสี แท็บที่ 1 0 100 100 0 แท็บที่ 2 0 75 100 0 แท็บที่ 3 0 50 100 0 แท็บที่ 4 0 25 100 0 แท็บที่ 5 0 0 100 0	 สีส้ม แท็บที่ 3	 สีส้มอมแดง แท็บที่ 2	 สีส้มอมแดง แท็บที่ 2
3	การตกตะกอน	ไม่พบการตกตะกอน		
4	ค่าความเป็นกรด-เบส (pH)	6.64±0.07	7.69±0.02*	7.76±0.10 [#]
5	ค่าความถ่วงจำเพาะ (g/mL)	1.000±0.000	1.014±0.001*	1.031±0.001 ^{#†}
6	ความหนืด (s)	14.08±0.22	13.88±0.07	13.83±0.11
7	TSS (°Brix)	0±0.0	5±0.0*	9±0.0 ^{#†}
8	ปริมาณความชื้น (%)	-	4.98±0.07	3.87±0.07 [†]

หมายเหตุ: * $p < 0.05$ เครื่องต้มฯ ผสมมอลโตเดกซ์ตรินร้อยละ 5 เทียบกับ เครื่องต้มฯ สกัดพร้อมต้ม

$p < 0.05$ เครื่องต้มฯ ผสมมอลโตเดกซ์ตริน ร้อยละ 10 เทียบกับ เครื่องต้มฯ สกัดพร้อมต้ม

† $p < 0.05$ เครื่องต้มฯ ผสมมอลโตเดกซ์ตริน ร้อยละ 10 เทียบกับ เครื่องต้มฯ ผสมมอลโตเดกซ์ตรินร้อยละ 5

จากตารางที่ 1 พบว่าเครื่องต้มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาที่ผสมมอลโตเดกซ์ตรินในสัดส่วนร้อยละ 5 และ 10 สามารถละลายในน้ำร้อนที่อุณหภูมิ 100°C ได้ดี โดยเครื่องต้มสมุนไพรที่ผสมมอลโตเดกซ์ตรินร้อยละ 5 และ 10 ใช้เวลาในการละลายด้วยน้ำร้อน 100°C เป็นเวลา 2.45±0.19 และ 2.99±0.19 นาที ตามลำดับ โดยเครื่องต้มสมุนไพรที่ผสมมอลโตเดกซ์ตรินร้อยละ 5 ใช้เวลาในการละลายน้อยกว่าเครื่องต้มสมุนไพรที่ผสมมอลโตเดกซ์ตรินร้อยละ 10 แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และไม่เกิดการตกตะกอน

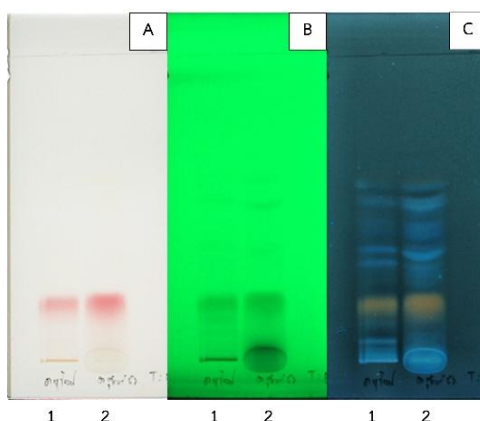
สีของเครื่องต้มในรูปแบบสกัดพร้อมต้ม เมื่อเทียบกับ CMYK Colour Chart มีสีส้มแท็บที่ 3 รหัส C:0 M:50 Y:100 K:0 ขณะที่สูตรผสมมอลโตเดกซ์ตรินร้อยละ 5 และ 10 มีสีส้มอมแดงแท็บที่ 2 รหัส C:0 M:75 Y:100 K:0 ซึ่งสีมีการเปลี่ยนแปลงจากเดิมเนื่องจากผลของการผสมมอลโตเดกซ์ตรินร่วมกับความร้อนในกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอย ค่าความเป็นกรด-เบส (pH) ของเครื่องต้มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาที่ผสมมอลโตเดกซ์ตรินร้อยละ 5 และ 10 อยู่ในช่วง 7.60–7.80 จัดอยู่ในภาวะเป็นกลาง โดยมีความมากกว่าเครื่องต้มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาในรูปแบบสกัดพร้อมต้ม ซึ่งมีค่า pH เท่ากับ 6.64±0.07 (กรดอ่อน) ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เนื่องจากมอลโตเดกซ์ตรินที่ใช้มีค่า pH 8.08±0.06 (เบสอ่อน) จึงทำให้ผลิตภัณฑ์ที่ผสมมอลโตเดกซ์ตรินมีค่า pH เพิ่มขึ้น ผลการวัดความหนืดของเครื่องต้มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาทั้งสามสูตรพบว่าไม่มีความแตกต่างกัน อย่างไรก็ตามค่าเฉลี่ยของความถ่วงจำเพาะและค่า TSS (°Brix) มีแนวโน้ม

เพิ่มขึ้นตามสัดส่วนของมอลโตเดกซ์ทรินที่ผสมร้อยละ 5 และ 10 ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยเป็นผลจากสัดส่วนมอลโตเดกซ์ทรินที่ต่างกัน สำหรับปริมาณความชื้น พบว่าผลิตภัณฑ์ที่ผสมมอลโตเดกซ์ทรินร้อยละ 5 มีความชื้นมากกว่าผลิตภัณฑ์ที่ผสมมอลโตเดกซ์ทรินร้อยละ 10 ซึ่งมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ เมื่อพิจารณาสัดส่วนการใช้ประโยชน์ พบว่าเครื่องต้มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาในรูปแบบสกัดพร้อมดื่ม รับประทานครั้งละ 200 มิลลิลิตร ซึ่งเมื่อนำมาผ่านกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอย ได้สารสกัดเท่ากับ 0.39 กรัม ในขณะที่เครื่องต้มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาสูตรผสมมอลโตเดกซ์ทรินร้อยละ 5 และ 10 เมื่อนำมาผ่านกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอย ได้สารสกัดเท่ากับ 9.36 กรัม และ 18.42 กรัม ตามลำดับ จึงจะสามารถเทียบได้กับสารสกัด 0.39 กรัม ของสูตรสกัดพร้อมดื่ม

จากผลดังกล่าวการศึกษานี้จึงคัดเลือกสูตรที่ผสมมอลโตเดกซ์ทรินร้อยละ 5 เพื่อตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีและฤทธิ์ทางชีวภาพในขั้นตอนต่อไป เนื่องจากสูตรดังกล่าวสามารถช่วยกักเก็บสารสกัดจากสมุนไพรได้ในระดับเทียบเท่ากับสูตรที่มีมอลโตเดกซ์ทรินร้อยละ 10 แต่ใช้ปริมาณมอลโตเดกซ์ทรินน้อยกว่า ซึ่งเหมาะสมต่อการพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์เครื่องต้มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาในรูปแบบผงสกัดขงดื่มเชิงพาณิชย์

3. การตรวจสอบคุณสมบัติทางเคมีของผลิตภัณฑ์เครื่องต้มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาในรูปแบบผงสกัดขงดื่ม

การศึกษานี้มุ่งตรวจสอบเอกลักษณ์ทางเคมีของเครื่องต้มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาในรูปแบบสกัดพร้อมดื่มและเครื่องต้มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาที่ผสมมอลโตเดกซ์ทรินร้อยละ 5 โดยใช้เทคนิคโครมาโทกราฟีแบบชั้นบางเพื่อเปรียบเทียบลักษณะลายพิมพ์นิ้วมือทางเคมีของทั้งสองตัวอย่างตามสัดส่วนการใช้งานจริง ผลการวิเคราะห์พบว่าภายใต้แสงขาวตรวจพบแถบสารจำนวน 1 แถบ ในทั้งสองตัวอย่าง เมื่อส่องด้วยแสงอัลตราไวโอเล็ตที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร พบแถบสารจำนวน 2 แถบ และภายใต้แสงอัลตราไวโอเล็ตที่ความยาวคลื่น 366 นาโนเมตร พบแถบสารจำนวน 6 แถบ ในทั้งสองตัวอย่าง (ดังแสดงในภาพที่ 2 และตารางที่ 2) จากผลการทดสอบดังกล่าวแสดงให้เห็นว่า เครื่องต้มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาในรูปแบบสกัดพร้อมดื่มและสูตรที่ผสมมอลโตเดกซ์ทรินร้อยละ 5 มีลักษณะลายพิมพ์นิ้วมือทางเคมีและค่า R_f ใกล้เคียงกัน ซึ่งบ่งชี้ว่าการแปรรูปด้วยกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอยและการเติมมอลโตเดกซ์ทรินไม่ได้ส่งผลต่อโครงสร้างของสารสำคัญจากสมุนไพรอย่างมีนัยสำคัญ ทำให้ผลิตภัณฑ์ผงสกัดขงดื่มยังคงรักษาเอกลักษณ์ของสารสำคัญได้ใกล้เคียงกับสูตรสกัดพร้อมดื่มต้นแบบ



ภาพที่ 2 TLC chromatogram ของเครื่องต้มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาในรูปแบบสกัดพร้อมดื่มและเครื่องต้มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาผสมมอลโตเดกซ์ทรินร้อยละ 5 โดย (A) ภายใต้แสงขาว (B) ภายใต้แสง UV254 nm และ (C) ภายใต้แสง UV366 nm

Lane 1: เครื่องต้มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาในรูปแบบสกัดพร้อมดื่ม

Lane 2: เครื่องต้มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาผสมมอลโตเดกซ์ทรินร้อยละ 5



ตารางที่ 2 ค่า R_f ของเครื่องตีสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาในรูปแบบสกัดพร้อมดื่มและเครื่องตีสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาในรูปแบบผงสกัดซึ่งตีผสมมอลโตเดกซ์ตรินร้อยละ 5

Detection	TLC fraction	ค่า R _f	
		เครื่องตีมา ในรูปแบบสกัดพร้อมดื่ม	เครื่องตีมา ผสมมอลโตเดกซ์ตรินร้อยละ 5
Normal lighting	1	0.19	0.19
UV254	1	0.19	0.19
	2	0.37	0.35
UV366	1	0.18	0.18
	2	0.31	0.30
	3	0.37	0.35
	4	0.44	0.43
	5	0.52	0.51
	6	0.57	0.57

4. การตรวจสอบปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวม (Total phenolic content) ปริมาณสารประกอบฟลาโวนอยด์รวม (Total flavonoid content) และฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของเครื่องตีสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาในรูปแบบผงสกัดขงดื่ม

การศึกษาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวมและสารประกอบฟลาโวนอยด์รวมของเครื่องตีสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนามีค่าเท่ากับ 151.6 ± 5.4 mg GAE/g extract และ 37.9 ± 2.8 mg CE/g extract ตามลำดับ ขณะที่ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวมและสารประกอบฟลาโวนอยด์รวมของเครื่องตีสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาที่ผสมมอลโตเดกซ์ตรินร้อยละ 5 พบว่ามีค่าเท่ากับ 34.7 ± 7.1 mg GAE/g extract และ 2.7 ± 0.2 mg CE/g extract ตามลำดับ เมื่อนำสารสกัดจากเครื่องตีสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนามาวิเคราะห์ความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH และ ABTS พบว่าสามารถยับยั้งอนุมูลอิสระชนิด DPPH และ ABTS โดยมีค่า IC₅₀ เท่ากับ 119.2 ± 2.5 µg/mL และ 36.0 ± 2.8 µg/mL ตามลำดับ ขณะที่เครื่องตีดังกล่าวที่นำมาผสมกับมอลโตเดกซ์ตรินร้อยละ 5 ยังแสดงฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระชนิด DPPH และ ABTS โดยมีค่า IC₅₀ เท่ากับ 857.5 ± 52.3 µg/mL และ 336.2 ± 12.9 µg/mL ตามลำดับ จากผลการศึกษาดังกล่าวพบได้ว่าสารสกัดจากเครื่องตีสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนามีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่ดีกว่าเครื่องตีสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาที่ผสมกับมอลโตเดกซ์ตรินร้อยละ 5 ทั้งนี้เนื่องจากการผสมมอลโตเดกซ์ตรินทำให้ความเข้มข้นของสารสกัดลดลง

จากผลการศึกษาดังกล่าวสามารถสรุปได้ว่า เครื่องตีสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาที่ผสมมอลโตเดกซ์ตรินร้อยละ 5 ยังคงมีสารออกฤทธิ์สำคัญจากสมุนไพรอยู่ในระดับที่สามารถแสดงฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระได้ ซึ่งสะท้อนถึงศักยภาพในการคงคุณสมบัติทางชีวภาพของสารสำคัญภายหลังการผ่านกระบวนการทำแห้งแบบพ่นฝอย

5. การตรวจสอบอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์เครื่องตีสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาในรูปแบบผงสกัดขงดื่ม

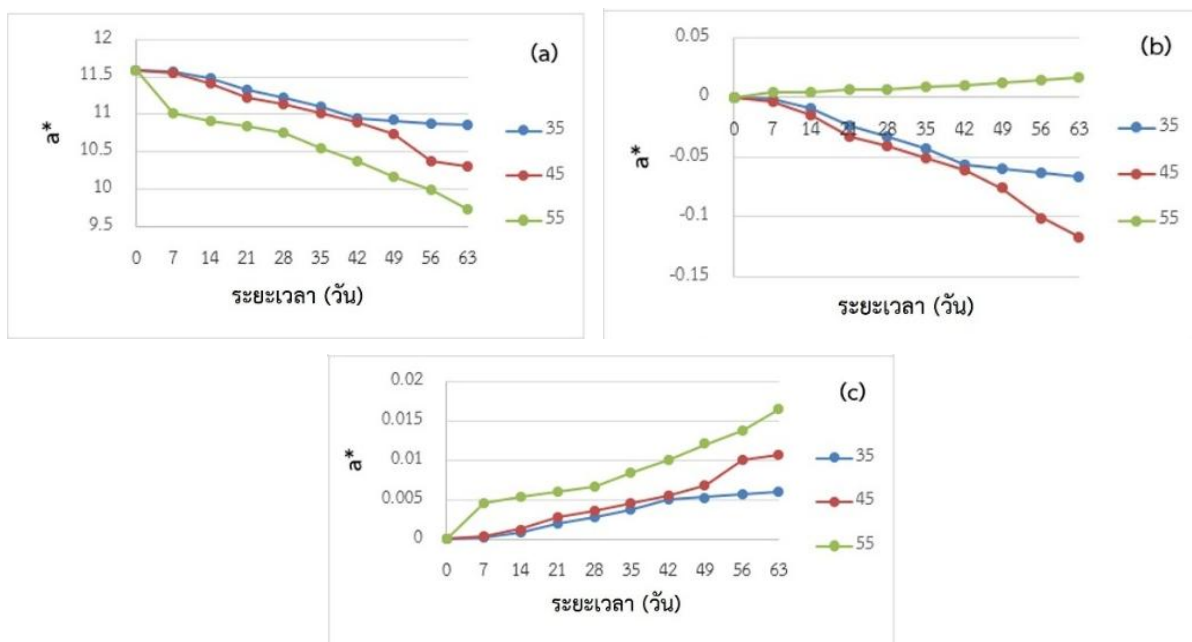
5.1 การตรวจสอบการเสื่อมสภาพในสภาวะเร่ง

การประเมินอายุการเก็บรักษาทางผู้วิจัยได้เลือกค่าดัชนี a* ที่ระดับครึ่งหนึ่ง ของค่าสี a* เริ่มต้น หรือมีค่าลดลง 50% เป็นตัวตัดสินอายุการเก็บของผลิตภัณฑ์เครื่องตีสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาผสมมอลโตเดกซ์ตรินร้อยละ 5 เนื่องจากผลิตภัณฑ์ของงานวิจัย เป็นผลิตภัณฑ์ที่ขงดื่มเพื่อสุขภาพ ดังนั้นในการคัดเลือกดัชนีเพื่อประเมินอายุการเก็บรักษาจึงเลือกค่าสี a* คือ ค่าความเป็นสีแดง เพราะค่าสีแดงบ่งบอกถึงความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระของผลิตภัณฑ์ (ทำการวัดด้วยวิธี DPPH ซึ่งมีความสัมพันธ์กับค่า a* โดยมีค่า correlation coefficient (r) เท่ากับ 0.9856) เมื่อทำการเก็บรักษาในสภาวะเร่ง

พบว่าค่าสีแดงมีแนวโน้มลดลง บ่งบอกถึงความสามารถในการต้านอนุมูลอิสระที่ลดลงตามไปด้วย จึงได้คัดเลือกค่าสีแดงเป็นดัชนีในการประเมินอายุการเก็บรักษา และเกณฑ์พิจารณาที่ค่าสีลดลง 50% มาจากผลที่สอดคล้องกับฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระที่ลดลงอยู่ในระดับต่ำกว่า 50% ซึ่งถือว่าต่ำและอาจไม่มีนัยสำคัญทางสุขภาพ (มีฤทธิ์น้อย)

จากการศึกษาการประเมินอายุการเก็บของสารสกัดสมุนไพรอโศก โดยเลือกใช้ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดเป็นดัชนีบ่งบอกอายุการเก็บผลิตภัณฑ์ พบว่าการสลายตัวของสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมดเป็นไปตามความสัมพันธ์ของปฏิกิริยาอันดับหนึ่ง และอายุการเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 35°C มีอายุการเก็บนาน 27 เดือน หรือประมาณ 2 ปี 2 เดือน อุณหภูมิ 45°C มีอายุการเก็บ 20 เดือน และที่อุณหภูมิ 55°C มีอายุการเก็บรักษา 16 เดือน [26] อย่างไรก็ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์สมุนไพรแห่งชาติ (มผช.996/2556) ระบุเรื่องเกณฑ์ของความชื้นในผลิตภัณฑ์ต้องไม่เกิน 10% [27] และจากการทดลองได้ทำการวัดค่าน้ำอิสระทุกสัปดาห์ พบว่าวันสุดท้ายของการเก็บรักษา ผลิตภัณฑ์ยังคงมีค่าน้ำอิสระไม่เกิน 0.6 ซึ่งบ่งบอกถึงมีระยะเวลาการเก็บรักษาที่ยาวนาน แต่เมื่อพิจารณาค่าน้ำอิสระทั้ง 3 อุณหภูมิ ทุกสัปดาห์พบว่า ค่าน้ำอิสระที่อุณหภูมิ 45°C และ 55°C มีค่าที่ต่ำกว่าอุณหภูมิ 35°C สาเหตุก็เนื่องมาจากอุณหภูมิที่สูงขึ้นมีผลทำให้น้ำระเหยออกจากผลิตภัณฑ์อย่างช้า ๆ และซึมผ่านบรรจุภัณฑ์ออกไป ส่งผลทำให้ปริมาณน้ำอิสระลดลง จึงไม่สามารถนำมาเป็นดัชนีประเมินอายุการเก็บรักษาโดยใช้สมการอาร์เรเนียสได้ เพราะทฤษฎีการประเมินอายุการเก็บของอาร์เรเนียสคือ ค่าคงที่ของการเสื่อมเสีย (k) จะเพิ่มขึ้นตามอุณหภูมิที่เพิ่มขึ้น

เมื่อนำข้อมูลมาสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าสีแดงที่เปลี่ยนแปลงไปและเวลา (ภาพที่ 3) เพื่อหาอันดับของปฏิกิริยา ผลการวิเคราะห์ข้อมูลจากการสร้างกราฟแสดงความสัมพันธ์ พบว่าการเปลี่ยนแปลงค่าสี a^* เป็นปฏิกิริยาอันดับ 1 เมื่อเวลาในการเก็บรักษามากขึ้น ค่าสีแดงมีแนวโน้มลดลง (อัตราการเกิดปฏิกิริยาขึ้นอยู่กับสารตั้งต้นกำลังหนึ่ง) มีค่า R^2 สูงที่สุด ดังตารางที่ 3



ภาพที่ 3 ปฏิกิริยาอันดับศูนย์ 0 (a) ปฏิกิริยาอันดับ 1 (b) ปฏิกิริยาอันดับ 2 (c)



ตารางที่ 3 ค่า R-square ของค่าสี (a*) ผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาผสมมอลโตเดกซ์ตรินร้อยละ 5 ที่อันดับปฏิกิริยาต่างๆ

อันดับปฏิกิริยา	R-square		
	35°C	45°C	55°C
ปฏิกิริยาอันดับ 0	0.9621	0.971	0.9579
ปฏิกิริยาอันดับ 1	0.9758	0.9748	0.9653
ปฏิกิริยาอันดับ 2	0.9644	0.9617	0.9615

ตารางที่ 4 ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา (Reaction rate constant) ของค่าสีผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาผสมมอลโตเดกซ์ตรินร้อยละ 5 ที่อุณหภูมิต่าง ๆ

อุณหภูมิการเก็บรักษา	ค่าคงที่ของปฏิกิริยาอันดับ 1 (1/สัปดาห์)
35°C	0.0013
45°C	0.0018
55°C	0.002

ตารางที่ 5 อายุการเก็บรักษาผลิตภัณฑ์ที่อุณหภูมิการเก็บรักษาต่าง ๆ

อุณหภูมิการเก็บรักษา	อายุการเก็บรักษา (วัน)
35°C	533
45°C	385
55°C	346

จากตารางที่ 4 พบว่า ผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาผสมมอลโตเดกซ์ตรินร้อยละ 5 มีค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยาของอุณหภูมิ 35°C, 45°C และ 55°C เท่ากับ 0.0013, 0.0018 และ 0.002 ตามลำดับ และจากการคำนวณอายุการเก็บรักษาตามสมการอันดับปฏิกิริยาที่ 1 จะได้อายุการเก็บดังตารางที่ 5

$$\ln (C_A / C_{AO}) = -kt$$

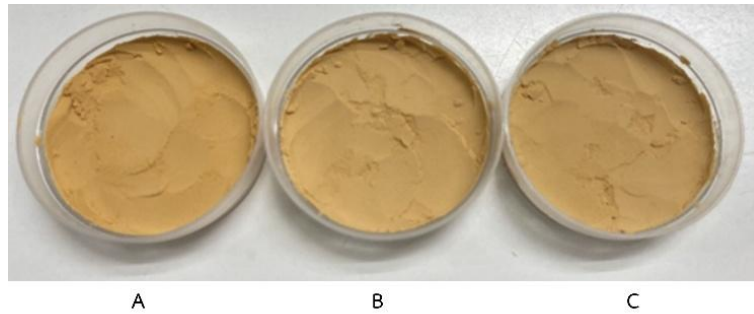
เมื่อ C_A คือ ปริมาณหรือความเข้มข้นของสารที่เวลาใด ๆ

C_{AO} คือ ปริมาณหรือความเข้มข้นของสารที่เวลาเริ่มต้น

k คือ ค่าคงที่ของการเกิดปฏิกิริยา

t คือ เวลาในการเก็บรักษา

จากผลการทดลองจะเห็นได้ว่า การเปลี่ยนแปลงค่าสีของผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาผสมมอลโตเดกซ์ตรินร้อยละ 5 ในสภาวะเร่ง ค่อนข้างเปลี่ยนแปลงอย่างช้า ๆ นั้นหมายความว่าอายุการเก็บรักษาของผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาผสมมอลโตเดกซ์ตรินร้อยละ 5 จะมีอายุที่ยาวนานไปด้วย อาจเป็นได้ว่า รงควัตถุของสีสมุนไพรค่อนข้างมีความคงตัวต่ออุณหภูมิสูง (ภาพที่ 4) จะเห็นได้จากอายุการเก็บรักษา อุณหภูมิ 35°C, 45°C และ 55°C เท่ากับ 533 วัน (ประมาณ 1 ปี 4 เดือน), 385 วัน (ประมาณ 1 ปี) และ 346 วัน (ประมาณ 9 เดือน) ตามลำดับ



ภาพที่ 4 สีของผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาผสมมอลโตเดกซ์ตรินร้อยละ 5 โดย (A) อุณหภูมิ 35°C (B) อุณหภูมิ 45°C และ (C) อุณหภูมิ 55°C ที่ระยะเวลาการเก็บรักษา 63 วัน

5.2 การตรวจสอบการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์

สำหรับการตรวจสอบการปนเปื้อนเชื้อจุลินทรีย์ในเครื่องดื่มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาในรูปแบบผงสกัดขงดื่มที่ผสมมอลโตเดกซ์ตรินร้อยละ 5 เป็นระยะเวลาทั้งหมด 9 เดือน พบจำนวน APC และจำนวนยีสต์และราต่ำกว่า 100 CFU/g ไม่พบการปนเปื้อนของเชื้อ *Escherichia coli* ในเครื่องดื่มสมุนไพร 1 กรัม ไม่พบการปนเปื้อนของเชื้อ *Salmonella* spp. ในเครื่องดื่มสมุนไพร 25 กรัม และไม่พบการปนเปื้อนของเชื้อ *Clostridium* spp. ในเครื่องดื่มสมุนไพร 1 กรัม ซึ่งเป็นไปตามค่ามาตรฐานในการตรวจวัดผลิตภัณฑ์สมุนไพรที่ประกอบด้วยสารสกัดหรือพืชสมุนไพร (ที่มีหรือไม่มีสารปรุงแต่ง) ซึ่งมีการรับประทานในลักษณะชงด้วยน้ำเดือด ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข เรื่อง เกณฑ์มาตรฐาน ค่าความบริสุทธิ์ หรือคุณลักษณะอื่นอันมีความสำคัญต่อคุณภาพ สำหรับผลิตภัณฑ์สมุนไพร พ.ศ. 2568 [25] ดังแสดงในตารางที่ 6

ตารางที่ 6 การตรวจสอบการปนเปื้อนเชื้อจุลินทรีย์ในเครื่องดื่มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาในรูปแบบผงสกัดขงดื่มที่ผสมมอลโตเดกซ์ตรินร้อยละ 5

เชื้อจุลินทรีย์	เกณฑ์มาตรฐาน	การปนเปื้อนเชื้อจุลินทรีย์ (เดือน)								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
Total	$< 5 \times 10^7$	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100
Aerobic Microbial	CFU/g	CFU/g	CFU/g	CFU/g	CFU/g	CFU/g	CFU/g	CFU/g	CFU/g	CFU/g
Total Yeast and Mold	$< 5 \times 10^5$	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100	< 100
	CFU/g	CFU/g	CFU/g	CFU/g	CFU/g	CFU/g	CFU/g	CFU/g	CFU/g	CFU/g
<i>Escherichia coli</i>	$< 10^3$	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
	CFU/g									
<i>Salmonella</i> spp.	ไม่พบใน 25 g	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND
<i>Clostridium</i> spp.	ไม่พบใน 1 g	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND	ND

ND = Not Detected

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

เครื่องดื่มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาเป็นตำรับสมุนไพรพื้นบ้านภาคเหนือ (ล้านนา) ที่พัฒนาขึ้นจากภูมิปัญญาการแพทย์แผนไทย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อส่งเสริมสุขภาพและชะลอวัย ตำรับดังกล่าวประกอบด้วยสมุนไพรหลายชนิดที่มี



สรรพคุณครอบคลุมการบำรุงและแก้ไขปัญหาสุภาพ เช่น อาการปวดเมื่อย นอนไม่หลับ ท้องผูก เบื่ออาหาร และความอยากอาหารลดลง [3] ในปัจจุบันเครื่องต้มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาได้รับการนำไปใช้ในงานบริการดูแลสุขภาพสำหรับผู้สูงอายุของโรงพยาบาลสาธารณสุขแพทยแผนไทย มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย โดยใช้กระบวนการผลิตที่ประยุกต์เทคโนโลยีสมัยใหม่ เช่น การใช้หม้อต้มยาสมุนไพรอัตโนมัติเพื่อให้การผลิตมีความสะดวกและได้มาตรฐาน อย่างไรก็ตามผลิตภัณฑ์ยังคงอยู่ในรูปของเหลวซึ่งมีข้อจำกัดด้านอายุการเก็บรักษา เนื่องจากมีความชื้นสูงและเสี่ยงต่อการเสื่อมสภาพของสารออกฤทธิ์เพื่อเพิ่มความสะดวกในการบริโภคและยืดอายุการเก็บรักษา การศึกษาจึงมุ่งพัฒนาเครื่องต้มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาให้อยู่ในรูปแบบผงสกัดขี้ผึ้ง โดยการพัฒนาเครื่องต้มสมุนไพรจากรูปแบบสกัดพร้อมต้มซึ่งอยู่ในรูปแบบของเหลว ให้เป็นผลิตภัณฑ์ชนิดผงสกัดขี้ผึ้งโดยใช้เทคนิคการทำแห้งแบบพ่นฝอย (Spray Drying) สามารถช่วยแก้ไขข้อจำกัดของผลิตภัณฑ์ในรูปแบบของเหลวได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในด้านอายุการเก็บรักษา และการคงตัวของคุณภาพผลิตภัณฑ์สอดคล้องกับการศึกษาของสโรบล สโรชวิสิฐ ที่ศึกษาเกี่ยวกับผลของอุณหภูมิการอบแห้งและสารช่วยอบแห้งต่อคุณภาพของน้ำสับปะรดผงโดยวิธีอบแห้งแบบพ่นฝอย [28] ซึ่งการทำแห้งแบบพ่นฝอยเป็นกระบวนการที่ทำให้สารสกัดสูญเสียน้ำอย่างรวดเร็ว ส่งผลให้ค่าความชื้นของผลิตภัณฑ์ลดลง ซึ่งช่วยลดความเสี่ยงต่อการเสื่อมสภาพของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ รวมถึงลดโอกาสการเจริญของจุลินทรีย์ สอดคล้องกับหลักการที่ว่า การลดปริมาณน้ำในผลิตภัณฑ์อาหารสามารถช่วยยืดอายุการเก็บรักษาได้ นอกจากนี้การเปลี่ยนสภาพผลิตภัณฑ์ให้อยู่ในรูปแบบผงยังช่วยลดปัญหาการตกตะกอนและการเปลี่ยนสีที่มักพบในเครื่องต้มสมุนไพรรูปแบบของเหลว สอดคล้องกับงานวิจัยของพิไลกร อินธิปัญญา ได้ศึกษาเกี่ยวกับผลของกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยต่อคุณภาพของน้ำหม่อนผสมน้ำผึ้งชนิดผง [29] ผลการเติมมอลโตเดกซ์ตรินในระดับร้อยละ 10–20 (w/v) พบว่าสามารถทำหน้าที่เป็นสารช่วยพ่นแห้งได้อย่างเหมาะสม โดยช่วยลดการเกาะติดของผงสกัดบริเวณผนังเครื่องพ่นแห้ง ส่งผลให้ได้ผงสกัดที่มีลักษณะร่วน ไม่จับตัวเป็นก้อน และมีสีสม่ำเสมอ อีกทั้งยังช่วยเพิ่มความสามารถในการละลายน้ำของผลิตภัณฑ์ ซึ่งเป็นคุณสมบัติสำคัญของเครื่องต้มสมุนไพรชนิดผงสกัดขี้ผึ้ง ทั้งนี้มอลโตเดกซ์ตรินยังมีบทบาทในการช่วยห่อหุ้มสารสกัดจากสมุนไพรไว้ ทำให้สามารถคงคุณค่าของสารออกฤทธิ์ได้ดีกว่าผลิตภัณฑ์ในรูปแบบของเหลวที่มีความชื้นสูง ส่งผลให้ผลิตภัณฑ์ผงสกัดมีเสถียรภาพสูงกว่า มีความสะดวกต่อการชงดื่มและพกพา อีกทั้งยังมีอายุการเก็บรักษาที่ยาวนานขึ้นเนื่องจากมีปริมาณความชื้นต่ำและเสถียรต่อการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชัน [9]

การศึกษาเครื่องต้มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาให้เป็นผงสกัดครั้งนี้โดยใช้เทคนิคการทำแห้งแบบพ่นฝอยได้กำหนดค่าการทำงานของเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่อุณหภูมิเข้า 150°C อุณหภูมิออก 90°C และอัตราการป้อนสารละลาย 10 ลิตรต่อชั่วโมง [8] พร้อมการเติมมอลโตเดกซ์ตรินในสัดส่วนร้อยละ 5, 10 และ 20 ผลการทำแห้งพบว่าสูตรผสมมอลโตเดกซ์ตรินร้อยละ 5 และ 10 ให้ปริมาณสารสกัดเท่ากับ $21.06 \pm 0.93\%$ และ $19.58 \pm 1.10\%$ ตามลำดับ ส่วนสูตรที่มีมอลโตเดกซ์ตรินร้อยละ 20 ไม่สามารถทำให้แห้งเป็นผงละเอียดได้เนื่องจากความหนืดสูง ซึ่งมีการศึกษาอื่นที่เข้ามาช่วยอธิบายว่าการผสมมอลโตเดกซ์ตรินร้อยละ 20–30 จำเป็นต้องใช้อุณหภูมิเข้า 160–200°C จึงจะทำให้สารสกัดที่ได้จากเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยมีความแห้งและไม่เหนียว [30] โดยการศึกษาครั้งนี้ได้เลือกใช้อุณหภูมิเข้าที่ 150°C จึงเป็นเหตุหนึ่งที่ไม่สามารถทำการคำนวณปริมาณสารสกัดที่มีการผสมมอลโตเดกซ์ตรินร้อยละ 20 ได้ ดังนั้นการทดสอบคุณสมบัติทางกายภาพของเครื่องต้มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาในรูปแบบสกัดพร้อมต้มและในสูตรที่ผสมมอลโตเดกซ์ตรินร้อยละ 5 และ 10 พบว่าทั้งสองสูตรมีคุณสมบัติใกล้เคียงกัน ได้แก่ ไม่มีการตกตะกอน สีของผลิตภัณฑ์อยู่ในโทนส้มอมแดง ซึ่งแตกต่างจากสีส้มของสูตรดั้งเดิม ค่า pH อยู่ระหว่าง 7.60–7.80 (เป็นกลาง) และเมื่อวัดค่าความถ่วงจำเพาะและค่า TSS (°Brix) พบว่ามีค่ามากขึ้นตามสัดส่วนของมอลโตเดกซ์ตรินที่เติม สำหรับคุณสมบัติทางเคมี พบว่าผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟีแบบชั้นบาง [18] แสดงให้เห็นว่าสูตรผสมมอลโตเดกซ์ตรินร้อยละ 5 ยังคงลักษณะลายพิมพ์นิ้วมือของสารสำคัญทางเคมีใกล้เคียงกับสูตรสกัดพร้อมต้มต้นแบบ นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์ปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวมและฟลาโวนอยด์รวม ซึ่งเป็นสารสำคัญที่สามารถพบได้ในพืชสมุนไพรทั่วไป เป็นกลุ่มสารที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพที่หลากหลาย โดยเฉพาะฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ผลการศึกษาพบว่าเครื่องต้มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาผสมมอลโตเดกซ์ตรินร้อยละ 5 สามารถกักเก็บกลุ่มสารสำคัญเหล่านี้ไว้ได้จึง



ทำให้แสดงฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระได้ รวมถึงสามารถเก็บรักษาได้นาน 9 เดือน โดยยังคงความปลอดภัยจากการปนเปื้อนของเชื้อจุลินทรีย์ก่อโรค เนื่องจากการใช้เครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอยที่ใช้ความร้อน 150°C ทำให้เกิดการฆ่าเชื้อและลดการปนเปื้อนเชื้อจุลินทรีย์เป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน และเมื่อทดสอบการเก็บรักษาภายใต้สภาวะเร่งพบว่าผงสกัดซึ่งดื่มสามารถเก็บรักษาได้ที่อุณหภูมิ 35°C, 45°C และ 55°C เป็นเวลา 533, 385 และ 346 วัน ตามลำดับ

ผลลัพธ์จากการดำเนินการดังกล่าว ทำให้สามารถผลิตเครื่องดื่มสมุนไพรเสริมสุขภาพตำรับล้านนาในรูปแบบผงสกัดซึ่งดื่มที่มีความสะดวกต่อการใช้งาน เหมาะสำหรับผู้บริโภคที่ต้องการดูแลสุขภาพด้วยสมุนไพร อีกทั้งยังรักษาคุณสมบัติของสารออกฤทธิ์ทางยาและฤทธิ์ส่งเสริมสุขภาพไว้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณทุนอุดหนุนการวิจัยประจำปี 2568 จากกองทุนสนับสนุนงานวิจัยเพื่อการพัฒนา สถาบันวิจัยและพัฒนามหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย ที่มอบทุนสนับสนุนในการทำวิจัยครั้งนี้ ทำให้งานวิจัยสำเร็จลุล่วงด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

1. คณะกรรมการนโยบายสมุนไพรแห่งชาติ. แผนปฏิบัติการด้านสมุนไพรแห่งชาติ ฉบับที่ 2 พ.ศ. 2566 – 2570. พิมพ์ครั้งที่ 2. นนทบุรี: กองสมุนไพรเพื่อเศรษฐกิจ กรมการแพทย์แผนไทยและการแพทย์ทางเลือก กระทรวงสาธารณสุข; 2566.
2. โพธิ์ทอง ประณีตพลกรัง. เทคนิคการอบแห้งแบบพ่นฝอยสำหรับอบแห้งผลผลิตทางการเกษตร. วารสารวิจัย มทร.ศรีวิชัย 2563;12(2):347-61.
3. นภาพร ณ อุโมงค์, สุวดี พลนรัตน์, กันยานุช เทาประเสริฐ, หทัยกาญจน์ เยาวบุตร, สมฤทัย ยังวรรณ. การพัฒนาผลิตภัณฑ์สมุนไพรเสริมคุณภาพชีวิตผู้ป่วยมะเร็งระยะสุดท้าย [รายงานวิจัย]. เชียงราย:วิทยาลัยการแพทย์พื้นบ้านและการแพทย์ทางเลือก มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงราย; 2567.
4. ศิริพร สอนสมบูรณ์สุข. การพัฒนาผลิตภัณฑ์มะตูมผงสำเร็จรูปด้วยการทำแห้งพ่นฝอย. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตรและอาหาร สำนักวิชาวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. นครราชสีมา; 2561.
5. ปฐมพงศ์ สมัครการ. การศึกษากระบวนการผลิตและอายุการเก็บรักษาน้ำข้าวคั่วผงพร้อมดื่มด้วยเครื่องอบแห้งแบบพ่นฝอย. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต คณะเทคโนโลยีการเกษตรและอุตสาหกรรมเกษตร, บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ พระนครศรีอยุธยา; 2557.
6. Xiao Z, Xia J, Zhao Q, Niu Y, Zhao D. Maltodextrin as wall material for microcapsules: A review. Carbohydr Polym 2022;298:120113.
7. บริษัท คอนเวอร์แซนต์ เทคโนโลยี จำกัด. Decoction Packaging Machine [คู่มือการใช้งาน]. กรุงเทพมหานคร: บริษัท คอนเวอร์แซนต์ เทคโนโลยี จำกัด; 2552.
8. บริษัท ยูโร-เบสท์ เทคโนโลยี จำกัด. คู่มือการใช้งานเครื่อง Spray Dryer [คู่มือการใช้งาน]. กรุงเทพมหานคร: บริษัท ยูโร-เบสท์ เทคโนโลยี จำกัด; 2552.
9. Mutavski Z, Vidovic S, Lazarevic Z, Ambrus R, Motzwicler-Nemeth A, Krunoslav T, et al. Stabilization and Preservation of Bioactive Compounds in Black Elderberry By-Product Extracts Using Maltodextrin and Gum Arabic via Spray Drying. Molecules 2025;14(7):723.
10. วอนลี ลอคำเอื้อง, กันตภาส กังสุวรรณ, นิรมล อุดมอ่าง. การพัฒนาผลิตภัณฑ์เครื่องดื่มชาเขียวผสมข้าวกล้องชนิดขละลาย. ใน: เอกสารประกอบการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 51 วันที่ 5-7 ก.พ. 2556. สาขา



- ส่งเสริมการเกษตรและคหกรรมศาสตร์, สาขาอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ. 2556. หน้า 455-63.
11. DTF PRINTING UK. [Internet]. 2025 [cited 2025 Oct 10]. Available from: <https://www.dtf-printinguk.co.uk>
 12. อีรณันท์ ธัญชัย, วนิษา ปันฟ้า, วิฑิตร์ตัน ชัยชนะ, กนกอร เพียรสูงเนิน. แนวทางการพัฒนาต้นแบบผลิตภัณฑ์น้ำยาบ้วนปากสมุนไพร. วารสารก้าวหน้าโลกวิทยาศาสตร์ 2569;26(1):199-220.
 13. อติศักดิ์ จูมวงษ์, วิทวัส เกตุดี. ผลของระยะเวลาในการชงชากับคุณภาพทางกายภาพ เคมี กิจกรรมต้านอนุมูลอิสระ และคุณภาพทางประสาทสัมผัสของชาเขียวภูหาลาน. วารสารเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี 2563;1(1):28-37.
 14. ปรีพัช เงินงาม, ชัยนรินทร์ เรือนเจริญ, พรพรรณ มณีวรรณ, สุวนันท์ แก้วจันทา, ศิวพงษ์ ต้นสุวรรณวงศ์. การพัฒนารูปแบบยาหมวนประสมสมุนไพรสำหรับเสริมการรักษาโรคหืด. วารสารสุขภาพและสิ่งแวดล้อมศึกษา 2566;8(3):79-87.
 15. ศิวพงษ์ ต้นสุวรรณวงศ์, มณฑนา คำอ้าย, นิศรา ชัยวงศ์, อีรณันท์ ธัญชัย. การศึกษาเพื่อพัฒนาผลิตภัณฑ์ต้นแบบสมุนไพรสเปรย์พอลิเอโรซอล. วารสารวิจัยและพัฒนา วไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ 2568;20(3):232-45.
 16. วรณวรรค์ รัตนนิคม. ความถูกต้องและความแม่นยำของผลการทดสอบ Atterberg limit จากการทดสอบหลายวิธี [รายงานวิจัย]. ชลบุรี: คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา; 2560.
 17. สุภาวดี แสนทวีสุข. น้ำมะขามป้อมผงกึ่งสำเร็จรูปโดยการทำให้แห้งแบบโฟม-แมท. ใน: เอกสารประกอบการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 52 วันที่ 4-7 ก.พ. 2557. สาขาอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ; 2557. หน้า 33-40.
 18. พรพรรณ ก่อใจ, ศิวพงษ์ ต้นสุวรรณวงศ์, กัญยานุช เทาประเสริฐ, ยิ่งยง เทาประเสริฐ, จักรกฤษณ์ คณารีย์. การนำเทคนิคโครมาโทกราฟีแบบชั้นบางมาปรับใช้ในกระบวนการตรวจสอบคุณภาพพืชสมุนไพรของแพทย์แผนไทย (กรณีศึกษาขมิ้นชัน). ใน: เอกสารประกอบการประชุมวิชาการระดับชาติ พะเยาวิจัย ครั้งที่ 9 วันที่ 23-24 มกราคม 2563. มหาวิทยาลัยพะเยา. พะเยา; 2563. หน้า 276-7.
 19. Chumphukam O, Pintha K, Khanaree C, Chewonarin T, Chaiwangyen W, Tantipaiboonwong P, et al. Potential anti-mutagenicity, antioxidant, and anti-inflammatory capacities of the extract from perilla seed meal. J Food Biochem 2018;42(11):e12556.
 20. Min B, McClung AM, Chen MH. Phytochemicals and antioxidant capacities in rice brans of different color. J Food Sci 2011;76(1):C117-26.
 21. Wu Q, Er-Bu A, Liang X, Luan S, He C, Yin L, et al. Determination of the main naphthoquinones in *Onosma hookeri* Clarke. var. *longiflorum* Duthie and its optimization of the ultrasound-assisted extraction using response surface methodology. J Food Sci 2020;85(2):357-65.
 22. Choosuk N, Meesuk P, Renumarn P, Phungamngoen C, Jakkranuhwat N. Kinetic Modeling of Quality Changes and Shelf Life Prediction of Dried Coconut Chips. Processes 2022;10(7):1392.
 23. พรพรรณ ก่อใจ, เกียรติภูมิ ลาภิโย, จักรกฤษณ์ คณารีย์. การศึกษาการปนเปื้อนโลหะหนักและเชื้อจุลินทรีย์ในดีปลีที่เพาะปลูกในพื้นที่จำกัด. วารสารวิจัยและส่งเสริมวิชาการเกษตร 2566;40(3):43-54.
 24. กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์ กระทรวงสาธารณสุข. ตำรามาตรฐานยาสมุนไพรไทย (Thai Herbal Pharmacopoeia) ฉบับ พ.ศ. 2564. นนทบุรี: กรมวิทยาศาสตร์การแพทย์; 2563.
 25. กระทรวงสาธารณสุข. ประกาศกระทรวงสาธารณสุข เรื่อง เกณฑ์มาตรฐาน ค่าความบริสุทธิ์ หรือคุณลักษณะอื่นอันมีความสำคัญต่อคุณภาพ สำหรับผลิตภัณฑ์สมุนไพร พ.ศ. 2568. ราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 142 ตอนพิเศษ 40 ง. (ลงวันที่ 31 มกราคม 2568). [อินเทอร์เน็ต]. 2568 [เข้าถึงเมื่อ 23 ม.ค. 2569]. เข้าถึงได้จาก: <https://herbal.fda.moph.go.th/law-herbal/herbal3-54>



26. ดวงพร อมรเลิศพิศาล, กาญจนา นาคประสม. การพัฒนาสูตรผลิตภัณฑ์สารสกัดสมุนไพรอัดเม็ดและการประเมินอายุการเก็บรักษา. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา 2565;27(1):504-23.
27. กระทรวงอุตสาหกรรม. ประกาศสำนักงานมาตรฐานผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม เรื่อง มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนสมุนไพรรวมแห้งขิงต้ม (ฉบับที่ 1812 มาตรฐานเลขที่ มผช. 996/2556). [อินเทอร์เน็ต]. 2556 [เข้าถึงเมื่อ 24 ม.ค. 2569]. เข้าถึงได้จาก: [https://tcps.tisi.go.th/pub/tcps0996_56\(สมุนไพรรวมแห้งขิงต้ม\).pdf](https://tcps.tisi.go.th/pub/tcps0996_56(สมุนไพรรวมแห้งขิงต้ม).pdf)
28. สโรบล สโรชวิสิต, ชัยรัตน์ ตั้งดวงดี. ผลของอุณหภูมิการอบแห้งและสารช่วยอบแห้งต่อคุณภาพของน้ำสับปะรดผงโดยวิธีอบแห้งแบบพ่นฝอย. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร 2554;34(3):203-15.
29. พิไลรัก อินธิปัญญา, ธนกิจ ถาหมี. ผลของกระบวนการอบแห้งแบบพ่นฝอยต่อคุณภาพของน้ำหม่อนผสมน้ำผึ้งชนิดผง. วารสารวิชาการเกษตร 2557;32(2):139-53.
30. Chong SY, Wong CW. Effect of spray dryer inlet temperature and maltodextrin concentration on colour profile and total phenolic content of Sapodilla (*Manilkara zapota*) powder. Int Food Res J 2017;24(6):2543-8.



การเปรียบเทียบข้อมูลเมตาโบโลมิกส์แบบไม่เจาะจงและฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระของชำแดงและ
ชำหลวงที่ปลูกในจังหวัดสมุทรปราการ

Comparative Untargeted Metabolomics and Antioxidant Activities of *Alpinia
siamensis* K. Schum. and *Alpinia galanga* (L.) Willd. Cultivated in Samut Prakan
Province

สรมน สุทิน¹ กรรณิการ์ แก้วกิม^{1*} ปิยนันท์ น้อยรอด¹ และ กฤษกมล ณ จอม²

¹สาขาวิชาวิทยาศาสตร์กายภาพ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ สมุทรปราการ 10540

²ภาควิชาวิทยาศาสตร์การอาหาร คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ 10900

Soramon Sutin¹, Kannika Keawkim^{1*}, Peeyanan Noirod¹, and Kriskamol Na jom²

¹Division of Physical Science, Faculty of Science and Technology, Huachiew Chalermprakiet University,
Samutprakarn 10540

²Department of Food Science and Technology, Faculty of Agro-Industry, Kasetsart University, Bangkok, 10900

*Corresponding author: k.kannika2252@gmail.com

Received: 23 January 2026/ Revised: 20 March 2026/ Accepted: 23 March 2026

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อเปรียบเทียบองค์ประกอบทางเคมี รวมถึงปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระของชำสองชนิด ได้แก่ ชำแดงและชำหลวง ซึ่งเป็นชนิดชำที่ปลูกมากในจังหวัดสมุทรปราการ โดยศึกษาสารที่เป็นองค์ประกอบในส่วนต่าง ๆ ของพืช ได้แก่ เหง้า (แก่และอ่อน) ลำต้นเทียม ใบ และดอก จากการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค UHPLC-Hi-Res-Orbitrap-MS/MS พบว่าชำแดงมีความหลากหลายของสารฟลาโวนอยด์และฟีนอลิกสูง โดยเฉพาะในเหง้าอ่อน เช่น Quercetin Kaempferol และ Ferulic Acid ในขณะที่ชำหลวงพบสาร Gallic Acid และ Vanillin สะสมในเหง้าแก่และใบมากกว่าส่วนอื่น ๆ โดยพบปริมาณสารฟีนอลิกรวมของชำแดง เท่ากับ 110.41 ± 1.12 mg GAE/g DW และชำหลวง พบปริมาณมากสุดในใบ เท่ากับ 75.21 ± 0.14 mg GAE/g DW และเมื่อทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี DPPH และ ABTS พบว่าค่า IC_{50} ของสารสกัดจากชำแดงในส่วนของเหง้าแก่ มีค่า IC_{50} ต่ำสุด คือ 52.00 ± 4.04 μ g/mL และ 58.0 ± 2.60 μ g/mL ตามลำดับ สำหรับชำหลวงพบค่า IC_{50} ต่ำสุดในส่วนของเหง้าอ่อน เท่ากับ 52.00 ± 4.04 μ g/mL และ 58.0 ± 2.60 μ g/mL ตามลำดับ ดังนั้นจากผลการศึกษาเห็นได้ว่าชำแดงมีศักยภาพในการเป็นแหล่งของสารต้านอนุมูลอิสระที่ดี โดยเฉพาะในส่วนของเหง้า มีประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระสูงกว่าชำหลวงอย่างมีนัยสำคัญที่ $P < 0.05$

คำสำคัญ: ชำ ชำแดง ชำหลวง ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ UHPLC-MS/MS

Abstract

This research aimed to compare the chemical constituents and antioxidant activities of two galangal varieties: *Alpinia siamensis* and *Alpinia galanga*, which are widely cultivated in Samut Prakan Province. Comprehensive analyses were performed on multiple plant parts, namely the mature and young rhizomes, pseudostems, leaves, and flowers. Chemical profiling using UHPLC-Hi-Res-Orbitrap-MS/MS revealed that *A. siamensis* exhibited a high diversity of flavonoids and phenolics, particularly in the young rhizome, where compounds such as Quercetin, Kaempferol, and Ferulic acid were predominant. In contrast, *A. galanga* showed higher accumulations of Gallic acid and Vanillin in the mature rhizome and leaves compared to other parts. The total phenolic content (TPC) of *A. siamensis* was found to be of at 110.41 ± 1.12 mg GAE/g DW. In contrast, for *A. galanga*, the highest concentration was observed in the leaves, reaching 75.21 ± 0.14 mg GAE/g DW. Antioxidant activity assays (DPPH and ABTS) demonstrated that the mature rhizome extract of *A. siamensis* possessed the lowest IC_{50} values of 52.00 ± 4.04 μ g/mL and 58.0 ± 2.60 μ g/mL, respectively. For *A. galanga*, the lowest IC_{50} values were observed in the young rhizome at 52.00 ± 4.04 μ g/mL and 58.0 ± 2.60 μ g/mL respectively. These results indicate that *A. siamensis* is a superior source of antioxidants, particularly its rhizomes, which exhibit significantly higher antioxidant efficiency compared to *A. galanga* ($p < 0.05$).

คำสำคัญ: Galangal, *Alpinia siamensis*, *Alpinia galanga*, Antioxidant activity, UHPLC-MS/MS

บทนำ

พืชในวงศ์ขิง (Zingiberaceae) โดยเฉพาะพืชในสกุล *Alpinia* Roxb. หรือที่รู้จักในนาม "ข่า" เป็นกลุ่มสมุนไพรและเครื่องเทศที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในระบบนิเวศเขตร้อนและเศรษฐกิจของภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ด้วยคุณสมบัติทางสัณฐานวิทยาที่มีเหง้าใต้ดิน ทำให้มีการสะสมสารทุติยภูมิ (Secondary Metabolites) หลากหลายกลุ่ม เช่น น้ำมันหอมระเหย สารฟลาโวนอยด์ และสารประกอบฟีนอลิก [1-3] ทำให้ข่าถูกนำมาใช้ประโยชน์ทั้งในด้านอุตสาหกรรมอาหารและยาสมุนไพรมาอย่างยาวนาน ในประเทศไทยการเพาะปลูกและใช้ประโยชน์จากข่ามีความผูกพันกับวิถีชีวิตเกษตรกรรมและวัฒนธรรมอาหารค่อนข้างมาก โดยเฉพาะในพื้นที่จังหวัดสมุทรปราการซึ่งเป็นหนึ่งในแหล่งปลูกข่าที่สำคัญที่สุดของประเทศ มีลักษณะทางภูมิศาสตร์และนิเวศวิทยาของพื้นที่มีความพิเศษ เนื่องจากตั้งอยู่บริเวณปากแม่น้ำเจ้าพระยาและชายฝั่งทะเลอ่าวไทย ทำให้สภาพดินและน้ำได้รับอิทธิพลจากความเค็ม (Salinity) ทั้งจากการรุกตัวของน้ำทะเลตามธรรมชาติและการทำนาเกลือหรือบ่อเลี้ยงปลาในพื้นที่เดิม เกษตรกรในพื้นที่นี้นิยมปลูกข่าบริเวณคันบ่อเลี้ยงปลา เพื่อใช้ประโยชน์จากที่ดินว่างเปล่าและสร้างรายได้เสริม ส่งผลให้ดินในบริเวณนี้ได้รับอิทธิพลจากความเค็ม ซึ่งแม้จะเป็นปัจจัยความเครียดทางชีวภาพต่อพืช แต่ในขณะเดียวกันสถานะความเครียดระดับปานกลางสามารถกระตุ้นให้พืชมีการปรับตัวทางสรีรวิทยาและชีวเคมี โดยการสังเคราะห์สารต้านอนุมูลอิสระและสารเมตาโบไลต์ทุติยภูมิเพิ่มขึ้นเพื่อปกป้องเซลล์ [4] ด้วยเหตุนี้จึงเป็นผลให้ข่าของสมุทรปราการมีอัตลักษณ์ทางเคมีและคุณภาพที่แตกต่างจากแหล่งอื่นที่ เช่น ข่าบางเพรียง อำเภอบางบ่อ ค่อนข้างมีชื่อเสียง มีเหง้าขนาดใหญ่ มีกลิ่นและรสชาติที่โดดเด่นเป็นเอกลักษณ์จนเป็นที่ต้องการของตลาด

จากงานวิจัยก่อนหน้านี้ ได้สำรวจความหลากหลายทางชีวภาพในพื้นที่ พบว่าเกษตรกรนิยมปลูกข่าสองชนิดหลักที่มีลักษณะทางสัณฐานวิทยาแตกต่างกัน คือ ข่าหลวง (*Alpinia galanga* (L.) Willd.) และ ข่าแดง (*Alpinia siamensis* K. Schum.) [5] ข่าหลวงเป็นชนิดที่รู้จักกันแพร่หลายในระดับสากล มีเหง้าขนาดใหญ่ สีขาวนวลหรือเหลืองอ่อน เนื้อแข็งและมีเส้นใย



มาก นิยมใช้ในอุตสาหกรรมเครื่องแกง ในขณะที่ข่าแดงหรือที่เกษตรกรบางพื้นที่เรียกว่าข่าหยวกมีลักษณะเด่นคือเหง้ามีสีขาวอมชมพูหรือแดง โดยเฉพาะบริเวณข้อปล้องและยอดอ่อน เนื้อสัมผัสละเอียด กรอบ และมีกลิ่นหอมที่แตกต่างจากข่าหลวง อย่างไรก็ตามแม้ว่าทั้งสองชนิดจะเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญ แต่การใช้ประโยชน์ในปัจจุบันยังคงจำกัดอยู่เพียงส่วนของเหง้าเป็นหลัก โดยมีการจำหน่ายทั้งในรูปเหง้าอ่อน (อายุ 3-4 เดือน) และเหง้าแก่ (อายุมากกว่า 8 เดือน-1 ปี) ในขณะที่ส่วนอื่น ๆ ของพืช ได้แก่ ลำต้น เติ้ม ใบ และดอก กลับถูกมองข้ามและมักถูกกำจัดทิ้งเป็นวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร อย่างไรก็ตามมีรายงานข้อมูลเล็กน้อยเกี่ยวกับองค์ประกอบทางเคมีของส่วนประกอบอื่น เช่น ดอก โดยพบสารสำคัญในน้ำมันหอมระเหยได้แก่ สาร Farnesene Acetogenol และ Eugenol [6] และใบข่า พบสาร Benzenepropanal Quercetin และ Phytol [7]

ที่ผ่านมา การศึกษาพฤกษเคมีในพืชสกุล *Alpinia* มักมุ่งเน้นไปที่การวิเคราะห์สารเป้าหมายเฉพาะกลุ่ม (Targeted Analysis) เช่น การหาปริมาณสารสำคัญหลักอย่าง 1'-acetoxychavicol acetate (ACA) หรือกลุ่มน้ำมันหอมระเหยเพียงไม่กี่ชนิด [8] ซึ่งแม้จะให้ข้อมูลเชิงปริมาณที่แม่นยำในสารที่สนใจ แต่มีข้อจำกัดอย่างมากในการสะท้อนภาพรวมของความหลากหลายทางชีวเคมี (Biochemical diversity) และไม่สามารถตรวจพบการเปลี่ยนแปลงของสารเมตาโบไลต์ชนิดอื่นที่อาจมีความสำคัญต่อการจำแนกอัตลักษณ์ของพืชได้ [9]

ด้วยเหตุนี้ การวิเคราะห์เมตาโบโลมิกส์แบบไม่เจาะจง (Untargeted Metabolomics) ร่วมกับเทคนิคความละเอียดสูงอย่าง UHPLC-High-Resolution Orbitrap MS/MS จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่ง เนื่องจากช่วยให้สามารถระบุ "ลายพิมพ์ทางชีวเคมี" (Metabolic Fingerprint) และจำแนกแบบแผนทางชีวโมเลกุล (Biomolecular patterns) ระหว่างชนิดและส่วนต่าง ๆ ของพืชได้อย่างครอบคลุม ซึ่งนำไปสู่การค้นพบสารบ่งชี้ทางเคมี (Chemical markers) ใหม่ ๆ ที่สะท้อนถึงอิทธิพลของสภาพแวดล้อมและการปรับตัวของพืชในพื้นที่จังหวัดสมุทรปราการได้อย่างแท้จริง

งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นที่จะเติมเต็มความรู้ในประเด็นดังกล่าว โดยการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีวิเคราะห์ขั้นสูง UHPLC-Hi-Res-Orbitrap-MS/MS โดยวิเคราะห์เมตาโบโลมิกส์แบบไม่เจาะจง ร่วมกับกระบวนการทางเคมีเชิงสถิติ (Chemometrics) เพื่อวิเคราะห์และจำแนกแบบแผนทางชีวโมเลกุลของสารเมตาโบไลต์ในเหง้า ลำต้น เติ้ม ใบ และดอก ของข่าทั้งสองชนิด พร้อมทั้งประเมินประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระเทียบกับปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวม ข้อมูลที่ได้จะนำไปสู่การระบุตัวบ่งชี้ทางเคมี (Chemical Markers) ที่จำเพาะต่อชนิดข่าได้มากขึ้น และเป็นการสร้างฐานข้อมูลสำคัญในการนำส่วนเหลือทิ้งทางการเกษตรมาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์มูลค่าสูง เพื่อขับเคลื่อนเศรษฐกิจฐานชีวภาพ (Bio-economy) และเพิ่มรายได้ให้แก่เกษตรกรอย่างยั่งยืนต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมตัวอย่างพืช (Sample Preparation)

ทำการเก็บตัวอย่างข่า 2 ชนิด ได้แก่ ข่าหลวง (*A. Galanga*) และ ข่าแดง (*A. Siamensis*) จากพื้นที่จังหวัดสมุทรปราการ โดยคัดแยกส่วนประกอบ ได้แก่ ใบ ลำต้น เติ้ม ดอก และเหง้า ซึ่งแบ่งเหง้าตามอายุการเก็บเกี่ยวเป็น เหง้าอ่อน (3-4 เดือน ลักษณะเปลือกสีขาวอมชมพู เนื้ออ่อน) และ เหง้าแก่ (มากกว่า 8 เดือน ลักษณะเปลือกสีน้ำตาล เส้นใยสูง) ตัวอย่างพืช แต่ละส่วน นำมาลดขนาดและทำให้แห้งด้วยเครื่องเยือกแข็งสุญญากาศ (Freeze dryer บริษัท LABCONCO รุ่น FreeZone 2.5) จากนั้นบดเป็นผงละเอียด และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ -18 °C จนกว่าจะทำการวิเคราะห์

2. การวิเคราะห์สารเมตาโบไลต์ (Untargeted Metabolomics Analysis)

2.1 การสกัดสารเมตาโบไลต์

การสกัดสารสำหรับการวิเคราะห์สารเมตาโบไลต์ จะใช้ตัวทำละลายที่มีความจำเพาะสูง เพื่อดึงสารเมตาโบไลต์ทั้งที่มีขั้วและไม่ขั้วสำหรับการวิเคราะห์แบบไม่เจาะจง จึงสกัดสารตามชนิดมีขั้วและไม่มีขั้ว ดังนี้

การสกัดสารเมตาโบไลต์ (ชนิดมีขี้ผึ้ง) ซึ่งสารตัวอย่างหนัก 1 กรัม ผสมกับสารละลายเอทานอล เข้มข้น 50%v/v ปริมาตร 10 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากันด้วยเครื่องเขย่าสาร (electric shaker) เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นเข้าเครื่องปั่นเหวี่ยง ที่ความเร็วรอบ 4000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที เก็บส่วนใส และกรองผ่านฟิลเตอร์ ขนาด 0.22 ไมโครเมตร ใส่ลงในขวดสีชาขนาด 2 มิลลิลิตร และฉีดเข้าเครื่อง Ultra-High Performance Liquid Chromatography (UHPLC) รุ่น Orbitrap Exploris Mass Spectrometer (UHPLC-Orbitrap Exploris MS) [10]

การสกัดสารเมตาโบไลต์ (ชนิดไม่มีขี้ผึ้ง) ซึ่งสารตัวอย่างหนัก 1 กรัม ผสมกับสารละลายผสมของ Methanol (RCI Labscan) และ Dichloromethane (RCI Labscan) อัตราส่วน 7:3, v/v ปริมาตร 10 มิลลิลิตร ผสมตัวอย่างให้เข้ากันกับตัวสกัด ด้วยเครื่องวอเทกซ์ เป็นเวลา 60 วินาที จากนั้นสกัดด้วยเครื่องล้างคลื่นความถี่สูง (Ultrasonic Bath) เป็นเวลา 30 นาที ที่อุณหภูมิห้อง และเข้าเครื่องปั่นเหวี่ยง ที่ความเร็วรอบ 4000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 10 นาที เก็บส่วนใสและกรองผ่านฟิลเตอร์ ขนาด 0.22 ไมโครเมตร ใส่ลงในขวดสีชาขนาด 2 มิลลิลิตร และฉีดเข้าเครื่อง UHPLC [11]

2.2 การตรวจวัดและระบุชนิดสารด้วย UHPLC-Orbitrap Exploris MS

ในการศึกษานี้ได้ทำการวิเคราะห์สารเมตาโบไลต์ แบบไม่ระบุสารเป้าหมาย (untargeted metabolomics) โดยใช้ระบบ Vanquish Flex UHPLC (Thermo Scientific, Germering, Germany) ด้วยระบบปั๊มแบบไบนารี (Binary pump system) เชื่อมต่อกับเครื่องแมสสเปกโตรมิเตอร์ชนิด Orbitrap Exploris 120 (Thermo Scientific, Bremen, Germany) ที่มีระบบ Electrospray ionization (H-ESI) และ Hybrid quadrupole-orbitrap ใช้คอลัมน์ชนิด Hypersil Gold C-18 (ขนาด 2.1×150 มม. ขนาดอนุภาค 1.9 ไมโครเมตร) จาก Thermo Fisher Scientific Inc. (Waltham, MA, USA)

2.3 การระบุชนิดสารประกอบชนิดมีขี้ผึ้ง (Polar compounds)

ในการวิเคราะห์แมสสเปกโตรเมตรีได้ทำการตรวจวัดในโหมดไอออนบวก (ESI+) และไอออนลบ (ESI-) ตัดแปลงจาก Tyagi et al. (2021) [10] คอลัมน์ที่ใช้สำหรับการวิเคราะห์คือ Hypersil Gold C18 ตัวอย่างปริมาตร 5 ไมโครลิตร ถูกฉีดด้วยระบบอัตโนมัติ และเคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์โดยใช้เฟสเคลื่อนที่ แบบไบนารี ประกอบด้วยสารละลาย A (0.1% v/v Formic acid ในน้ำ) และสารละลาย B (Methanol) โดยใช้ความเร็วการไหล 0.4 มิลลิลิตร/นาที ภายใต้กราเดียนต์เชิงเส้น เป็นเวลา 25 นาที (สัดส่วนของเฟสเคลื่อนที่ B เริ่มต้นที่ 9% และเพิ่มขึ้นตามลำดับจนสูงสุดที่ 70% ภายในนาทีที่ 22.53 ก่อนจะปรับลดกลับมาที่สภาวะเริ่มต้นเพื่อเตรียมการวิเคราะห์รอบถัดไป) จากนั้น ทำการวิเคราะห์ด้วยแมสสเปกโตรเมตรีในโหมด ESI+ และ ESI- โดยกำหนดช่วงมวลต่อประจุ (m/z) ที่ 70–700 ใช้การสแกนแบบ Full MS ที่ความละเอียด 60,000 และสแกน MS2 (data-dependent MS2) ที่ความละเอียด 15,000 โดยใช้ค่า Stepped Collision Energy ที่ 30, 50 และ 150 eV เพื่อให้ครอบคลุมการแตกตัวของสารเมตาโบไลต์ทั้งกลุ่มที่แตกตัวง่ายและยาก ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มประสิทธิภาพในการระบุชนิดสาร (Compound Identification) ได้อย่างแม่นยำยิ่งขึ้น

2.4 การระบุชนิดสารชนิดไม่มีขี้ผึ้ง (Non-polar compound Identification)

การวิเคราะห์ในส่วนของสารไม่มีขี้ผึ้ง ใช้คอลัมน์แบบเดียวกันกับการระบุสารกลุ่มมีขี้ผึ้ง โดยทำการฉีดตัวอย่างปริมาตร 5 ไมโครลิตร ด้วยระบบอัตโนมัติ และเคลื่อนที่ผ่านคอลัมน์ด้วยเฟสเคลื่อนที่แบบไบนารี ซึ่งประกอบด้วยสารละลาย A (0.1% v/v Formic acid ในน้ำ) และสารละลาย B (0.1% v/v Formic acid ใน Isopropanol/Acetonitrile อัตราส่วน 4/6, v/v) โดยใช้ความเร็วการไหล 0.3 มิลลิลิตร/นาที และใช้โปรแกรมกราเดียนต์เชิงเส้นเป็นเวลา 30 นาที จากนั้นทำการวิเคราะห์ด้วยแมสสเปกโตรเมตรีใน ESI+ เช่นเดียวกับการวิเคราะห์สารกลุ่มมีขี้ผึ้งเพื่อจำแนกสารกลุ่มไม่มีขี้ผึ้งต่าง ๆ ในตัวอย่าง [10]



3. วิเคราะห์ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระจากส่วนต่าง ๆ (เหง้า ใบ ลำต้นเทียมและดอก) ของชำแดงและชำหลวง

3.1 การสกัดตัวอย่าง

สกัดตัวอย่างโดยการแช่ตัวอย่างในสารละลาย Ethanol เข้มข้น 95% v/v (บริษัท RCI Labscan) ในอัตราส่วนตัวอย่างต่อปริมาตรสารละลาย Ethanol เท่ากับ 1:5 แช่ทิ้งไว้ 3 วัน จากนั้นกรองผ่านกระดาษกรองเบอร์ 1 ทั้งนี้เพื่อให้ได้สารสกัดหยาบปริมาณมากพอสำหรับทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ทำการสกัดตัวอย่างซ้ำ จำนวน 2-3 ครั้ง ด้วยสารละลาย Ethanol เข้มข้น 95% v/v ในอัตราส่วนเท่าเดิม และทำการระเหยสาร Ethanol ด้วยเครื่องกลั่นระเหยสารแบบหมุน (Rotary evaporator บริษัท BUCHI รุ่น R210) นำสารสกัดหยาบที่เตรียมได้ไปทำให้แห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze dryer บริษัท LABCONCO รุ่น FreeZone 2.5) และเก็บไว้ในขวดสีชา ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เพื่อใช้ทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวม

3.2 การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ และปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวม

การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ด้วยวิธีการทดสอบแบบ 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl (DPPH) (บริษัท Sigma-Aldrich) ใช้ความเข้มข้นของสารสกัดจากชำ เข้มข้น 100 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร โดยชั่งสารสกัดชำหนัก 0.100 กรัม ละลายในสารละลาย Ethanol ปริมาตร 1 มิลลิลิตร เป็นสารละลายเข้มข้นเริ่มต้น จากนั้นทำการเจือจางความเข้มข้นให้เป็น 1, 0.5, 0.1, 0.05 และ 0.025 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร ผสมตัวอย่างที่ความเข้มข้นต่างๆ ปริมาตร 100 ไมโครลิตร กับสาร DPPH ความเข้มข้น 0.1 มิลลิโมลาร์ ปริมาตร 900 ไมโครลิตร เขย่า และทิ้งไว้ในที่มืดเป็นเวลา 30 นาที เพื่อให้เกิดปฏิกิริยาอย่างสมบูรณ์ก่อนนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 517 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (บริษัท SHIMADZU รุ่น-1800) [12] ในการทดสอบ ชุดทดลองประกอบไปด้วยตัวแปรควบคุม (control) ที่มีเฉพาะสารละลาย DPPH (สำหรับการคำนวณสารอนุมูลอิสระเริ่มต้นที่ 100%) ซึ่งจะเปรียบเทียบกับหลอดปฏิกิริยาที่มีสารสกัดหยาบชำแต่ละชนิด เรียกว่า หลอดทดสอบ (sample) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ โดยใช้สารละลายมาตรฐาน butylated hydroxytoluene (BHT) (บริษัท Sigma-Aldrich) เป็นสารมาตรฐานสำหรับเปรียบเทียบกับสารสกัดที่ใช้ศึกษา ที่ความเข้มข้น 1, 0.5, 0.1, 0.05 และ 0.025 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร จากนั้นหาเปอร์เซ็นต์การยับยั้ง (% inhibition) จากสูตร

$$\% \text{ inhibition} = ((\text{Abs}_{\text{control}} - \text{Abs}_{\text{sample}}) / \text{Abs}_{\text{control}}) \times 100$$

การหาค่า IC_{50} ทำได้โดยการสร้างกราฟหาความสัมพันธ์ระหว่างเปอร์เซ็นต์การยับยั้งกับความเข้มข้นของสารสกัดชำที่ความเข้มข้นต่าง ๆ และคำนวณหาความเข้มข้นของสารสกัดชำที่ทำให้ความเข้มข้นของสาร DPPH ลดลง 50 เปอร์เซ็นต์

การทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ ด้วยวิธีการทดสอบแบบ 2,2'-azino-bis(3-ethylbenzothiazoline-6-sulfonic acid) assay [ABTS] (บริษัท Sigma-Aldrich) [13] โดยเตรียมอนุมูล ABTS (ABTS radical cation, $\text{ABTS}^{\bullet+}$) ที่ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ ผสมกับสารละลาย phosphate buffer saline (PBS) (บริษัท Sigma-Aldrich) pH 7.4 เข้มข้น 2.45 มิลลิโมลาร์ ในอัตราส่วน 2:1 โดยปริมาตร จากนั้นเก็บไว้ในตู้เย็นอุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง นำสารละลายอนุมูล ABTS เจือจางด้วย PBS ไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 734 นาโนเมตร ให้ได้ค่าการดูดกลืนแสง เท่ากับ 0.70 ± 0.02 จากนั้นเตรียมความเข้มข้นของสารสกัดจากชำ เข้มข้น 1, 0.5, 0.1, 0.05 และ 0.025 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร และผสมสารสกัดที่ความเข้มข้นต่าง ๆ โดยใช้ปริมาตร 10 ไมโครลิตร กับสารละลายอนุมูลอิสระ ABTS ที่เตรียมไว้ ปริมาตร 990 ไมโครลิตร บ่มที่อุณหภูมิห้อง เก็บไว้ในที่มืด เป็นเวลา 10 นาที และวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 734 นาโนเมตร ในการทดสอบชุดทดลองประกอบไปด้วยตัวแปรควบคุม (control) ที่มีเฉพาะสารละลาย ABTS (สำหรับการคำนวณสารอนุมูลอิสระเริ่มต้นที่ 100%) ซึ่งจะเปรียบเทียบกับหลอดปฏิกิริยาที่มีสารสกัดหยาบชำแต่ละชนิด เรียกว่า หลอดทดสอบ (sample) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ โดยใช้สารละลายมาตรฐาน Butylated hydroxytoluene (BHT) (บริษัท Sigma-Aldrich) เป็นสารมาตรฐานสำหรับเปรียบเทียบกับสารสกัดที่ใช้ศึกษา ที่ความเข้มข้น 1,

0.5, 0.1, 0.05 และ 0.025 มิลลิกรัมต่อมิลลิลิตร หาค่า %inhibition และรายงานผลการยับยั้งอนุมูลอิสระ (IC_{50}) ได้เช่นเดียวกับวิธี DPPH

การหาปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวม [14] โดยเตรียมสารทดสอบให้มีความเข้มข้น 1 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร ในสารละลาย Ethanol 95% v/v เทียบกับสารละลายมาตรฐาน Gallic acid (บริษัท Sigma-Aldrich) ที่มีความเข้มข้นเป็น 10, 8, 6, 4, 2, 1 และ 0.5 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร ปิดเตาสารที่ความเข้มข้นต่าง ๆ มาจำนวน 100 ไมโครลิตร ผสมกับสารละลาย Folin-Ciocalteu's phenol reagent (บริษัท Sigma-Aldrich) ที่มีปริมาตร 10 ไมโครลิตร เขย่าแล้วตั้งไว้ในที่มืด 5 นาที แล้วเติมสารละลาย Na_2CO_3 เข้มข้น 1 โมลาร์ ปริมาตร 500 ไมโครลิตร ปรับปริมาตรด้วยสาร Methanol จนได้ปริมาตร 1 มิลลิลิตร เขย่าแล้วตั้งทิ้งไว้ในที่มืด 1 ชั่วโมง นำไปเข้าเครื่องปั่นเหวี่ยง ที่ความเร็วรอบ 6,000 รอบต่อนาที นาน 5 นาที จากนั้นนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องยูวี-วิสิเบิล สเปกโตรโฟโตมิเตอร์ ที่ความยาวคลื่น 765 นาโนเมตร การทดลองทำซ้ำ 3 ครั้ง นำค่าการดูดกลืนแสงที่ได้ไปสร้างกราฟมาตรฐาน แสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าการดูดกลืนแสงเป็นแกน y และค่าความเข้มข้นของสารละลายมาตรฐาน Gallic acid เป็นแกน x นำค่าการดูดกลืนแสงของสารทดสอบไปเทียบกับกราฟมาตรฐาน Gallic acid

4. การวิเคราะห์ข้อมูลและสถิติ (Data Analysis)

การระบุชนิดเมตาโบไลต์ดำเนินการผ่านซอฟต์แวร์ Compound Discoverer 3.3 (Thermo Fisher Scientific, USA) โดยเปรียบเทียบข้อมูลมวลสารและรูปแบบการแตกตัวของไอออน (MS/MS fragments) กับฐานข้อมูลมาตรฐาน mzCloud (<https://www.mzcloud.org/>) และ ChemSpider (<https://www.chemspider.com/>) ข้อมูลดิบที่ผ่านการปรับทอนค่าเพื่อให้ข้อมูลมีมาตรฐานเดียวกัน (Normalization) โดยใช้วิธี Pareto scaling เพื่อลดอคติจากสารที่มีความเข้มข้นสูงเกินไปและเพิ่มความสำคัญให้กับสารที่มีความเข้มข้นน้อยในทางสถิติ ข้อมูลที่ผ่านการปรับแล้วจะนำมาวิเคราะห์ความสัมพันธ์เชิงสถิติหลายตัวแปร (Multivariate Analysis) ด้วยเทคนิคทางเคโมเมตริกซ์ (Chemometrics) ได้แก่ Principal Component Analysis (PCA) Heatmap และ Agglomerative Hierarchical Clustering (AHC) การวิเคราะห์เหล่านี้ดำเนินการผ่านแพลตฟอร์ม Google Colab (<https://colab.research.google.com/>) โดยใช้ภาษา Python สำหรับข้อมูลการทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (DPPH และ ABTS) และปริมาณสารประกอบฟีนอลิกรวม จะรายงานผลเป็น ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Mean $\pm$ SD) จากนั้นนำมาวิเคราะห์ความแตกต่างทางสถิติระหว่างกลุ่มตัวอย่างโดยใช้ การวิเคราะห์ความแปรปรวนสองทาง (Two-Way ANOVA) ตามด้วยการทดสอบเปรียบเทียบเชิงซ้อนเพื่อระบุความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ด้วยซอฟต์แวร์ SPSS version 25.0

ผลการวิจัย

การศึกษาองค์ประกอบทางเคมี และปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระของชำแดง และชำหลวง ทำการศึกษาจากส่วนต่าง ๆ ได้แก่ เหง้า (เหง้าแก่ เหง้าอ่อน) ลำต้นเทียม ใบ และดอก โดยเก็บตัวอย่างในช่วงเดือนมิถุนายน จึงไม่พบการติดผล ส่วนประกอบของชำแดงและชำหลวง แสดงดังภาพที่ 1 จากภาพเห็นได้ว่าลักษณะภายนอกของชำทั้งสองชนิด มีความคล้ายกัน ทั้งนี้ชนิดชำที่นำมาศึกษาได้รับการรับรองชนิดจากงานวิจัยของ ยุคลธร และคณะ (2568) [5]

อย่างไรก็ตามชำแดงมีลักษณะเป็นเหง้าสีขาวนวลหรือสีขาวอมชมพู ส่วนที่ติดกับลำต้นเทียมมักมีสีชมพูหรือชมพูอมแดง สำหรับชำหลวง จะมีลำต้นใต้ดินเป็นเหง้าขนาดใหญ่ สีขาวนวลหรือสีเหลืองอ่อน (ภาพที่ 2) สำหรับการจำแนกเหง้าแก่ และเหง้าอ่อน จะพิจารณาจากอายุการปลูก ชำอ่อน อายุไม่เกิน 8 เดือน หั่นง่าย มีเนื้ออ่อน และชำแก่ มีอายุมากกว่า 1 ปี มีเนื้อแข็ง ดังนั้นเพื่อเปรียบเทียบความแตกต่างของทั้งชำแดง และชำหลวงที่ปลูกในพื้นที่สมุทรปราการ ได้ดำเนินการศึกษาแบบแผนของสารเมตาโบไลต์ สารฟลาโวนอยด์ และสารต้านอนุมูลอิสระ จากเหง้าแก่ เหง้าอ่อน ต้น ใบ และ ดอก โดยมีผลการวิเคราะห์ ดังนี้



ภาพที่ 1 แสดงลักษณะของต้น ข่าแดง (ภาพทางซ้าย) และ ข่าหลวง (ภาพทางขวา)



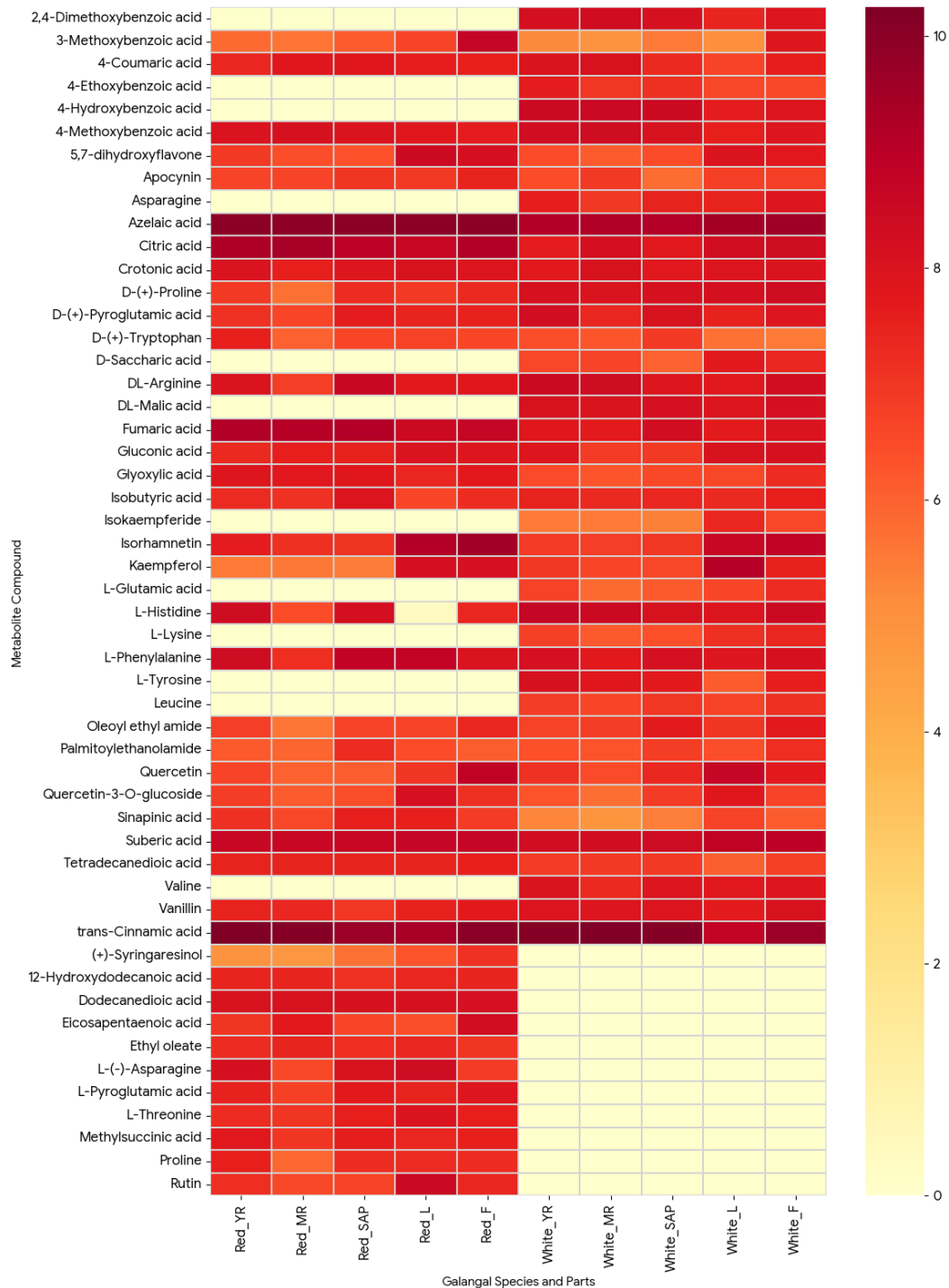
ภาพที่ 2 แสดงลักษณะลำต้นใต้ดิน (เหง้า) ของ ข่าแดง (ก) และข่าหลวง (ข)

ผลการวิเคราะห์แบบแผนทางชีวโมเลกุล โดยใช้เทคนิค UHPLC-Hi-Res-Obitrap-MS/MS

จากผลการวิเคราะห์แมสสเปกโตรเมตรี ตรวจวัดโดยการคัดแยกมวลต่อประจุ (m/z) ของสาร ด้วยเทคนิค UHPLC-Hi-Res-Obitrap-MS/MS ทำให้ทราบชนิดของสารเมตาโบไลต์ และสารสำคัญอื่น ที่เป็นองค์ประกอบในข่าทั้ง 2 ชนิด โดยวิเคราะห์ในโหมดไม่ระบุสารเป้าหมาย (non-Target mode) เพื่อตรวจสอบชนิดของสารเมตาโบไลต์ รวมถึงสารสำคัญอื่น ๆ ที่เป็นองค์ประกอบในเหง้า ใบ ลำต้นเทียม และดอก

เมื่อนำส่วนต่าง ๆ ของข่าทั้งสองชนิด สกัดในตัวทำละลาย 2 แบบ คือตัวทำละลายมีขั้ว และตัวทำละลายไม่มีขั้ว ทำให้ได้สารสกัด 2 ชนิด คือ สารสกัดมีขั้ว และสารสกัดไม่มีขั้ว จากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค UHPLC-Hi-Res-Obitrap-MS/MS ได้ถูกระบุชนิดของสารเมตาโบไลต์ โดยใช้ซอฟต์แวร์ Compound Discoverer เวอร์ชัน 3.3 โดยค้นหาข้อมูลเปรียบเทียบกับฐานข้อมูล 2 แหล่ง ได้แก่ mzCloud (<https://www.mzcloud.org>) ChemSpider compound (<http://www.chemspider.com>) พบจำนวนสารเมตาโบไลต์ที่ถูกสกัดออกมาในตัวทำละลายที่ใช้ มากกว่า 100 ชนิด ทั้งของสารในกลุ่มที่มีขั้วและไม่มีขั้วของชนิดข่าแดง และข่าหลวง และสามารถระบุชนิดของสารเมตาโบไลต์ของสารสกัดข่าแดง และข่าหลวง จำนวน 63 ชนิด (ประมาณ 37%) และจำนวน 59 ชนิด (ประมาณ 43%) ตามลำดับ ได้จำแนกสารเมตาโบไลต์ของข่าแดง และข่าหลวง ออกเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ ฟลาโวนอยด์ (Flavonoids) ฟีนอลิก (Phenolics) กรดไขมัน (Fatty Acids) และกรดอะมิโน (Amino acids) เพื่อวิเคราะห์การกระจายของสารประกอบเคมีในส่วนต่าง ๆ ของพืช ได้ใช้เทคนิคทางสถิติและการวิเคราะห์ข้อมูลขั้นสูง ได้แก่ แผนภาพความร้อน (Heat map), การวิเคราะห์กลุ่ม (Cluster Analysis) และการวิเคราะห์องค์ประกอบหลัก (Principal Component Analysis, PCA) เพื่อเข้าใจถึงรูปแบบการสะสมของสารประกอบเหล่านี้และบทบาททางชีวภาพที่เกี่ยวข้อง

ผลของปริมาณของแต่ละสารประกอบที่แสดงรายงาน เป็นการรวมผลทั้งหมดของสารที่ถูกสกัดด้วยตัวทำละลายแบบมีขี้ผึ้ง และแบบไม่มีขี้ผึ้ง ทั้งข้าแดงและข้าหลวง และรายงานข้อมูลในรูป % relative peak area ของสารประกอบที่พบในส่วนต่าง ๆ ของพืช ผลที่ได้จาก Heatmap แสดงให้เห็นการกระจายตัวของสารประกอบในส่วนต่าง ๆ ของทั้งข้าแดง และข้าหลวง (ภาพที่ 3)



ภาพที่ 3 แสดงผล heatmap ขององค์ประกอบทางเคมีในส่วนของเหง้าแก่ (Mature rhizome) เหง้าอ่อน (Young rhizome) ลำต้นเทียม (Sapling) ใบ (Leaf) และดอก (Flower) ต่าง ๆ ของข้าแดง และข้าหลวง โดยที่ ข้าแดงแทนด้วย Red และข้าหลวง แทนด้วย White

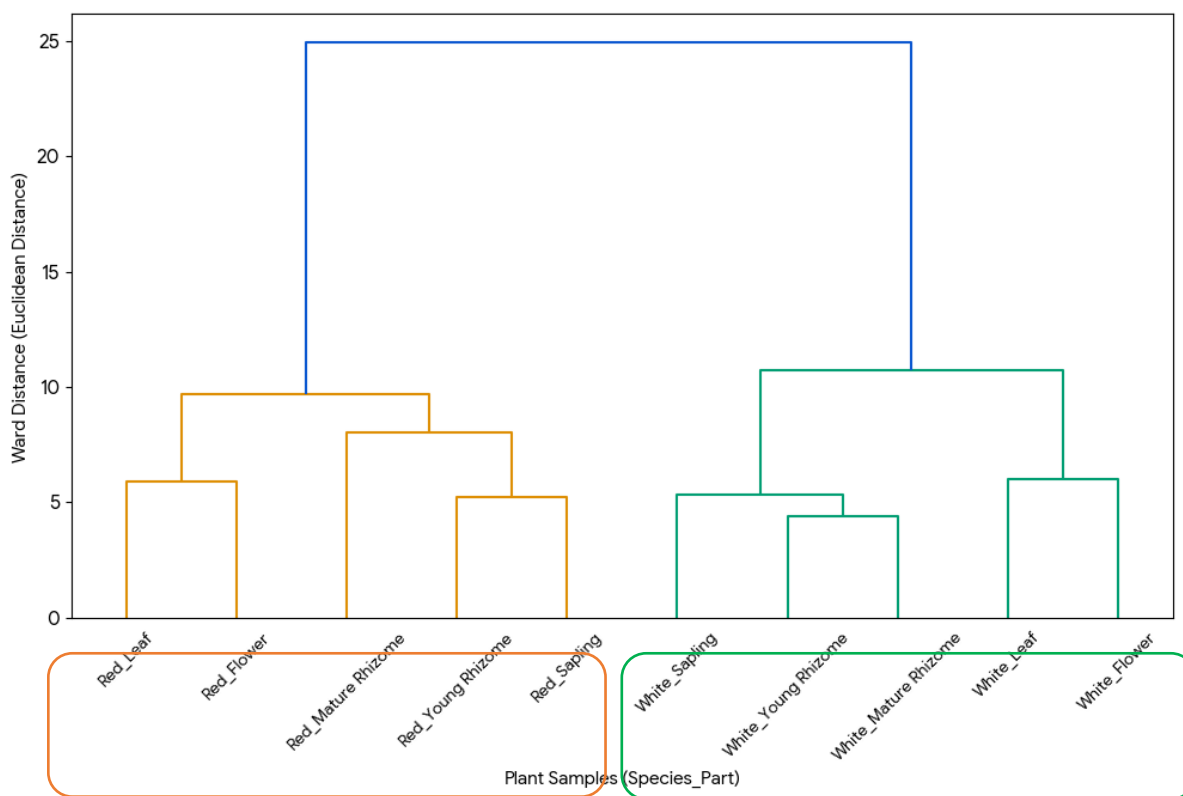


จากการวิเคราะห์แผนภาพความร้อน แสดงให้เห็นรูปแบบการสะสมของสารสำคัญ ดังนี้

จากการวิเคราะห์รูปแบบชีวโมเลกุลด้วยเทคนิค UHPLC-Hi-Res-Orbitrap-MS/MS และการวิเคราะห์ผลผ่าน Heatmap แสดงให้เห็นว่า ข้าแดง ตรวจพบการสะสมของสารกลุ่มกรดอินทรีย์ (Organic acids) และกรดอะมิโน (Amino acids) สูงถึงร้อยละ 59.14 โดยพบการสะสมมากในส่วนเหง้าและใบ ในขณะที่ข้าหลวง ตรวจพบสารกลุ่ม Aldehydes และ Phenylpropanoids เป็นองค์ประกอบหลักในปริมาณสูงถึง ร้อยละ 66.86 พบการสะสมมากที่สุดในส่วนเหง้าแก่และเหง้าอ่อน ได้แก่ สาร trans-Cinnamaldehyde Vanillin และ 4-Hydroxybenzaldehyde เป็นต้น

นอกจากนี้ในส่วนของใบและดอกของข้าทั้งสองชนิด พบการสะสมของสารกลุ่มฟลาโวนอยด์ (Flavonoids) หลากหลายชนิดซึ่งทำหน้าที่เป็นสารต้านอนุมูลอิสระหลักของพืช โดยข้าแดง พบการสะสมของ Quercetin Isorhamnetin และ Rutin ในปริมาณสูง ขณะที่ข้าหลวง พบการสะสมของ Trifolin (Kaempferol-3-galactoside) และ Isokaempferide เป็นอนุพันธ์เฉพาะของกลุ่ม Kaempferol ที่พบมากในส่วนของใบ

เมื่อจัดกลุ่มส่วนต่าง ๆ ตามองค์ประกอบทางเคมี ของข้าแดง และข้าหลวง ด้วยวิธี Agglomerative hierarchical clustering ได้ผลการจัดกลุ่ม แสดงดังภาพที่ 4

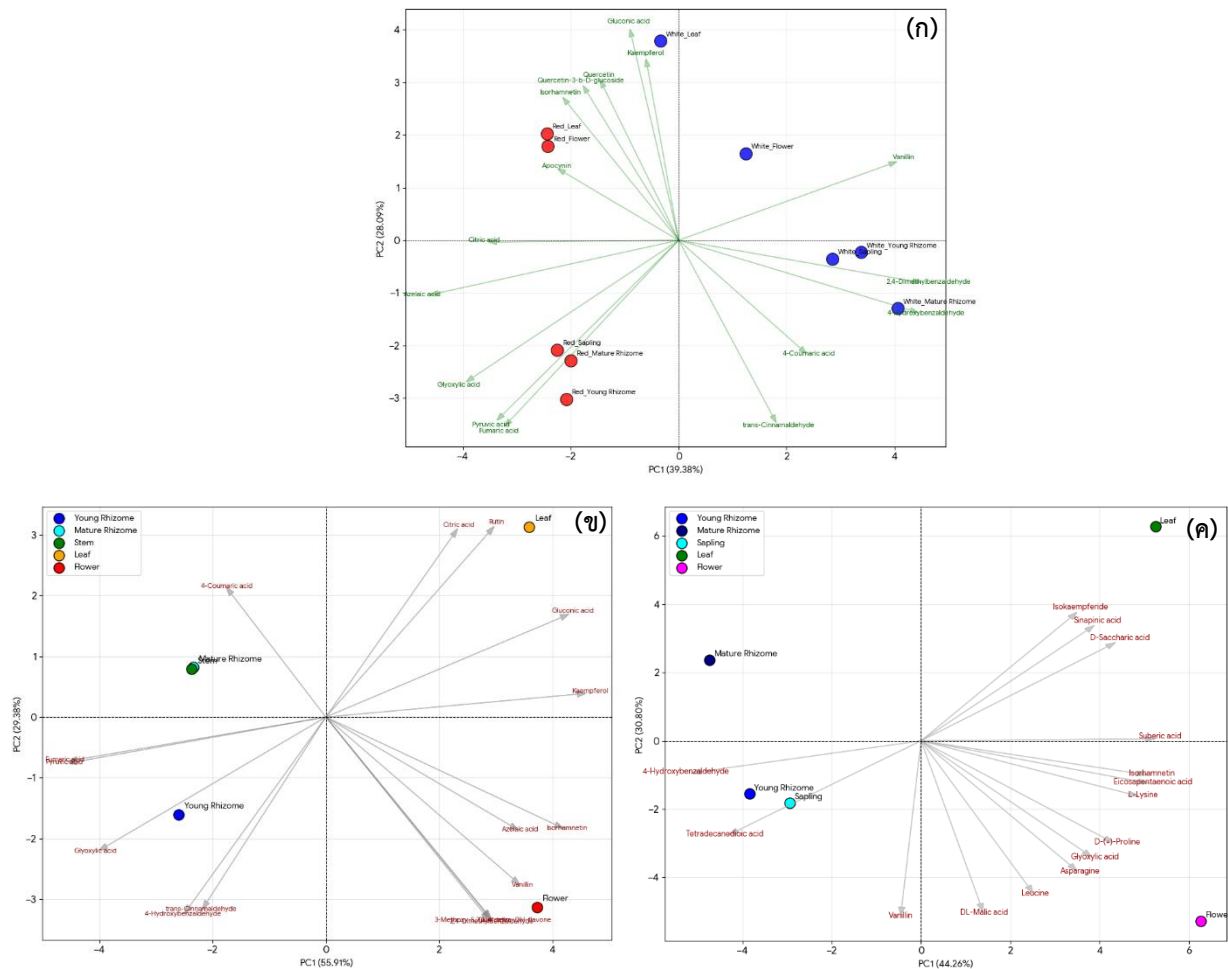


ภาพที่ 4 แสดง AHC Dendrogram จัดกลุ่มขององค์ประกอบทางเคมีในส่วนของเหง้าแก่ (Mature rhizome) เหง้าอ่อน (Young rhizome) ลำต้นเทียม (Sapling) ใบ (Leaf) และดอก (Flower) ต่าง ๆ ของข้าแดง และข้าหลวง โดยที่ ข้าแดงแทนด้วย Red และข้าหลวง แทนด้วย White

จากแผนภาพ AHC Dendrogram โดยใช้วิธี Ward's linkage และระยะห่างแบบ Euclidean แสดงให้เห็นถึงการจำแนกกลุ่มตัวอย่างพืชออกเป็น 2 กลุ่มหลัก ตามความแตกต่างของชนิดข้า โดยกลุ่มแรกประกอบด้วยส่วนประกอบทั้งหมดของข้าแดง และกลุ่มที่สองประกอบด้วยส่วนประกอบทั้งหมดของข้าหลวง

สำหรับการพิจารณาความสัมพันธ์ในชาชนิดเดียวกัน ในชาแดง มีการแยกกลุ่มย่อยออกเป็น 2 กลุ่ม คือกลุ่มใบและดอก และ กลุ่มเหง้าและลำต้นใต้ดิน โดยส่วนใบและดอกมีความใกล้เคียงทางชีวโมเลกุลสูงเนื่องจากการสะสมของสารกลุ่มฟลาโวนอยด์ ในปริมาณสูง เช่น Rutin และ Isorhamnetin ขณะที่ส่วนเหง้าและลำต้นเทียม มีองค์ประกอบทางเคมีที่คล้ายกันของกลุ่มกรดอินทรีย์และกรดอะมิโนที่เป็นองค์ประกอบหลัก ในทำนองเดียวกันชนิดชาหลวง มีรูปแบบการจำแนกส่วนเหง้าและลำต้นเทียม แยกออกจากส่วนใบและดอก ทั้งนี้ลำต้นเทียมของชาหลวงมีองค์ประกอบทางเคมีของสารกลุ่มฟีนอลิกอัลดีไฮด์ (Phenolic aldehydes) โดยเฉพาะ trans-Cinnamic acid และ Vanillin แตกต่างจากเหง้าอ่อนและเหง้าแก่

เมื่อศึกษาผลความสัมพันธ์ของสารประกอบเคมีในส่วนต่าง ๆ ของพืช ด้วยวิธี Principal Component Analysis (PCA) เพื่อให้เข้าใจรูปแบบและความสัมพันธ์ของสารประกอบเคมีในส่วนต่าง ๆ ของพืช ของชาทั้งสองชนิด ผลการวิเคราะห์ PCA Biplot แสดงดังภาพที่ 5



ภาพที่ 5 แสดง PCA biplot ขององค์ประกอบทางเคมีในส่วนของเหง้าแก่ (Mature rhizome) เหง้าอ่อน (Young rhizome) ลำต้นเทียม (Sapling) ใบ (Leaf) และดอก (Flower) ต่าง ๆ ของชาแดงและชาหลวง (ก) ชาแดง (ข) และชาหลวง (ค)

การวิเคราะห์ PCA Biplot เพื่อเปรียบเทียบแบบแผนทางชีวโมเลกุลระหว่างส่วนต่าง ๆ (เหง้าแก่ เหง้าอ่อน ลำต้นเทียม ใบ และดอก) ของชาทั้งสองชนิด สามารถอธิบายรูปแบบการกระจายตัวขององค์ประกอบทางเคมีที่เป็นองค์ประกอบสำคัญตามส่วนต่าง ๆ ดังนี้



เมื่อพิจารณา PCA Biplot โดยรวมของทั้งชำแดงและชำหลวง ดังภาพ 5(ก) พบว่าสามารถแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม ตามจุดภาค ซึ่งเมื่อพิจารณาการแยกตัวตามแนวแกน PC1 (39.38%) ซึ่งแบ่งชำสองชนิดนี้ออกจากกันอย่างชัดเจน โดยที่ทุกส่วนของ ชำแดง เกาะกลุ่มอยู่ทางด้านซ้าย (ค่า PC1 เป็นลบ) แสดงให้เห็นว่าชำแดงมีองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างจากชำหลวง โดยเฉพาะความสัมพันธ์กับสารกลุ่มกรดไขมันและกรดอินทรีย์ เช่น Azelaic acid Glyoxylic acid และ Pyruvic acid สำหรับชำหลวง ทุกส่วนเกาะกลุ่มอยู่ทางด้านขวา (ค่า PC1 เป็นบวก) สัมพันธ์กับสาร 4-Hydroxybenzaldehyde และ Vanillin เมื่อพิจารณาตามแนวแกน PC2 (28.09%) พบว่ามีการแยกส่วนของพืชภายในชนิดเดียวกัน โดยที่ใบและดอกของทั้งชำแดงและชำหลวง อยู่ด้านบน (ค่า PC2 เป็นบวก) มีความสัมพันธ์กับสารกลุ่ม Flavonoids และ Antioxidants เช่น Quercetin, Kaempferol และ Isorhamnetin ส่วนเหง้าและลำต้นเทียมของทั้งสองชนิดอยู่ทางด้านลบของแกน PC2 สัมพันธ์กับสารกลุ่ม trans-Cinnamaldehyde และ 4-Coumaric acid

จากภาพ 5(ข) ผลการวิเคราะห์ PCA Biplot ของชำแดง แสดงการแยกกลุ่มทางเคมีออกเป็นกลุ่มตามจุดภาคอย่างชัดเจน สามารถอธิบายความแปรปรวนของข้อมูลได้รวม 85.29% (PC1: 55.91% และ PC2: 29.38%) ดังนี้ เหง้าอ่อน และ เหง้าแก่ เกาะกลุ่มกันในควอดรนต์ที่ 3 (ล่างซ้าย) และฝั่งซ้ายของ PC1 แสดงว่ามีแบบแผนองค์ประกอบทางเคมีที่คล้ายคลึงกัน โดยมีสารเด่นคือกลุ่มสารให้รสเผ็ดร้อนและกลุ่มสารประกอบฟีนอลิก เช่น trans-Cinnamaldehyde และ 4-Coumaric acid ส่วนของ ใบ แยกตัวโดดเดี่ยวชัดเจนอยู่ทางด้านขวา (PC1 เป็นบวก) บ่งบอกว่ามีองค์ประกอบทางเคมีที่เฉพาะตัวแตกต่างจากส่วนเหง้าอย่างสิ้นเชิง ซึ่งสัมพันธ์กับสาร Rutin และ Citric acid และส่วนของ ดอก แยกไปทางควอดรนต์ที่ 1 (บนขวา) สัมพันธ์กับสารกลุ่มฟลาโวนอยด์และสารต้านอนุมูลอิสระ เช่น Quercetin Isorhamnetin และสารให้กลิ่นเฉพาะตัวอย่าง Vanillin

จากภาพ 5(ค) ผลการวิเคราะห์ PCA Biplot ชำหลวง สามารถอธิบายความแปรปรวนได้รวม 75.06% (PC1: 44.26% และ PC2: 30.80%) ซึ่งให้เห็นการแยกส่วนเหนือดินและใต้ดินออกจากกันตามแนวแกน PC1 โดย เหง้าอ่อน เหง้าแก่ และลำต้นเทียม มีองค์ประกอบทางเคมีเกาะกลุ่มกันทางด้านซ้าย (PC1 เป็นลบ) ซึ่งสัมพันธ์กับสาร 4-Hydroxybenzaldehyde และ Tetradecanedioic acid เห็นได้ว่าในเหง้าแก่ชำหลวงมีการสะสมสารกลุ่มอัลดีไฮด์ที่เด่นชัด สำหรับ ใบ และ ดอก แยกกลุ่มออกไปทางด้านขวา (ค่าบวกของ PC1) โดยเฉพาะส่วน ใบ ที่อยู่ควอดรนต์ที่ 1 (บนขวา) สัมพันธ์กับกลุ่มสาร Isokaempferide และ Sinapinic acid ซึ่งเป็นสารสำคัญที่พบมากในใบของชำหลวง ส่วนของ ดอก แยกตัวลงมาควอดรนต์ที่ 4 (ล่างขวา) สัมพันธ์กับกลุ่มกรดอะมิโนและกรดอินทรีย์ เช่น Leucine และ Glyoxylic acid

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีด้วย PCA biplot ให้ผลที่สอดคล้องกับ AHC dendrogram ทำให้ยืนยันได้ว่า ชนิดชำเป็นปัจจัยหลักในการจำแนกสารเมตาโบไลต์ ส่วนเหง้าของชำแดงพบสารกลุ่มกรดอินทรีย์และกรดอะมิโน (เช่น Azelaic และ Fumaric acid) ในปริมาณสูง ขณะที่เหง้าชำหลวงพบสารกลุ่มอัลดีไฮด์และฟีนอลโพรพานอยด์ (เช่น trans-Cinnamaldehyde และ Vanillin) ในทางตรงกันข้าม ส่วนใบและดอกของทั้งสองชนิดมีแบบแผนการสะสมสารกลุ่มฟลาโวนอยด์ที่คล้ายคลึงกัน

ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระของชำแดงและชำหลวง

สารสกัดที่นำมาวิเคราะห์ปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ และปริมาณฟีนอลิกทั้งหมด ได้จากการสกัดด้วยตัวทำละลาย เอทานอลบริสุทธิ์ และนำไปประเหยตัวทำละลายจนหมด พบว่าได้สารสกัดที่มีลักษณะและปริมาณสารผลิตภัณฑ์ (% yield) ของแต่ละส่วนของชำ ทั้งสองชนิด ดังแสดงดังตารางที่ 1

เห็นได้ว่าการสกัดด้วยสารเอทานอล ได้ปริมาณสารสกัดของแต่ละส่วน มีความแตกต่างกัน โดยพบว่าในชำแดงมีปริมาณสารสกัด (% yield) มากที่สุดคือ ดอก และเหง้าอ่อน ตามลำดับ สำหรับชำหลวงได้ปริมาณสารสกัดที่มาจากใบ และเหง้าอ่อนตามลำดับ โดยปริมาณของสารสกัดน่าจะขึ้นกับสารที่เป็นองค์ประกอบอยู่ในแต่ละส่วนมีมากน้อยไม่เท่ากัน ซึ่งสารแต่ละชนิดมีความชอบที่จะละลายในตัวทำละลายที่ต่างกัน ทำให้ได้ปริมาณสารสกัดที่ต่างกัน



ตารางที่ 1 ลักษณะและปริมาณสารผลิตภัณฑ์ (% yield) ที่สกัดได้จากเหง้าแก่ เหง้าอ่อน ต้น ใบ และดอก จากข่าแดงและข่าหลวง

ข่าแดง (<i>Alpinia siamensis</i> K. Scum)			ข่าหลวง (<i>Alpinia galanga</i> L. Willd)		
สารสกัด	ลักษณะสารสกัด	% yield สารสกัด	สารสกัด	ลักษณะสารสกัด	% yield สารสกัด
เหง้าแก่	สารมีสีเหลืองเข้มหนืด ลื่น มีน้ำมันเป็น ส่วนผสมน้ำมันสีเหลือง	8.05	เหง้าแก่	หนืด มีสีน้ำตาลอ่อน ปน น้ำมัน	10.75
เหง้าอ่อน	หนืด มีสีน้ำตาลแดง มี น้ำมัน	16.20	เหง้าอ่อน	น้ำมันสีเหลือง มีตะกอนสี เหลือง	13.16
ต้น	หนืด มีสีน้ำตาลแดง	4.40	ต้น	น้ำมันสีเหลือง ตะกอนสี เขียวดำ	7.99
ใบ	หนืด มีสีดำ	9.46	ใบ	มีสีดำ มีน้ำมันปนเล็กน้อย	15.34
ดอก	หนืด สีน้ำตาลเข้ม มี น้ำมันสีเหลือง	17.92	ดอก	น้ำมันสีน้ำตาลอ่อน มี ตะกอนสีน้ำตาลอ่อน	10.22

ผลการทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ

ในงานวิจัยนี้ได้ทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ 2 วิธี คือ DPPH assay และ ABTS assay เพื่อหาปริมาณการออกฤทธิ์ของเหง้าแก่ เหง้าอ่อน ลำต้นเทียม ใบ และดอก ของข่าแดง และข่าหลวง โดยใช้ค่า IC_{50} ในการรายงานผลการยับยั้งอนุมูลอิสระ ได้ 50 เปอร์เซ็นต์ (IC_{50}) ของทั้งสองวิธี แสดงดังตารางที่ 2

จากผลการวิเคราะห์ค่า IC_{50} ด้วยวิธี DPPH assay และทดสอบด้วย Two-way ANOVA พบว่า ข่าทั้งสองชนิดมีค่า IC_{50} แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยข่าแดงมีค่า IC_{50} โดยเฉลี่ยต่ำกว่าข่าหลวงในทุกส่วนประกอบ โดยมีค่าต่ำสุดในช่วง 52.00 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร ซึ่งบ่งบอกว่าสารสกัดจากข่าแดงมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่มีประสิทธิภาพสูงกว่า เนื่องจากใช้ปริมาณสารสกัดในการยับยั้งอนุมูลอิสระ 50% ได้น้อยกว่าข่าหลวง และผลการวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี ABTS ให้ผลไปในทิศทางเดียวกับวิธี DPPH โดยชนิดข่าแดงมีค่า IC_{50} เฉลี่ยต่ำกว่าข่าหลวง พบว่าเหง้าอ่อนของข่าแดงมีค่า IC_{50} ต่ำที่สุด เท่ากับ 39.7 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร แม้ว่าจากการทดสอบปริมาณสารต้านอนุมูลอิสระ ด้วยวิธี DPPH และ ABTS ให้ผลการทดสอบค่า IC_{50} เฉลี่ยที่แตกต่างกัน แต่หากพิจารณาจากแนวโน้มของข้อมูลพบว่าข่าแดงมีประสิทธิภาพการยับยั้งสารอนุมูลอิสระมากกว่าข่าหลวง ซึ่งเหง้าแก่ เหง้าอ่อน และดอก จากทั้งข่าแดงและข่าหลวง มีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระได้ดีเมื่อเทียบกับส่วนอื่น

ผลการทดสอบฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระจากวิธี DPPH และ ABTS assays ช่วยยืนยันประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระได้ครอบคลุมทุกมิติทางชีวโมเลกุล โดยวิธี DPPH มีความจำเพาะต่อการวัดการกำจัดอนุมูลอิสระที่ละลายในไขมันผ่านกลไกการให้อิเล็กตรอน (Hydrogen Atom Transfer: HAT) ขณะที่วิธี ABTS สามารถวัดฤทธิ์ของสารได้กว้างขวางกว่าทั้งในส่วนที่ละลายในน้ำและไขมันผ่านกลไกการให้อิเล็กตรอน (Single Electron Transfer: SET) การใช้ทั้งสองวิธีร่วมกันจึงช่วยลดความคลาดเคลื่อนที่อาจเกิดจากปัจจัยความเกะกะทางโครงสร้างโมเลกุล (Steric hindrance) ของสารสกัดต่ออนุมูลอิสระแต่ละชนิดได้อย่างมีประสิทธิภาพ อย่างไรก็ตามเมื่อเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน BHT ที่มีค่า IC_{50} เท่ากับ 10 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร พบว่าสารสกัดจากข่าแดงยังคงมีประสิทธิภาพต่ำกว่าในการยับยั้งอนุมูลอิสระ



ตารางที่ 2 แสดงค่าเปรียบเทียบ IC_{50} ด้วยวิธี DPPH assay และ ABTS assay และปริมาณฟีนอลิกรวม (total phenolic content, TPC) ในชำแดงและชำหลวง

ส่วนประกอบ	DPPH assay		ABTS assay		TPC	
	ค่า IC_{50} ($\mu\text{g/mL}$)		ค่า IC_{50} ($\mu\text{g/mL}$)		mg GAE/g DW	
	ชำแดง	ชำหลวง	ชำแดง	ชำหลวง	ชำแดง	ชำหลวง
เหง้าแก่	52.0 ± 4.0^a	$191.3 \pm 1.5^{d**}$	$58.0 \pm 2.6^{b*}$	$40.7 \pm 2.5^{**}$	34.5 ± 0.6^d	$51.3 \pm 0.3^{**}$
เหง้าอ่อน	53.0 ± 3.1^a	$92.0 \pm 5.5^{b**}$	39.7 ± 5.0^a	$56.7 \pm 6.8^{b**}$	110.4 ± 1.1^g	$50.5 \pm 0.2^{**}$
ดอก	53.0 ± 3.0^a	$321.0 \pm 4.7^{f**}$	93.3 ± 3.5^c	$120.0 \pm 10^{c**}$	54.3 ± 1.1^e	$11.3 \pm 0.2^{b**}$
ลำต้น	165.0 ± 5.0^c	$226.0 \pm 5.0^{e**}$	192.0 ± 3.6^e	$284.7 \pm 4.5^{f**}$	4.8 ± 0.3^a	$20.6 \pm 0.4^{c**}$
ใบ	227.0 ± 5.0^e	676.0 ± 4.5^g	126.0 ± 6.0^d	394.3 ± 3.8^g	18.2 ± 0.3^c	$75.2 \pm 0.1^{f**}$

หมายเหตุ: อักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างในแนวตั้ง (แต่ละส่วนของต้น) และเครื่องหมาย * จำนวน * และ ** ในแนวนอน (ระหว่างชนิดชำ) มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากตารางที่ 2 แสดงผลปริมาณสารฟีนอลิกรวม เป็นการหาสารที่มีหมู่ฟีนอลทั้งหมดที่เป็นองค์ประกอบในสารสกัดจากเหง้า ลำต้นเทียม ใบ และดอก ในชำแดงและชำหลวง ในการศึกษาครั้งนี้ใช้สารละลายกรดแกลลิก (Gallic acid) เป็นสารมาตรฐาน และคำนวณความเข้มข้นของสารฟีนอลิกรวมในหน่วยของมิลลิกรัมสมมูลของกรดแกลลิกต่อกรัมน้ำหนักแห้งของพืช (mg gallic acid equivalent (GAE)/g DW) จากสมการเส้นตรงของกราฟมาตรฐาน Gallic acid ($y = 6.8891x$; $R^2 = 0.9922$) จากการวิเคราะห์เปรียบเทียบค่า Phenolic content (mg GAE/g DW) ระหว่างชำแดง และชำหลวง ในแต่ละส่วนของพืชโดยใช้ two-way ANOVA พบว่าเมื่อเปรียบเทียบระหว่างชนิดชำแดงและชำหลวง มีค่า Phenolic content เฉลี่ยที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ซึ่งชำแดงมีค่า Phenolic content สูงมากในเหง้าอ่อน ขณะที่ชำหลวงพบมากในส่วนของใบ และเหง้าแก่

เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์เชิงเส้นระหว่างปริมาณสารฟีนอลิกรวม และค่า IC_{50} จากวิธี DPPH และ ABTS โดยวิธี Pearson Correlation Coefficient แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Pearson Correlation, r) ดังตารางที่ 3

ตารางที่ 3 แสดงค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Pearson Correlation, r) ระหว่างปริมาณสารฟีนอลิกรวม และค่า IC_{50} จากวิธี DPPH และ ABTS ($p < 0.05$)

ชนิดชำ	TPC เทียบกับ IC_{50} (DPPH)	TPC เทียบกับ IC_{50} (ABTS)
ชำแดง	-0.669	-0.799
ชำหลวง	+0.459	+0.275

ชำแดง มีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างปริมาณฟีนอลิกรวมเทียบกับค่า IC_{50} จากวิธี DPPH และ ABTS เท่ากับ -0.669 และ -0.799 ตามลำดับ ซึ่งเป็นค่าลบที่มาก แสดงว่าเมื่อปริมาณสารฟีนอลิกรวม (TPC) เพิ่มขึ้น ค่า IC_{50} จะมีแนวโน้มลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) สำหรับชำหลวง มีค่าเท่ากับ 0.275 และ 0.459 ตามลำดับ ซึ่งมีความสัมพันธ์เชิงบวกในระดับต่ำถึงปานกลาง แสดงว่าค่าปริมาณสารฟีนอลิกรวม (TPC) ไม่ได้ส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (IC_{50}) อย่างเป็นเส้นตรง

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

การประยุกต์ใช้เทคโนโลยี UHPLC-Hi-Res-Orbitrap-MS/MS ร่วมกับกระบวนการทางสถิติหลายตัวแปร (Chemometrics) ในการศึกษาครั้งนี้ ช่วยให้สามารถจำแนกแบบแผนทางชีวโมเลกุล (Metabolic Profiling) ของชาแดงและชาหลวงที่ปลูกในจังหวัดสมุทรปราการได้ ผลการวิเคราะห์ PCA และ AHC ทำให้ทราบว่าการสะสมสารเมตาโบไลต์ทุติยภูมิมีความจำเพาะตามส่วนต่าง ๆ และชนิดอย่างมีนัยสำคัญ

ชาแดงมีการสะสมสารกลุ่มฟลาโวนอยด์ (Flavonoids) ที่หลากหลายชนิด ได้แก่ Quercetin Rutin และ Isorhamnetin โดยเฉพาะในส่วนใบและดอกในปริมาณที่สูงกว่าส่วนอื่น ๆ ซึ่งสอดคล้องกับหน้าที่ในการป้องกันแสง UV และการดึงดูดแมลง การสะสมของสารเหล่านี้ปริมาณสูงบริเวณใบและดอก สอดคล้องกับบทบาทหน้าที่ทางสรีรวิทยาของพืชในการป้องกันความเสียหายจากรังสี UV (Photoprotection) และความสวยงามเพื่อช่วยดึงดูดแมลงผสมเกสร [15, 16] นอกจากนี้ชาแดงยังโดดเด่นในการสะสมกรดอินทรีย์และกรดอะมิโน เช่น Azelaic acid, Fumaric acid และ Proline ในส่วนเหง้า ในขณะที่ชาหลวงมีรูปแบบการสะสมของสารในกลุ่มฟีนอลิกอัลดีไฮด์และฟีนิลโพรพานอยด์ เช่น trans-Cinnamaldehyde, Vanillin และ 4-Hydroxybenzoic acid ในเหง้าแก่และเหง้าอ่อนเป็นหลัก และพบสารกลุ่ม Kaempferol และ Isokaempferide สะสมในส่วนใบของชาหลวงอย่างเด่นชัด สำหรับสาร Azelaic acid (AzA) จัดเป็นสารบ่งชี้สำคัญในการจำแนกชนิดของชา (โดยเฉพาะชาแดง) เป็นกรดไขมันที่เกิดจากการสลายตัวของกรดไขมันไม่อิ่มตัวผ่านกระบวนการ Lipid peroxidation เมื่อพืชเผชิญกับความเครียด เช่น สภาวะดินเค็ม (Salt stress) ในพื้นที่จังหวัดสมุทรปราการ พืชจะเพิ่มระดับ AzA เพื่อกระตุ้นระบบภูมิคุ้มกันและรักษาสมดุลของเซลล์ และเป็นตัวกระตุ้นหลักให้พืชเปิดการทำงานของยีนในวิถี Phenylpropanoid biosynthesis ส่งผลให้เกิดสารประกอบฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์หลากหลายชนิด [4, 16] ปริมาณของสารสำคัญต่างๆ ที่สะสมในส่วนต่างๆ ของทั้งชาแดง และชาหลวง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Trimanto และคณะ [17] พบว่า เหง้าของชาเป็นส่วนที่มีปริมาณกลุ่มฟลาโวนอยด์และฟีนอลิกสูงที่สุด มีฤทธิ์ต้านจุลชีพด้านการอักเสบ และต้านอนุมูลอิสระสูง สำหรับใบ ลำต้นเทียมและดอก มักพบสารกลุ่มฟลาโวนอยด์ มีประโยชน์ในการต้านอนุมูลอิสระและช่วยบำรุงร่างกาย

ดังนั้น สามารถใช้สาร Azelaic acid และ trans-Cinnamaldehyde เป็นตัวบ่งชี้ทางชีวภาพ ในการระบุชนิดของชาแดงและชาหลวง เพื่อทำหน้าที่เป็น Molecular Barcode ที่แม่นยำกว่าการพิจารณาจากสัณฐานวิทยาหรือการดมกลิ่นซึ่งเป็นวิธีดั้งเดิมที่มีข้อจำกัดสำหรับผลิตภัณฑ์แปรรูปที่ลักษณะทางกายภาพสูญหายไป ทั้งนี้เอกลักษณ์ทางเคมีจะมีความคงตัวและสามารถใช้ตรวจสอบย้อนกลับได้เพื่อป้องกันการปลอมปนของชนิดชา

เมื่อพิจารณาปริมาณสารที่สกัดได้จากชาแดงเทียบกับฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ พบว่า ดอก และ เหง้าอ่อน เป็นส่วนที่ให้ค่า % yield สูงที่สุด และเป็นส่วนที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระดีที่สุด แสดงว่าในสารสกัดจากดอก และเหง้าอ่อน มีความเข้มข้นของสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในปริมาณมากเช่นกัน สำหรับชาหลวงพบว่า ใบ ให้ % yield สูงที่สุด อย่างไรก็ตาม สารสกัดดังกล่าวกลับมีประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระต่ำที่สุด จึงสะท้อนให้เห็นว่าปริมาณสารสกัดที่ได้ในสัดส่วนที่สูงนั้น ประกอบด้วยสารที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพน้อย หรืออาจมีสารกลุ่มอื่นที่ไม่ออกฤทธิ์โดยตรงปะปนอยู่มาก เช่น ไข (Waxes) หรือคลอโรฟิลล์ ดังนั้นเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระของสารสกัดชาหลวง สามารถปรับความเข้มข้นของระบบตัวทำละลาย แทนการใช้ Ethanol เพียงชนิดเดียว เพื่อเจาะจงการสกัดสารกลุ่มฟลาโวนอยด์ให้มากขึ้น จะช่วยกำจัดสิ่งเจือปนที่ไม่เกี่ยวข้องและเพิ่มความแรงของฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระต่อหน่วยน้ำหนักสารสกัดให้สูงขึ้น

สำหรับประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระ พบว่าชาแดงเป็นแหล่งที่มีองค์ประกอบของสารต้านอนุมูลอิสระ ที่เด่นกว่าชาหลวงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยเฉพาะในส่วนของเหง้าและดอกซึ่งมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูงสุด (มีค่า IC_{50} ต่ำ) และพบปริมาณฟีนอลิกรวมสูงที่สุดในเหง้าอ่อน การที่เหง้าอ่อนมีกิจกรรมทางเคมีสูงอาจเกิดจากกระบวนการเมแทบอลิซึมที่ว่องไว



เพื่อการเติบโตและการตอบสนองต่อสภาวะความเค็มในพื้นที่จังหวัดสมุทรปราการ [17-18] ส่งผลให้มีการสะสมของสารกลุ่ม Flavonols เช่น Quercetin และ Kaempferol ซึ่งมีโครงสร้างประกอบด้วยหมู่ไฮดรอกซิล (-OH) ในตำแหน่งที่เหมาะสมต่อการให้อิเล็กตรอนหรือไฮโดรเจนเพื่อกำจัดอนุมูลอิสระได้มีประสิทธิภาพ ขณะที่ข้าหลวงพบปริมาณฟีนอลิก รวมมากที่สุดบริเวณใบแม่ใบของข้าหลวงจะมี TPC สูง แต่กลับมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระที่ต่ำมาก อาจเกิดจากสารประกอบฟีนอลิกในใบข้าหลวงอยู่ในรูปแบบที่ทำปฏิกิริยากับอนุมูล DPPH ได้ช้า หรืออาจถูกบดบังด้วยสารอื่น ๆ นอกจากนี้เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ทางสถิติด้วยการวิเคราะห์สหสัมพันธ์ (Correlation Analysis) ระหว่างค่า IC_{50} กับปริมาณฟีนอลิกรวมพบว่าค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ของข้าหลวงมีค่าติดลบสูง บ่งชี้ว่าปริมาณสารฟีนอลิกเป็นปัจจัยโดยตรงที่กำหนดประสิทธิภาพการต้านอนุมูลอิสระ ในขณะที่ข้าหลวงมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ เป็นบวกน้อย แสดงว่าค่าปริมาณสารฟีนอลิกรวม (TPC) ไม่ได้ส่งผลโดยตรงต่อการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (IC_{50}) อย่างเห็นเป็นเส้นตรง อาจเป็นผลมาจากในข้าหลวง สาร TPC ที่วัดได้ส่วนใหญ่อาจเป็นสารกลุ่ม Phenolic Aldehydes (เช่น Vanillin หรือ 4-Hydroxybenzaldehyde) ซึ่งแม้จะทำปฏิกิริยากับสาร Folin-Ciocalteu ได้ค่า TPC สูง แต่สารเหล่านี้มีประสิทธิภาพในการกำจัดอนุมูลอิสระต่ำ จึงเป็นผลให้มีประสิทธิภาพในการต้านอนุมูลอิสระต่ำ

อย่างไรก็ตาม ข้อมูลที่ได้จากการศึกษาวิจัยในครั้งนี้สามารถนำไปประยุกต์ใช้เพื่อยกระดับและสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับข้าหลวงจังหวัดสมุทรปราการได้อย่างเป็นรูปธรรมตามแนวทางเศรษฐกิจฐานชีวภาพ (Bio-economy) โดยเฉพาะการนำส่วนประกอบของพืชที่เคยถูกมองข้ามอย่างใบและดอกมาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพ เนื่องจากผลการวิเคราะห์หลายพิมพ์ทางชีวเคมีชี้ให้เห็นชัดเจนว่าดอกข้าหลวงเป็นแหล่งของสารกลุ่มฟลาโวนอยด์ที่มีศักยภาพในการต้านอนุมูลอิสระสูงเทียบเท่ากับส่วนเหง้า ขณะที่เหง้าอ่อนข้าหลวงซึ่งมีปริมาณสารฟีนอลิกรวมและฤทธิ์ทางชีวภาพโดดเด่นที่สุดนั้นจัดเป็นวัตถุดิบคุณภาพสูงหรือ "Superfood" ที่เหมาะสมอย่างยิ่งสำหรับอุตสาหกรรมเวชสำอางและผลิตภัณฑ์เสริมอาหารชะลอวัย นอกจากนี้ ฐานข้อมูลตัวบ่งชี้ทางเคมี (Chemical Markers) ที่จำเพาะต่อชนิดและอวัยวะจากสภาพดินเค็มในพื้นที่ เช่น Azelaic acid และ Eugenol ยังสามารถนำไปประยุกต์ใช้เป็นมาตรฐานในการพิสูจน์อัตลักษณ์และควบคุมคุณภาพวัตถุดิบสมุนไพรในระดับอุตสาหกรรม อันจะนำไปสู่การบริหารจัดการทรัพยากรเกษตรแบบ Zero Waste ที่ช่วยเพิ่มรายได้ที่ยั่งยืนและสร้างความเชื่อมั่นให้กับผู้บริโภคได้ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ ที่สนับสนุนทุนวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบคุณชาวบ้านจาก 4 อำเภอ ในจังหวัดสมุทรปราการ ที่อำนวยความสะดวกและให้ความช่วยเหลือในการเก็บข้อมูลภาคสนาม

เอกสารอ้างอิง

1. Ghosh S, Rangan L. *Alpinia*: The gold mine of future therapeutics. 3 Biotech 2013;3(3):173–85.
2. Tungmunthum D, Tanaka N, Uehara A, Iwashina T. Flavonoids profile, taxonomic data, history of cosmetic uses, anti-oxidant and anti-aging potential of *Alpinia galanga* (L.) Willd. Cosmetics 2020;7(4):89.
3. Tang X, Xu C, Yagiz Y, Simonne A, Marshall MR. Phytochemical profiles, and antimicrobial and antioxidant activities of greater galangal [*Alpinia galanga* (Linn.) Swartz.] flowers. Food Chem 2018;255:300–8.
4. Sharma A, Shahzad B, Rehman A, Bhardwaj R, Landi M, Zheng B. Response of phenylpropanoid pathway and the role of polyphenols in plants under abiotic stress. Molecules 2019;24(13):2452.
5. ยุคลธร สถาปนศิริ, รัมภ์ดา มีบุญญา, ชวนพิศ จิระพงษ์, ผุสดี สิริยากร, อลิศรา พรายแก้ว, วิภาพรณ ชนะภักดิ์. การสำรวจชนิดและการใช้ประโยชน์ของข้าในพื้นที่จังหวัดสมุทรปราการ. ว วิทย เทคโนโลยี หัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ 2568;11(2):12–27.
6. Tian Y, Jia X, Wang Q, Lu T, Deng G, Tian M, et al. Antioxidant, antibacterial, enzyme inhibitory, and anticancer activities and chemical composition of *Alpinia galanga* flower essential oil. Pharmaceuticals 2022; 15(9):1069.



7. Singh S, Sahoo BC, Kar SK, Sahoo A, Nayak S, Kar B, et al. Chemical constituents Analysis of *Alpinia galanga* and *Alpinia calcarata*. Res J Pharm Technol 2020;13(10):4735–9.
8. Chouni A, Paul S. A review on phytochemical and pharmacological potential of *Alpinia galanga*. Pharmacogn J 2018;10(1):9–15.
9. Han W, Ward JL, Kong Y, Li X. Editorial: Targeted and untargeted metabolomics for the evaluation of plant metabolites in response to the environment. Front Plant Sci 2023;14:116751.
10. Tyagi A, Yeon SJ, Daliri EBM, Chen X, Chelliah R, Oh DH. Untargeted metabolomics of Korean fermented brown rice using UHPLC Q-TOF MS/MS reveal an abundance of potential dietary antioxidative and stress-reducing compounds. Antioxidants 2021;10(4):626.
11. Jin M, Zheng W, Zhang Y, Gao B, Yu L. Lipid compositions and geographical discrimination of 94 geographically authentic wheat samples based on UPLC-MS with non-targeted lipidomic approach. Foods 2021;10(1):10.
12. Xu J, Schaich KM. Re-evaluation of the 2,2-diphenyl-1-picrylhydrazyl free radical (DPPH) assay for antioxidant activity. J Agric Food Chem 2014;62(19):4251–60.
13. Re R, Pellegrini N, Proteggente A, Pannala A, Yang M, Rice-Evans C. Antioxidant activity applying an improved ABTS radical cation decolorization assay. Free Radic Biol Med 1999;26(9-10):1231–7.
14. Ainsworth EA, Gillespie KM. Estimation of total phenolic content and other oxidation substrates in plant tissues using Folin-Ciocalteu reagent. Nat Protoc 2007;2(4):875–7.
15. Agati G, Tattini M. Multiple functions of flavonoids in photoprotection. New Phytol 2010;186(4):786–93.
16. Tattini M, Guidi L, Morassi-Bonzi L, Pinelli P, Remorini D, Degl'Innocenti E, et al. On the role of flavonoids in the integrated mechanisms of response of *Ligustrum vulgare* and *Phillyrea latifolia* to high solar radiation. New Phytol 2005;167(2):457–70.
17. Trimanto T, Hapsari L, Dwiyantri D. *Alpinia galanga* (L.) Willd: Plant morphological characteristic, histochemical analysis and review on pharmacological. AIP Conf Proc 2021;2353:030021.
18. Setiawati T, Susilawati A, Mutaqin AZ, Nurzaman M, Annisa, Partasasmita R, et al. Morpho-anatomy and physiology of red galangal (*Alpinia purpurata*) and white galangal (*Alpinia galanga*) under some salinity stress levels. Biodiversitas 2018;19(3):809–15.



ผลของน้ำชาต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของหัวใจในหนูแรทเพศผู้
The Effect of Galangal (*Alpinia galanga*) Decoction on Cardiac Structural
Changes in Male Rats

จันเพ็ญ บางสำรวจ^{1*} ทิพวรรณ นนทะน้า² ศศิกานต์ เลิศนา² ศุภานัน พรเจริญ²

สุธาวัลย์ สมพินิจ² และ ระพีพันธุ์ ศรีเดช¹

¹สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ สมุทรปราการ 10540

²หลักสูตรวิทยาศาสตรการแพทย์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ สมุทรปราการ 10540

Janpen Bangsumruaj^{1*}, Thippawan Nonthanum², Sasikan Lertna², Supanan Porncharoen²,
Suthawan Sompini² and Rapipan Siridet¹

¹Division of Biological Science, Faculty of Science and Technology, Huachiew Chalermprakiet University,
Samutprakarn 10540

²Medical science, Faculty of Science and Technology, Huachiew Chalermprakiet University, Samutprakarn
10540

*Corresponding author: janpen.ban.365@hcu.ac.th

Received: 23 January 2026/ Revised: 26 March 2026/ Accepted: 31 March 2026

บทคัดย่อ

ชา (*Alpinia galanga*) เป็นสมุนไพรที่นิยมบริโภคในชีวิตประจำวันและมีรายงานฤทธิ์ทางชีวภาพหลากหลาย อย่างไรก็ตาม ข้อมูลด้านความปลอดภัยต่อโครงสร้างหัวใจ โดยเฉพาะในรูปแบบการบริโภคจริงยังมีจำกัด การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ ประเมินผลของน้ำชาต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างหัวใจทั้งในระดับมหกายวิภาคและจุลกายวิภาคในหนูแรทเพศผู้สายพันธุ์วิสตาร์ หนูทดลองถูกแบ่งเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มละ 5 ตัว ได้แก่ กลุ่มควบคุมและกลุ่มที่ได้รับน้ำชาขนาด 400 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักตัว 1 กิโลกรัม ต่อวันเป็นเวลา 14 วัน จากนั้นประเมินลักษณะเชิงกายภาพของหัวใจและลักษณะทางจุลกายวิภาคของเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจด้วย วิธีการย้อม hematoxylin และ eosin (H&E) พบว่ากลุ่มที่ได้รับน้ำชามีน้ำหนักและความยาวของหัวใจลดลงอย่างมีนัยสำคัญทาง สถิติ ขณะที่ความหนาของผนังหัวใจไม่แตกต่างกัน ในระดับจุลกายวิภาคพบว่าขนาดเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ทางสถิติ ขณะที่อัตราส่วนนิวเคลียสต่อไซโตพลาสซึมลดลงและพบความสัมพันธ์เชิงลบระหว่างขนาดเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจกับ น้ำหนักหัวใจเฉพาะในกลุ่มที่ได้รับน้ำชา สรุปว่าการได้รับน้ำชาอย่างต่อเนื่องทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของหัวใจทั้งในระดับมหกาย วิภาคและจุลกายวิภาค ผลการศึกษานี้ให้ข้อมูลเบื้องต้นเกี่ยวกับความปลอดภัยของการบริโภคน้ำชาในรูปแบบใกล้เคียงการใช้จริง เพื่อนำไปศึกษาต่อยอดในอนาคต

คำสำคัญ: ชา โครงสร้างหัวใจ พื้นที่หน้าตัดเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจ หนูแรท ความปลอดภัยในการบริโภค

Abstract

Alpinia galanga is a commonly used medicinal herb with a wide range of biological activities. However, information regarding its effects on cardiac structure, particularly under conditions that reflect actual consumption, remains limited. This study aimed to evaluate the effects of galangal decoction on cardiac structural changes at gross and microscopic level in male Wistar rats. The rats were randomly divided into two groups (n = 5 per group): a control and a galangal-treated group. The treated group received galangal decoction at 400 mg/kg body weight per day for 14 days. Cardiac physical characteristics and myocardial histology were assessed using hematoxylin and eosin (H&E) staining. The galangal-treated group showed significantly reduced heart weight and length, while ventricular wall thickness was unchanged. At the microscopic level, cardiomyocyte size significantly increased, whereas the nucleus-to-cytoplasm ratio decreased. A positive correlation between cardiomyocyte size and heart weight was observed only in the treated group. In conclusion, continuous intake of galangal decoction induced cardiac structural changes at gross and microscopic levels. The results provide preliminary data on the cardiac safety of galangal consumption and support further investigation.

Keywords: *Alpinia galanga*, cardiac structure, cardiomyocytes cross-sectional area, rat, consumption safety

บทนำ

ข่า (*Alpinia galanga*) เป็นพืชสมุนไพรที่พบได้ทั่วไปในเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ ซึ่งใช้ทั้งในครัวเรือนและในยาสมุนไพรพื้นบ้าน องค์ประกอบทางเคมีของข่า เช่น สารฟีนอลิกและฟลาโวนอยด์ มีรายงานว่ามียฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ [1-3] ด้านการอักเสบ [3] และด้านการเติบโตของเซลล์มะเร็ง [4, 5] สารสำคัญที่พบในเหง้าข่าประกอบด้วย 1'-acetoxychavicol acetate (ACA), galangin และ kaempferide รวมถึงสารในกลุ่มน้ำมันหอมระเหย เช่น eugenol ล้วนมีบทบาททางเภสัชวิทยาที่สำคัญ โดย ACA มีรายงานว่าสามารถยับยั้งกระบวนการอักเสบผ่านการยับยั้งเส้นทางสัญญาณ NF-KB และมีฤทธิ์ต้านมะเร็งโดยกระตุ้นกระบวนการตายของเซลล์ (apoptosis) [6-8] ขณะที่ galangin เป็นสารในกลุ่ม ฟลาโวนอยด์มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระสูง สามารถลดความเครียดออกซิเดชันและยับยั้งการเพิ่มจำนวนของเซลล์มะเร็ง รวมถึงมีฤทธิ์ด้านการอักเสบ [9-11] นอกจากนี้ kaempferide ยังเป็น O-methylated flavonoid มีรายงานว่ามียฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและด้านการอักเสบเช่นเดียวกัน และอาจมีบทบาทในการปกป้องเซลล์จากความเสียหายที่เกิดจากความเครียดออกซิเดชันรวมทั้งมีบทบาทในการปกป้องระบบหัวใจและหลอดเลือด [12, 13] ขณะเดียวกันสารในกลุ่มน้ำมันหอมระเหย เช่น eugenol มีรายงานว่ามียฤทธิ์ด้านจุลชีพ และด้านการอักเสบ ซึ่งอาจมีส่วนช่วยเสริมฤทธิ์ทางเภสัชวิทยาของข่า [14, 15]

ในช่วงการระบาดของโรคโควิด-19 ในประเทศไทย มีการบริโภคน้ำสมุนไพรจากข่าอย่างแพร่หลาย เนื่องจากมีความเชื่อที่สามารถช่วยป้องกันหรือกำจัดเชื้อไวรัสได้ ถึงแม้จะยังไม่มีรายงานวิจัยที่แน่ชัดเกี่ยวกับผลดังกล่าว แต่เมื่อพิจารณาจากผลการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าข่าสามารถทำให้เกิดการตายของเซลล์มะเร็งได้ ในการศึกษาพรีคลินิกหลายฉบับบ่งชี้ว่าข่าสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตหรือทำให้เซลล์มะเร็งเกิดการตาย (apoptosis) ได้ในเซลล์หลากหลายชนิด [16-18] โดยเฉพาะอย่างยิ่งการศึกษาที่ใช้สารสกัดจากเหง้าข่าที่สกัดด้วยน้ำ (aqueous extract) ซึ่งใกล้เคียงกับลักษณะการบริโภคในชีวิตประจำวันพบว่าสารสกัดดังกล่าวสามารถทำให้ทั้งเซลล์มะเร็งและเซลล์ปกติหยุดการเจริญเติบโตได้ในความเข้มข้นระดับสูง โดยมีการสร้างความเสียหายต่อ DNA และการตายของเซลล์อย่างชัดเจนเมื่อทดลองกับเซลล์หลายชนิดในหลอดทดลอง [19] งานวิจัยนี้ระบุว่าเมื่อให้สารสกัดข่าใน



ความเข้มข้นตั้งแต่ประมาณ 100–300 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร จะเกิดการทำลายเส้นใย DNA และเริ่มมีสัญญาณการตายของเซลล์ อาจเกี่ยวข้องกับการเพิ่มระดับของอนุมูลอิสระภายในเซลล์ [19]

ในบริบททางสรีรวิทยา ข่าสามารถส่งผลกระทบต่อระบบต่างๆ ของร่างกายได้โดยมีการศึกษาที่บ่งชี้ว่าสารสกัดข่าสามารถลดการบาดเจ็บของหัวใจจากความเครียดออกซิเดชันและมีฤทธิ์ด้านการอักเสบ จะช่วยในการป้องกันการทำลายเนื้อเยื่อหัวใจ [20] นอกจากนี้ยังพบว่าสารสกัดข่าสามารถลดการบาดเจ็บของกล้ามเนื้อหัวใจที่เกิดจากความเครียดจากเสียงดัง โดยการปรับสมดุลระบบออกซิเดชันและยับยั้งตัวกลางการอักเสบ ซึ่งเป็นกลไกหนึ่งที่สำคัญต่อการป้องกันการทำลายเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจ [21] ในทางโภชนาการและเภสัชวิทยายังมีรายงานว่าข่าสามารถส่งผลกระทบต่อระดับไขมันในเลือดโดยลดคอเลสเตอรอลและไตรกลีเซอไรด์ พร้อมทั้งเพิ่มระดับ high density lipoprotein (HDL) มีความเกี่ยวข้องกับความเสี่ยงต่อโรคหลอดเลือดหัวใจ [22, 23] สิ่งเหล่านี้บ่งชี้ถึงศักยภาพของข่าในการสนับสนุนการทำงานของระบบหัวใจและหลอดเลือดผ่านกลไกหลายทาง เช่น การลดออกซิเดชันลดการอักเสบ และควบคุมไขมันในเลือด [21, 22, 24] จะเห็นว่าสรรพคุณของข่าให้ผลในเชิงบวกต่อระบบหัวใจและหลอดเลือด แต่ยังไม่มีการศึกษาผลของน้ำสมุนไพรข่าที่มีรูปแบบการเตรียมใกล้เคียงกับการบริโภคในครัวเรือนต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของหัวใจทั้งในเชิงมหากายวิภาคและจุลกายวิภาค ดังนั้นจึงเป็นที่น่าสนใจว่าน้ำข่ามีผลต่อโครงสร้างของหัวใจหรือไม่ จึงเป็นช่องว่างของความรู้ที่จำเป็นต้องได้รับการศึกษาของสรีรวิทยาที่ถูกต้องตามหลักวิทยาศาสตร์ที่เหมาะสม ดังนั้นการศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของน้ำข่าต่อการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของหัวใจทั้งในเชิงกายภาพและระดับเซลล์ในหนูปกติ โดยมีสมมติฐานคือน้ำข่าไม่ทำให้เกิดพยาธิสภาพต่อหัวใจในหนูปกติ

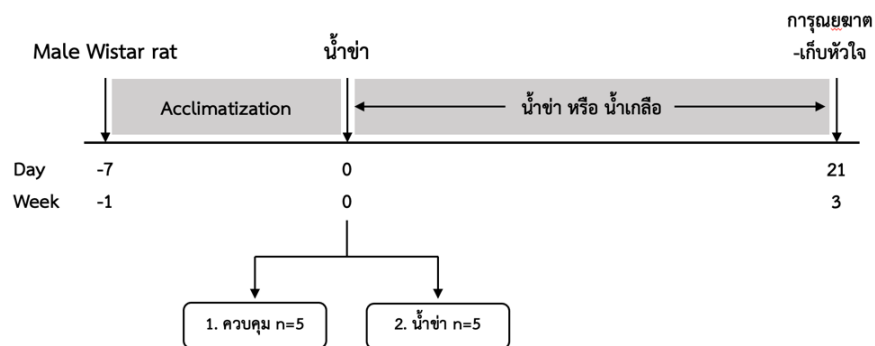
วิธีดำเนินการวิจัย

สัตว์ทดลอง

การศึกษานี้ใช้หนูแรทเพศผู้สายพันธุ์วิสตา (Wistar rat) จำนวน 10 ตัว อายุ 7 สัปดาห์ น้ำหนักเฉลี่ยระหว่าง 200–250 กรัม หนูทดลองถูกเลี้ยงเป็นคู่ในกรงระบบระบายอากาศเฉพาะ (Individually Ventilated Cage; IVC) ขนาดกว้าง 20 เซนติเมตร ยาว 31 เซนติเมตร และสูง 18 เซนติเมตร ภายใต้สภาวะรอบแสงสว่างและความมืดอย่างละ 12 ชั่วโมง (เปิดไฟเวลา 06.00 น. ความเข้มแสงประมาณ 350 ลักซ์) ในห้องที่ควบคุมอุณหภูมิที่ 22 ± 1 องศาเซลเซียส และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 30 – 60 หนูทดลองได้รับอาหารและน้ำดื่มอย่างอิสระ (ad libitum) ก่อนเริ่มการทดลองหนูทุกตัวได้รับการปรับสภาพให้คุ้นเคยกับสภาพแวดล้อมเป็นระยะเวลา 1 สัปดาห์ การดำเนินการทดลองทั้งหมดเป็นไปตามหลักเกณฑ์และแนวทางจริยธรรมการใช้สัตว์เพื่อการวิจัย โดยได้รับการพิจารณาและอนุมัติจากคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัย มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ เลขที่ HCU-EC1688/2568

ขั้นตอนการดำเนินการวิจัย

หนูทดลองถูกแบ่งออกเป็น 2 กลุ่ม กลุ่มละ 5 ตัว ได้แก่ กลุ่มควบคุมและกลุ่มน้ำข่า โดยกลุ่มควบคุมได้รับน้ำเกลือในขนาด 400 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักตัว 1 กิโลกรัมต่อวัน ผ่านทางป้อนทางปาก (oral gavage) ติดต่อกันเป็นระยะเวลา 14 วัน [23, 25] ขณะที่กลุ่มน้ำข่าได้รับน้ำข่าในขนาด 400 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักตัว 1 กิโลกรัมต่อวัน ผ่านทางป้อนทางปากติดต่อกันเป็นระยะเวลา 14 วันเช่นเดียวกัน เมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการทดลองหนูทุกตัวถูกวางยาสลบด้วยไอโซฟลูเรน (isoflurane) และดำเนินการการุณยฆาตตามหลักจริยธรรมการใช้สัตว์ทดลองเพื่อเก็บชิ้นเนื้อหัวใจสำหรับนำไปตรวจประเมินการเปลี่ยนแปลงเชิงกายภาพและการเปลี่ยนแปลงของเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจ โดยชั่งน้ำหนัก วัดความยาว ความหนา และวัดขนาดของนิวเคลียส ขนาดของเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจ แสดงลำดับและระยะเวลาการดำเนินการทดลอง (experimental timeline) ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แสดงลำดับเวลาในการทดลอง

วัสดุและวิธีการทดลอง

การเตรียมน้ำขำ

เหง้าขำที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้เป็น ขำแดง (*Alpinia siamensis* K. Schum.) นำมาจากตำบลศรีชะชะจะใหญ่ อำเภอบางเสาธง จังหวัดสมุทรปราการ โดยมีวิธีการเตรียมดังนี้ นำเหง้าขำสดและสมบูรณ์มาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำสะอาด จากนั้นนำไปผึ่งให้แห้งแล้วชั่งน้ำหนักก่อนนำมาผานเป็นชิ้นบาง ๆ เพื่อนำไปปั่นให้ละเอียดแล้วนำไปต้มที่อุณหภูมิ 95 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 66.21 นาที โดยใช้อัตราส่วนของเหง้าขำต่อน้ำกลั่นร้อยละ 13.79 (1 : 7.25 (น้ำหนักต่อปริมาตร)) ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ตรวจพบสารสำคัญในปริมาณที่ไม่เป็นพิษต่อตับและไต เนื่องจากการศึกษานี้ได้มีการประเมินความเป็นพิษเบื้องต้นของน้ำขำที่ความเข้มข้นดังกล่าว โดยตรวจวัดค่า BUN และ creatinine ในเลือด ซึ่งไม่พบความผิดปกติเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม (ข้อมูลไม่ได้แสดง) จากนั้นกรองเอากากออกเพื่อให้ได้น้ำขำที่ใส นำน้ำขำที่ได้มาพักให้เย็นและเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียสก่อนนำไปใช้ในการทดลอง

การวัดความยาวและความหนาของผนังกล้ามเนื้อหัวใจ

นำหัวใจที่ตัดแยกออกจากสัตว์ทดลองมาล้างด้วยสารละลายน้ำเกลือความเข้มข้นร้อยละ 0.9 (normal saline) เพื่อกำจัดเลือดและสิ่งปนเปื้อน จากนั้นเก็บชิ้นเนื้อโดยแช่ในสารละลาย 10% neutral buffered formalin เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ในวันที่เริ่มการทดสอบวัดความยาวของหัวใจด้วยเวอร์เนียดิจิทัล (digital vernier caliper) โดยวัดจากตำแหน่ง base ถึง apex ตามแนว longitudinal axis ของหัวใจ จากนั้นตัดหัวใจตามแนวขวางบริเวณกึ่งกลางของหัวใจออกเป็น 2 ส่วน เพื่อแยกบริเวณห้องบนและห้องล่าง วัดความหนาของผนังหัวใจ ได้แก่ ผนังห้องล่างซ้าย (left ventricle) ผนังห้องล่างขวา (Right ventricle) และผนังกันหัวใจ (interventricular septum) โดยใช้เวอร์เนียดิจิทัล

การวัดขนาดของเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจห้องล่างซ้าย

นำหัวใจครึ่งล่างที่ถูกตัดแบ่งเพื่อวัดความหนาตามขวางอีกครั้งโดยตัดได้ต่อตำแหน่งแรกลงมาประมาณ 5 มิลลิเมตร ชิ้นเนื้อนี้จะใช้เป็นตัวแทนของหัวใจห้องล่างซ้ายสำหรับวัดขนาดเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจ จากนั้นนำไปผ่านกระบวนการเตรียมเนื้อเยื่อมาตรฐานเพื่อเตรียมบล็อกพาราฟินสำหรับการตัดชิ้นเนื้อเป็นแผ่นบาง (section) ด้วยไมโครโทม (microtome) ที่ความหนา 5 ไมโครเมตร โดยเก็บชิ้นเนื้อจำนวน 3 ริปบอน (ribbons) ต่อ 1 ตัวอย่าง ห่างกัน 100 ไมโครเมตร นำชิ้นเนื้อที่ได้ไปเตรียมสไลด์และย้อมสีด้วยวิธี hematoxylin and eosin staining (H&E) ตามวิธีมาตรฐานโดยมีขั้นตอนการย้อมสีอย่างย่อ ดังนี้ แช่สไลด์ในสารละลาย hematoxylin เป็นเวลา 15 นาที เพื่อย้อมโครงสร้างที่มีคุณสมบัติเป็นกรด โดยเฉพาะนิวเคลียส จากนั้นล้างด้วยน้ำ 5 นาที และทำการแยกสีส่วนเกินด้วย acid alcohol โดยจุ่มสไลด์ 3 ครั้ง ก่อนล้างน้ำอีกครั้ง ต่อมาทำให้สี hematoxylin คงตัวด้วยการจุ่มใน ammonia water 2 ครั้ง จากนั้นย้อมด้วย eosin Y เป็นเวลา 30 วินาที เพื่อย้อมโครงสร้างที่มีคุณสมบัติเป็นด่าง



เช่น โซโดพลาสซึมและเนื้อเยื่อนอกเซลล์ ขั้นตอนสุดท้ายคือการไล่น้ำด้วยแอลกอฮอล์ความเข้มข้นร้อยละ 95 และ 100 ตามลำดับ แล้วทำให้ใสด้วย xylene จำนวน 2 ครั้ง ตัดกระจกปิดสไลด์ปล่อยให้แห้ง นำสไลด์ไปตรวจประเมินภายใต้กล้องจุลทรรศน์ด้วยกำลังขยาย 400 เท่าและสัณฐานภาพจากกล้องจุลทรรศน์จำนวน 4 ตำแหน่ง นำภาพทั้งหมดมาประเมินขนาดของเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจและนิวเคลียสด้วยโปรแกรมวิเคราะห์ภาพสำเร็จรูป ImageJ [26] โดยวัดจำนวน 40 เซลล์ต่อสัตว์ทดลองหนึ่งตัวภายใต้สภาวะและการตั้งค่ากล้องเดียวกัน ทั้งนี้ผู้ทำการวิเคราะห์ที่ไม่ทราบกลุ่มการทดลอง (blinded analysis) เพื่อลดอคติในการประเมินผล

การวิเคราะห์ข้อมูล

นำเสนอข้อมูลด้วยค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean ± SD) ทดสอบความแตกต่างระหว่างกลุ่มโดยใช้สถิติ Unpaired student t-test ทหาความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงขนาดเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจกับน้ำหนักของหัวใจด้วยสหสัมพันธ์แบบเพียร์สัน (Pearson correlation) โดยกำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติไว้ที่ $p < 0.05$

ผลการวิจัย

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของสมุนไพรชาต่อการเปลี่ยนแปลงเชิงกายภาพของหัวใจในหนูแรทเพศผู้ โดยประเมินจากความหนาของผนังและน้ำหนักของหัวใจ รวมทั้งการเปลี่ยนแปลงเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจโดยประเมินจากขนาดของเซลล์และขนาดนิวเคลียสของเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจ โดยแบ่งผลการศึกษาเป็นด้านข้อมูลเชิงกายภาพของหัวใจ ข้อมูลเชิงโครงสร้างระดับเซลล์ และความสัมพันธ์ของขนาดเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจกับน้ำหนักหัวใจ ดังนี้

ผลของน้ำชาต่อการเปลี่ยนแปลงเชิงกายภาพของหัวใจ

ผลการเปรียบเทียบลักษณะเชิงกายภาพของหัวใจในกลุ่มควบคุมและกลุ่มที่ได้รับน้ำชา แสดงดังตารางที่ 1 พบว่า น้ำหนักหัวใจของกลุ่มที่ได้รับน้ำชา มีค่าต่ำกว่ากลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (0.28 ± 0.02 เทียบกับ 0.31 ± 0.03 ; $p = 0.049$) สำหรับความหนาผนังกล้ามเนื้อหัวใจห้องล่างซ้ายและห้องล่างขวา ไม่พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในกลุ่มควบคุมและกลุ่มที่ได้รับน้ำชา ($p > 0.05$) โดยกลุ่มควบคุมและกลุ่มที่ได้รับน้ำชา มีความหนาของผนังหัวใจห้องล่างซ้ายเท่ากับ 4.72 ± 1.05 และ 4.08 ± 0.62 มิลลิเมตร ($p > 0.05$) มีความหนาของผนังหัวใจห้องล่างขวาเท่ากับ 0.88 ± 0.09 และ 0.84 ± 0.08 มิลลิเมตร ($p > 0.05$) ในกลุ่มควบคุมและกลุ่มที่ได้รับน้ำชาตามลำดับ นอกจากนี้ความหนาผนังกันหัวใจห้องล่างในกลุ่มควบคุมและกลุ่มที่ได้รับน้ำชา ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญเช่นเดียวกัน (3.86 ± 0.39 เทียบกับ 3.76 ± 0.40 , $p > 0.05$) อย่างไรก็ตามพบว่าความยาวของหัวใจในกลุ่มที่ได้รับน้ำชา มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม (13.77 ± 0.69 เทียบกับ 16.40 ± 1.53 มิลลิเมตร; $p = 0.007$)

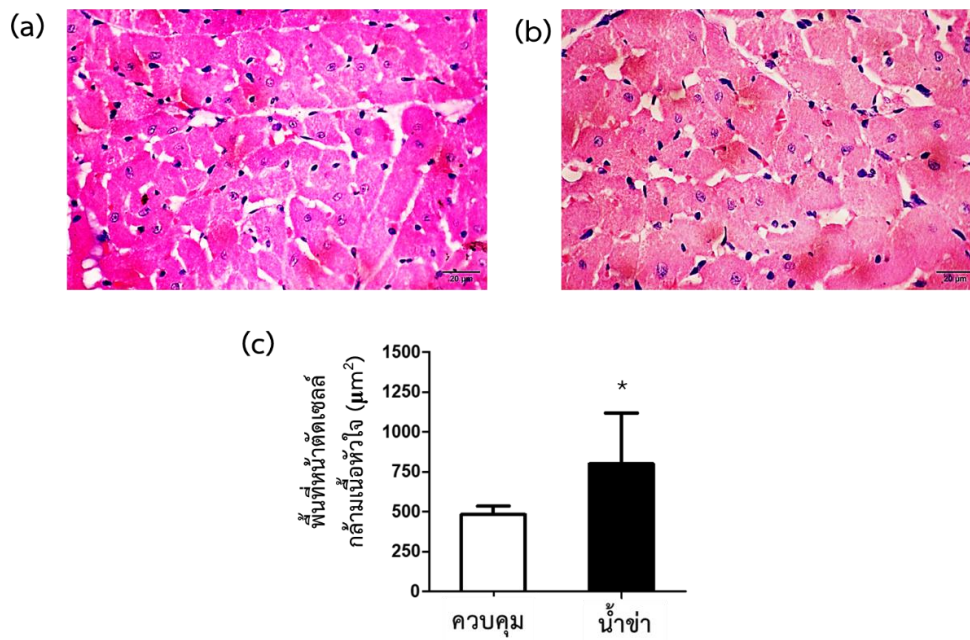
ตารางที่ 1 การเปลี่ยนแปลงเชิงกายภาพของหัวใจหลังได้รับน้ำชาในหนูแรทเพศผู้โดยเทียบกับกลุ่มควบคุม

ตัวแปรตาม	กลุ่มควบคุม	กลุ่มน้ำชา	p-value
น้ำหนักหัวใจ/น้ำหนักตัว 100 (กรัม)	0.31 ± 0.03	0.28 ± 0.02 *	0.049
ความหนาผนังหัวใจห้องล่างซ้าย (มิลลิเมตร)	4.72 ± 1.05	4.08 ± 0.62	0.138
ความหนาผนังหัวใจห้องล่างขวา (มิลลิเมตร)	0.88 ± 0.09	0.84 ± 0.08	0.228
ความหนาผนังกันหัวใจห้องล่าง (มิลลิเมตร)	3.86 ± 0.39	3.76 ± 0.40	0.354
ความยาวของหัวใจ (มิลลิเมตร)	16.40 ± 1.53	13.77 ± 0.69 *	0.007

ข้อมูลแสดงในรูป ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD), $p^* < 0.05$ โดยใช้สถิติ Unpaired Student t-test, $n=5$ /กลุ่ม

ผลของน้ำข่าต่อการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างทางจุลกายวิภาคของเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจห้องล่างซ้าย

ผลการศึกษาลักษณะทางจุลกายวิภาคของเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจจากการย้อมด้วย H&E แสดงดังรูปที่ 2 พบว่ากลุ่มที่ได้รับน้ำข่าเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจมีขนาดใหญ่ขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับกลุ่มควบคุม (รูปที่ 2a, 2b) โดยยังมีการเรียงตัวของเซลล์เป็นปกติ การวิเคราะห์เชิงปริมาณของพื้นที่หน้าตัดเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจ (รูปที่ 2c) พบว่ากลุ่มที่ได้รับน้ำข่ามีพื้นที่หน้าตัดเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุมโดยค่าเฉลี่ยของพื้นที่หน้าตัดเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจในกลุ่มที่ได้รับน้ำข่าสูงกว่ากลุ่มควบคุมอย่างชัดเจน (799.84 ± 318.53 เทียบกับ 482.17 ± 53.46 , $p = 0.045$) ผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการได้รับน้ำข่าส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงลักษณะทางจุลกายวิภาคของเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจ โดยเฉพาะมีการเพิ่มขึ้นของขนาดเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจ



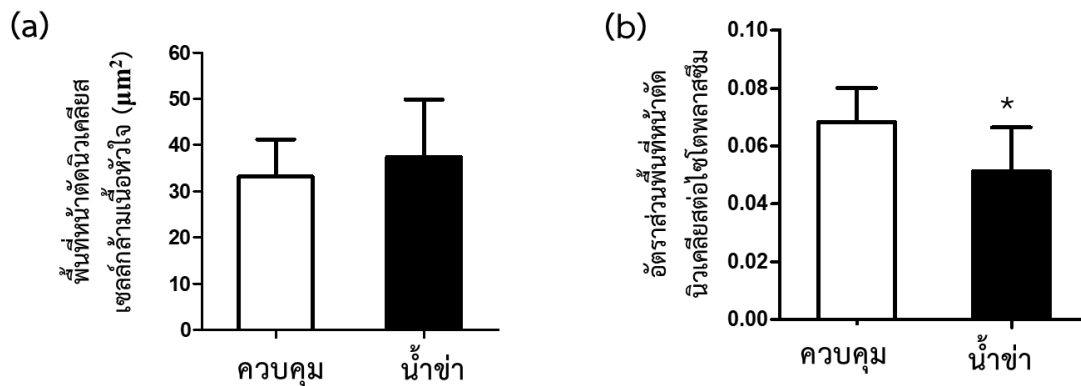
ภาพที่ 2 ภาพตัดขวางเนื้อเยื่อของผนังหัวใจห้องล่างซ้ายในกลุ่มควบคุม (a) และกลุ่มน้ำข่า (b) และการวิเคราะห์เชิงปริมาณของพื้นที่หน้าตัดเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจ (c) โดยข้อมูลแสดงในรูปค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ย้อมเนื้อเยื่อด้วยวิธี H&E ถ่ายภาพด้วยกล้องขยาย 400 เท่า, $p^* < 0.05$ โดยใช้สถิติ Unpaired Student t-test, $n=5$ /กลุ่ม โดยวิเคราะห์จาก 40 เซลล์ต่อสัตว์ทดลองหนึ่งตัว (40 cells/animal)

ผลของน้ำข่าต่อการเปลี่ยนแปลงขนาดนิวเคลียสและอัตราส่วนระหว่างนิวเคลียสกับไซโทพลาสซึมของเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจ

ผลการวิเคราะห์ลักษณะทางจุลกายวิภาคเชิงปริมาณของนิวเคลียสเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจห้องล่างซ้ายแสดงดังภาพที่ 3 พบว่าลักษณะนิวเคลียสของกลุ่มที่ได้รับน้ำข่ามีรูปร่างและการติดสีตามปกติ ไม่พบลักษณะการหดตัวของนิวเคลียส (pyknotic nucleus) ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้การเสื่อมหรือการตายของเซลล์ (รูปที่ 2a, 2b) พื้นที่หน้าตัดเฉลี่ยของนิวเคลียสเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจในกลุ่มที่ได้รับน้ำข่าไม่มีความแตกต่างกับกลุ่มควบคุม (37.41 ± 1.25 เทียบกับ 33.17 ± 8.07 , $p > 0.05$) (ภาพที่ 3a) ในทางตรงกันข้ามอัตราส่วนพื้นที่หน้าตัดของนิวเคลียสต่อพื้นที่ไซโทพลาสซึมในกลุ่มที่ได้รับน้ำข่ามีค่าน้อยกว่ากลุ่มควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (0.05 ± 0.015 เทียบกับ 0.07 ± 0.011 , $p = 0.042$) ดังแสดงในภาพที่ 3b ผลการทดลองดังกล่าวแสดงให้เห็นว่าการได้รับน้ำข่าส่งผล



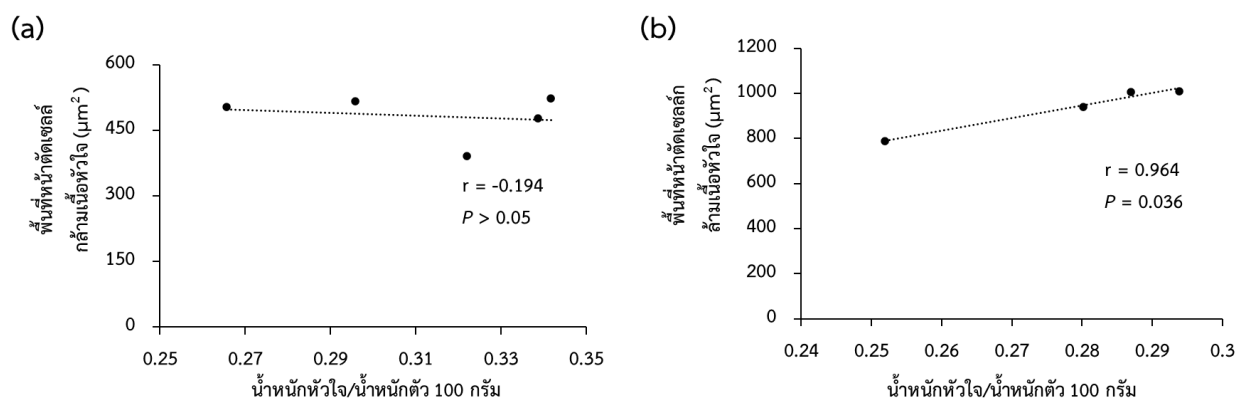
ต่อการเปลี่ยนแปลง องค์ประกอบของไลโปพลาสซึมของเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจ อย่างไรก็ตามไม่พบการเรียงตัวของเซลล์ที่ผิดปกติ และไม่พบการสะสมของแวคิวโอลไขมัน (lipid vacuole) ภายในไลโปพลาสซึมของเซลล์



ภาพที่ 3 พื้นที่หน้าตัดของนิวเคลียส (a) และอัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดนิวเคลียสต่อพื้นที่ไซโตพลาสซึมของเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจ (b) ในหนูแรทกลุ่มควบคุมและกลุ่มที่ได้รับน้ำชา ข้อมูลแสดงในรูปค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD), $p^* < 0.05$ โดยใช้สถิติ Unpaired Student t-test, $n=5$ /กลุ่ม โดยวิเคราะห์จาก 40 เซลล์ต่อสัตว์ทดลองหนึ่งตัว (40 cells/animal)

ความสัมพันธ์ของการเปลี่ยนแปลงขนาดเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจกับน้ำหนักของหัวใจ

ผลการวิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างพื้นที่หน้าตัดของเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจกับค่าน้ำหนักหัวใจ แสดงดังภาพที่ 4 ในกลุ่มควบคุม (ภาพที่ 4a) ไม่พบความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติระหว่างพื้นที่หน้าตัดของเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจกับค่าน้ำหนักหัวใจ ($r = -0.194$, $p = 0.754$) ในทางตรงกันข้ามกลุ่มที่ได้รับน้ำชา (ภาพที่ 4b) มีพื้นที่หน้าตัดของเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจมีความสัมพันธ์เชิงบวกอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับค่าน้ำหนักหัวใจ ($r = 0.964$, $p < 0.05$) โดยเมื่อพื้นที่หน้าตัดของเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจเพิ่มขึ้น ค่าน้ำหนักหัวใจมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตาม



ภาพที่ 4 ความสัมพันธ์ขนาดเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจกับน้ำหนักหัวใจในกลุ่มควบคุม (a) กลุ่มได้รับน้ำชา (b) โดยแสดงค่า Pearson's correlation coefficient (r) และค่า p-value, $n=5$ /กลุ่ม

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

การศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าน้ำข้าส่งผลต่อการเปลี่ยนแปลงของหัวใจทั้งในระดับมหากายวิภาคและจุลกายวิภาค โดยรูปแบบของการเปลี่ยนแปลงที่พบมีความซับซ้อนและไม่เป็นไปในทิศทางเดียวกันทั้งหมด ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดว่าการเปลี่ยนแปลงของหัวใจในระดับโครงสร้างมหากายวิภาคอาจไม่สะท้อนการเปลี่ยนแปลงในระดับจุลกายวิภาคโดยตรงเสมอไป [27] เมื่อพิจารณาการเปลี่ยนแปลงเชิงกายภาพของหัวใจ พบว่าน้ำหนักหัวใจของกลุ่มที่ได้รับน้ำข้าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ขณะที่ความหนาของผนังกล้ามเนื้อหัวใจทั้งห้องล่างซ้าย ห้องล่างขวา และผนังกันหัวใจไม่แตกต่างจากกลุ่มควบคุม การลดลงของน้ำหนักหัวใจโดยไม่พบการเปลี่ยนแปลงของความหนาผนังกล้ามเนื้อหัวใจบ่งชี้ว่าการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวไม่น่าจะเกิดจากการฝ่อลีบของกล้ามเนื้อหัวใจโดยตรง แต่อาจเกี่ยวข้องกับองค์ประกอบอื่นของหัวใจ เช่น ปริมาณน้ำในเนื้อเยื่อ ปริมาณไขมันระหว่างเซลล์ หรือการเปลี่ยนแปลงของโครงสร้างเนื้อเยื่อเกี่ยวพัน [27] นอกจากนี้ การลดลงอย่างมีนัยสำคัญของความยาวหัวใจในกลุ่มที่ได้รับน้ำข้าอาจสะท้อนถึงการเปลี่ยนแปลงของรูปร่างโดยรวมของหัวใจ หรือภาวะ cardiac remodeling ซึ่งสามารถเกิดขึ้นได้โดยไม่จำเป็นต้องมีการเปลี่ยนแปลงของความหนาผนังหัวใจ โดยเฉพาะในกรณีที่มีการเปลี่ยนแปลงเริ่มต้นในระดับเซลล์ [28]

ในทางตรงกันข้าม เมื่อพิจารณาในระดับเซลล์พบว่าน้ำข้าส่งผลให้ขนาดของเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติเมื่อเทียบกับกลุ่มควบคุม เป็นผลที่แตกต่างจากรายงานก่อนหน้านี้ โดยทั่วไปสารออกฤทธิ์ในข้า เช่น galangin ซึ่งเป็นฟลาโวนอยด์สำคัญ มีรายงานว่าสามารถยับยั้งการขยายตัวของเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจผ่านการยับยั้ง PI3K-AKT-GSK3 β pathway และช่วยป้องกันภาวะหัวใจโต [29] นอกจากนี้โพลีฟีนอล (polyphenols) ในน้ำข้ายังมีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระและลดการอักเสบ สามารถส่งผลทางอ้อมในการป้องกันการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างของหัวใจ [21]

ผลลัพธ์ที่พบในงานวิจัยนี้ที่ขนาดเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจเพิ่มขึ้นแต่น้ำหนักหัวใจลดลงอาจอธิบายได้จากสมมติฐาน 2 ประการ ประการแรกน้ำข้าอาจทำให้เกิดการลดลงขององค์ประกอบของเนื้อเยื่อที่ไม่ใช่เซลล์กล้ามเนื้อหัวใจ เช่น เนื้อเยื่อเกี่ยวพันหรือไขมันที่แทรกอยู่ในกล้ามเนื้อหัวใจ ส่งผลให้เซลล์กล้ามเนื้อหัวใจมีพื้นที่ในการจัดเรียงตัวและขยายตัวของไซโทพลาซึมมากขึ้น จึงอาจตรวจพบขนาดเซลล์ที่เพิ่มขึ้นได้จากการวิเคราะห์ทางสัณฐานวิทยา ถึงแม้ว่าปัจจุบันยังไม่มีหลักฐานที่สนับสนุนชัดเจนว่าข้าลดไขมันที่หัวใจได้โดยตรง แต่มีข้อมูลที่แน่ชัดว่าข้าสามารถลดระดับไขมันในเลือดของหนูที่ได้รับอาหารไขมันสูงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ [22] อาจเป็นผลทางอ้อมที่ช่วยลดไขมันที่หัวใจ นอกจากนี้ยังพบว่าข้าสามารถลดการแสดงออกของยีนที่เกี่ยวข้องกับการสะสมของ extracellular matrix และลดการเกิดพังผืดในเนื้อเยื่อหัวใจในสัตว์ทดลองได้ [30] ดังนั้นจึงทำให้น้ำหนักหัวใจลดลง ประการที่ 2 มีความเป็นไปได้ค่อนข้างน้อยเนื่องจากมีข้อมูลสนับสนุนไม่เพียงพอที่น้ำหนักหัวใจที่ลดลงอาจเกิดจากความหนาแน่นของเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจลดลง ดังนั้นเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจที่เหลืออยู่จึงต้องเพิ่มภาระการทำงานเพื่อคงประสิทธิภาพการทำงานของหัวใจ ส่งผลให้เกิดการปรับตัวโดยการเพิ่มขนาดของเซลล์ หรือภาวะ compensatory hypertrophy หลักฐานที่สนับสนุนแนวคิดนี้มีเพียงการพบความสัมพันธ์เชิงบวกระหว่างขนาดของเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจกับน้ำหนักหัวใจเฉพาะในกลุ่มที่ได้รับน้ำข้า ขณะที่ไม่พบความสัมพันธ์ดังกล่าวในกลุ่มควบคุม ซึ่งบ่งชี้ว่าหัวใจที่มีน้ำหนักมากกว่าภายในกลุ่มทดลองมักประกอบด้วยเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจที่มีขนาดใหญ่กว่า อันสะท้อนถึงการตอบสนองเชิงชดเชยของเซลล์ต่อการลดลงของมวลหัวใจโดยรวม อย่างไรก็ตามการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวเป็นการคาดคะเนจากผลการทดลองที่มีอยู่อย่างจำกัดไม่เพียงพอที่จะยืนยันได้อย่างแน่นอนและจากลักษณะทางจุลกายวิภาคไม่พบลักษณะทางพยาธิสภาพของเซลล์ในการศึกษานี้ จึงจำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมเพื่อยืนยันข้อมูล เช่น การประเมินความหนาแน่นของเซลล์และการประเมินตัวบ่งชี้การตายของเซลล์ (biomarker of cell death)

หลักฐานจากงานวิจัยที่ผ่านมาที่สนับสนุนความเป็นไปได้ว่าการลดลงของน้ำหนักหัวใจและการเพิ่มขนาดของเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจเกิดจากความหนาแน่นของเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจลดลงนั้นมาจากรายงานที่พบว่าสารสกัดจากข้าโดยใช้น้ำเป็นตัวทำละลายสามารถก่อให้เกิดการตายของเซลล์ทั้งเซลล์ปกติและเซลล์มะเร็งที่มีความเข้มข้นสูง (300 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร) [19] กลไกที่



เป็นไปได้คือการออกฤทธิ์ของสาร ACA ซึ่งเป็นสารสำคัญที่พบมากในเห็บฆ่า [31] ได้มีการรายงานว่าสามารถกระตุ้น apoptotic pathway ผ่านการกระตุ้นการทำงานของ caspase-8 ได้โดยตรง [32] แม้โดยทั่วไป ACA จะมีความจำเพาะต่อเซลล์มะเร็งมากกว่า [32] แต่มีรายงานว่าหากได้รับในความเข้มข้นสูงก็สามารถก่อให้เกิดความเสียหายต่อเซลล์ปกติได้เช่นกัน [33] อย่างไรก็ตามงานวิจัยด้านเซลล์เพาะเลี้ยงชี้ให้เห็นว่า ACA มีความเป็นพิษต่อเซลล์ปกติค่อนข้างต่ำ โดยมีค่า IC_{50} ต่อเซลล์ osteoblast ปกติ (hFOB) สูงกว่าเซลล์มะเร็งกระดูก (MG-63) อย่างชัดเจน มีข้อบ่งชี้ว่าต้องใช้ความเข้มข้นสูงจึงจะส่งผลกระทบต่อเซลล์ปกติได้ [33] โดยในงานวิจัยนี้ได้ให้น้ำชากับหนูในปริมาณ 400 มิลลิกรัมต่อน้ำหนักตัว 1 กิโลกรัม ทุกวันเป็นระยะเวลา 14 วันเพื่อประเมินผลของการได้รับสารในระยะกึ่งเฉียบพลัน (sub-acute exposure) และระยะเวลาดังกล่าวเป็นระยะเวลามาตรฐานสอดคล้องกับแนวทาง OECD Guideline 407 เพื่อประเมินผลของสารสะสมต่ออวัยวะสำคัญ รวมถึงเนื้อเยื่อหัวใจ ส่วนขนาดความเข้มข้นที่เลือกใช้ในการศึกษานี้เนื่องจากการศึกษาที่ผ่านมาพบว่าเป็นขนาดที่สามารถลดระดับไขมันและมีสารออกฤทธิ์ที่สำคัญหลายอย่างถึงแม้จะเป็นระยะเวลาเพียง 5 วัน [23] และเป็นขนาดที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการลดระดับน้ำตาลและระดับไขมันในเลือดในหนูที่ถูกเหนี่ยวนำให้มีภาวะเบาหวาน [25] ถึงแม้จะเป็นปริมาณค่อนข้างสูงเมื่อเทียบกับการศึกษาในเซลล์เพาะเลี้ยงซึ่งพบว่าสารสกัดด้วยน้ำจากเห็บฆ่าที่ความเข้มข้น 300 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร มีผลยับยั้งการเติบโตของเซลล์ปกติ [19] แต่เมื่อพิจารณาค่า lethal dose (LD_{50}) ซึ่งเป็นขนาดที่ทำให้สัตว์ทดลองเสียชีวิตร้อยละ 50 พบว่ามีขนาดค่อนข้างสูงคือมากกว่า 2,000 มิลลิกรัม/กิโลกรัม [34] แสดงให้เห็นว่าสารสกัดดังกล่าวมีความเป็นพิษเฉียบพลันในระดับต่ำ อย่างไรก็ตาม ค่า LD_{50} เป็นตัวชี้วัดที่สะท้อนความเป็นพิษที่ทำให้เกิดการเสียชีวิตของสัตว์ทดลองโดยรวมไม่ได้สะท้อนถึงผลกระทบต่ออวัยวะเฉพาะหรือการเปลี่ยนแปลงในระดับเซลล์ ในทางชีววิทยาของเซลล์สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพหลายชนิดสามารถส่งผลกระทบต่อกระบวนการภายในเซลล์ได้ในความเข้มข้นที่ต่ำกว่าขนาด lethal dose ไม่ว่าจะเป็นการกระตุ้นหรือยับยั้งวิถีการส่งสัญญาณของเซลล์ การเหนี่ยวนำให้เกิดการตายของเซลล์แบบ apoptosis หรือ necrosis รวมถึงการเหนี่ยวนำความเครียดออกซิเดชัน (oxidative stress) และการอักเสบในระดับเซลล์ สอดคล้องกับการศึกษาของ Baradwaj et al. (2017) ที่พบว่า ACA ที่สกัดจากเห็บฆ่าสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเซลล์มะเร็งลำไส้ใหญ่ได้อย่างมีนัยสำคัญที่ความเข้มข้น IC_{50} เพียง 80 ไมโครโมลาร์ [18] นอกจากนี้ยังพบว่าสาร ACA ก่อให้เกิดการตายของเซลล์ผ่านกระบวนการ apoptosis ตามด้วย secondary necrosis และสามารถทำลายเซลล์มะเร็งได้ทั้งหมดภายใน 30 ชั่วโมงที่ความเข้มข้น 40 ไมโครโมลาร์ [17] ที่สำคัญไปกว่านั้นสารสกัดฆ่าสามารถส่งผลกระทบต่อเซลล์ปกติได้เช่นกันโดยมีรายงานว่าสารสกัดหยาบของเห็บฆ่ามีฤทธิ์ cytotoxic ต่อเซลล์ fibroblast ที่ความเข้มข้น 620.5 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร [35] และพบว่าขนาด 300 มิลลิกรัม/มิลลิลิตร มีผลยับยั้งการเติบโตของเซลล์ปกติชนิด fibroblast และ epithelial [19] ดังนั้นการพัฒนาน้ำสมุนไพรฆ่าในอนาคตจึงจำเป็นต้องให้ความสำคัญต่อปริมาณความเข้มข้นเป็นอันดับแรกเพื่อให้เกิดความปลอดภัยสูงสุดต่อผู้บริโภค อย่างไรก็ตามปริมาณที่ใช้ในการศึกษานี้มีค่าค่อนข้างสูงจากน้ำหนักตัวของช้างจึงเป็นเพียงการเทียบเคียงกับวิธีการสกัดด้วยน้ำซึ่งมีลักษณะคล้ายกันมากที่สุด และเป็นการศึกษาในสัตว์ทดลองจึงอาจเทียบความเข้มข้นกับการศึกษาในเซลล์ได้ไม่ دقیق ดังนั้นจึงจำเป็นต้องศึกษาเพิ่มเติมถึงความเข้มข้นที่ได้จากการเตรียมชาสดถึงปริมาณที่อาจเป็นผลเสียในสัตว์ทดลองเพราะเป็นรูปแบบที่มักใช้รับประทานกันทั่วไป

ในส่วนของพื้นที่หน้าตัดนิวเคลียสของเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจระหว่างกลุ่มควบคุมและกลุ่มที่ได้รับน้ำชาพบว่าไม่แตกต่างกัน อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาอัตราส่วนระหว่างพื้นที่หน้าตัดของนิวเคลียสต่อขนาดของไซโทพลาสซึมพบว่ากลุ่มที่ได้รับน้ำชาที่มีค่าอัตราส่วนดังกล่าวลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ผลดังกล่าวอาจเกิดจากการเพิ่มขึ้นของปริมาตรไซโทพลาสซึมของเซลล์มากกว่าการเปลี่ยนแปลงของขนาดนิวเคลียส ในเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจซึ่งเป็นเซลล์ที่มีความสามารถในการแบ่งตัวจำกัด การเพิ่มขนาดของเซลล์มักเกิดจากการเพิ่มองค์ประกอบของไซโทพลาสซึม เช่น ไมโอไฟบริลล์หรือไมโทคอนเดรีย เพื่อรองรับการทำงานของเซลล์ที่เพิ่มขึ้น [36, 37] นอกจากนี้จากการตรวจสอบลักษณะทางจุลพยาธิวิทยาไม่พบลักษณะความผิดปกติของนิวเคลียส เช่น ไม่พบลักษณะการ



หดตัวของนิวเคลียส (pyknotic nucleus) หรือการสะสมของแควคิวโอลไขมันในไซโทพลาซึม ซึ่งบ่งชี้ว่าการเปลี่ยนแปลงดังกล่าว อาจจะไม่เกี่ยวข้องกับการบาดเจ็บหรือการเสื่อมสภาพของเซลล์ แต่มีแนวโน้มเป็นการปรับตัวทางสรีรวิทยาของเซลล์มากกว่า

โดยสรุป การได้รับน้ำชาทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงของหัวใจทั้งในระดับมหากายวิภาคและระดับจุลกายวิภาค โดยพบว่า น้ำหนัก ขนาดหัวใจและอัตราส่วนนิวเคลียสต่อไซโทพลาซึมลดลง ขณะที่ขนาดเซลล์กล้ามเนื้อหัวใจเพิ่มขึ้น ซึ่งน่าจะสะท้อนการปรับตัวของเซลล์ต่อสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพในน้ำชามากกว่าการเกิดพยาธิสภาพโดยตรง แม้การศึกษานี้ยังไม่ลงลึกถึงกลไกทางอนุชีววิทยา แต่ผลที่ได้มีความสำคัญต่อการนำไปเป็นข้อมูลเบื้องต้นเพื่อศึกษาต่อยอดเกี่ยวกับความปลอดภัยของการบริโภคน้ำชาที่เตรียมจากชาสดในรูปแบบใกล้เคียงกับการบริโภคจริง แตกต่างจากงานวิจัยส่วนใหญ่ที่ใช้สารสกัดเข้มข้นหรือสารบริสุทธิ์ จึงสะท้อนผลกระทบในสภาวะการใช้งานจริงได้ดีกว่า อย่างไรก็ตามยังจำเป็นต้องมีการศึกษาเพิ่มเติมในระดับกลไกเพื่อยืนยันผลดังกล่าวต่อไป

ข้อเสนอแนะ

การศึกษานี้มีข้อจำกัดจากขนาดตัวอย่างที่ค่อนข้างน้อย และยังขาดหลักฐานโดยตรงที่ยืนยันการตายของเซลล์ (apoptosis หรือ necrosis) เช่น การตรวจ TUNEL assay การประเมินการแสดงออกของโปรตีนใน apoptotic pathway (เช่น caspase-3, caspase-8 หรือ Bax/Bcl-2 ratio) หรือการประเมินตัวบ่งชี้การซ่อมแซมเนื้อเยื่อ การขาดข้อมูลดังกล่าวทำให้ยังไม่สามารถสรุปกลไกที่แท้จริงของการลดลงของมวลหัวใจได้อย่างชัดเจน ดังนั้นผลลัพธ์ที่ได้ควรได้รับการยืนยันเพิ่มเติมในงานวิจัยในอนาคตที่มีขนาดตัวอย่างมากขึ้น ควบคู่กับการศึกษาทางจุลพยาธิวิทยาและการวิเคราะห์ระดับอนุชีววิทยา เพื่ออธิบายกลไกและความหมายทางพยาธิสรีรวิทยาของการเปลี่ยนแปลงที่พบได้อย่างชัดเจนยิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ดร.ชวนพิศ จิระพงษ์ สำหรับการสนับสนุนและการจัดเตรียมน้ำชา และขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ ที่ให้การสนับสนุนสารเคมีและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลอง

เอกสารอ้างอิง

1. Mahae N, Chaiseri S. Antioxidant activities and antioxidative components in extracts of *Alpinia galanga* (L.) Sw. *Agr Nat Resour* 2009;43(2):358-69.
2. Theanphong O, Jenjittikul T, Somwong P. Unveiling flavonoids in *Alpinia* species indigenous to Thailand and their relevance with radical scavenging potential and α -glucosidase inhibitory activities. *J Biol Act Prod Nat* 2024;14(6):620-30.
3. Aziz IM, Alfuraydi AA, Almarfadi OM, Aboul-Soud MAM, Alshememry AK, Alsaleh AN, et al. Phytochemical analysis, antioxidant, anticancer, and antibacterial potential of *Alpinia galanga* (L.) rhizome. *Heliyon* 2024;10(17):e37196.
4. Thooptianrat T, Chaveerach A, Sudmoon R, Tanee T, Liehr T, Babayan N. Screening of phytochemicals and toxicity of medicinal plants, *Dillenia* species, reveals potential natural product resources. *J Food Biochem* 2017;41(3):e12363.
5. Samarghandian S, Hadjzadeh MA, Afshari JT, Hosseini M. Antiproliferative activity and induction of apoptotic by ethanolic extract of *Alpinia galanga* rhizome in human breast carcinoma cell line. *BMC Complement Altern Med* 2014;14:192.



6. Ito K, Nakazato T, Xian MJ, Yamada T, Hozumi N, Murakami A, et al. 1'-acetoxychavicol acetate is a novel nuclear factor kappaB inhibitor with significant activity against multiple myeloma in vitro and in vivo. *Cancer Res* 2005;65(10):4417-24.
7. Awang K, Nurul Azmi MN, In Lian Aun LIL, Nazif Aziz AN, Ibrahim H, Hasima Nagoor N. The apoptotic effect of 1'S-1'-Acetoxychavicol acetate from *Alpinia conchigera* on human cancer cells. *Molecules* 2010;15(11):8048-59.
8. Ye Y, Li B. 1'S-1'-acetoxychavicol acetate isolated from *Alpinia galanga* inhibits human immunodeficiency virus type 1 replication by blocking Rev transport. *J Gen Virol* 2006;87(Pt 7):2047-53.
9. Herath H, Piao MJ, Kang KA, Fernando P, Senavirathna H, Koh YS, et al. Galangin mitigates oxidative damage induced by environmental stresses in skin keratinocytes. *Int J Med Sci* 2025;22(14):3682-91.
10. Zou Y, Li R, Kuang D, Zuo M, Li W, Tong W, et al. Galangin inhibits cholangiocarcinoma cell growth and metastasis through downregulation of microRNA-21 expression. *Biomed Res Int* 2020;2020:5846938.
11. Lin K, Fu D, Wang Z, Zhang X, Zhu C. Analgesic and anti-inflammatory effects of galangin: a potential pathway to inhibit transient receptor potential vanilloid 1 receptor activation. *Korean J Pain* 2024;37(2):151-63.
12. Ma X, Tian Y, Xue K, Huai Y, Patil S, Deng X, et al. Kaempferide enhances antioxidant capacity to promote osteogenesis through FoxO1/ β -catenin signaling pathway. *Eur J Pharmacol* 2021;911:174555.
13. Calderón-Montaña JM, Burgos-Morón E, Pérez-Guerrero C, López-Lázaro M. A review on the dietary flavonoid kaempferol. *Mini Rev Med Chem* 2011;11(4):298-344.
14. Marchese A, Barbieri R, Coppo E, Orhan IE, Daglia M, Nabavi SF, et al. Antimicrobial activity of eugenol and essential oils containing eugenol: A mechanistic viewpoint. *Crit Rev Microbiol* 2017;43(6):668-89.
15. Damasceno ROS, Pinheiro JLS, Rodrigues LHM, Gomes RC, Duarte ABS, Emídio JJ, et al. Anti-inflammatory and antioxidant activities of eugenol: An update. *Pharmaceuticals* 2024;17(11):1505.
16. Ibrahim S. *Alpinia galanga* extract inhibits MCF-7/HER2+ Cells by inducing apoptosis. *J Sci Technol Res Pharm* 2021;2(72-77):1-6.
17. Awang K, Azmi MN, Aun LI, Aziz AN, Ibrahim H, Nagoor NH. The apoptotic effect of 1's-1'-acetoxychavicol acetate from *Alpinia conchigera* on human cancer cells. *Molecules* 2010;15(11):8048-59.
18. Baradwaj RG, Rao MV, Senthil Kumar T. Novel purification of 1'S-1'-Acetoxychavicol acetate from *Alpinia galanga* and its cytotoxic plus antiproliferative activity in colorectal adenocarcinoma cell line SW480. *Biomed Pharmacother* 2017;91:485-93.
19. Muangnoi P, Lu M, Lee J, Thepouyporn A, Mirzayans R, Le XC, et al. Cytotoxicity, apoptosis and DNA damage induced by *Alpinia galanga* rhizome extract. *Planta Med* 2007;73(8):748-54.
20. Choi JY, Lee NK, Wang YY, Hong JP, Son SR, Gu DH, et al. 1'-Acetoxyeugenol Acetate isolated from Thai Ginger induces apoptosis in human ovarian cancer cells by ROS production via NADPH oxidase. *Antioxidants (Basel)* 2022;11(2).



21. Ben Attia T, Serairi-Beji R, Horchani M, Aloui S, Salhi M, Galai S, et al. *Alpinia galanga* rhizome extract shields against noise-induced cardiotoxicity via antioxidant and anti-inflammatory actions: Experimental insights. *Mol Nutr Food Res* 2025;69(24):e70320.
22. Achuthan CR, Padikkala J. Hypolipidemic effect of *Alpinia galanga* (Rasna) and *Kaempferia galanga* (Kachoori). *Indian J Clin Biochem* 1997;12(1):55-8.
23. Iyer D, Sharma BK, Patil UK. Isolation of bioactive phytoconstituent from *Alpinia galanga* L. with anti-hyperlipidemic activity. *J Diet Suppl* 2013;10(4):309-17.
24. Destryana RA, Estiasih T, Pranowo D. The potential uses of Galangal (*Alpinia* sp.) essential oils as the sources of biologically active compounds. *AIMS Agric Food* 2024;9(4):1064-109.
25. Verma RK, Mishra G, Singh P, Jha KK, Khosa RL. Anti-diabetic activity of methanolic extract of *Alpinia galanga* Linn. aerial parts in streptozotocin induced diabetic rats. *Ayu* 2015;36(1):91-5.
26. Baviskar SN. A quick & automated method for measuring cell area using ImageJ. *Am Biol Teach* 2011;73(9):554-56.
27. Hill JA, Olson EN. Cardiac plasticity. *N Engl J Med* 2008;358(13):1370-80.
28. Cohn JN, Ferrari R, Sharpe N. Cardiac remodeling--concepts and clinical implications: a consensus paper from an international forum on cardiac remodeling. Behalf of an International Forum on Cardiac Remodeling. *J Am Coll Cardiol* 2000;35(3):569-82.
29. Wang HB, Huang SH, Xu M, Yang J, Yang J, Liu MX, et al. Galangin ameliorates cardiac remodeling via the MEK1/2-ERK1/2 and PI3K-AKT pathways. *J Cell Physiol* 2019;234(9):15654-67.
30. Thangaiyan R, Arjunan S, Govindasamy K, Khan HA, Alhomida AS, Prasad NR. Galangin attenuates isoproterenol-induced inflammation and fibrosis in the cardiac tissue of Albino wistar rats. *Front Pharmacol* 2020;11:585163.
31. Sardsaengjun C, Thipunkaew N. Comparison of extraction techniques for 1'-Acetoxychavicol acetate from dried *Alpinia galanga* (L.) Willd. Rhizomes. *JFHB* 2024;17(2).
32. Da'i M, Meilinasary KA, Suhendi A, Haryanti S. Selectivity index of *alpinia galanga* extract and 1'-acetoxychavicol acetate on cancer cell lines. *Indones J Cancer Chemoprev* 2019;10(2):95-100.
33. Safitri PGA, Da'i M, Wulandari F. 1'-Acetoxychavicol acetate suppresses osteosarcoma cell proliferation through the PI3K Pathway: A molecular docking and cytotoxicity study. *Mol Cell Biomed Sci* 2025;9(2):105-14.
34. Karunarathne P, Thammitiyagodage M, Weerakkody N. Safety evaluation of galangal (*Alpinia galanga*) extract for therapeutic use as an antimicrobial agent. *Int J Pharm Sci Res* 2018;8:4582-90.
35. Sandra F, Sudiono J, Trisfilha P, Pratiwi D. Cytotoxicity of *Alpinia galanga* rhizome crude extract on NIH-3T3 cells. *Indones Biomed J* 2017;9(1):23-8.
36. Zhou LY, Liu JP, Wang K, Gao J, Ding SL, Jiao JQ, et al. Mitochondrial function in cardiac hypertrophy. *Int J Cardiol* 2013;167(4):1118-25.
37. Bishop SP, Zhang J, Ye L. Cardiomyocyte proliferation from fetal- to adult- and from normal- to hypertrophy and failing hearts. *Biology (Basel)* 2022;11(6).



ผลกระทบของ pH ต่อการสังเคราะห์ลิแวนจาก *Bacillus siamensis* ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพแบบกะ

The effect of pH on levan synthesis from *Bacillus siamensis* using batch bio-reactor

วิวัฒน์ แจ้งเยี่ยม¹ สุภัก นาคทองคำ¹ พงษ์ธร เพ็งน้อย¹ ศุภศิลป์ ทวีศักดิ์¹ และโกสินทร์ ทิปรักษ์พันธ์^{2*}

¹ภาควิชาวิศวกรรมเคมี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ชลบุรี 20131

²หลักสูตรรายวิชาวิทยาศาสตร์ คณะศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย สงขลา 90000

Witawat jangiam¹, Suphak Nakthongkham¹, Pongtorn Phengnoi¹, Supphasin Thaweesak¹,
and Kosin Teeparuksapun^{2*}

¹Department of Chemical Engineering, Faculty of Engineering, Burapha University, Chonburi, 20131

²Science Program, Department of General Education, Faculty of Liberal Arts, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Songkhla, 90000

*Corresponding Author: kosin.t@rmutsv.ac.th

Received: 8 January 2026/ Revised: 30 March 2026/ Accepted: 3 April 2026

บทคัดย่อ

ลิแวนเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่สังเคราะห์จากซูโครสด้วยเอนไซม์ลิแวนซูเครส (Levansucrase) โครงสร้างของลิแวนประกอบด้วยโมเลกุลฟรุกโทสเป็นสายหลัก ปลายสายหลักประกอบไปด้วยกลูโคส 1 โมเลกุล เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ β -(2,6) glycosidic มีลักษณะเป็นผงสีขาวหรือสีเหลืองและสามารถละลายได้ทั้งในน้ำและน้ำมัน ลิแวนถูกใช้งานในด้านเทคโนโลยีชีวภาพและอุตสาหกรรมเคมีอย่างแพร่หลาย อย่างไรก็ตาม จากงานวิจัยที่ผ่านมา ลิแวนถูกสังเคราะห์ด้วยเอนไซม์ลิแวนซูเครสจาก *Bacillus siamensis* ในระดับห้องปฏิบัติการด้วยขวดรูปชมพู่ปริมาตร 250 มิลลิลิตร โดยไม่มีการสังเกตและควบคุม pH ให้คงที่ตลอดระยะเวลาที่ดำเนินการสังเคราะห์ เพื่อตอบโต้ต่อการหมักแบบแม่นยำ (Precision fermentation) และการขยายกำลังการผลิต (Scale-up) งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นเปรียบเทียบระหว่างการสังเคราะห์ลิแวนโดยใช้ขวดรูปชมพู่กับเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพ เพื่อศึกษาผลกระทบของสภาวะที่มีการควบคุม pH เป็น 5.0 และไม่มีการควบคุม pH ต่อการสังเคราะห์ลิแวนด้วย *B. siamensis* ผลการทดลอง พบว่า การสังเคราะห์ลิแวนโดยใช้ขวดรูปชมพู่และเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพที่สภาวะควบคุม pH เป็น 5.0 มีการเจริญของ *B. siamensis* สูงกว่าที่สภาวะไม่ควบคุม pH อย่างมีนัยสำคัญเชิงสถิติ ($p < 0.05$) อย่างไรก็ตาม ปริมาณลิแวนที่สังเคราะห์ในขวดรูปชมพู่และเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพในสภาวะไม่ควบคุม pH มีปริมาณสูงกว่าในสภาวะที่ควบคุม pH เป็น 5.0 โดยสามารถผลิตลิแวนในขวดรูปชมพู่และเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพได้สูงสุด 16.2 และ 21.8 % (w/v) ตามลำดับ อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

คำสำคัญ: เครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพ ลิแวน พอลิแซ็กคาไรด์ *Bacillus siamensis*

Abstract

Levan is a polysaccharide synthesized from sucrose by levansucrase. The structure consists of a fructose polymer as the main chain and a single glucose molecule at the terminal end, which is linked by β -(2, 6) glycosidic bonds. It appears as a white or yellow powder and is soluble in both water and oil. It is used in biotechnology and chemical industries. However, in previous study, levan was synthesized by levansucrase from *Bacillus siamensis* in a laboratory scale using 250 mL batch-flask. Throughout the synthesis process, the pH was not monitored or controlled. To address the challenges of precision fermentation and scale-up, this research focuses on comparing the synthesis of levan under pH-controlled and uncontrolled conditions, utilizing batch-flask and bioreactor to investigate the effects of maintaining a controlled pH of 5.0 versus uncontrolled pH conditions on levan synthesis by *B. siamensis*. The results showed that the levan biosynthesis using both batch-flask and bioreactor at controlled pH of 5.0 demonstrated the growth of *B. siamensis* greater than uncontrolled pH ($p < 0.05$). On the contrary, the amount of levan produced using both batch-flask and bioreactor with uncontrolled pH were greater than controlled pH of 5.0, reaching 16.23 and 21.83 % (w/v) in batch-flask and bioreactor, respectively ($p < 0.05$).

Keywords: Bioreactor, Levan, Polysaccharide, *Bacillus siamensis*

บทนำ

ลิแวนเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ที่สังเคราะห์จากซูโครสด้วยเอนไซม์ลิแวนซูเครส (Levansucrase) หรือเรียกว่า 6-fructosyltransferase โครงสร้างของลิแวนประกอบด้วยสายของฟรุกโตสเป็นสายหลัก ปลายสายหลักประกอบด้วยกลูโคส 1 โมเลกุล [1] ลิแวนสามารถพบและสังเคราะห์ได้จากหลายแหล่ง เช่น พืช ยีสต์ รา และแบคทีเรีย เป็นต้น [2] เอนไซม์ลิแวนซูเครสสามารถผลิตได้จากแบคทีเรียหลากหลายสายพันธุ์ เช่น *Lactobacillus johnsonii*, *L. gasserii*, *Bacillus subtilis*, *Aerobacter levanicum* และ *Streptococcus salivarius* เป็นต้น [1] จากงานวิจัยที่ผ่านมาได้ทำการคัดแยกจุลินทรีย์สายพันธุ์ *Bacillus siamensis* จากถั่วเน่าซึ่งเป็นอาหารพื้นเมืองทางภาคเหนือของประเทศไทย ซึ่งมีความสามารถในการผลิตสารพรีไบโอติกลิแวนได้อย่างมีประสิทธิภาพ [3]

ลิแวนถูกใช้งานในอุตสาหกรรมด้านเทคโนโลยีชีวภาพและอุตสาหกรรมเคมี เนื่องจากคุณสมบัติทางเคมีและกายภาพ ลิแวนจึงสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในอาหาร (สารเพิ่มปริมาณ สารคงตัว สารอิมัลซิไฟเออร์ และสารหล่อลื่น) เครื่องสำอาง พลาสติกที่ย่อยสลายได้ทางชีวภาพ หรือใช้เป็นสารเคลือบวัสดุเพื่อเพิ่มความทนทานป้องกันการแตกหัก อนุพันธ์ของลิแวนถูกนำมาใช้ในผลิตภัณฑ์ดูแลเส้นผม สังเคราะห์เป็นนาโนฟิล์ม [4, 5] ลิแวนมีลักษณะเป็นผงผลึกสีขาวหรือสีเหลือง มีโครงสร้างที่เชื่อมต่อกันด้วยพันธะ β -(2,6) glycosidic จึงส่งผลให้ลิแวนสามารถละลายได้ทั้งในน้ำและน้ำมัน แต่ไม่ละลายในแอลกอฮอล์เข้มข้น 75% [1] มีคุณสมบัติทางกายภาพ เช่น มีความหนืดต่ำ มีความเสถียรต่อความร้อน ไม่เป็นพิษ ไม่ระคายเคือง มีความสามารถในการกักเก็บน้ำและสารเคมี และความเข้ากันได้ของสารลดแรงตึงผิว เป็นต้น [6] ลิแวนยังมีคุณสมบัติทางชีวภาพ เช่น มีฤทธิ์เป็นสารต้านอนุมูลอิสระ สารต้านการอักเสบ สารต้านการก่อมะเร็ง ต้านโรคเอดส์ และยังมีฤทธิ์ยับยั้งน้ำตาลในกระแสเลือด เป็นต้น [7]

จากงานวิจัยที่ผ่านมา ลิแวนถูกสังเคราะห์ด้วยเอนไซม์ลิแวนซูเครสจาก *B. siamensis* ในระดับห้องปฏิบัติการ โดยหมักในขวดรูปชมพู่ปริมาตร 250 มิลลิลิตร ด้วยอาหารเลี้ยงจุลินทรีย์ปริมาตร 200 มิลลิลิตร ทำการหมักเป็นเวลา 48 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 37°C เช้าด้วยความเร็วรอบ 200 rpm และ pH เริ่มต้นเป็น 6.0 [8] อย่างไรก็ตาม ในระหว่างกระบวนการสังเคราะห์ลิแวนไม่มีการสังเกตและควบคุม pH ให้คงที่ตลอดระยะเวลาที่ดำเนินการหมัก ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมุ่งเน้นศึกษาการสังเคราะห์ลิแวนโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพในสภาวะที่ควบคุมค่า pH เพื่อศึกษาผลกระทบของสภาวะที่มีการควบคุมและไม่มีการ



การควบคุมค่า pH ต่อการเจริญของ *B. siamensis* และการสังเคราะห์ลิแกนด์ เพื่อเป็นข้อมูลสำคัญเบื้องต้นในกระบวนการหมักแบบแม่นยำ (Precision fermentation) เพิ่มประสิทธิภาพ และขยายกำลังการผลิต (scale-up) ในเชิงอุตสาหกรรมและพาณิชย์

วิธีดำเนินการวิจัย

แบคทีเรีย

ทางผู้วิจัยได้คัดเลือกจุลินทรีย์ *B. siamensis* จากถั่วเน่าซึ่งเป็นอาหารทางภาคเหนือของประเทศไทย จากการวิจัยก่อนหน้านี้พบว่า *B. siamensis* สามารถผลิตลิแกนด์ได้จากอาหารที่มีความเข้มข้นของซูโครสที่ 20 % (w/v) [3] มีลักษณะเป็นแท่งขนาด 0.3–0.661.5–3.5 มิลลิเมตร เป็นแบคทีเรียชนิดแกรมบวก อยู่ในสกุลของ *Bacillus* อยู่ตามธรรมชาติทั่วไป [9] เป็นแบคทีเรียที่สามารถเจริญได้ทั้งสภาวะที่มีออกซิเจน และไม่มีออกซิเจน โคโลนีมีสีขาวครีม เป็นเมือก โปร่งแสง [10]

อาหารเลี้ยงจุลินทรีย์

เตรียมอาหารแข็ง Nutrient agar (NA) สำหรับคัดเลือกจุลินทรีย์ จากอาหาร NA สำเร็จรูป (Himedia, ประเทศอินเดีย) โดยมีส่วนประกอบของ NA 28 กรัมละลายในน้ำปราศจากไอออน (Deionized water, DI) 1 ลิตร เตรียมอาหารเหลวสำหรับเพิ่มจำนวนจุลินทรีย์ที่ประกอบด้วย ซูโครส (Sucrose) 50 กรัมต่อลิตร ยีสต์สกัด (Yeast Extract) 5 กรัมต่อลิตร ทริปโตน (Tryptone) 10 กรัมต่อลิตร เกลือแกง (NaCl) 5 กรัมต่อลิตร และเตรียมอาหารสำหรับผลิตลิแกนด์ซึ่งประกอบด้วย ซูโครส 300 กรัมต่อลิตร ไดโซเดียมไฮโดรเจนฟอสเฟต (Na_2HPO_4) 3.5 กรัมต่อลิตร โซเดียมไดไฮโดรเจนฟอสเฟต (NaH_2PO_4) 0.8 กรัมต่อลิตร แมงกานีสซัลเฟต (MnSO_4) 0.2 กรัมต่อลิตร โซเดียมไนเตรต (NaNO_3) 3.5 กรัมต่อลิตร และยีสต์สกัด 5.0 กรัมต่อลิตร นำอาหารทั้ง 3 ชนิด ไปฆ่าเชื้อด้วยหม้อนึ่งไอน้ำแรงดันสูงที่ 121 องศาเซลเซียส 15–20 ปอนด์ต่อตารางนิ้ว (psi) โดยใช้ระยะเวลาประมาณ 30 นาทีก่อนดำเนินการเลี้ยงจุลินทรีย์

การเตรียมหัวเชื้อจุลินทรีย์

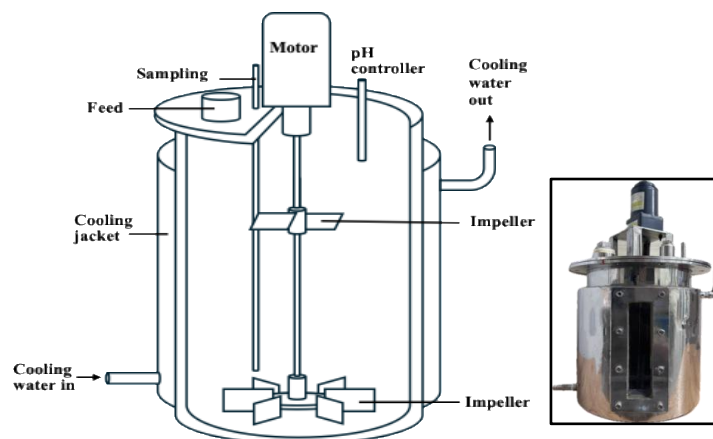
นำ *B. siamensis* ที่เก็บในกลีเซอรอลด้วยอุณหภูมิ -80 องศาเซลเซียส มาเลี้ยงบนอาหารแข็ง Nutrient agar (NA) เพื่อใช้คัดเลือกจุลินทรีย์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส หลังจากนั้นทำการคัดเลือกจุลินทรีย์ 1 โคโลนี เลี้ยงลงในอาหารเหลวสำหรับเพิ่มจำนวนจุลินทรีย์ ปริมาตร 100 มิลลิลิตร แล้วทำการหมักเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ด้วยเครื่องเขย่าด้วยความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที

ผลกระทบของสภาวะ pH ที่ถูกควบคุมและไม่ควบคุมต่อการผลิตสารลิแกนด์ด้วย *B. siamensis*

นำจุลินทรีย์ *B. siamensis* ที่ได้จากการหมักในอาหารเหลวสำหรับเพิ่มจำนวนจุลินทรีย์ 20 มิลลิลิตร ใส่ในอาหารเหลวเพื่อผลิตลิแกนด์ปริมาตร 180 มิลลิลิตร ทำการหมักเป็นเวลา 48 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส เขย่าด้วยความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที ทำการปรับ pH เริ่มต้นของอาหารเลี้ยงจุลินทรีย์เป็น 5.0 และปรับ pH ให้คงที่ด้วย HCl/NaOH เข้มข้น 1 โมลาร์ ทุก ๆ 6 ชั่วโมง และเก็บตัวอย่างที่ 0 6 12 24 และ 48 ชั่วโมงของการหมัก ปริมาตร 5 มิลลิลิตร วัดค่าการดูดกลืนแสง ด้วยเครื่อง UV-Visible spectrophotometer ด้วยความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร (OD600) และตรวจสอบปริมาณของลิแกนด์และน้ำตาลด้วยเครื่อง High performance liquid chromatography (HPLC) จากนั้นทำการทดลองซ้ำโดยไม่ปรับ pH ในระหว่างการหมักพร้อมวัดค่า pH ระหว่างการหมัก

การผลิตสารลิแกนด์จาก *B. siamensis* ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพ

นำจุลินทรีย์ที่ได้จากการหมักในอาหารเหลวสำหรับเพิ่มจำนวนจุลินทรีย์ 200 มิลลิลิตร เลี้ยงลงในอาหารสำหรับผลิตลิแกนด์ 1800 มิลลิลิตร ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพขนาด 5 ลิตร (ภาพที่ 1) (ปริมาตรการทำงาน 2 ลิตร) ที่ประกอบด้วยใบพัดแบบใบพัดพิทช์ (Pitch blade impeller) ขนาด 4 เซนติเมตร 2 ใบพัด และ ใบพัดแบบรัสตัน (Rushton turbine) ขนาด 4 เซนติเมตร 6 ใบพัด เส้นผ่านศูนย์กลาง 20 เซนติเมตร สูง 60 เซนติเมตร ควบคุมอุณหภูมิของเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพที่ 37 องศาเซลเซียส ด้วยอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิแบบหมุนเวียน ทำการหมักเป็นเวลา 48 ชั่วโมง กวนด้วยความเร็วรอบ 200



ภาพที่ 1 แบบจำลองเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพ

รอบก่อนที่ ติดตามและทำการปรับ pH เริ่มต้นของอาหารเลี้ยงจุลินทรีย์เป็น 5.0 และปรับ pH ให้คงที่ด้วย HCl/NaOH เข้มข้น 1 โมลาร์ ทุก ๆ 6 ชั่วโมง เก็บตัวอย่างปริมาตร 5 มิลลิลิตร ที่ 0 6 12 24 และ 48 ชั่วโมงของการหมัก วัดค่าการดูดกลืนแสง (OD600) และตรวจสอบปริมาณของกลีโคเจนและน้ำตาลด้วยเครื่อง HPLC จากนั้นทำการทดลองซ้ำโดยไม่ทำการปรับ pH ในระหว่างการหมักพร้อมตรวจวัดค่า pH ระหว่างการหมัก นำข้อมูลการเปลี่ยนแปลงความเข้มข้นของน้ำตาล (ฟรุกโตส กลูโคส และซูโครส) และปริมาณกลีโคเจนที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (one-way analysis ; ANOVA) ที่ระดับนัยสำคัญ $p\text{-value} = 0.05$

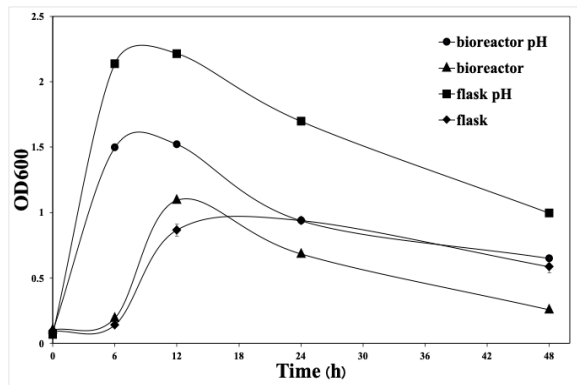
การวิเคราะห์ปริมาณกลีโคเจนและน้ำตาล ด้วยเครื่อง high-performance liquid chromatography (HPLC)

นำตัวอย่างที่เก็บจากกระบวนการหมักไปปั่นเหวี่ยงเพื่อแยกเซลล์ด้วยความเร็วรอบ $9,100 \times g$ เป็นเวลา 30 นาที นำส่วนใสไปต้มในน้ำเดือดเป็นเวลา 10 นาที เพื่อหยุดกิจกรรมของเอนไซม์ ทำการวิเคราะห์น้ำตาลในส่วนใสด้วยเครื่อง HPLC (Shimadzu LC-20A series, Shimadzu Corporation, Japan) ผ่านคอลัมน์ Phenomenex NH₂ ตรวจวัดด้วย refractive index detector ใช้ 80% กราฟทิคแอคโรนิไทโรลเป็นเฟสเคลื่อนที่ (Mobile phase) ด้วยอัตราการไหล 1.5 มิลลิลิตรต่อนาที ฉีดสารตัวอย่างปริมาตร 10 ไมโครลิตร ควบคุมอุณหภูมิที่ 40 องศาเซลเซียส สำหรับการวิเคราะห์กลีโคเจนจะใช้คอลัมน์ TOSOH TSKgel amide-80 size exclusion ตรวจวัดด้วย refractive index detector โดยใช้ 0.1 โมลาร์ โซเดียมคลอไรด์เป็นเฟสเคลื่อนที่ อัตราการไหล 1 มิลลิลิตรต่อนาที ฉีดสารตัวอย่างปริมาตร 10 ไมโครลิตร ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส นำข้อมูลที่ได้จากการทดลองมาวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (one-way analysis ; ANOVA) ที่ระดับนัยสำคัญ $p\text{-value} = 0.05$

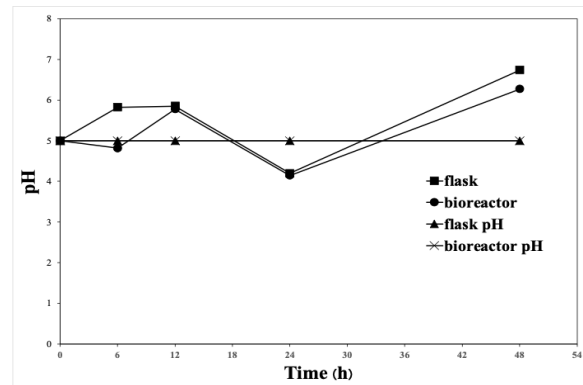
ผลการวิจัย

อัตราการเจริญของจุลินทรีย์ *B. siamensis*

จากขั้นตอนการศึกษาการหมักจุลินทรีย์ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพและในขวดรูปชมพู่โดยที่มีการควบคุม pH ที่ 5.0 โดยติดตามการเปลี่ยนแปลงและปรับ pH ด้วย 1 โมลาร์ HCl และ 1M NaOH ทุก 6 ชั่วโมง โดยค่า OD600 ที่แสดงถึงการเจริญของจุลินทรีย์ *B. siamensis* แสดงดังภาพที่ 2(a) โดยพบว่า *B. siamensis* สามารถเจริญเข้าสู่ระยะเอกซ์โพเนนเชียล (Exponential growth phase) เป็นระยะที่ *B. siamensis* มีการเพิ่มจำนวนเซลล์อย่างรวดเร็วและต่อเนื่องได้ภายในระยะเวลาหมัก 6 ชั่วโมง โดยมีช่วงระยะในการปรับตัว (Lag phase) น้อยมาก ซึ่งอาจเกิดจากหลายปัจจัย เช่น สภาพแวดล้อมที่เหมาะสม การปรับตัวของจุลินทรีย์ หรือการใช้จุลินทรีย์ที่พร้อมสำหรับการเจริญทันที รวดเร็ว ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่ผ่านมา พบว่า จุลินทรีย์ที่ผลิตกลีโคเจนส่วนใหญ่เจริญได้ดีในช่วง pH 5.0 ถึง 6.5 ที่ 6-12 ชั่วโมงของการหมัก และมีอัตราการเจริญเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง และเริ่มพบการเจริญแบบคงที่หลังจากชั่วโมงที่ 12 เป็นต้นไป [11] สำหรับการผลิตกลีโคเจนในสภาวะที่ไม่มี



(a)



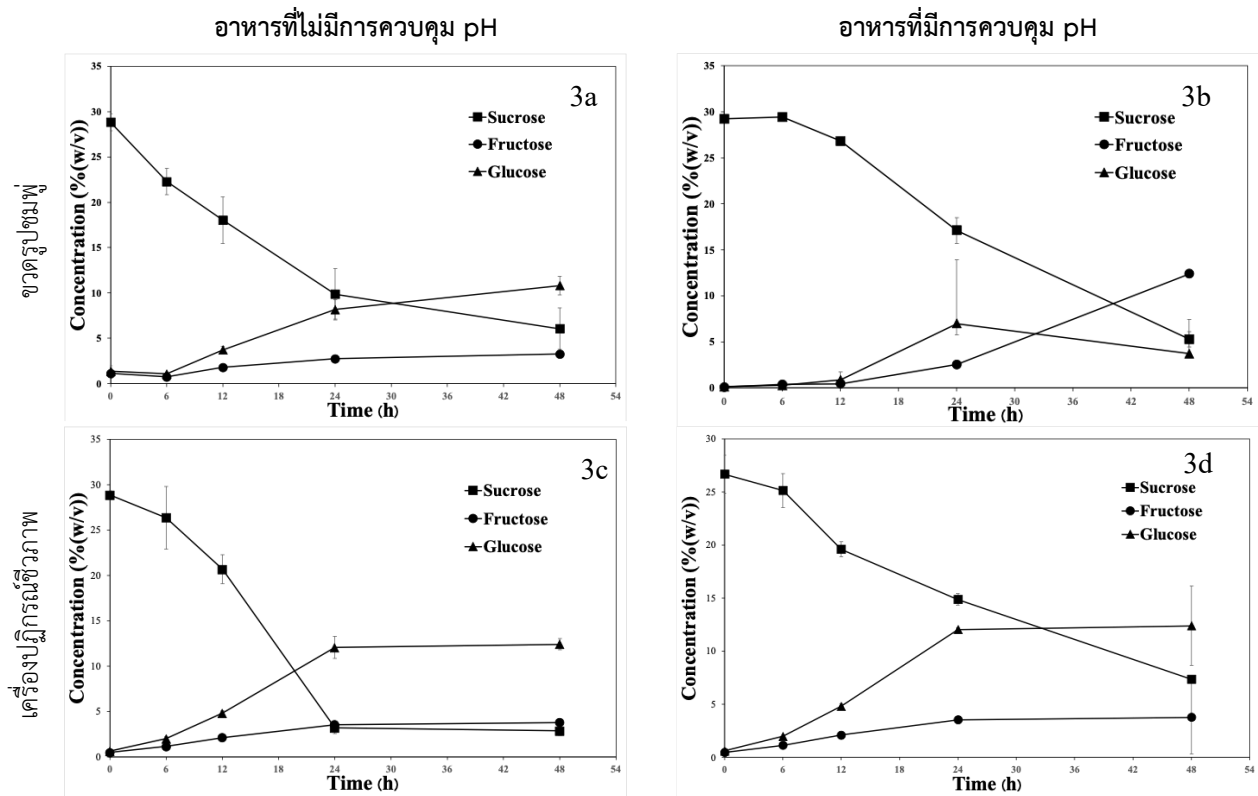
(b)

ภาพที่ 2 การเจริญของจุลินทรีย์ *B. siamensis* ภายใต้สภาวะที่มีและไม่มีการควบคุมค่า pH ระหว่างกระบวนการหมักในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพและขวดรูปชมพู่ ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส และความเร็วรอบ 200 รอบต่อนาที เป็นเวลา 48 ชั่วโมง (a) แสดงค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 600 นาโนเมตร (OD600) เพื่อใช้ประเมินการเจริญของจุลินทรีย์ (b) แสดงการเปลี่ยนแปลงของค่า pH ตลอดกระบวนการหมัก เพื่อเปรียบเทียบเสถียรภาพของสภาวะการเลี้ยงเชื้อ

การควบคุมค่า pH นั้น การเจริญของ *B. siamensis* สามารถแบ่งออกเป็นระยะต่าง ๆ ได้อย่างชัดเจน โดยช่วงแรก *B. siamensis* จะแสดงระยะปรับตัว (Lag phase) เนื่องจากเป็นช่วงที่ *B. siamensis* ปรับตัวเข้ากับสภาพแวดล้อมของอาหารเลี้ยง ก่อนเข้าสู่ช่วงถัดไปซึ่งเป็นระยะการเจริญอย่างรวดเร็ว (Log phase) โดยค่า OD600 เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ และหลังจาก 12 ชั่วโมงของการหมัก พบว่า การเจริญของ *B. siamensis* จะเข้าสู่ระยะคงตัว (Stationary phase) เนื่องจากปริมาณสารอาหารลดลงสอดคล้องกับการเปลี่ยนแปลงของน้ำตาลซูโครสที่มีปริมาณลดลง และน้ำตาลกลูโคส ฟรุกโตสที่มีปริมาณเพิ่มขึ้น ตามเวลาที่เพิ่มขึ้น ดังภาพที่ 3 และพบว่าค่า OD600 ลดลงเล็กน้อย เนื่องจาก *B. siamensis* เริ่มเข้าสู่ระยะการตาย (Death phase) อันเป็นผลมาจากการขาดแคลนอาหารที่จำเป็นต่อการเจริญของจุลินทรีย์ [12] และในขณะที่การเลี้ยงในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพไม่พบช่วง Stationary phase อย่างชัดเจนนั้น เนื่องจากเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพเกิดพื้นที่อับ (Dead zones) ที่เกิดขึ้นในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพซึ่งส่งผลกระทบต่อกิจกรรมและการเจริญของจุลินทรีย์ ส่งผลให้อัตราการเจริญในช่วง Stationary phase ไม่ชัดเจน โดยมีค่า OD600 ในช่วง 12-24 ชั่วโมงมีค่าลดลงอย่างต่อเนื่อง นอกเหนือจากนี้ยังพบตะกอนของจุลินทรีย์บริเวณพื้นที่อับ ซึ่งอาจเกิดขึ้นจากการกวนผสมที่ไม่ดี จึงส่งผลให้ประสิทธิภาพการผลิตลิแวนด้วยเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพลดลง [13] จากการวิเคราะห์กราฟการเปลี่ยนแปลงค่า pH ในภาพที่ 2(b) ระหว่างการเพาะเลี้ยงแบคทีเรีย พบว่าในการทดลองที่ไม่มีการควบคุมค่า pH ทั้งในขวดรูปชมพู่และเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพ มีรูปแบบการเปลี่ยนแปลงในทิศทางเดียวกัน โดยในช่วง 24 ชั่วโมงแรกของการหมัก ค่า pH มีความผันผวนเล็กน้อยก่อนจะลดลงมาอยู่ที่ประมาณ pH 4.0 ซึ่งเป็นผลจากการสะสมของกรดอินทรีย์ที่ได้จากกระบวนการเมแทบอลิซึมของจุลินทรีย์ในช่วงการเจริญเติบโต อย่างไรก็ตาม หลังจากชั่วโมงที่ 24 เป็นต้นไป ค่า pH ของทั้งสองสภาวะมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง จนกระทั่งในชั่วโมงที่ 48 ค่า pH ในขวดรูปชมพู่และเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพพุ่งสูงขึ้นไปที่ 6.7 และ 6.2 ตามลำดับ

ผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลและลิแวน ด้วยเครื่อง High-performance liquid chromatography (HPLC)

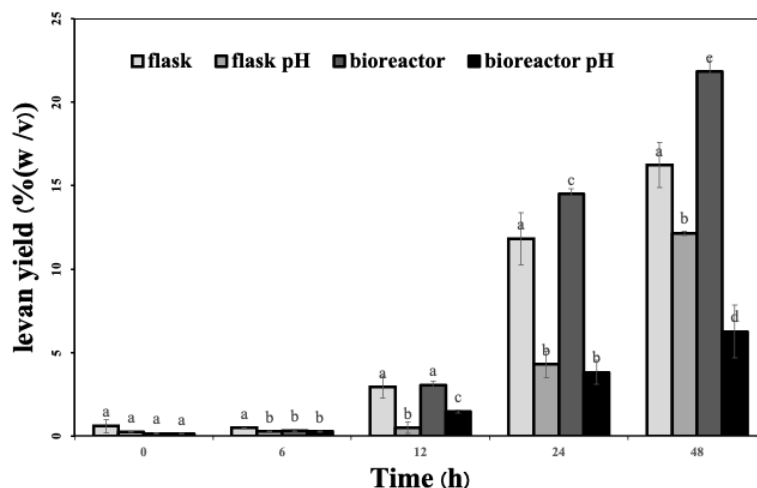
จากการเลี้ยงจุลินทรีย์ *B. siamensis* ในอาหารที่มีปริมาณความเข้มข้นของซูโครส 30 % (w/v) เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณของน้ำตาลในอาหารเลี้ยงจุลินทรีย์ แสดงดังภาพที่ 3 น้ำตาลซูโครสลดลงอย่างรวดเร็วในช่วง 6-24 ชั่วโมงของการหมัก ที่ 48 ชั่วโมงของการหมัก พบว่า การผลิตลิแวนด้วยเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพและขวดรูปชมพู่ที่มีการควบคุม pH เหลือน้ำตาลซูโครส 7.36 และ 5.29 % (w/v) ตามลำดับ และที่ไม่มีการควบคุม pH เหลือน้ำตาลซูโครส 2.85 และ 6.06 % (w/v) ตามลำดับ แนวโน้มการลดลงของน้ำตาลซูโครสมีความสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของปริมาณน้ำตาลกลูโคสและฟรุกโตสที่เกิดขึ้น



ภาพที่ 3 ความเข้มข้นของน้ำตาล (ฟรุกโตส กลูโคส และซูโครส) จากการหมักจุลินทรีย์ *B. siamensis* ภายใต้สภาวะที่ไม่มีการควบคุม pH ด้วยขบวนการหมัก (3a) เครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพ (3c) และภายใต้สภาวะที่มีการควบคุม pH ด้วย ขบวนการหมัก (3b) เครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพ (3d) ควบคุมอุณหภูมิที่ 37 องศาเซลเซียส 200 รอบต่อนาทีที่ 48 ชั่วโมง เพื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำตาล

ในระหว่างกระบวนการหมัก โดยเพิ่มขึ้นจนมีปริมาณสูงสุดที่ 48 ชั่วโมงของการหมัก โดยในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพพบกลูโคส 7.06 % (w/v) และ ฟรุกโตส 4.65 % (w/v) ในขณะที่ขบวนการหมักที่มีการควบคุม pH พบกลูโคส 3.71 % (w/v) และฟรุกโตส 12.28 % (w/v) สำหรับระบบการหมักที่ไม่มีการควบคุม pH พบว่า การหมักด้วยเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพ พบ กลูโคสและฟรุกโตส 12.40 % (w/v) และ 3.77 % (w/v) ตามลำดับ ในขณะที่การหมักด้วยขบวนการหมักที่ไม่มีการควบคุม pH พบ กลูโคสและฟรุกโตส 10.82 % (w/v) และ 3.26 % (w/v) ตามลำดับ

จากการวิเคราะห์ปริมาณของลิแกนด์ด้วยเทคนิค High-Performance Liquid Chromatography (HPLC) เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการผลิตภายใต้สภาวะการควบคุมและไม่ควบคุมค่า pH ในระบบขบวนการหมัก และเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพ พบว่า สภาวะการหมักส่งผลต่อปริมาณลิแกนด์แสดงในภาพที่ 4 โดยช่วงเริ่มแรกที่ 0-6 ชั่วโมง พบว่าปริมาณลิแกนด์ที่ผลิตได้จาก *B. siamensis* ในทุกชุดการทดลองมีปริมาณน้อยมากและไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) เนื่องจาก *B. siamensis* อยู่ในระยะปรับตัว (Lag phase) อย่างไรก็ตาม เมื่อเข้าสู่ชั่วโมงที่ 12 ของการหมัก เริ่มสังเกตเห็นความแตกต่างของปริมาณลิแกนด์อย่างชัดเจน โดยสภาวะที่ไม่มีการควบคุมค่า pH ทั้งในขบวนการหมักและเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพ ให้ผลผลิตลิแกนด์สูงกว่าสภาวะที่มีการควบคุมค่า pH อย่างมีนัยสำคัญ (2.94% และ 3.05% (w/v) ตามลำดับ) เมื่อการหมักดำเนินไปถึง 24 ชั่วโมง ปริมาณลิแกนด์ในทุกสภาวะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งสอดคล้องกับการเจริญของจุลินทรีย์และการลดลงของปริมาณน้ำตาลซูโครสในอาหารเลี้ยงเชื้อ (ภาพที่ 2 และ 3) โดยในระยะนี้ เครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพในสภาวะไม่ควบคุมค่า pH ให้ผลผลิตสูงสุดที่ 14.50% (w/v) ตามด้วยขบวนการหมักในสภาวะไม่ควบคุมค่า pH ที่ 11.82% (w/v) ในขณะที่ชุดการทดลองที่มีการควบคุมค่า pH ให้ผลผลิตต่ำกว่าอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) กระบวนการหมักที่ 48 ชั่วโมง พบว่าการหมักด้วยเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพในสภาวะไม่ควบคุมค่า pH เป็นสภาวะที่ให้ผลผลิตลิแกนด์สูงที่สุดเท่ากับ 21.8% (w/v) ซึ่งสูงกว่า



ภาพที่ 4 ความเข้มข้นของลิแวนที่ผลิตจากจุลินทรีย์ *B. siamensis* ในสภาวะที่มีการควบคุม pH เป็น 5.0 และไม่มีการควบคุม pH ด้วยเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพและขวดรูปชมพู่ ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส 200 รอบต่อนาทีเป็นเวลา 48 ชั่วโมง เพื่อเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของปริมาณลิแวน

(สัญลักษณ์อักษรภาษาอังกฤษที่กำกับเหมือนกันบนแท่งกราฟแสดงถึงความไม่แตกต่างทางสถิติและอักษรภาษาอังกฤษต่างกันที่กำกับบนแท่งกราฟแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $p < 0.05$)

การหมักในขวดรูปชมพู่ที่ไม่ควบคุมค่า pH (16.2% w/v) อย่างมีนัยสำคัญ ในทางตรงกันข้าม การควบคุมค่า pH ส่งผลให้ปริมาณของลิแวนเพิ่มขึ้นเล็กน้อย โดยเฉพาะในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพที่มีการควบคุมค่า pH ซึ่งให้ผลผลิตเพียง 6.3% (w/v) และการหมักด้วยขวดรูปชมพู่สามารถผลิตลิแวนได้เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเทียบกับชั่วโมงที่ 24 ของการหมัก โดยสามารถผลิตลิแวนได้ 12.1 % (w/v)

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

ผลการวิเคราะห์ปริมาณน้ำตาลและลิแวน ด้วยเครื่อง High-performance liquid chromatography (HPLC)

จากการเลี้ยงจุลินทรีย์ *B. siamensis* ในอาหารที่มีปริมาณความเข้มข้นของซูโครส 30 % (w/v) เกิดการเปลี่ยนแปลงปริมาณของน้ำตาลในอาหารเลี้ยงจุลินทรีย์ แสดงดังภาพที่ 3 น้ำตาลซูโครสลดลงเล็กน้อยในช่วงแรก (0-6 ชั่วโมง) ในทุกรูปแบบของการหมักเนื่องจากอยู่ในช่วงปรับตัวและมีการใช้สารอาหารในการเจริญของจุลินทรีย์น้อย การลดลงของปริมาณน้ำตาลซูโครสและการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลกลูโคสและฟรุกโตสในระบบกระบวนการหมักนั้น เป็นผลมาจากการทำงานของเอนไซม์ลิแวนซูเครส (Levansucrase) ที่ผลิตโดยจุลินทรีย์ *B. siamensis* เอนไซม์ชนิดนี้มีบทบาทสำคัญในการเปลี่ยนซูโครสให้เป็นลิแวน โดยกระบวนการเปลี่ยนแปลงดังกล่าวสามารถสังเกตได้จากการลดลงของปริมาณซูโครสทั้งในระบบการหมักด้วยเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพและขวดรูปชมพู่ โดยการเพิ่มขึ้นของน้ำตาลกลูโคสและฟรุกโตสเกิดปฏิกิริยาไฮโดรไลซิส (Hydrolysis) ของซูโครสให้กลายเป็นน้ำตาลกลูโคสและฟรุกโตส และเกิดกระบวนการทรานส์ฟรุกโตซิเลชัน (Transfructosylation) ที่นำฟรุกโตสซึ่งได้จากการไฮโดรไลซิสมาสรางเป็นลิแวน [14] โดยความแตกต่างของสัดส่วนของน้ำตาลกลูโคสและฟรุกโตสที่เกิดขึ้นสามารถบ่งชี้การสังเคราะห์ลิแวนได้เช่นกัน [1] รูปแบบการเจริญเติบโตของ *B. siamensis* มีความสัมพันธ์โดยตรงกับการเปลี่ยนแปลงค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ในอาหารเลี้ยงเชื้อโดยในช่วงแรก ที่มีการแบ่งตัวสูงสุด (log phase) จะเกิดการสะสมของกรดอินทรีย์ส่งผลให้ค่า pH ลดลงต่ำสุดที่ชั่วโมงที่ 24 จากกระบวนการเมแทบอลิซึมของคาร์โบไฮเดรต ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยก่อนหน้านี้โดยการสะสมกรดอินทรีย์และการเปลี่ยนแปลง pH ในการหมักของแบคทีเรียกรดแลคติก ซึ่งระบุว่าคาร์โบไฮเดรต (เช่น น้ำตาล) เป็นปัจจัยหลักที่ถูกแปลงเป็นกรดอินทรีย์ในช่วงของการเจริญเติบโต นำไปสู่การลดลงของค่า pH [15] และการเปลี่ยนแปลงค่า pH ในช่วง 24-48 ชั่วโมง ซึ่งช่วงเป็นเจริญของ *B. siamensis* เริ่มเข้าสู่ระยะการตาย (Death phase) ดังที่ภาพที่ 2(a) เป็นสัญญาณว่าแหล่งคาร์บอนหลักอย่างน้ำตาลในอาหารเลี้ยงเชื้อเริ่มถูก

ใช้จนหมด ส่งผลให้เมแทบอลิซึมของ *B. siamensis* เปลี่ยนทิศทางการสลายน้ำตาลเพื่อสร้างกรดอินทรีย์ ไปเป็นการสลายแหล่งไนโตรเจนหรือโปรตีนที่เหลืออยู่แทนผ่านกระบวนการ Deamination ซึ่งจะปลดปล่อยสารประกอบแอมโมเนียที่มีฤทธิ์เป็นด่างออกมาสู่ภายนอกเซลล์ [16]

จากการวิเคราะห์ผลทางสถิติโดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (one-way analysis ; ANOVA) ที่ระดับนัยสำคัญ $p\text{-value} = 0.05$ พบว่า หลังสิ้นสุดกระบวนการผลิต ปริมาณของลิแวนที่ได้จากการผลิตที่มีการควบคุม pH นั้นมีค่าที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ทางสถิติกับปริมาณของลิแวนที่ได้จากการผลิตที่ไม่มีการควบคุมค่า pH ซึ่งบ่งชี้ว่าการควบคุม pH เป็น 5.0 อาจไม่เหมาะสมสำหรับการผลิตลิแวน ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาแสดงให้เห็นถึงผลกระทบของ pH ต่อกิจกรรมของเอนไซม์ลิแวนซูเครส โดยเอนไซม์ลิแวนซูเครสสามารถทำงานได้ดีที่ pH 6.0 [14] นอกเหนือจากนี้ ในระหว่างกระบวนการหมัก pH ของระบบอาจมีเปลี่ยนแปลงจากกระบวนการเมแทบอลิซึมของจุลินทรีย์ และ pH อาจเพิ่มขึ้นสูงกว่า pH 5.0 ได้ ซึ่งส่งผลให้กระบวนการหมักที่ไม่มีการควบคุม pH มีประสิทธิภาพในการผลิตลิแวนได้สูงกว่ากระบวนการหมักที่มีการควบคุม pH ซึ่งสอดคล้องกับรายงานการวิจัยที่เคยมีการศึกษาไว้ก่อนหน้านี้ งานวิจัยดังกล่าวระบุว่า ในกระบวนการเลี้ยงจุลินทรีย์ *B. licheniformis* NS032 ในสภาวะที่ไม่มีการควบคุมค่า pH พบว่า แนวน้ำที่จุลินทรีย์จะผลิตลิแวนในปริมาณที่สูงที่สุดจะเกิดขึ้นในช่วงที่ค่า pH สูงกว่า 5.0 ทั้งนี้ การเพิ่มขึ้นของ pH ในระหว่างกระบวนการหมักอาจส่งผลต่อการทำงานของเอนไซม์ลิแวนซูเครสที่เป็นเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์ลิแวนให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้น [17] และยังสอดคล้องกับงานวิจัยของ Anam Nasir และคณะ ที่หมักจุลินทรีย์ *B. aryabhatai* แล้วพบว่า อาหารสำหรับการผลิตลิแวนที่มี pH มากกว่า 5.0 สามารถผลิตลิแวนได้เพิ่มขึ้น [18]

การสังเคราะห์ลิแวนโดยใช้เครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพในสภาวะที่ควบคุมค่า pH เพื่อศึกษาผลกระทบของสภาวะที่มีการควบคุมและไม่มีการควบคุมค่า pH ต่ออัตราการเพิ่มขึ้นของ *B. siamensis* และสังเคราะห์ลิแวน ในอัตราการเพิ่มขึ้นของ *B. siamensis* มีอัตราการเพิ่มขึ้นที่สูงสุดในรูปแบบการเลี้ยงในรูปหมักโดยมีการควบคุมค่า pH ที่ 5.0 และในรูปแบบการเลี้ยงในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพที่มีการควบคุมค่า pH ที่ 5.0 มีอัตราการเพิ่มขึ้นของเชื้อเป็นอันดับต่อมา เนื่องจาก *B. siamensis* มีปัจจัยในการควบคุมค่า pH ที่เหมาะสมสำหรับการเจริญ และการสังเคราะห์ลิแวนของ *B. siamensis* ในอาหารที่มีปริมาณความเข้มข้นของซูโครสเริ่มต้น 30 % (w/v) มีปริมาณลิแวนที่สูงสุดในรูปแบบการใช้เครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพอยู่ที่ 21.8 % (w/v) จากการทดลองรูปแบบการทดลองในเครื่องปฏิกรณ์ชีวภาพ ช่วยให้สามารถผลิตลิแวนได้ในปริมาณที่สูงกว่าการเพาะเลี้ยงแบบดั้งเดิม เพราะสามารถควบคุมปัจจัยต่างๆที่มีผลต่ออัตราการเจริญของจุลินทรีย์ได้ และอีกทั้งมีการออกแบบที่ช่วยลดความเสี่ยงจากการปนเปื้อนของจุลินทรีย์ที่ไม่พึงประสงค์ ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องมีความบริสุทธิ์สูง ทำให้ตอบสนองความต้องการของอุตสาหกรรมขนาดใหญ่ได้ เทคโนโลยีนี้เหมาะสำหรับการขยายขนาดการผลิตจากระดับห้องปฏิบัติการไปสู่ระดับอุตสาหกรรม ทำให้สามารถผลิตพรีไบโอติกส์เชิงพาณิชย์ได้อย่างมีประสิทธิภาพและคุ้มค่า โดยการวิจัยในอนาคตนั้นแนะนำให้ศึกษาการควบคุมปัจจัยอื่นอีก เช่น อุณหภูมิ ความเข้มข้นของออกซิเจน และการกวนผสม เป็นต้น ซึ่งเป็นสิ่งสำคัญในการเพิ่มอัตราการเจริญของจุลินทรีย์และเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตลิแวนให้ได้ปริมาณมากและสม่ำเสมอ

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์และคณะเภสัชศาสตร์ มหาวิทยาลัยบูรพา ที่ให้การสนับสนุนงานวิจัย ห้องปฏิบัติการและเครื่องมือในการดำเนินงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

1. Srikanth R, Reddy CHS, Siddartha G, Ramaiah MJ, Uppuluri KB. Review on production, characterization and applications of microbial levan. Carbohydr Polym 2015;120:102-14.
2. Jang KH, Kang SA, Cho Y, Kim YY, Lee YJ, Hong K, et al. Prebiotic properties of levan in rats. J Microbiol Biotechnol 2003;13(3):348-53.



3. Thakham N, Thaweesak S, Teerakulkittipong N, Traiosot N, Kaikaew A, Lirio GA, et al. Structural characterization of functional ingredient Levan synthesized by *Bacillus siamensis* isolated from traditional fermented food in Thailand. *International Journal of Food Science*. 2020;2020(1):7352484.
4. Sima F, Mutlu EC, Eroglu MS, Sima LE, Serban N, Ristoscu C, et al. Levan nanostructured thin films by MAPLE assembling. *BOMAF6* 2011;12(6):2251-6.
5. Anguluri K, La China S, Brugnoli M, De Vero L, Pulvirenti A, Cassanelli S, et al. Candidate acetic acid bacteria strains for levan production. *Polymers* 2022;14(10):2000.
6. Silbir S, Dagbagli S, Yegin S, Baysal T, Goksungur Y. Levan production by *Zymomonas mobilis* in batch and continuous fermentation systems. *Carbohydr Polym* 2014;99:454-61.
7. Dahech I, Belghith KS, Hamden K, Feki A, Belghith H, Mejdoub H. Oral administration of levan polysaccharide reduces the alloxan-induced oxidative stress in rats. *Int J Biol Macromol* 2011;49(5):942-7.
8. Phengnoi P, Sattavanich S, Charoensup C, Nuengnoon S, Janthorn K, Teerakulkittipong N, et al. Production and characterization of levan by *Bacillus siamensis* at flask and bioreactor. *EAEF* 2023;16(1):15-23.
9. Meidong R, Doolgindachbaporn S, Jamjan W, Sakai K, Tashiro Y, Okugawa Y, et al. A novel probiotic *Bacillus siamensis* B44v isolated from Thai pickled vegetables (Phak-dong) for potential use as a feed supplement in aquaculture. *J Gen Appl Microbiol* 2017;63(4):246-53.
10. Sumpavapol P, Tongyonk L, Tanasupawat S, Chokesajjawatee N, Luxananil P, Visessanguan W. *Bacillus siamensis* sp. nov., isolated from salted crab (poo-khem) in Thailand. *Int J Syst Evol Microbiol* 2010;60(10):2364-70.
11. El-Refai HA, Abdel-Fattah AF, Mostafa FA. Enzymic synthesis of levan and fructo-oligosaccharides by *Bacillus circulans* and improvement of levansucrase stability by carbohydrate coupling. *World J Microbiol Biotechnol* 2009;25(5):821-7.
12. Maier RM, Pepper IL. Bacterial growth. *Environ. Microbiol: Elsevier*; 2015. p. 37-56.
13. Amin I, Elsakka M, Oterkus S, Nguyen CT, Ozdemir M, El-Aassar A-H, et al. Computational fluid dynamics-based design of anoxic bioreactor zone in wastewater treatment plant. *Desalin. Water Treat* 2022;253:9-23.
14. Phengnoi P, Thakham N, Rachphirom T, Teerakulkittipong N, Lirio GA, Jangiam W. Characterization of levansucrase produced by novel *Bacillus siamensis* and optimization of culture condition for levan biosynthesis. *Heliyon* 2022;8(12) e12137.
15. Garrote Achou C, Cantalejo Díez MJ, Diaz Cano J, Molinos Equiza X. Evaluation of different nutritional sources in lactic acid bacteria fermentation for sustainable postbiotic production. *Foods* 2025;14(4):649.
16. Zhao CC, Eun JB. Isolation and identification of hyper-ammonia-producing bacteria from commercial fermented skates (*Raja kenoi*). *J Food Sci Technol* 2018;55(12):5082-90.
17. Gojgic-Cvijovic G, Jakovljevic D, Loncarevic B, Todorovic N, Pergal MV, Ciric J, et al. Production of levan by *Bacillus licheniformis* NS032 in sugar beet molasses-based medium. *Int J Biol Macromol* 2019;121:142-51.
18. Nasir A, Sattar F, Ashfaq I, Lindemann SR, Chen M-H, Van den Ende W, et al. Production and characterization of a high molecular weight levan and fructooligosaccharides from a rhizospheric isolate of *Bacillus aryabhattai*. *LWT* 2020;123:109093.



การพัฒนาสูตรไอศกรีมกล้วยหอมทองลดไขมันโดยใช้อินูลินเป็นสารทดแทนไขมัน Development of a Reduced-Fat Hom Thong Banana Ice Cream Product using Inulin as a Fat Replacer

เพ็ญศิริ คงสิทธิ์

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี ลพบุรี 15000

Phensiri Khongsit

Department of Food Science and Technology, Faculty of Science and Technology,

Thepsatri Rajabhat University, Lopburi, 15000

Corresponding author: Phensiri.k@lawasri.tru.ac.th

Received: 3 December 2025/ Revised: 15 April 2026/ Accepted: 19 April 2026

บทคัดย่อ

งานวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ศึกษาปริมาณกล้วยหอมทองที่ใช้ในการผลิตไอศกรีมกล้วยหอมทอง 2) ศึกษาปริมาณอินูลินที่ใช้เป็นสารทดแทนไขมันในผลิตภัณฑ์ไอศกรีมกล้วยหอมทองลดไขมัน และ 3) ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและจุลินทรีย์ของไอศกรีมกล้วยหอมทองลดไขมันโดยใช้อินูลินเป็นสารทดแทนไขมันเปรียบเทียบกับไอศกรีมสูตรควบคุม โดยได้ทำการศึกษ ปริมาณกล้วยหอมทองที่ใช้ในการผลิตไอศกรีม โดยใช้ปริมาณกล้วยหอมทองร้อยละ 0 (ควบคุม), 20, 40 และ 60 (โดยน้ำหนักต่อน้ำหนักไอศกรีม) จากการทดลองพบว่าเมื่อปริมาณกล้วยหอมทองเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความหนืด ค่าความแน่นแข็ง ค่าร้อยละการขึ้นฟู และค่า a^* เพิ่มขึ้น แต่ค่า L^* ค่า b^* ค่าการละลายลดลง โดยปริมาณกล้วยหอมทองร้อยละ 40 ได้รับคะแนนการทดสอบทางประสาทสัมผัสมากที่สุด และจากการศึกษาปริมาณอินูลินที่ใช้เป็นสารทดแทนไขมันในผลิตภัณฑ์ไอศกรีมกล้วยหอมทองลดไขมัน โดยใช้อินูลินร้อยละ 0 (ควบคุม), 2, 4, 6 และ 8 (โดยน้ำหนักต่อน้ำหนักของวิปครีม) พบว่าเมื่อปริมาณอินูลินเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความหนืด ค่า L^* และค่า b^* เพิ่มขึ้น ค่าความแน่นแข็ง ค่าไขมันค่า a^* และอัตราการละลายมีค่าลดลง แต่ค่าร้อยละการขึ้นฟูไม่แตกต่างกัน ไอศกรีมกล้วยหอมทองลดไขมันโดยใช้อินูลินเป็นสารทดแทนไขมันร้อยละ 8 มีร้อยละไขมันน้อยที่สุด และผู้บริโภคให้คะแนนการยอมรับมากที่สุด และจากการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและจุลินทรีย์ของไอศกรีมกล้วยหอมทองลดไขมันโดยใช้อินูลินเป็นสารทดแทนไขมันเปรียบเทียบกับไอศกรีมสูตรควบคุม พบว่าปริมาณไขมัน โปรตีน และพลังงานของไอศกรีมกล้วยหอมทองที่เติมอินูลินร้อยละ 8 มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และไอศกรีมกล้วยหอมทองที่เติมอินูลินร้อยละ 8 มีปริมาณกากใย มากกว่าไอศกรีมกล้วยหอมทองสูตรควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยมีปริมาณความชื้น เถ้า และคาร์โบไฮเดรตไม่แตกต่างกัน และพบว่าจำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมดและแบคทีเรียในกลุ่มโคลิฟอร์มอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานของประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 354 เรื่องไอศกรีม (2556)

คำสำคัญ: อินูลิน กล้วยหอมทอง ไอศกรีมลดไขมัน



Abstract

The objectives of this research were: 1) to determine the amount of Hom Thong banana for the production of banana ice cream; 2) to investigate the concentration of inulin used as a fat replacer in reduced-fat Hom Thong banana ice cream; and 3) to study the chemical composition and microbiological quality of the reduced-fat Hom Thong banana ice cream using inulin as a fat replacer compared to a control. The study on the amount of banana was conducted by varying the Hom Thong banana content at 0%(control), 20%, 40%, and 60% (w/w of ice cream). The results showed that increasing the banana content resulted in higher viscosity, firmness, overrun, and a^* value, while the L^* value, b^* value, and melting rate decreased. The formulation with 40% Hom Thong banana ice cream received the highest sensory evaluation scores. Furthermore, the study on inulin as a fat replacer in the reduced-fat ice cream utilized inulin concentrations of 0% (control), 2%, 4%, 6%, and 8% (w/w of whipping cream). It was found that an increase in inulin content led to higher viscosity, L^* value, and b^* value. Conversely, firmness, fat content, a^* and melting rate decreased, whereas the overrun showed no significant differences. The reduced-fat Hom Thong banana ice cream formulated with 8% inulin exhibited the lowest fat percentage and received the highest sensory evaluation scores. When comparing the chemical composition and microbiological quality of the 8% inulin low-fat ice cream to the control, the moisture, fat, protein, and energy contents of the 8% inulin ice cream were significantly lower ($p < 0.05$). However, its dietary fiber contents were significantly higher than those of the control ($p < 0.05$), with no significant difference observed in moisture ash and carbohydrate content. Finally, the total plate count and coliform bacteria were in agreement with the Food Act standard No354 (Ice cream), Ministry of Public Health (2556).

Keywords: Inulin, Hom Thong Banana, Ice Cream Reduced-Fat

บทนำ

กล้วยหอม มีชื่อวิทยาศาสตร์คือ *Musa Sapientum* Linn. อยู่ในวงศ์ Musaceae กล้วยหอมเป็นพืชนิยมบริโภคกันอย่างแพร่หลาย เป็นผลไม้เศรษฐกิจที่สามารถปลูกได้ทั่วทุกภูมิภาคของประเทศไทยและให้ผลผลิตตลอดปี รสชาติหวานและกลิ่นที่เป็นเอกลักษณ์ มีสารอาหารประเภทโปรตีนและคาร์โบไฮเดรตสูง เป็นแหล่งวิตามินเอ วิตามินบี และวิตามินซี รวมถึง แคลเซียม ฟอสฟอรัส และธาตุเหล็ก [1] ผลสดของกล้วยหอมทองมีข้อจำกัดด้านอายุการเก็บรักษา เนื่องจากมีอัตราการหายใจและการสุกที่รวดเร็ว ส่งผลให้ผลผลิตจำนวนหนึ่งไม่สามารถผ่านมาตรฐานการส่งออกได้ แม้ว่าคุณภาพของเนื้อผลยังคงเหมาะสมต่อการบริโภคก็ตาม กล้วยหอมทองมีลักษณะเปลือกบาง เนื้อนิ่ม และมีการเปลี่ยนแปลงทางสรีรวิทยาหลังการเก็บเกี่ยวอย่างรวดเร็ว ทำให้เกิดการเปลี่ยนสีของเปลือกและการเสื่อมคุณภาพในระยะเวลานานขึ้น ซึ่งส่งผลให้มีอายุการวางจำหน่ายในตลาดค่อนข้างจำกัด ดังนั้นการนำกล้วยหอมที่ไม่ผ่านเกณฑ์มาตรฐานการส่งออกหรือกล้วยที่สุกเกินไปมาบริโภคสด นำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์อาหารรูปแบบต่าง ๆ เช่น ผงกล้วย กล้วยอบแห้ง หรือส่วนผสมในผลิตภัณฑ์อาหาร จึงเป็นแนวทางสำคัญในการยืดอายุการเก็บรักษา ลดการสูญเสียหลังการเก็บเกี่ยว และเพิ่มมูลค่าทางเศรษฐกิจให้กับผลผลิตทางการเกษตร

ไอศกรีมเป็นผลิตภัณฑ์ของหวานแช่แข็งที่มีส่วนประกอบจากนมและบริโภคอย่างแพร่หลายทั่วโลกเนื่องจากมีรสชาติหวานและให้ความรู้สึกเย็นสดชื่นเมื่อบริโภค โดยทั่วไปส่วนประกอบหลักของไอศกรีม ได้แก่ นม ไขมันนม และสารให้ความหวาน (sweeteners) หรือน้ำตาล ซึ่งนมเป็นแหล่งสำคัญของสารอาหาร เช่น โปรตีน แร่ธาตุ และวิตามินต่าง ๆ ที่เป็นประโยชน์ต่อร่างกาย นอกจากนี้สูตรไอศกรีมยังประกอบด้วยสารให้ความคงตัว (stabilizer) และอิมัลซิไฟเออร์ (emulsifier) รวมถึงสารปรุงแต่งกลิ่น รส สี และส่วนผสมอื่น ๆ เพื่อช่วยปรับปรุงคุณลักษณะของผลิตภัณฑ์ให้มีความคงตัวและเนื้อสัมผัสที่

เหมาะสม [2, 3] ไอศกรีมมีโครงสร้างซับซ้อน ประกอบด้วยผลึกน้ำแข็ง หยดไขมัน ฟองอากาศ โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และเกลือที่กระจายตัวอยู่ในเฟสของน้ำ โครงสร้างจุลภาคเหล่านี้มีบทบาทสำคัญต่อคุณสมบัติทางกายภาพและประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ เช่น ความเนียน ความครีมมี่ และลักษณะการละลายของไอศกรีม ซึ่งองค์ประกอบต่างๆ ในสูตรไอศกรีมมีบทบาทต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์แตกต่างกันไป โดยไขมันนมเป็นองค์ประกอบสำคัญที่มีผลต่อโครงสร้าง เนื้อสัมผัส และคุณสมบัติทางรีโอโลยีของไอศกรีม รวมถึงช่วยเพิ่มความครีมมี่และกลิ่นรสของผลิตภัณฑ์ ขณะที่สารให้ความคงตัวมีบทบาทในการควบคุมพฤติกรรมของน้ำและช่วยลดการเกิดผลึกน้ำแข็งขนาดใหญ่ ส่งผลให้ไอศกรีมมีเนื้อสัมผัสที่เรียบเนียนมากขึ้น ส่วนอิมัลซิไฟเออร์ช่วยให้ไขมันและน้ำกระจายตัวได้อย่างสม่ำเสมอ ทำให้เกิดโครงสร้างอิมัลชันที่มีความเสถียรและช่วยเพิ่มความเนียนนุ่มของเนื้อไอศกรีม [2] โดยทั่วไปไอศกรีมประกอบด้วยไขมันประมาณ 10-16% ที่เป็นส่วนประกอบสำคัญ และส่งผลต่อเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ การคงรูปร่าง และอัตราการละลายหลังการแช่แข็ง [3] ในปัจจุบันผู้บริโภคมีความสนใจในการบริโภคผลิตภัณฑ์อาหารไขมันต่ำเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากการบริโภคไขมันในปริมาณที่มากเกินไปมีความสัมพันธ์กับความเสี่ยงที่เพิ่มขึ้นต่อการเกิดภาวะโรคอ้วนและโรคหลอดเลือดหัวใจ [4] ดังนั้นการลดปริมาณไขมันในไอศกรีมจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งให้กับผู้บริโภคที่ใส่ใจต่อสุขภาพ ด้วยเหตุนี้ในปัจจุบันจึงมีการนำสารทดแทนไขมันมาใช้ในสูตรไอศกรีมอย่างแพร่หลาย เพื่อช่วยลดหรือบรรเทาคุณลักษณะที่ไม่พึงประสงค์ของผลิตภัณฑ์สำเร็จรูปซึ่งอาจเกิดขึ้นจากการลดหรือกำจัดไขมันออกจากสูตรผลิตภัณฑ์

อินูลินเป็นพอลิแซ็กคาไรด์ในกลุ่มฟรุกแทนที่ประกอบด้วยหน่วยฟรุกโตสเชื่อมต่อกันด้วยพันธะ β -(2 $\rightarrow$ 1) โดยมีคุณสมบัติเป็นใยอาหารชนิดละลายน้ำและไม่ถูกย่อยในระบบทางเดินอาหารของมนุษย์ จึงสามารถทำหน้าที่เป็นพรีไบโอติก ส่งเสริมการเจริญของจุลินทรีย์ที่มีประโยชน์ในลำไส้ใหญ่ และมีบทบาทในการส่งเสริมสุขภาพ เช่น การเพิ่มการดูดซึมแร่ธาตุ และการเสริมสร้างภูมิคุ้มกัน นอกจากนี้อินูลินยังให้พลังงานต่ำและสามารถสร้างโครงสร้างเจลได้ ทำให้ได้รับความสนใจในการประยุกต์ใช้เป็นสารทดแทนไขมันในผลิตภัณฑ์อาหาร โดยเฉพาะผลิตภัณฑ์นมแปรรูป เช่น ไอศกรีม [5] ในผลิตภัณฑ์ไอศกรีมไขมันมีบทบาทสำคัญในการให้เนื้อสัมผัส ความครีมมี่ และความคงตัวของโครงสร้าง อย่างไรก็ตามแนวโน้มการบริโภคอาหารเพื่อสุขภาพส่งผลให้มีการพัฒนาไอศกรีมไขมันต่ำ โดยมีการใช้อินูลินเป็นสารทดแทนไขมัน (fat replacer) เนื่องจากสามารถเลียนแบบคุณสมบัติของไขมันได้ การเติมอินูลินสามารถเพิ่มความหนืดของส่วนผสม (ice cream mix) ปรับปรุงการกักเก็บอากาศ (overrun) และทำให้เนื้อสัมผัสของไอศกรีมมีความเนียนและสม่ำเสมอมากขึ้น นอกจากนี้อินูลินยังมีบทบาทสำคัญในการพัฒนาไอศกรีมไขมันต่ำหรือปราศจากไขมัน โดยสามารถลดปริมาณไขมันในผลิตภัณฑ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ในขณะที่ยังคงคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสและการยอมรับทางประสาทสัมผัสในระดับที่ใกล้เคียงกับไอศกรีมปกติ [6] มีรายงานว่าไอศกรีมไขมันต่ำที่ใช้อินูลินเป็นส่วนประกอบสามารถให้คุณลักษณะด้านความครีมมี่และความพึงพอใจของผู้บริโภคใกล้เคียงกับผลิตภัณฑ์ที่มีไขมันสูง [7] งานวิจัยก่อนหน้านี้มีการศึกษาการใช้อินูลินเป็นสารทดแทนไขมันต่อคุณภาพทางเคมีกายภาพ และประสาทสัมผัสต่อผลิตภัณฑ์ไอศกรีมไขมันต่ำ ซึ่งทำให้ไอศกรีมไขมันต่ำมีอัตราการละลายต่ำลง [8] อย่างไรก็ตามการลดปริมาณไขมันในผลิตภัณฑ์ไอศกรีมมักส่งผลกระทบต่อคุณลักษณะทางกายภาพและคุณสมบัติทางประสาทสัมผัสของผลิตภัณฑ์ เนื่องจากไขมันมีบทบาทสำคัญในการสร้างโครงสร้าง เนื้อสัมผัส ดังนั้นการพัฒนาไอศกรีมไขมันต่ำจึงจำเป็นต้องใช้สารทดแทนไขมันเพื่อชดเชยหน้าที่ของไขมันที่ลดลง ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงศึกษาพัฒนาสูตรไอศกรีมกล้วยหอมทอง มาปรับเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์ไอศกรีมกล้วยหอมทองลดไขมัน ซึ่งใช้อินูลินเป็นสารทดแทนไขมัน โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปริมาณกล้วยหอมทองที่ใช้ในการผลิตไอศกรีมกล้วยหอมทอง ศึกษาปริมาณอินูลินที่ใช้เป็นสารทดแทนไขมัน และศึกษาองค์ประกอบทางเคมีและจุลินทรีย์ของไอศกรีมกล้วยหอมทองลดไขมันโดยใช้อินูลินเป็นสารทดแทนไขมันเปรียบเทียบกับไอศกรีมสูตรควบคุมเพื่อสนองความต้องการของผู้บริโภคที่ต้องการรักษาสุขภาพ



วิธีดำเนินการวิจัย

1. การศึกษาปริมาณกล้วยหอมทองที่ใช้ในการผลิตไอศกรีมกล้วยหอมทอง

การเตรียมกล้วยหอมทอง นำกล้วยหอมทองที่ซื้อจาก ห้างบิ๊กซี จังหวัดลพบุรี ระยะความสุกที่ 7 ตามมาตรฐาน CSIRO(1972) [9] ซึ่งประกอบด้วยสารให้กลิ่นหอมเฉพาะของกล้วยหอมพันธุ์หอมทองมากที่สุด [10] มาล้างทำความสะอาด ปอกเปลือก แล้วนำไปปั่นให้ละเอียดด้วยเครื่องปั่นผสมอาหาร เก็บไว้ใช้เป็นส่วนผสมในสูตรไอศกรีมต่อไป และการศึกษาปริมาณกล้วยหอมทองที่ใช้ในการทำไอศกรีมกล้วยหอมทอง โดยศึกษาปริมาณกล้วยหอมทอง 4 ระดับ ได้แก่ ร้อยละ 0 (สูตรควบคุม), 20, 40, 60 (โดยน้ำหนักต่อน้ำหนักไอศกรีม) และวางแผนการทดลอง CRD (Completely Randomized Design) ซึ่งมีส่วนผสมดังตารางที่ 1 มีวิธีการผลิตไอศกรีมทำได้โดย ชั่งน้ำหนักส่วนผสมตามสูตร และนำส่วนผสมที่เป็นของเหลว ได้แก่ นมสด วิปปิงครีม น้ำเปล่า ใส่หม้อตุ๋นให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 63 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที จากนั้นนำส่วนผสมที่เป็นของแข็ง ได้แก่ น้ำตาลทราย เกลือ สารละลายกัวร์กัม ผสมลงในส่วนผสมของเหลว คนจนส่วนผสมละลายเข้าด้วยกัน เติมน้ำแดง นำส่วนผสมที่ได้มาผ่านเครื่องโฮโมจิไนซ์เซอร์ (ยี่ห้อ Ystral, รุ่น X10/20-E3) ที่ความเร็ว 2,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 2 นาที นำมาทำให้เย็นด้วยการแช่ลงในน้ำอุณหภูมิห้องจนส่วนผสมมีอุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ใส่กลิ่นวานิลาลงไป เทส่วนผสมใส่กล่องพลาสติกปิดฝาและนำไปบ่มในตู้เย็นที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง นำไปปั่นในเครื่องทำไอศกรีมเป็นเวลา 30 นาที บรรจุไอศกรีมในถ้วยพลาสติกชนิดพอลิสไตรีน เก็บรักษาในตู้แช่เยือกแข็งอุณหภูมิ -18 องศาเซลเซียส จากนั้นนำไอศกรีมกล้วยหอมทองที่ได้มาวิเคราะห์คุณภาพด้านต่าง ๆ

ตารางที่ 1 ส่วนผสมของไอศกรีมกล้วยหอมทอง

ส่วนผสม	ปริมาณ (ร้อยละ)			
กล้วยหอมทอง	0 (ควบคุม)	20	40	60
นมสดขาดมันเนย	52.62	52.62	52.62	52.62
วิปปิงครีม	15.26	15.26	15.26	15.26
น้ำตาล	8.62	8.62	8.62	8.62
กลิ่นวานิลลา	0.32	0.32	0.32	0.32
กัวร์กัม	0.60	0.60	0.60	0.60
น้ำเปล่า	22.58	22.58	22.58	22.58

ที่มา: ดัดแปลงจาก ปิยนุสรณ์ น้อยด้วง และระวีวรรณ วงศ์วรรณ [11]

2. การศึกษาปริมาณอินูลินที่ใช้เป็นสารทดแทนไขมันในผลิตภัณฑ์ไอศกรีมกล้วยหอมทองลดไขมัน

นำไอศกรีมสูตรที่ได้ผ่านการทดสอบทางกายภาพและทางประสาทสัมผัสจากข้อที่ 1 มาศึกษาปริมาณอินูลินที่ใช้ในการผลิตไอศกรีมกล้วยหอมทองลดไขมันโดยทดแทนอินูลินในส่วนผสมที่เป็นไขมัน ซึ่งอินูลินจากบริษัท กรุงเทพเคมี จำกัด (DP≥14) ทำการศึกษาปริมาณอินูลิน 5 ระดับ ได้แก่ ร้อยละ 0 (ควบคุม), 2, 4, 6 และ 8 (โดยน้ำหนักต่อน้ำหนักของวิปปิงครีม) แสดงดังตารางที่ 2 และวางแผนการทดลอง CRD (Completely randomized design) จากนั้นนำไอศกรีมกล้วยหอมทองลดไขมันที่ผลิตได้มาวิเคราะห์คุณภาพด้านต่าง ๆ

การวิเคราะห์คุณภาพผลิตภัณฑ์

1.1 คุณภาพทางกายภาพ

1) ค่าความหนืด ด้วยเครื่อง Brookfield viscometer (Brookfield viscometer; ยี่ห้อ Brookfield, รุ่น LV DV-II+Pro Extra, ประเทศญี่ปุ่น) โดยใช้หัววัดเบอร์ No. 64 ความเร็ว 30 รอบต่อนาที วัดความหนืดของไอศกรีมเหลวหลังการบ่มที่อุณหภูมิประมาณ 4 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง โดยเครื่องวัดความหนืด อ่านค่าที่ได้หลังมอเตอร์หมุน 30 วินาที ความเร็วอุณหภูมิตัวอย่างที่ 20 ± 1 องศาเซลเซียส



ตารางที่ 2 ส่วนผสมของไอศกรีมกล้วยหอมทองลดไขมันโดยใช้อินูลินเป็นสารทดแทนไขมัน

ส่วนผสม	ปริมาณส่วนผสมอินูลินในแต่ละสูตร (ร้อยละ)			
	0	2	4	6
อินูลิน	0	0.22	0.44	0.65
วิปป์ครีม	10.9	10.68	10.46	10.25
กล้วยหอมทอง	28.57	28.57	28.57	28.57
นมสดขาดมันเนย	37.58	37.58	37.58	37.58
น้ำตาล	6.16	6.16	6.16	6.16
กลีขนวนิลลา	0.23	0.23	0.23	0.23
กัวร์กัม	0.43	0.43	0.43	0.43
น้ำเปล่า	16.13	16.13	16.13	16.13

2) ค่าร้อยละการขึ้นฟู โดยชั่งน้ำหนักของไอศกรีมเหลว และน้ำหนักของไอศกรีมลงในภาชนะปริมาตร 120 มิลลิลิตร ตามวิธีของ Arbuckle [12] ที่นำข้อมูลไปคำนวณค่าร้อยละการขึ้นฟู ดังสมการที่ 1

$$\text{ค่าร้อยละการขึ้นฟู} = \frac{\text{น้ำหนักไอศกรีมเหลว} - \text{น้ำหนักไอศกรีมหลังปั่น}}{\text{น้ำหนักไอศกรีมหลังปั่น}} \times 100 \quad (1)$$

3) อัตราการละลาย นำไอศกรีมที่ผ่านการแช่เยือกแข็ง 24 ชั่วโมง มา 50 กรัม นำมาปล่อยให้ละลายบนตะแกรงร้อน แบ่งขนาด 80 เมช ที่มีถ้วยแสดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว รองรับไอศกรีมอยู่ด้านล่าง วางไอศกรีมทิ้งไว้ 30 นาที ที่ อุณหภูมิ 25 ± 1 องศาเซลเซียส ชั่งน้ำหนักไอศกรีมที่ละลายออกมาทุก ๆ 5 นาที เป็นเวลา 30 นาที โดยดัดแปลงวิธีของ Markowska และคณะ [13] นำข้อมูลไปคำนวณค่าร้อยละของไอศกรีมที่ละลาย ดังสมการที่ 2

$$\text{อัตราการละลาย} = \frac{\text{น้ำหนักไอศกรีมที่ละลาย}}{\text{น้ำหนักไอศกรีมเริ่มต้น}} \times 100 \quad (2)$$

4) ค่าสี L^* , a^* และ b^* โดยใช้เครื่อง Colorimeter (ยี่ห้อ Hunter lab, รุ่น Color Flex Z2) ซึ่งค่า L^* แสดงถึงความมืด-สว่าง มีค่าตั้งแต่ 0-100 ค่า a^* แสดงถึง ค่าสีแดงและสีเขียวของวัตถุ เมื่อค่า a^* เป็น บวก หมายถึง วัตถุมีสีแดง หากค่า a^* เป็น ลบ หมายถึง วัตถุมีสีเขียว และค่า b^* แสดงถึง ค่าสีเหลืองและน้ำเงินของวัตถุ เมื่อค่า b^* เป็น บวก หมายถึง วัตถุมีสีเหลือง หากค่า b^* เป็น ลบ หมายถึง วัตถุมีสีน้ำเงิน

5) ค่าความแน่นแข็งของเนื้อสัมผัสไอศกรีมด้วยเครื่อง Texture Analyzer (ยี่ห้อ Stable micro systems, รุ่น TA-XT2i) ต่อกับหัววัด P/2 cylindrical probe กดลงไปในตัวอย่าง 15 mm ทำการทดลอง 5 ซ้ำ โดยดัดแปลงวิธีจาก Aime และคณะ [14]

1.2 คุณภาพทางเคมี วิเคราะห์ปริมาณไขมัน โดยวิธี Modified Mojonnier ether extraction ตามวิธี AOAC [15]

1.3 คุณภาพทางประสาทสัมผัส ทดสอบทางด้านประสาทสัมผัส โดยใช้วิธีการทดสอบแบบ 9-point hedonic scale [16] กับ ผู้บริโภคที่ไม่ผ่านการฝึกฝน ซึ่งเป็นผู้บริโภคไอศกรีมเป็นประจำ และไม่มีภาวะแพ้อาหาร เป็นนักศึกษามหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี จำนวน 30 คน ในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่นกล้วย รสชาติ เนื้อสัมผัส การละลายในปาก และความชอบโดยรวม โดยให้



คะแนนตั้งแต่ 1 ถึง 9 (1 คะแนน หมายถึง ไม่ชอบมากที่สุด ถึง 9 คะแนน หมายถึง ชอบมากที่สุด) ได้ขอหมายเลขการรับรองจริยธรรมการวิจัย คือ TRU-EC No.050/68

3. การศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของไอศกรีมกล้วยหอมทองลดไขมันโดยใช้ไขมันเป็นสารทดแทนไขมันเปรียบเทียบกับสูตรควบคุม

นำไอศกรีมสูตรที่ใช้ไขมันซึ่งมีคุณสมบัติทางกายภาพที่ดีและมีคะแนนทดสอบทางประสาทสัมผัสสูงที่สุด จากข้อ 2 มาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ตามวิธีของ AOAC [15] เปรียบเทียบกับสูตรควบคุม พร้อมทั้งตรวจวิเคราะห์จำนวนจุลินทรีย์ทั้งหมด (Total Plate Count) และวิเคราะห์แบคทีเรียกลุ่มโคลิฟอร์ม [15]

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

นำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน วิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance, ANOVA) จากนั้นเปรียบเทียบความแตกต่างของคะแนนเฉลี่ยด้วย Duncan's new multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ผลการวิจัย

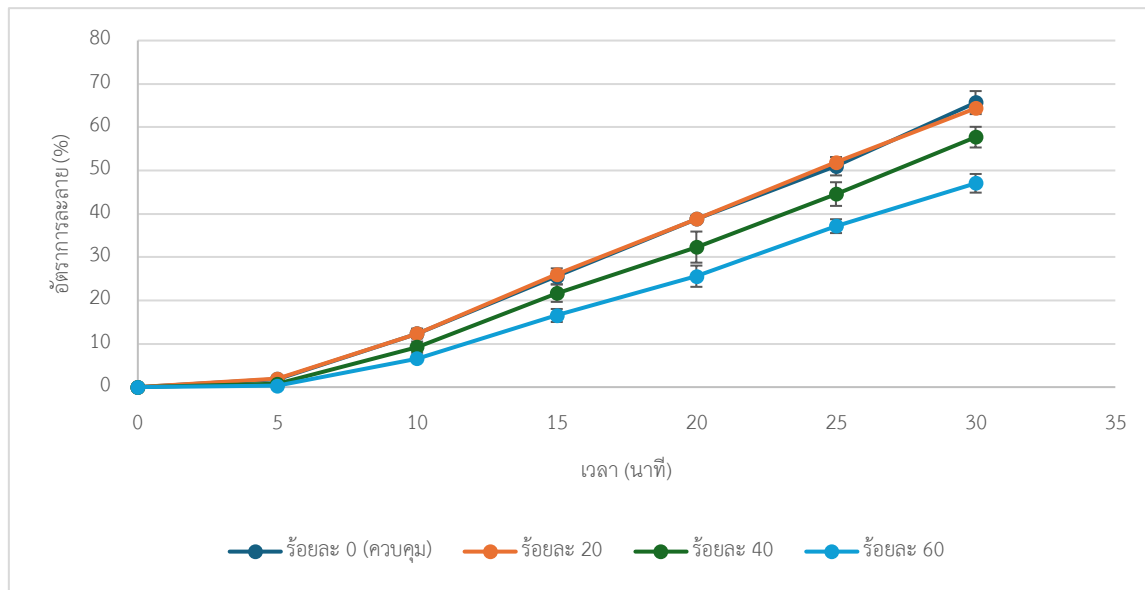
1. ผลการศึกษาปริมาณกล้วยหอมทองที่ใช้ในการผลิตไอศกรีมกล้วยหอมทอง

การศึกษาปริมาณกล้วยหอมทองที่ใช้ในผลิตภัณฑ์ไอศกรีมกล้วยหอมทอง 4 ระดับ ได้แก่ ร้อยละ 0 (ควบคุม), 20, 40 และ 60 (โดยน้ำหนักต่อน้ำหนักไอศกรีม) จากการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของไอศกรีมกล้วยหอมทอง ทั้ง 4 สูตร ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 3-5 พบว่าไอศกรีมที่ใช้กล้วยหอมทองร้อยละ 60 มีความหนืดสูงที่สุด เท่ากับ 3,071.67 cP โดยค่าความหนืดของไอศกรีมจะวัดความหนืดของไอศกรีมเหลวหลังผ่านการบ่มที่อุณหภูมิ 4 ± 1 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 4 ชั่วโมง มีค่าความแน่นแข็งสูงที่สุด เท่ากับ 11.71 N และร้อยละการขึ้นฟูสูงที่สุด เท่ากับ 68.67 และพบว่าเมื่อปริมาณกล้วยหอมทองเพิ่มมากขึ้น ทำให้ค่าความหนืด ค่าความแน่นแข็ง และร้อยละการขึ้นฟูมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) สำหรับค่าอัตราการละลายที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ของไอศกรีมที่ใช้กล้วยหอมทอง แสดงดังภาพที่ 1 ค่าอัตราการละลายของไอศกรีมที่ใช้กล้วยหอมทองร้อยละ 60 มีค่าน้อยที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 47.05 และพบว่าเมื่อปริมาณกล้วยหอมทองเพิ่มมากขึ้น ทำให้ค่าอัตราการละลายมีค่าลดลง และไอศกรีมที่มีปริมาณกล้วยหอมทองร้อยละ 20 มีอัตราการละลายสูงที่สุด

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพของไอศกรีมสูตรควบคุมและปริมาณกล้วยหอมทองที่ระดับร้อยละ 20, 40 และ 60

ปริมาณกล้วยหอมทอง (ร้อยละ)	ความหนืด (cP)	ความแข็ง(นิวตัน)	การขึ้นฟู (ร้อยละ)
0 (ควบคุม)	1,828.67 $\pm$ 31.56 ^d	4.14 $\pm$ 0.27 ^d	60.31 $\pm$ 2.13 ^c
20	2,272.33 $\pm$ 62.14 ^c	7.36 $\pm$ 0.57 ^c	61.28 $\pm$ 4.61 ^c
40	2,653.00 $\pm$ 69.49 ^b	9.12 $\pm$ 0.64 ^b	62.90 $\pm$ 3.16 ^b
60	3,071.67 $\pm$ 97.39 ^a	11.71 $\pm$ 1.16 ^a	68.67 $\pm$ 2.37 ^a

หมายเหตุ : ^{a-d} หมายถึง การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตามแนวดังในปัจจัยเดียวกัน อักษรที่แตกต่างกันมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)



ภาพที่ 1 อัตราการละลายของไอศกรีมสูตรควบคุมและปริมาณกล้วยหอมทองที่ระดับร้อยละ 0, 20, 40 และ 60

คุณภาพทางกายภาพด้านสีของผลิตภัณฑ์ไอศกรีมและผลิตภัณฑ์อาหารอื่น ๆ เป็นปัจจัยคุณภาพที่สำคัญ เนื่องจากเป็นปัจจัยที่ดึงดูดใจและการตัดสินใจซื้อผลิตภัณฑ์ของผู้บริโภค จากผลการทดลองในตารางที่ 4 พบว่าค่าสีของไอศกรีมกล้วยหอมทอง มีความสว่าง (L^*) ค่าสีแดง (a^*) และสีเหลือง (b^*) แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยค่าความสว่างของไอศกรีมกล้วยหอมทองสูตรควบคุม ค่าความสว่างสูงที่สุด เท่ากับ 83.26 รองลงมาคือ ไอศกรีมกล้วยหอมทอง ที่มีปริมาณกล้วยหอมทองร้อยละ 20, 40 และ 60 มีค่าเท่ากับ 65.76, 64.09 และ 60.64 ตามลำดับ พบว่า ไอศกรีมกล้วยหอมทองที่มีปริมาณกล้วยหอมทองที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าความสว่าง (L^*) ของไอศกรีมกล้วยหอมทองมีค่าลดลง แสดงถึงค่าความสว่างมีทิศทางไปทางมืด สำหรับค่าสีแดง (a^*) พบว่าไอศกรีมกล้วยหอมที่มีปริมาณกล้วยหอมทอง ร้อยละ 60 มีค่าสี a^* สูงที่สุด เท่ากับ 5.82 มีทิศทางไปทางสีแดง รองลงมาคือ ไอศกรีมกล้วยหอมทองที่มีปริมาณกล้วยหอมทองร้อยละ 40, 20 และ 0 (ควบคุม) มีค่าเท่ากับ 4.92, 4.06 และ -0.76 ตามลำดับ และพบว่าไอศกรีมกล้วยหอมทองสูตรควบคุม มีค่าสี a^* มีทิศทางไปทางสีเขียว ซึ่งเมื่อปริมาณกล้วยหอมทองที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าสี a^* ของไอศกรีมกล้วยหอมทองมีค่าเพิ่มขึ้น แสดงถึงมีทิศทางไปทางสีแดงมากขึ้น และค่าสีเหลือง (b^*) พบว่าไอศกรีมกล้วยหอมทองสูตรควบคุม มีค่าสี b^* สูงที่สุด เท่ากับ 13.59 มีทิศทางไปทางสีเหลือง รองลงมาคือ ไอศกรีมกล้วยหอมทอง ที่มีปริมาณกล้วยหอมทองร้อยละ 20, 40 และ 60 มีค่าเท่ากับ 13.18, 11.12 และ 9.95 ตามลำดับ พบว่าปริมาณกล้วยหอมทองที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ค่าสี b^* ของไอศกรีมกล้วยหอมทองมีค่าลดลง แสดงถึงมีทิศทางไปทางสีน้ำเงินมากขึ้น

ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติด้านสี L^* a^* b^* ของไอศกรีมสูตรควบคุมและปริมาณกล้วยหอมทองที่ระดับร้อยละ 20, 40 และ 60

ปริมาณกล้วยหอมทอง (ร้อยละ)	ค่าสี		
	L^*	a^*	b^*
0 (ควบคุม)	83.26 ± 0.11^a	-0.76 ± 0.01^d	13.58 ± 0.32^a
20	65.76 ± 0.61^b	4.06 ± 0.19^c	11.34 ± 0.11^b
40	64.09 ± 0.66^c	4.92 ± 0.58^b	11.12 ± 0.51^b
60	60.64 ± 1.01^d	5.82 ± 0.18^a	9.95 ± 0.28^c

หมายเหตุ : ^{a-d} หมายถึง การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตามแนวดิ่งในปัจจัยเดียวกัน อักษรที่แตกต่างกันมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)



สำหรับการศึกษาคุณภาพทางประสาทสัมผัสของไอศกรีมกล้วยหอมทอง ความชอบทางด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่นกล้วย รสชาติ เนื้อสัมผัส การละลายในปาก และความชอบโดยรวม ผลการทดลองแสดงในตารางที่ 5 พบว่าสี กลิ่นกล้วย รสชาติ เนื้อสัมผัส การละลายในปาก และความชอบโดยรวม ของไอศกรีมกล้วยหอมทองสูตรควบคุมไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) กับไอศกรีมกล้วยหอมทองที่มีปริมาณกล้วยหอมทองร้อยละ 40 ส่วนความชอบทางด้านลักษณะปรากฏ ไอศกรีมกล้วยหอมทองที่มีปริมาณกล้วยหอมทองร้อยละ 40 มีคะแนนความชอบสูงสุด มีค่าเท่ากับ 8.33 ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพด้านสีของไอศกรีมกล้วยหอมทอง ที่พบว่าการเติมกล้วยหอมทองลงในไอศกรีมนั้นมีผลต่อลักษณะปรากฏของผลิตภัณฑ์โดยสังเกตได้จากค่าความสว่างและค่าสีเหลืองมีค่าลดลงหรือทำให้มีสีคล้ำมากขึ้น ซึ่งผลการประเมินทางประสาทสัมผัสของไอศกรีมกล้วยหอมทองนั้น (ร้อยละ 40 และ 60) พบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณกล้วยหอมทอง ผู้ทดสอบชิมมีแนวโน้มให้คะแนนความชอบด้านสีลดลง (8.27 และ 7.07) รวมทั้งคะแนนการยอมรับทางด้านลักษณะปรากฏ กลิ่นกล้วย รสชาติ เนื้อสัมผัส การละลายในปาก และความชอบโดยรวม ก็มีแนวโน้มลดลงเช่นกัน ดังนั้นจากการทดสอบทางกายภาพ และทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสของไอศกรีมกล้วยหอมทองทั้ง 3 ระดับ พบว่าไอศกรีมที่เติมกล้วยหอมทองร้อยละ 40 โดยมีส่วนผสม ได้แก่ กล้วยหอมทอง นมสดขาดมันเนย วิปปิงครีม น้ำตาล กลิ่นวนิลา กัวร์กัม และน้ำเปล่า เท่ากับ 28.57, 37.58, 10.90, 6.16, 0.23, 0.43 และ 16.13 ตามลำดับ ผู้ทดสอบให้คะแนนความชอบในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่นกล้วย รสชาติ เนื้อสัมผัส การละลายในปาก และความชอบโดยรวม มากที่สุด และจากการทดสอบทางกายภาพของไอศกรีมที่เติมกล้วยหอมทองร้อยละ 40 พบว่ามีค่าร้อยละการขึ้นฟูสูง และละลายได้ช้า ดังนั้นจึงเลือกสูตรที่เติมกล้วยหอมทองร้อยละ 40 เป็นสูตรที่ใช้ในการศึกษาไอศกรีมกล้วยหอมทองลดไขมันโดยใช้อินูลินเป็นสารทดแทนไขมัน

ตารางที่ 5 ผลการศึกษาคุณภาพทางประสาทสัมผัสไอศกรีมสูตรควบคุมและปริมาณกล้วยหอมทองที่ระดับร้อยละ 20, 40 และ 60 ($n=30$)

ปริมาณ กล้วยหอม ทอง (ร้อยละ)	คะแนนความชอบ (คะแนน)						
	ลักษณะ ปรากฏ	สี	กลิ่นกล้วย	รสชาติ	เนื้อสัมผัส	การละลาย ในปาก	ความชอบ โดยรวม
0 (ควบคุม)	7.97±0.56 ^b	8.00±0.59 ^a	8.23±0.77 ^a	8.40±0.67 ^a	8.30±0.75 ^a	8.67±0.48 ^a	8.47±0.51 ^a
20	6.90±0.80 ^c	7.03±0.72 ^b	6.73±0.78 ^b	7.00±0.83 ^b	7.23±0.77 ^b	7.30±0.65 ^b	7.40±0.72 ^b
40	8.33±0.55 ^a	8.27±0.61 ^a	8.37±0.61 ^a	8.43±0.68 ^a	8.50±0.57 ^a	8.40±0.56 ^a	8.53±0.57 ^a
60	7.03±0.85 ^c	7.07±0.83 ^b	7.10±0.84 ^b	6.97±0.93 ^b	7.17±0.91 ^b	7.07±1.01 ^b	7.17±0.83 ^b

หมายเหตุ : ^{a-d} หมายถึง การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตามแนวดังในปัจจัยเดียวกัน อักษรที่แตกต่างกันมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

2. ผลการศึกษาปริมาณอินูลินที่ใช้เป็นสารทดแทนไขมันในผลิตภัณฑ์ไอศกรีมกล้วยหอมทองลดไขมัน

ศึกษาปริมาณอินูลินที่ใช้ในการผลิตไอศกรีมกล้วยหอมทองลดไขมันโดยทดแทนอินูลินในส่วนผสมที่เป็นไขมัน โดยศึกษาอินูลิน 5 ระดับ ได้แก่ ร้อยละ 0 (ควบคุม), 2, 4, 6 และ 8 ของส่วนผสมที่เป็นไขมัน ซึ่งได้แก่ วิปปิงครีม จากนั้นนำมาวิเคราะห์คุณสมบัติทางกายภาพ ได้แก่ ความหนืด ความแข็ง ร้อยละการขึ้นฟู ความแน่นแข็ง ปริมาณไขมัน อัตราการละลาย ค่าสี (L^* , a^* และ b^*) และทดสอบทางประสาทสัมผัสด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่นกล้วย รสชาติ เนื้อสัมผัส การละลายในปาก และความชอบโดยรวม ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 6-8

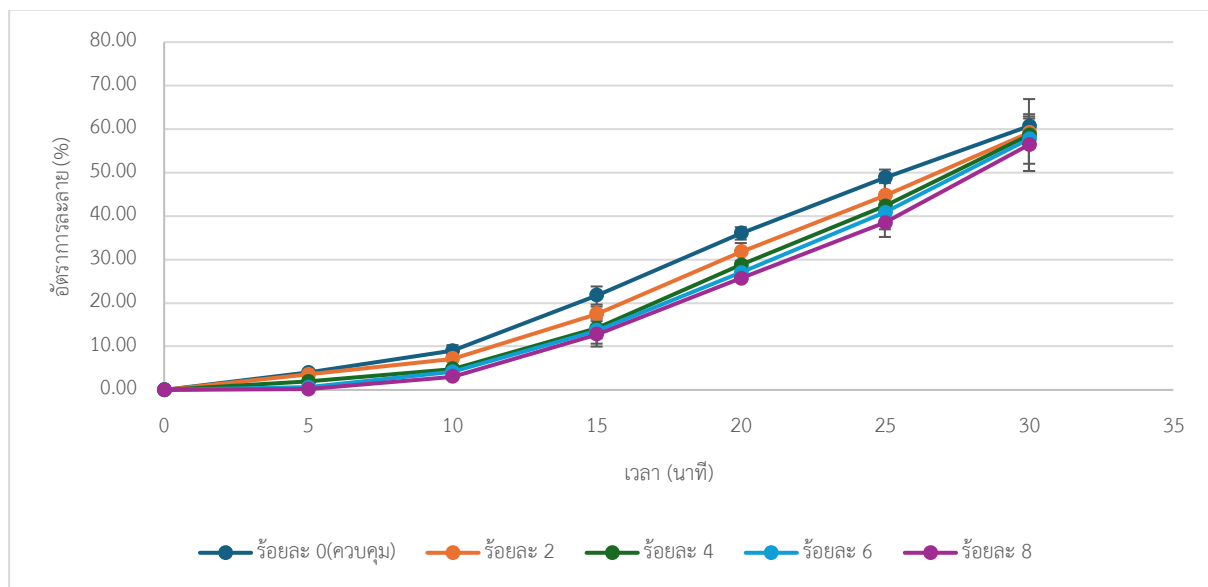
ผลการวิเคราะห์ค่าความหนืด พบว่าเมื่อนำไอศกรีมมิกซ์ที่บ่มนาน 24 ชั่วโมง มาวัดความหนืดเพื่อศึกษาผลของปริมาณอินูลินต่อความหนืดของไอศกรีมมิกซ์ ค่าความหนืดมีค่าอยู่ในช่วง 2,304.33 - 3,075.67 cP มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ไอศกรีมกล้วยหอมที่มีปริมาณอินูลินร้อยละ 8 มีค่าความหนืดสูงสุด และพบว่าเมื่อปริมาณอินูลินเพิ่มมากขึ้นทำให้ค่าความหนืดของไอศกรีมมิกซ์มีค่าเพิ่มมากขึ้น

ตารางที่ 6 ผลการวิเคราะห์คุณภาพทางกายภาพและเคมีของไอศกรีมกล้วยหอมทองลดไขมันโดยใช้อินูลินเป็นสารทดแทนไขมัน

ปริมาณอินูลิน (%)	ความหนืด (cP)	ความแข็ง (N)	การขึ้นฟู (%) ^{ns}	ปริมาณไขมัน (%)
0	2,304.33±33.71 ^e	8.34±0.69 ^a	54.30±3.40	10.24±0.95 ^a
2	2,493.33±13.50 ^d	6.94±0.21 ^b	54.76±6.19	8.04±0.27 ^b
4	2,760.00±13.00 ^c	6.00±0.26 ^{bc}	55.12±8.57	6.53±0.59 ^c
6	2,951.00±36.50 ^b	5.16±0.55 ^{cd}	55.66±2.79	4.83±0.60 ^d
8	3,075.67±28.02 ^a	4.21±0.85 ^d	60.13±3.39	3.46±0.61 ^e

หมายเหตุ : ^{a-d} หมายถึง การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตามแนวดิ่งในปัจจัยเดียวกัน อักษรที่แตกต่างกันมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ความแข็งของไอศกรีม คือ ภาพสะท้อนของโครงสร้างการก่อตัวของอิมัลชันที่มีไขมัน น้ำ อากาศ และโปรตีนระหว่างการทำให้เนื้อไอศกรีมเป็นเนื้อเดียวกัน ค่าความแข็ง มีค่าอยู่ในช่วง 4.21 – 8.34 นิวตัน มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) และพบว่าเมื่อปริมาณอินูลินเพิ่มมากขึ้นทำให้ค่าความแข็งของไอศกรีมมีค่าลดลง ค่าร้อยละการขึ้นฟู แสดงดังตารางที่ 6 พบว่าค่าร้อยละการขึ้นฟูมีค่าอยู่ในช่วง 54.30 – 60.13 ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \geq 0.05$) พบว่าค่าร้อยละการขึ้นฟูมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเติมอินูลินเพิ่มมากขึ้น ค่าร้อยละไขมันมีค่าอยู่ในช่วง 3.46-10.24 จากตารางที่ 6 จะเห็นได้ว่าการเติมอินูลินทดแทนในไขมันโดยใช้ทดแทนในวิปปิ้งครีม คือ การลดปริมาณวิปปิ้งครีม ทำให้ปริมาณร้อยละไขมันมีค่าลดลง พบว่าตัวอย่างควบคุมมีปริมาณร้อยละไขมันสูงที่สุดเท่ากับ 10.24 รองลงมาคือ ไอศกรีมลดไขมันที่เติมอินูลินร้อยละ 2, 4, 6 และ 8 มีค่าเท่ากับ 8.04, 6.53, 4.83 และ 3.46 ตามลำดับ แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ค่าอัตราการละลายของไอศกรีม พบว่าค่าอัตราการละลายของไอศกรีมมีแนวโน้มลดลงเมื่อเพิ่มปริมาณอินูลินมากขึ้น แสดงดังภาพที่ 2



ภาพที่ 2 อัตราการละลายของไอศกรีมกล้วยหอมทองลดไขมันโดยใช้อินูลินเป็นสารทดแทนไขมัน



ตารางที่ 7 ค่าสีของไอศกรีมกล้วยหอมทองลดไขมันโดยใช้อินูลินเป็นสารทดแทนไขมัน

ปริมาณอินูลิน (%)	L*	a*	b*
0	64.14±0.56 ^e	4.61±0.01 ^a	11.95±0.31 ^c
2	65.20±0.82 ^d	4.58±0.06 ^b	14.08±0.17 ^b
4	66.84±0.17 ^c	4.45±0.04 ^c	14.26±0.22 ^b
6	67.74±0.15 ^b	4.34±0.01 ^d	14.86±0.10 ^a
8	68.24±0.37 ^a	4.01±0.02 ^e	14.96±0.08 ^a

หมายเหตุ : ^{a-e} หมายถึง การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตามแนวตั้งในปัจจัยเดียวกัน อักษรที่แตกต่างกันมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

จากตารางที่ 7 ผลการวิเคราะห์คุณสมบัติด้านสี L* a* b* ของไอศกรีมกล้วยหอมทองลดไขมันที่ใช้อินูลินเป็นสารทดแทนไขมัน พบว่าค่าสีของไอศกรีมไอศกรีมกล้วยหอมทองลดไขมันที่ใช้อินูลินเป็นสารทดแทนไขมัน ค่า L* มีค่าอยู่ในช่วง 64.14 – 68.24 แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) พบว่าไอศกรีมลดไขมันที่เติมอินูลินร้อยละ 8 มีค่า L* สูงที่สุดเท่ากับ 68.24 เนื่องจากอินูลินมีสีขาวทำให้เมื่อเพิ่มปริมาณอินูลินมากขึ้นจึงส่งผลให้ค่าความสว่างของไอศกรีมเพิ่มขึ้น แสดงถึงค่าความสว่างไปในทิศทางสว่าง ค่า a* มีค่าอยู่ในช่วง 4.01-4.61 พบว่าไอศกรีมสูตรควบคุมมีค่า a* มากที่สุดเท่ากับ 4.61 มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) เนื่องจากปริมาณอินูลินที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า a* ของไอศกรีมมีค่าลดลง แสดงถึงมีทิศทางไปทางสีแดงน้อยลง และค่า b* มีค่าอยู่ในช่วง 11.95-14.96 แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) พบว่าไอศกรีมลดไขมันที่เติมอินูลินร้อยละ 8 มีค่า b* สูงที่สุดเท่ากับ 14.96 ปริมาณอินูลินที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่า b* มีค่าเพิ่มขึ้น แสดงถึงมีทิศทางไปทางสีเหลืองมากขึ้น

ตารางที่ 8 ผลการศึกษาคุณภาพทางประสาทสัมผัสไอศกรีมกล้วยหอมทองลดไขมันที่ใช้อินูลินเป็นสารทดแทนไขมัน (n=30)

ปริมาณอินูลิน (%)	ลักษณะปรากฏ ^{ns}	สี ^{ns}	กลิ่นกล้วย ^{ns}	รสชาติ ^{ns}	เนื้อสัมผัส ^{ns}	การละลายในปาก	ความชอบโดยรวม ^{ns}
0	8.37±0.56	8.13±0.57	8.40±0.62	8.60±0.50	8.60±0.56	8.67±0.48 ^a	8.47±0.51
2	8.30±0.60	8.23±0.68	8.20±0.71	8.37±0.67	8.33±0.76	8.37±0.67 ^{ab}	8.23±0.77
4	8.40±0.62	8.20±0.76	8.30±0.75	8.33±0.66	8.37±0.67	8.23±0.68 ^b	8.33±0.66
6	8.33±0.55	8.17±0.70	8.37±0.67	8.43±0.68	8.30±0.75	8.27±0.69 ^b	8.53±0.57
8	8.23±0.68	8.27±0.74	8.23±0.73	8.30±0.65	8.40±0.62	8.40±0.56 ^{ab}	8.23±0.68

หมายเหตุ : ^{a-b} หมายถึง การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตามแนวตั้งในปัจจัยเดียวกัน อักษรที่แตกต่างกันมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

จากการศึกษาคุณภาพทางประสาทสัมผัสโดยใช้ผู้ทดสอบชิมจำนวน 30 คน ซึ่งเป็นประชาชนทั่วไปอายุระหว่าง 15-60 ปี ในการทดสอบโดยวิธี 9-point hedonic scale ผลการทดลองแสดงดังตาราง 8 พบว่าด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่นกล้วย รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ผู้ทดสอบชิมให้คะแนนความชอบไม่มีความแตกต่างกันโดยมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) ส่วนด้านการละลายในปากแสดงให้เห็นว่าผู้ทดสอบชิมให้คะแนนความชอบอยู่ในช่วง 8.23-8.67 คะแนน พบว่าผู้บริโภคให้คะแนนทางด้านการละลายในปากไอศกรีมที่เติมปริมาณอินูลินร้อยละ 0, 2 และ 8 มากที่สุด มีค่า 8.67, 8.37 และ 8.40 คะแนน ตามลำดับ หมายถึง ชอบมาก

จากการวิเคราะห์ทางกายภาพ เคมี และทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสของไอศกรีมกล้วยหอมทองลดไขมันโดยใช้ อินูลินเป็นสารทดแทนไขมัน พบว่าการเติมปริมาณอินูลินร้อยละ 8 มีความแน่นแข็ง และร้อยละของไขมันน้อยที่สุด และ ผู้บริโภคให้คะแนนความชอบด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ไม่แตกต่างอย่างมี นัยสำคัญกับไอศกรีมสูตรควบคุม ดังนั้นจึงเลือกไอศกรีมกล้วยหอมทองลดไขมันใช้อินูลินร้อยละ 8 ไปศึกษาในตอนต่อไป

3. ผลการศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของไอศกรีมกล้วยหอมทองลดไขมันใช้อินูลินเป็นสารทดแทนไขมันเปรียบเทียบกับ ไอศกรีมกล้วยหอมทอง

ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของไอศกรีมกล้วยหอมทองที่เติมอินูลิน ร้อยละ 8 เปรียบเทียบกับไอศกรีมกล้วยหอมทอง (สูตรควบคุม) ผลการทดลองแสดงดังตารางที่ 9 พบว่าไขมัน โปรตีน คากใย และพลังงานของไอศกรีมกล้วยหอมทองที่เติม อินูลิน ร้อยละ 8 กับไอศกรีมกล้วยหอมทองแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 ส่วนปริมาณความชื้น ปริมาณ เถ้า และคาร์โบไฮเดรต ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.05 พบว่าปริมาณไขมันของไอศกรีมกล้วยหอม ทองที่เติมอินูลิน ร้อยละ 8 น้อยกว่าไอศกรีมกล้วยหอมทองอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ซึ่งการเติมอินูลินเป็นสารทดแทนไขมันใน ไอศกรีมกล้วยหอมทองส่งผลให้ค่าไขมันลดลงร้อยละ 63.37 เมื่อเปรียบเทียบกับไอศกรีมกล้วยหอมทอง ปริมาณโปรตีน พบว่า ไอศกรีมกล้วยหอมทอง มีปริมาณโปรตีนเท่ากับ 2.79 และไอศกรีมกล้วยหอมทองที่เติมอินูลิน ร้อยละ 8 มีค่าเท่ากับ 2.11 แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) ปริมาณคากใย พบว่าไอศกรีมกล้วยหอมทองที่เติมอินูลิน ร้อยละ 8 มีปริมาณ คากใย เท่ากับ 8.15 แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) เมื่อเทียบกับไอศกรีมกล้วยหอมทอง ซึ่งมีค่าเท่ากับ 1.50 ปริมาณเถ้า พบว่าไอศกรีมกล้วยหอมทอง มีปริมาณเถ้าเท่ากับ 0.49 และไอศกรีมกล้วยหอมทองที่เติมอินูลิน ร้อยละ 8 มีค่า เท่ากับ 0.52 ไม่มีความแตกต่างกันมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\geq 0.05$) ปริมาณคาร์โบไฮเดรต พบว่าไอศกรีมกล้วยหอมทองที่เติม อินูลิน ร้อยละ 8 มีปริมาณคาร์โบไฮเดรตเท่ากับ 15.14 และไอศกรีมสูตรกล้วยหอมทอง มีค่าเท่ากับ 14.49 ไม่มีความแตกต่าง กันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\geq 0.05$) ปริมาณพลังงาน พบว่าไอศกรีมกล้วยหอมทอง มีปริมาณพลังงานเท่ากับ 152.88 และ ไอศกรีมกล้วยหอมทองที่เติมอินูลิน ร้อยละ 8 มีค่าเท่ากับ 99.63 แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) เห็นได้ว่าเมื่อ ใช้อินูลินเป็นสารทดแทนไขมันทำให้ลดปริมาณพลังงานได้ร้อยละ 34.83 เมื่อเปรียบเทียบกับไอศกรีมกล้วยหอมทอง

ตารางที่ 9 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของไอศกรีมกล้วยหอมทองลดไขมันและไอศกรีมกล้วยหอมทอง

องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละ)	ไอศกรีมกล้วยหอมทอง (สูตรควบคุม)	ไอศกรีมกล้วยหอมทอง (เติมอินูลิน ร้อยละ 8)
ความชื้น ^{ns}	71.42±0.36	70.67±0.45
ไขมัน	9.31±0.34 ^a	3.41±0.28 ^b
โปรตีน	2.79±0.17 ^a	2.11±0.11 ^b
คากใย	1.50±0.16 ^a	8.15±0.35 ^b
เถ้า ^{ns}	0.49±0.06	0.52±0.04
คาร์โบไฮเดรต ^{ns}	14.49±0.60	15.14±0.43
พลังงาน (กิโลแคลอรี/100กรัม)	152.88±2.94 ^a	99.63±3.23 ^b

หมายเหตุ : ข้อมูลแสดงเป็นค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานจากการทดลอง 3 ซ้ำ

^{ns} หมายถึง การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตามแนวนอนในปัจจัยเดียวกันไม่มีความแตกต่างกันมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\geq 0.05$)

^{a-b} หมายถึง การเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตามแนวนอนในปัจจัยเดียวกันอักษรที่แตกต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมี นัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)



ตามประกาศกระทรวงสาธารณสุข ฉบับที่ 354 [17] เรื่อง ไอศกรีม มีข้อกำหนดว่าไอศกรีมต้องมีแบคทีเรียได้ไม่เกิน 6.0×10^5 โคโลนี/กรัม และต้องไม่พบเชื้อ *Escherichia coli* ในตัวอย่างอาหาร 0.01 กรัม ไม่มีจุลินทรีย์ที่ทำให้เกิดโรคและไม่มีสารเป็นพิษจากจุลินทรีย์ในปริมาณที่อาจเป็นอันตรายต่อสุขภาพ และเกณฑ์มาตรฐานทางจุลชีววิทยาสำหรับไอศกรีมของ International Commission on Microbiological Specifications for Foods (ICMSF) [18] มีวัตถุประสงค์เพื่อความปลอดภัยของผู้บริโภค โดยทั่วไปสำหรับผลิตภัณฑ์ Simple Ice Cream ได้กำหนดค่าสูงสุดไว้คือ จุลินทรีย์ทั้งหมด (Standard Plate Count) ไม่เกิน 2.5×10^5 โคโลนี/กรัม และจุลินทรีย์ Coliforms ไม่เกิน 10^3 โคโลนีต่อตัวอย่าง 1 กรัม อย่างไรก็ตาม ไอศกรีมกล้วยหอมทองและไอศกรีมกล้วยหอมทองลดไขมันมีจำนวนจุลินทรีย์ไม่เกินที่มาตรฐานกำหนด เนื่องจากกระบวนการผลิตมีขั้นตอนการพาสเจอร์ไรส์ และคำนึงถึงสุขลักษณะที่ถูกต้องในกระบวนการผลิตไอศกรีม แสดงดังตารางที่ 10

ตารางที่ 10 ผลการวิเคราะห์คุณภาพทางด้านจุลินทรีย์ของไอศกรีมกล้วยหอมทองลดไขมันโดยใช้อินูลินเป็นสารทดแทน

	สูตรไอศกรีม	
	ไอศกรีมกล้วยหอมทอง (สูตรควบคุม)	ไอศกรีมกล้วยหอมทอง (เติมอินูลิน ร้อยละ 8)
จุลินทรีย์ทั้งหมด (โคโลนี/กรัม)	1.8×10^4	2.3×10^4
แบคทีเรีย โคลิฟอร์ม (MPN/กรัม)	<3	<3

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

ไอศกรีมกล้วยหอมทองที่มีการเติมกล้วยหอมทองเพิ่มมากขึ้น ทำให้ความหนืด ค่าความแน่นแข็งและร้อยละการขึ้นฟูมีค่าเพิ่มขึ้น ซึ่งความหนืดที่เพิ่มขึ้น อาจจะเป็นเนื่องจากองค์ประกอบของกล้วยหอมมีสารเพคตินเป็นองค์ประกอบ [1] ซึ่งเพคตินเป็นสารไฮโดรคอลลอยด์ที่มีผลต่อความสามารถในการอุ้มน้ำและถ้ามีการอุ้มน้ำได้ดีจะส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของอนุภาคให้ช้าลง และเมื่อเพิ่มปริมาณกล้วยหอมทองในสูตรไอศกรีม จะส่งผลให้ความหนืดของส่วนผสมเพิ่มขึ้น เนื่องจากมีปริมาณของแข็งทั้งหมดและใยอาหารสูง ซึ่งเพิ่มแรงต้านทานต่อการไหล ส่งผลให้ต้องใช้แรงมากขึ้นในการทำให้อนุภาคเคลื่อนที่ นอกจากนี้ความหนืดที่เพิ่มขึ้นยังช่วยเสริมเสถียรภาพของฟองอากาศ ทำให้สามารถกักเก็บอากาศได้ดีขึ้น และส่งผลให้ค่าร้อยละการขึ้นฟู (overrun) สูงขึ้น [19] การเพิ่มปริมาณกล้วยหอมทองในสูตรไอศกรีมยังส่งผลให้ค่าความแข็งของผลิตภัณฑ์เพิ่มขึ้น เนื่องจากการเพิ่มขึ้นของปริมาณของแข็งทั้งหมด (total solids) โดยเฉพาะคาร์โบไฮเดรตและใยอาหารในกล้วย ซึ่งมีคุณสมบัติในการจับน้ำ ส่งผลให้ปริมาณน้ำอิสระลดลงและโครงสร้างของผลิตภัณฑ์มีความหนาแน่นมากขึ้น สอดคล้องกับรายงานของ Soukoulis & Tzia [20] ที่พบว่า การเติมใยอาหารในไอศกรีมทำให้ความแข็งเพิ่มขึ้นเนื่องจากการลดลงของน้ำอิสระและการเพิ่มของแข็งในระบบ นอกจากนี้เพคตินและสารโพลีแซ็กคาไรด์ในกล้วยสามารถสร้างโครงข่ายเจลภายใน ส่งผลให้เนื้อสัมผัสมีความหนาแน่นมากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Akalin & Erişir [21] ที่รายงานว่า การเติมใยอาหารในไอศกรีมสามารถเพิ่มความแข็งและความคงตัวของโครงสร้างได้ สำหรับค่าการละลายมีค่าลดลง เมื่อเพิ่มปริมาณกล้วยหอมทองมากขึ้น อาจเกิดจากการเพิ่มปริมาณกล้วยหอมทองทำให้ไอศกรีมมีความหนืดเพิ่มขึ้น มีการศึกษาพบว่าอัตราการละลายมีความสัมพันธ์กับความหนืดของส่วนผสมในไอศกรีม [22] หากไอศกรีมมีความหนืดสูงจะส่งผลให้อัตราการละลายช้าลง ทำให้ไอศกรีมที่เติมกล้วยหอมทองร้อยละ 60 มีค่าอัตราการละลายน้อยที่สุด คือ ร้อยละ 47.05

ปริมาณกล้วยหอมทองที่เพิ่มขึ้นส่งผลให้ค่าความสว่าง (L^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) ของไอศกรีมกล้วยหอมทองมีค่าลดลง ค่าความเป็นสีแดง (a^*) มีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากกล้วยหอมเป็นผลไม้ที่ไม่สามารถเกิดสีน้ำตาลได้อย่างรวดเร็วเมื่อปอกเปลือกและบดกล้วยหรือได้รับความร้อน [23] ทำให้กล้วยมีปฏิกิริยาสีน้ำตาล ซึ่งการเกิดสีน้ำตาลคล้ำของเนื้อกล้วยหอมมีสาเหตุหลัก ๆ มาจาก ปฏิกิริยาการออกซิไดซ์ (oxidation reaction) สารประกอบฟีนอล ไปเป็น o-quinone และเกิดพอลิเมอร์ไรซ์ (polymerized) ต่อจนได้สารเชิงซ้อนสีน้ำตาล โดยมี polyphenol oxidase เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา ปฏิกิริยานี้

นอกจากจะทำให้เนื้อกล้วยหอมมีสีเข้มขึ้นแล้ว ยังทำให้เกิดกลิ่นรสผิดปกติได้ และส่งผลเสียต่อคุณค่าทางอาหาร [24] ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากกล้วยหอมทองสุกที่ใช้เป็นส่วนผสมเป็นกล้วยหอมทองสุกในระยะที่ 7 ซึ่งมีสีค่อนข้างเหลือง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของช่อฟ้า กลิ่นจันทร์และคณะ [25] ที่ศึกษาการพัฒนาผลิตภัณฑ์ไอศกรีมกล้วยน้ำว้า พบว่าการเพิ่มปริมาณกล้วยที่มากขึ้น ส่งผลทำให้ค่าสี L^* และ b^* ลดลง

จากการศึกษาปริมาณอินูลินที่ใช้ในการผลิตไอศกรีมกล้วยหอมทองลดไขมันโดยทดแทนอินูลินในส่วนผสมที่เป็นไขมัน โดยพบว่าเมื่อปริมาณอินูลินเพิ่มขึ้น ทำให้ความหนืดมีค่าเพิ่มขึ้น เนื่องจากเมื่อเติมอินูลินลงในไอศกรีมลดไขมัน พบว่าอินูลินช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพของไอศกรีมมิคซ์โดยทำให้มีความหนืดเพิ่มขึ้น เนื่องจากอินูลินซึ่งเป็นแหล่งของเส้นใยอาหารสามารถจับกับส่วนประกอบที่เป็นของเหลวในไอศกรีมและเกิดโครงสร้างคล้ายเจลและทำให้ปรับปรุงคุณสมบัติการไหลของไอศกรีมเหลวให้ดีขึ้น [26] โดยทั่วไปการลดลงของปริมาณไขมันจะทำให้เพิ่มความแข็งของไอศกรีมเนื่องจากการเพิ่มขึ้นของโมเลกุลของน้ำอิสระในไอศกรีม ที่สามารถก่อตัวเป็นผลึกน้ำแข็งที่ใหญ่ขึ้นในระหว่างการแช่แข็ง แต่เมื่อไขมันถูกแทนที่ด้วยอินูลินจะทำให้ความแข็งของไอศกรีมลดลง เนื่องจากอินูลินมีคุณสมบัติในการจับน้ำและลดจุดเยือกแข็งของไอศกรีม ส่งผลให้ปริมาณน้ำอิสระที่สามารถเกิดเป็นผลึกน้ำแข็งลดลง อีกทั้งยังสามารถสร้างโครงข่ายเจลที่ช่วยปรับปรุงเนื้อสัมผัสให้มีความนุ่มและครีมมี่มากขึ้น ซึ่งสอดคล้องกับรายงานของ Akbari [8] ดังนั้นจึงทำให้ไอศกรีมมีความแน่นแข็งลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Narala และคณะ [27] ได้ศึกษาของการใช้อินูลินเป็นสารทดแทนไขมันต่อคุณสมบัติทางกายภาพและคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของไอศกรีมวิแกนจากถั่วลิสง พบว่าเมื่อเติมอินูลินเพิ่มขึ้น ทำให้ค่าความแน่นแข็งของไอศกรีมมีค่าเพิ่มมากขึ้น ค่าร้อยละการขึ้นฟูมีแนวโน้มเพิ่มขึ้น เมื่อเติมอินูลินเพิ่มมากขึ้นในไอศกรีมไขมันต่ำที่มีการเติมอินูลิน จะทำให้ค่าร้อยละการขึ้นฟูมีค่าเพิ่มมากขึ้น ซึ่งจะเกี่ยวข้องกับความหนืดที่มากขึ้นด้วย โดยผลิตภัณฑ์จะสามารถนำอากาศเข้ามาในผลิตภัณฑ์ไอศกรีมได้มีประสิทธิภาพมากขึ้น และทำให้เกิดฟองอากาศที่มีขนาดเล็กลง [28,29] ซึ่งจากการทดลองการลดปริมาณวิปปิ้งครีม และแทนที่ด้วยอินูลิน อาจช่วยเพิ่มความเสถียรของฟองอากาศระหว่างและหลังจากกระบวนการแช่แข็งได้ [30]

การเพิ่มปริมาณอินูลินเป็นสารทดแทนไขมันส่งผลต่อคุณสมบัติการละลายของไอศกรีม คุณสมบัติการละลายของไอศกรีมได้รับอิทธิพลมาจากส่วนผสมในไอศกรีมรวมถึงอินูลิน ซึ่งเกิดจากน้ำแข็ง อากาศ และไขมัน เกิดการกระจายตัว ซึ่งปริมาณผลึกน้ำแข็งที่เกิดขึ้นขึ้นอยู่กับความสามารถของน้ำที่สามารถแข็งได้ และปริมาณของแข็งในไอศกรีม ซึ่งเห็นได้จากที่ความหนืด และร้อยละการขึ้นฟูมีค่าสูง ทำให้สามารถกักเก็บอากาศได้ดี เนื่องจากฟองอากาศทำหน้าที่เป็นตัวกลาง ที่เป็นฉนวนช่วยป้องกันการถ่ายเทความร้อนอย่างรวดเร็วจากสิ่งแวดล้อมไปยังผลึกน้ำแข็ง ทำให้ค่าการละลายมีค่าลดลง [31, 32] สอดคล้องกับงานวิจัยของ Narala และคณะ [27] ได้ศึกษาการใช้อินูลินเป็นสารทดแทนไขมันต่อคุณสมบัติทางกายภาพและคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของไอศกรีมวิแกนจากถั่วลิสง พบว่าเมื่อเติมอินูลินเพิ่มขึ้น ทำให้อัตราการละลายของไอศกรีมมีค่าลดลง และเมื่อเพิ่มปริมาณอินูลินมากขึ้นส่งผลทำให้ค่าร้อยละไขมันลดลง เนื่องจากในไอศกรีมอินูลินจัดเป็นสารทดแทนไขมันในกลุ่มคาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate-base Fat Substitutes) เช่นเดียวกับพวกแซนแทนกัม กัวร์กัม คาราจีแนน เป็นต้น [33]

ค่าองค์ประกอบทางเคมีของไอศกรีมกล้วยหอมทองที่มีอินูลินร้อยละ 8 และไอศกรีมกล้วยหอมทอง พบว่าเมื่อใช้อินูลินทดแทนไขมันในไอศกรีมกล้วยหอมทองส่งผลให้ค่าร้อยละไขมันลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เนื่องจากไอศกรีมกล้วยหอมทอง มีส่วนผสมที่เป็นไขมันมากกว่าไอศกรีมกล้วยหอมทองที่เติมอินูลินร้อยละ 8 เนื่องจากในไอศกรีมอินูลินจัดเป็นสารทดแทนไขมันในกลุ่มคาร์โบไฮเดรต (Carbohydrate-base Fat Substitutes) เช่นเดียวกับพวกแซนแทนกัม กัวร์กัม คาราจีแนน เป็นต้น [33] ซึ่งการเติมอินูลินเป็นสารทดแทนไขมันในไอศกรีมกล้วยหอมทองส่งผลให้ค่าร้อยละไขมันลดลงร้อยละ 63.50 เมื่อเปรียบเทียบกับไอศกรีมกล้วยหอมทองสูตรควบคุม โดยไอศกรีมกล้วยหอมทองมีปริมาณโปรตีนมากกว่าไอศกรีมกล้วยหอมทองที่เติมอินูลินร้อยละ 8 เนื่องจากใช้อินูลินทดแทนไขมันในไอศกรีมกล้วยหอมทองลดไขมัน ซึ่งใช้ทดแทนในวิปปิ้งครีม การลดปริมาณวิปปิ้งครีมส่งผลให้โปรตีนที่อยู่ในเนื้อครีมสูญเสียไปบางส่วน เนื่องจากอินูลินที่นำมาใช้ทดแทนในวิปปิ้งครีม โดยอินูลินเป็นเส้นใยอาหารกลุ่มฟรุคโตโอลิโกแซ็กคาไรด์ (Fructo-oligosaccharides) ซึ่งปราศจาก



โปรตีน ดังนั้น การลดปริมาณวิปครีมจึงส่งผลกระทบต่อปริมาณโปรตีนรวมของผลิตภัณฑ์ ปริมาณกากใยในไอศกรีมกล้วยหอมทองที่เติมอินูลินร้อยละ 8 มีค่ามากกว่าปริมาณกากใยในไอศกรีมกล้วยหอมทอง เนื่องจากอินูลินจัดเป็นพรีไบโอติกที่ประกอบด้วยโอลิโกแซ็กคาไรด์และพอลิแซ็กคาไรด์ที่ให้อليافที่นุ่มนวล สามารถละลายน้ำได้ปานกลาง และเกิดโครงสร้างร่างแหของเจลให้ความหนืดต่ำ สามารถนำไปใช้เป็นสารทดแทนไขมันและสารให้ความคงตัวในผลิตภัณฑ์อาหารได้หลายชนิด ช่วยรักษาความชื้นของขนมปังและเค้กให้สด ช่วยให้สามารถเก็บไว้ได้นาน อาจใช้เป็นเส้นใยอาหารในเครื่องดื่มผลิตภัณฑ์นม [34] ไอศกรีมกล้วยหอมทอง และจากการดำเนินการวิจัยพบว่าไอศกรีมกล้วยหอมทองลดไขมันมีจำนวนจุลินทรีย์ไม่เกินที่มาตรฐานกำหนด

ผลงานวิจัยเรื่องไอศกรีมกล้วยหอมทองลดไขมันโดยใช้อินูลินเป็นสารทดแทนไขมัน แสดงให้เห็นว่าอินูลินสามารถนำมาใช้ทดแทนไขมันในสูตรไอศกรีมได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยช่วยปรับปรุงคุณสมบัติทางกายภาพและเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ให้มีความใกล้เคียงกับไอศกรีมสูตรปกติ และช่วยลดปริมาณไขมันในไอศกรีมได้ เหมาะสำหรับกลุ่มผู้บริโภคที่ต้องการดูแลสุขภาพ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากงบประมาณแผ่นดิน ประจำปีงบประมาณ 2567 ของมหาวิทยาลัยราชภัฏเทพสตรี

เอกสารอ้างอิง

1. เบญจมาศ ศิลาอ้อย. กล้วย. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์; 2558.
2. Santos PHS, Suzuki CK, Lannes SCS. Structural properties before and after ripening of ice cream made with different dairy fat bases. *Foods* 2025;14(18):3276.
3. Kot A, Jakubczyk E, Kamińska-Dwórznička A. The effectiveness of combination stabilizers and ultrasound homogenization in milk ice cream production. *Appl Sci* 2023;13(13):7561.
4. Akalin AS, Karagözü C, Ünal G. Rheological properties of reduced-fat and low-fat ice cream containing whey protein isolate and inulin. *Eur Food Res Technol* 2008;227:889–95.
5. Mensink MA, Frijlink H W, Maarschalk K, Hinrichs WLJ. Inulin, a flexible oligosaccharide I: Review of its physicochemical characteristics. *Carbohydr Polym* 2015;130:405–19.
6. Faresin LDS, Devos RJB, Reinehr CO, Colla L. Development of ice cream with reduction of sugar and fat by the addition of inulin, *Spirulina platensis* or phycocyanin. *Int J Gastron Food Sci* 2022; 27:100445.
7. Guimarães JT, Alcântara NE, Vieira GP, Balthazar CF, Mársico ET, Oliveira CAF, et al. Prebiotic ice cream without additives: The influence of degree of inulin polymerization on product manufacturing. *Food Res Int* 2025;211(2):117279.
8. Akbari M, Eskandari MH, Niakosari M, Bedeltavana A. The effect of inulin on the physicochemical properties and sensory attributes of low-fat ice cream. *Int Dairy J* 2016;57:52–5.
9. CSIRO. Division of food research/Banana ripening guide. North Ryde, NSW: Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization; 1972.
10. สมฤดี ไทพานิชย์, ปราณี อ่านเปรื่อง. การป้องกันการเกิดสีน้ำตาลของผลิตภัณฑ์เนื้อกล้วยหอมตีปนพาสเจอร์ไรซ์. *วารสารเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยสยาม* 2556;9(1):39-51.
11. ปิยะนุช น้อยด้วง, วชิรพันธ์ จันทพงษ์. การใช้มิวซิเลจแห้งจากเมล็ดแมงลักเป็นสารให้ความคงตัวในผลิตภัณฑ์ไอศกรีมกล้วยหอม. *วารสารเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยสยาม* 2549;2(1):4-7.
12. Arbuckle WS. *Ice Cream*. 4th ed. New York: Springer New York; 2013.



13. Markowska J, Tyfa A, Drabent A, Stepniak A. The Physicochemical Properties and Melting Behavior of Ice Cream Fortified with Multimineral Preparation from Red Algae. *Foods* 2023;12:4481.
14. Aime DB, Arntfield SD, Malcolmson LJ, Ryland D. Textural analysis of fat reduced vanilla ice cream products. *Food Res Int* 2001;34(2-3):237-46.
15. AOAC association. Official methods of analysis of AOAC International. 17th ed. Gaithersburg: The Association of Official Analytical Chemists, Inc; 2000.
16. Chamber E, Wolf MB. Sensory Testing Methods. 2nd ed. Philadelphia: American Society for Testing and Materials; 2018.
17. กระทรวงสาธารณสุข. ประกาศกระทรวงสาธารณสุข เรื่อง ไอศกรีม. ราชกิจจานุเบกษา เล่มที่ 130 ตอนพิเศษ 87 ง. (ลงวันที่ 24 กรกฎาคม 2556).[อินเทอร์เน็ต].2556 [เข้าถึงเมื่อ 12 มี.ค. 2569]. เข้าถึงได้จาก: <https://food.fda.moph.go.th/food-law/f2-ice-cream>
18. International Commission on Microbiological Specifications for Foods (ICMSF). Microorganisms in foods 8: Use of data for assessing process control and product acceptance. New York: Springer; 2011.
19. Kumar P,Mishra HN. Effect of incorporation of banana pulp on the physicochemical and sensory properties of ice cream. *J Food Sci Technol* 2021;58:143–50.
20. Soukoulis C, Tzia C. Response surface mapping of the sensory characteristics and acceptability of chocolate ice cream containing alternative sweetening agents. *J Sens Stud* 2008;23(4):456–72.
21. Akalin AS, Karagözü C, Ünal G. Rheological properties of reduced-fat and low-fat ice cream containing whey protein isolate and inulin. *Eur Food Res Technol* 2008;227:889–95.
22. อภิเดช พงษ์ประจักษ์, อรวรรณ พึ่งคำ ,พนัดดา เพ็งกุลกุล, ศิริสุข แดงกองโค ,ปพนพัชร ภัทรฐิติวัสส์, พรพา ชื่นชูเชิด, และคณะ. การพัฒนาผลิตภัณฑ์ไอศกรีมเสริมกล้วยหอมทอง. วารสารเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์และนวัตกรรม 2566;2(1):1-9.
23. Aimi Azira S, Wan Zunairah W I, Nor Afizah M, Nor-Khaizura MAR, Radhiah S, Ismail Fitry MR, et al. Prevention of browning reaction in banana jam during storage by physical and chemical treatments. *Food Res* 2021;5(5):55-62.
24. นกเกตน์ สายสมบัติ, ภัทราภรณ์ สุขขาว, อนันต์ บุญปาน. การยืดอายุการเก็บรักษาของกล้วยหอมทอง (*Musa sapientum*) สุกบดพาสเจอไรซ์ สำหรับใช้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์เค้กกล้วยหอม. วารสารเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยสยาม 2567;19(1):1-18.
25. ช่อฟ้า กลิ่นจันทร์, พูลทรัพย์ แก้วทองคำ, นัฐวัน ล้วนลอย, วิรัชยา อินทะกันท์. การพัฒนาผลิตภัณฑ์ไอศกรีมกล้วยน้ำว้า. ใน: รายงานสืบเนื่องจากการประชุมวิชาการระดับชาติ สถาบันวิจัย มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร ครั้งที่ 4 วันที่ 22 ธันวาคม 2560. มหาวิทยาลัยราชภัฏกำแพงเพชร. กำแพงเพชร; 2560. หน้า 1119-25.
26. Pintor A, Severiano-Pérez P, Totosa A. Optimization of fat-reduced ice cream formulation employing inulin as fat replacer via response surface methodology. *Food Sci Technol Int* 2014;20(7):489-500.
27. Narala VR, Orlovs I, Jugbarde MA, Masin M. Inulin as a fat replacer in pea protein vegan ice cream and its influence on textural properties and sensory attributes. *Appl Food Res* 2022;2(1):100066.
28. Chang Y, Hartel RW. Development of air cells in a batch ice cream freezer. *J Food Eng* 2002;55(1):71-8.



29. Akin MB, Akin MS, Kirmaci Z. Effect of inulin and sugar levels on the viability of yogurt and probiotic bacteria and the physical and sensory characteristics in probiotic ice cream. *Food Chem* 2007;104(1):93-9.
30. Pintor A, Escalona-Buendía HB, Totosa A. Effect of inulin on melting and textural properties of low-fat and sugar-reduced ice cream: optimization via a response surface methodology. *Int Food Res J* 2017;24(4):1728-34.
31. Goff HD, Hartel RW. *Ice Cream*. 7th ed. New York: Springer; 2013.
32. Sofjan R, Hartel RW. Effects of overrun on structural and physical characteristics of ice cream. *Int Dairy J* 2004;14(3):255-62.
33. Doublier JL, Garnier C, Doublier C. *Gums and hydrocolloids: Functional Aspects*. 3rd ed. Boca Raton: CRC Press; 2017.
34. Gibson GR, Roberfroid M. *Handbook of Prebiotics*. 1st ed. Boca Raton: CRC Press; 2008.

Assessment of Fungal Bioaerosols in Indoor and Outdoor Air Conditions of Child Development Centers of the Local Government in Northeast Thailand

Chontichar Jinapon¹, Pornchanok Boonlub¹, Patcharee Pansa², Bunliang Suphim³,
Napatsorn Wongpriaw⁴ and Piyapong Choomsri^{3*}

¹Program of Biology, Faculty of Science and Technology, Loei Rajabhat University, Loei, 42000

²Faculty of Science and Technology, Loei Rajabhat University, Loei, 42000

³Program of Public Health, Faculty of Science and Technology, Loei Rajabhat University, Loei, 42000

⁴Program of Chemistry, Faculty of Science and Technology, Loei Rajabhat University, Loei, 42000

*Corresponding author: choomseer@gmail.com

Received: 9 January 2026/ Revised: 15 April 2026/ Accepted: 19 April 2026

Abstract

This cross-sectional survey aimed to determine the concentration of fungal bioaerosols at the 6 child development centers in Loei province, Northeast Thailand. Eighty-two air samples were collected by using a BioStage. The Indoor and Outdoor (I/O) ratio was 1.81. Moreover, the fungi from the indoor air conditions were found belonging to 7 fungal groups. The predominant fungi were in the yeast group (9.81 ± 17.37 CFU/m³; 49.05%), followed by *Aspergillus* sp. (4.49 ± 4.71 CFU/m³; 22.45%). However, the fungi collected from outdoor air conditions belonged to 6 genera of filamentous fungi and 1 group of yeast. These fungi belonged predominantly to *Aspergillus* sp. (4.07 ± 4.31 CFU/m³; 38.00%), followed by the yeast group (2.23 ± 5.54 CFU/m³; 20.82%). This result could be useful in the monitoring or planning of environmental conditions in child development centers or public spaces to reduce the abundance of airborne microbes.

Keywords: Fungal bioaerosols, Indoor air, Outdoor air, Child development centers, Air quality

Introduction

The air quality in buildings and the environment has become a significant concern in public health monitoring, and more than 90% of the general public spends time in indoor areas. Microorganisms can be found in approximately 33% of indoor air in buildings, and pollution can be caused by one or more microorganisms, such as fungal bioaerosols (i.e., *Aspergillus* spp., *Alternaria* spp., *Penicillium* spp., *Cladosporium* spp., and yeast) [1-4]. Fungal bioaerosols are opportunistic pathogens that are present in the form of airborne fungal spores, which allows them to survive under environmental stress and spread through the air and in the environment [5, 6]. However, fungal bioaerosols might have serious effects associated with asthma, allergies, and acute toxicity in immunodeficient populations, such as infants and young children, because the majority of defects in the humoral immune response (HIR) system occur when



children are 1.5 to 2 years old, they are normally unable to produce antibodies against response antigens [7-11]. For all these reasons, young children enrolled at the child development centers of the local government and spending time there for more than 6 hours a day might be more susceptible to fungal bioaerosols than adults are. The child development centers of the local government should be monitoring locations because of the high population density of children per room, the lack of air conditioning maintenance and the lack of sufficient sanitation. Due to the importance of healthcare for young children, this study investigated the quantity of fungal bioaerosols in the child development centers of the local government in Loei province, northeast Thailand. These results could be used as information for evaluating the quality of children's physical growth.

Materials and Methods

Study Area

This study was performed in Loei province, northeast Thailand which has an approximate population of 0.64 million. The geographic coordinates of Loei province are 101°29'20.1" E, and the province is located in close proximity to the border with Laos [12]. The 6 child development centers of the local government were divided by terrain conditions into 3 groups. The first group included low plain areas, consisting of Na-O and BanTit-O child development centers; the second group included high mountain areas, consisting of Kaeng-Laen and Kok-Pho child development centers; and the last group included irrigation areas, consisting of Na-Sao and Ban-Mai child development centers. These centers were selected for air sample collection.

Ethical Approval

Ethical approval of research protocol was considered and certified as an exemption for research ethics based on The Declaration of Helsinki and the ICH Good Clinical Practice Guideline.

Sample Collection

In this study, eighty-two air samples were collected. For indoor air collection, sampling was conducted in duplicate according to room size as follows: in one room of Na-O child development center, samples were collected at seven points (14 samples), while in one room each of BanTit-O, Na-Sao and Ban-Mai child development centers, samples were collected at six points (36 samples). In one room of Kok-Pho and Kaeng-Laen child development centers, samples were collected at five points (20 samples). Additionally, the samples were collected at one point twice in outdoor areas per child development center (12 samples). Air samples were taken during the rainy season from June to August 2022.

Fungal bioaerosols were investigated using a BioStage (BioStage Impactor, Model 255-9611) (BBL Becton Dickinson, USA). The sampler was positioned 80 cm above the floor (respiratory height average children) [10, 13] the airflow rate was set at 28.3 L/min for 10 minutes, and the collector was sterilized with 70% ethyl alcohol before use. The collector allowed the air to pass over disposable Petri dishes (90 × 10 mm) containing Sabouraud dextrose agar (SDA) for fungal collection. The humidity and temperature were measured both indoors and outdoors via the same real-time sampling method (Hygrotherm Thermo/Hygrometer; Digicon TH-02), and the indoor and outdoor wind speeds were measured via a hot wire anemometer (Testo-425) [1].

Isolation and Identification of Fungi

The sample plates were stored in sterile plastic bags and transported to the laboratory within one hour. These plates were incubated at 35-37 °C for 48 hours as recommended by the American Society for Microbiology and Bailey & Scott's Diagnostic Microbiology. The number of fungal filamentous colonies was calculated and reported in colony-forming units per cubic meter of air (CFU/m³). In addition, identification of fungal genera was performed based on macroscopic and microscopic characteristics. The macroscopic characteristics were directly examined by eye observation on the upper and lower regions of the colonies. However, microscopic identification was performed by the slide culture method. After incubation, all of the fungal isolates were stained with lactophenol cotton blue to observe the spore arrangement and hyphal structure under a brightfield microscope [14]. The Identification of Pathogenic Fungi (2nd edition) was used as a standard key for identification [15].

Fungal DNA Extraction

Fungal genomic DNA was isolated by using a GF-1 fungal DNA extraction kit (Vivantis Technologies Sdn Bhd, Malaysia). A total of 30 mg of fungal sample was collected into a microcentrifuge tube, after which 280 µl of Buffer FuL was added to the microcentrifuge tube. The suspension was mixed well by vortexing for 30 seconds to make a homogenous solution. Then, 20 µl of Proteinase K was added, and the solution was mixed by inverting the tube several times, followed by incubation at 65 °C for 30 minutes (the sample was mixed every 5 minutes during incubation). The sample was then centrifuged at 14,000 rpm for 5 minutes. The supernatant was transferred to a clean microcentrifuge tube, and 2 volumes of Buffer FuB and mixed by inverting the tube several times. The mixture was incubated at 65 °C for 10 minutes, and 200 µl of absolute ethanol was added to the microcentrifuge tube. The sample was subsequently transferred to a column and centrifuged at 10,000 × g for 1 minute. Afterward, the column was washed with 650 µl of wash buffer and centrifuged at 10,000 × g for 1 minute. DNA was eluted by adding 50 µl of preheated Elution Buffer directly onto column membrane and allowing to stand for 2 minutes, followed by centrifugation at 10,000x g for 1 minute. The DNA was stored at 4 °C or -20 °C.

Polymerase Chain Reaction (PCR) for Fungi

To confirm that the major fungal groups found in this study were yeast and *Aspergillus* sp., the fungi were subjected to PCR-specific testing using the fungal universal primers ITS1/ITS4 (600 bp) [16] and the *Aspergillus* sp. specific primers Asp-ITS-F/Asp-ITS-R (170 bp) [16]. PCR was performed using the primer ITS1 (5'- TCCGTAGGTGAACCTGCGG-3') and the primer ITS4 (5'- TCCTCCGCTTATTGATATGC-3') for fungal confirmation [17]. The PCR protocol consisted of an initial denaturation at 95 °C for 4.5 minutes followed by 35 cycles of 95 °C for 30 seconds, 50 °C for 30 seconds, and 72 °C for 1 minute and a final extension at 72 °C for 3 minutes. The primers Asp-ITS forward (5'-ACCGAGTGTAGGGTTCCTAG-3') and Asp-ITS reverse (5'-GCGATACAATCAACTCAGAC-3') were used for *Aspergillus* sp. confirmation [16]. The PCR protocol consisted of an initial denaturation at 98 °C for 3 min followed by 28 cycles of 98 °C for 10 s, 55 °C for 10 s, and 72 °C for 30 s and a final extension at 72 °C for 1 min. The PCR products were evaluated via electrophoresis on 1.2% agarose gels in 1X TBE buffer and stained with SYBR Safe (Vivantis Technologies Sdn Bhd, Malaysia).



Statistical Analysis

The descriptive statistics (i.e., frequency, percentage, mean and standard deviation) are reported as the concentration of fungal bioaerosols, temperature, %RH, and wind speed. The dependent variable was the concentration of fungal bioaerosols. Moreover, the independent variables were the indoor temperature, %RH, wind speed, and the indoor/outdoor ratio (I/O ratio). The statistical analysis was conducted using the SPSS software program.

Results and Discussion

Concentrations of Fungal Bioaerosols in Different Sampling Area

The concentrations of fungal bioaerosols in the sampled indoor air of the child development centers are presented in Table 1. The mean concentration of fungal bioaerosols from the six child development centers was 20.83 ± 23.25 CFU/m³. Among these centers, the Ban-Mai child development centers had the highest concentration of fungal bioaerosols (37.02 ± 28.57 CFU/m³); however, this concentration did not exceed the standard quality requirements for cleanrooms set by the Department of Health Ministry of Public Health, Thailand (must be less than 50 CFU/m³). Moreover, the mean indoor temperature and indoor %RH were 27.90 ± 2.42 °C and $65.04 \pm 11.61\%$, respectively. These results showed that the temperature exceeded the recommended standard (24–26 °C), while the %RH was within the standard range (50–65% RH). For the fungal bioaerosols collected outdoors, the mean concentration of fungal bioaerosols was 11.45 ± 9.78 CFU/m³, and the Na-Sao child development centers had the highest concentration of fungal bioaerosols (22.28 ± 0.75 CFU/m³). However, the mean I/O ratio was 1.81 (Table 2), which indicates that fungal contaminants from the air outside enter the room, and the ratio exceeds the recommendations of the Bureau of Environmental Health (2015) (must be less than 1.0) [1].

Table 1 The mean concentrations of fungal bioaerosols and indoor environmental parameters.

The child development centers	Mean concentration of fungal bioaerosols (CFU/m ³) (S.D)	Temperature (°C) (S.D)	%RH (S.D)	Wind speed (m/s) (S.D)	Mean concentration of CO ₂ (ppm)
Na-O	$16.14 \pm 21.66^*$	25.48 ± 2.10	49.53 ± 3.03	0.17 ± 0.03	705.14 ± 13.84
BanTit-O	29.29 ± 26.83	25.90 ± 0.39	67.47 ± 2.20	0.08 ± 0.02	515.67 ± 14.06
Na-Sao	$9.83 \pm 23.37^*$	28.87 ± 0.36	77.97 ± 0.28	0.11 ± 0.04	440.67 ± 16.33
Ban-Mai	37.02 ± 28.57	31.97 ± 0.16	52.52 ± 0.44	0.10 ± 0.02	445.17 ± 10.22
Kok-Pho	10.29 ± 7.87	27.52 ± 0.08	76.58 ± 0.48	0.11 ± 0.09	489.20 ± 8.20
Kaeng-Laen	21.52 ± 9.69	28.04 ± 0.39	71.82 ± 0.17	0.20 ± 0.14	430.80 ± 2.44
Total mean	$20.83 \pm 23.25^*$	27.90 ± 2.42	65.04 ± 11.61	0.13 ± 0.08	512.71 ± 13.16

Remark: The mean concentration of fungal bioaerosols and indoor environments including temperature, %RH, wind speed, and CO₂ concentration were a summary of the concentration of fungal bioaerosols and indoor environments in each child development centers during June to August, 2022.

* The concentration of fungal bioaerosols could not be measured at every point, so the average concentration of fungal bioaerosols is not reported as the geometric mean. Thus, it is reported as the arithmetic mean.

**Table 2** The mean concentrations of fungal bioaerosols and outdoor environmental parameters.

The child development centers	Mean concentration of fungal bioaerosols (CFU/m ³) (S.D)	Temperature* (°C)	%RH*	Wind speed* (m/s)	Concentration of CO ₂ * (ppm)	I/O ratios
Na-O	1.52±0.72	28.70	72.40	0.16	395.00	10.61
BanTit-O	3.04±0.00	27.30	81.30	0.18	425.00	9.63
Na-Sao	22.28±0.75	28.90	78.60	0.12	421.00	0.44
Ban-Mai	13.93±11.06	32.20	53.30	0.19	399.00	2.66
Kok-Pho	8.68±2.19	29.50	77.10	0.43	386.00	1.19
Kaeng-Laen	19.22±14.18	29.00	74.70	0.08	386.00	1.12
Total mean	11.45±9.78	29.27±1.54	72.90±9.61	0.19±0.12	402.00±16.29	1.81

Remark: * The sampling was conducted in onetime.

Fungal Genera in Different Sampling Areas

The fungi were identified by using standard microbiological techniques, and the fungal type was investigated by checking with The Identification of Pathogenic Fungi (2nd edition). The results showed that all the samples collected from the 6 child development centers of the local government in Loei province were contaminated with different fungal genera. After identification, the fungi from indoor air condition were belonged to 7 fungal groups; 6 genera were filamentous fungi, and 1 yeast group was found. However, the yeast genera were not identified by this method (Table 3) (Figure 1). The yeast group was predominant among these fungi at 9.81±17.37 CFU/m³ (49.05%), followed by *Aspergillus* sp. 4.49±4.71 CFU/m³ (22.45%). The fungi collected from outdoor air conditions included six genera of filamentous fungi and one belonging to the yeast group. The predominant among these was *Aspergillus* sp. (4.07±4.31 CFU/m³; 38.00%), followed by the yeast group (2.23±5.54 CFU/m³; 20.82%) (Table 4).

Table 3 Characteristics of fungal isolates from the different child development centers of the local government in Loei province

Fungal Genera	Characteristics	
	Macroscopic	Microscopic
<i>Aspergillus</i> sp.	The colonies were initially white and then turning into dark green, rapidly and fast growth.	The conidia were radiated and contained in the vasicle; the spore walls were thick, hyaline, and smooth.
<i>Penicillium</i> sp.	The colonies were initially white and then turned into blue-green.	The conidiospores were branched and produced from the tips of phialides. Appear septate between conidiophores and branched.



Fungal Genera	Characteristics	
	Macroscopic	Microscopic
<i>Rhizopus</i> sp.	The colonies were initially cottony white and turn dark grayish-brown.	Sporangiophores, non-septate (coenocytic), stolon, and rhizoids.
<i>Phaeoacremonium</i> sp.	The colonies were suede-like, initially whitish-grey, and turn olivaceous-grey and slow-growing.	Phialides were tapered towards the tip with conidia.
<i>Neurospora</i> sp.	Orange colonies and fast-growing.	The conidia were orange-colored.
<i>Epidermophyton</i> sp.	Greenish-brown colonies, a velvety and folded center surface, and slow growing.	Appear septate between macroconidia, direct growth from the hyphae.
Yeast group	The colonies were white-creamy, round, and smooth.	Oval cell with budding.

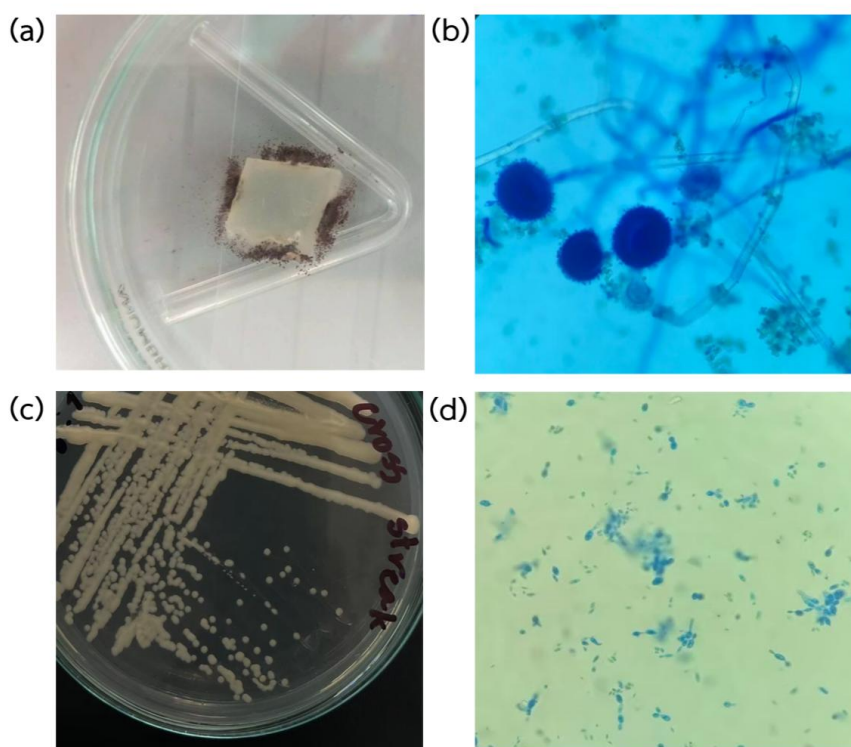


Figure 1 The Characteristics of *Aspergillus* sp. and yeast. (a) macroscopic morphology of *Aspergillus* sp.; (b) microscopic morphology of *Aspergillus* sp. under a microscope (400 x magnification); (c) macroscopic colony morphology of yeast; (d) microscopic morphology of yeast under a microscope (400 x magnification).

Table 4 Distribution and identification of airborne fungi (CFU/m³) in air samples from the different child development centers of the local government in Loei province

Genera	The mean concentration of isolated fungi				PCR primers	
	Indoor		Outdoor		(Percent positive)	
	CFU/m ³	%	CFU/m ³	%	ITS1/ITS4	Asp-ITS-F/Asp-ITS-R
<i>Aspergillus</i> sp.	4.49±4.71*	22.45	4.07±4.31*	38.00	100%	100%
<i>Penicillium</i> sp.	0.03±0.17*	0.15	1.18±4.09*	11.02	100%	-
<i>Rhizopus</i> sp.	1.02±2.66*	5.10	0.93±1.33*	8.68	100%	-
<i>Phaeoacremonium</i> sp.	4.19±7.04*	20.95	1.80±4.73*	16.81	100%	-
<i>Neurospora</i> sp.	0.39±0.50*	1.95	0.42±0.52*	3.92	100%	-
<i>Epidermophyton</i> sp.	0.07±0.40*	0.35	0.08±0.29*	0.75	100%	-
Yeast group	9.81±17.37*	49.05	2.23±5.54*	20.82	100%	-
Total	20.00±3.47	100.00	10.71±1.36	100	100%	-

Remark: *The concentration of fungal bioaerosols could not be measured at every point, so the average concentration of fungal bioaerosols is not reported as the geometric mean. Thus, it is reported as the arithmetic mean.

PCR method for confirmation of yeast and *Aspergillus* sp.

The majority of yeast group and *Aspergillus* sp. found in this study were confirmed. The *Aspergillus* sp. causes an aspergillosis [18], most infected people will develop a symptom related to the respiratory system. The fungi were thus subjected to PCR-specific testing using the fungal universal primers ITS1/ITS4 [16] and the *Aspergillus* sp. specific primers Asp-ITS-F/Asp-ITS-R [17]. All the yeast and *Aspergillus* sp. samples exhibited positive PCR results for the ITS1/ITS4 primers (600 bp) (data not shown); likewise, the *Aspergillus* sp. samples had positive PCR results for the Asp-ITS-F/Asp-ITS-R primers (170 bp) (Figure 2).

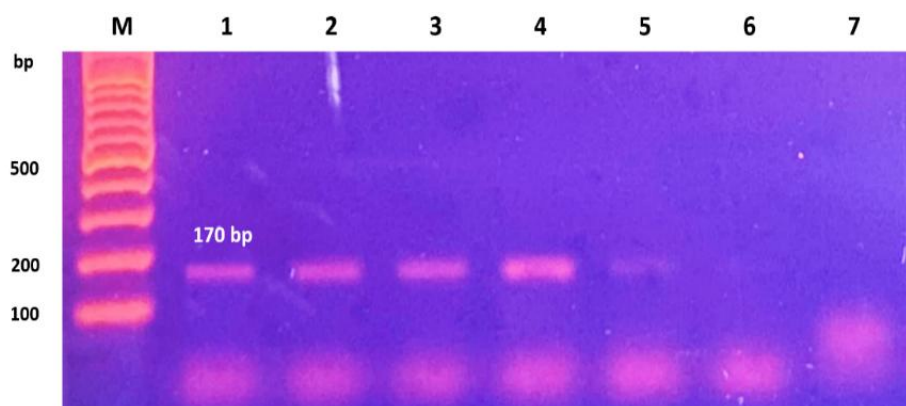


Figure 2 PCR confirmation of *Aspergillus* sp. by the *Aspergillus* sp.-specific primers Asp-ITS-F/Asp-ITS-R, yielding a 170 bp amplicon. Lane M, standard marker; lanes 1–6, *Aspergillus* sp. from child development centers 1–6; and lane 7, negative control.



The fungi from indoor air conditions were collected from 6 child development centers of the local government in Loei province, northeast Thailand and belonged to 7 fungal groups. The predominant fungi among these were the yeast group and *Aspergillus* sp. However, there are concerns regarding *Aspergillus* sp. as a cause of aspergillosis, and airborne *Aspergillus* sp. spores might cause serious problems associated with asthma or allergies in children or immunocompromised people. Therefore, *Aspergillus* sp. was confirmed by PCR with the fungal universal primers ITS1/ITS4 and the specific primers Asp-ITS-F/Asp-ITS-R. In the same way, although natural yeasts consist of beneficial types, they also include pathogenic types, such as *Candida* spp. and *Cryptococcus neoformans*. Therefore, all the yeast strains in this study were confirmed via PCR with the fungal universal primers ITS1/ITS4. The results from the present study were the same as those of Chotigawin R. who studied the microbial indoor air quality in early childhood education facilities in Chonburi, eastern Thailand. The results showed that the predominant fungus was *Aspergillus* sp. (50%) [19]. However, a previous study reported microbial counts and particulate matter levels in indoor air samples collected from a child home care center in Bangkok, Thailand, from 2006–2007. The total bacterial and fungal concentrations in the air were 527.8 ± 230.9 CFU/m³ and 514.6 ± 256.7 CFU/m³, respectively [20]. In 2018, Fang *et al.* studied assemblages of culturable airborne fungi in a typical urban, tourism-driven center of southeast China; the concentrations of fungi in the air in these areas ranged from < 12 CFU/m³ to 8,767 CFU/m³ (mean of 848 CFU/m³); and the predominant fungi were from the genera *Penicillium*, *Cladosporium*, *Alternaria*, *Aspergillus* and *Trichoderma* [21]. In 2019, Andualem *et al.* studied the indoor microbial load and found that it was correlated with physical indoor air quality parameters in public primary schools in Ethiopia; the predominant fungal pathogens were *Penicillium* sp., *Cladosporium* sp. and *Aspergillus* sp. at 40%, 19% and 16%, respectively [22]. In 2020, Szulc *et al.* assessed the microbiological indoor air quality of cattle breeding farms located in central Poland, and the samples were collected between February and April 2019. The results showed that the bacterial and fungal concentrations reduced between 7.14×10^3 and 3.88×10^4 CFU/m³ and between 5.53×10^1 and 1.30×10^4 CFU/m³, respectively, indicating that the predominant fungi were *Aspergillus* sp. However, the air circulation and the types of particles in the air may be important factors that help increase the amount of mold in the air [23]. In 2020, Ma studied blowing in the wind, bacteria and fungi are spreading from public restroom hand dryers. The results showed that 40 fungal species were found, and the predominant fungi genera were *Aspergillus* spp., *Cladosporium* spp., *Penicillium* spp., and *Didymella* spp. [24]. In 2013, Augustyniuk-Kram and Dmowska studied the spectrum and concentration of culturable fungi in house dust from flats in Warsaw, Poland. The results showed that the highest fungal concentrations were observed in dust collected from shelves (median value 8.2×10^4 CFU/g of dust), and the lowest fungal concentrations were isolated from dust collected from beds (median value 8.0×10^3 CFU/g of dust) [25]. In 2020, Sepahvand *et al.* studied the quantity and quality of indoor and outdoor air fungus bioaerosols in Khorrambad day care child centers western of Iran, 2018. The results showed that a direct relationship was found between fungal and relative humidity (%RH) and temperature, based on water activity requirements [26]. The common fungi such as *Aspergillus* sp., *Rhizopus* sp. and *Mucor* sp. can divided the second colony at water activity about 0.8-0.9% [27]. In 2023, Jabeen *et al.* studied the bioaerosol assessment in indoor and outdoor environments: a case study from India, the most common

fungal species were *Cladosporium*, *Aspergillus niger*, *Penicillium*, *Rhizopus*, *Fusarium*, *Mucor*, and *Alternaria*, relative to weather conditions, such as temperature and relative humidity [28]. In the same way, the present study, the mean indoor relative humidity (%RH) in the child development centers was 65.04 ± 11.61 , while the average temperature was 27.90 ± 2.42 °C. These conditions are favorable for fungal growth. In particular, relative humidity exceeding 60% and temperatures ranging from 25–30 °C provide suitable environmental conditions for yeast survival [29]. Moreover, indoor air-conditioning systems with inadequate ventilation may act as reservoirs that facilitate yeast proliferation. In addition, *Aspergillus* spp., which are mesophilic fungi, exhibit optimal growth at temperatures ranging from 20 to 40 °C [30]. The predominant fungi are also yeast and *Aspergillus* sp. Although the source of airborne bacteria may be shedding of the skin and secretions from the respiratory tract transmitted via human breathing, airborne fungi may be widely distributed in soil, water, and decaying vegetation [31-35]. Moreover, the outdoor air quality is usually related to the environment directly. In the country, environmental laws are not strictly enforced, leading to air pollution [36]. For instance, the report of Pringsulaka et al. studied the assessment of indicator microorganisms and fungi: health risk in the Saen Saeb canal, Thailand. They found the amounts of the fungi and airborne bacteria were higher than usual and related to high levels of pathogenic microorganisms of water in the Saen Saeb canal [36].

Fungal bioaerosols are opportunistic pathogens that might have serious effects in immunodeficient populations, particularly young children who spend more than six hours per day in child development centers. The Department of Health Ministry of Public Health, Thailand, set the standard quality requirements for cleanrooms, the concentration of fungal bioaerosols must be less than 50 CFU/m³, due to concern for the health of young children, this study investigated the quantity of fungal bioaerosols in the child development centers of the local government in Loei province, northeast Thailand. The concentration of fungal bioaerosols from the six child development centers did not exceed the standard quality, the predominant fungi from the indoor air conditions were the yeast group, followed by *Aspergillus* sp., which can cause fungal diseases and allergies [37]. However, the predominant fungi collected from outdoor air conditions were *Aspergillus* sp. followed by the yeast groups, the results of the study were similar in all terrain conditions of the three groups. The results of this study can lead to the prevention and elimination of fungal bioaerosols, as well as being able to monitor and plan environmental operations in child development centers to further reduce microorganisms in the air.

The indoor environment of child development centers should be appropriately managed to maintain cleanliness and to prevent these facilities from becoming sources of fungal contamination. Particular emphasis should be placed on the management of indoor spaces that may serve as reservoirs for fungal growth. This includes the control of environmental parameters such as indoor temperature, relative humidity, and air velocity. In addition, the density of children relative to the available indoor space should be regulated. Ensure regular implementation of daily activities and systematic cleaning practices within child development centers. Furthermore, policy recommendations should be developed to promote the improvement of biosafety measures within child development centers. Such measures are important for



minimizing potential health risks to young children and to individuals who may be exposed to airborne fungal spores in these environments.

Conclusion

The present study aimed to determine the concentration of fungal bioaerosols in 6 child development centers of the local government in Loei province, Thailand. The mean concentrations of fungal bioaerosols indoor air condition (I) and outdoors air condition (O) were 20.83 ± 23.25 CFU/m³ and 11.45 ± 9.78 CFU/m³, respectively. The I/O ratio was 1.81. The predominant fungal bioaerosols were yeasts and *Aspergillus* sp. This result could be useful in surveillance and planning for proper environmental management at child development centers to reduce the abundances of airborne fungi.

Acknowledgements

This research was financially supported by Thailand Science Research and Innovation (2022) and Loei Rajabhat University. We also special thanks to Dr.Chantana Khensri and Dr.Pokkamol Laoraksawong, who helped in Polymerase chain reaction (PCR) process.

References

1. Choomsri P, Jinapon C, Boonlub P, Panpetch O, Laoraksawong P, Suphim B. Effects of environmental management factors on airborne microorganism concentrations in a childcare center: a case study in Mueang District, Loei Province. *KKU J Public Health Res* 2023;16(4):65–74.
2. Abdel-Aziz RAZ, Radwan SM. Microbial pollution of indoor air in Riyadh city government schools. *World J Adv Res Rev* 2020;8(1):209–16.
3. Saini J, Dutta M, Marques G. A comprehensive review on indoor air quality monitoring systems for enhanced public health. *Sustain Environ Res* 2020;30(6):1–12.
4. Mannan M, Al-Ghamdi SG. Indoor air quality in buildings: a comprehensive review on the factors influencing air pollution in residential and commercial structures. *Int J Environ Res Public Health* 2021;18(6):1–25.
5. Shelton BG, Kirkland KH, Flanders WD, Morris GK. Profiles of airborne fungi in buildings and outdoor environments in the United States. *Appl Environ Microbiol* 2002;68(4):1743–53.
6. Jung JH, Lee JE, Lee CH, Kim SS, Lee BU. Treatment of fungal bioaerosols by a high-temperature, short-time process in a continuous-flow system. *Appl Environ Microbiol* 2009;75(9):2742–59.
7. Van HL, Dubois B, Goris A. Somatic variants: new kids on the block in human immunogenetics. *Trends Genet* 2019;35(12):935–47.
8. Hill DL, Carr EJ, Rutishauser T, Moncunill G, Campo JJ, Innocentin S, et al. Immune system development varies according to age, location, and anemia in African children. *Sci Transl Med* 2020;12(529):eaaw9522.
9. Lakshmikanth T, Muhammad SA, Olin A, Chen Y, Mikes J, Fagerberg L, et al. Human immune system variation during 1 year. *Cell Rep* 2020;32(3):107923.



10. Mosalaei S, Amiri H, Rafiee A, Alireza A, Baghani AN, Hoseini M. Assessment of fungal bioaerosols and particulate matter characteristics in indoor and outdoor air of veterinary clinics. *J Environ Health Sci Eng* 2021;19(2):1773–80.
11. Liston A, Humblet-Baron S, Duffy D, Goris A. Human immune diversity: from evolution to modernity. *Nat Immunol* 2021;22(12):1479–89.
12. Suthamrit W, Thaewnon-ngiw B. Morphometry of mountain crabs (Crustacea: Decapoda: Brachyura: Potamidae) from Phetchabun Mountains, Thailand. *Interdiscip Res Rev* 2020;15(2):24–31.
13. Choomsri P, Suphim B, Chalamat M, Panpetch O, Jinapon C, Laoraksawong P. Factors correlated with the concentration of airborne microbes in childcare centers, Loei, Thailand. *J Southwest Jiaotong Univ* 2023;58(4):334–43.
14. Pedrosa KP, Nascimento JPMD, Araújo M, Silva MSDS, Santos DE, Filho E. Airborne fungi in a neonatal intensive care unit and operating theater in a university hospital. *Int J Innov Educ Res* 2022;10(2):41–55.
15. Campbell CK, Johnson EM, Warnock DW. The identification of pathogenic fungi. 2nd ed. Chichester: Wiley-Blackwell, Inc; 2013.
16. Henry T, Iwen PC, Hinrichs SH. Identification of *Aspergillus* species using internal transcribed spacer regions 1 and 2. *J Clin Microbiol* 2000;38(4):1510–5.
17. Rahman HU, Yue X, Ren X, Zhang W, Zhang Q, Li P. Multiplex PCR assay to detect *Aspergillus*, *Penicillium* and *Fusarium* species simultaneously. *Food Addit Contam Part A* 2020;37(11):1939–50.
18. Rudramurthy SM, Paul RA, Chakrabarti A, Mouton JW, Meis JF. Invasive aspergillosis by *Aspergillus flavus*: epidemiology, diagnosis, antifungal resistance, and management. *J Fungi* 2019;55(5):1–23.
19. Chotigawin R. Microbial indoor air quality in early childhood education facilities. *Thaksin J* 2016;19(1):84–94.
20. Luksamijarulkul P, Ratthanakhot Y, Vatanasomboon P. Microbial counts and particulate matter levels in indoor air samples collected from a child home care center in Bangkok, Thailand. *J Med Assoc Thai* 2012;95(6):161–8.
21. Fang Z, Zhang J, Guo W, Lou X. Assemblages of culturable airborne fungi in a typical urban tourism-driven center of Southeast China. *Aerosol Air Qual Res* 2019;19(4):820–31.
22. Andualet Z, Gizaw Z, Bogale L, Dagne H. Indoor bacterial load and its correlation to physical indoor air quality parameters in public primary schools. *Multidiscip Respir Med* 2019;14(2):1–7.
23. Szulc J, Okrasa M, Dybka-Stepień K, Sulyok M, Nowak A, Otlewska A, et al. Assessment of microbiological indoor air quality in cattle breeding farms. *Aerosol Air Qual Res* 2020;20(6):1353–73.
24. Ma JJ. Blowing in the wind: bacteria and fungi are spreading from public restroom hand dryers. *Arch Environ Occup Health* 2020;76(1):52–60.
25. Augustyniuk-Kram A, Dmowska E. Spectrum and concentration of culturable fungi in house dust from flats in Warsaw, Poland. *Aerosol Air Qual Res* 2013;13(5):1438–47.



26. Sepahvand A, Salim K, Hoseinzadeh E, Jafari K, Khorramabadi RM. Indoor and outdoor air fungus bioaerosols in Khorramabad day care child centers, western Iran. J Environ Health Sustain Dev 2020;5(3):1077–90.
27. Mounghthong G, Klamkam P, Mahakit P, Chalermwatanachai T, Thunyaharn S, Monyakul V. Efficacy of the precise climate controller on the reduction of indoor microorganisms. Asia Pac Allergy 2014;4(2):113–8.
28. Jabeen R, Kizhisseri MI, Mayanaik SN, Mohamed MM. Bioaerosol assessment in indoor and outdoor environments: a case study from India. Sci Rep 2023;13:18066.
29. Mackenzie DW. Effect of relative humidity on survival of *Candida albicans* and other yeasts. J Appl Microbiol 1971;22(4):678–82.
30. Schlosser O, Robert S, Debeauvais C. *Aspergillus fumigatus* and mesophilic moulds in air downwind of non-hazardous waste landfill sites. Int J Hyg Environ Health 2016;219(3):239–51.
31. Chakrabarti HS, Das S, Gupta-Bhattacharya S. Outdoor airborne fungal spore load in a suburb of Kolkata, India: variation, meteorological determinants and health impact. Int J Environ Health Res 2012;22(1):37–50.
32. Kumari S, Gond DK, Samuel CO, Abassi PA. Comparative study of aeromycospores in different localities of Gorakhpur, U.P. Indian J Sci Res 2011;2(4):51–5.
33. Kalyoncu F. Relationship between airborne fungal allergens and meteorological factors in Manisa City, Turkey. Environ Monit Assess 2010;165:553–8.
34. Sen B, Asan A. Fungal flora in indoor and outdoor air of residential houses in Tekirdag City, Turkey: seasonal distribution and relationship with climatic factors. Environ Monit Assess 2009;151:209–19.
35. Horner WE, Worthan AG, Morey PR. Air- and dustborne mycoflora in houses free of water damage and fungal growth. Appl Environ Microbiol 2004;70(11):6394–400.
36. Pringsulaka O, Suwannasai N, Sunthornthummas S, Krajangsang S, Sarawaneeyaruk S, Lorliam W, et al. Assessment of indicator microorganisms and fungi: health risk in the Saen Saeb Canal, Thailand. Chiang Mai J Sci 2017;44(2):309–21.
37. Shams-Ghahfarokhi M, Aghaei-Gharehbolaghet S, Aslani N, Razzaghi-Abyaneh M. Investigation on distribution of airborne fungi in outdoor environment in Tehran, Iran. J Environ Health Sci Eng 2014;12(1):1–7.



การศึกษาเปรียบเทียบสถาปัตยกรรม YOLO สำหรับการตรวจจับข้อบกพร่องบนรอยเชื่อม
ที่ซับซ้อนภายใต้ความกำกวมของป้ายกำกับ
Comparative Study of YOLO Architectures for Detecting Complex Weld Defects
under Label Ambiguity

สุรเทพ แป้นเกิด¹ และ ปิยะพงษ์ คำคุณ^{2*}

¹ภาควิชาการจัดการวิศวกรรมและเทคโนโลยี คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
กรุงเทพมหานคร 10120

²ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและอุตสาหการ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ
กรุงเทพมหานคร 10120

Suratep Pangerd¹ and Piyapong Kumkoon^{2*}

¹Department of Engineering and Technology Management, Faculty of Engineering, Rajamangala University of
Technology Krungthep, Bangkok 10120

²Department of Mechanical and Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of
Technology Krungthep, Bangkok 10120

*Corresponding author: piyapong.k@mail.rmutk.ac.th

Received: 28 February 2026/ Revised: 29 May 2026/ Accepted: 4 June 2026

บทคัดย่อ

งานวิจัยมีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) พัฒนาแบบจำลองตรวจจับข้อบกพร่องของรอยเชื่อมด้วยสถาปัตยกรรม YOLO จำนวน 3 เวอร์ชัน 2) เปรียบเทียบประสิทธิภาพของแบบจำลอง YOLOv11l, YOLOv12l และ YOLOv26l ภายใต้เงื่อนไขการทดลองเดียวกัน 3) วิเคราะห์ผลการตรวจจับข้อบกพร่องของรอยเชื่อมรายการคลาส ได้แก่ รอยแตก (Crack), รูพรุน (Porosity), สะเก็ดเชื่อม (Spatter) และแนวเชื่อม (Weld Line) 4) พัฒนาเว็บแอปพลิเคชันต้นแบบสำหรับการตรวจจับข้อบกพร่องของรอยเชื่อม โดยทำการศึกษาชุดข้อมูลจาก Roboflow Universe จำนวน 5,544 ภาพ และทำการประเมินผลด้วยตัวชี้วัด ผลการทดลองพบว่า YOLOv26l ให้ประสิทธิภาพสูงที่สุด โดยเฉพาะเมื่อฝึกที่ 300 epochs ซึ่งให้ค่า Precision = 0.91, Recall = 0.876, mAP50 = 0.908, mAP50-95 = 0.773 และ F1-score = 0.89 แสดงถึงความสามารถในการตรวจจับและระบุตำแหน่งข้อบกพร่องได้อย่างแม่นยำเหนือกว่าโมเดลอื่น นอกจากนี้ผลการวิเคราะห์รายการคลาสชี้ว่าโมเดลสามารถจำแนก Crack และ Weld Line ได้ดีพอสมควร ขณะที่ Porosity และ Spatter ยังคงมีความท้าทายเนื่องจากความคล้ายคลึงกับพื้นหลัง ทั้งนี้โมเดล YOLOv26l ถูกนำไปประยุกต์ใช้งานบนเว็บแอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้น ซึ่งสามารถใช้ตรวจจับข้อบกพร่องในสภาพแวดล้อมจริงได้อย่างมีประสิทธิภาพ สะท้อนศักยภาพของสถาปัตยกรรม YOLO รุ่นใหม่สำหรับการตรวจสอบคุณภาพรอยเชื่อมในภาคอุตสาหกรรม อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัดจากการใช้ชุดข้อมูลสาธารณะเพียงชุดเดียว จึงอาจยังไม่ครอบคลุมสภาพแวดล้อมจริงทั้งหมด

คำสำคัญ: การตรวจจับข้อบกพร่องรอยเชื่อม การเรียนรู้เชิงลึก การตรวจจับวัตถุ วิสัยทัศน์คอมพิวเตอร์ โยโล



Abstract

The objectives of this research are 1) to develop a weld defect detection model utilizing the YOLO architecture, specifically three versions 2) to compare the performance of the YOLOv11l, YOLOv12l, and YOLOv26l models under identical experimental conditions; 3) to analyze the class-specific weld defect detection results, which include Crack, Porosity, Spatter, and Weld Line; and 4) to develop a web application prototype for weld defect detection. The study was conducted by examining a dataset of 5,544 annotated images comprising four defect categories: Crack, Porosity, Spatter, and Weld Line. All models were trained with identical configurations and assessed. The results indicate that YOLOv26l achieves the highest overall performance, particularly at 300 epochs, yielding a Precision of 0.91, Recall of 0.876, mAP50 of 0.908, mAP50-95 of 0.773 and F1-score of 0.89. These metrics reflect superior localization accuracy and defect classification capability compared to the other architectures. Class-wise analysis reveals that Crack and Weld Line are consistently well-detected, whereas Porosity and Spatter remain more challenging due to visual similarity with background textures. Despite this, YOLOv26l demonstrates the best balance across all defect classes. Furthermore, the trained model was successfully deployed in a web-based application, enabling prototype demonstration for weld-quality inspection. The findings confirm the potential of modern YOLO architectures, especially YOLOv26l, for accurate and robust automated weld defect detection in industrial environments. However, this research is limited by the use of only a single public dataset, and therefore may not cover all real-world environments.

Keywords: Weld defect detection, Deep learning, Object detection, Computer vision, YOLO

บทนำ

กระบวนการเชื่อมเป็นขั้นตอนที่มีความสำคัญอย่างยิ่งในอุตสาหกรรมโครงสร้างโลหะ ระบบท่อส่ง และการผลิตชิ้นส่วนเครื่องจักรกล เนื่องจากคุณภาพของแนวเชื่อมส่งผลโดยตรงต่อความแข็งแรง ความปลอดภัย และอายุการใช้งานของโครงสร้างโดยรวม อย่างไรก็ตามข้อบกพร่องในการเชื่อม (welding defects) สามารถเกิดขึ้นได้จากหลายปัจจัย อาทิ การออกแบบรอยเชื่อมที่ไม่เหมาะสม การกำหนดพารามิเตอร์กระบวนการเชื่อมที่คลาดเคลื่อน การเลือกใช้วัสดุที่ไม่สอดคล้องกัน รวมถึงทักษะและประสบการณ์ของผู้ปฏิบัติงาน ข้อบกพร่องที่พบบ่อย ได้แก่ รอยแตก (crack) ความพรุน (porosity) และสะเก็ดเชื่อม (Spatter) ซึ่งล้วนส่งผลกระทบต่อสมรรถนะเชิงกลของโครงสร้าง และในกรณีรุนแรงอาจนำไปสู่ความเสียหายต่อทรัพย์สินและชีวิตได้ ทั้งนี้การตรวจสอบคุณภาพรอยเชื่อมมักเริ่มต้นด้วยการตรวจสอบด้วยการพินิจ (Visual Testing: VT) ซึ่งเป็นวิธีทดสอบแบบไม่ทำลาย (NDT) [1, 2] ที่พื้นฐานและประหยัดค่าใช้จ่ายที่สุดในการตรวจหาข้อบกพร่องบริเวณพื้นผิว อย่างไรก็ตามการตรวจสอบด้วยสายตา มนุษย์มีข้อจำกัดด้านความเหนื่อยล้าและอาจเกิดความไม่สม่ำเสมอในการประเมินผล โดยการตรวจสอบด้วยสายตา ยังคงเป็นวิธีพื้นฐานที่ใช้กันอย่างแพร่หลายในภาคอุตสาหกรรม โดยครอบคลุมการตรวจสอบก่อนเชื่อม ระหว่างเชื่อม และหลังเชื่อม แม้ว่าจะมีเกณฑ์การประเมินที่กำหนดไว้อย่างชัดเจนตามมาตรฐานที่เกี่ยวข้อง แต่ผลการตรวจสอบยังคงขึ้นอยู่กับประสบการณ์ ความชำนาญ และสถานะแวดล้อมของผู้ตรวจสอบ ส่งผลให้เกิดความแปรปรวนของผลลัพธ์ ความล่าช้าในการประเมิน และความเสี่ยงต่อความผิดพลาดจากมนุษย์ โดยเฉพาะในกรณีที่มีปริมาณชิ้นงานจำนวนมากหรือมีลักษณะพื้นผิวแนวเชื่อมที่ซับซ้อน

ด้วยความก้าวหน้าของเทคโนโลยีปัญญาประดิษฐ์และคอมพิวเตอร์วิชัน (Computer Vision) [3] ซึ่งเป็นแขนงหนึ่งของปัญญาประดิษฐ์ที่มุ่งเน้นการทำความเข้าใจและวิเคราะห์ข้อมูลภาพและวิดีโอ เทคโนโลยีดังกล่าวได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่องและ



มีความสามารถในการประมวลผลที่รวดเร็วและแม่นยำสูง โดยเฉพาะการประยุกต์ใช้การเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) ผ่านโครงข่ายประสาทเทียมแบบคอนโวลูชัน (Convolutional Neural Network: CNN) ที่สามารถดำเนินการได้ทั้งการจำแนกประเภท (classification) การตรวจจับวัตถุ (object detection) และการแบ่งส่วนภาพ (segmentation) อย่างมีประสิทธิภาพ ความเร็วและความแม่นยำของระบบขึ้นอยู่กับความซับซ้อนของสถาปัตยกรรมแบบจำลองที่เลือกใช้ ในบรรดาแบบจำลองตรวจจับวัตถุแบบจำลองชนิดหนึ่งขั้นตอน (one-stage detector) ในตระกูล YOLO (You Only Look Once) [3] ได้รับความนิยมอย่างกว้างขวาง เนื่องจากมีจุดเด่นด้านความเร็วในการประมวลผลควบคู่กับประสิทธิภาพการตรวจจับที่เหมาะสมกับการประยุกต์ใช้ในงานที่ต้องการการตอบสนองแบบใกล้เคียงเวลาจริง ที่ผ่านมามีงานวิจัยที่ประยุกต์ใช้ CNN และอัลกอริทึมตระกูล YOLO ในการตรวจจับข้อบกพร่องบนรอยเชื่อมโดยตรง [4, 5] ในสภาพแวดล้อมการผลิตจริง การออกแบบและพัฒนาระบบตรวจจับและระบุตำแหน่งข้อบกพร่องบนแนวเชื่อมบนผิวเหล็ก โดยประยุกต์ใช้อัลกอริทึม YOLOv11, YOLOv12 และ YOLOv26 เพื่อสร้างแบบจำลองสำหรับการตรวจจับและจำแนกข้อบกพร่องของรอยเชื่อมจากภาพ ระบบที่พัฒนาขึ้นสามารถระบุตำแหน่งของข้อบกพร่องในลักษณะกรอบล้อม (bounding box) พร้อมทั้งจำแนกประเภทของรอยบกพร่องได้อย่างอัตโนมัติ

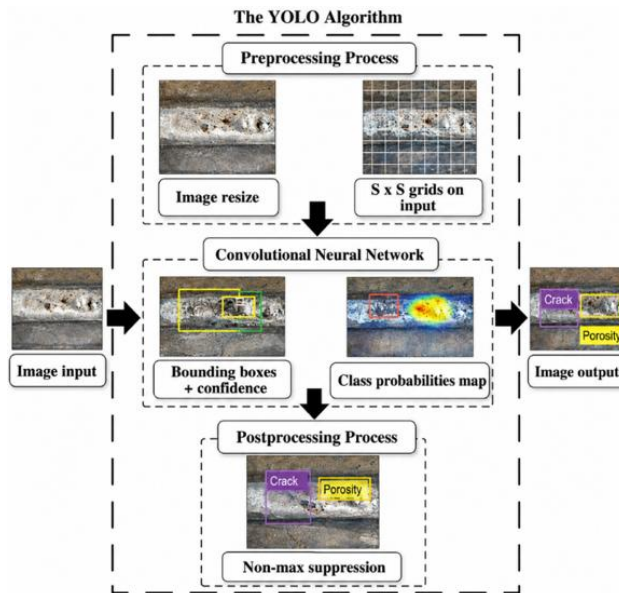
การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์หลักเพื่อพัฒนาแบบจำลองสำหรับการตรวจจับข้อบกพร่องของรอยเชื่อม โดยประยุกต์ใช้สถาปัตยกรรม YOLO เวอร์ชันล่าสุด ที่ได้รับความนิยมในงานด้าน Object Detection มีจุดเด่นด้านความเร็วและความแม่นยำ พร้อมทั้งทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโมเดลทั้งสามภายใต้เงื่อนไขที่ควบคุมให้เหมือนกันทั้งหมด ไม่ว่าจะเป็นชุดข้อมูลที่ใช้สัดส่วนการแบ่งข้อมูล และค่าพารามิเตอร์สำหรับการฝึกสอน ท้ายที่สุดผู้วิจัยจะทำการคัดเลือกโมเดลที่มีประสิทธิภาพสูงที่สุดจากการทดสอบ เพื่อนำไปต่อยอดและพัฒนาเป็นเว็บแอปพลิเคชันต้นแบบ สำหรับนำไปประยุกต์ใช้ในการตรวจจับข้อบกพร่องของรอยเชื่อมในระดับปฏิบัติการจริงต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาข้อมูลที่เกี่ยวข้อง

1.1 การประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมของชุดอัลกอริทึมตรวจจับวัตถุ YOLO

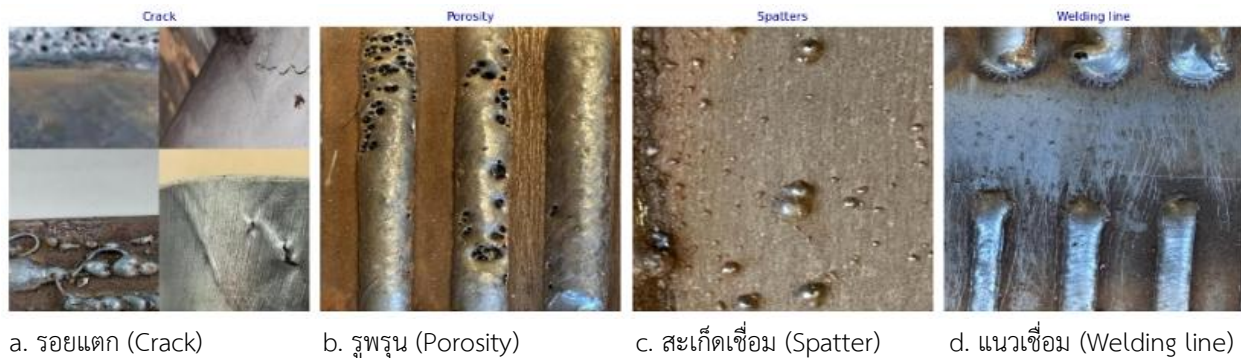
ในระยะเริ่มต้นงานตรวจจับวัตถุด้วย YOLO ถูกพัฒนาเพื่อแก้ข้อจำกัดของกระบวนการตรวจจับแบบหลายขั้นตอน (multi-stage detection pipelines) โดยเปลี่ยนแนวคิดจากการจำแนกภาพเฉพาะบริเวณมาเป็นการตรวจจับแบบขั้นตอนเดียว (single-stage detection framework) ทำให้สามารถระบุตำแหน่งและจำแนกวัตถุได้ภายในกระบวนการเดียว ส่งผลให้ YOLO มีความเร็วสูงและเหมาะสมกับงานตรวจจับแบบเวลาจริง ต่อมา YOLO ได้รับการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง โดยมีการปรับปรุงแนวคิดด้านการทำนายตำแหน่งวัตถุผ่าน anchor boxes เพื่อช่วยให้ระบุตำแหน่งวัตถุได้แม่นยำขึ้น ซึ่งถือเป็นพื้นฐานสำคัญของ YOLOv2 ในระยะถัดมา YOLOv3 ถึง YOLOv8 [3] ได้รับการพัฒนาให้มีความสามารถในการตรวจจับวัตถุที่มีขนาดแตกต่างกันมากขึ้น โดยอาศัยแนวคิดการทำนายหลายระดับ (multi-scale prediction) และการปรับปรุงโครงสร้างส่วนหัวของโมเดล เช่น feature pyramid และ anchor-free heads เพื่อเพิ่มความสามารถในการตรวจจับวัตถุขนาดเล็กและเพิ่มประสิทธิภาพการประมวลผล ขณะเดียวกัน YOLOv9 และ YOLOv10 [6, 7] ได้มุ่งเน้นการออกแบบโมเดลให้มีประสิทธิภาพสูงขึ้นผ่านแนวทาง lightweight design เพื่อลดภาระการประมวลผลและรองรับการใช้งานบนอุปกรณ์ปลายทาง (edge devices) สำหรับ YOLOv11 และ YOLOv12 แนวทางการพัฒนาเริ่มเปลี่ยนจากการเพิ่มความซับซ้อนของโครงข่ายไปสู่การปรับปรุงองค์ประกอบภายในโมเดลให้มีประสิทธิภาพมากขึ้น เช่น การใช้ convolutional design ที่มีประสิทธิภาพสูงขึ้น และการนำกลไก attention เข้ามาช่วยเพิ่มความสามารถในการเรียนรู้คุณลักษณะสำคัญของวัตถุ โดย YOLOv11 มีการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างสำคัญ เช่น การใช้ C3k2 แทน C2f และการเพิ่ม C2PSA เพื่อเพิ่มความสามารถในการสกัดคุณลักษณะเชิงพื้นที่ [8, 9] ขณะที่ YOLOv12 นำกลไก attention มาปรับใช้ในโครงสร้างของโมเดล [10 - 14] เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการเรียนรู้บริเวณสำคัญของภาพและปรับปรุงความแม่นยำในการตรวจจับวัตถุ โดยกลไกการตรวจจับวัตถุของอัลกอริทึมตระกูล YOLO แสดงดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 กลไกการตรวจจับวัตถุของอัลกอริทึมตระกูล YOLO

1.2 รอยบกพร่องของรอยเชื่อม

ข้อบกพร่องในการเชื่อมภายใต้พารามิเตอร์ที่ไม่เหมาะสม ข้อบกพร่องเหล่านี้มักเกิดจากความเร็วในการป้อนลวดเชื่อมที่ไม่เหมาะสม ระยะห่างระหว่างลวดเชื่อมและแหล่งความร้อน ข้อบกพร่องที่แสดงในภาพที่ 2 ปัญหาการหลอมละลายของลวดเชื่อมไม่เพียงพอ มักเกิดขึ้นเมื่อความเร็วในการป้อนลวดเชื่อมสูงเกินไป หรือระยะห่างระหว่างลวดเชื่อมกับแหล่งความร้อนมากเกินไป โดยจะมีสรุปข้อบกพร่องในการเชื่อมที่พบได้ทั่วไป สาเหตุหลัก และผลกระทบที่เป็นอันตรายต่อชิ้นส่วนที่ผลิตขึ้นดังตารางที่ 1



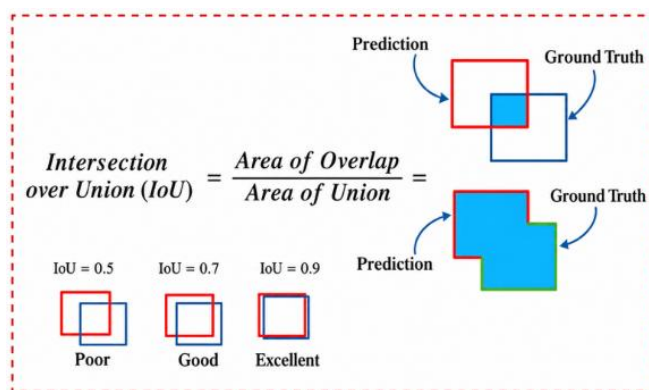
ภาพที่ 2 รอยบกพร่องของรอยเชื่อม

1.3 การวัดผลประสิทธิภาพโมเดล

การวัดประสิทธิภาพโมเดลในการการตรวจจับวัตถุ (Object Detection) Intersection over Union (IoU) เพื่อประเมินความเกี่ยวข้องกันระหว่างผลการทำนาย (Predict) Bounding box กับผลเฉลย (Ground truth) ซึ่งหาได้จากพื้นที่ที่มีการทับซ้อนกันของ Bounding box กับ Ground truth หรือเรียกพื้นที่ Intersection ทหารด้วยพื้นที่รวมของทั้งสอง หากผลลัพธ์ IoU มีค่าเข้าใกล้ 1 แสดงว่าโมเดลทำนาย (Precision) ได้แม่นยำ แสดงถึงพื้นที่ทำนายตรงหรือใกล้เคียงกับพื้นที่ผลเฉลย หากผลลัพธ์ไม่ถึง 0.5 แสดงว่าโมเดลทำนายพื้นที่ที่ต่างจากผลเฉลยมากถือว่ายอมรับไม่ได้จะเป็นค่า False Positive ดังภาพที่ 3 โดยคำนวณได้จากสมการ (1) Mean Average Precision (mAP) คือ ค่าเฉลี่ยของค่า Average Precision (AP) ของแต่ละคลาสแล้วนำค่า AP ทุกคลาส

ตารางที่ 1 รอยบกพร่องของรอยเชื่อมและเกณฑ์การยอมรับ

ประเภทของรอยบกพร่อง	ลักษณะของข้อบกพร่อง	ผลกระทบต่อชิ้นส่วนที่ผลิตขึ้น
a. รอยแตก (Crack) [15]	สังเกตได้จากรอยแตกตามยาว ขว้าง หรือเป็น ร้างแห ซึ่งบ่งบอกถึงความไม่ต่อเนื่องในเนื้อโลหะ	ลดความแข็งแรงทางโครงสร้าง ขาด ความเสถียร
b. รูพรุน (Porosity) [16]	ลักษณะเป็นรูพรุนขนาดเล็กจำนวนมากที่กระจาย อยู่บนผิวหน้าหรือภายในเนื้อเชื่อม เกิดจากก๊าซที่ เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการเชื่อมที่ไม่สามารถ แทรกตัวจากแนวเชื่อมที่กำลังแข็งตัวได้ ทำให้เกิด ช่องว่าง	อายุการใช้งานลดลง ความแข็งแรงทาง กลดลดลง อาจเกิดการกัดกร่อนและการ รั่วซึม
c. สะเก็ดเชื่อม (Spatter) [17]	เป็นเม็ดโลหะเล็กๆ ที่กระเด็นออกมาจากบริเวณที่ ทำการเชื่อมและเกาะติดอยู่บนผิวชิ้นงานรอบๆ แนวเชื่อม	ผิวชิ้นงานไม่สมบูรณ์ อาจเป็นจุดเริ่มต้น ของรอยร้าวขนาดเล็กและการกัดกร่อน เฉพาะจุด
d. แนวเชื่อม (welding line)	แนวเชื่อม หรือแนวรอยต่อที่เกิดจากการหลอม ละลายเนื้อโลหะสองชิ้นให้ติดกัน	



ภาพที่ 3 การหาค่า IoU

มาเฉลี่ยเข้าด้วยกันเพื่อให้ได้ค่า mAP ที่เป็นตัวบ่งชี้ความสามารถของโมเดลในการทำนายคลาสหรือวัตถุที่แตกต่างกันในภาพ โดยมี กระบวนการหาค่า mAP ดังนี้ 1. คำนวณค่า Precision และ Recall ของโมเดลที่ตรวจจับวัตถุในแต่ละคลาส (2) , (3) , (4) 2. คำนวณค่า AP ของแต่ละคลาสจาก Precision และ Recall ที่ได้ (5) 3. คำนวณค่า mAP โดยเอาค่า AP ของแต่ละคลาสมา เฉลี่ย (6) คำนวณได้จากสมการดังนี้

$$IoU = \frac{A \cap B}{A \cup B} \quad (1)$$

$$Accuracy = \frac{TP + TN}{TP + TN + FP + FN} \quad (2)$$

$$Precision = \frac{TP}{TP + FP} \quad (3)$$

$$Recall = \frac{TP}{TP + FN} \quad (4)$$

$$AP = \int_0^1 p(r) dr \quad (5)$$

$$mAP = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k AP_i \quad (6)$$

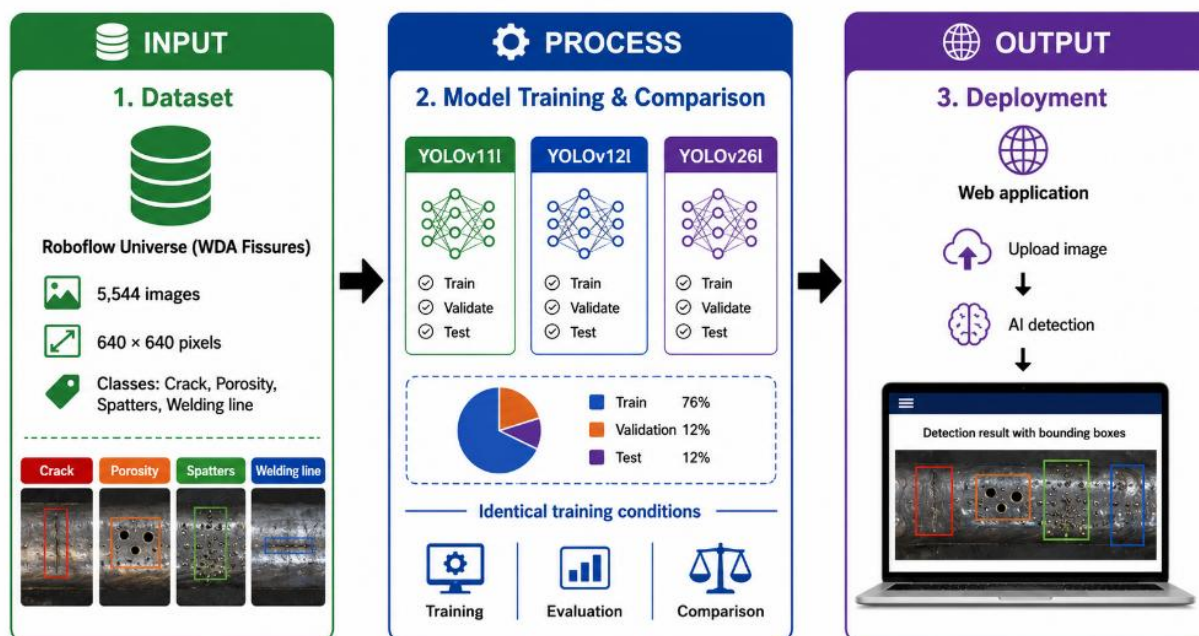


2. รูปแบบและวิธีการศึกษา

2.1 พัฒนาแบบจำลองด้วยอัลกอริทึมโครงข่ายประสาทเทียม โดยใช้โมเดล YOLOv11l, YOLOv12l และ YOLOv26l เป็นแม่แบบดังภาพที่ 4 เพื่อทำการตรวจจับและจำแนกข้อบกพร่องของรอยเชื่อมจากภาพถ่าย โดยชุดข้อมูลที่ใช้ในการศึกษานี้รวบรวมจาก Roboflow Universe (WDA Fissures) [18] ซึ่งประกอบด้วยภาพรอยเชื่อมจำนวนทั้งสิ้น 5,544 ภาพ โดยทุกภาพมีความละเอียด 640×640 พิกเซล ชุดข้อมูลดังกล่าวได้รับการกำหนดป้ายกำกับสำหรับการตรวจจับวัตถุจำนวน 4 ประเภท โดยข้อมูลรายคลาส (class distribution) ของชุดข้อมูล ได้แก่ รอยแตก (Crack), รูพรุน (Porosity), สะเก็ดเชื่อม (Spatter) และ แนวเชื่อม (Weld Line) ทั้งนี้ตัวอย่างภาพและป้ายกำกับจริง (ground truth annotations) ชุดข้อมูลนี้ครอบคลุมลักษณะข้อบกพร่องในการเชื่อมที่พบได้บ่อยในงานอุตสาหกรรม และมีการระบุขอบเขตวัตถุอย่างละเอียด ซึ่งช่วยสนับสนุนการฝึกสอนแบบจำลองให้เรียนรู้ลักษณะเชิงพื้นที่ของข้อบกพร่องได้อย่างเหมาะสม นอกจากนี้ความหลากหลายของตัวอย่างภาพยังช่วยเพิ่มความสามารถในการนำแบบจำลองไปประยุกต์ใช้กับสถานการณ์จริง สำหรับการฝึกและประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองชุดข้อมูลถูกแบ่งออกเป็น 3 ส่วน ได้แก่ ชุดฝึก (training set) 4,230 ภาพ (76%), ชุดตรวจสอบ (validation set) 660 ภาพ (12%) และ ชุดทดสอบ (test set) 654 ภาพ (12%) การแบ่งข้อมูลในลักษณะนี้ช่วยให้มีข้อมูลเพียงพอสำหรับการเรียนรู้ของแบบจำลอง ขณะเดียวกันยังรักษาความน่าเชื่อถือของการประเมินผลผ่านชุด validation และ test ที่เป็นอิสระจากกัน โดยมีการแสดงการกระจายตัวของข้อมูลรายคลาสในชุดข้อมูล WDA Fissures รายงานเป็นจำนวนป้ายกำกับวัตถุหรือกรอบล้อมวัตถุ (annotation/bounding box) ของแต่ละคลาส เนื่องจากงานวิจัยนี้เป็นงานตรวจจับวัตถุ ซึ่งภาพหนึ่งภาพสามารถประกอบด้วยข้อบกพร่องได้มากกว่าหนึ่งตำแหน่ง ดังนั้น จำนวน annotation จึงมีมากกว่าจำนวนภาพทั้งหมด ผลของชุดข้อมูลมี annotation รวมทั้งสิ้น 92,093 รายการ แบ่งเป็นชุดฝึก 72,143 รายการ ชุดตรวจสอบ 12,675 รายการ และชุดทดสอบ 7,275 รายการ

2.2 การฝึกสอนโมเดล การฝึกและเปรียบเทียบแบบจำลองตรวจจับวัตถุ 3 แบบ ได้แก่ YOLOv11l YOLOv12l และ YOLOv26l ซึ่งมีความแตกต่างด้านความซับซ้อนของสถาปัตยกรรม อันส่งผลต่อความแม่นยำและความเร็วในการประมวลผล โดยการทดลองทั้งหมดดำเนินการภายใต้สภาพแวดล้อมเดียวกันเพื่อให้เปรียบเทียบได้อย่างเป็นธรรม ใช้ภาษา Python ที่ติดตั้ง Jupyter Notebook ซึ่งในการฝึกสอนโมเดล ผู้วิจัยกำหนดค่าพารามิเตอร์ให้เหมือนกันทุกโมเดลเพื่อความเป็นธรรมในการเปรียบเทียบ โดยใช้ขนาดภาพอินพุต 640×640 พิกเซล กำหนด batch เท่ากับ 12 และทดลองฝึกสอนที่ 100, 200 และ 300 epochs เพื่อศึกษาผลของจำนวนรอบการเรียนรู้ต่อประสิทธิภาพของโมเดล นอกจากนี้กำหนดค่า patience เท่ากับ 50 สำหรับ Early Stopping และใช้ AdamW เป็น optimizer เพื่อช่วยปรับค่าน้ำหนักของโมเดลให้มีประสิทธิภาพ พร้อมกำหนดค่า seed เท่ากับ 42 เพื่อให้สามารถทำการทดลองซ้ำได้ อีกทั้งกำหนดค่า NMS IoU threshold เท่ากับ 0.7 เพื่อลดการตรวจจับวัตถุซ้ำซ้อนและเพิ่มความแม่นยำในการตรวจจับข้อบกพร่องของรอยเชื่อม

2.3 การนำโมเดลไปใช้งาน ในการศึกษาเริ่มจากการประเมินประสิทธิภาพของโมเดลตรวจจับวัตถุด้วยตัวชี้วัดมาตรฐาน ได้แก่ Accuracy, Precision, Recall และ mAP โดยค่า Accuracy ใช้แสดงสัดส่วนของจำนวนตัวอย่างที่โมเดลทำนายถูกต้องเมื่อเทียบกับจำนวนตัวอย่างทั้งหมดในชุดทดสอบ ส่วนค่า Precision ใช้ประเมินความแม่นยำของการทำนายว่าเป็นวัตถุ (สัดส่วนของวัตถุที่ตรวจจับถูกต้องต่อจำนวนที่โมเดลทำนายว่าเป็นวัตถุ) และค่า Recall ใช้ประเมินความครบถ้วนของการตรวจจับ (สัดส่วนของวัตถุที่ตรวจจับถูกต้องต่อจำนวนวัตถุจริงทั้งหมด) ซึ่งทั้งสองค่ายังมีค่าเข้าใกล้ 1 ยิ่งสะท้อนถึงประสิทธิภาพของโมเดลที่สูงขึ้น นอกจากนี้ยังใช้ค่า mAP@0.5 เป็นตัวชี้วัดหลัก โดยคำนวณจากค่าเฉลี่ยของ Average Precision (AP) ของทุกคลาสนำไปหารค่า IoU เท่ากับ 0.5 ซึ่งผลการทำนายจะถือว่าถูกต้องเมื่อกรอบทำนาย (bounding box) มีค่า IoU กับกรอบคำตอบจริง (ground truth) ตั้งแต่ 0.5 ขึ้นไป หลังจากฝึกสอนโมเดล YOLOv11l, YOLOv12l และ YOLOv26l เสร็จสิ้นแล้ว จึงทำการติดตั้งและเตรียมความพร้อมสำหรับการใช้งานจริง โดยนำไฟล์โมเดลที่ผ่านการฝึกสอนแล้ว (best.pt) จากเครื่องคอมพิวเตอร์ไปโหลดและวางไว้ในระบบเว็บไซต์ เพื่อใช้ในการทดสอบและประมวลผลการตรวจจับข้อบกพร่องบนสภาพแวดล้อมการใช้งานจริง



ภาพที่ 4 block diagram

2.4 การวิจัยนี้พัฒนาระบบสำหรับการตรวจจับข้อบกพร่องรอยเชื่อมในรูปแบบเว็บแอปพลิเคชัน โดยเขียนโปรแกรมด้วยภาษา PHP และออกแบบโครงสร้างซอฟต์แวร์ตามแนวคิดการเขียนโปรแกรมเชิงวัตถุ (Object-Oriented Programming: OOP) เพื่อให้ระบบมีความเป็นระเบียบ สามารถแยกส่วนการทำงาน เช่น ส่วนรับภาพเข้า ส่วนประมวลผลโมเดล ส่วนแสดงผล และส่วนจัดการข้อมูล ได้อย่างชัดเจน อีกทั้งยังสะดวกต่อการปรับปรุงและขยายระบบในอนาคต เว็บแอปพลิเคชันที่พัฒนาขึ้นรองรับการนำโมเดลตรวจจับที่ผ่านการฝึกสอนแล้วมาใช้งานจริงสำหรับการทดสอบและสาธิตผลการตรวจจับผ่านหน้าเว็บ โดยเผยแพร่ในรูปแบบออนไลน์เพื่อให้สามารถเข้าถึงและใช้งานได้สะดวกผ่านลิงก์ <http://btech-rmutk.com/welding/> ซึ่งช่วยให้สามารถประเมินการทำงานของระบบในบริบทการใช้งานจริงได้

2.5 การเชื่อมโมเดลกับหน้าเว็บแอปพลิเคชัน งานวิจัยนี้ดำเนินการโดยนำโมเดลที่ผ่านการฝึกสอนแล้วมาเตรียมให้อยู่ในรูปแบบที่เหมาะสมต่อการใช้งานบนเว็บแอปพลิเคชัน (.onnx) และเชื่อมต่อเข้ากับหน้าเว็บที่พัฒนาด้วย PHP โดยโครงสร้างการทำงานแบ่งเป็น 2 ส่วนสำคัญ ได้แก่ ส่วนแสดงผลหน้าเว็บ (frontend) และส่วนจัดการคำขอ/ฐานข้อมูล (backend) ในส่วนหน้าเว็บ มีการออกแบบหน้าทดสอบโมเดลให้ผู้ใช้สามารถอัปโหลดภาพ กำหนดค่า threshold และดูผลการตรวจจับได้แบบโต้ตอบ (interactive) ขณะเดียวกันหน้าเว็บจะเรียกใช้สคริปต์สำหรับโหลดโมเดลและประมวลผลภาพ จากนั้นจึงนำผลลัพธ์การตรวจจับ เช่น ชื่อคลาส ค่าความเชื่อมั่น และพิกัดกรอบวัตถุ มาแสดงผลบนภาพโดยตรง สำหรับส่วนหลังบ้าน PHP ทำหน้าที่รับข้อมูลผลการตรวจจับจากหน้าเว็บในรูปแบบข้อมูล JSON แล้วบันทึกลงฐานข้อมูลเพื่อใช้งานในหน้ารายงานผล (Dashboard) โดยการออกแบบหน้าเว็บ

ผลการวิจัย

การวิจัยนี้มุ่งประเมินประสิทธิภาพของแบบจำลองตรวจจับวัตถุสำหรับงานตรวจจับข้อบกพร่องรอยเชื่อม โดยเปรียบเทียบแบบจำลอง YOLOv11l , YOLOv12l และ YOLOv26l ภายใต้สภาพแวดล้อมการทดลองเดียวกันทั้งหมด ทั้งในด้านความแม่นยำในการตรวจจับและความเร็วในการประมวลผล ผลการทดลองจากชุดข้อมูลรอยเชื่อมจำนวน 5,544 ภาพ



ซึ่งประกอบด้วย 4 คลาส ได้แก่ Crack (รอยแตก), Porosity (รูพรุน), Spatter (เศษโลหะกระเด็น) และ Weld Line (แนวเชื่อม) แสดงให้เห็นว่าแบบจำลองทั้งสองสามารถตรวจจับข้อบกพร่องได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยมีการเปรียบเทียบผลการทดลองของโมเดล ดังนี้

1. ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของโมเดล

ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพโมเดล YOLOv11l, YOLOv12l และ YOLOv26l พบว่าค่าผลการประเมินประสิทธิภาพของโมเดลทั้ง 3 เวอร์ชัน ประสิทธิภาพในการตรวจจับและใช้เวลาในการตรวจจับอยู่ในเกณฑ์ที่เหมาะสม ดังตารางที่ 2 และ ตารางเปรียบเทียบ Per-class Average Precision (AP) ดังตารางที่ 3 แสดงผลการเปรียบเทียบพบว่า YOLOv26l ให้ประสิทธิภาพสูงสุด โดยเฉพาะที่ 300 epochs แสดงถึงความแม่นยำและความครอบคลุมที่ดีที่สุดโดยรวมแนวโน้มทุกโมเดลมีประสิทธิภาพเพิ่มขึ้นเมื่อจำนวน epochs มากขึ้น แต่หลัง 200 epochs การเพิ่มขึ้นเริ่มชะลอตัว ดังนั้น YOLOv26l ที่ 300 epochs เป็นค่าที่เหมาะสมที่สุดสำหรับงานตรวจจับตำหนิในชุดข้อมูลนี้

ตารางที่ 2 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพโดยรวมที่จำนวนรอบการฝึกต่างกัน

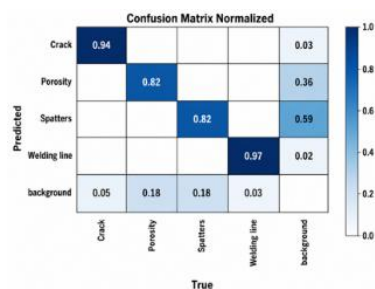
Model	Epochs	Precision	Recall	mAP50	mAP50-95	F1-score
YOLOv11l	100	0.885	0.850	0.883	0.696	0.86
	200	0.895	0.870	0.885	0.721	0.88
	300	0.884	0.866	0.883	0.728	0.87
YOLOv12l	100	0.889	0.845	0.884	0.699	0.86
	200	0.905	0.863	0.899	0.735	0.88
	300	0.884	0.852	0.891	0.735	0.86
YOLOv26l	100	0.891	0.853	0.887	0.711	0.87
	200	0.902	0.875	0.902	0.751	0.88
	300	0.91	0.876	0.908	0.773	0.89

ตารางที่ 3 ตารางเปรียบเทียบ Per-class Average Precision (AP)

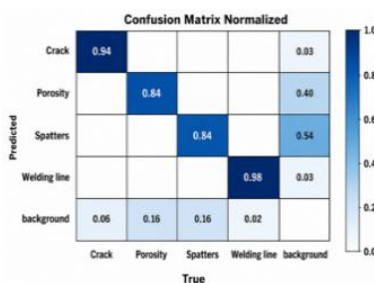
Model	Epochs	Crack	Porosity	Spatters	Welding line
YOLOv11l	100	0.939	0.788	0.832	0.975
	200	0.889	0.815	0.862	0.977
	300	0.896	0.809	0.851	0.974
YOLOv12l	100	0.953	0.780	0.823	0.978
	200	0.961	0.804	0.854	0.974
	300	0.942	0.800	0.849	0.973
YOLOv26l	100	0.954	0.777	0.844	0.971
	200	0.965	0.801	0.870	0.971
	300	0.960	0.819	0.879	0.976



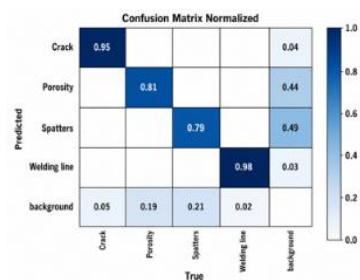
จากตารางที่ 3 แสดงให้เห็นว่าผลจาก Per-class Average Precision (AP) แสดงว่า YOLOv26 ที่ 300 epochs ให้ค่า AP สูงสุดในหลายคลาส โดยเฉพาะ Porosity (0.819) และ Spatters (0.879) ขณะที่ Crack และ Welding line ให้ค่าสูงสม่ำเสมอทุกโมเดล (0.95–0.97) แนวโน้มโดยรวมพบว่าการเพิ่ม epochs ช่วยเพิ่มประสิทธิภาพ โดยเฉพาะในคลาสที่จำแนกยาก เช่น Porosity และ Spatters ดังนั้น YOLOv26 (300 epochs) แสดงสมรรถนะโดยรวมดีที่สุดและมีความสมดุลระหว่างทุกคลาสมากที่สุด



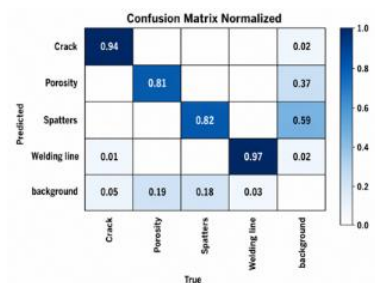
(a1) YOLOv11 epoch 100



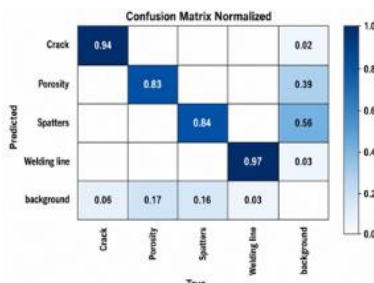
(a2) YOLOv11 epoch 200



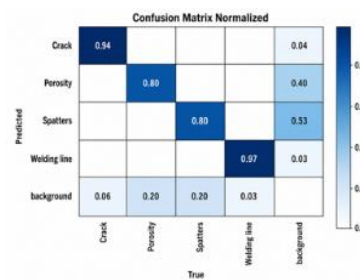
(a3) YOLOv11 epoch 300



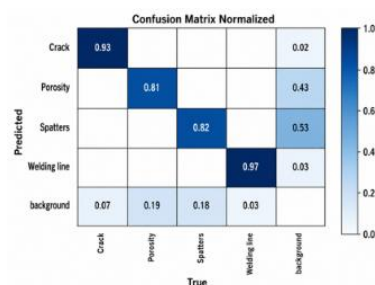
(b1) YOLOv12 epoch 100



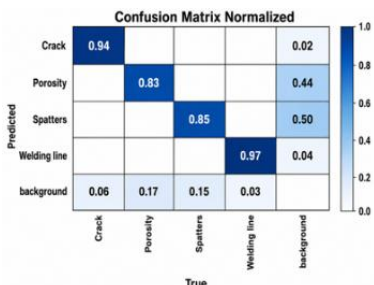
(b2) YOLOv12 epoch 200



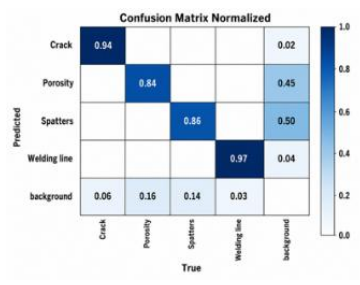
(b3) YOLOv12 epoch 300



(c1) YOLOv26 epoch 100



(c2) YOLOv26 epoch 200



(c3) YOLOv26 epoch 300

ภาพที่ 5 ค่า Confusion Matrix

2. ผลวิเคราะห์ผลลัพธ์ตาราง Confusion Matrix

จากภาพที่ 5 แสดง Confusion Matrix ของโมเดล YOLOv11, YOLOv12 และ YOLOv26 ที่จำนวนรอบการฝึก 100, 200 และ 300 epochs พบว่าค่าบนแนวทแยงหลักมีค่าสูงอย่างสม่ำเสมอ โดยเฉพาะคลาส Crack และ Welding line ซึ่งสะท้อนว่าโมเดลสามารถจำแนกคลาสดังกล่าวได้อย่างแม่นยำ ในขณะที่คลาส Porosity และ Spatters ยังคงมีความสับสนกับคลาสพื้นหลังมากกว่าคลาสนั้น เนื่องจากลักษณะพื้นผิวของข้อบกพร่องมีความคล้ายคลึงกับบริเวณรอยเชื่อมและพื้นหลังโดยรอบ เมื่อพิจารณาผลในแต่ละจำนวนรอบการฝึก พบว่าการเพิ่ม epochs ช่วยปรับปรุงค่าการจำแนกบางคลาสดูเล็กน้อย อย่างไรก็ตาม แนวโน้มโดยรวมเริ่มเข้าใกล้จุดอิ่มตัวของประสิทธิภาพ โดยโมเดล YOLOv26 ที่ 300 epochs ให้ผลการจำแนกที่สมดุลที่สุดเมื่อเทียบกับเงื่อนไขอื่น



3. ผลการพัฒนาระบบ

การพัฒนาเว็บแอปพลิเคชัน โดยการรวมโมเดลที่ให้ค่าที่ดีที่สุดในแต่ละคลาส ผลการเปรียบเทียบทั้ง 3 โมเดลบนภาพทดสอบเดียวกันพบว่า YOLOv26 (Epoch 200 และ 300) ให้ความเร็วสูงกว่า YOLOv12 (Epoch 100) เล็กน้อย โดยมี FPS 0.28 และ Latency 3.53–3.55 วินาที/ภาพ ขณะที่ YOLOv12 ได้ FPS 0.25 และ Latency 4.04 วินาที/ภาพ แสดงว่า YOLOv26 ตอบสนองเร็วขึ้นประมาณ 0.5 วินาที/ภาพ เหมาะสำหรับการใช้งานเชิงปฏิบัติการมากกว่าในบริบทระบบเว็บดังกล่าวที่ 6 และ รายงานผลการบันทึกการเปรียบเทียบเพื่อใช้สำหรับตรวจสอบ ดังภาพที่ 7



ต้นฉบับ



Yolov12epoch100 FPS: 0.25, Latency: 4038.30 ms, Objects: 14

สรุปรอยข้อบกพร่องที่ตรวจพบ Porosity: 7 , Spatter: 4 , Weld Line: 2, Crack: 1



Yolov26 epoch200 FPS: 0.28, Latency: 3552.10 ms, Objects: 11

สรุปรอยข้อบกพร่องที่ตรวจพบ Porosity: 6 , Weld Line: 2, Spatter: 2, Crack: 1



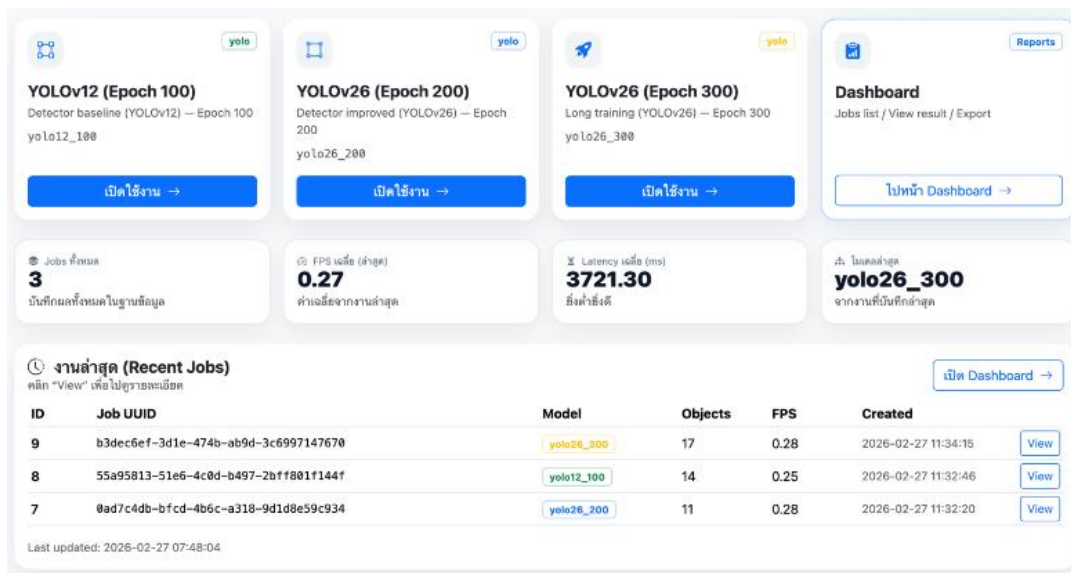
Yolov26 epoch300 FPS: 0.28, Latency: 3533.20 ms, Objects: 17

สรุปรอยข้อบกพร่องที่ตรวจพบ Porosity: 10, Spatter: 4, Weld Line: 2, Crack: 1

ภาพที่ 6 ผลการเปรียบเทียบ 3 โมเดล

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

จากการเปรียบเทียบสถาปัตยกรรม YOLOv11l, YOLOv12l และ YOLOv26l สำหรับการตรวจจับข้อบกพร่องบนรอยเชื่อม พบว่า YOLOv26l ให้ประสิทธิภาพสูงที่สุด โดยเฉพาะที่ 300 epochs ซึ่งให้ค่า Precision = 0.91, Recall = 0.876, F1-score = 0.89, mAP50 = 0.908 และ mAP50-95 = 0.773 แสดงให้เห็นว่าโมเดลดังกล่าวสามารถตรวจจับและระบุตำแหน่งข้อบกพร่องได้ดีกว่าโมเดลอื่นภายใต้เงื่อนไขการทดลองเดียวกัน ทั้งนี้การเพิ่มจำนวน epochs ช่วยปรับปรุงประสิทธิภาพของโมเดลได้ แต่หลัง 200 epochs เป็นต้นไป ผลลัพธ์มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเพียงเล็กน้อย ในระดับรายการคลาส โมเดลสามารถตรวจจับ Crack และ Welding line



ภาพที่ 7 รายงานผลการบันทึกการเปรียบเทียบ

ได้อย่างสม่ำเสมอ ขณะที่ Porosity และ Spatters ยังคงเป็นคลาสที่ทำหาย เนื่องจากมีลักษณะคล้ายพื้นหลังและมีขอบเขตไม่ชัดเจน ซึ่งสอดคล้องกับงานของ Ling และคณะ [5] ที่ระบุว่าภาพรอยเชื่อมมีพื้นหลังซับซ้อน และขอบกพร่องบางประเภทมีลักษณะใกล้เคียงกับพื้นผิวโลหะ อีกทั้งสอดคล้องกับ Zhang และคณะ [19] ที่เน้นการจัดการตำหนิที่มีขอบเขตกำกวมด้วยการผสานคุณลักษณะหลายระดับ

ผลการวิจัยนี้สนับสนุนแนวโน้มการใช้แบบจำลองเชิงลึกสำหรับการตรวจสอบคุณภาพรอยเชื่อมอัตโนมัติ โดยสอดคล้องกับ Cheng และคณะ [20] ที่ประยุกต์ใช้วิธีตรวจจับรอยบกพร่องในการเชื่อมแบบหลายขนาด โดยอาศัยการปรับปรุงภาพแบบปรับตัวตามสภาพและ Gui และคณะ [9] ที่เสนอแนวทางเพิ่มความสามารถของ YOLO ในการตรวจจับวัตถุขนาดเล็ก ดังนั้น YOLOv26 [21] จึงมีศักยภาพสำหรับการพัฒนาเป็นระบบต้นแบบตรวจจับข้อบกพร่องรอยเชื่อมผ่านเว็บแอปพลิเคชัน อย่างไรก็ตามงานวิจัยนี้ยังมีข้อจำกัดจากการใช้ชุดข้อมูลสาธารณะเพียงชุดเดียว ความไม่สมดุลของข้อมูลรายคลาส และการยังไม่ได้ทดสอบกับสายการผลิตจริงแบบต่อเนื่อง ในอนาคตควรเพิ่มชุดข้อมูลจากสภาพแวดล้อมอุตสาหกรรมจริง ทดสอบระบบแบบวิดีโอเรียลไทม์ เปรียบเทียบกับโมเดลนอกกลุ่ม YOLO และประเมินผลร่วมกับผู้เชี่ยวชาญด้านงานเชื่อม เพื่อยืนยันความเหมาะสมต่อการใช้งานจริง

เอกสารอ้างอิง

1. Deepak JR, Bupesh Raja VK, Srikanth D, Surendran H, Nickolas MM. Non-destructive testing (NDT) techniques for low carbon steel welded joints: A review and experimental study. Mater Today Proc 2021;44:3732-7.
2. He G, Gao X, Zhang Y. Magneto optical imaging non-destructive testing of welding defects with controlled rotationally excited magnetic field based on improved NSCT-GWO-PCNN image fusion. Opt Lasers Eng 2026;201:109718.
3. Hussain M. YOLO-v1 to YOLO-v8, the Rise of YOLO and Its Complementary Nature toward Digital Manufacturing and Industrial Defect Detection. Machines 2023;11(7):677.



4. Mendieta EE, Quintero H, Pinzon-Acosta C. Application of convolutional neural networks for surface discontinuities detection in shielded metal arc welding process. *Front Robot AI* 2025;12:1632417.
5. Ling L, Wei G, Liu Y, Xu S, Wei L, Hong B. RBPSD-YOLOv8: weld surface defect detection based on improved YOLOv8. *J Real Time Image Process* 2025;22(4):152.
6. Wang CY, Yeh IH, Liao HYM. YOLOv9: Learning what you want to learn using programmable gradient information. In: proceedings of the 18th European Conference on Computer Vision (ECCV), September 29-October 4, 2024; Milan, Italy; 2024. p. 1-21.
7. Chairunisa YA, Kosala G. Performance comparison of YOLOv9, YOLOv10, and YOLOv11 for detecting highway potholes. In: proceedings of the 2025 International Conference on Data Science and Its Applications (ICoDSA), July 3-5, 2025; Jakarta, Indonesia; 2025. p. 7-12.
8. He L, Zhou Y, Liu L, Ma J. Research and application of YOLOv11-based object segmentation in intelligent recognition at construction sites. *Buildings* 2024;14(12):3777.
9. Gui Y, Xiao X, Fu Y, Yao M. A local training paradigm for YOLO models to enhance tiny object detection. *Results Eng* 2026;29:109835.
10. Redmon J, Farhadi A. YOLO9000: Better, faster, stronger. In: proceedings of the 2017 IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), July 21-26, 2017; Honolulu, HI, USA; 2017. p. 6517-25.
11. Kang S, Hu Z, Liu L, Zhang K, Cao Z. Object detection YOLO algorithms and their industrial applications: Overview and comparative analysis. *Electronics* 2025;14(6):1104.
12. Wang CY, Bochkovskiy A, Liao HYM. YOLOv7: trainable bag-of-freebies sets new state-of-the-art for real-time object detectors. In: proceedings of the 2023 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), June 17-24, 2023; Vancouver, BC, Canada; 2023. p. 7464-75.
13. Wang A, Chen H, Liu L, Chen K, Lin Z, Han J, et al. Yolov10: Real-time end-to-end object detection. *Adv Neural Inf Process Syst* 2024;37: 107984-8011.
14. Yang C, Huang Z, Wang N. QueryDet: Cascaded sparse query for accelerating high-resolution small object detection. In: proceedings of the 2022 IEEE/CVF Conference on Computer Vision and Pattern Recognition (CVPR), June 18-24, 2022; New Orleans, LA, USA; 2022. p. 13668-77.
15. Tomków J, Rogalski G, Fydrych D, Łabanowski J. Improvement of S355G10+N steel weldability in water environment by Temper Bead Welding. *J Mater Process Technol* 2018;262:372-81.
16. Kam DH, Lee TH, Kim DY, Kim J, Kang M. Weld quality improvement and porosity reduction mechanism of zinc coated steel using tandem gas metal arc welding (GMAW). *J Mater Process Technol* 2021;294:117127.
17. Omoniyi PO, Mahamood RM, Akinlabi ET. Impact of process parameters of laser welding on the mechanical properties of Ti6Al4V: a review. *J Chem Technol Metall* 2021;56:1074-81.
18. Aminerealm. WDA fissures Dataset. Roboflow Universe [Internet]. 2025 [cited 2025 May 16]. Available from: <https://universe.roboflow.com/aminerealm/wda-fissures/dataset/2>



19. Zhang M, Hu Y, Xu B, Luo L, Wang S. DSF-YOLO for weld defect detection in X-ray images with dynamic staged fusion. *Sci Rep* 2025;15(1):23305.
20. Cheng H, Jiang H, Jing D, Huang L, Gao J, Zhang Y, et al. Multiscale welding defect detection method based on image adaptive enhancement. *Knowl-Based Syst* 2025;327:114174.
21. Anusree R, Hareendranathan RA, Suhail CPM. Nodule detection in breast ultrasound using deep learning-based instance segmentation. In: *proceedings of the 2026 International Conference on Future and Advanced Computing Technologies (ICFACT)*, March 26-27, 2026; Krishnankoil, Tamil Nadu, India; 2026. p. 1-6.



การตรวจจับพฤติกรรมผิดปกติของเหตุการณ์การเข้าถึงไฟล์บนระบบคลาวด์แบบเรียลไทม์ โดยใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องแบบสตรีม

Real-Time Anomaly Detection of Cloud File Access Events Using Streaming Machine Learning Techniques

พงษ์พิชญ์ เลิศเจริญวุฒา เสกสรรค์ ศิวิลัย และ ธงรบ อักษร*

สาขาวิชาเทคโนโลยีสารสนเทศ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม พิษณุโลก 65000

Phongphit Loescharoenwutha, Sakesan Sivilai and Thongrob Auxsorn*

Department of Information Technology, Faculty of Science and Technology,

Pibulsongkram Rajabhat University, Phitsanulok 65000

*Corresponding author: auxsorn@psru.ac.th

Received: 23 May 2026/ Revised: 21 June 2026/ Accepted: 23 June 2026

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาแนวทางการตรวจจับพฤติกรรมผิดปกติของเหตุการณ์การเข้าถึงไฟล์บนระบบคลาวด์แบบเรียลไทม์ โดยใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องแบบสตรีม งานวิจัยดำเนินการเป็น 5 ระยะ ได้แก่ การสร้างแบบจำลองพื้นฐาน การตรวจสอบเสถียรภาพของโมเดล การจัดอันดับความสำคัญของฟีเจอร์ การเปรียบเทียบผลภายใต้ชุดฟีเจอร์ที่ลดลง และการทดลองหลักบนข้อมูลแบบสตรีมที่จำลองขึ้นโดยการปรับโครงสร้างข้อมูลบันทึกเหตุการณ์ HDFS ให้สอดคล้องกับโครงสร้างเหตุการณ์การเข้าถึงไฟล์บนระบบคลาวด์ ซึ่งใช้ชุดข้อมูลรวมทั้งสิ้น 250,000 เหตุการณ์ (แบ่งเป็นเหตุการณ์ปกติ 225,000 เหตุการณ์ และเหตุการณ์ผิดปกติ 25,000 เหตุการณ์) โมเดลที่ใช้ในการศึกษา ได้แก่ Half-Space Trees (HST), Logistic Regression (LR) และ Adaptive Random Forest (ARF) โดยประเมินผลด้วยวิธีเพรีเคเวนเซียล ซึ่งเหมาะสมกับข้อมูลที่ไหลเข้าต่อเนื่องตามเวลา ผลการศึกษาพบว่า ARF ให้ผลดีที่สุดเชิงตัวเลขเมื่อใช้ชุดฟีเจอร์หลักร่วมกับฟีเจอร์ที่สร้างเพิ่มเติม 11 ตัว โดยมี Accuracy เท่ากับ 0.849965 และ F1-score เท่ากับ 0.839121 อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาพร้อมกับจำนวนฟีเจอร์และความซับซ้อนของระบบ พบว่าชุดฟีเจอร์หลักร่วมกับฟีเจอร์ที่สร้างเพิ่มเติม 5 ตัว มีความเหมาะสมมากกว่าสำหรับการนำไปใช้จริง โดยยังคงให้ Accuracy เท่ากับ 0.803863 และ F1-score เท่ากับ 0.782305 สรุปได้ว่า ARF เป็นโมเดลหลักที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการตรวจจับความผิดปกติในข้อมูลสตรีมของระบบไฟล์บนคลาวด์ และผลที่ได้สามารถใช้เป็นฐานสำหรับการพัฒนาระบบตรวจจับและแจ้งเตือนความเสี่ยงในสภาพแวดล้อมจริงต่อไป

คำสำคัญ: การตรวจจับ ความผิดปกติ เหตุการณ์การเข้าถึงไฟล์ ระบบคลาวด์ การเรียนรู้ของเครื่องแบบสตรีม

Abstract

This study aimed to develop a real-time anomaly detection approach for cloud file access events using streaming machine learning techniques. The research was organized into five phases: baseline model construction, model stability analysis, feature importance ranking, reduced feature-set comparison, and the

main experiment on a schema-adapted data stream transformed from HDFS logs to mimic cloud file access events. The evaluation utilized a streaming dataset comprising a total of 250,000 events (consisting of 225,000 normal events and 25,000 anomalous events). The models examined in this study were Half-Space Trees (HST), Logistic Regression (LR), and Adaptive Random Forest (ARF), and their performance was evaluated using the prequential approach, which is suitable for continuously arriving data. The results showed that ARF achieved the highest numerical performance when the core feature set was combined with 11 additional engineered features, with an Accuracy of 0.849965 and an F1-score of 0.839121. However, when the number of features and system complexity were also considered, the core feature set combined with 5 additional engineered features was more appropriate for practical use, while still maintaining an Accuracy of 0.803863 and an F1-score of 0.782305. These findings indicate that ARF is the most suitable primary model for anomaly detection in cloud file-system streams, and that the selected feature configuration can serve as a basis for developing a risk detection and alerting system in real-world cloud environments.

Keywords: detection, anomaly, cloud, file access events, streaming machine learning

บทนำ

ในปัจจุบันคลาวด์คอมพิวเตอร์เป็นโครงสร้างพื้นฐานที่องค์กรจำนวนมากใช้สำหรับการจัดเก็บข้อมูล การประมวลผล และให้บริการระบบสารสนเทศ โดยเฉพาะการให้บริการโครงสร้างพื้นฐานบนคลาวด์หรือ Infrastructure as a Service (IaaS) ที่เปิดให้ผู้ใช้เข้าถึงทรัพยากรได้อย่างยืดหยุ่นมากขึ้น [1] อย่างไรก็ตามเมื่อข้อมูลและภาระงานถูกย้ายเข้าสู่สภาพแวดล้อมคลาวด์มากขึ้น ความเสี่ยงด้านความมั่นคงปลอดภัยของข้อมูลก็เพิ่มขึ้นตามไปด้วย โดยเฉพาะเหตุการณ์การเข้าถึงหรือเปลี่ยนแปลงไฟล์ที่อาจเกิดขึ้นโดยไม่ได้รับอนุญาต ซึ่งเป็นหนึ่งในจุดเริ่มต้นของการละเมิดข้อมูลในองค์กรได้ [2, 3]

งานวิทยานิพนธ์ก่อนหน้าที่ได้ศึกษารอบการวัดประสิทธิภาพของระบบบันทึกเหตุการณ์ในสภาพแวดล้อมคลาวด์ประเภท IaaS ชี้ให้เห็นว่าระบบบันทึกเหตุการณ์มีความสำคัญต่อการเก็บหลักฐานของการเข้าถึงและการกระทำที่เกิดขึ้นกับไฟล์ โดยเฉพาะเมื่อต้องตรวจสอบย้อนหลังหรือระบุผู้ที่เกี่ยวข้องกับเหตุการณ์ผิดปกติ [4] งานดังกล่าวจึงเป็นฐานสำคัญที่ทำให้เห็นบทบาทของ log ในระบบคลาวด์อย่างเป็นรูปธรรม แต่ในอีกด้านหนึ่งยังเหลือช่องว่างที่ควรศึกษาต่อ คือ ข้อมูล log ยังถูกใช้ในลักษณะของการเก็บหลักฐานและตรวจสอบภายหลังเป็นหลัก มากกว่าการนำมาใช้วิเคราะห์พฤติกรรมผิดปกติในขณะที่เหตุการณ์กำลังเกิดขึ้น [5]

ช่องว่างนี้มีผลโดยตรงต่อการออกแบบระบบตรวจจับความเสี่ยง เพราะเหตุการณ์ของระบบไฟล์ในสภาพแวดล้อมคลาวด์ไม่ได้เกิดขึ้นเป็นชุดข้อมูลนิ่ง แต่เกิดขึ้นต่อเนื่องตามเวลา หากระบบรอให้เหตุการณ์ผ่านไปก่อนแล้วจึงตรวจสอบย้อนหลัง การตอบสนองต่อความเสี่ยงอาจช้าเกินไป โดยเฉพาะกรณีที่มีการเปลี่ยนสิทธิ์ไฟล์ การเข้าถึงไฟล์ที่มีความเสี่ยง หรือพฤติกรรมที่ค่อย ๆ เบี่ยงออกจากรูปแบบปกติ งานวิจัยนี้จึงนำช่องว่างดังกล่าวมาเป็นจุดตั้งต้นในการพัฒนาแนวทางตรวจจับพฤติกรรมผิดปกติของเหตุการณ์การเข้าถึงไฟล์ด้วยเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องแบบสตรีม

แม้ในช่วงหลังจะมีการนำเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องมาใช้กับข้อมูลบันทึกเหตุการณ์มากขึ้น แต่งานจำนวนหนึ่งยังประเมินผลบนชุดข้อมูลแบบคงที่ หรือเน้นโมเดลเพียงชนิดเดียว ทำให้ยังสะท้อนธรรมชาติของข้อมูลที่เปลี่ยนแปลงตามเวลาได้ไม่เต็มที่ [6-8] ด้วยเหตุนี้การประเมินผลแบบสตรีมจึงมีความสำคัญ เพราะช่วยจำลองลักษณะการทำงานของระบบตรวจจับที่ต้องรับข้อมูลใหม่เข้ามาอย่างต่อเนื่อง และต้องตัดสินใจจากข้อมูลที่มีอยู่ในขณะนั้น ไม่ใช่จากข้อมูลที่ถูกรวบรวมครบถ้วนไว้ล่วงหน้า



สำหรับงานวิจัยนี้ ข้อมูลตั้งต้นเป็นเหตุการณ์ปกติที่จัดเตรียมจากบันทึกเหตุการณ์ของระบบ HDFS/DataNode แล้วปรับให้อยู่ในรูปแบบเหตุการณ์ระบบไฟล์จำนวน 14 ฟีเจอร์ [9] ข้อมูลส่วนนี้ถูกใช้เป็นฐานของพฤติกรรมปกติก่อนเข้าสู่การทดลองหลัก ส่วนเหตุการณ์ผิดปกติในระยะที่ 5 ถูกสร้างเพิ่มเติมโดยอ้างอิงลักษณะพฤติกรรมจากกรอบ MITRE ATT&CK และปรับให้สอดคล้องกับฟีเจอร์ของข้อมูลระบบไฟล์ [10] วิธีนี้ช่วยให้การทดลองยังยึดอยู่กับโครงสร้างข้อมูลเดิม แต่มีบริบทของเหตุการณ์ผิดปกติที่เพียงพอต่อการประเมินความสามารถของโมเดล

จากเหตุผลดังกล่าว งานวิจัยนี้จึงมุ่งพัฒนาแนวทางการตรวจจับพฤติกรรมผิดปกติของเหตุการณ์การเข้าถึงไฟล์บนระบบคลาวด์แบบเรียลไทม์ โดยใช้เทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องแบบสตรีม และประเมินผลด้วยวิธีฟรีเคเวนเซียล กระบวนการดำเนินงานวิจัยถูกออกแบบแบ่งออกเป็น 5 ระยะ ตั้งแต่การสร้างแบบจำลองพื้นฐาน การทดสอบเสถียรภาพ การคัดเลือกฟีเจอร์ จนถึงการศึกษาการทดลองหลักบนข้อมูลสตรีมแบบผสม ในส่วนของแบบจำลอง ผู้วิจัยได้นำโมเดล Half-Space Trees (HST), Logistic Regression (LR) และ Adaptive Random Forest (ARF) มาใช้เป็นโมเดลหลักในการวิเคราะห์และเปรียบเทียบประสิทธิภาพร่วมกัน

การเลือกแนวทางสุดท้ายของงานวิจัยนี้ไม่ได้พิจารณาเพียงว่าโมเดลใดให้ค่าประสิทธิภาพสูงที่สุดเท่านั้น แต่พิจารณาพร้อมกับจำนวนฟีเจอร์ ความซับซ้อนของระบบ และความเป็นไปได้ในการนำผลไปต่อยอดเป็นระบบตรวจจับและแจ้งเตือนความเสี่ยงในสภาพแวดล้อมคลาวด์จริง

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ออกแบบการทดลองเป็นการประเมินผลข้อมูลแบบสตรีม โดยแบ่งกระบวนการออกเป็น 5 ระยะ เพื่อค่อย ๆ ตรวจสอบตั้งแต่ข้อมูลตั้งต้น พฤติกรรมของโมเดล การคัดเลือกฟีเจอร์ ไปจนถึงการประเมินผลบนข้อมูลที่มีเหตุการณ์ผิดปกติร่วมด้วย การแยกระยะในลักษณะนี้ช่วยให้การตีความผลไม่ปะปนกันระหว่างการสร้างฐานพฤติกรรมปกติของระบบกับการตรวจจับ anomaly ในการทดลองหลัก

1. ข้อมูลและการจัดเตรียมข้อมูล

ข้อมูลตั้งต้นของงานวิจัยนี้จัดเตรียมจากชุดข้อมูล HDFS/DataNode logs ซึ่งเป็นบันทึกเหตุการณ์ของระบบไฟล์แบบกระจายที่ถูกใช้เป็นตัวอย่างสาธารณะในเอกสารของ Quickwit สำหรับการจัดทำและค้นคืนข้อมูล log เหตุผลที่เลือกใช้ข้อมูลกลุ่มนี้ เนื่องจากมีลักษณะใกล้เคียงกับเหตุการณ์ที่พบในระบบจัดเก็บไฟล์บนสภาพแวดล้อมคลาวด์ เช่น การอ้างอิงไฟล์ directory เวลา และบริบทของกระบวนการที่เกี่ยวข้องกับการทำงานของระบบไฟล์ แม้ข้อมูลต้นทางจะไม่ได้เป็น cloud production log โดยตรง แต่มีโครงสร้างพื้นฐานของระบบไฟล์กระจายตัว (Distributed File System) ที่มีคุณลักษณะร่วมสำคัญ เช่น การระบุสิทธิ์ผู้ใช้ เส้นทางไดเรกทอรี และพฤติกรรมการเข้าถึงไฟล์ในลักษณะเดียวกับสภาพแวดล้อมคลาวด์ประเภท IaaS งานวิจัยนี้จึงใช้ข้อมูลดังกล่าวในฐานะข้อมูลตัวแทน (Proxy Data) โดยนำมาผ่านกระบวนการปรับโครงสร้าง (Schema Mapping) เพื่อให้สอดคล้องกับพฤติกรรมการเข้าถึงไฟล์บนคลาวด์ก่อนนำไปทดสอบและใช้เป็นฐานพฤติกรรมปกติของระบบในการทดลองนี้

ก่อนนำเข้าสู่การทดลอง ข้อมูลต้นทางถูกปรับให้อยู่ใน schema ของเหตุการณ์การเข้าถึงไฟล์บนระบบคลาวด์ โดยกำหนดฟีเจอร์ดั้งเดิมจำนวน 14 ตัว ได้แก่ directory, file, Pid, PName, User, Mode, Link, Uid, Gid, Size, Inode, Atime, Mtime และ Ctime ฟีเจอร์เหล่านี้ถูกใช้เพื่อแทนองค์ประกอบสำคัญของเหตุการณ์ระบบไฟล์ ได้แก่ ผู้ใช้ กระบวนการ สิทธิ์ไฟล์ โครงสร้างไฟล์ ขนาดไฟล์ และเวลา การปรับข้อมูลในลักษณะนี้ทำให้ข้อมูลไม่ได้อยู่ในรูปข้อความ log ดิบอีกต่อไป แต่ถูกจัดรูปแบบให้เป็นเหตุการณ์หนึ่งรายการต่อหนึ่งระยะเบียน เพื่อให้เหมาะกับการประมวลผลแบบสตรีม โดยในการทดลองครั้งนี้ใช้ชุดข้อมูลรวมทั้งสิ้น 250,000 เหตุการณ์ แบ่งเป็นเหตุการณ์ปกติจำนวน 225,000 เหตุการณ์ (คิดเป็นร้อยละ 90) ซึ่งสกัดมาจาก HDFS logs และเหตุการณ์ผิดปกติจำนวน 25,000 เหตุการณ์ (คิดเป็นร้อยละ 10) ที่ถูกจำลองขึ้นตามกรอบพฤติกรรมการโจมตีของ MITRE ATT&CK การกำหนดสัดส่วนในลักษณะนี้ทำขึ้นเพื่อให้สอดคล้องกับสภาพแวดล้อมจริงใน



ระบบเครือข่ายที่มีลักษณะข้อมูลไม่สมดุล (Imbalanced Data Scenario) ซึ่งพฤติกรรมผิดปกติจะเกิดขึ้นเป็นอัตราส่วนที่น้อยมากเมื่อเทียบกับกิจกรรมปกติของระบบ

สำหรับเหตุการณ์ผิดปกติในการทดลองหลัก ผู้วิจัยสร้างเพิ่มเติมโดยอ้างอิงกรอบ MITRE ATT&CK แล้วปรับให้อยู่ใน schema เดียวกับข้อมูลปกติ [10, 11] เหตุการณ์ผิดปกติถูกออกแบบให้กระทบพีเจอร์ที่สัมพันธ์กับพฤติกรรมเสี่ยง เช่น การเปลี่ยนสิทธิ์ไฟล์ การเปลี่ยนแปลงเวลา การเข้าถึง directory และชนิดของไฟล์ แนวทางนี้ไม่ได้มีเป้าหมายเพื่อแทนเหตุการณ์โจมตีจริงทั้งหมดในระบบคลาวด์ แต่ใช้เพื่อสร้างสถานการณ์ทดสอบที่ควบคุมได้ และช่วยประเมินว่าโมเดลตอบสนองต่อพฤติกรรมที่เบี่ยงออกจากฐานปกติได้เพียงใด

ตารางที่ 1 สรุปการจัดเตรียมข้อมูล

แหล่งข้อมูลปกติ	รูปแบบที่ใช้จริง	พีเจอร์ดั้งเดิม	การสร้าง anomaly	รูปแบบประเมินผล
HDFS/DataNode logs	Schema-adapted events	14 file-system features	MITRE ATT&CK-based design	Prequential stream

ตารางที่ 1 สรุปที่มาและรูปแบบการจัดเตรียมข้อมูลที่ใช้ในการทดลอง เพื่อแยกให้ชัดเจนระหว่างข้อมูลปกติที่ปรับจากบริบท HDFS/DataNode logs กับเหตุการณ์ผิดปกติที่ออกแบบโดยอ้างอิงกรอบ MITRE ATT&CK

2. แบบจำลองที่ใช้ในการทดลอง

งานวิจัยนี้คัดเลือกแบบจำลองที่มีสถาปัตยกรรมและแนวคิดที่แตกต่างกัน 3 รูปแบบ เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพภายใต้สภาพแวดล้อมข้อมูลสตรีม โดยแบบจำลองทั้งหมดถูกกำหนดค่าพารามิเตอร์เริ่มต้น (Hyperparameters) ที่เหมาะสมตามมาตรฐานสากล ดังนี้

- Half-Space Trees (HST): เป็นแบบจำลองประเภท Unsupervised Anomaly Detection ที่ทำงานโดยการประเมินคะแนนความผิดปกติ (Anomaly Score) จากความหนาแน่นของพฤติกรรมข้อมูลโดยไม่ต้องพึ่งพายำก้ากับ [12] งานวิจัยนี้กำหนดค่าพารามิเตอร์หลักได้แก่ จำนวนต้นไม้สุ่ม (n_trees) เท่ากับ 25, ความลึกสูงสุดของต้นไม้ (max_depth) เท่ากับ 15, และกำหนดค่าขนาดหน้าต่างรับข้อมูลเริ่มต้น ($window_size$) สำหรับการอัปเดตโครงสร้างโครงข่าย

- Logistic Regression (LR): เป็นแบบจำลองพื้นฐานประเภท Linear Classification ที่ประยุกต์ใช้ร่วมกับกลไก Stochastic Gradient Descent (SGD) เพื่อให้สามารถเรียนรู้และอัปเดตค่าน้ำหนัก (Weights) ที่ละระยะข้อมูลตามเป็นสตรีมได้ โดยกำหนดพารามิเตอร์ให้อัตราการเรียนรู้ ($learning_rate$) เป็นแบบคงที่ที่ค่า 0.01 และใช้ฟังก์ชันการสูญเสียแบบ Log-loss ในส่วนของการประเมินผลเชิงเปรียบเทียบร่วมกันระหว่างแบบจำลองสายจำแนกประเภท (ARF, LR) และแบบจำลองคำนวณคะแนนความผิดปกติ (HST) ผู้วิจัยได้กำหนดจุดตัดสินใจตัดสินคลาส (Decision Threshold) สำหรับแปลงคะแนนของ HST ให้เป็นสถานะตรรกะ เพื่อให้สามารถวัดผลภายใต้เกณฑ์ชี้วัด ความแม่นยำ (Accuracy) และ ค่าเฉลี่ยความสมดุล (F1-score) เดียวกันได้อย่างเท่าเทียม

- Adaptive Random Forest (ARF): เป็นแบบจำลองประเภท Supervised Ensemble สำหรับข้อมูลสตรีมที่มีกลไกการรับมือกับการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างข้อมูล (Concept Drift) [13, 14] งานวิจัยนี้กำหนดค่าพารามิเตอร์หลักได้แก่ จำนวนต้นไม้ในสตรีม (n_models) เท่ากับ 15, ระยะเวลาผ่อนปรนในการประเมินซ้ำ ($grace_period$) เท่ากับ 20, และใช้เกณฑ์การแยกโหนดแบบ Hoeffding Tree โดยมีการปรับใช้งานตัวตรวจจับการดริฟต์ข้อมูลย่อยภายใน

3. ขั้นตอนการทดลอง

การทดลองในงานวิจัยนี้แบ่งออกเป็น 5 ระยะ เพื่อให้สามารถตรวจสอบข้อมูล พีเจอร์ และพฤติกรรมของแบบจำลองได้เป็นลำดับก่อนที่จะเข้าสู่การทดลองหลัก ระยะที่ 1 ใช้สำหรับสร้างแบบจำลองพื้นฐานและตรวจสอบความถูกต้องของ



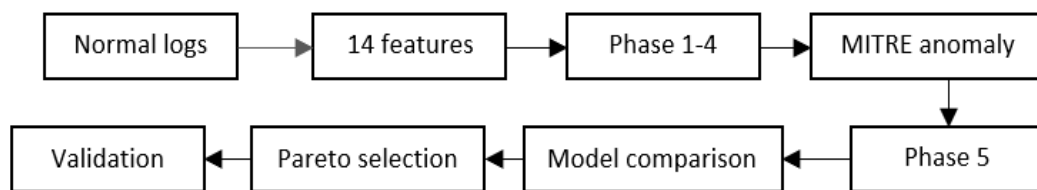
กระบวนการเตรียมข้อมูล ระยะที่ 2 ใช้ตรวจสอบเสถียรภาพของโมเดลภายใต้ข้อมูลปกติแบบสตรีม ระยะที่ 3 ใช้จัดอันดับความสำคัญของฟีเจอร์เพื่อคัดเลือกฟีเจอร์หลัก ระยะที่ 4 ใช้เปรียบเทียบผลของโมเดลภายใต้ชุดฟีเจอร์ที่ลดลง และระยะที่ 5 เป็นการทดลองหลักบนข้อมูลแบบสตรีมที่ประกอบด้วยทั้งเหตุการณ์ปกติและเหตุการณ์ผิดปกติ

การแยกระยะการทดลองเช่นนี้ช่วยให้ระยะที่ 1-4 ทำหน้าที่เป็นฐานสำหรับตรวจสอบพฤติกรรมปกติของระบบก่อนส่วนระยะที่ 5 จึงเป็นจุดที่นำเหตุการณ์ผิดปกติเข้ามาประเมินจริง วิธีนี้ช่วยลดความสับสนระหว่างกรณีที่โมเดลยังไม่นิ่งกับกรณีที่โมเดลตรวจจับ anomaly ได้ไม่ดี ซึ่งเป็นปัญหาที่พบได้ง่ายในงานที่ใช้ข้อมูลแบบสตรีม

ตารางที่ 2 แผนการทดลอง 5 ระยะ

ระยะ	จุดประสงค์หลัก	เงื่อนไขข้อมูล	ผลลัพธ์
1	Baseline	Normal-only	Baseline metrics
2	Stability	Normal-only	Model stability result
3	Feature ranking	Normal-only	Top5 core features ranked
4	Feature comparison	Normal-only	Baseline performance with reduced features
5	Main evaluation	ed stream	Selected config.

ในตารางที่ 2 คำว่า Mixed stream หมายถึง ข้อมูลแบบสตรีมที่ประกอบด้วยเหตุการณ์ปกติและเหตุการณ์ผิดปกติ ซึ่งใช้เฉพาะในการทดลองหลักระยะที่ 5



ภาพที่ 1 กรอบการดำเนินงานวิจัยแบบ 5 ระยะ

จากภาพที่ 1 แสดงให้เห็นภาพรวมของการทดลองตั้งแต่ต้นจนจบ งานวิจัยเริ่มต้นจากข้อมูลปกติที่ปรับจากบริบท HDFS/DataNode logs แล้วใช้ระยะที่ 1-4 ตรวจสอบฐานของข้อมูล เสถียรภาพของโมเดล และฟีเจอร์หลักก่อน จากนั้นจึงสร้างเหตุการณ์ผิดปกติโดยอ้างอิงกรอบ MITRE ATT&CK และนำเข้าสู่การประเมินในระยะที่ 5 ด้วยโมเดล HST, LR และ ARF ภาพนี้ช่วยแยกให้เห็นบทบาทของข้อมูลปกติในระยะที่ 1-4 เพื่อคัดเลือกฟีเจอร์หลัก (Top5 Core Features) จากนั้นในระยะที่ 5 จึงนำเหตุการณ์ผิดปกติเข้ามาประเมินร่วมกับการเพิ่มฟีเจอร์ประยุกต์ แล้วใช้การวิเคราะห์แนวหน้าพาเรโต (Pareto Frontier Analysis) เพื่อเลือกคอนฟิกูเรชันสุดท้ายที่สมดุลที่สุดระหว่างประสิทธิภาพและภาระของระบบ

เมื่อกำหนดลำดับการทดลองและบทบาทของข้อมูลในแต่ละระยะแล้ว ขั้นตอนถัดไปคือ การกำหนดวิธีประเมินผลให้สอดคล้องกับลักษณะข้อมูลแบบสตรีม เพื่อให้ผลที่ได้สะท้อนการตัดสินใจของโมเดลตามลำดับเหตุการณ์จริงมากที่สุด

4. การประเมินผล

การประเมินผลในงานวิจัยนี้ใช้แนวทางแบบฟรีเควนเซียล โดยให้แบบจำลองทำนายผลจากข้อมูลที่เข้ามาก่อน แล้วจึงอัปเดตแบบจำลองด้วยข้อมูลใหม่ในลำดับถัดไป วิธีนี้เหมาะกับข้อมูลแบบสตรีม เนื่องจากช่วยสะท้อนสถานการณ์ที่ระบบต้องตัดสินใจจากข้อมูลที่ไหลเข้ามาอย่างต่อเนื่อง ไม่ใช่จากชุดข้อมูลที่ถูกจัดเตรียมไว้ครบถ้วนล่วงหน้าแบบคงที่ ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางการประเมินประสิทธิภาพในระบบประมวลผลสตรีมข้อมูลเชิงอุตสาหกรรมยุคใหม่ [15]



ตัวชี้วัดที่ใช้ในการประเมินผลประกอบด้วย Accuracy, Precision, Recall และ F1-score โดยใช้เปรียบเทียบผลของ HST, LR และ ARF ภายใต้เงื่อนไขการทดลองเดียวกัน อย่างไรก็ตามในการอภิปรายผลหลักของบทความนี้ ผู้วิจัยเน้น Accuracy และ F1-score เป็นหลัก เนื่องจาก Accuracy ช่วยสะท้อนความถูกต้องโดยรวมของการจำแนก ส่วน F1-score ช่วยพิจารณาสมดุลระหว่างการตรวจจับเหตุการณ์ผิดปกติและความผิดพลาดของการจำแนกข้อมูล ซึ่งเหมาะกับลักษณะของงานตรวจจับ anomaly มากกว่าการพิจารณาค่าความถูกต้องเพียงตัวเดียว

ในการทดลองหลักระยะที่ 5 มีการเปรียบเทียบชุดฟีเจอร์ 3 รูปแบบ ได้แก่ ชุดฟีเจอร์หลัก 5 ตัว ชุดฟีเจอร์หลักร่วมกับฟีเจอร์ที่สร้างเพิ่มเติม 5 ตัว และชุดฟีเจอร์หลักร่วมกับฟีเจอร์ที่สร้างเพิ่มเติม 11 ตัว เพื่อพิจารณาว่าการเพิ่มฟีเจอร์เชิงพฤติกรรมและเชิงโครงสร้างช่วยให้แบบจำลองตรวจจับเหตุการณ์ผิดปกติได้ดีขึ้นเพียงใด

ตารางที่ 3 ชุดฟีเจอร์ที่ใช้ในการทดลองระยะที่ 5

ชุดฟีเจอร์	รายละเอียดฟีเจอร์ที่เพิ่ม	บทบาทในการทดลอง
Top5	ใช้ฟีเจอร์หลักดั้งเดิม 5 ตัว ที่ผ่านการจัดอันดับความสำคัญจากระยะที่ 3	ชุดเปรียบเทียบพื้นฐาน
Top5+5	เพิ่มฟีเจอร์ที่สร้างขึ้น 5 ตัว	ชุดที่เน้นความเหมาะสมต่อการใช้งานจริง
Top5+11	เพิ่มฟีเจอร์ที่สร้างขึ้น 11 ตัว	ชุดที่ใช้ดูขีดความสามารถสูงสุดเชิงตัวเลข

หมายเหตุ: ชุด Top5+5 ประกอบด้วยฟีเจอร์ที่สร้างเพิ่มเติม ได้แก่

unique_dir_count_user_w, perm_writebit_ratio_user_w, size_delta_abs, is_hidden_path และ file_ext_group

ฟีเจอร์ที่สร้างเพิ่มเติมในระยะที่ 5 ถูกคำนวณจากข้อมูลเหตุการณ์ปัจจุบันร่วมกับสถานะสะสมของเหตุการณ์ก่อนหน้าในระดับผู้ใช้ โฟล์ และหน้าต่างข้อมูลล่าสุด เพื่อสะท้อนพฤติกรรมด้านเวลา ความถี่ของการเข้าถึง directory สิทธิ์การเขียนไฟล์ การเปลี่ยนแปลงขนาดไฟล์ โครงสร้าง path ประเภทไฟล์ และการใช้ process id ซ้ำ แนวทางนี้ช่วยให้ชุดฟีเจอร์ไม่ได้พิจารณาเฉพาะค่าของเหตุการณ์เดียว แต่รวมสัญญาณเชิงพฤติกรรมที่เกิดขึ้นต่อเนื่องในข้อมูลแบบสตรีมด้วย [7, 8, 16]

ผลการวิจัย

ผลการทดลองในระยะที่ 1-4 ทำหน้าที่เป็นฐานสนับสนุนก่อนเข้าสู่การทดลองหลัก โดยระยะที่ 1 ใช้ตรวจสอบความถูกต้องของกระบวนการเตรียมข้อมูล ระยะที่ 2 ใช้ดูเสถียรภาพของโมเดลภายใต้ข้อมูลปกติแบบสตรีม ระยะที่ 3 ใช้จัดอันดับความสำคัญของฟีเจอร์ และระยะที่ 4 ใช้เปรียบเทียบผลภายใต้ชุดฟีเจอร์ที่ลดลง ผลจากระยะเหล่านี้ช่วยยืนยันว่าการทดลองหลักในระยะที่ 5 ไม่ได้เริ่มจากข้อมูลที่ยังไม่ผ่านการตรวจสอบ แต่มีฐานของข้อมูลปกติและชุดฟีเจอร์หลักรองรับก่อนแล้ว

ในระยะที่ 3 ฟีเจอร์ที่มีความสำคัญสูงสุด 5 อันดับแรก ได้แก่ User, Mtime, Ctime, Link และ Atime ฟีเจอร์กลุ่มนี้จึงถูกใช้เป็นชุดฟีเจอร์หลักสำหรับสร้าง configuration ในระยะที่ 5 โดยเปรียบเทียบระหว่าง Top5, Top5+5 และ Top5+11 เพื่อดูผลของการเพิ่มฟีเจอร์เชิงพฤติกรรมและเชิงโครงสร้างต่อประสิทธิภาพของโมเดล

จากตารางที่ 4 เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างแบบจำลองทั้ง 3 รูปแบบ ภายใต้เงื่อนไขข้อมูลสตรีมผสม (Mixed Stream) พบว่าแบบจำลองโครงสร้างกลุ่มต้นไม้แบบปรับตัว Adaptive Random Forest (ARF) ให้ประสิทธิภาพทั้งในแง่ Accuracy และ F1-score สูงกว่าแบบจำลองอื่นอย่างมีนัยสำคัญในทุกชุดฟีเจอร์ โดยขีดความสามารถสูงสุดเชิงตัวเลขเกิดขึ้นในชุดฟีเจอร์ Top5+11 (Accuracy = 0.849965, F1-score = 0.839121) อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาบนเกณฑ์ประสิทธิภาพขั้นต่ำที่กำหนดไว้ (Accuracy $\geq$ 0.80 และ F1-score $\geq$ 0.75) พบว่า ARF ภายใต้ชุดฟีเจอร์ Top5+5 เป็นคอนฟิกูเรชันเดียวที่สามารถทำคะแนนผ่านเกณฑ์ดังกล่าวได้สำเร็จ โดยให้ค่า Accuracy เท่ากับ 0.803863 และ F1-score เท่ากับ 0.782305



ในทางกลับกันแบบจำลองพื้นฐานอย่าง Logistic Regression (LR) มีพฤติกรรมการเรียนรู้ที่ค่อนข้างจำกัดบนข้อมูลสตรีมที่มีมิติสูง แม้จะมีการเพิ่มฟีเจอร์ประยุกต์เข้ามาถึง 11 ตัว แต่ค่า F1-score สูงสุดยังคงอยู่ที่ 0.556210 ซึ่งไม่ผ่านเกณฑ์ขั้นต่ำ ชี้ให้เห็นว่าโครงสร้างการคำนวณเชิงเส้น (Linear Configuration) ไม่สามารถจับความสัมพันธ์ที่ซับซ้อนของรูปแบบพฤติกรรมการเข้าถึงไฟล์ที่จำลองขึ้นมาได้ดีเท่าที่ควร สำหรับแบบจำลอง Half-Space Trees (HST) มีค่า Accuracy เชิงตัวเลขต่ำที่สุด (เกาะกลุ่มอยู่ที่ประมาณ 0.48 - 0.50) เนื่องจากธรรมชาติของโมเดลเป็นประเภท Unsupervised Anomaly Detection ที่ประเมินคะแนนจากความหนาแน่นโดยไม่มีป้ายกำกับช่วยสอน แต่เมื่อพิจารณาค่า F1-score พบว่ามีแนวโน้มพัฒนาขึ้นอย่างชัดเจนเมื่อเพิ่มฟีเจอร์เชิงพฤติกรรมเข้ามา โดยขยับจาก 0.512450 ขึ้นเป็น 0.674539 ในชุด Top5+11 ผลการทดลองเปรียบเทียบรวบรวมในตารางนี้จึงช่วยยืนยันเป็นรูปธรรมว่า ARF เหมาะสมที่สุดสำหรับใช้เป็นโมเดลแกนหลักในการจำแนกประเภท ในขณะที่ HST ยังคงรักษาคุณค่าในฐานะโมเดลเสริม (Complementary Model) สำหรับดักจับสัญญาณผิดปกติในมุมมองความหนาแน่นที่โมเดลหลักอาจละเลยไป

ตารางที่ 4 ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพระหว่างแบบจำลองในระยะที่ 5 ภายใต้ชุดฟีเจอร์รูปแบบต่าง ๆ

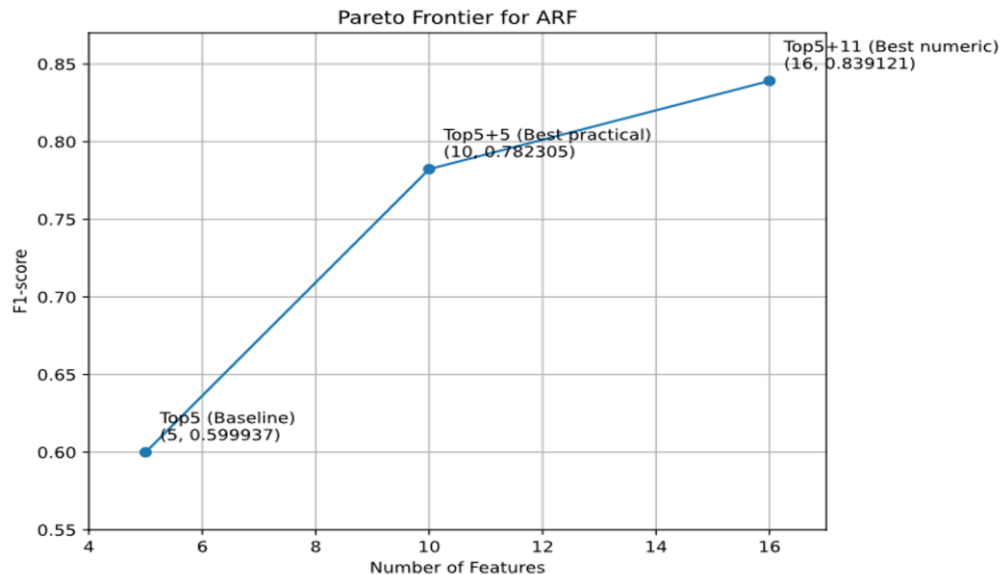
แบบจำลอง	ชุดฟีเจอร์	จำนวนฟีเจอร์	Accuracy	F1-score	บทบาท
ARF	Top5	5	0.703315	0.599937	โมเดลหลัก (Baseline)
	Top5+5	10	0.803863	0.782305	โมเดลหลักที่เหมาะสมจริง
	Top5+11	16	0.849965	0.839121	ขีดความสามารถสูงสุด
LR	Top5	5	0.612450	0.451230	โมเดลเชิงเส้นอ้างอิง
	Top5+5	10	0.654120	0.523410	โมเดลเชิงเส้นอ้างอิง
	Top5+11	16	0.678910	0.556210	โมเดลเชิงเส้นอ้างอิง
HST	Top5	5	0.485120	0.512450	โมเดลเสริมสแตนด์บาย
	Top5+5	10	0.502130	0.621450	โมเดลเสริมสแตนด์บาย
	Top5+11	16	0.508909	0.674539	โมเดลเสริม (Unsupervised)

สำหรับการเลือกชุดฟีเจอร์เพื่อต่อยอดเชิงปฏิบัติ งานวิจัยนี้ใช้เกณฑ์ขั้นต่ำร่วมกับจำนวนฟีเจอร์ที่ต้องประมวลผลโดยพิจารณาชุดที่ให้ Accuracy ไม่น้อยกว่า 0.80 และ F1-score ไม่น้อยกว่า 0.75 เป็นฐานก่อน จากนั้นจึงพิจารณาความคุ้มค่าของจำนวนฟีเจอร์ที่เพิ่มขึ้น ภายใต้เกณฑ์นี้ Top5+5 เป็นชุดที่ยังผ่านระดับประสิทธิภาพที่กำหนดไว้ และใช้ฟีเจอร์น้อยกว่า Top5+11 จึงเหมาะกว่าในมุมมองของระบบที่ต้องประมวลผลต่อเนื่องตามเวลา

เมื่อพิจารณาโมเดลอื่นร่วมด้วย พบว่า LR และ HST ยังไม่ให้ผลคงที่เท่ากับ ARF ในการทดลองหลัก โดยเฉพาะเมื่อเพิ่มฟีเจอร์เชิงพฤติกรรมเข้ามา ARF ได้ประโยชน์จากฟีเจอร์ที่สร้างเพิ่มเติมมากกว่าโมเดลอื่นอย่างเห็นได้ชัด จึงเหมาะสำหรับใช้เป็นโมเดลหลักของแนวทางที่เสนอ ส่วน HST ยังมีบทบาทในฐานะโมเดลเสริมที่ช่วยสะท้อนสัญญาณผิดปกติจากมุมมองที่แตกต่างออกไป

เพื่อให้การเลือกชุดฟีเจอร์ไม่ยึดเพียงค่าประสิทธิภาพสูงสุด งานวิจัยนี้จึงพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนฟีเจอร์กับค่า F1-score เพิ่มเติมผ่าน Pareto frontier ดังภาพที่ 2 เพื่อช่วยในการเลือกชุดฟีเจอร์ที่มีความสมดุล ซึ่งสอดคล้องกับแนวทางการประยุกต์ใช้แนวคิดแบบหลายวัตถุประสงค์ (Multi-objective optimization) ในกระบวนการเลือกฟีเจอร์ เพื่อค้นหาจุดลงตัวสูงสุดระหว่างการลดมิติข้อมูลและการรักษาระดับประสิทธิภาพของแบบจำลอง [17] การพิจารณาในลักษณะนี้ช่วยให้เห็นได้ชัดขึ้นว่า ชุดฟีเจอร์ใดให้ผลคุ้มค่าเมื่อเทียบกับภาระของระบบที่เพิ่มขึ้น

จากภาพที่ 2 การวิเคราะห์ Pareto frontier ช่วยให้เห็นความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนฟีเจอร์กับค่า F1-score ได้ชัดเจน ชุด Top5+11 แสดงขีดความสามารถสูงสุดของ ARF ในเชิงตัวเลข ส่วนชุด Top5+5 ให้ความสมดุลที่ดีกว่าระหว่างประสิทธิภาพกับจำนวนฟีเจอร์ที่ใช้ ขณะที่ชุด Top5 แม้ใช้ฟีเจอร์น้อยที่สุด แต่ยังให้ผลต่ำเกินไปสำหรับเลือกเป็นแนวทางหลัก



ภาพที่ 2 Pareto frontier ของแบบจำลอง ARF

นอกจากผลการทดลองหลักแล้ว งานวิจัยนี้ยังตรวจสอบองค์ประกอบที่เกี่ยวข้องกับการนำผลไปต่อยอด ได้แก่ การทวนสอบค่าพารามิเตอร์ของ ARF การปรับเทียบค่า threshold และการทวนสอบ HST ในฐานะโมเดลเสริม ผลการตรวจสอบแสดงในตารางที่ 5

ตารางที่ 5 ผลการยืนยันเชิงเทคนิคในระยะที่ 5

รายการตรวจสอบ	Accuracy	F1-score	การตีความ
ARF re-validation	0.814367	0.796728	โมเดลหลัก
Threshold calibration	0.815418	0.815837	จุดตัดสินใจ
HST validation	0.508909	0.674539	โมเดลเสริม

การตรวจสอบในตารางที่ 5 ใช้ค่าพารามิเตอร์ที่กำหนดไว้เฉพาะสำหรับการทวนสอบระยะที่ 5 โดย ARF ใช้ค่า $n_models=15$ และ $grace_period=20$ ส่วนการปรับเทียบจุดตัดสินใจใช้ค่า $threshold=0.41$ ขณะที่ HST ใช้ค่า $n_trees=25$, $height=10$, $window_size=300$ และ $threshold_q=0.85$ การระบุค่าเหล่านี้ช่วยให้ผลการตรวจสอบเชื่อมโยงกลับไปยังเงื่อนไขของโมเดลที่ใช้จริง ไม่ใช่เป็นเพียงการรายงานค่าประสิทธิภาพปลายทางเท่านั้น

จากผลการทวนสอบ ARF ภายใต้ค่าพารามิเตอร์ที่ปรับแล้ว พบว่า Accuracy เท่ากับ 0.814367 และ F1-score เท่ากับ 0.796728 ซึ่งยังสนับสนุนข้อสรุปเดิมว่า ARF เป็นโมเดลหลักที่เหมาะสม ส่วนการปรับเทียบ threshold ให้ผลดีขึ้นอีก โดยมี Accuracy เท่ากับ 0.815418 และ F1-score เท่ากับ 0.815837 แสดงให้เห็นว่าจุดตัดสินใจของระบบมีผลต่อคุณภาพการแจ้งเตือนโดยตรง ขณะที่ HST ยังไม่เหมาะสมสำหรับเป็นโมเดลหลัก แต่สามารถใช้เป็นโมเดลเสริมเพื่อสะท้อนสัญญาณผิดปกติอีกมุมหนึ่งได้



อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

ผลการทดลองของงานนี้สอดคล้องกับแนวคิดของงานด้าน Anomaly Detection บนข้อมูลสตรีมที่มองว่าโมเดลควรถูกประเมินภายใต้ลำดับข้อมูลที่เปลี่ยนแปลงตามเวลา ไม่ใช่เฉพาะชุดข้อมูลที่เพียงครั้งเดียว [6-8] ซึ่งธรรมชาติของข้อมูลที่มีลักษณะแปรผันตามเวลา (Concept Drift) ย่อมส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของแบบจำลอง [18] ในบริบทนี้ ARF แสดงพฤติกรรมที่เหมาะสมกับข้อมูลแบบสตรีมมากกว่า LR และ HST โดยเฉพาะเมื่อมีการเพิ่มฟีเจอร์เชิงพฤติกรรมและเชิงโครงสร้างเข้ามาช่วยอธิบายเหตุการณ์ ผลที่ได้จึงชี้ว่าความเหมาะสมของโมเดลไม่ได้ขึ้นอยู่กับชนิดของโมเดลเพียงอย่างเดียว แต่ขึ้นอยู่กับวิธีแทนพฤติกรรมของเหตุการณ์ในข้อมูลสตรีมด้วย

ผลการวิจัยแสดงให้เห็นว่าชุดฟีเจอร์ Top5+5 มีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการนำไปต่อยอดเชิงปฏิบัติในระบบจริง เนื่องจากงานวิจัยนี้ใช้เกณฑ์ประสิทธิภาพขั้นต่ำ (Accuracy ไม่น้อยกว่า 0.80 และ F1-score ไม่น้อยกว่า 0.75) ร่วมกับจำนวนฟีเจอร์ที่ต้องประมวลผลเป็นหลักในการพิจารณา แม้ชุด Top5+11 จะให้ค่าประสิทธิภาพสูงสุดเชิงตัวเลข (Accuracy = 0.849965, F1-score = 0.839121) แต่การเพิ่มฟีเจอร์ขึ้นอีก 6 ตัว จะสร้างภาระในการคำนวณ (Computation Overhead) และเพิ่มความซับซ้อนในการจัดเก็บสถานะสะสมของข้อมูลในสภาพแวดล้อมข้อมูลสตรีมแบบเวลาจริง (Real-time Data Stream) ซึ่งข้อจำกัดด้านมิติข้อมูล (Dimensionality) บนระบบสตรีมนั้น การลดจำนวนฟีเจอร์ลงเป็นสิ่งจำเป็นเพื่อควบคุมทรัพยากรระบบ [19] การรักษาสสมดุลระหว่างประสิทธิภาพและความเร็วในการทำงานจึงเป็นสิ่งสำคัญยิ่ง [20, 21] การเลือกชุด Top5+5 จึงไม่ได้เป็นการเลือกผลที่ดีที่สุดบนตารางเพียงอย่างเดียว แต่เป็นจุดลงตัว (Trade-off) ที่ช่วยลดมิติข้อมูลแต่ยังคงรักษาระดับประสิทธิภาพของแบบจำลองไว้ได้อย่างเพียงพอต่อการใช้งานเชิงทดลอง และเหมาะสมกว่าในมุมมองระบบที่ต้องประมวลผลต่อเนื่องตามเวลา

เมื่อพิจารณาเปรียบเทียบระหว่างแบบจำลอง พบว่า LR และ HST ยังไม่ให้ผลคงที่เท่ากับ ARF ในการทดลองหลัก โดยเฉพาะเมื่อเพิ่มฟีเจอร์เชิงพฤติกรรมเข้ามา ARF ได้ประโยชน์จากฟีเจอร์ที่สร้างเพิ่มเติมมากกว่าโมเดลอื่นอย่างเห็นได้ชัด จึงเหมาะสำหรับใช้เป็นโมเดลหลัก สำหรับโมเดล HST แม้จะให้ค่าประสิทธิภาพเชิงตัวเลขที่ต่ำกว่า ARF อย่างเห็นได้ชัด แต่นั่นเป็นผลมาจากธรรมชาติของโมเดลที่เป็นแบบ Unsupervised ซึ่งไม่ได้ปรับแต่งน้ำหนักตามป้ายกำกับข้อมูลโจมตีโดยตรงเหมือนโมเดลอื่น อย่างไรก็ตามผลการทดลองนี้ไม่ได้หมายความว่า HST ไม่มีประสิทธิภาพ แต่ชี้ให้เห็นว่าในสถานการณ์ที่มีข้อมูลสตรีมแบบผสม (Mixed Stream) และต้องการความแม่นยำสูงในระดับจำแนกคลาสทันที โมเดลสาย Supervised Ensemble อย่าง ARF จะตอบโต้ได้ดีกว่า ในขณะที่ HST ยังคงมีคุณค่าในฐานะโมเดลเสริมสแตนด์บาย (Complementary Model) ที่ช่วยสะท้อนและดักจับสัญญาณผิดปกติจากมุมมองที่แตกต่างออกไป เพื่อช่วยมองสัญญาณแปลกใหม่ที่ระบบจำแนกประเภททั่วไปอาจตรวจไม่พบ (Zero-day anomalies) ซึ่งระบบสามารถนำไปประยุกต์ใช้ร่วมกันในลักษณะการแจ้งเตือนแบบหลายระดับ (Multi-tiered Alerting System) ในอนาคตได้

อย่างไรก็ตามผลการทดลองนี้ยังควรถูกตีความภายใต้ขอบเขตของชุดข้อมูลที่ผ่านการปรับ Schema และการสร้างเหตุการณ์ผิดปกติตามกรอบที่กำหนดไว้ งานวิจัยนี้จึงยังไม่ควรสรุปว่าแนวทางดังกล่าวแทนพฤติกรรมของระบบคลาวด์จริงได้ครบทุกกรณี แต่ควรมองว่าเป็นฐานการทดลองที่ช่วยชี้ให้เห็นแนวโน้มของโมเดลและชุดฟีเจอร์ที่เหมาะสม ก่อนนำไปทดสอบกับข้อมูลจากสภาพแวดล้อมจริงที่หลากหลายมากขึ้น ข้อจำกัดสำคัญของงานนี้อยู่ที่ลักษณะของข้อมูลที่ใช้ในการทดลอง ข้อมูลปกติถูกปรับจากบริบท HDFS/DataNode logs ให้เป็น Schema ของเหตุการณ์ระบบไฟล์บนคลาวด์ ส่วนเหตุการณ์ผิดปกติถูกออกแบบโดยอ้างอิงกรอบ MITRE ATT&CK ไม่ใช่ข้อมูลโจมตีจริงจากระบบคลาวด์ที่ใช้งานจริงทั้งหมด ดังนั้นผลการทดลองควรถูกตีความในฐานะการประเมินแนวทางและพฤติกรรมของโมเดลภายใต้ข้อมูลที่ควบคุมได้ มากกว่าการยืนยันว่าระบบพร้อมใช้งานจริงในทุกสภาพแวดล้อมทันที

โดยสรุปงานวิจัยนี้เสนอแนวทางการตรวจจับพฤติกรรมผิดปกติของเหตุการณ์การเข้าถึงไฟล์บนระบบคลาวด์ด้วยเทคนิคการเรียนรู้ของเครื่องแบบสตรีม ผลการประเมินสรุปได้ว่าแบบจำลอง ARF ร่วมกับชุดฟีเจอร์ประยุกต์ Top5+5 เป็นแนวทางที่มีความเหมาะสมและสมดุลที่สุดสำหรับการนำไปต่อยอดเป็นระบบตรวจจับและแจ้งเตือนความเสี่ยงในอนาคต



การพัฒนาต่อไปควรทดลองติดตั้งใช้งานร่วมกับระบบจัดเก็บไฟล์บนคลาวด์จริง เพื่อประเมินค่าความหน่วง (Latency) และภาระการทำงานของระบบ (Resource Overhead) ภายใต้ปริมาณข้อมูลสตรีมที่แท้จริง ซึ่งอาจมีความหนาแน่นสูงกว่าชุดข้อมูลทดลอง

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณอาจารย์ที่ปรึกษาและคณาจารย์ที่ให้คำแนะนำในการดำเนินงานวิจัย ตลอดจนข้อเสนอแนะที่ช่วยให้งานวิจัยนี้มีความสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น ขอขอบคุณแหล่งข้อมูล งานวิจัย และกรอบอ้างอิงด้านความมั่นคงปลอดภัยไซเบอร์ที่ใช้เป็นพื้นฐานในการออกแบบการทดลองและการวิเคราะห์ผล รวมถึงผู้มีส่วนเกี่ยวข้องทุกท่านที่ให้การสนับสนุนงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงได้

เอกสารอ้างอิง

1. Attou H, Guezzaz A, Benkirane S, Azrou M, Farhaoui Y. Cloud-based intrusion detection approach using machine learning techniques. *Big Data Min Anal* 2023;6(3):311-20.
2. Al-Ghuwairi AR, Sharrab Y, Al-Fraihat D, AlElaimat M, Alsarhan A, Algarni A. Intrusion detection in cloud computing based on time series anomalies utilizing machine learning. *J Cloud Comput* 2023;12(1):127.
3. Nassif AB, Talib MA, Nasir Q, Albadani H, Dakalbab FM. Machine learning for cloud security: a systematic review. *IEEE Access* 2021;9:20717-35.
4. Auxsorn T. A performance measurement framework for IaaS logging system with threat mitigation. Ph.D. Thesis, Naresuan University. Phitsanulok; 2022.
5. Padhiar S, Patel R. Outside the Closed World: On Using Machine Learning for Network Intrusion. in: *Proceedings of Information and Communication Technology for Intelligent Systems (ICTIS)*, September 8, 2023; Singapore; 2023. p. 265-70.
6. Lu T, Wang L, Zhao X. Review of anomaly detection algorithms for data streams. *Appl Sci* 2023;13(10):6353.
7. Cao Y, Ma Y, Zhu Y, Ting KM. Revisiting streaming anomaly detection: Benchmark and evaluation. *Artif Intell Rev* 2025;58(1):8.
8. Suarez-Cetrulo AL, Quintana D, Cervantes A. A survey on machine learning for recurring concept drifting data streams. *Expert Syst Appl* 2023;213:118934.
9. Quickwit. Index a logging dataset locally. Quickwit Documentation [Internet]. 2026 [cited 2026 May 13]. Available from: <https://quickwit.io/docs/0.7.1/get-started/tutorials/tutorial-hdfs-logs>
10. MITRE. ATT&CK Matrix for Enterprise. The MITRE Corporation [Internet]. 2026 [cited 2026 May 22]. Available from: <https://attack.mitre.org/>
11. Al-Sada B, Sadighian A, Oligeri G. MITRE ATT&CK: State of the art and way forward. *ACM Comput Surv* 2024;57(1):1-37.
12. Liu JJ, Cassales GW, Liu FT, Pfahringer B, Bifet A. Adaptive Isolation Forest. In: *International Conference on Discovery Science*, September 22, 2025; Slovenia; 2025. p. 363-78.
13. AlQabbany AO, Azmi AM. Measuring the effectiveness of adaptive random forest for handling concept drift in big data streams. *Entropy* 2021;23(7):859.



14. Cano A, Krawczyk B. ROSE: robust online self-adjusting ensemble for continual learning on imbalanced drifting data streams. *Mach Learn* 2022;111(7):2561-99.
15. Garcia-Mendez S, de Arriba-Perez F, Leal F, Veloso B, Malheiro B, Burguillo-Rial JC. An explainable machine learning framework for railway predictive maintenance using data streams from the metro operator of Portugal. *Sci Rep* 2025;15(1):27495.
16. Xu J, Lin C, Liu F, Wang Y, Xiong W, Li Z, et al. StreamAD: A cloud platform metrics-oriented benchmark for unsupervised online anomaly detection. *BenchCouncil Trans Benchmarks Stand Eval* 2023;3(2):100121.
17. Dhal P, Azad C. A fine-tuning deep learning with multi-objective-based feature selection approach for the classification of text. *Neural Comput Appl* 2024;36(7):3525–53.
18. Gama J, Zliobaite I, Bifet A, Pechenizkiy M, Bouchachia A. A survey on concept drift adaptation. *ACM Comput Surv* 2014;46(4):1-37.
19. Souiden I, Omri MN, Brahmi Z. A survey of outlier detection in high dimensional data streams. *Comput Sci Rev* 2022;44:100463.
20. Saiyed AM. Experimental Evaluation of Real-Time Data Streaming Analytics Using Reinforcement Learning. *J Integr Des Res* 2024;5(4):51-61.
21. Bifet A, Gavalda R, Holmes G, Pfahringer B. Machine learning for data streams: with practical examples in MOA. Massachusetts: The MIT Press; 2017.



การพยากรณ์ปริมาณน้ำฝนรายเดือนในจังหวัดแพร่โดยวิธีทางสถิติ Monthly Rainfall Forecasting in Phrae Province Using Statistical Methods

ยุทธชัย มิ่งขวัญ

สาขาวิชาคณิตศาสตร์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์ อุดรดิตถ์ 53000

Yutthachai Mingkwan

Department of Applied Mathematics, Faculty of Science and Technology, Uttaradit Rajabhat University,
Uttaradit 53000

Corresponding author: yutthachai.min@uru.ac.th

Received: 6 May 2026/ Revised: 26 June 2026/ Accepted: 28 June 2026

บทคัดย่อ

จังหวัดแพร่เป็นจังหวัดที่ประสบปัญหาอุทกภัยและภัยแล้งบ่อยครั้ง การพยากรณ์จึงมีบทบาทสำคัญที่ช่วยในการเตรียมความพร้อม วางแผน และป้องกัน เพื่อบรรเทาภัยธรรมชาติที่อาจเกิดขึ้นได้ งานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบวิธีการพยากรณ์ปริมาณน้ำฝนรายเดือนในจังหวัดแพร่ด้วยวิธีทางสถิติ 3 วิธี ได้แก่ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีฤดูกาลอย่างง่าย วิธีของบ็อกซ์และเจนกินส์ และวิธีการพยากรณ์รวม โดยใช้ข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายเดือนตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2554 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2568 รวม 180 เดือน แบ่งข้อมูลออกเป็น 2 ชุด คือ ชุดที่ 1 เป็นปริมาณน้ำฝนตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2554 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2567 ไว้สำหรับสร้างตัวแบบพยากรณ์ และชุดที่ 2 เป็นปริมาณน้ำฝนตั้งแต่เดือนมกราคมถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2568 ไว้สำหรับเปรียบเทียบประสิทธิภาพวิธีการพยากรณ์ ด้วยเกณฑ์ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (RMSE) ค่าความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAE) และค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์เพียร์สัน (r) ผลการศึกษาพบว่า วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีฤดูกาลอย่างง่ายเป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพการพยากรณ์โดยรวมดีที่สุด โดยให้ค่า RMSE ต่ำสุดเท่ากับ 92.47 มิลลิเมตร และมีค่า r สูงสุดเท่ากับ 0.835 ถึงแม้ว่าวิธีการพยากรณ์รวมให้ค่า MAE ต่ำที่สุด แต่วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีฤดูกาลอย่างง่ายมีค่า MAE ที่ใกล้เคียงกัน (MAE เท่ากับ 52.86 มิลลิเมตร) ดังนั้นจึงเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการพยากรณ์ปริมาณน้ำฝนรายเดือนในจังหวัดแพร่ โดยผลการพยากรณ์ปริมาณน้ำฝนรวมในปี พ.ศ. 2569 เท่ากับ 1,367.76 มิลลิเมตร ซึ่งมีแนวโน้มลดลงเมื่อเทียบกับปริมาณน้ำฝนรวมในปี พ.ศ. 2568

คำสำคัญ: การพยากรณ์ปริมาณน้ำฝน การทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีฤดูกาลอย่างง่าย บ็อกซ์และเจนกินส์ การพยากรณ์รวม

Abstract

Phrae Province frequently experiences chronic floods and droughts; therefore, accurate rainfall forecasting plays a pivotal role in enhancing preparedness, strategic planning, and natural disaster mitigation. This study aimed to investigate and compare three statistical approaches for forecasting monthly rainfall in Phrae Province: Simple Seasonal Exponential Smoothing (SSES), the Box and Jenkins method, and Combined Forecasting. The dataset comprised 180 monthly observations spanning from January 2011 to December 2025. This dataset was partitioned into two subsets: the first subset (January 2011 to December 2024) was



utilized for model construction, whereas the second subset (January to December 2025) was reserved for evaluating and validating forecasting performance. Model accuracy was rigorously assessed using three statistical criteria: Root Mean Squared Error (RMSE), Mean Absolute Error (MAE), and Pearson correlation coefficient (r). The empirical results demonstrated that the SSES method exhibited the best overall forecasting performance, yielding the lowest RMSE of 92.47 mm and the highest r value of 0.835. Although the Combined Forecasting method achieved the lowest MAE, the SSES method produced a comparably low MAE of 52.86 mm. Consequently, SSES was determined to be the most suitable model for predicting monthly rainfall in Phrae Province. Based on this optimal model, the total annual rainfall for 2026 is projected to be 1,367.76 mm, indicating a downward trend compared to the total rainfall recorded in 2025.

Keywords: Rainfall Forecasting, Simple Seasonal Exponential Smoothing, Box and Jenkins, Combined Forecasting

บทนำ

น้ำฝนเป็นทรัพยากรที่สำคัญอย่างมากต่อการใช้ชีวิตของคนในจังหวัดแพร่ ที่จะต้องนำไปใช้ในการอุปโภค บริโภค และการนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ โดยเฉพาะอย่างยิ่งทางด้านเกษตรกรรม เนื่องจากประชากรในจังหวัดแพร่ส่วนใหญ่ ประกอบอาชีพเกษตรกรรม โดยในปี พ.ศ. 2568 จังหวัดแพร่มีพื้นที่ทำการเกษตรจำนวน 821,162 ไร่ คิดเป็นร้อยละ 20.09 ของพื้นที่ทั้งหมด มีครัวเรือนที่ประกอบอาชีพการเกษตร จำนวน 53,434 ครัวเรือน คิดเป็นร้อยละ 29.82 ของจำนวนครัวเรือน ทั้งหมด [1] น้ำฝนจึงเป็นปัจจัยที่สำคัญอย่างยิ่งต่อเกษตรกรที่จะสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ ทางเกษตรเพื่อทำให้เกษตรกรมีความเป็นอยู่ที่ดี แต่ถ้าเกิดเหตุการณ์ที่มีปริมาณน้ำฝนไม่เพียงพอ หรือมีปริมาณน้ำฝนที่มากเกินไปแล้วย่อมส่งผลกระทบต่อ การดำเนินชีวิตของเกษตรกรและคนในจังหวัดอย่างแน่นอน จากในอดีตที่ผ่านมา จังหวัดแพร่เคยประสบอุทกภัย และภัยแล้ง ทำให้พื้นที่ด้านการเกษตรได้รับความเสียหายเป็นจำนวนมาก เช่น ในช่วงเดือน มกราคม พ.ศ. 2559 เกิดสถานการณ์ภัยแล้งปริมาณน้ำเริ่มแห้งขอดบางช่วงถึงกับไม่มีน้ำไหลผ่านชาวบ้านหลายหมู่บ้านเดือดร้อนหนักหาน้ำทำการเกษตรไม่ได้ ทำให้เกษตรกรเดือดร้อนเนื่องจากทางจังหวัดไม่ได้มีการเตรียมการป้องกันไว้ก่อน ทำให้ชาวบ้านต้องออกมาช่วยเหลือกันเอง โดยมีชาวบ้านบางพื้นที่ในเขตอำเภอเมืองและอำเภอวังชิ้น ได้ช่วยกันนำเอากะสอบทรายไปบรรจุทรายเพื่อ กันน้ำในแม่น้ำยม และชาวบ้านบางพื้นที่ได้นำเอาเครื่องสูบน้ำของตนเองทำการสูบน้ำที่คลองชลประทานเพื่อสูบน้ำเข้าพื้นที่ การเกษตรของตนเอง [2] และในช่วงวันที่ 20-22 สิงหาคม พ.ศ. 2563 มีฝนตกหนักส่งผลให้ทั่วทุกพื้นที่ของจังหวัดแพร่มี ปริมาณน้ำท่วมเป็นจำนวนมากรวมทั้ง 8 อำเภอ 43 ตำบล 195 หมู่บ้าน 666 หลังคาเรือน [3] และในช่วงเดือนกรกฎาคม พ.ศ. 2568 ได้เกิดฝนตกอย่างหนักในจังหวัดภาคเหนือตอนบนและในจังหวัดแพร่ทำให้มีปริมาณน้ำฝนสะสมเป็นจำนวนมาก และในวันที่ 25 กรกฎาคม พ.ศ. 2568 ระดับน้ำแม่น้ำยมเพิ่มสูงขึ้น 11 เมตรและมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง ซึ่งผลทำให้ มวลน้ำทะลักเข้าท่วม 5 อำเภอ ได้แก่ อำเภอเมือง อำเภอสอง อำเภอเด่นชัย อำเภอหนองม่วงไข่และอำเภอสูงเม่น รวมถึงใน ย่านเศรษฐกิจในเขตเทศบาลเมืองแพร่ และมวลน้ำในแม่น้ำยมไหลเข้าสู่อำเภอลองและอำเภอวังชิ้น ก่อนลงสู่อำเภอศรีสาขาลำ ยจังหวัดสุโขทัย [4] จากอุทกภัยและภัยแล้งที่เกิดขึ้นทำให้ชาวบ้านและเกษตรกรจำนวนมากได้รับผลกระทบ พื้นที่และผลผลิต ทางเกษตรได้รับความเสียหาย

ในสถานการณ์ปัญหาที่เกิดขึ้นถ้าได้มีการพยากรณ์ปริมาณน้ำฝนล่วงหน้าจะทำให้สามารถคาดการณ์ปริมาณน้ำฝนที่ จะเกิดขึ้นได้ว่ามีปริมาณมากหรือน้อยกว่าเมื่อเทียบกับในปีที่ผ่านมา ซึ่งช่วยในการวางแผน ป้องกันการเกิดอุทกภัยและภัยแล้ง ที่อาจจะเกิดขึ้นได้ ผู้วิจัยจึงได้ทำการศึกษางานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพยากรณ์ปริมาณน้ำฝนในแต่ละงานวิจัย พบว่า มี การศึกษาวิธีการพยากรณ์ปริมาณน้ำฝนรายเดือนในจังหวัดพัทลุง ณ ศูนย์อุทกวิทยาฯ ภาคใต้ ด้วยวิธีการพยากรณ์ทางสถิติ 2 วิธี ได้แก่ วิธีของบอซซ์และเจนกินส์ และวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีฤดูกาลอย่างง่าย พร้อมทั้งทำการเปรียบเทียบ

ประสิทธิภาพวิธีการพยากรณ์โดยใช้ค่าร้อยละความคลาดเคลื่อนสัมบูรณ์เฉลี่ย (MAPE) และ RMSE ที่ต่ำที่สุด ผลการศึกษาพบว่า วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีฤดูกาลอย่างง่ายเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดในการพยากรณ์ [5] การศึกษาการสร้างตัวแบบพยากรณ์ปริมาณน้ำฝนในจังหวัดอุดรดิตถ์ด้วยวิธีการพยากรณ์ทางสถิติ 3 วิธี ได้แก่ วิธีการแยกส่วนประกอบ วิธีของวินเทอร์แบบบวก และวิธีของบ็อกซ์และเจนกินส์ และทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพวิธีการพยากรณ์ ด้วยค่า RMSE ที่ต่ำที่สุด ผลการศึกษาพบว่า วิธีของบ็อกซ์และเจนกินส์ ที่มีตัวแบบ SARIMA(1, 0, 0)(1, 1, 0)₁₂ ไม่มีค่าคงตัว มีความเหมาะสมที่สุดในการพยากรณ์ [6] การศึกษาการสร้างตัวแบบพยากรณ์ปริมาณน้ำฝนในจังหวัดนครราชสีมา ด้วยวิธีการพยากรณ์ทางสถิติ 4 วิธี ได้แก่ วิธีของบ็อกซ์และเจนกินส์ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีฤดูกาลอย่างง่าย วิธีวินเทอร์แบบบวก และวิธีวินเทอร์แบบคูณ และทำการคัดเลือกตัวแบบพยากรณ์โดยใช้ค่า RMSE ที่ต่ำที่สุด ผลการศึกษาพบว่า วิธีของบ็อกซ์และเจนกินส์ที่มีตัวแบบ SARIMA(0, 0, 0)(1, 1, 0)₁₂ ไม่มีค่าคงตัว มีความเหมาะสมที่สุดในการพยากรณ์ [7] การศึกษาการสร้างตัวแบบและเปรียบเทียบตัวแบบพยากรณ์ปริมาณน้ำฝนในจังหวัดนราธิวาสด้วยวิธีการพยากรณ์ทางสถิติ 2 วิธี ได้แก่ วิธีของวินเทอร์ และวิธีของบ็อกซ์และเจนกินส์ และทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวแบบโดยใช้เกณฑ์จากค่า MAPE และ RMSE ผลการศึกษาพบว่า วิธีของวินเทอร์เป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดในการพยากรณ์ [8] การศึกษาการสร้างตัวแบบพยากรณ์ SRIMA ด้วยวิธีของบ็อกซ์และเจนกินส์ โดยใช้ข้อมูลปริมาณน้ำฝนจาก สถานี Nyala ประเทศชูดาน ผลการศึกษาพบว่า ตัวแบบพยากรณ์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับปริมาณน้ำฝนรายเดือนของสถานี Nyala ประเทศชูดาน คือ SRIMA (0, 0, 0)(0, 1, 1)₁₂ [9] การศึกษาเปรียบเทียบตัวแบบการพยากรณ์ปริมาณน้ำฝนในเมือง Umuahia รัฐ Abia ประเทศไนจีเรีย โดยใช้ตัวแบบพยากรณ์ 2 แบบ ได้แก่ ตัวแบบ SARIMA ด้วยวิธีของบ็อกซ์และเจนกินส์และตัวแบบโครงข่ายประสาทเทียมเชิงฤดูกาล (Seasonal Artificial Neural Network: SANN) และทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวแบบพยากรณ์โดยพิจารณาจากค่าความคลาดเคลื่อนการพยากรณ์ 4 ค่า ได้แก่ ค่าความเคลื่อน ค่าความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย ค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย และค่า RMSE ผลการศึกษาพบว่า ตัวแบบ SARIMA ด้วยวิธีของบ็อกซ์และเจนกินส์มีค่าความคลาดเคลื่อนที่ต่ำที่สุด จึงเป็นตัวแบบที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการพยากรณ์ของปริมาณน้ำฝน [10] การศึกษาการพยากรณ์ปริมาณน้ำฝนโดยการวิเคราะห์เปรียบเทียบตัวแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่อง (Machine Learning) แบบดั้งเดิมและแบบการเรียนรู้เชิงลึก (Deep Learning) โดยใช้ข้อมูลอนุกรมเวลาปริมาณน้ำฝนรายชั่วโมงจากเมืองสำคัญในประเทศอังกฤษ โดยใช้ตัวแบบจำลองที่นำมาเปรียบเทียบ ได้แก่ ตัวแบบ Long Short-Term Memory (LSTM), Stacked-LSTM, Bidirectional-LSTM, XGBoost และตัวแบบผสมซึ่งประกอบด้วย Gradient Boosting Regressor, Linear Support Vector Regression และ Extra-Trees Regressor และ ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวแบบจำลอง โดยพิจารณาจากค่า RMSE, MAE และค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ยเชิงลอการิทึม (Root Mean Squared Logarithmic Error: RMSLE) ผลการศึกษาพบว่า ตัวแบบ Stacked-LSTM และ Bidirectional-LSTM เป็นตัวแบบที่ให้ผลการพยากรณ์ดีที่สุด [11] การศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวแบบจำลองการเรียนรู้ของเครื่องสำหรับการพยากรณ์ปริมาณน้ำฝนล่วงหน้าหนึ่งวัน ซึ่งได้ใช้ข้อมูลปริมาณน้ำฝนของสองภูมิภาคของประเทศอินเดีย ได้แก่ ภูมิภาค Pune จากรัฐ Maharashtra และ ภูมิภาค Panchmahal จากรัฐ Gujarat ในการศึกษาครั้งนี้ได้ใช้ตัวแบบจำลอง ได้แก่ การถดถอยเชิงเส้นพหุคูณ (MLR), ต้นไม้ตัดสินใจ (DT), K-Nearest Neighbor (K-NN) และ Random Forest (RF) และ ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวแบบจำลองในการพยากรณ์ปริมาณน้ำฝนกับปริมาณน้ำฝนจริง โดยพิจารณาจากค่า RMSE และ MAE ผลการศึกษาพบว่า ในภูมิภาค Pune ตัวแบบจำลอง K-NN มีประสิทธิภาพดีกว่าตัวแบบจำลองอื่น ๆ และในภูมิภาค Panchmahal ตัวแบบจำลอง RF มีประสิทธิภาพที่ดีกว่า [12]

จากการศึกษาและค้นคว้าข้อมูลงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการพยากรณ์ปริมาณน้ำฝนที่ผ่านมา พบว่ายังไม่เคยมีการศึกษาการพยากรณ์ปริมาณน้ำฝนในจังหวัดแพร่ ดังนั้น ผู้วิจัยจึงสนใจที่จะศึกษาการพยากรณ์ปริมาณน้ำฝนรายเดือนในจังหวัดแพร่ เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปใช้ประโยชน์ในการวางแผนและป้องกันภัยที่อาจจะเกิดในอนาคต โดยงานวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาและเปรียบเทียบวิธีการพยากรณ์ทางสถิติ 3 วิธี ได้แก่ 1) วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีฤดูกาลอย่างง่าย เป็นวิธีที่ใช้ได้ดีกับข้อมูลที่มีอิทธิพลของฤดูกาล 2) วิธีของบ็อกซ์และเจนกินส์ เป็นวิธีที่สามารถใช้ได้กับข้อมูลที่มี



แนวโน้ม หรือฤดูกาล หรือที่มีทั้งแนวโน้มและฤดูกาลและ 3) วิธีการพยากรณ์รวมเป็นการศึกษาวิธีการพยากรณ์ของแต่ละวิธี แล้วนำมารวมเข้าด้วยกัน ซึ่งผลการศึกษาที่ได้ที่จะเป็นแนวทางเชิงข้อมูลที่เป็นประโยชน์ต่อหน่วยงานที่เกี่ยวข้องในการบริหารจัดการน้ำ และเพื่อบรรเทาปัญหาที่เกิดขึ้นได้อย่างเหมาะสมต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การรวบรวมข้อมูล

ดำเนินการเก็บรวบรวมข้อมูลปริมาณน้ำฝนในจังหวัดแพร่จากกรมอุตุนิยมวิทยาและสถานีอุตุนิยมวิทยาแพร่ทำให้ได้อนุกรมเวลาปริมาณน้ำฝนรายเดือน (หน่วย : มิลลิเมตร) ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2554 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2568 จำนวนทั้งหมด 180 เดือน และทำการแบ่งข้อมูลทั้งหมดออกเป็น 2 ชุด ดังนี้ ข้อมูลชุดที่ 1 ไว้สำหรับในการสร้างตัวแบบพยากรณ์จากทั้ง 3 วิธี โดยใช้ข้อมูลปริมาณน้ำฝนตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2554 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2567 จำนวน 168 เดือน และข้อมูลชุดที่ 2 ไว้สำหรับเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวแบบพยากรณ์จากทั้ง 3 วิธี โดยใช้ข้อมูลปริมาณน้ำฝนตั้งแต่เดือนมกราคมถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2568 จำนวน 12 เดือน สาเหตุที่ต้องแบ่งข้อมูลนั้นเพื่อป้องกันการประเมินประสิทธิภาพของตัวแบบพยากรณ์จากข้อมูลชุดเดียวกับที่ใช้สร้างตัวแบบพยากรณ์ อาจทำให้ผลการประเมินมีความลำเอียงและสูงกว่าความเป็นจริงได้ ในการใช้ข้อมูลอีกชุดหนึ่งที่ไม่ได้มีส่วนในการสร้างตัวแบบพยากรณ์จะช่วยให้สามารถตรวจสอบความสามารถในการพยากรณ์ข้อมูลใหม่ ได้อย่างเป็นกลางและสะท้อนประสิทธิภาพที่แท้จริงของตัวแบบพยากรณ์

2. วิเคราะห์การเคลื่อนไหวของอนุกรมเวลา

ทำการวิเคราะห์ลักษณะการเคลื่อนไหวของอนุกรมเวลาปริมาณน้ำฝนจากข้อมูลในชุดที่ 1 ว่ามีลักษณะการเคลื่อนไหวที่มีแนวโน้มและอิทธิพลของฤดูกาลหรือไม่ โดยการพิจารณาจากกราฟของอนุกรมเวลาและการทดสอบของ Kruskal-Wallis Test [13] และทำการทดสอบความคงที่ (Stationary) ของอนุกรมเวลาด้วยการทดสอบของ Augmented Dickey-Fuller (ADF) Test

3. การสร้างตัวแบบพยากรณ์

การสร้างตัวแบบพยากรณ์จากทั้ง 3 วิธีจะใช้ตัวโปรแกรม ได้แก่ SPSS version 31, R และ Excel เข้ามาช่วยในการสร้างและวิเคราะห์ผล มีรายละเอียดดังนี้

3.1 วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีฤดูกาลอย่างง่าย (Simple Seasonal Exponential Smoothing

Method: SSES)

เป็นวิธีที่เหมาะสมสำหรับข้อมูลอนุกรมเวลาที่มีอิทธิพลของฤดูกาลเพียงอย่างเดียว ซึ่งสอดคล้องกับลักษณะข้อมูลของปริมาณน้ำฝนที่นำมาศึกษาในครั้งนี้ โดยกระบวนการในการสร้างตัวแบบพยากรณ์จะต้องอาศัยค่าพารามิเตอร์ที่สำคัญ 2 ส่วน คือ ค่าพารามิเตอร์การทำให้เรียบของระดับ (α) และค่าพารามิเตอร์การทำให้เรียบของฤดูกาล (δ) เพื่อนำไปใช้ประกอบในการสร้างตัวแบบพยากรณ์ ซึ่งตัวแบบพยากรณ์มีสมการดังนี้ [14]

$$\hat{Y}_{t+m} = a_t + \hat{S}_{t-s+m} \quad (1)$$

โดยที่ $\hat{Y}_{t+m}$ คือ ค่าปริมาณน้ำฝนพยากรณ์ ณ เวลา $t + m$

a_t คือ ค่าประมาณระดับ (Level) ณ เวลา t เมื่อ $a_t = \alpha(Y_t - \hat{S}_{t-s}) + (1 - \alpha)a_{t-1}$

$\hat{S}_t$ คือ ค่าดัชนีฤดูกาลปริมาณน้ำฝน ณ เวลา t เมื่อ $\hat{S}_t = \delta(Y_t - a_t) + (1 - \delta)\hat{S}_{t-s}$

s คือ จำนวนฤดูกาลปริมาณน้ำฝนรายเดือน ($s = 12$)

m คือ จำนวนเวลาที่พยากรณ์ล่วงหน้า

α และ δ คือ ค่าพารามิเตอร์การทำให้เรียบของระดับและฤดูกาล ตามลำดับ โดยมีค่าตั้งแต่ 0 ถึง 1

3.2 วิธีของบ็อกซ์และเจนกินส์ (Box and Jenkins Method)

การกำหนดตัวแบบพยากรณ์ในวิธีของบ็อกซ์และเจนกินส์ ข้อมูลอนุกรมเวลาจะต้องมีความคงที่ [13] ถ้าไม่คงที่เนื่องจากมีแนวโน้มและฤดูกาลจะต้องมีการปรับข้อมูลใหม่ด้วยการหาผลต่างและผลต่างฤดูกาล [14] จากนั้นทำการวิเคราะห์ฟังก์ชันสหสัมพันธ์ในตัว ACF (Autocorrelation Function) และ ฟังก์ชันสหสัมพันธ์ในตัวบางส่วน PACF (Partial Autocorrelation Function) เพื่อกำหนดค่าพารามิเตอร์ p , q , P และ Q ในการสร้างตัวแบบ [13, 14] ทำการกำหนดตัวแบบที่เป็นไปได้และทำการประมาณค่าพารามิเตอร์พร้อมกับทดสอบค่าพารามิเตอร์แต่ละตัวว่ามีความเหมาะสมอยู่ในตัวแบบหรือไม่ แล้วทำการเลือกตัวแบบที่มีค่าพารามิเตอร์ที่มีความเหมาะสม โดยมีตัวแบบพยากรณ์ที่ใช้ศึกษา คือ SARIMA (p, d, q) (P, D, Q)_s [14, 15] ซึ่งตัวแบบพยากรณ์มีสมการดังนี้

$$\phi_p(B)\Phi_P(B^s)(1-B)^d(1-B^s)^D Y_t = \theta_0 + \theta_q(B)\Theta_Q(B^s)\varepsilon_t \quad (2)$$

โดยที่ Y_t คือ ค่าปริมาณน้ำฝนจริง ณ เวลา t

θ_0 คือ ค่าคงที่ (constant)

ε_t คือ ความคลาดเคลื่อนสุ่ม ณ เวลา t

t คือ จำนวนเวลา 1, 2, 3, ..., n_1 เมื่อ n_1 คือ ข้อมูลอนุกรมเวลาชุดที่ 1 ($n_1 = 168$)

d และ D คือ อันดับของการหาผลต่างและผลต่างฤดูกาล ตามลำดับ

B คือ การดำเนินการย้อนกลับ เมื่อ $B^s Y_t = Y_{t-s}$

s คือ จำนวนฤดูกาลของปริมาณน้ำฝนรายเดือน ($s = 12$)

$\phi_p(B) = 1 - \phi_1 B - \phi_2 B^2 - \dots - \phi_p B^p$ คือ ตัวดำเนินการ autoregressive อันดับที่ p แบบไม่มีฤดูกาล

$\Phi_P(B^s) = 1 - \phi_1 B^s - \phi_2 B^{2s} - \dots - \phi_P B^{Ps}$ คือ ตัวดำเนินการ autoregressive อันดับที่ P แบบมีฤดูกาล

$\theta_q(B) = 1 - \theta_1 B - \theta_2 B^2 - \dots - \theta_q B^q$ คือ ตัวดำเนินการ moving average อันดับที่ q แบบไม่มีฤดูกาล

$\Theta_Q(B^s) = 1 - \theta_1 B^s - \theta_2 B^{2s} - \dots - \theta_Q B^{Qs}$ คือ ตัวดำเนินการ moving average อันดับที่ Q แบบมีฤดูกาล

3.3 วิธีการพยากรณ์รวม (Combined Forecasting method)

เป็นวิธีการนำค่าพยากรณ์ที่ได้จากหลายวิธีมาคำนวณรวมกันเพื่อให้ได้ค่าพยากรณ์เพียงค่าเดียว ซึ่งในการวิจัยครั้งนี้ได้ใช้ค่าพยากรณ์จากตัวแบบพยากรณ์ทั้ง 2 วิธีข้างต้นที่ได้ผ่านการตรวจสอบความเหมาะสม แล้วนำมาดำเนินการสร้างตัวแบบพยากรณ์รวม 2 วิธีเข้าด้วยกัน และอาศัยหลักการวิเคราะห์การถดถอยเข้ามาช่วยในการหาค่าถ่วงน้ำหนักของแต่ละวิธี [16] แล้วนำไปสร้างตัวแบบพยากรณ์ ซึ่งตัวแบบพยากรณ์มีสมการดังนี้ [16, 17]

$$\hat{Y}_t = w_1 \hat{Y}_{1t} + w_2 \hat{Y}_{2t} \quad (3)$$

โดยที่ $\hat{Y}_t$ คือ ค่าปริมาณน้ำฝนพยากรณ์ ณ เวลา t

$\hat{Y}_{1t}$ และ $\hat{Y}_{2t}$ คือ ค่าปริมาณน้ำฝนพยากรณ์ของวิธีการปรับให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีฤดูกาลอย่างง่ายและวิธีของบ็อกซ์และเจนกินส์ ตามลำดับ ณ เวลา t

w_1 และ w_2 คือ ค่าถ่วงน้ำหนัก เมื่อ $w_1 = \frac{b_1}{b_1 + b_2}$ และ $w_2 = \frac{b_2}{b_1 + b_2}$

สมการถดถอยที่ใช้ในการหาค่าถ่วงน้ำหนักมีสมการดังนี้

$$\hat{Y}_t = b_1 \hat{Y}_{1t} + b_2 \hat{Y}_{2t} \quad (4)$$

b_1 และ b_2 คือ ค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยของวิธีการปรับให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีฤดูกาลอย่างง่ายและวิธีของบ็อกซ์และเจนกินส์ ตามลำดับ



4. การตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแบบพยากรณ์

ทำการตรวจสอบค่าความคลาดเคลื่อนจากตัวแบบพยากรณ์ต้องเป็นไปตามข้อสมมุติ ดังนี้ 1) ความคลาดเคลื่อนมีการแจกแจงปกติ ทำการทดสอบด้วย Kolmogorov-Smirnov test (K-S test) 2) ความคลาดเคลื่อนมีความเป็นอิสระกัน ทำการทดสอบด้วย Ljung-Box test 3) ความคลาดเคลื่อนมีค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างจากศูนย์ ทำการทดสอบด้วย t-test [7, 13] และ 4) ความคลาดเคลื่อนมีความแปรปรวนคงที่ ทำการทดสอบด้วย ARCH-LM Test [18] ถ้าพบว่าตัวแบบพยากรณ์ใดมีความคลาดเคลื่อนไม่เป็นไปตามข้อใดข้อหนึ่ง แสดงว่าตัวแบบพยากรณ์นั้นไม่มีความเหมาะสมและจะไม่นำไปใช้ในการพยากรณ์

5. การเปรียบเทียบประสิทธิภาพวิธีการพยากรณ์

ในการหาวิธีการพยากรณ์ที่เหมาะสมที่สุดนั้น โดยการเปรียบเทียบปริมาณน้ำฝนที่เกิดขึ้นจริงในข้อมูลชุดที่ 2 ตั้งแต่เดือนมกราคมถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2568 กับค่าพยากรณ์ของแต่ละวิธีเพื่อคำนวณหาค่าเกณฑ์ที่ใช้ในการพิจารณา 3 ค่า ได้แก่ RMSE, MAE และ r โดยวิธีการพยากรณ์ใดมีค่า RMSE และ MAE ที่ต่ำสุด และให้ค่า r สูงสุด [19, 20] แสดงว่ามีความเหมาะสมที่สุดสำหรับการพยากรณ์ปริมาณน้ำฝนชุดนี้ วิธีการหาค่าของ RMSE MAE และ r มีสมการตามลำดับดังนี้ [13, 14]

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n_2} \sum_{t=1}^{n_2} (Y_t - \hat{Y}_t)^2} \quad (5)$$

$$MAE = \frac{1}{n_2} \sum_{t=1}^{n_2} |Y_t - \hat{Y}_t| \quad (6)$$

$$r = \frac{\sum_{t=1}^{n_2} (Y_t - \bar{Y})(\hat{Y}_t - \bar{\hat{Y}})}{\sqrt{\sum_{t=1}^{n_2} (Y_t - \bar{Y})^2 (\hat{Y}_t - \bar{\hat{Y}})^2}} \quad (7)$$

โดยที่ Y_t คือ ค่าปริมาณน้ำฝนจริง ณ เวลา t และ $\bar{Y}$ คือ ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำฝนจริง

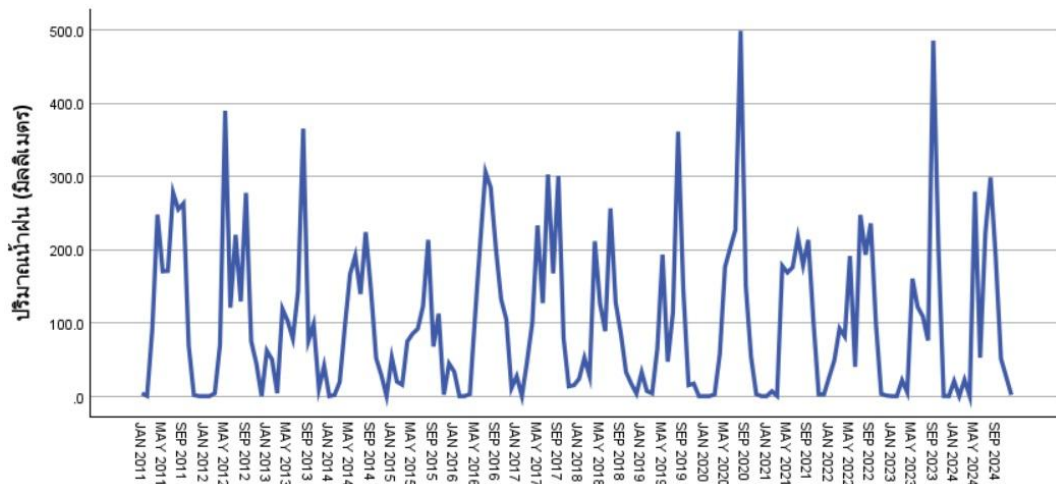
$\hat{Y}_t$ คือ ค่าปริมาณน้ำฝนพยากรณ์ ณ เวลา t และ $\bar{\hat{Y}}$ คือ ค่าเฉลี่ยปริมาณน้ำฝนพยากรณ์

n_2 คือ ข้อมูลอนุกรมเวลาชุดที่ 2 ($n_2 = 12$)

ผลการวิจัย

1. ผลการวิเคราะห์การเคลื่อนไหวของอนุกรมเวลา

การเคลื่อนไหวของอนุกรมเวลาปริมาณน้ำฝนในข้อมูลชุดที่ 1 ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2554 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2567 จำนวน 168 เดือน แสดงดังภาพที่ 1 พบว่า อนุกรมเวลาชุดนี้มีลักษณะการเคลื่อนไหวที่ไม่มีแนวโน้ม แต่มีการเคลื่อนไหวในลักษณะขึ้นและลงสลับกัน มีรูปแบบคล้ายกันในทุก ๆ ปี แสดงให้เห็นว่าอนุกรมเวลาชุดนี้มีอิทธิพลของฤดูกาล และเพื่อความชัดเจนจึงทำการทดสอบสมมติฐานแนวโน้มและฤดูกาลด้วยการทดสอบของ Kruskal-Wallis test ที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 ผลการทดสอบสมมติฐาน พบว่า อนุกรมเวลาชุดนี้ไม่มีแนวโน้ม ($p\text{-value} = 0.998$) แต่มีอิทธิพลของฤดูกาล ($p\text{-value} < 0.001$) เมื่อทำการทดสอบความคงที่ของอนุกรมเวลาด้วยการทดสอบของ Augmented Dickey-Fuller Test (ADF) พบว่า อนุกรมเวลาปริมาณน้ำฝนไม่มีความคงที่ ($p\text{-value} = 0.192$) และทำการวิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลอนุกรมเวลาในช่วงเวลาแต่ละเดือน พบว่า อนุกรมเวลามีความแปรปรวนไม่คงที่ ดังนั้น จึงต้องแปลงอนุกรมเวลาใหม่เพื่อให้อนุกรมเวลามีความคงที่ด้วยการหาค่ารากที่สอง [14] ทำให้ได้อนุกรมเวลาใหม่ $Z_t = \sqrt{Y_t}$ จากนั้นจึงดำเนินการสร้างตัวแบบพยากรณ์ในแต่ละวิธี



ภาพที่ 1 ปริมาณน้ำฝนในจังหวัดแพร่ตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2554 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2567

2. ผลการสร้างตัวแบบพยากรณ์ด้วยวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีฤดูกาลอย่างง่าย

ผลการสร้างตัวแบบพยากรณ์จากวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีฤดูกาลอย่างง่าย โดยใช้โปรแกรม SPSS ในการหาค่าพารามิเตอร์การทำให้เรียบของระดับ (α) และฤดูกาล (δ) ได้เท่ากับ 0.0996 และ 1.9744×10^{-6} ตามลำดับ แล้วนำค่าพารามิเตอร์ที่ได้ไปหาค่าประมาณระดับและดัชนีฤดูกาลปริมาณน้ำฝน ซึ่งเขียนสมการได้ดังนี้

$$\hat{Z}_{t+m} = 7.9049 + \hat{S}_{t-s+m} \quad (8)$$

เมื่อ $Z_t = \sqrt{Y_t}$ จะได้สมการในการพยากรณ์ดังนี้

$$\hat{Y}_{t+m} = (7.9049 + \hat{S}_{t-s+m})^2 \quad (9)$$

โดยที่ $\hat{Y}_{t+m}$ คือ ค่าพยากรณ์ปริมาณน้ำฝน ณ เวลา $t+m$

$\hat{S}_t$ คือ ค่าดัชนีฤดูกาลปริมาณน้ำฝน แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ค่าดัชนีฤดูกาลปริมาณน้ำฝน

เดือน	$\hat{S}_t$	เดือน	$\hat{S}_t$	เดือน	$\hat{S}_t$
มกราคม	-4.862	พฤษภาคม	4.927	กันยายน	5.446
กุมภาพันธ์	-5.984	มิถุนายน	2.436	ตุลาคม	0.489
มีนาคม	-4.244	กรกฎาคม	5.882	พฤศจิกายน	-4.710
เมษายน	0.281	สิงหาคม	6.811	ธันวาคม	-6.471

จากตารางที่ 1 ค่าดัชนีฤดูกาลปริมาณน้ำฝนในแต่ละเดือน พบว่า ในเดือนที่คาดว่าปริมาณน้ำฝนน้อยที่สุด คือเดือนธันวาคมมีค่าดัชนีฤดูกาลเท่ากับ -6.471 และในเดือนที่มีปริมาณน้ำฝนมากที่สุดคือ เดือนสิงหาคมมีค่าดัชนีฤดูกาลเท่ากับ 6.811

3. ผลการสร้างตัวแบบพยากรณ์ด้วยวิธีของบอซซ์และเจนกินส์

เนื่องจากข้อมูลอนุกรมเวลาชุดนี้มีเพียงฤดูกาล จึงกำหนดตัวแบบพยากรณ์ในส่วนเฉพาะค่า P , D และ Q เท่านั้น และเพื่อให้อนุกรมเวลาชุดนี้มีความคงที่จึงต้องทำการกำจัดฤดูกาล โดยการหาผลต่างฤดูกาลอันดับที่ 1 ($D = 1$) แล้วทำการพิจารณาค่า ACF ที่มีความคงที่ แสดงดังภาพที่ 2 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในตัว ณ lag 12 มีค่าเกินขอบเขตความเชื่อมั่นทำให้ได้ Q เท่ากับ 1 และเมื่อพิจารณาค่า PACF ที่มีความคงที่ แสดงดังภาพที่ 3 พบว่า ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ในตัว



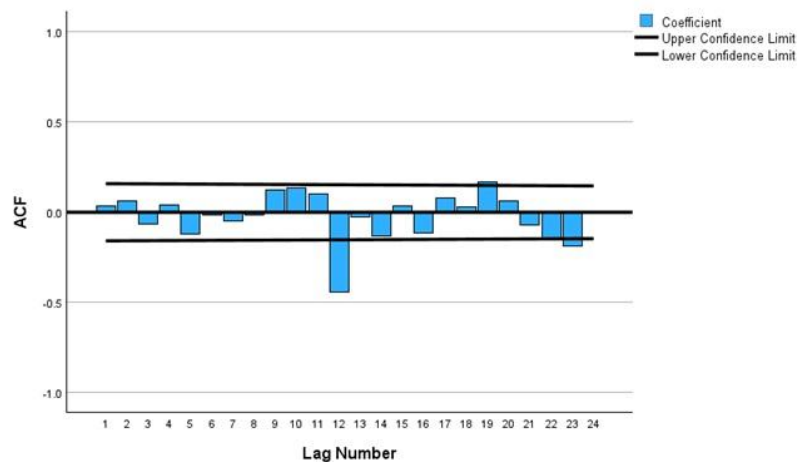
ณ lag 12 และ lag 24 มีค่าเกินขอบเขตความเชื่อมั่นทำให้ได้ P เท่ากับ 2 ดังนั้น จึงกำหนดตัวแบบเริ่มต้น คือ SARIMA (0, 0, 0)(2, 1, 1)₁₂ ไม่มีพจน์ค่าคงที่ และเมื่อทำการตรวจสอบความเหมาะสมของพารามิเตอร์ที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 ทำให้ได้ตัวแบบใหม่ที่เหมาะสม คือ SARIMA (0, 0, 0)(1, 1, 0)₁₂ ไม่มีพจน์ค่าคงที่ โดยมีค่าประมาณพารามิเตอร์ ϕ_1 เท่ากับ -0.4894 (p-value < 0.001) ซึ่งเขียนสมการได้ดังนี้

$$(1 - \phi_1 B^{12})(1 - B^{12})Z_t = \varepsilon_t \quad (10)$$

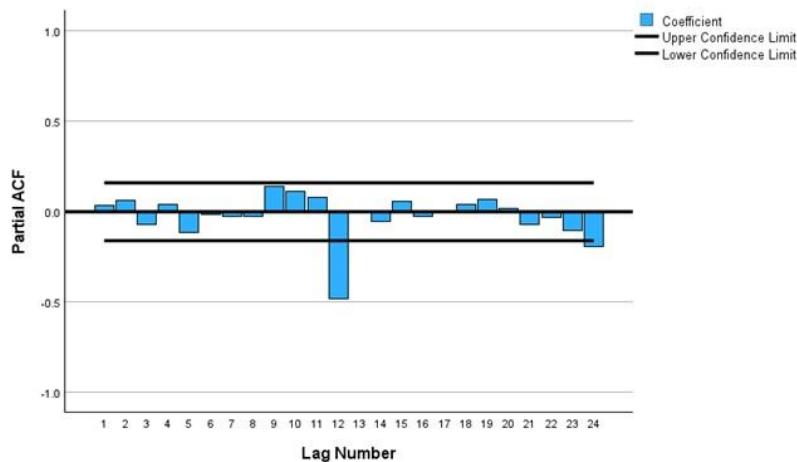
เมื่อ $Z_t = \sqrt{Y_t}$ และแทนค่าประมาณพารามิเตอร์ ϕ_1 จะได้สมการในการพยากรณ์ดังนี้

$$\hat{Y}_t = (0.5106\sqrt{Y_{t-12}} + 0.4894\sqrt{Y_{t-24}})^2 \quad (11)$$

โดยที่ $\hat{Y}_t$ คือ ค่าพยากรณ์ปริมาณน้ำฝน ณ เวลา t



ภาพที่ 2 ACF ของปริมาณน้ำฝนในจังหวัดแพร่ที่มีความคงที่



ภาพที่ 3 PACF ของปริมาณน้ำฝนในจังหวัดแพร่ที่มีความคงที่

4. ผลการสร้างตัวแบบพยากรณ์ด้วยวิธีการพยากรณ์รวม

เมื่อนำค่าพยากรณ์จากทั้ง 2 วิธีมาทำการหาค่าสัมประสิทธิ์การถดถอยด้วยโปรแกรม SPSS ทำให้ได้ค่า $b_1 = 1.0922$ และ $b_2 = -0.1053$ และเมื่อนำมาคำนวณค่าถ่วงน้ำหนักได้ $w_1 = 1.1067$ และ $w_2 = -0.1067$ ซึ่งนำมาเขียนสมการได้ดังนี้

$$\hat{Z}_t = 1.1067\hat{Y}_{1t} - 0.1067\hat{Y}_{2t} \quad (12)$$

เมื่อ $Z_t = \sqrt{Y_t}$ จะได้สมการในการพยากรณ์ดังนี้



$$\hat{Y}_t = (1.1067\hat{Y}_{1t} - 0.1067\hat{Y}_{2t})^2 \quad (13)$$

โดยที่ $\hat{Y}_t$ คือ ค่าพยากรณ์ปริมาณน้ำฝน ณ เวลา t

$\hat{Y}_{1t}$ คือ ค่าพยากรณ์ปริมาณน้ำฝนของวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีฤดูกาลอย่างง่าย ณ เวลา t

$\hat{Y}_{2t}$ คือ ค่าพยากรณ์ปริมาณน้ำฝนของวิธีบอชและเจนกินส์ ณ เวลา t

5. ผลการตรวจสอบความเหมาะสมของตัวแบบพยากรณ์

เมื่อนำค่าความคลาดเคลื่อนจากตัวแบบพยากรณ์ทั้ง 3 วิธี มาทำการตรวจสอบความเหมาะสม แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ผลการตรวจสอบความเหมาะสมของค่าความคลาดเคลื่อนจากตัวแบบพยากรณ์ทั้ง 3 วิธี

วิธีการพยากรณ์	K-S test (p-value)	Ljung-Box test (p-value)	t-test (p-value)	ARCH-LM Test (p-value)
SSES	0.200	0.509	0.753	0.373
Box and Jenkins	0.055	0.107	0.512	0.364
Combined Forecasting	0.200	0.611	0.817	0.174

จากตารางที่ 2 ผลการตรวจสอบความเหมาะสมของค่าความคลาดเคลื่อนจากตัวแบบพยากรณ์ทั้ง 3 วิธี พบว่า ค่าความคลาดเคลื่อนของทุกตัวแบบผ่านการทดสอบสมมติฐานทางสถิติ โดยมีค่า p-value มากกว่า ระดับนัยสำคัญ 0.01 ในทุกการทดสอบ ได้แก่ การทดสอบการแจกแจงแบบปกติ (K-S test) การทดสอบความเป็นอิสระ (Ljung-Box test) การทดสอบค่าเฉลี่ยไม่แตกต่างจากศูนย์ (t-test) และการทดสอบความแปรปรวนคงที่ (ARCH-LM Test) ดังนั้น สามารถสรุปได้ว่าตัวแบบพยากรณ์ทั้ง 3 วิธีมีความเหมาะสมในการนำไปใช้พยากรณ์

6. ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพวิธีการพยากรณ์

ผลการเปรียบเทียบประสิทธิภาพของตัวแบบพยากรณ์โดยพิจารณาจากค่า RMSE, MAE และ r แสดงดังตารางที่ 3

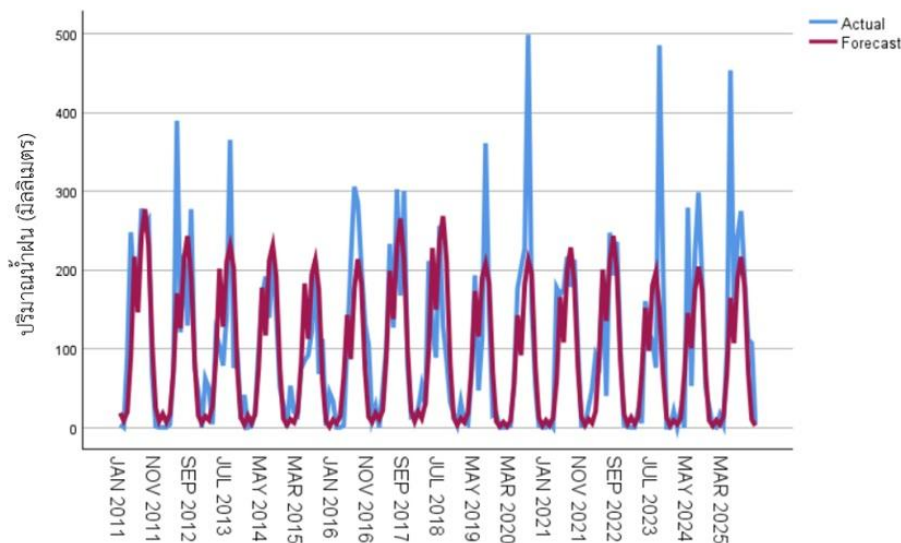
ตารางที่ 3 ค่า RMSE MAE และ r ในข้อมูลชุดที่ 2 จากทั้ง 3 วิธี

วิธีการพยากรณ์	RMSE	MAE	r
SSES	92.47	52.86	0.835
Box and Jenkins	96.67	69.89	0.753
Combined Forecasting	93.37	52.54	0.827

จากตารางที่ 3 พบว่า วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีฤดูกาลอย่างง่ายให้ค่า RMSE ต่ำที่สุด เท่ากับ 92.47 มิลลิเมตร รองลงมาคือ วิธีการพยากรณ์รวม และวิธีของบอชและเจนกินส์ ซึ่งมีค่า RMSE เท่ากับ 93.37 และ 96.67 มิลลิเมตร ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีฤดูกาลอย่างง่ายมีความคลาดเคลื่อนโดยรวมของการพยากรณ์ต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีอื่น และเมื่อพิจารณาค่า MAE พบว่า วิธีการพยากรณ์รวมให้ค่าต่ำที่สุด เท่ากับ 52.54 มิลลิเมตร รองลงมาคือ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีฤดูกาลอย่างง่าย และวิธีของบอชและเจนกินส์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 52.86 และ 69.89 มิลลิเมตร ตามลำดับ อย่างไรก็ตามความแตกต่างของค่า MAE ระหว่างวิธีการพยากรณ์รวมและวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีฤดูกาลอย่างง่ายมีค่าแตกต่างกันไม่มาก สำหรับค่า r พบว่า วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีฤดูกาลอย่างง่ายให้ค่าสูงที่สุด เท่ากับ 0.835 รองลงมา คือ วิธีการพยากรณ์รวม และวิธีของบอชและเจนกินส์ ซึ่งมีค่าเท่ากับ 0.827 และ 0.753 ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าค่าพยากรณ์จากวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีฤดูกาลอย่างง่ายมีความสัมพันธ์กันเชิงบวกที่อยู่ในระดับมากกับค่าจริง และสามารถสะท้อนแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำฝนได้ดีกว่าวิธีอื่น ดังนั้น เมื่อพิจารณาจากค่า RMSE, MAE และ r ทำให้ได้ข้อสรุปได้ว่า วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีฤดูกาลอย่างง่ายมีประสิทธิภาพดีที่สุดในการพยากรณ์ปริมาณน้ำฝนรายเดือนในจังหวัดแพร่ เนื่องจากให้ค่า RMSE ต่ำที่สุดและมีค่า r



สูงที่สุด ขณะที่ค่า MAE มีความแตกต่างจากวิธีการพยากรณ์รวมไม่มาก และ เมื่อนำค่าพยากรณ์จากวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีฤดูกาลอย่างง่ายไปสร้างกราฟเปรียบเทียบกับข้อมูลจริง เพื่อดูลักษณะของการเคลื่อนไหว แสดงดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 การเปรียบเทียบปริมาณน้ำฝนจริงกับค่าพยากรณ์จากวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีฤดูกาลอย่างง่าย

จากภาพที่ 4 พบว่า ลักษณะการเคลื่อนไหวมีบางช่วงเวลาที่ค่าพยากรณ์อาจจะแตกต่างจากค่าจริงบ้าง แต่ลักษณะการเคลื่อนไหวส่วนใหญ่ค่าพยากรณ์มีค่าใกล้เคียงกับค่าจริง

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้ได้ศึกษาการพยากรณ์ปริมาณน้ำฝนรายเดือนในจังหวัดแพร่ โดยใช้ข้อมูลอนุกรมเวลาปริมาณน้ำฝนรายเดือนตั้งแต่เดือนมกราคม พ.ศ. 2554 ถึงเดือนธันวาคม พ.ศ. 2568 จำนวนทั้งหมด 180 เดือนจากกรมอุตุนิยมวิทยาและสถานีอุตุนิยมวิทยาแพร่ และเมื่อนำข้อมูลอนุกรมเวลาปริมาณน้ำฝนมาทำการวิเคราะห์การเคลื่อนไหวเพื่อดูลักษณะของอิทธิพลแนวโน้มและฤดูกาล พบว่า ข้อมูลอนุกรมเวลาชุดนี้มีลักษณะการเคลื่อนไหวที่มีอิทธิพลของฤดูกาลเพียงอย่างเดียวไม่มีส่วนของแนวโน้ม และเมื่อทำการทดสอบความคงที่ของความแปรปรวนพบว่า ความแปรปรวนไม่มีความคงที่จึงต้องทำการแปลงข้อมูลใหม่ให้มีความคงที่ด้วยการหาค่ารากที่สองแล้วจึงดำเนินการสร้างตัวแบบพยากรณ์ ซึ่งในงานวิจัยครั้งนี้ได้นำเสนอการสร้างตัวแบบพยากรณ์ด้วยวิธีการทางสถิติ 3 วิธี คือ วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีฤดูกาลอย่างง่าย วิธีของบ็อกซ์และเจนกินส์ และวิธีการพยากรณ์รวม พร้อมกับทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพวิธีการพยากรณ์ทั้ง 3 วิธี เพื่อทำการคัดเลือกวิธีการพยากรณ์ที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการพยากรณ์ปริมาณน้ำฝนรายเดือนในจังหวัดแพร่ ผลการศึกษาพบว่า วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีฤดูกาลอย่างง่าย ที่มีตัวแบบพยากรณ์ คือ $\hat{Y}_{t+m} = (7.9049 + \hat{S}_{t-s+m})^2$ ให้ประสิทธิภาพในการพยากรณ์ปริมาณน้ำฝนรายเดือนในจังหวัดแพร่ดีที่สุด ทั้งนี้เนื่องมาจากลักษณะข้อมูลปริมาณน้ำฝนรายเดือนในจังหวัดแพร่มีรูปแบบการเคลื่อนไหวของฤดูกาลอย่างชัดเจนซึ่งสอดคล้องกับหลักการของวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีฤดูกาลอย่างง่าย ที่จะมีการแยกส่วนประกอบของฤดูกาลออกมาอย่างชัดเจนทำให้มีการจับลักษณะของรูปแบบการขึ้นและลงของข้อมูลที่มีการเกิดขึ้นซ้ำ ๆ กันตามรอบของเวลาได้อย่างแม่นยำ และสามารถสะท้อนรูปแบบการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำฝนได้ดี โดยมีค่า RMSE ต่ำที่สุด และค่า r สูงที่สุด ซึ่งแสดงให้เห็นว่าวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีฤดูกาลอย่างง่ายสามารถลดความคลาดเคลื่อนที่มีขนาดใหญ่ได้ดีกว่าและสามารถติดตามแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำฝนได้ใกล้เคียงกับค่าจริงมากกว่า ถึงแม้ว่าวิธีการพยากรณ์รวมจะให้ค่า MAE ต่ำสุด แต่ก็มีค่าแตกต่างจากวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีฤดูกาลอย่างง่ายไม่มาก ดังนั้นจึงเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการพยากรณ์ปริมาณน้ำฝนรายเดือนในจังหวัดแพร่ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของธนากรและสมชาย [5] ที่ได้ใช้วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีฤดูกาลอย่างง่ายไปเปรียบเทียบประสิทธิภาพกับวิธีการพยากรณ์อื่น ๆ แล้วให้ผลการศึกษาที่พบว่า

วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีฤดูกาลอย่างง่ายเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการพยากรณ์ เช่นเดียวกัน แต่ขัดแย้งกับงานวิจัยของ วรารัตนาและคณะ [7] ที่ได้ใช้วิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีฤดูกาลอย่างง่ายไปเปรียบเทียบกับประสิทธิภาพกับวิธีการพยากรณ์อื่น ๆ แล้วให้ผลการศึกษาที่พบว่า มีวิธีการพยากรณ์อื่นที่เหมาะสมกว่าซึ่งสาเหตุอาจเนื่องมาจากในบริบทของพื้นที่ที่ต่างกันและปริมาณน้ำฝนที่แตกต่างกัน ย่อมส่งผลทำให้ได้วิธีการพยากรณ์ที่เหมาะสมแตกต่างกัน ในการทำวิจัยครั้งต่อไปผู้สนใจอาจจะศึกษาอิทธิพลที่เกี่ยวข้องกับปริมาณน้ำฝนจากด้านอื่น ๆ เพื่อเข้าร่วมในการสร้างตัวแบบพยากรณ์ที่เหมาะสมต่อไป หรือ อาจจะนำวิธีการพยากรณ์ในการวิจัยครั้งนี้ไปประยุกต์ใช้กับข้อมูลอนุกรมเวลาชุดอื่น ๆ ที่มีลักษณะคล้ายกัน หรือนำวิธีการพยากรณ์ไปเปรียบเทียบกับวิธีการพยากรณ์รูปแบบอื่น ๆ เช่น วิธี Prophet, XGBoost และ LSTM ในข้อมูลชุดอื่น ๆ ต่อไป ถึงแม้จะใช้วิธีการพยากรณ์รูปแบบใดในการพยากรณ์ข้อมูลนั้น สิ่งสำคัญขึ้นอยู่กับข้อมูลที่ใช้จะต้องมีความถูกต้อง มีการเปลี่ยนแปลง และปรับปรุงข้อมูลอยู่ตลอดเวลา ซึ่งจะมีส่วนทำให้ผลพยากรณ์ที่ได้มีความถูกต้องและมีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น

จากผลการศึกษาที่ได้เมื่อนำวิธีการทำให้เรียบด้วยเลขชี้กำลังที่มีฤดูกาลอย่างง่ายไปพยากรณ์ปริมาณน้ำฝนรายเดือนในจังหวัดแพร่ ช่วงเดือนมกราคมถึงเดือนธันวาคม ในปี พ.ศ. 2569 แสดงดังตารางที่ 4 ทำให้คาดการณ์ได้ว่าเดือนที่มีปริมาณน้ำฝนน้อยที่สุด คือ เดือนธันวาคม มีปริมาณน้ำฝนจำนวน 8.64 มิลลิเมตร โดยในช่วงความเชื่อมั่น 99% มีปริมาณน้ำฝนอยู่ระหว่าง 0.0 มิลลิเมตร ถึง 130.64 มิลลิเมตร น้อยที่สุดรองลงมา คือ เดือนกุมภาพันธ์ มีปริมาณน้ำฝนจำนวน 12.32 มิลลิเมตร ส่วนเดือนที่มีปริมาณน้ำฝนมากที่สุด คือ เดือนสิงหาคม มีปริมาณน้ำฝนจำนวน 265.36 มิลลิเมตร โดยในช่วงความเชื่อมั่น 99% มีปริมาณน้ำฝนอยู่ระหว่าง 63.36 มิลลิเมตร ถึง 606.14 มิลลิเมตร มากที่สุดรองลงมาคือเดือนกรกฎาคม มีปริมาณน้ำฝนจำนวน 235.93 มิลลิเมตร โดยคาดว่าจะมีปริมาณน้ำฝนรวมตลอดทั้งปีจำนวน 1,367.76 มิลลิเมตร ซึ่งเป็นปริมาณที่อาจจะมีแนวโน้มลดลงจากเดิม คิดเป็นร้อยละ 16.07 เมื่อเทียบกับปี พ.ศ. 2568 ที่ผ่านมา

ตารางที่ 4 ค่าพยากรณ์และช่วงความเชื่อมั่นของปริมาณน้ำฝนรายเดือนของจังหวัดแพร่ในปี พ.ศ. 2569 (หน่วย: มิลลิเมตร)

เดือน	ค่าพยากรณ์	ช่วงความเชื่อมั่น 99% (LCL-UCL)	เดือน	ค่าพยากรณ์	ช่วงความเชื่อมั่น 99% (LCL-UCL)
มกราคม	18.40	0.0* - 152.52	กรกฎาคม	235.93	49.84 - 559.32
กุมภาพันธ์	12.32	0.0* - 134.79	สิงหาคม	265.36	63.36 - 606.14
มีนาคม	25.00	0.0* - 172.65	กันยายน	219.63	41.60 - 537.77
เมษายน	95.06	2.49 - 321.48	ตุลาคม	99.80	2.49 - 338.56
พฤษภาคม	220.52	43.95 - 531.76	พฤศจิกายน	26.21	0.0* - 184.14
มิถุนายน	140.89	13.03 - 404.81	ธันวาคม	8.64	0.0* - 130.64

หมายเหตุ * ปรับจากค่าติดลบ

โดยปริมาณน้ำฝนที่เกิดขึ้นในจังหวัดแพร่นั้นมาจากอิทธิพลปัจจัยที่เกี่ยวข้องหลายประการ โดยเฉพาะการได้รับอิทธิพลจากลมมรสุม 2 ประเภท คือ ลมมรสุมตะวันตกเฉียงใต้ที่ทำให้มีฝนตกชุกโดยเริ่มกลางเดือนพฤษภาคมถึงกลางเดือนตุลาคม [1] ซึ่งสอดคล้องกับผลการพยากรณ์ที่มีปริมาณน้ำฝนมากในช่วงเวลาดังกล่าว และลมมรสุมตะวันออกเฉียงเหนือที่นำพาอากาศเย็นมาในช่วงเดือนกลางเดือนพฤศจิกายนถึงปลายเดือนกุมภาพันธ์ และเริ่มมีอากาศร้อนในช่วงเดือนมีนาคมถึงกลางเดือนพฤษภาคม [1] ส่งผลให้มีโอกาสเกิดฝนได้น้อย รวมทั้งการพัดผ่านของร่องมรสุมและอิทธิพลของพายุหมุนเขตร้อนที่ส่งผลทำให้เกิดฝนตกเพิ่มมากขึ้น นอกจากนี้ยังมี ปรากฏการณ์เอลนีโญและลานีญา ซึ่งเป็นปรากฏการณ์ทางธรรมชาติที่ส่งผลต่อความแปรปรวนของสภาพอากาศในทั่วโลก ทำให้มีส่วนสำคัญต่อการเปลี่ยนแปลงของปริมาณน้ำฝนในประเทศไทย และในจังหวัดแพร่ โดยภาวะลานีญาเป็นปรากฏการณ์ที่ส่งผลทำให้เกิดปริมาณน้ำฝนมากกว่าปกติ จึงเป็นสาเหตุทำให้เกิดอุทกภัยขึ้นได้ ในขณะที่ภาวะเอลนีโญเป็นปรากฏการณ์ที่ส่งผลทำให้ปริมาณน้ำฝนน้อยกว่าปกติจึงเป็นสาเหตุทำให้เกิดภาวะภัยแล้งและการขาดแคลนน้ำได้ ซึ่งจากผลพยากรณ์ที่ได้จะเป็นข้อมูลที่สำคัญในด้านการบริหารจัดการน้ำของหน่วยงานที่



รับผิดชอบในจังหวัดแพร่ เช่น ศูนย์บริหารจัดการน้ำจังหวัด โครงการชลประทาน และสำนักงานทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม สามารถนำผลการพยากรณ์ไปใช้ประกอบการวางแผนการกักเก็บน้ำในอ่างเก็บน้ำ การบริหารปริมาณน้ำต้นทุน การควบคุมการระบายน้ำ การจัดสรรน้ำเพื่ออุปโภคบริโภค และจัดการน้ำเพื่อการเกษตรได้อย่างเหมาะสม นอกจากนี้ในช่วงเวลาที่คาดว่าจะมีปริมาณน้ำฝนมาก หน่วยงานที่เกี่ยวข้องสามารถเตรียมความพร้อมในการจัดการโครงสร้างพื้นฐาน เช่น การเตรียมระบบระบายน้ำ การจัดทำคันกันน้ำ และจัดการพื้นที่รับน้ำ เพื่อลดความเสี่ยงจากอุทกภัยที่อาจเกิดขึ้น ส่วนในภาคการเกษตรทางสำนักงานเกษตรจังหวัด สามารถใช้เป็นข้อมูลสนับสนุนให้กับเกษตรกร ในการวางแผนเลือกเพาะปลูกพืชให้เหมาะสมตามช่วงเวลาของปริมาณน้ำฝนที่ได้คาดการณ์ไว้ รวมทั้งเตรียมมาตรการป้องกันผลกระทบที่เกิดจากฝนตกหนักในช่วงฤดูฝนที่ทำให้เกิดอุทกภัยและการขาดแคลนน้ำในช่วงภาวะภัยแล้งได้อย่างมีประสิทธิภาพ ซึ่งจะช่วยลดความเดือดร้อนของเกษตรกรและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากรน้ำได้อย่างเหมาะสม

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) และมหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์ที่ให้ทุนอุดหนุนสำหรับการทำวิจัย และขอขอบคุณกรมอุตุนิยมวิทยาและสถานีอุตุนิยมวิทยาแพร่สำหรับข้อมูลปริมาณน้ำฝนที่ใช้ในการทำวิจัยในครั้งนี้ด้วย

เอกสารอ้างอิง

1. กลุ่มงานยุทธศาสตร์และข้อมูลเพื่อการพัฒนาจังหวัด สำนักงานจังหวัดแพร่. บรรยายสรุปจังหวัดแพร่ ประจำปี 2568. [อินเทอร์เน็ต]. 2568 [เข้าถึงเมื่อ 27 เม.ย. 2569]. เข้าถึงได้จาก: https://phrae.go.th/info/Phraedetailing2569_240469.pdf
2. ไทยรัฐออนไลน์. ภัยแล้งกระหน่ำเมืองแพร่ เกษตรกรทนไม่ไหว ต้องช่วยตัวเองไม่ขอจ้อร์รัฐ. [อินเทอร์เน็ต]. 2559 [เข้าถึงเมื่อ 28 เม.ย. 2569]. เข้าถึงได้จาก: <https://www.thairath.co.th/news/local/565013>
3. The Standard team. แพร่สรุปพื้นที่ถูกน้ำท่วม กินพื้นที่ 8 อำเภอรวม 666 หลังคาเรือนผู้ว่าฯ เร่งให้ความช่วยเหลือระบายน้ำขัง. [อินเทอร์เน็ต]. 2563 [เข้าถึงเมื่อ 27 เม.ย. 2569]. เข้าถึงได้จาก: <https://thestandard.co/phrae-floods-220863/>
4. MGROnline. แพร่ท่วมหนัก น้ำยมขึ้นสูงถึง 11 เมตร ล้นทะลักจมแล้ว 5 อำเภอ พุ่งน้ำหลากลงลง-วังขึ้น-ศรีสัขา. [อินเทอร์เน็ต]. 2568 [เข้าถึงเมื่อ 27 เม.ย. 2569]. เข้าถึงได้จาก: <https://mgronline.com/local/detail/9680000070181>
5. ธนากร โชติช่วง, สมชาย เล็กเจริญ. การพยากรณ์ปริมาณน้ำฝนรายเดือนในจังหวัดพัทลุง ณ ศูนย์อุทกวิทยา ภาคใต้. ใน: เอกสารประกอบการประชุมวิชาการระดับชาติ วิทยาลัยนครราชสีมา ครั้งที่ 5 วันที่ 31 มีนาคม 2561. วิทยาลัยนครราชสีมา. นครราชสีมา; 2561. หน้า 260-71.
6. ยุทธชัย มิ่งขวัญ. การพยากรณ์ปริมาณน้ำฝนในจังหวัดอุดรดิตถ์โดยใช้เทคนิคทางสถิติ. วารสารวิจัย มข (ฉบับบัณฑิตศึกษา) 2567;24(3):83-94.
7. วราภรณ์ เรียงสุทธิ, ศุภมิตร วิริยกุลโอภาส, ณัฐนันท์ เหลืองอักษร, วชิรวิทย์ พจน์จำเนียร. ตัวแบบพยากรณ์ปริมาณน้ำฝนในจังหวัดนครราชสีมา กรณีศึกษาด้วยวิธีการทางอนุกรมเวลา. วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง 2567;33(1):51-65.
8. ธนพร จิวไม้แดง, พรทิพย์ วิมลทรง, ธนา จารุพันธุ์เศรษฐ์, กานต์ธิดา บุญมา, บุษยมาศ เหมณี. การเปรียบเทียบวิธีการพยากรณ์ปริมาณน้ำฝนรายเดือนในจังหวัดนราธิวาส. วารสารวิชาการมหาวิทยาลัยอีสเทิร์นเอเชีย ฉบับวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 2568;19(3):106-123.



9. Mohamed TM, Ibrahim AA. Time Series Analysis of Nyala Rainfall Using ARIMA Method. JECS 2016;17(1):5-11.
10. Nwokike CC, Offorha BC, Obubu M, Ugoala CB, Ukomah HI. Comparing SANN and SARIMA for forecasting frequency of monthly rainfall in Umuahia. Sci Afr 2020;10:e00621.
11. Barrera-Animas AY, Oyedele LO, Bilal M, Akinosho TD, Delgado JMD, Akanbi LA. Rainfall prediction: A comparative analysis of modern machine learning algorithms for time-series forecasting. Mach Learn Appl 2022;7:100204.
12. Hudnurkar S, Patel P, Ponnalagarsamy S. Comparing the Performance of Machine Learning Models for a Day Ahead Rainfall Prediction. ISI 2025;30(3):655-63.
13. ทรงศิริ แต่สมบัติ. การพยากรณ์เชิงปริมาณ. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์; 2549.
14. สมเกียรติ เกตุเอี่ยม. เทคนิคการพยากรณ์. พิมพ์ครั้งที่ 2. สงขลา: มหาวิทยาลัยทักษิณ; 2548.
15. Box GEP, Jenkins GM, Reinsel GC, Ljung GM. Time Series Analysis: Forecasting and Control. 5th ed. New Jersey: John Wiley & Sons, Inc; 2016.
16. วรางคณา กิรติวิบูลย์. ตัวแบบพยากรณ์ปริมาณการจำหน่ายเบียร์ในประเทศไทย. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 2558;23(5):731-42.
17. ยุทธชัย มิ่งขวัญ. การเปรียบเทียบตัวแบบพยากรณ์สำหรับปริมาณการปล่อยก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์จากภาคการผลิตไฟฟ้า. วารสารวิทยาศาสตร์ลาดกระบัง 2566;32(2):122-35.
18. Zhang X, Liu Y, Li J. Application of a Box-Cox Transformed LSTAR-GARCH Model for Point and Interval Forecasting of Monthly Rainfall in Hainan, China. Water 2025;17(22):3274.
19. Islam F, Imteaz MA. A novel hybrid approach for predicting Western Australia's seasonal rainfall variability. Water Resour Manag 2022;36(10):3649-72.
20. Waqas M, Humphries UW, Wangwongchai A, Dechpichai P, Zarin R, Hlaing PT. Incorporating novel input variable selection method for in the different water basins of Thailand. Alex Eng J 2024;86:557-76.



คำแนะนำในการเตรียมต้นฉบับบทความเพื่อตีพิมพ์ใน วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ

(Huachiew Chalermprakiet Science and Technology Journal)

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ เป็นสื่อกลางในการเผยแพร่ผลงานวิชาการทางด้าน
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ประกอบด้วยสาขาวิชาต่าง ๆ ดังนี้

1. วิทยาศาสตร์ชีวภาพ ได้แก่ จุลชีววิทยา ชีววิทยา พันธุศาสตร์ และเทคโนโลยีชีวภาพ เป็นต้น
2. วิทยาศาสตร์กายภาพ ได้แก่ เคมี ฟิสิกส์ คณิตศาสตร์ และสถิติ เป็นต้น
3. วิทยาศาสตร์สุขภาพ ได้แก่ แพทยศาสตร์ สัตวแพทยศาสตร์ เภสัชศาสตร์ เทคนิคการแพทย์ กายภาพบำบัด

พยาบาลศาสตร์ และสาธารณสุขศาสตร์ เป็นต้น

4. วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร
5. วิทยาการคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ

โดยรับพิจารณาตีพิมพ์บทความวิจัย (research article) และบทความวิชาการ (review article) ทั้งรูปแบบภาษาไทย
และภาษาอังกฤษ ทั้งนี้ผลงานวิชาการที่ส่งมาจะต้องไม่เคยตีพิมพ์หรืออยู่ระหว่างการรอพิจารณาตีพิมพ์จากวารสารวิชาการอื่น

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ มีกำหนดออกวารสารปีละ 2 ฉบับ คือ ฉบับที่ 1 มกราคม-
มิถุนายน และฉบับที่ 2 กรกฎาคม-ธันวาคม ซึ่งจะรับพิจารณาตีพิมพ์ผลงานวิชาการทั้งจากบุคคลภายในและภายนอก
มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ

หลักเกณฑ์การพิจารณาบทความ

บทความที่ส่งมาพิจารณาควรมีคุณค่าทางวิชาการ โดยผู้เขียนเป็นผู้ทำการทดลอง สร้างสรรค์ หรือเกี่ยวข้องกับงาน
โดยปราศจากการคัดลอกผลงานวิจัยหรือบทความของผู้อื่นนำเสนอถึงแนวความคิดหรือหลักการใหม่ที่เป็นไปได้ซึ่งสอดคล้อง
กับทฤษฎี และนำไปสู่การพัฒนาหรือเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาและการวิจัย มีความสมบูรณ์ในเนื้อหา ภาษา ตลอดจนความ
ชัดเจนของสมมติฐานหรือวัตถุประสงค์

บทความจะได้รับการประเมินจากผู้ทรงคุณวุฒิผู้เชี่ยวชาญในสาขาวิชานั้น ๆ จำนวน 3 คน ซึ่งกองบรรณาธิการสงวน
สิทธิ์ในการตรวจแก้ไขบทความ และอาจส่งกลับคืนให้ผู้เขียนแก้ไขเพิ่มเติมหรือพิมพ์ต้นฉบับใหม่ แล้วแต่กรณี เพื่อปรับปรุง
บทความให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้นก่อนการตีพิมพ์ ทั้งนี้ต้นฉบับที่ถูกต้องตามหลักเกณฑ์ของการเขียนที่กำหนดเท่านั้นจึงจะได้รับการ
พิจารณา และดำเนินการประเมินบทความก่อนการตีพิมพ์

การยอมรับบทความที่จะตีพิมพ์เป็นสิทธิของกองบรรณาธิการ และกองบรรณาธิการไม่รับผิดชอบความถูกต้องของ
เนื้อหา หรือความถูกต้องของบทความที่ส่งมาตีพิมพ์ทุกเรื่อง

ข้อกำหนดทั่วไปของการพิมพ์บทความ

1. พิมพ์ด้วยโปรแกรม Microsoft Word for Windows
2. พิมพ์บนกระดาษ A4 หนึ่งหน้าเดียว โดยมีระยะห่างจากขอบกระดาษด้านละ 1 นิ้ว (2.54 เซนติเมตร) และจัดพิมพ์
เป็น 1 คอลัมน์
3. ใช้ตัวอักษรแบบ TH Sarabun New
4. ระยะห่างของการพิมพ์แบบ 1.5 line space พิมพ์แบบเสมอนหน้า-หลัง (justified)
5. การกำหนดขนาดและชนิดตัวอักษร



ข้อความ	ขนาด	ชนิด	การจัดหน้ากระดาษ
ชื่อเรื่อง (ภาษาไทยและภาษาอังกฤษ)	18	ตัวหนา	กึ่งกลาง
ชื่อผู้เขียน	16	ตัวหนา	กึ่งกลาง
ที่อยู่หรือหน่วยงานสังกัดของผู้เขียน	14	ตัวปกติ	กึ่งกลาง
อีเมลติดต่อเฉพาะผู้เขียนประสานงาน (corresponding author)	14	ตัวปกติ	กึ่งกลาง
หัวข้อบทคัดย่อ (abstract)	16	ตัวหนา	ชิดซ้าย
หัวข้อเรื่องใหญ่	14	ตัวหนา	ชิดซ้าย
หัวข้อเรื่องย่อย	14	ตัวหนา	ชิดซ้าย
บทคัดย่อ คำสำคัญ เนื้อเรื่อง (วิธีดำเนินการวิจัย ผลการวิจัย อภิปราย และสรุปผลการวิจัย กิตติกรรมประกาศ และเอกสารอ้างอิง)	14	ตัวปกติ	ชิดซ้ายขวา
คำบรรยายรูปภาพ	14	ตัวปกติ	กึ่งกลาง
คำบรรยายตาราง	14	ตัวปกติ	ชิดซ้าย

รายละเอียดการจัดเตรียมต้นฉบับ

- ชื่อเรื่อง** มีทั้งชื่อเรื่องภาษาไทยและภาษาอังกฤษ ควรสั้น กระชับ และสื่อความหมายตรงกับเรื่องที่ทำ สำหรับชื่อภาษาอังกฤษนั้น อักษรตัวแรกของภาษาอังกฤษให้พิมพ์ด้วยอักษรตัวพิมพ์ใหญ่
- ชื่อผู้เขียนและสถานที่ทำงาน** ชื่อผู้เขียนใช้ชื่อ-นามสกุลเต็ม ไม่ต้องระบุตำแหน่งชื่อ ตำแหน่งทางวิชาการ และคุณวุฒิ โดยให้มีการกำกับเลขยกกำลังต่อท้ายชื่อ สำหรับผู้เขียนประสานงาน (corresponding author) ให้ทำเครื่องหมายดอกจัน (*) ไว้ท้ายชื่อ พร้อมระบุหมายเลขโทรศัพท์และอีเมล สำหรับชื่อสถานที่ทำงานควรพิมพ์ให้ตรงกับตัวเลขยกกำลังที่กำกับไว้ท้ายชื่อผู้เขียน กรณีมีผู้เขียน จำนวน 2 คน ให้ใช้ “และ/and” คั่น สำหรับผู้เขียนมากกว่า 2 คน ขึ้นไป กรณีภาษาไทยให้เว้นวรรค 2 ครั้ง คั่น กรณีภาษาอังกฤษให้ใส่จุลภาค (.) คั่น และเว้นวรรค 1 ครั้ง ระหว่างแต่ละคน กรณีบทความเป็นรูปแบบภาษาไทย ให้จัดลำดับบทคัดย่อภาษาไทยขึ้นต้น และกรณีบทความเป็นรูปแบบภาษาอังกฤษ ให้จัดลำดับบทคัดย่อภาษาอังกฤษขึ้นต้น ไม่ต้องมีภาษาไทย
- บทคัดย่อ** มีทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ โดยนำเสนอสาระสำคัญของเรื่อง ครอบคลุมถึงวัตถุประสงค์ บทนำ วิธีดำเนินการวิจัย ผลการวิจัย อภิปรายและสรุปผลการวิจัย มีความยาวไม่เกิน 250 คำ
- คำสำคัญ** ทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษอย่างละ 3-5 คำ ทั้งนี้ควรเลือกคำสำคัญที่เกี่ยวข้องกับบทความ
- เนื้อหา** รายละเอียดของการเตรียมต้นฉบับบทความแต่ละประเภทมีดังนี้

5.1 บทความวิจัย (research article) ความยาวไม่เกิน 12 หน้า (รวมเอกสารอ้างอิง ตาราง รูปภาพ และแผนภูมิ)

ภาษาไทยประกอบด้วย

- **บทนำ** นำเสนอความสำคัญหรือที่มาของปัญหาวิจัย สาระสำคัญจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และสำหรับวัตถุประสงค์ของการวิจัยให้นำเสนอไว้ตอนท้ายของบทนำ
- **วิธีดำเนินการวิจัย** นำเสนอรายละเอียดที่จำเป็นของการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล
- **ผลการวิจัย** นำเสนอผลการวิจัยที่สมบูรณ์ ชัดเจน โดยอาจนำเสนอด้วยตาราง แผนภูมิ หรือรูปภาพ พร้อมมีการบรรยายประกอบ



- **อภิปรายและสรุปผลการวิจัย** เป็นการวิเคราะห์ ประเมิน และตีความผลการวิจัยว่าสอดคล้องกับวัตถุประสงค์หรือไม่ มีการเทียบเคียงผลการวิจัยกับงานวิจัยอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้อง พร้อมการอ้างอิงหลักวิชาการหรือทฤษฎี และอาจมีข้อเสนอแนะประเด็นที่ควรทำวิจัยต่อไป

- **กิตติกรรมประกาศ** แสดงความขอบคุณต่อองค์กรหรือบุคคลที่ให้การสนับสนุนทุนวิจัยหรือให้ความช่วยเหลือในด้านต่าง ๆ

- **เอกสารอ้างอิง** ควรเป็นบทความที่ได้รับการตีพิมพ์หรือกำลังจะได้รับการตีพิมพ์ และระบุรายการเอกสารที่นำมาใช้อ้างอิงให้ครบถ้วน โดยใช้ Vancouver style

บทความวิจัยภาษาอังกฤษ ประกอบด้วย

Introduction, Materials and Methods, Results and Discussion, Conclusions, Acknowledgement, References

5.2 บทความวิชาการ (review article) ความยาวไม่เกิน 12 หน้า (รวมเอกสารอ้างอิง ตาราง รูปภาพ และแผนภูมิ) นำเสนอเนื้อหาทางวิชาการที่ได้จากเอกสารวิชาการทั่วไป สามารถสอดแทรกความคิดเห็นของผู้เขียนที่มีการอ้างอิงจากหลักวิชาการประกอบบทความได้ ประกอบไปด้วย บทความทั้งภาษาไทยและภาษาอังกฤษ บทนำ เนื้อหา บทสรุป และเอกสารอ้างอิง

6. รูปภาพและตาราง

รูปภาพ

ความละเอียดของรูปภาพไม่น้อยกว่า 600 dpi สำหรับภาพขาว-ดำ และไม่น้อยกว่า 300 dpi สำหรับภาพสี ระบุลำดับที่ของรูปภาพโดยใช้คำว่า “ภาพที่.....” (Figure.....) และคำบรรยายใต้ภาพอยู่ส่วนล่างกึ่งกลางของภาพ ส่วนที่เป็นสัญลักษณ์ให้นำเสนอในส่วนของคำบรรยายใต้ภาพ พร้อมทั้งแนบไฟล์รูปภาพที่ประกอบในเนื้อหาพร้อมกับไฟล์เอกสารปกติดด้วย

ตาราง

ระบุลำดับที่ของตาราง โดยใช้คำว่า “ตารางที่.....” (Table.....) และคำบรรยายตารางอยู่ส่วนบนชิดขอบซ้ายของตาราง การนำรูปภาพ แผนภูมิ หรือตารางมาอ้างอิงประกอบในบทความจะต้องมีการอ้างอิงถึงแหล่งที่มาของข้อมูลให้ถูกต้อง ไม่ละเมิดลิขสิทธิ์ของผู้อื่น

การเขียนเอกสารอ้างอิง

1. การอ้างอิงในเนื้อหา

การอ้างอิงในเนื้อหาใช้ระบบ Vancouver style ให้อ้างเลขลำดับที่ที่กำกับชื่อผู้แต่ง โดยระบุเลขลำดับที่ไว้ในวงเล็บท้ายข้อความตามลำดับการอ้างอิงก่อน-หลัง เช่น จิรวรรณ และคณะ [1] พบว่า *Geobacillus stearothermophilus* PTL38 ผลิตเอนไซม์ไลเปสที่สามารถทำงานได้ดีที่ค่าพีเอชเท่ากับ 6.0 และอุณหภูมิที่เหมาะสม คือ 60 องศาเซลเซียส หรือมีการค้นพบว่าน้ำมันหอมระเหยจากเปลือกมะกรูดและกระชายมีฤทธิ์ในการต้านแบคทีเรียก่อโรคแกรมบวกได้ดีที่สุด [2]

2. การอ้างอิงเอกสารท้ายบทความ

การอ้างอิงท้ายบทความใช้ระบบ Vancouver style โดยเรียงลำดับให้ตรงกับหมายเลขในเอกสารอ้างอิงที่ได้ทำการอ้างอิงในเนื้อหา

ตัวอย่างการเขียนเอกสารอ้างอิง

1. หนังสือหรือตำรา

ชื่อผู้แต่ง. ชื่อเรื่อง. พิมพ์ครั้งที่. เมืองหรือสถานที่พิมพ์: สำนักพิมพ์; ปีที่พิมพ์.

1. สุรินทร์ ปิยะโชคนากุล. พันธุวิศวกรรมเบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์; 2548.

2. Watson JD, Baker TA, Bell SP, Gann A, Levine M, Losick R. Molecular biology of the gene. 5th ed. San Francisco: Pearson Education, Inc.; 2004.



2. วารสาร

ชื่อผู้แต่ง. ชื่อเรื่องหรือชื่อบทความ. ชื่อย่อวารสาร. ปีที่พิมพ์. ปีที่ (ฉบับที่): หน้า.

1. วรางคณา วิเศษมณี, กาญจนา หิริมเพ็ง. ความเป็นพิษเฉียบพลันและการกลายพันธุ์จากสารมลพิษรวมในน้ำและตะกอนดิน กรณีศึกษาคลองขุดหมัน จังหวัดสมุทรปราการ. วารสาร มฉก. วิชาการ 2554;14(28):153-73.

2. Supakdamrongkul P, Bhumiratana A, Wiwat C. Characterization of an extracellular lipase from the biocontrol fungus, *Nomuraea rileyi* MJ and its toxicity toward *Spodoptera litura*. J Invertebr Pathol 2010;105(3):228-35.

3. รายงานจากการประชุมวิชาการ

ชื่อผู้แต่ง. ชื่อเรื่อง. ใน: ชื่อคณะบรรณาธิการ, editors. ชื่อเอกสารรายงานการสัมมนา วันที่ เดือน ปี; เมืองที่สัมมนา, ประเทศ. เมืองที่พิมพ์: สำนักพิมพ์; ปีที่พิมพ์. หน้า.

1. วรธนา ศักดิ์สงค์, หิรัญญา จันทรเกลี้ยง, ปิยาภรณ์ สุภักด์ดำรงกุล. การศึกษาประสิทธิภาพของเจลล้างมือผสมสารสกัดจากธรรมชาติในการยับยั้งแบคทีเรียก่อโรค. ใน: เอกสารประกอบการประชุมวิชาการระดับชาติ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีระหว่างสถาบัน ครั้งที่ 2 วันที่ 21 มีนาคม 2557. คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต. กรุงเทพฯ; 2557. หน้า 289-97.

2. Supakdamrongkul P, Wongthong A, Komkaew S. Production and characterization of a novel high-alkaline and thermal stable lipase from *Bacillus* sp. HCU3-2 and potential application as detergent formulation. In: proceedings of the 7th AOHUPO Congress and 9th International Symposium of the Protein Society of Thailand, August 6-8, 2014; Bangkok, Thailand; 2014. p. 259-68.

3. Deci EL, Ryan RM. A motivational approach to self: Integration in personality. In: Dienstbier R, editor. Nebraska Symposium on Motivation: Vol. 38. Perspectives on Motivation. Lincoln: University of Nebraska Press; 1991. p. 237-88.

4. พจนานุกรม

ชื่อพจนานุกรม. พิมพ์ครั้งที่. เมืองหรือสถานที่พิมพ์: สำนักพิมพ์; ปีที่พิมพ์. คำศัพท์; หน้า.

1. พจนานุกรม ฉบับราชบัณฑิตยสถาน พ.ศ. 2542. กรุงเทพฯ: นานมีบุ๊คพับลิเคชัน; 2546. หน้า 1488.

2. Stedmin's medical dictionary. 26th ed. Baltimore: Williams & Wilkins; 1995. Apraxia; p. 119-20.

5. วิทยานิพนธ์

ชื่อผู้แต่ง. ชื่อวิทยานิพนธ์. ระดับปริญญาของวิทยานิพนธ์, ชื่อมหาวิทยาลัย. จังหวัด; ปีที่พิมพ์.

1. อัจฉรา คอประเสริฐศักดิ์. การศึกษาแบคทีเรียผลิตเอนไซม์ไลเปสที่มีผลต่อการย่อยสลายน้ำมันและน้ำเสียประเภทไขมันสูง. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาเทคโนโลยีชีวภาพ, บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ; 2542.

2. Darling CW. Giver of due regard: the poetry of Richard Wilbur. Ph.D. Thesis, University of Connecticut. USA; 1976.

6. หนังสือพิมพ์

ชื่อผู้แต่ง. ชื่อเรื่อง. ชื่อหนังสือพิมพ์ วัน เดือน ปี; หน้า.

1. สายใจ ดวงมาลี. มาลาเรียม 3 จว.ได้ตอนบน สธ.เร่งคุมเข้มกันเชื้อแพร่หนัก. คม-ชัด-ลึก 7 มิถุนายน 2548; 25.

2. Di Rado A. Trekking through college: Classes explore modern society using the world of Star Trek. Los Angeles Time March 15, 1995; p. A3.



7. เว็บไซต์

ชื่อผู้แต่ง. ชื่อเรื่อง. ชื่อวารสาร [ประเภทของสื่อ]. ปีที่พิมพ์ [เข้าถึงเมื่อ]; ปีที่:[หน้า]. เข้าถึงได้จาก: URL ของเว็บไซต์ที่อ้างอิงข้อมูลสืบค้น

1. ชีร์เกียรติ เกิดเจริญ. นาโนเทคโนโลยีความเป็นไปได้และทิศทางในอนาคต. วารสารเทคโนโลยีวัสดุ [อินเทอร์เน็ต]. 2542 [เข้าถึงเมื่อ 13 ก.ค. 2558]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.nanotech.sc.mahidol.ac.th/index.html>

2. Macia E, Paris S, Chabre M. Binding of the pH and polybasic C-terminal domains of ARNO to phosphoinositides and to acidic lipids. Biochemistry [Internet].2001 [cited 2004 May 19]. Available from: <http://pubs.acs.org/cgibin/article.cgi/bichaw/2001/40/05pdf/bi005123a.pdf>

การส่งบทความ

การส่งบทความเพื่อลงตีพิมพ์ในวารสาร ให้ผู้เสนอจัดเตรียมต้นฉบับบทความและแบบเสนอบทความ โดยดำเนินการจัดส่งเอกสารดังกล่าวแบบออนไลน์ทางเว็บไซต์ของวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ ที่ <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/scihcu/index> ดังรายละเอียดต่อไปนี้

กำหนดไฟล์เอกสารที่ต้องส่งทั้งแบบ MS Document และ PDF ไฟล์ ประกอบด้วย

1. แบบเสนอบทความ
2. ต้นฉบับบทความ
3. ไฟล์ภาพประกอบบทความ
4. เอกสารแสดงผลคัดลอกวรรณกรรม (Plagiarism checking report) เช่น ระบบตรวจสอบอักขระวิสุทธิ์ และ

Turnitin

5. เอกสารการขอจริยธรรมงานวิจัย (โดยเฉพาะงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบในคนและสัตว์ทดลอง)

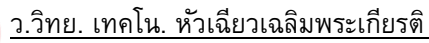
ทั้งนี้หากพบปัญหาในการส่งเอกสารแบบออนไลน์ โปรดติดต่อสอบถามมายังกองบรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ

การติดต่อสอบถามข้อมูล

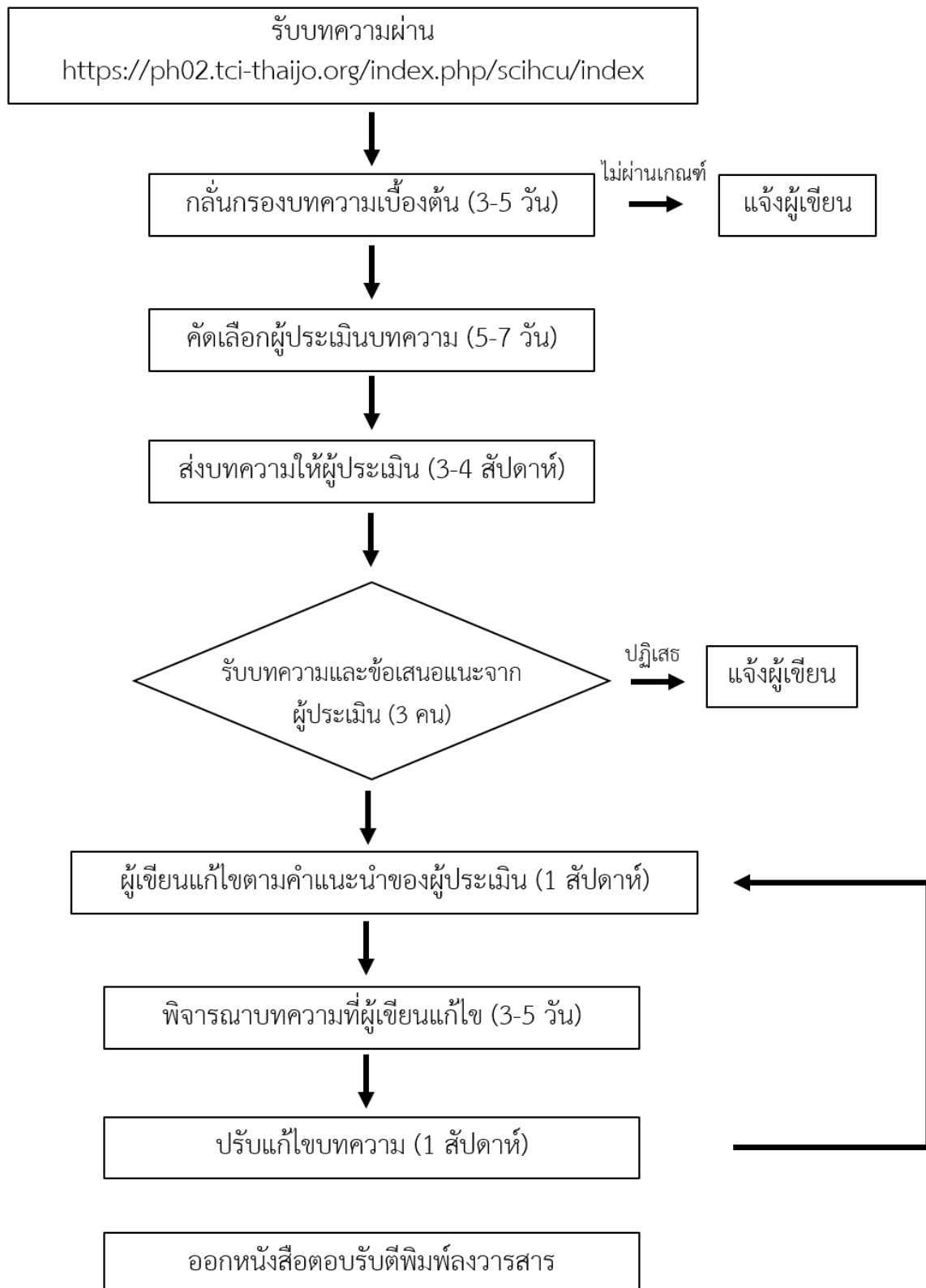
สามารถติดต่อสอบถามข้อมูลได้ที่ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ เลขที่ 18/18 ถนนเทพรัตน กม.18 ตำบลบางโฉลง อำเภอบางพลี สมุทรปราการ 10540 โทรศัพท์ 02-312-6300 ต่อ 1180, 1213 โทรศัพท์มือถือ 084-9091766 อีเมล hcujournal.sci@gmail.com



เว็บไซต์วารสาร: <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/scihcu/index>



ขั้นตอนการส่งบทความลงวารสาร
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ





แบบเสนอบทความเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ใน
วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ห้วเจ็ยวเฉลิมพระเกียรติ
(Huachiew Chalermprakit Science and Technology Journal)



วันที่.....เดือน.....พ.ศ.

ข้าพเจ้า [นาย/นาง/น.ส./ดร./ผศ./รศ./ศ./อื่น (ระบุ)].....

ขอส่ง ☐ บทความวิจัย ☐ บทความวิชาการ

สาขา ☐ วิทยาศาสตร์ชีวภาพ ☐ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร ☐ วิทยาศาสตร์สุขภาพ

☐ วิทยาศาสตร์กายภาพ ☐ วิทยาการคอมพิวเตอร์และเทคโนโลยีสารสนเทศ

ชื่อเรื่อง(ภาษาไทย).....

ชื่อเรื่อง (ภาษาอังกฤษ).....

คำสำคัญ (ภาษาไทย).....

(ภาษาอังกฤษ).....

ผู้เขียนทั้งหมด (ภาษาไทย) เรียงลำดับตามรายชื่อในบทความ

- | | |
|---------|---------|
| 1. | 5. |
| 2. | 6. |
| 3. | 7. |
| 4. | 8. |

อีเมลทั้งหมดของผู้แต่ง เรียงลำดับตามรายชื่อในบทความ

- | | |
|---------|---------|
| 1. | 5. |
| 2. | 6. |
| 3. | 7. |
| 4. | 8. |

ที่อยู่ที่สามารถติดต่อได้.....

โทรศัพท์.....โทรศัพท์มือถือ.....

ชื่อ-นามสกุลของผู้ประสานงาน (corresponding author).....อีเมล.....

ข้าพเจ้าขอรับรองว่าบทความนี้ ☐ เป็นผลงานของข้าพเจ้าแต่เพียงผู้เดียว

☐ เป็นผลงานของข้าพเจ้าและผู้ร่วมงานตามที่ระบุในบทความ

โดยบทความนี้ยังมิเคยได้รับการตีพิมพ์และไม่ได้อยู่ระหว่างการพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารอื่นใด ข้าพเจ้าและผู้เขียนร่วมยอมรับหลักเกณฑ์การพิจารณาต้นฉบับ ทั้งยินยอมให้กองบรรณาธิการมีสิทธิ์พิจารณาและตรวจแก้ไขต้นฉบับได้ตามที่เห็นสมควร พร้อมทั้งมอบลิขสิทธิ์บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ให้แก่คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหัวเจ็ยวเฉลิมพระเกียรติ และหากมีการฟ้องร้องในเรื่องการละเมิดลิขสิทธิ์เกี่ยวกับ ส่วนหนึ่งหรือส่วนใด ๆ ในบทความ ให้ถือเป็นความรับผิดชอบของข้าพเจ้าและผู้เขียนร่วมแต่เพียงฝ่ายเดียว

ลงชื่อ.....

(.....)

วันที่.....

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ

หลักสูตรที่เปิดสอน

1. หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาปัญญาประดิษฐ์

ชื่อหลักสูตร

วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาปัญญาประดิษฐ์

Bachelor of Science Program in Artificial Intelligence

ชื่อปริญญา

วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาปัญญาประดิษฐ์

วท.บ. (ปัญญาประดิษฐ์)

Bachelor of Science (Artificial Intelligence)

B.Sc. (Artificial Intelligence)

2. หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์

ชื่อหลักสูตร

วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์

Bachelor of Science Program in Computer Science

ชื่อปริญญา

วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์

วท.บ. (วิทยาการคอมพิวเตอร์)

Bachelor of Science (Computer Science)

B.S. (Computer Science)

3. หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การแพทย์

ชื่อหลักสูตร

วิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การแพทย์

Bachelor of Science Program in Medical Science

ชื่อปริญญา

วิทยาศาสตรบัณฑิต (วิทยาศาสตร์การแพทย์)

วท.บ. (วิทยาศาสตร์การแพทย์)

Bachelor of Science (Medical Science)

B.Sc. (Medical Science)

4. หลักสูตรวิทยาศาสตรบัณฑิต สาขาวิชาวิทยาการหุ่นยนต์สุขภาพ (นานาชาติ)

ชื่อหลักสูตร

วิทยาศาสตรบัณฑิต วิทยาการหุ่นยนต์สุขภาพ (หลักสูตรนานาชาติ)

Bachelor of Science Program in Health Robotics

(International Program)

ชื่อปริญญา

วิทยาศาสตรบัณฑิต (วิทยาการหุ่นยนต์สุขภาพ)

วท.บ. (วิทยาการหุ่นยนต์สุขภาพ)

Bachelor of Science (Health Robotics)

B.Sc. (Health Robotics)

สอบถามรายละเอียดเพิ่มเติมได้ที่

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ

เลขที่ 18/18 ถนนเทพรัตน กม.18 ตำบลบางโจลง อำเภอบางพลี จังหวัดสมุทรปราการ 10540

โทรศัพท์ 02-713-8100 ต่อ 1180, 1213

เว็บไซต์ : <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/scihcu/index>

Faculty of Science and Technology, Huachiew Chalermprakiet University

18/18 Debaratana Road k.m. 18 Samutprakarn 10540 Thailand

Tel : +662-713-8100 ext. 1180, 1213

Website : <https://ph02.tci-thaijo.org/index.php/scihcu/index>



Contact