



วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ Huachiew Chalermprakiet Science and Technology Journal

เรียนรู้เพื่อรับใช้สังคม

ปีที่ 11 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม-ธันวาคม 2568

ISSN 2985-1653 (Online)

Volume 11 No.2 July-December 2025



บทความวิจัย

- โมเดลปัจจัยเชิงสาเหตุที่มีผลต่อการสู่วัยอย่างมีสุขภาวะของผู้สูงอายุในเขตสุขภาพที่ 9 กระทรวงสาธารณสุข
- การสำรวจชนิดและการใช้ประโยชน์ของข้าวในพื้นที่จังหวัดสมุทรปราการ
- ประสิทธิภาพการเก็บกักอุณหภูมิของถุงประคบบรรจุธัญพืชตระกูลถั่วเพื่อการประยุกต์ใช้ในการแพทย์แผนไทย
- ความหนืดของกลีเซอรินตามกฎของสโตกส์และสมการลันเดา-ลิฟชิตซ์ที่ทดสอบด้วยการทดลองการสั่นแบบฮาร์มอนิกที่หน่วงต่ำ
- Solution of the exponential Diophantine Equation $n^x + (2p - 1)^y = z^2$
- Application of the Simple Equation Method with Jumarie's Modified Riemann-Liouville Derivative to Space-Time Fractional Nonlinear mBBM and ZKBBM
- ผลกระทบของนมมาเดอลีนทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วขาว

บทความวิชาการ

- กลไกการดื้อยาและการแพร่กระจายยีนดื้อของแบคทีเรียแกรมลบในระบบบำบัดน้ำเสีย: มุมมองเชิงสิ่งแวดล้อมเพื่อการจัดการความเสี่ยง



วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ห้วเฉี่ยวเฉลิมพระเกียรติ

ปีที่ 11 ฉบับที่ 2 กรกฎาคม – ธันวาคม 2568

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 มหาวิทยาลัยห้วเฉี่ยวเฉลิมพระเกียรติ

ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร.อุไรพรรณ เจนวาณิชยานนท์

อาจารย์ ดร.จำรูญศรี พุ่มเทียน

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรสิริ วนรัฐกาล

รองหัวหน้ากองบรรณาธิการ

อาจารย์ ดร.สุกัญญา เพชรศิริเวทย์

กองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.บังอร ฉางทรัพย์

มหาวิทยาลัยห้วเฉี่ยวเฉลิมพระเกียรติ

รองศาสตราจารย์ ดร.ประยูรศักดิ์ เปลื้องผล

มหาวิทยาลัยห้วเฉี่ยวเฉลิมพระเกียรติ

อาจารย์ ดร.สุรีย์พร หอมวิเศษวงศา

มหาวิทยาลัยห้วเฉี่ยวเฉลิมพระเกียรติ

อาจารย์ ดร.ชัชวาลย์ ช่างทำ

มหาวิทยาลัยห้วเฉี่ยวเฉลิมพระเกียรติ

อาจารย์ ดร.นพมาศ อัครจันทโชติ

มหาวิทยาลัยห้วเฉี่ยวเฉลิมพระเกียรติ

ศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ สุขสำราญ

มหาวิทยาลัยรามคำแหง

ศาสตราจารย์ ดร.ศิริรัตน์ เร่งพิพัฒน์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศาสตราจารย์ ดร.อรรพรรณ ชัยลภากุล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศาสตราจารย์ ดร.พีรพรรณ ตันอารีย์

มหาวิทยาลัยมหิดล

ศาสตราจารย์ ดร.โกสุม จันทรศิริ

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ศาสตราจารย์ ดร.อรสา สุตเธียรกุล

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ศาสตราจารย์ ดร.วราวุฒิ ครูส่ง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

ศาสตราจารย์ ดร.วิไล รังสาดทอง

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ



รองศาสตราจารย์ ดร.วิมลยุดต์ วรรณสว่าง
รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ ภาสันต์
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.ธิติมา รุกขไชยศิริกุล
รองศาสตราจารย์ ดร.อุดมศิลป์ ปิ่นสุข
รองศาสตราจารย์ นพ.สมพล สงวนรังศิริกุล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชาดา จูอนุวัฒน์กุล

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 วนรวิจักล

คุณโสภี บุญทรัพย์

ฝ่ายสมาชิการสารและประชาสัมพันธ์

อาจารย์ตติภรณ์ ภัทรานุรักษ์โยธิน

เลขานุการกองบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กรรณิการ์ แก้วกิม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์จันทร์เพ็ญ บางสำรวจ

อาจารย์ยุคลธร สถาปนศิริ

บทความในวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติเป็นความคิดเห็นของผู้เขียนโดยเฉพาะ
กองบรรณาธิการไม่มีส่วนกับความคิดเห็นในข้อเขียนเหล่านั้น



รายชื่อผู้ทรงคุณวุฒิกลั่นกรองบทความ (peer review)

ผู้ทรงคุณวุฒิกลั่นกรองบทความภายนอก

ศาสตราจารย์ ดร.บุษบา ยงสมิทธิ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ สมสุข	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.ภญ.วริสรา ปาริชาติกานนท์	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.ภญ.วารี ลิ้มปวีกรานต์	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.ชัชวาล ปานรักษา	มหาวิทยาลัยมหิดล
รองศาสตราจารย์ ดร.วิณา เสี่ยงเพราะ	มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
รองศาสตราจารย์ ดร.จิตบรรจง ตั้งปอง	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
รองศาสตราจารย์ ดร.ทรงยศ อนุชปรีดา	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.นุชนิภา นันทะวงศ์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
รองศาสตราจารย์ ดร.ดร.ณัฏฐ์ วัฒนศิริเวช	มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง
รองศาสตราจารย์ ดร.เสาวลักษณ์ พงษ์ไพจิตร	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
รองศาสตราจารย์ ดร.นงนุช เศรษฐเสถียร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.วีไลลักษณ์ ศิริพรอดุลศิลป์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.พรพรม ย่อยสูงเนิน	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.ภทวรรณ แสงนวกิจ	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.อรพินท์ จินตสถาพร	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.อัฐสิทธิ์ ทับทิมแท้	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.อริชัญญ์ กุมพล	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ ดร.วิจิตรา เตือนฉาย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.วิราวรรณ ชินวิริยสิทธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.ทรงเกียรติ ภัทรปัทมวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.มนฤดี ผ่องอักษร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.ชานนท์ พรหมสกล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.อัษฎา อระวีพร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.นพรัตน์ โพธิ์ชัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริพร จำเนียรสวัสดิ์	มหาวิทยาลัยบูรพา
รองศาสตราจารย์ ดร.จุฑามาศ แหนจอน	มหาวิทยาลัยบูรพา
รองศาสตราจารย์ ดร.รัชฎาพร อุ่นศิริไธย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.กรรณิการ์ ขำพึงสน	มหาวิทยาลัยพะเยา
รองศาสตราจารย์ ดร.สุริวัลย์ ดวงจิตต์	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิโรจน์ บุญรัตนกรกิจ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิราพรรณ สุนทรโชติ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพจน์ กนกกันขพงษ์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุศราภา ลีละวัฒน์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภารดี แสงวัฒนกุล	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริญญา เพ็ญโรจน์	มหาวิทยาลัยศิลปากร



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กนิษฐพร วังโน
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษภมล ณ จอม
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุวิมล เจริญสิทธิ์
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาวณิ อารีศรีสม
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิสมัย วัฒนสิทธิ์
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นราทิพย์ จันสกุล
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พัชรินทร์ ชัยสุวรรณ
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัชฎาพร อุ่นศิริไธย
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ ปันรัตน์
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สชาติรี เจริญพานิชกุล
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐจิรา อินต๊ะใส
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรัณย์ อินทโกสุม
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ยุวดี กล่อมวิเศษ
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนากานต์ เกียรติอร่ามกุล
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรัญ แสนราช
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.งามรยุ งามดอกไม้
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภาพร มัชฌิมะปุระ
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นุชนาถ แซ่มซ้อย
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกรียงศักดิ์ เตมีย์
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภาพร แนวบุตร
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นันทิมา นาคาพงศ์ อัครวิรักษ์
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไผ่แดง ขวัญใจ
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรวัฒน์ พรหมเด่น
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิขญา สวัสดิ์
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ พิมพ์ชนก พริกบุญจันทร์
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ปุณญาเพชร เดชเพชรธวัช
 อาจารย์ ดร.ธิดารัตน์ นน่อสุวรรณ
 ดร.นันทน์ภัส ลายทิพย์

ผู้ทรงคุณวุฒิกลั่นกรองบทความภายใน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กรรณิการ์ แก้วกิม
 รองศาสตราจารย์ ดร.ประยูรศักดิ์ เปลื้องผล

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
 มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
 มหาวิทยาลัยแม่โจ้
 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
 มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
 มหาวิทยาลัยรามคำแหง
 มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
 มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
 มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
 มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
 มหาวิทยาลัยขอนแก่น
 มหาวิทยาลัยขอนแก่น
 มหาวิทยาลัยนเรศวร
 มหาวิทยาลัยนเรศวร
 มหาวิทยาลัยนเรศวร
 มหาวิทยาลัยพะเยา
 มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์
 มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์
 มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม
 มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช
 มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่
 สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุวรรณา เสมศรี
 ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติพัฒน์ โสภิตธรรมคุณ



บรรณาธิการแถลง

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ ในฐานะเป็นสื่อกลางสำคัญในการแลกเปลี่ยนความรู้ทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี รวมทั้งเผยแพร่บทความวิจัย บทความวิชาการของคณาจารย์ นักศึกษา นักวิจัย และนักวิชาการ เพื่อก่อให้เกิดการสร้างสรรค์ผลงานวิชาการทั้งทางด้านการศึกษาและการวิจัยให้ก้าวหน้าต่อไป วารสารฉบับนี้เป็นฉบับที่ 2 ของปี พ.ศ. 2568 (กรกฎาคม - ธันวาคม) ซึ่งเป็นปีที่ 11 ของการดำเนินงานวารสาร มีจำนวนบทความทั้งหมด 8 เรื่อง ประกอบด้วยบทความวิจัย 7 เรื่อง และบทความวิชาการ 1 เรื่อง ซึ่งบทความเหล่านี้ได้ผ่านกระบวนการกลั่นกรองทางวิชาการจากผู้ทรงคุณวุฒิจำนวน 3 ท่าน ในแต่ละสาขาวิชาอย่างน้อยหนึ่งท่าน 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	หน้า
● โมเดลปัจจัยเชิงสาเหตุที่มีผลต่อการสูงวัยอย่างมีสุขภาวะของผู้สูงอายุในเขตสุขภาพที่ 9 1 กระทรวงสาธารณสุข Causal Factors Model of the Promotion of Healthy Aging Amongst Older People in the Health Region 9 th Ministry of Public Health บัว ฤชุบัว และ สุวารี ชันสำโรง	
● การสำรวจชนิดและการใช้ประโยชน์ของชาในพื้นที่จังหวัดสมุทรปราการ 12 A Survey on Species Diversity and Utilization of Genus <i>Alpinia</i> Roxb. (Zingiberaceae) in Samut Prakan Province. ยุคลธร สถาปนศิริ รัมภ์รดา มีบุญญา ชวนพิศ จิระพงษ์ ผุสดี สิริยากร อลิศรา พรายแก้ว และ วิภาพรรณ ชนะภักดิ์	
● ประสิทธิภาพการเก็บกักอุณหภูมิของถุงประคบบรรจุธัญพืชตระกูลถั่วเพื่อการประยุกต์ใช้ในการแพทย์แผนไทย ... 28 Heat Retention Efficiency of Legume-Based Hot Compress Bags for Thai Traditional Medicine Applications พชรมน สอนเจริญ อติศักดิ์ สุมาลี สุธาสิณี สงวนโกศัย พชร ตรีทิพย์ธนากุล เพ็ญจันทร์ ประจันตะเสน อชิรกฤษฎ์ วาเสฏฐิรังษี วิรา นิลดำ และ อำภา คนเชื้อ	
● ความหนืดของกลีเซอรินตามกฎของสโตกส์และสมการแลนด์-ลิฟชิตซ์ที่ทดสอบด้วยการทดลอง 39 การสั่นแบบฮาร์โมนิกที่หน่วงต่ำ The Viscosity of Glycerin Based on Stokes’s Law and the Landau-Lifshitz Equation Tested with the Underdamped Hamonic Oscillation Experiment อนันต์ อาแว ปรัชญา ตั้งจิตสมบูรณ์ จามร วสุรัตน์ณี พินิจดิฐ กลิ่นขจร เกวลี นิลกำแหง และ ดุสิต งามรุ่งโรจน์	
● Solution of the exponential Diophantine Equation $n^x + (2p - 1)^y = z^2$ 49 Vipawadee Moonchaisook	
● Application of the Simple Equation Method with Jumarie’s Modified Riemann–Liouville 75 Derivative to Space–Time Fractional Nonlinear mBBM and ZKBBM Orapan Janngam Supinan Janma and Jiraporn Sanjun	
● ผลิตภัณฑ์ขนมมาเดอลีนทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วขาว 89 Madeleine Dessert Products Substituted Wheat Flour with White Kidney Beans Flour ชวิน เสรีกิจ เจตนิพัทธ์ บุญยสวัสดิ์ จักราวุธ ภู่เสม ศิวกร ตลับนาค และ จักรกฤษณ์ ทองคำ	
บทความวิชาการ	
● กลไกการดื้อยาและการแพร่กระจายยีนดื้อของแบคทีเรียแกรมลบในระบบบำบัดน้ำเสีย: 59 มุมมองเชิงสิ่งแวดล้อมเพื่อการจัดการความเสี่ยง Resistance Mechanisms and Dissemination of Resistance Genes in Gram-negative Bacteria from Wastewater Treatment Systems: Environmental Risk Management Perspective สุริย์พร เอี่ยมศรี	



โมเดลปัจจัยเชิงสาเหตุที่มีผลต่อการสูงวัยอย่างมีสุขภาวะของผู้สูงอายุในเขตสุขภาพที่ 9 กระทรวงสาธารณสุข

Causal Factors Model of the Promotion of Healthy Aging Amongst Older People in the Health Region 9th Ministry of Public Health

บัว ฤตুবัว¹ และ ฐาวรี ชันสำโรง²

¹ สาขาวิชาสาธารณสุขศาสตร์ บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเวสเทิร์น ปทุมธานี 12150

² บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยเวสเทิร์น ปทุมธานี 12150

Bua Ruedoobua¹ and Thawari Khansamrong²

¹ Public Health Program, Graduate School, Western University, Pathum Thani 12150

² Graduate School, Western University, Pathum Thani 12150

*Corresponding author: namhompert@gmail.com

Received: 15 May 2025/ Revised: 5 August 2025/ Accepted: 17 August 2025

บทคัดย่อ

การวิจัยครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปัจจัยเชิงสาเหตุที่มีผลต่อการสูงวัยอย่างมีสุขภาวะของผู้สูงอายุในเขตสุขภาพที่ 9 กระทรวงสาธารณสุข และพัฒนาโมเดลสมการโครงสร้างที่สะท้อนความสัมพันธ์ของปัจจัยเชิงสาเหตุเหล่านี้กับข้อมูลเชิงประจักษ์ ปัจจัยที่ศึกษา ได้แก่ การเห็นคุณค่าในตนเอง วิธีชีวิตส่งเสริมสุขภาพ การสนับสนุนทางสังคม และการเข้าถึงบริการสุขภาพ กลุ่มตัวอย่างคือ ผู้สูงอายุจำนวน 520 คน โดยการสุ่มแบบหลายขั้นตอน วิเคราะห์ข้อมูลด้วยโปรแกรมคอมพิวเตอร์สำหรับการวิเคราะห์โมเดลสมการโครงสร้าง ผลการวิจัยพบว่าโมเดลสมการโครงสร้างที่พัฒนาขึ้นมีความสอดคล้องกับข้อมูลเชิงประจักษ์ ($\chi^2 = 284.294$, $df = 131$, $\chi^2/df = 2.170$, $p = 0.000$, $CFI = 0.984$, $GFI = 0.957$, $AGFI = 0.909$, $TLI = 0.968$, $NFI = 0.970$, $RMSEA = 0.047$) โดยพบว่าวิธีชีวิตส่งเสริมสุขภาพมีอิทธิพลทางตรงสูงสุดต่อสุขภาวะของผู้สูงอายุ (0.96) รองลงมาคือการสนับสนุนทางสังคม (0.81) การเข้าถึงบริการสุขภาพ (0.32) และการเห็นคุณค่าในตนเอง (0.07) ตามลำดับ ปัจจัยทั้งหมดสามารถอธิบายความแปรปรวนของการสูงวัยอย่างมีสุขภาวะได้ร้อยละ 80.9

คำสำคัญ: การเห็นคุณค่าในตนเอง วิธีชีวิตส่งเสริมสุขภาพ การสนับสนุนทางสังคม การเข้าถึงบริการสุขภาพ
การสูงวัยอย่างมีสุขภาวะ

Abstract

The objective of this research was to study the causal factors affecting healthy aging among the elderly in Health Region 9, Ministry of Public Health, and to develop a structural equation model reflecting these causal relationships using empirical data. The study also examined the direct influence of these factors on healthy aging. The model included five key variables: self-esteem, health-promoting lifestyle, social support, access to health services, and healthy aging. The sample consisted of 520 elderly individuals. by multi-stage sampling and data were analyzed using Software for Structural Equation Modeling (SEM). The results revealed that the developed structural equation model aligned well with the empirical data ($\chi^2 = 284.294$, $df = 131$, $\chi^2/df = 2.170$, $p = 0.000$, CFI = 0.984, GFI = 0.957, AGFI = 0.909, TLI = 0.968, NFI = 0.970, RMSEA = 0.047). Among the studied factors, a health-promoting lifestyle had the highest direct influence on healthy aging (0.96), followed by social support (0.81), access to health services (0.32), and self-esteem (0.07), respectively. The model explained 80.9% of the variance in healthy aging among the elderly. The results of this research can be used as a model for promoting health for the good health of the elderly.

Keywords: Self-Esteem, Health-Promoting Lifestyle, Social Support, Health Service Access, Healthy Aging

บทนำ

องค์การสหประชาชาติได้ประเมินสถานการณ์ว่าปี พ.ศ. 2544-2643 เป็นศตวรรษแห่งผู้สูงอายุ คือ การมีประชากรอายุ 60 ปีขึ้นไปมากกว่า ร้อยละ 10 ของประชากรรวมทั่วโลก [1] ซึ่งประเทศไทยกำลังเผชิญกับการเปลี่ยนแปลงทางโครงสร้างของประชากรที่สำคัญนี้เช่นกัน จากการเพิ่มขึ้นของประชากรผู้สูงอายุกว่าร้อยละ 4 ต่อปี คาดการณ์ว่าประเทศไทยจะกลายเป็นสังคมสูงวัยอย่างสมบูรณ์ (Complete aged society) คือ มีสัดส่วนประชากรอายุ 60 ปีขึ้นไปสูงถึงร้อยละ 20 ในปี พ.ศ. 2564 และเป็นสังคมสูงวัยระดับสุดยอด (Super aged society) เมื่อมีสัดส่วนประชากรอายุ 60 ปีขึ้นไปสูงถึงร้อยละ 28 ในปี พ.ศ. 2574 [2] การเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรสูงอายุทำให้เกิดผลกระทบในหลาย ๆ ด้านทั้งทางด้านเศรษฐกิจ สังคม และสุขภาพ โดยเมื่ออายุมากขึ้นร่างกายจะมีการเปลี่ยนแปลงไป ผู้สูงอายุต้องเผชิญกับความเสื่อมถอยของร่างกาย ปัญหาสุขภาพ โรคเรื้อรัง และโรคประจำตัว จากเหตุผลดังกล่าวจึงมีความจำเป็นที่ผู้สูงอายุไทยจะต้องมีความสามารถในการดำเนินชีวิตและมีศักยภาพในการดูแลตนเองมากยิ่งขึ้น นอกจากจำนวนผู้สูงอายุที่มากขึ้นแล้ว ในวัยสูงอายุยังเป็นช่วงอายุที่ต้องเผชิญกับการเปลี่ยนแปลงทั้งทางด้านร่างกาย จิตใจ อารมณ์ และสังคม ในลักษณะที่มีการเสื่อมถอยลง การเปลี่ยนแปลงเหล่านี้อาจเป็นสาเหตุให้เกิดปัญหาทางด้านสุขภาพจิตจนส่งผลกระทบไปถึงสุขภาพกาย และทำให้เกิดความยากลำบากในการดำเนินชีวิตของผู้สูงอายุมากขึ้นด้วย หากผู้สูงอายุไม่ยอมปรับตัว ย่อมส่งผลกระทบทางด้านจิตสังคม ทำให้เกิดปัญหาสุขภาพจิต และความรู้สึกลดลงหลายด้าน [3] เกิดความรู้สึกรำคาญ วิตกกังวล และซึมเศร้า สิ่งเหล่านี้ทำให้เกิดความทุกข์ใจ รบกวนการดำเนินชีวิต บั่นทอนคุณภาพชีวิต และมีผลกระทบต่อสุขภาพองค์รวมได้แก่ สุขภาพกาย จิตใจ สังคม และจิตวิญญาณของผู้สูงอายุ แต่หากผู้สูงอายุมีการปรับตัวและยอมรับก็สามารถดำเนินชีวิตอยู่อย่างมีความสุขด้วยความรู้สึกพึงพอใจ มีความสุข ไม่มีความเครียด และมีคุณภาพชีวิตที่ดี ย่อมทำให้ผู้สูงอายุมีการสูงวัยอย่างมีสุขภาวะ (Healthy Aging) แม้ว่าผู้สูงอายุต้องเผชิญกับความยากลำบากในการดำเนินชีวิตใด ๆ ก็ตาม [4]

องค์การอนามัยโลกได้ให้ความสำคัญกับการสูงวัยอย่างมีสุขภาวะ ซึ่งเป็นประเด็นที่สำคัญของประชากรสูงอายุ โดยกำหนดเป้าหมายและกลยุทธ์ในการดำเนินงานทางด้านสุขภาพของผู้สูงอายุ ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2559 เป็นต้นมา เพื่อให้ผู้สูงอายุได้มีการสูงวัยอย่างมีสุขภาวะ และให้ความหมายของการสูงวัยอย่างมีสุขภาวะ หมายถึง การเป็นผู้สูงวัยที่ปราศจากโรค รวมถึงมีความสามารถในการใช้



ร่างกาย สรีรวิทยา จิตใจ และสังคม ซึ่งได้เปลี่ยนแปลงไปตามกระบวนการชราที่เกิดขึ้น แต่สามารถทำงานได้อย่างเหมาะสม แนวคิดการสูงวัยอย่างมีสุขภาวะเกิดขึ้นเพื่อให้ผู้สูงอายุมีสุขภาพดียิ่งขึ้น พึ่งพาตัวเองได้ และใช้ชีวิตอย่างมีความสุข การสูงวัยอย่างมีสุขภาวะเป็นการนำแนวคิดหลายมิติมาเกี่ยวข้องกัน ในการส่งเสริมสุขภาวะทางด้านร่างกาย จิตใจ สังคม และจิตวิญญาณ จากภาวะของการเปลี่ยนแปลงไปตามกระบวนการชราที่เกิดขึ้น ทั้งในผู้สูงอายุที่มีสุขภาพดีและผู้สูงอายุที่มีภาวะโรคเรื้อรัง

เขตสุขภาพที่ 9 ประกอบด้วย จังหวัดนครราชสีมา จังหวัดชัยภูมิ จังหวัดบุรีรัมย์ และจังหวัดสุรินทร์ มีจำนวนประชากรผู้สูงอายุในเขตสุขภาพที่ 9 ปี พ.ศ. 2565 มีจำนวนทั้งหมด 1,271,928 คน [5] สะท้อนให้เห็นการเป็นสังคมผู้สูงอายุอย่างแท้จริง และแนวโน้มสูงมากขึ้น เขตสุขภาพที่ 9 จึงเป็นเขตสุขภาพที่มีความน่าสนใจในการศึกษาการสูงวัยอย่างมีสุขภาวะของผู้สูงอายุ ด้วยการวิเคราะห์โมเดลสมการโครงสร้าง (Structural Equation Model: SEM) ร่วมกับปัจจัยที่มีความสัมพันธ์กับการสูงวัยอย่างมีสุขภาวะหรือคุณภาพชีวิตของผู้สูงอายุอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ได้แก่ การเห็นคุณค่าในตนเอง วิธีชีวิตส่งเสริมสุขภาพ การสนับสนุนทางสังคม การมีส่วนร่วมกิจกรรมทางสังคม และการเข้าถึงบริการสุขภาพ เพื่อนำปัจจัยที่มีอิทธิพลทางตรงช่วยกำหนดนโยบายสร้างผู้สูงวัยอย่างมีสุขภาวะ ให้คงความสามารถในการทำหน้าที่ทางด้านร่างกายและจิตใจ ความผาสุก ความเป็นอิสระในการทำหน้าที่ การตัดสินใจด้วยตนเองของผู้สูงอายุ ประสบความสำเร็จในวัยสูงอายุ และมีคุณภาพชีวิตที่ดี สามารถนำผลการศึกษาไปใช้ในการเพิ่มกลยุทธ์พัฒนางานด้านสุขภาพผู้สูงอายุที่มีประสิทธิภาพ

ผู้วิจัยจึงสนใจศึกษาโมเดลปัจจัยเชิงสาเหตุที่มีผลต่อการสูงวัยอย่างมีสุขภาวะของผู้สูงอายุในเขตสุขภาพที่ 9 กระทรวงสาธารณสุข ด้วยการสร้างแบบจำลองสมการโครงสร้าง ซึ่งเป็นเทคนิคทางสถิติที่สามารถใช้เพื่อจำลองความสัมพันธ์เชิงสาเหตุที่ซับซ้อนระหว่างตัวแปรหลายตัว [6] ปัจจุบันนิยมใช้ศึกษาการทำงานร่วมกันที่ซับซ้อนระหว่างปัจจัยต่าง ๆ และผลกระทบต่อผลลัพธ์ด้านสุขภาพ [7] เพื่อให้ผลการศึกษานี้เกิดประโยชน์ต่อผู้สูงอายุสูงวัยอย่างมีสุขภาวะและมีคุณภาพชีวิตที่ดี ซึ่งมีวัตถุประสงค์ของการวิจัย (1) เพื่อศึกษาการสูงวัยอย่างมีสุขภาวะของผู้สูงอายุ (2) เพื่อพัฒนาและตรวจสอบความสอดคล้องของโมเดลปัจจัยเชิงสาเหตุสู่ผลต่อการสูงวัยอย่างมีสุขภาวะของผู้สูงอายุ (3) เพื่อศึกษาปัจจัยเชิงสาเหตุที่มีอิทธิพลทางตรงต่อการสูงวัยอย่างมีสุขภาวะของผู้สูงอายุ

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้เป็นการวิจัยเชิงปริมาณ (Quantitative Research) ประชากรเป้าหมาย ที่ใช้ในการศึกษาค้นคว้าครั้งนี้ คือ ผู้สูงอายุที่พักอาศัยในเขตสุขภาพที่ 9 ประกอบด้วยจังหวัดนครราชสีมา จังหวัดชัยภูมิ จังหวัดบุรีรัมย์ และจังหวัดสุรินทร์ มีผู้สูงอายุทั้ง 4 จังหวัดรวมทั้งสิ้น 1,271,928 คน [5] กลุ่มตัวอย่างได้แก่ ผู้สูงอายุที่มีอายุตั้งแต่ 60 ปีขึ้นไปตามปีปฏิทิน ทั้งเพศชายและเพศหญิง อาศัยอยู่ในพื้นที่เขตสุขภาพที่ 9 ใช้วิธีการสุ่มแบบหลายขั้นตอน (Multi-stage Sampling) โดยทุกขั้นตอนย่อยเป็นการสุ่มแบบอาศัยความน่าจะเป็น (Probability) โดยมีขั้นตอนการสุ่มตัวอย่าง คือ ขั้นที่ 1 เลือกจังหวัดในเขตสุขภาพที่ 9 (4 จังหวัด) ร้อยละ 50 ด้วยวิธีสุ่มแบบง่าย (Simple random sampling) ได้แก่ จังหวัดนครราชสีมา และจังหวัดชัยภูมิ ขั้นที่ 2 โดยในแต่ละจังหวัดเลือกมา 2 อำเภอ โดยจังหวัดนครราชสีมา ได้แก่ อำเภอเมืองและอำเภอยางชุมน้อย จังหวัดชัยภูมิ ได้แก่ อำเภอจัตุรัสและอำเภอลำทะเมนชัย ขั้นที่ 3 สุ่มเลือกตำบลจากสภากลางอำเภอ ตำบลละ 2 ตำบล คือ ตำบลโพธิ์กลาง ตำบลโคกสูง ตำบลหนองระเวียง และตำบลธารละหลอด (จังหวัดนครราชสีมา) ตำบลละหาน ตำบลหนองบัวบาน ตำบลคอนสวรรค์ และตำบลยางหวาย (จังหวัดชัยภูมิ) รวม 8 ตำบล การสุ่มตัวอย่าง กำหนดตามหลักการและเหตุผลของการใช้สถิติวิเคราะห์สมการโครงสร้าง (Structural Equation Model) ของนางลักษณ์ วิรัชชัย [8] ซึ่งอาศัยการวิเคราะห์องค์ประกอบ (Factor Analysis) และการวิเคราะห์เส้นทาง (Path Analysis) ต้องใช้กลุ่มตัวอย่างขนาดใหญ่ ยึดตามจำนวนตัวแปรสังเกตอย่างน้อย 1 ตัว ต่อขนาดตัวอย่าง 10 – 30 ตามแบบของ Hair et al. [9] ในการวิจัยครั้งนี้ผู้วิจัยใช้สัดส่วนจำนวนตัวแปรสังเกต 1 ตัว ต่อขนาดตัวอย่าง 20 ตัวอย่าง มีตัวแปรสังเกต



23 ตัว จึงต้องใช้กลุ่มตัวอย่าง อย่างน้อย 460 คน เพื่อให้มีความเชื่อมั่นมากขึ้น และป้องกันการสูญเสียของแบบสอบถามที่ได้รับคืนไม่สมบูรณ์ ผู้วิจัยจึงเพิ่มจำนวนกลุ่มตัวอย่างอีกร้อยละ 10 ได้เท่ากับจำนวน 46 คน รวมกลุ่มตัวอย่างจำนวนทั้งสิ้น 506 คน ซึ่งผู้วิจัยได้ปรับเพิ่มจำนวนเป็น 520 คน เพื่อสะดวกต่อการสุ่มตามสัดส่วนพื้นที่ศึกษา 8 พื้นที่ [8, 9]

เครื่องมือที่ใช้ในการวิจัยคือ แบบสอบถาม ที่สร้างขึ้นจากการทบทวนแนวคิดและทฤษฎี ผู้วิจัยประยุกต์แนวคิดการสูงวัยอย่างมีสุขภาวะของหน่วยงานสุขภาพและเวลเนสแห่งเมืองอัลเบอร์ตา แนวคิดทฤษฎีการเห็นคุณค่าในตนเองของคูเปอร์สมิธ แนวคิดทฤษฎีวิถีชีวิตส่งเสริมสุขภาพของเพนเดอร์ แนวคิดทฤษฎีการสนับสนุนทางสังคมของเฮาส์ การเข้าถึงบริการสุขภาพของเฟินชานสกีและโทมัส ประกอบด้วย 6 ส่วน โดยแบบสอบถามประกอบด้วยข้อมูลลักษณะทางประชากรศาสตร์ของผู้ตอบแบบสอบถาม แบบสอบถามเกี่ยวกับการเห็นคุณค่าในตนเองของผู้สูงอายุ แบบสอบถามเกี่ยวกับวิถีชีวิตส่งเสริมสุขภาพของผู้สูงอายุ แบบสอบถามเกี่ยวกับการสนับสนุนทางสังคมของผู้สูงอายุ แบบสอบถามเกี่ยวกับการเข้าถึงบริการสุขภาพของผู้สูงอายุ และแบบสอบถามเกี่ยวกับการสูงวัยอย่างมีสุขภาวะของผู้สูงอายุ เครื่องมือวิจัยผ่านการตรวจสอบจากผู้เชี่ยวชาญ จำนวน 5 ท่าน และการตรวจสอบอำนาจจำแนก (Discrimination power) หาค่าความเชื่อมั่น (Reliability) ด้วยวิธีการหาค่าสัมประสิทธิ์แอลฟาของครอนบาค (Cronbach's Alpha Coefficient) ได้ค่าความเชื่อมั่นทั้งฉบับเท่ากับ 0.919

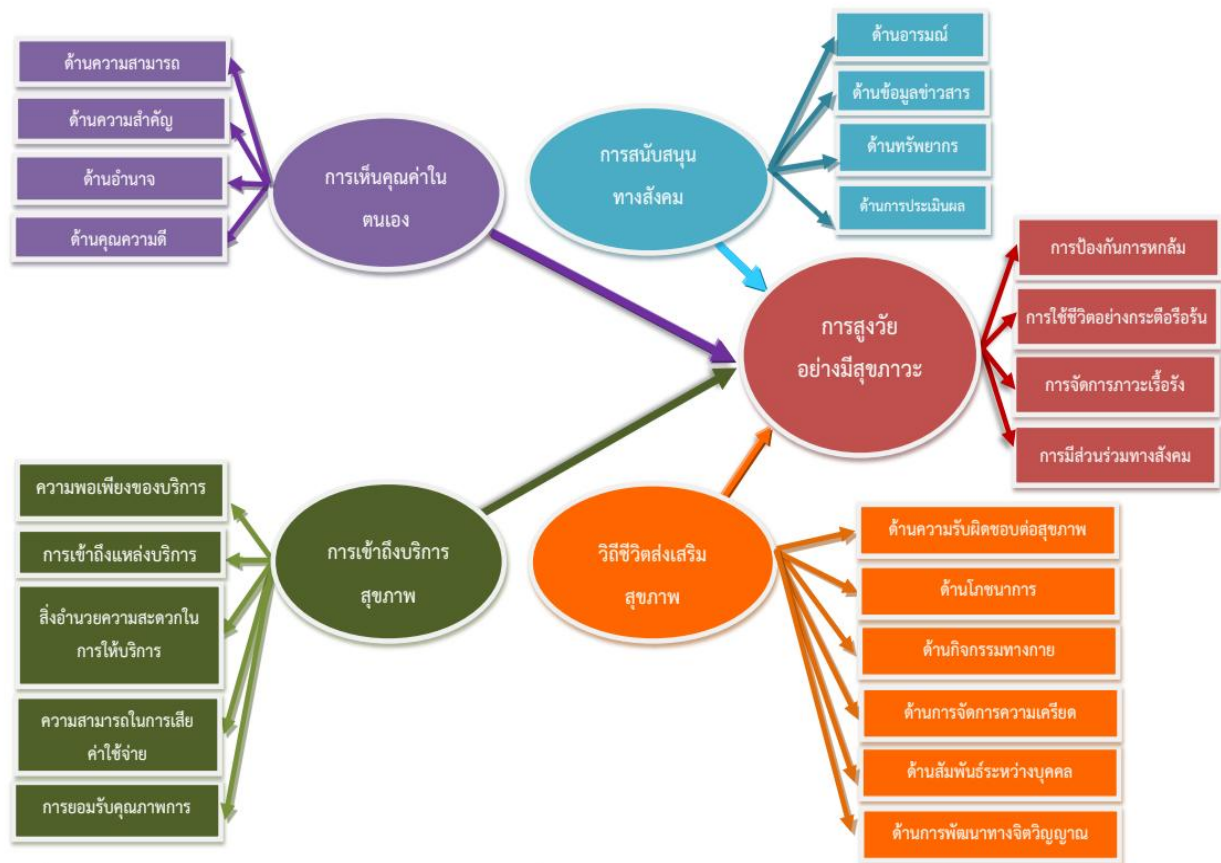
การรับรองจริยธรรมในมนุษย์ ผ่านการพิจารณาจากคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัยในมนุษย์ มหาวิทยาลัยเวสเทิร์น ในการประชุมคณะกรรมการพิจารณาจริยธรรม เมื่อวันที่ 13 กันยายน พ.ศ. 2567 ตามรหัสโครงการเลขที่ HE-WTU 2567-0094 เอกสารรับรองเลขที่ WTU 2567-0094 วิเคราะห์ข้อมูลวิเคราะห์สถิติพื้นฐาน ได้แก่ ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน สัมประสิทธิ์การผันแปร ความเบ้ ความโด่ง ตรวจสอบความตรงเชิงโครงสร้างของตัวแปรแฝง ด้วยวิธีการวิเคราะห์องค์ประกอบเชิงยืนยัน และวิเคราะห์ความสอดคล้องของโมเดล ความสัมพันธ์เชิงสาเหตุของการสูงวัยอย่างมีสุขภาวะของผู้สูงอายุในเขตสุขภาพที่ 9 กระทรวงสาธารณสุข ด้วยการวิเคราะห์โมเดลสมการโครงสร้าง

กรอบแนวคิดการวิจัย

ผู้วิจัยร่างโมเดลสมมติฐานความสัมพันธ์เชิงสาเหตุของการสูงวัยอย่างมีสุขภาวะของผู้สูงอายุในเขตสุขภาพที่ 9 กระทรวงสาธารณสุข เพื่อเป็นแนวทางในการศึกษาวิจัยดังแสดงในภาพที่ 1

ผลการวิจัย

1. ข้อมูลทั่วไปของกลุ่มตัวอย่าง ผลการวิจัยพบว่าข้อมูลทั่วไปของกลุ่มตัวอย่างเป็นเพศหญิงร้อยละ 56 และเพศชายร้อยละ 44 มีอายุเฉลี่ย 69.73 ปี โดยส่วนใหญ่อยู่ในช่วงอายุ 60-69 ปี ร้อยละ 54.6 ส่วนมากมีสถานภาพสมรส ร้อยละ 66.5 และมีระดับการศึกษาอยู่ในช่วงชั้นประถมศึกษามากที่สุด ร้อยละ 90 ด้านสุขภาพพบว่าร้อยละ 51 ไม่มีโรคประจำตัว สำหรับผู้สูงอายุมีโรคประจำตัวพบมากที่สุดคือ โรคความดันโลหิตสูง ร้อยละ 12.5 สิทธิการรักษาหลักคือ สิทธิประกันสุขภาพถ้วนหน้า ร้อยละ 91.2 อาชีพหลักคือ ค่าขาย ร้อยละ 51.5 และร้อยละ 37.9 ไม่ได้ประกอบอาชีพ รายได้เฉลี่ยต่อเดือนอยู่ที่ 2,394.15 บาท โดยส่วนใหญ่มีรายได้เป็นเงินสวัสดิการจากรัฐ ร้อยละ 57.3 ด้านสภาพความเป็นอยู่พบว่าร้อยละ 56.2 อาศัยอยู่กับสมาชิกในครอบครัว 3 - 5 คน บ้านส่วนใหญ่เป็นบ้าน 2 ชั้น ร้อยละ 52.7 และมีความสว่างเพียงพอ ร้อยละ 84.6 ด้านการดูแลผู้สูงอายุพบว่าร้อยละ 70.6 มีผู้ดูแลอยู่ด้วย สำหรับการใช้อุปกรณ์เทคโนโลยีพบว่าร้อยละ 53.5 มีอุปกรณ์แต่ไม่เคยใช้ ผลการวิเคราะห์ร้อยละ ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของระดับความคิดเห็นด้านปัจจัยต่าง ๆ ของปัจจัยเชิงสาเหตุที่มีผลต่อการสูงวัยอย่างมีสุขภาวะของผู้สูงอายุ ในเขตสุขภาพที่ 9 กระทรวงสาธารณสุขพบว่า การเห็นคุณค่าในตนเอง วิถีชีวิตส่งเสริมสุขภาพ การสนับสนุนทางสังคม การเข้าถึงบริการสุขภาพอยู่ในระดับมาก การสูงวัยอย่างมีสุขภาวะอยู่ในระดับปานกลาง ดังตารางที่ 1



ภาพที่ 1 โมเดลปัจจัยเชิงสาเหตุที่มีผลต่อการสูงวัยอย่างมีสุขภาวะของผู้สูงอายุในเขตสุขภาพที่ 9 กระทรวงสาธารณสุข

ตารางที่ 1 ร้อยละ ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐานของระดับความคิดเห็นด้านต่าง ๆ ของปัจจัยเชิงสาเหตุที่มีผลต่อการสูงวัยอย่างมีสุขภาวะของผู้สูงอายุในเขตสุขภาพที่ 9 กระทรวงสาธารณสุข

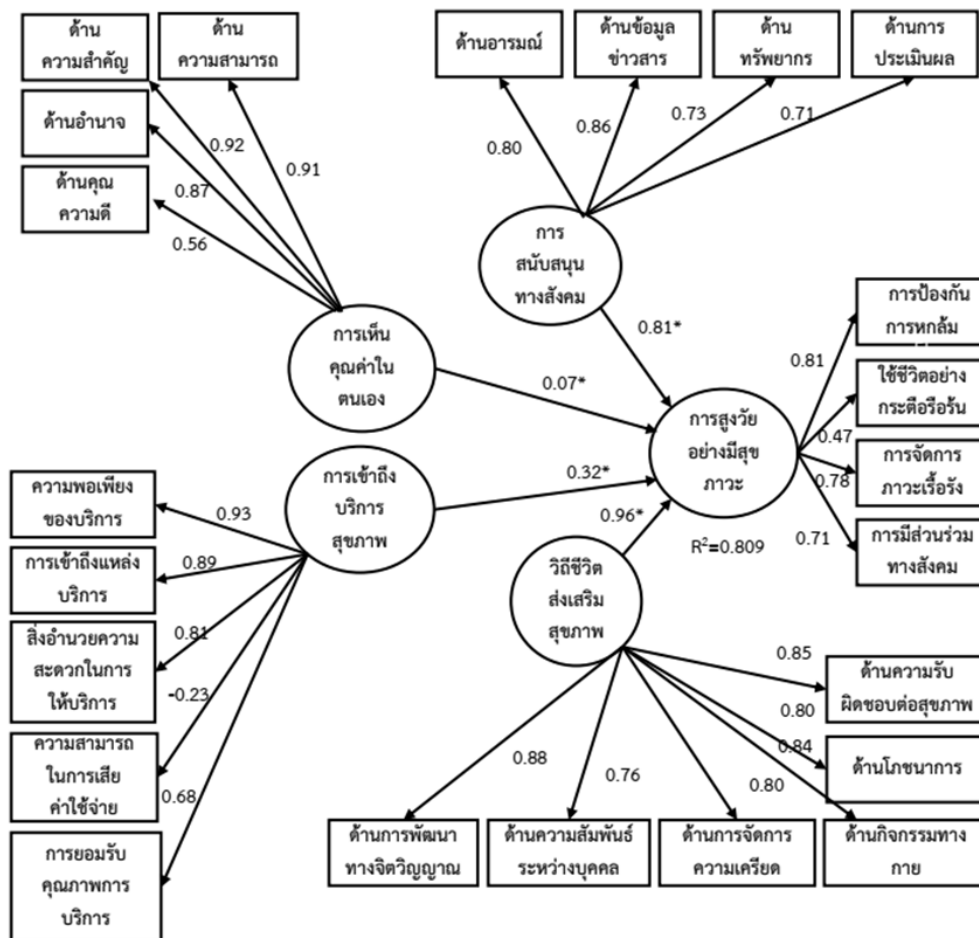
ปัจจัย	ระดับความคิดเห็น						Mean	S.D.
	มาก		ปานกลาง		น้อย			
	n (%)		n (%)		n (%)			
■ การเห็นคุณค่าในตนเอง	359	(69.0)	152	(29.2)	9	(1.7)	4.210	0.642
■ วิถีชีวิตส่งเสริมสุขภาพ	312	(60.0)	188	(36.2)	20	(3.8)	4.149	0.721
■ การสนับสนุนทางสังคม	301	(57.9)	189	(36.3)	30	(5.8)	4.050	0.694
■ การเข้าถึงบริการสุขภาพ	318	(61.2)	183	(35.2)	19	(3.7)	4.082	0.698
■ การสูงวัยอย่างมีสุขภาวะ	139	(26.7)	288	(55.4)	93	(17.9)	3.610	0.631

2. ผลการศึกษาการสูงวัยอย่างมีสุขภาวะของผู้สูงอายุพบว่าผู้สูงอายุในเขตสุขภาพที่ 9 กระทรวงสาธารณสุข ในภาพรวมอยู่ในระดับปานกลางร้อยละ 55.4 รองลงมาอยู่ในระดับมากร้อยละ 26.7 และระดับน้อยร้อยละ 17.9 ตามลำดับ จากผลการวิเคราะห์พบว่าแปรสังเกต ซึ่งประกอบด้วย 4 ตัวแปร ได้แก่ (1) การป้องกันการหกล้ม (2) การใช้ชีวิตอย่างกระตือรือร้น

(3) การจัดการภาวะเรื้อรัง และ (4) การมีส่วนร่วมทางสังคม มีความสอดคล้องกลมกลืนกับข้อมูลเชิงประจักษ์ สรุปได้ว่าตัวแปรการสูงวัยอย่างมีสุขภาวะสามารถวัดได้จากตัวแปรสังเกตดังกล่าวได้จริง

3. โมเดลปัจจัยเชิงสาเหตุที่มีผลต่อการสูงวัยอย่างมีสุขภาวะของผู้สูงอายุในเขตสุขภาพที่ 9 กระทรวงสาธารณสุข ที่ผู้วิจัยพัฒนา มีความสอดคล้องกลมกลืนกับข้อมูลเชิงประจักษ์ ผลการทดสอบค่าสถิติ Chi-Square (χ^2) = 284.294, df = 131 ค่าดัชนี χ^2/df = 2.170, p = 0.000 ค่าดัชนี CFI = 0.984, ค่าดัชนี GFI = 0.957, ค่าดัชนี AGFI = 0.909, ค่าดัชนี TLI = 0.968, ค่าดัชนี NFI = 0.970 และค่าดัชนี RMSEA = 0.047 โดยดัชนีความสอดคล้องเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนด จึงสรุปได้ว่าพฤติกรรม การสูงวัยอย่างมีสุขภาวะของผู้สูงอายุประกอบด้วย 4 องค์ประกอบ ได้แก่ การเห็นคุณค่าในตนเอง วิธีชีวิตส่งเสริมสุขภาพ การสนับสนุนทางสังคม การเข้าถึงบริการสุขภาพ สามารถร่วมกันอธิบายความแปรปรวนของพฤติกรรมสูงวัยอย่างมีสุขภาวะของผู้สูงอายุได้ร้อยละ 80.9

4. เมื่อพิจารณาเส้นทางอิทธิพลของโมเดลปัจจัยเชิงสาเหตุที่มีผลต่อการสูงวัยอย่างมีสุขภาวะของผู้สูงอายุในเขตสุขภาพที่ 9 กระทรวงสาธารณสุข พบว่าวิถีชีวิตส่งเสริมสุขภาพมีอิทธิพลทางตรงสูงสุดต่อสุขภาวะของผู้สูงอายุ (r^2 = 0.96) รองลงมาคือ การสนับสนุนทางสังคม (r^2 =0.81) การเข้าถึงบริการสุขภาพ (r^2 =0.32) และการเห็นคุณค่าในตนเอง (r^2 =0.07) ตามลำดับ และพบว่าตัวแปรในการศึกษามีอิทธิพลทางตรงต่อการสูงวัยอย่างมีสุขภาวะอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ 0.01 และสามารถร่วมกันอธิบายความแปรปรวนของพฤติกรรมสูงวัยอย่างมีสุขภาวะของผู้สูงอายุได้ร้อยละ 80.9 ดังแสดงในภาพที่ 2 และตารางที่ 2



ภาพที่ 2 โมเดลปัจจัยเชิงสาเหตุที่มีผลต่อการสูงวัยอย่างมีสุขภาวะของผู้สูงอายุในเขตสุขภาพที่ 9 กระทรวงสาธารณสุข



ตารางที่ 2 อิทธิพลเส้นทางโมเดลปัจจัยเชิงสาเหตุที่มีผลต่อการสูงวัยอย่างมีสุขภาวะของผู้สูงอายุ

ตัวแปร	อิทธิพลทางตรง
	Direct Effect
■ การเห็นคุณค่าในตนเอง มีอิทธิพลทางตรงต่อการสูงวัยอย่างมีสุขภาวะของผู้สูงอายุ	0.07
■ วิถีชีวิตส่งเสริมสุขภาพ มีอิทธิพลทางตรงต่อการสูงวัยอย่างมีสุขภาวะของผู้สูงอายุ	0.96
■ การสนับสนุนทางสังคม มีอิทธิพลทางตรงต่อการสูงวัยอย่างมีสุขภาวะของผู้สูงอายุ	0.81
■ การเข้าถึงบริการสุขภาพ มีอิทธิพลทางตรงต่อการสูงวัยอย่างมีสุขภาวะของผู้สูงอายุ	0.32

Chi-Square (χ^2) = 284.294, df = 131 ค่าดัชนี χ^2/df = 2.170, p = 0.000 ค่าดัชนี CFI = 0.984, ค่าดัชนี GFI = 0.957, ค่าดัชนี AGFI = 0.909, ค่าดัชนี TLI = 0.968, ค่าดัชนี NFI = 0.970, ค่าดัชนี RMSEA = 0.047

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

ผลการวิจัยพบว่ากลุ่มตัวอย่างมีระดับการสูงวัยอย่างมีสุขภาวะของผู้สูงอายุในภาพรวมอยู่ในระดับปานกลางร้อยละ 55.4 รองลงมาอยู่ในระดับมากร้อยละ 26.7 และระดับน้อยร้อยละ 17.9 ตามลำดับ จำแนกเป็นรายด้านเรียงจากมากไปน้อยได้ดังนี้ 1) การป้องกันการหกล้มร้อยละ 65.4 2) การจัดการภาวะเรื้อรังร้อยละ 52.1 3) การมีส่วนร่วมทางสังคมร้อยละ 52.1 และ 4) การใช้ชีวิตอย่างกระตือรือร้นร้อยละ 14.2 ตามลำดับ สามารถอธิบายได้ว่าผู้สูงอายุส่วนใหญ่ให้ความสำคัญกับการป้องกันการหกล้มมากที่สุด เนื่องจากเป็นปัญหาสุขภาพที่พบบ่อยและส่งผลกระทบรุนแรงต่อคุณภาพชีวิตในวัยสูงอายุ การหกล้มอาจนำไปสู่การบาดเจ็บรุนแรงหรือภาวะทุพพลภาพได้ ดังนั้นการป้องกันการหกล้มจึงเป็นพฤติกรรมที่ผู้สูงอายุให้ความสำคัญและปฏิบัติอย่างสม่ำเสมอ นอกจากนี้การจัดการภาวะเรื้อรังและการมีส่วนร่วมทางสังคมก็เป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อสุขภาวะของผู้สูงอายุ ผู้สูงอายุส่วนใหญ่สามารถจัดการภาวะเรื้อรังได้ดี โดยเฉพาะการเฝ้าระวังอาการและการไปพบแพทย์อย่างสม่ำเสมอ อย่างไรก็ตามการใช้ชีวิตอย่างกระตือรือร้นยังมีคะแนนค่อนข้างต่ำ ซึ่งอาจสะท้อนถึงข้อจำกัดทางสุขภาพหรือสภาพแวดล้อมที่ไม่เอื้ออำนวยต่อการมีกิจกรรมทางกายหรือการเข้าร่วมกิจกรรมทางสังคมอย่างเต็มที่ ดังนั้นการส่งเสริมให้ผู้สูงอายุมีกิจกรรมทางกายและสังคมอย่างสม่ำเสมอจึงเป็นประเด็นที่ควรได้รับการสนับสนุนมากขึ้น นอกจากนี้การมีส่วนร่วมทางการเมืองและสังคมยังเป็นพฤติกรรมที่ผู้สูงอายุให้ความสำคัญมากที่สุด ซึ่งสะท้อนถึงบทบาทและความต้องการในการมีส่วนร่วมกิจกรรมของชุมชนและสังคม แม้จะอยู่ในวัยสูงอายุก็น่าสนใจ

การเห็นคุณค่าในตนเองมีอิทธิพลทางตรงต่อการสูงวัยอย่างมีสุขภาวะของผู้สูงอายุในเขตสุขภาพที่ 9 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์อิทธิพลเท่ากับ 0.07 ยอมรับสมมติฐานที่ 1 ซึ่ง Coopersmith [10] ได้อธิบายว่าการเห็นคุณค่าในตนเองคือ การประเมินคุณค่าในสิ่งที่ตนเองมีจนเกิดเป็นพฤติกรรมที่บุคคลแสดงออกถึงการยอมรับหรือไม่ยอมรับตนเอง ซึ่งสะท้อนถึงทัศนคติที่มีต่อตนเองในด้านความสามารถ ความสำเร็จ อำนาจ และคุณความดี โดยบุคคลอื่นสามารถรับรู้ได้จากภาษาและท่าทีที่แสดงออกมา ดังนั้นการเห็นคุณค่าในตนเองจึงเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลต่อพฤติกรรมการสูงวัยอย่างมีสุขภาวะ เนื่องจากผู้สูงอายุที่มีการเห็นคุณค่าในตนเองสูงจะมีความมั่นใจในการจัดการชีวิตและสุขภาพของตนเองได้ดีขึ้น การเห็นคุณค่าในตนเองวัดได้จาก 4 ตัวแปร ได้แก่ (1) ด้านความสามารถ (2) ด้านความสำคัญ (3) ด้านอำนาจ และ (4) ด้านคุณความดี โดยตัวแปรที่มีความสำคัญมากที่สุด ได้แก่ การเห็นคุณค่าในตนเองด้านอำนาจ รองลงมาคือ การเห็นคุณค่าในตนเองด้านคุณความดี การเห็นคุณค่าในตนเองด้านความสำคัญ และการเห็นคุณค่าในตนเองด้านความสามารถ แสดงว่าในการส่งเสริมการเห็นคุณค่าในตนเองของประชาชน ควรเน้นไปที่การเห็นคุณค่าในตนเองด้านอำนาจ และการเห็นคุณค่าในตนเองด้านคุณความดี สอดคล้องกับการศึกษาของ Sadjapong U. และ Thongtip S. [11] ที่ศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความภาคภูมิใจในตนเองและคุณภาพชีวิตที่เกี่ยวข้องกับสุขภาพในชุมชนผู้สูงอายุในชนบทภาคเหนือ

ของประเทศไทย ผลการศึกษาพบว่าความรู้สึกมีคุณค่าในตนเองของผู้สูงอายุสามารถปรับปรุงสุขภาพโดยรวมและความเป็นอยู่ที่ดีของบุคคลในช่วงบั้นปลายชีวิตได้

วิถีชีวิตส่งเสริมสุขภาพมีอิทธิพลทางตรงต่อการสูงวัยอย่างมีสุขภาวะของผู้สูงอายุในเขตสุขภาพที่ 9 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์อิทธิพลเท่ากับ 0.96 ยอมรับสมมติฐานที่ 2 ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดในการส่งเสริมสุขภาพของเพนเดอร์ [12] ที่ได้สรุปรูปแบบของการสร้างเสริมสุขภาพที่บุคคลจะมีพฤติกรรมในการสร้างเสริมสุขภาพของตนเองไว้ว่า การที่บุคคลปฏิบัติกิจกรรมเพื่อส่งเสริมสุขภาพนั้นต้องอย่างต่อเนื่องสม่ำเสมอจนกลายเป็นแบบแผนการดำเนินชีวิตและนิสัยสุขภาพ (Life style and Health habits) ที่จะช่วยให้บุคคลคงไว้หรือยกระดับภาวะสุขภาพ เพื่อความผาสุก (Well-Being) และมีสุขภาวะที่ดี ในการวิจัยนี้พบว่าตัวแปรที่มีความสำคัญมากที่สุด ได้แก่ ความรับผิดชอบต่อสุขภาพ รองลงมาคือ การพัฒนาทางจิตวิญญาณ การจัดการกับความเครียดสัมพันธ์ภาวะระหว่างบุคคล กิจกรรมทางกาย และโภชนาการ แสดงให้เห็นว่าวิถีชีวิตส่งเสริมสุขภาพมีบทบาทสำคัญต่อการสูงวัยอย่างมีสุขภาวะของผู้สูงอายุ ผลการศึกษานี้สอดคล้องกับการศึกษาของ กรธณธัช ปัญญาโส และคณะ [13] ที่พบว่าการสร้างเสริมสุขภาพเป็นกระบวนการที่บุคคลสามารถเพิ่มความสามารถในการควบคุมและปรับปรุงสุขภาพให้บรรลุถึงความสมบูรณ์ของร่างกาย จิตใจ สังคม ให้เข้ากับสภาพแวดล้อมของสังคมและธรรมชาติได้เพื่อพัฒนาคุณภาพชีวิตของผู้สูงอายุให้ดีขึ้นและนำไปสู่การมีสุขภาวะที่ดี และสอดคล้องกับผลการศึกษาของ กุลวดี โรจนไพศาลกิจ และวรากร เกรียงไกรศักดิ์ดา [14] พบว่าการที่ผู้สูงอายุจะมีสุขภาวะที่ดีนั้นต้องอาศัยแนวคิดในการดูแลสุขภาพแบบองค์รวมที่ครอบคลุมมิติทางกาย จิตใจ สังคม จึงควรมีการดำเนินงานภายใต้การสนับสนุนและความร่วมมือจากภาคีเครือข่ายซึ่งมีแกนนำโดยผู้สูงอายุและผู้สูงอายุจิตอาสาในชุมชนเป็นกลไกทรัพยากรบุคคลที่สำคัญในการขับเคลื่อนการสร้างสุขภาวะให้กับผู้สูงอายุได้ประสบความสำเร็จตามเป้าหมายในการพัฒนา เพื่อส่งเสริมสุขภาพร่างกายให้แข็งแรงเหมาะสมกับสภาพร่างกายที่เปลี่ยนแปลงไปในทางเสื่อมลงได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้นการส่งเสริมให้ผู้สูงอายุมีวิถีชีวิตที่สนับสนุนสุขภาพในด้านต่าง ๆ โดยเฉพาะความรับผิดชอบต่อสุขภาพและโภชนาการที่เหมาะสม จะช่วยให้เกิดการสูงวัยอย่างมีสุขภาวะและสามารถใช้ชีวิตอย่างมีคุณภาพได้ต่อไป

การสนับสนุนทางสังคมมีอิทธิพลทางตรงต่อการสูงวัยอย่างมีสุขภาวะของผู้สูงอายุในเขตสุขภาพที่ 9 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์อิทธิพลเท่ากับ 0.81 ยอมรับสมมติฐานที่ 3 ซึ่ง Schaefer et al. [15] และ Thoits [16] กล่าวว่า การสนับสนุนทางอารมณ์เป็นการให้ความรัก ความห่วงใย ความอบอุ่นใจ และการยอมรับซึ่งกันและกัน ซึ่งช่วยให้ผู้สูงอายุรู้สึกมีคุณค่าและเป็นส่วนหนึ่งของสังคม ส่วนการสนับสนุนทางเครื่องมือเป็นการให้ความช่วยเหลือในรูปแบบของสิ่งของ เงินทอง หรือบริการต่าง ๆ ที่ช่วยให้ผู้สูงอายุสามารถดำรงชีวิตได้อย่างปกติ และ House [17] อธิบายว่าการสนับสนุนทางข้อมูลข่าวสารเกี่ยวข้องกับการให้คำแนะนำ คำปรึกษา และข้อมูลที่เป็นประโยชน์ เพื่อช่วยแก้ไขปัญหาในชีวิตประจำวัน สำหรับการสนับสนุนด้านการประเมินผลจะเกี่ยวข้องกับการให้ข้อมูลป้อนกลับและการรับรองผลการปฏิบัติ ซึ่งช่วยให้ผู้สูงอายุเห็นความสำคัญของพฤติกรรมสุขภาพที่ตนเองปฏิบัติ ในการวิจัยนี้ การสนับสนุนทางสังคมวัดได้จาก 4 ตัวแปร โดยตัวแปรที่มีความสำคัญมากที่สุด ได้แก่ การสนับสนุนทางอารมณ์ รองลงมาคือการสนับสนุนทางข้อมูลข่าวสาร การสนับสนุนทางทรัพยากร และการสนับสนุนด้านการประเมินผล จากการวิจัยในครั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่า การสนับสนุนทางสังคมมีบทบาทสำคัญต่อการสูงวัยอย่างมีสุขภาวะของผู้สูงอายุในเขตสุขภาพที่ 9 โดยเฉพาะการสนับสนุนทางอารมณ์และข้อมูลข่าวสาร ซึ่งช่วยให้ผู้สูงอายุรู้สึกมีคุณค่า มีความมั่นใจ และสามารถจัดการกับปัญหาต่าง ๆ ในชีวิตประจำวันได้ดีขึ้น โดย Schaefer et al. [15] และ Thoits [16] ระบุว่า การสนับสนุนทางอารมณ์ช่วยลดความเครียดและเพิ่มความพึงพอใจในชีวิต House [17] กล่าวว่า การให้ข้อมูลข่าวสารที่เป็นประโยชน์เช่น คำแนะนำเกี่ยวกับการดูแลสุขภาพและการป้องกันโรค ช่วยให้ผู้สูงอายุมีทักษะและความรู้ในการจัดการกับปัญหาสุขภาพในชีวิตประจำวัน สำหรับการสนับสนุนทางเครื่องมือ เช่น การให้ความช่วยเหลือในรูปแบบของสิ่งของ เงินทอง หรือบริการต่าง ๆ ช่วยให้ผู้สูงอายุสามารถดำรงชีวิตได้อย่างปกติ โดยเฉพาะผู้สูงอายุที่ขาดแคลนทรัพยากรหรือมีข้อจำกัดทางกายภาพ [15, 16] และการสนับสนุนด้านการประเมินผล ได้แก่ การให้



ข้อมูลย้อนกลับและการรับรองผลการปฏิบัติตัว ซึ่งจะช่วยให้ผู้สูงอายุเห็นความสำคัญของพฤติกรรมสุขภาพที่ตนเองปฏิบัติ และมีแรงจูงใจในการปรับเปลี่ยนพฤติกรรมให้ดีขึ้น โดยสรุปในการส่งเสริมการสูงวัยอย่างมีสุขภาวะควรเน้นการสนับสนุนทางอารมณ์มากที่สุด แต่ยังคงให้การสนับสนุนทางข้อมูลข่าวสาร การสนับสนุนทางเครื่องมือ และการสนับสนุนด้านการประเมินผลแก่ผู้สูงอายุเพื่อส่งเสริมการสูงวัยอย่างมีสุขภาวะ สอดคล้องกับการศึกษาของจิรนนท์ วงศ์สุวรรณ และคณะ [18] ได้ทำการศึกษารื่อง การสนับสนุนทางสังคมและพฤติกรรมสุขภาพของผู้สูงอายุในชมรมผู้สูงอายุ อำเภอสูงเม่น จังหวัดแพร่ ผลการศึกษาพบว่าการสนับสนุนทางสังคมจากครอบครัวและชุมชนมีบทบาทสำคัญในการส่งเสริมพฤติกรรมสุขภาพของผู้สูงอายุ โดยเฉพาะการเข้าร่วมกิจกรรมในชมรมผู้สูงอายุและการได้รับความรู้จากบุคลากรสาธารณสุข และการศึกษาของ Zanjari et al. [19] ได้ศึกษาเรื่อง อิทธิพลของการให้และการสนับสนุนทางสังคมต่อความเป็นอยู่ที่ดีของผู้สูงอายุ ผลการศึกษาพบว่าการให้การสนับสนุนทางสังคมมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญกับความเป็นอยู่ที่ดีของผู้สูงอายุ ($p < 0.05$) นอกจากนี้ Thoits [16] ยังพบว่าการสนับสนุนทางสังคมช่วยลดความเครียดและเพิ่มความมั่นใจในการดูแลตนเองของผู้สูงอายุ

การเข้าถึงบริการสุขภาพมีอิทธิพลทางตรงต่อการสูงวัยอย่างมีสุขภาวะของผู้สูงอายุในเขตสุขภาพที่ 9 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์อิทธิพลเท่ากับ 0.32 ยอมรับสมมติฐานที่ 4 ซึ่งสอดคล้องกับ Penchamsky & Thomas [20] ได้อธิบายว่า การเข้าถึงบริการสุขภาพสามารถจำแนกได้เป็น 5 ด้านหลัก ได้แก่ (1) ความพอเพียงของบริการ (2) การเข้าถึงแหล่งบริการ (3) สิ่งอำนวยความสะดวกในการให้บริการ (4) ความสามารถในการเสียค่าใช้จ่าย และ (5) การยอมรับคุณภาพการบริการ จากการวิจัยในครั้งนี้สามารถอธิบายได้ว่าการเข้าถึงบริการสุขภาพมีบทบาทสำคัญต่อการสูงวัยอย่างมีสุขภาวะของผู้สูงอายุในเขตสุขภาพที่ 9 โดยเฉพาะความพอเพียงของบริการและการเข้าถึงแหล่งบริการ ซึ่งช่วยให้ผู้สูงอายุสามารถเข้าถึงบริการได้อย่างสะดวกและมีประสิทธิภาพ ความพอเพียงของบริการ หมายถึง การมีบุคลากรและทรัพยากรที่เพียงพอช่วยให้ผู้สูงอายุได้รับการที่รวดเร็วและมีคุณภาพ ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดของ Donabedian [21] ที่เน้นความสำคัญของโครงสร้างบริการสุขภาพในการส่งเสริมคุณภาพการดูแล ส่วนการเข้าถึงแหล่งบริการ หมายความว่า การที่สถานบริการตั้งอยู่ในระยะทางที่ไม่ไกลและสะดวกต่อการเดินทาง ช่วยลดอุปสรรคในการเข้าถึงบริการตามที่ Andersen [22] ที่ระบุว่าการเข้าถึงบริการสุขภาพขึ้นอยู่กับปัจจัยทางกายภาพและสิ่งแวดล้อม และสิ่งอำนวยความสะดวกในการให้บริการคือ การมีอุปกรณ์และสิ่งอำนวยความสะดวกที่เหมาะสม ช่วยให้ผู้สูงอายุรู้สึกสะดวกสบายและปลอดภัยในการใช้บริการ นอกจากนี้ความสามารถในการเสียค่าใช้จ่าย ช่วยลดอุปสรรคทางเศรษฐกิจในการเข้าถึงบริการสุขภาพ ช่วยให้ผู้สูงอายุสามารถใช้บริการได้อย่างทั่วถึง ซึ่งสอดคล้องกับแนวคิดของ WHO [23] ที่ต้องการสร้างความเท่าเทียมทางการเงิน (Fair Financial Contribution) ลดภาระทางการเงินที่ประชาชนต้องจ่ายสำหรับบริการสุขภาพ และการยอมรับคุณภาพการบริการ เป็นความพึงพอใจของผู้สูงอายุต่อประสิทธิภาพความเป็นธรรมของบริการ ช่วยเพิ่มความเชื่อมั่นความตั้งใจในการใช้บริการอย่างต่อเนื่อง ในการส่งเสริมสุขภาวะของผู้สูงอายุควรเน้นไปที่ความพอเพียงของบริการและการเข้าถึงแหล่งบริการ สอดคล้องกับการศึกษาของ ศิริพร งามขำ และคณะ [24] ได้ศึกษาเรื่อง การเข้าถึงบริการสุขภาพของผู้สูงอายุเขตทวีวัฒนา กรุงเทพมหานคร ผลการศึกษาพบว่าการเข้าถึงบริการสุขภาพของผู้สูงอายุในเขตทวีวัฒนา กรุงเทพมหานคร อยู่ในระดับดี โดยพบว่าปัจจัยสำคัญได้แก่ คุณภาพบริการและการมีครอบครัวสนับสนุน นอกจากนี้การศึกษาของอาจริย์ เชิดชู และคณะ [25] ศึกษาเรื่องการเข้าถึงบริการสุขภาพของผู้สูงอายุอำเภอบางปะอิน จังหวัดพระนครศรีอยุธยา ผลการศึกษาพบว่าผู้สูงอายุมองว่าความพอเพียงของบริการ จำนวนเจ้าหน้าที่สาธารณสุขในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบลเพียงพอต่อการให้บริการและดูแลสุขภาพของผู้สูงอายุ สามารถจัดบริการเพื่อตอบสนองความจำเป็นด้านสุขภาพได้รวมถึงมีเครื่องมือ วัสดุทางการแพทย์ และยาในการรักษาพยาบาลผู้สูงอายุอย่างเพียงพอ นอกจากนี้สมชาย นันทวัฒน์ภรณ์ [26] ได้ศึกษาเรื่อง การเข้าถึงบริการสุขภาพของผู้สูงอายุในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล อำเภอเวียงแหง จังหวัดเชียงใหม่ ผลการศึกษาพบว่าการรับรู้ระบบบริการสุขภาพและสิทธิประโยชน์หลักประกันสุขภาพมีความสัมพันธ์กับการเข้าถึงบริการสุขภาพของผู้สูงอายุอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นการส่งเสริมการ

เข้าถึงบริการสุขภาพควรเน้นการพัฒนาความพอเพียงของบริการและการเข้าถึงแหล่งบริการ โดยการที่สถานบริการสุขภาพเพิ่มจำนวนบุคลากร จัดระบบขนส่งสำหรับผู้สูงอายุ และปรับปรุงสิ่งอำนวยความสะดวกในสถานบริการ นอกจากนี้ควรให้ความรู้เกี่ยวกับสิทธิประโยชน์หลักประกันสุขภาพเพื่อลดอุปสรรคทางเศรษฐกิจ

ประโยชน์ของการวิจัย

1) ด้านนโยบาย การวิจัยในครั้งนี้เป็นการนำเสนอโมเดลปัจจัยเชิงสาเหตุที่มีผลต่อการสูงวัยอย่างมีสุขภาวะของผู้สูงอายุ ซึ่งเป็นผลจากการศึกษา รวบรวมแนวคิดทฤษฎีของนักวิชาการหลายท่าน จากเอกสาร ตำรา และงานวิจัยจากแหล่งความรู้ นำมาสู่การสังเคราะห์และพัฒนาเป็นโมเดลปัจจัยเชิงสาเหตุที่มีผลต่อการสูงวัยอย่างมีสุขภาวะของผู้สูงอายุ อันเป็นการขยายขอบเขตความรู้ในเชิงวิชาการซึ่งจะเป็นประโยชน์ต่อการแก้ปัญหาทางสาธารณสุขต่อไป

2) ด้านการประยุกต์ใช้ ผลที่ได้จากการวิจัยในครั้งนี้จะเป็นข้อมูลให้กับระบบสาธารณสุขในการสูงวัยอย่างมีสุขภาวะของผู้สูงอายุอันจะนำไปสู่การมีคุณภาพชีวิตที่ดีเมื่อเข้าสู่วัยสูงอายุ นอกจากนี้ยังสามารถนำไปสู่แนวทางการสูงวัยอย่างมีสุขภาวะของผู้สูงอายุได้อย่างชัดเจน และทำให้การสูงวัยอย่างมีสุขภาวะของผู้สูงอายุสามารถบรรลุเป้าหมายที่ตั้งไว้ และการจัดบริการสุขภาพของประชากรผู้สูงอายุโดยเฉพาะผู้สูงอายุติดสังคมและกลุ่มติดบ้านที่สามารถช่วยเหลือตนเองได้ หรือต้องการความช่วยเหลือบางส่วนให้มีการมีสุขภาวะองค์รวมทั้งทางกาย จิตใจ สังคม และจิตวิญญาณที่ดีนำไปสู่การมีคุณภาพชีวิตที่ดี

ข้อเสนอแนะสำหรับการวิจัยครั้งต่อไป

1) ควรศึกษาแนวคิดทฤษฎีอื่นที่เป็นสาเหตุของการเกิดพฤติกรรมสุขภาพเพิ่มเติมจากการเห็นคุณค่าในตนเอง วิธีชีวิต ส่งเสริมสุขภาพ การสนับสนุนทางสังคม และการเข้าถึงบริการสุขภาพ มาวิจัยในครั้งต่อไปเช่น ปัจจัยด้านชุมชน ความเข้มแข็งของชุมชน นโยบายของประเทศ เป็นต้น

2) ควรมีการศึกษาเชิงคุณภาพหรือการวิจัยกึ่งทดลอง เพื่อพัฒนารูปแบบ (Model) ที่เหมาะสมกับการส่งเสริมพฤติกรรมเพื่อส่งเสริมสุขภาวะผู้สูงอายุโดยเฉพาะการวิจัยและพัฒนา (Research & Development : R&D)

เอกสารอ้างอิง

1. เจาะลึกระบบสุขภาพ. 2544-2643 โลกเข้าสู่ศตวรรษแห่งผู้สูงอายุ. วารสารเทคโนโลยีวัสดุ [อินเทอร์เน็ต]. 2544 [เข้าถึงเมื่อ 1 ต.ค. 2566]. เข้าถึงได้จาก: <https://www.hfocus.org/content/2015/04/9734>.
2. สำนักข่าวสร้างสุข. ปี 65 ไทยเข้าสู่สังคมผู้สูงอายุโดยสมบูรณ์ สสส.ผนึกภาคี ผลักดันนโยบายเพื่อสุขภาวะที่ดีของผู้สูงอายุทั่วประเทศ. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการสร้างเสริมสุขภาพ. [อินเทอร์เน็ต]. 2565 [เข้าถึงเมื่อ 22 ธ.ค. 2566]. เข้าถึงได้จาก: <https://www.thaihealth.or.th>.
3. วิไลวรรณ ทองเจริญ. ศาสตร์ และศิลป์ การพยาบาลผู้สูงอายุ. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์โครงการตำราคณะพยาบาลศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล; 2554.
4. Hengudomsab P. Resilience in later life. Thai Pharm Health Sci J 2007;2(1):115-23.
5. กรมกิจการผู้สูงอายุ. คลังความรู้ สถิติผู้สูงอายุ. กระทรวงการพัฒนาสังคมและความมั่นคงของมนุษย์ [อินเทอร์เน็ต]. 2565 [เข้าถึงเมื่อ 22 ธ.ค. 2566]. เข้าถึงได้จาก: <https://www.dop.go.th>
6. Kline RB. Principles and Practice of Structural Equation Modeling. 4th ed. New York: The Guilford Press; 2016.



7. Brown AF, Ma GX, Miranda J, Eng E, Castille D, Brockie T, et al. Structural Interventions to Reduce and Eliminate Health Disparities. *Am J Public Health* 2019;109(S1):72-8.
8. นงลักษณ์ วิรัชชัย. โมเดลลิสเรล: สถิติวิเคราะห์สำหรับการวิจัย. พิมพ์ครั้งที่ 3. กรุงเทพฯ: โรงพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์; 2542.
9. Hair JF, Black WC, Babin BJ, Anderson RE. Multivariate data analysis. 7th ed. Englewood Cliffs: Prentice-Hall; 2010.
10. Coopersmith S. The antecedents of self-esteem. San Francisco: W.H. Freeman; 1967.
11. Sadjapong U, Thongtip S. Association between self-esteem and health-related quality of life among elderly rural community, Northern Thailand. *Cogent Social Sciences* 2023; 9:2282410.
12. Pender NJ. Health promotion innursing practice. 3rd ed. Stamford: Appleton and Lange; 1996.
13. กรฐณัฐ ปัญญาใส. ประสิทธิผลของโปรแกรมการสร้างเสริมสุขภาพเพื่อการพัฒนาคุณภาพชีวิต บนพื้นฐานความต้องการของผู้สูงอายุ. *วารสารสาธารณสุขมหาวิทยาลัยบูรพา* 2560;12(2):1-10.
14. กุลวดี โรจน์ไพศาลกิจ, วรากร เกรียงไกรศักดิ์. การพัฒนาแนวทางการดำเนินงานของชุมชนในการพัฒนาสุขภาพของผู้สูงอายุ. *วารสารสมาคมนักวิจัย* 2560;22(1):81-97.
15. Schaefer C, Coyne CJ, Lazarus RS. The health-related functions of social support. *Journal of Behavioral Medicine* 1981;4(4):381-409.
16. Thoits PA. Conceptual, methodological, and theoretical problems in studying social support as a buffer against life stress. *JHSB* 1982;23(2):145-59.
17. House JS. Work stress and social support. Massachusetts: Addison-Wesley publishing company; 1981.
18. จิรนนท์ วงศ์สุวรรณ, ศิวพร อึ้งวัฒนา, สุกฤตา สวนแก้ว. การสนับสนุนทางสังคมและพฤติกรรมสุขภาพของผู้สูงอายุในชมรมผู้สูงอายุ อำเภอสูงเม่น จังหวัดแพร่. *พยาบาลสาร* 2563;47(3):267-76.
19. Zanjari N, Momtaz YA, Kamal SHM, Basakha M, Ahmadi S. The Influence of Providing and Receiving Social Support on Older Adults' Well-being. *Clin Pract Epidemiol Ment Health* 2022;3(18):e174501792112241.
20. Penchansky R, Thomas JW. The concept of access: Definition and relationship to consumer satisfaction. *Medical Care* 1981;19(2):127-40.
21. Donabedian A. The quality of care: How can it be assessed?. *JAMA* 1988;260(12):1743-8.
22. Andersen RM. Revisiting the behavioral model and access to medical care: Does it matter?. *JHSB* 1995;36(1):1-10.
23. World Health Organization. The world health report 2000: Health systems: Improving performance. WHO [Internet]. 2000 [cited 2023 October 19]. Available from: <https://iris.who.int/handle/10665/>
24. ศิริพร งามขำ, นวรัตน์ สุวรรณผ่อง, มธุรส ทิพยมงคลกุล, จารุวรรณ หมั่นมี. “การเข้าถึงบริการสุขภาพของผู้สูงอายุเขตทวีวัฒนา กรุงเทพมหานคร”. *วารสารพยาบาลเกื้อการุณย์* 2561;25(2):91-104.
25. อาจารย์ เชิดชู, ฉวีวรรณ บุญสุยา, ชรินทร์ เจริญกุล. การเข้าถึงบริการสุขภาพของผู้สูงอายุอำเภอบางปะอิน จังหวัดพระนครศรีอยุธยา. *วารสารความปลอดภัยและสุขภาพ* 2562;12(2):1-13.
26. สมชาย นันทวัฒนากรณ์. การเข้าถึงบริการสุขภาพผู้สูงอายุในโรงพยาบาลส่งเสริมสุขภาพตำบล อำเภอเวียงแหง จังหวัดเชียงใหม่. สำนักงานสาธารณสุขจังหวัดเชียงใหม่ [อินเทอร์เน็ต]. 2556 [เข้าถึงเมื่อ 1 ต.ค. 2566]. เข้าถึงได้จาก <https://www.chiangmaihealth.go.th/document/231122170062611826.pdf>.



การสำรวจชนิดและการใช้ประโยชน์ของชำในพื้นที่ยังหวัดสมุทรปรการ

A Survey on Species Diversity and Utilization of Genus *Alpinia* Roxb. (Zingiberaceae) in Samut Prakan Province.

ยุคลธร สถาปนศิริ^{1*} ร่มรดา มีบุญญา² ชวนพิศ จิระพงษ์¹ ผุสดี สิริยากร³ อลิสรฯ พรายแก้ว⁴
และวิภาพรรณ ชนะภักดี⁵

¹สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ สมุทรปรการ 10540

²สาขาวิชาภักษาเวชศาสตร์ วิทยาลัยสหเวชศาสตร์ มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา วิทยาเขตสมุทรสงคราม
สมุทรสงคราม 75000

³สาขาวิชาวิทยาศาสตร์กายภาพ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ สมุทรปรการ 10540

⁴สาขาวิชาวิทยาการคำนวณและเทคโนโลยีดิจิทัล คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ
สมุทรปรการ 10540

⁵โรงเรียนบางหลวงวิทยา นครปฐม 73190

Yukontorn Sathapanasiri^{1*}, Rumrada Meeboonya², Chaunpis Jirapong¹,
Phudsadee Sirayakorn³, Alissara Praykaew⁴ and Wipapan Chanapag⁵

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

²Department of Cannabis Medical Science, College of Allied Health Sciences, Suan Sunandha Rajabhat
University, Samut Songkhram Campus, Samut Songkhram 75000

³Division of Physical Science, Faculty of Science and Technology, Huachiew Chalermprakiet University,
Samutprakarn 10540

⁴Division of Computing Science and Digital Technology, Faculty of Science and Technology,
Huachiew Chalermprakiet University, Samutprakarn 10540

⁵Bangluangwittaya School, Nakhon Pathom 73190

*Corresponding author: y_satapanasiri@hotmail.com

Received: 7 May 2025/ Revised: 29 September 2025/ Accepted: 2 October 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความหลากหลายชนิด และการใช้ประโยชน์ของชำในพื้นที่อำเภอบางบ่อ อำเภอบางพลี อำเภอบางเสาธง และอำเภอสุมทปรการ ซึ่งมีการดำเนินการตั้งแต่เดือนมิถุนายน ถึง เดือนสิงหาคม พ.ศ. 2566 โดยมีการเก็บตัวอย่างพืชเพื่อใช้ตรวจสอบชื่อพฤกษศาสตร์ จัดทำตัวอย่างพรรณไม้แห้ง บันทึกข้อมูลพืช ชื่อพื้นเมือง ช่วงเวลาการออกดอก นิเวศวิทยา และได้สร้างฐานข้อมูลระบุนชนิด รวมถึงมีการบันทึกข้อมูลจากการสัมภาษณ์ผู้ที่มีความรู้ในการใช้ประโยชน์



จากพืช จากผลการศึกษาลักษณะทางสัณฐานวิทยาในตัวอย่างชาทั้งหมด 32 ตัวอย่าง พบว่ามีชาจำนวน 2 ชนิด ได้แก่ ชาหลวง (*Alpinia galanga* (L.) Willd.) และชาแดง (*Alpinia siamensis* K. Schum.) โดยชนิดที่มีการกระจายพันธุ์ในพื้นที่มากที่สุด คิดเป็น 84 เปอร์เซ็นต์ ได้แก่ *A. siamensis* ชาชนิดนี้พบในพื้นที่ปลูกทั้ง 4 อำเภอ 18 ตำบล ส่วนชนิด *A. galanga* พบในพื้นที่ปลูก 3 อำเภอ 4 ตำบล คิดเป็น 16 เปอร์เซ็นต์ ในการศึกษาครั้งนี้ได้มีการเก็บชาในตำบลบางเปรี้ยว อ.บางบ่อ ทั้งหมด 3 ตัวอย่าง โดยผลการตรวจสอบพบว่าเป็น *A. siamensis* ทั้งหมด ซึ่งชาของตำบลบางเปรี้ยวค่อนข้างมีชื่อเสียงเนื่องจากมีขนาดเหง้าใหญ่ ขาว สวยและอร่อย ทำให้มีพ่อค้ามารับซื้อทั้งจากในพื้นที่และนอกพื้นที่ สำหรับการศึกษาข้อมูลการใช้ประโยชน์สามารถแบ่งการใช้ประโยชน์ออกเป็น 2 ด้าน ได้แก่ ด้านอาหาร และด้านสมุนไพร ซึ่งความรู้ต่าง ๆ เหล่านี้ได้รับการถ่ายทอดจากบรรพบุรุษสืบต่อกันมา

คำสำคัญ: ชา ความหลากหลายชนิด สัณฐานวิทยา การใช้ประโยชน์

Abstract

The objectives of this research were to study the species diversity and utilization of *Alpinia* in Bang Bo District, Bang Phli District, Bang Sao Thong District and Mueang Samut Prakan District, Samut Prakan Province, was conducted from June to August 2023. Plant samples were collected for identification, preparation of herbarium specimens, and record of plant information. The vernacular name, phenology ecological data and a key to the species are provided. Data on usage were obtained through interviews with key informants. The results based on *Alpinia* morphology, in all 32 samples, it was found that there are 2 species, namely Kha Luang (*Alpinia galanga* (L.) Willd.) and Kha Daeng (*Alpinia siamensis* K. Schum.). The species with the most widespread distribution in the area accounted for 84 percent is viz. *A. siamensis*, was found in all four districts and across 18 subdistricts. *A. galanga*, which was found in three districts and four subdistricts, accounted for 16 percent. In this study, a total of 3 *Alpinia* samples were collected from Bang Phiang Subdistrict, Bang Bo District. The examination results revealed that all samples were *A. siamensis*. *Alpinia* from Bang Phiang Subdistrict is quite renowned due to its large rhizomes that are white, beautiful, and delicious, attracting merchants to purchase from both within and outside the area. For the utilization, we found that two categories including food and medicinal plants. This knowledge has been transferred through their ancestors.

Keywords: *Alpinia* sp. diversity, morphology, utilization

บทนำ

ชา (Galanga) เป็นพืชที่มักเจริญเติบโตอยู่ในเขตร้อนชื้นจึงมีศูนย์กลางการกระจายพันธุ์อยู่ในเขตเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ สามารถพบชาได้ทั่วไปในไทย พม่า ลาว กัมพูชา เวียดนาม ฟิลิปปินส์ มาเลเซีย สิงคโปร์ และอินโดนีเซีย โดยประชาชนรู้จักใช้ประโยชน์และมีการนำมาปลูกเพื่อการบริโภคมาอย่างช้านาน เนื่องจากชาเป็นพืชที่ปลูกง่าย ทนทานต่อสภาพแวดล้อม มีขั้นตอนในการดูแลไม่ยุ่งยาก อายุยืนยาว สามารถขุดมากินหรือนำมาใช้ได้ตลอดทั้งปี [1] ชาเป็นพืชที่อยู่ในสกุล *Alpinia* Roxb. จัดอยู่ในวงศ์ขิง (Zingiberaceae) โดยลักษณะเด่นของพืชวงศ์นี้คือ การมีน้ำมันหอมระเหยอยู่ในทุกส่วนของพืช โดยเฉพาะส่วนของเหง้า ชาเป็นสกุลที่มีจำนวนชนิดมากที่สุดในวงศ์ขิง โดยทั่วโลกมีมากกว่า 250 ชนิด สำหรับประเทศไทยมีการศึกษาด้านอนุกรมวิธานของพืชสกุลชาในปี ค.ศ. 1996 โดย Larsen [2] ได้รวบรวมรายชื่อของพืชสกุลชาได้ทั้งหมด 13 ชนิด ต่อมาในปี ค.ศ. 2006 Saensouk [3] ได้ศึกษาเพิ่มเติมโดยจัดทำรูปวิธานระบุชนิด (key to species) ของพืชสกุลชา โดยพบพืชสกุลชาจำนวน 18 ชนิด

ชาเป็นพืชล้มลุก อายุหลายปี ลำต้นใต้ดินหรือเหง้าเจริญในแนวนานกับผิวดิน ก้านใบและใบอยู่เหนือดินโดยก้านใบแผ่ออกเป็นกาบซ้อนทับกันคล้ายเป็นส่วนของลำต้นที่โผล่พ้นดิน ใบเป็นใบเดี่ยวมีสีเขียวเข้ม รูปรี รูปขอบขนาน หรือรูปใบหอก ดอกออกเป็นช่อที่ปลายยอด ดอกย่อยมีขนาดเล็กสีชมพูหรือสีขาวอมม่วงแดง ผลรี เปลือกสีแดงอมส้ม เมื่อแก่เป็นสีดำมีเมล็ดอยู่ข้างใน ขามีชื่อเรียกแตกต่างกันไปตามแต่ละท้องถิ่น เช่น ภาคเหนือเรียกว่า ชาหยวก แม่ฮ่องสอน (กะเหรี่ยง) เรียกว่า สะเอเขยหรือสะเอเคย ภาคตะวันออกเฉียงเหนือและภาคเหนือบางแห่งเรียกว่า ชาหลวง [4-6]

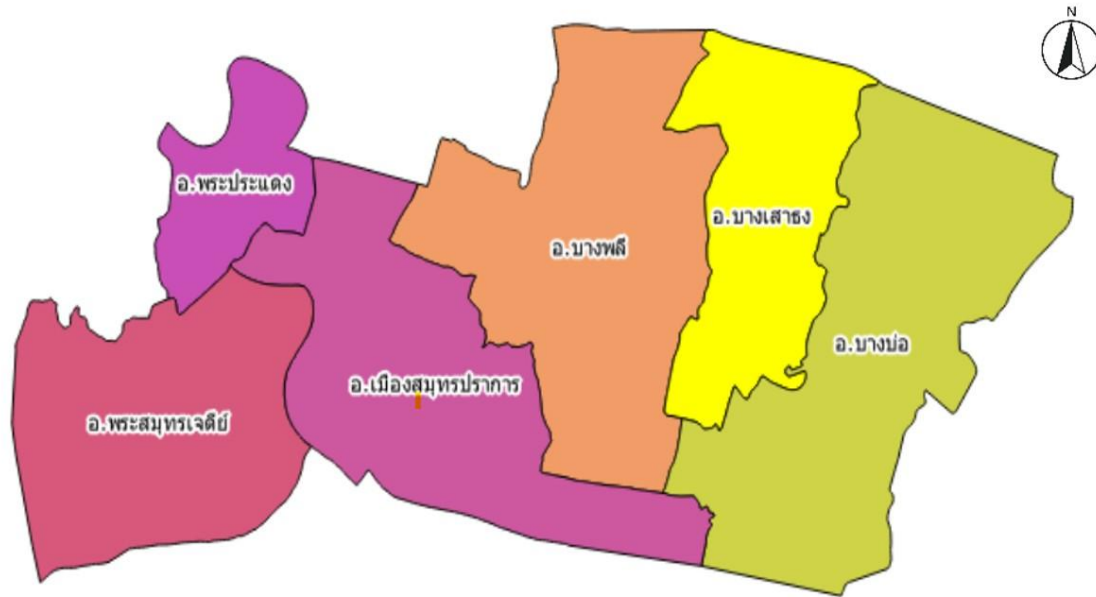
การใช้ประโยชน์จากชามีหลากหลายรูปแบบ ได้แก่

1. พืชอาหารและเครื่องเทศ มีการนำลำต้นใต้ดินหรือเหง้าที่สามารถขูดมาใช้ได้ตลอดปีมาเป็นองค์ประกอบของอาหารเพื่อดับกลิ่นคาวและแต่งกลิ่นรสของอาหารให้มีกลิ่นหอมชวนรับประทาน เช่น ชาหลวง (*Alpinia galanga* (L.) Willd.) ข่าแดง (*Alpinia siamensis* K. Schum.) หรือข่าลิง (*Alpinia conchigera* Griff.) โดยใช้เหง้าใส่ลงไปต้มยำ ต้มข่า ต้มแซบ ใส่ในหม้อก๋วยเตี๋ยว เครื่องแกง น้ำพริกต่าง ๆ นอกจากนี้ยังมีการนำหน่อข่า ดอกข่า มาลวกจิ้มน้ำพริก หรือนำมาเป็นผักแกล้มใส่ในข้าวยาของคนใต้ เป็นต้น [1, 7]

2. พืชสมุนไพร เนื่องจากชามีรสเผ็ดปร่า มีน้ำมันหอมระเหย มีกลิ่นหอมฉุนรุนแรง ดังนั้นจึงมีการใช้ชาเป็นยารักษาอาการเจ็บป่วยในระบบต่าง ๆ ของร่างกาย เช่น ระบบทางเดินอาหาร ช่วยย่อย ช่วยขับลม แก้จุกเสียด แน่นท้อง แก้อาการท้องอืด ขับน้ำดี แก้สะอึก เช่น ข่าเล็ก (*Alpinia officinarum* Hance) ข่าตาแดง (*Alpinia nigra* (Gaertn.) B.L. Burtt) ข่าคม (*Alpinia zerumbet* (Pers.) B.L. Burtt & R.M. Sm.) ระบบทางเดินหายใจ ช่วยแก้ไอ แก้หวัด แก้หอบหืด ลดน้ำมูก เนื่องจากมีรสร้อน จึงเหมาะที่จะรักษาหวัดได้ เช่น ชาหลวง (*A. galanga*) ข่าเล็ก (*A. officinarum*) ระบบผิวหนัง ข่าแก้ลมพิษ แก้ผดผื่นคัน แก้กลากเกลื้อน แผลงสัตรีกัดต่อย เช่น ชาหลวง (*A. galanga*) ข่าคม (*A. zerumbet*) ข่าตาแดง (*A. nigra*) [1, 7-9]

3. ด้านอื่น ๆ โดยในปัจจุบันมีการนำชามาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ มากมาย รวมทั้งนำมาใช้ในภาคอุตสาหกรรม เช่น เครื่องสำอาง สบู่ สารสกัดน้ำมันหอมระเหย ผลิตภัณฑ์สำหรับฆ่าแมลง [1, 7, 10]

จังหวัดสมุทรปราการ เป็นจังหวัดที่มีความสำคัญมาแต่โบราณเนื่องจากที่ตั้งเป็นเขตยุทธศาสตร์ทางน้ำ ตั้งอยู่ริมฝั่งแม่น้ำเจ้าพระยา โดยอยู่ตอนปลายสุดของแม่น้ำเจ้าพระยาและเหนืออ่าวไทย พื้นที่ส่วนใหญ่เป็นที่ราบลุ่มมีแม่น้ำเจ้าพระยาไหลผ่าน ไม่มีภูเขา มีลำคลองรวม 63 สาย โดยเป็นคลองชลประทาน 15 สาย คลองธรรมชาติ 48 สาย ใช้ประโยชน์ทางคมนาคม และการขนส่งทางน้ำรวมทั้งการประมงและเกษตรกรรม จังหวัดสมุทรปราการไม่มีพื้นที่ป่าไม้ (ป่าบก) มีแต่ป่าชายเลน สภาพภูมิอากาศเป็นแบบพื้นที่ชายทะเล ในฤดูร้อนมีความชื้นในอากาศสูง ฤดูฝนมีฝนตกมาก ฤดูหนาวก็ไม่หนาวจนเกินไป [11] เป็นจังหวัดปริมณฑลที่มีการผสมผสานระหว่างภาคการเกษตรและภาคอุตสาหกรรมที่สามารถนำผลผลิตจากการเกษตรมาพัฒนา รวมถึงแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่สร้างมูลค่าเพิ่มให้กับเกษตรกรได้ และจากข้อมูลของสำนักงานเกษตรจังหวัดสมุทรปราการ [12] เกษตรกรในจังหวัดสมุทรปราการ ให้ความสำคัญในการปลูกเป็นอันดับต้น ๆ โดยในปี พ.ศ. 2564 จำนวนเกษตรกรที่ปลูกมีทั้งสิ้น 620 ราย และมีพื้นที่ในการปลูกรวม 714 ไร่ โดยพบว่ามีการปลูกใน 4 อำเภอ จากทั้งหมด 6 อำเภอ ได้แก่ อำเภอเมืองสมุทรปราการ อำเภอบางบ่อ อำเภอบางพลี และอำเภอบางเสาธง (ภาพที่ 1) สำหรับอำเภอที่มีพื้นที่การปลูกชามากที่สุดได้แก่ อำเภอบางบ่อ โดยเฉพาะในตำบลบางเปรี้ยว ซึ่งการปลูกส่วนใหญ่ปลูกตามคันบ่อเลี้ยงปลา บ่อกุ้ง และบริเวณบ้านเพื่อใช้พื้นที่ดังกล่าวให้เกิดประโยชน์และสร้างรายได้เสริม ซึ่งชาของตำบลบางเปรี้ยวค่อนข้างมีชื่อเสียงเนื่องจากมีขนาดเหง้าใหญ่ ขาว สวย และอร่อย ทำให้มีพ่อค้ามารับซื้อทั้งจากในพื้นที่และนอกพื้นที่ ทั้งนี้ปัจจุบันยังไม่มีงานวิจัยที่ศึกษาความหลากหลายของชาหรือพืชวงศ์ชิง ในพื้นที่จังหวัดสมุทรปราการมีเพียงการศึกษาในพื้นที่อื่น ๆ เท่านั้น ดังนั้นหากมีการศึกษาความหลากหลาย ลักษณะทางอนุกรมวิธาน และการใช้ประโยชน์ของชาในจังหวัดสมุทรปราการ ก็จะทำให้ทราบถึงจำนวนชนิด สัณฐานวิทยา และข้อมูลการใช้ประโยชน์ของชาอันจะนำมาซึ่งข้อมูลพื้นฐานเพื่อใช้ในการพัฒนาและสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับเกษตรกร รวมทั้งยังสามารถนำข้อมูลไปประยุกต์ใช้ประโยชน์ในงานด้านอื่น ๆ ได้อีกด้วย



ภาพที่ 1 แสดงแผนที่จังหวัดสมุทรปราการ [11]

วิธีดำเนินการวิจัย

1. ศึกษาเอกสารด้านอนุกรมวิธาน สัตฐานวิทยา และตัวอย่างพรรณไม้ของพืชสกุลข้าว [13-15]

2. ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

มีการกำหนดพื้นที่เก็บตัวอย่าง โดยใช้วิธีการสำรวจแบบเฉพาะเจาะจง ด้วยการสัมภาษณ์เกษตรกรผู้ปลูกข้าวในพื้นที่อำเภอต่าง ๆ ของจังหวัดสมุทรปราการ จากนั้นผู้วิจัยลงพื้นที่สำรวจภาคสนามในแต่ละอำเภอที่มีรายงานการปลูกข้าวของจังหวัดสมุทรปราการทั้งหมดเพื่อเก็บรวบรวมตัวอย่าง (ภาพที่ 2) จากผลสำรวจพบว่าการปลูกข้าวส่วนใหญ่จะปลูกตามคันบ่อ เลี้ยงปลา บ่อเลี้ยงกุ้ง และบริเวณบ้าน โดยตัวอย่างข้าวที่เก็บประกอบไปด้วยส่วนที่เป็นลำต้นใต้ดิน ใบ และดอก เพื่อใช้ในการตรวจพิสูจน์หาชื่อชนิดของข้าว รวมถึงมีการเก็บข้อมูลการใช้ประโยชน์โดยมีการสัมภาษณ์ชาวบ้านที่อยู่รอบพื้นที่ศึกษา

3. เครื่องมือที่ใช้ในการทำวิจัย

3.1 อุปกรณ์ในการเก็บและอัดแห้ง

3.2 กล้องถ่ายรูป

3.3 อุปกรณ์ในการตรวจพิสูจน์ชนิดของข้าว

4. วิธีดำเนินการ

4.1 เก็บรวบรวมตัวอย่างพืชตามวิธีของก่องกานดา [16]

- ลำต้นใต้ดินและราก ต้องขุดอย่างระมัดระวังไม่ให้ลักษณะบางอย่างผิดไปจากเดิม และนำดินหรือกรวดทรายออกให้หมด อาจทำได้โดยการล้างหรือเคาะกับพื้นดินหรือก้อนหินเบา ๆ

- ใบ เลือกเก็บแต่ใบที่สมบูรณ์ไม่ถูกแมลงหรือสัตว์กัดทำลาย หรือใบเป็นโรคหงิกงอ

- ดอก เก็บเป็นช่อ ควรเก็บให้ได้ทั้งดอกตูมและดอกบานเต็มที่แล้ว แต่ไม่ใช่ดอกที่ร่วงหล่นจากต้น และเก็บช่อดอกที่ติดกับใบด้วย

- ตัวอย่างพืชแต่ละชนิดให้เก็บตัวอย่างประมาณ 3-5 ชิ้น แล้วแต่กรณี เก็บใส่ถุงพลาสติกเมื่อเวลาเดินสำรวจและนำออกมาอัดในแผงอัดพรรณไม้

4.2 ถ่ายรูปตัวอย่างพืชที่พบในจังหวัดสมุทรปราการโดยจะเน้นลักษณะวิสัย ที่อยู่อาศัย ตลอดจนรายละเอียดต่าง ๆ ของพืชแต่ละตัวอย่าง

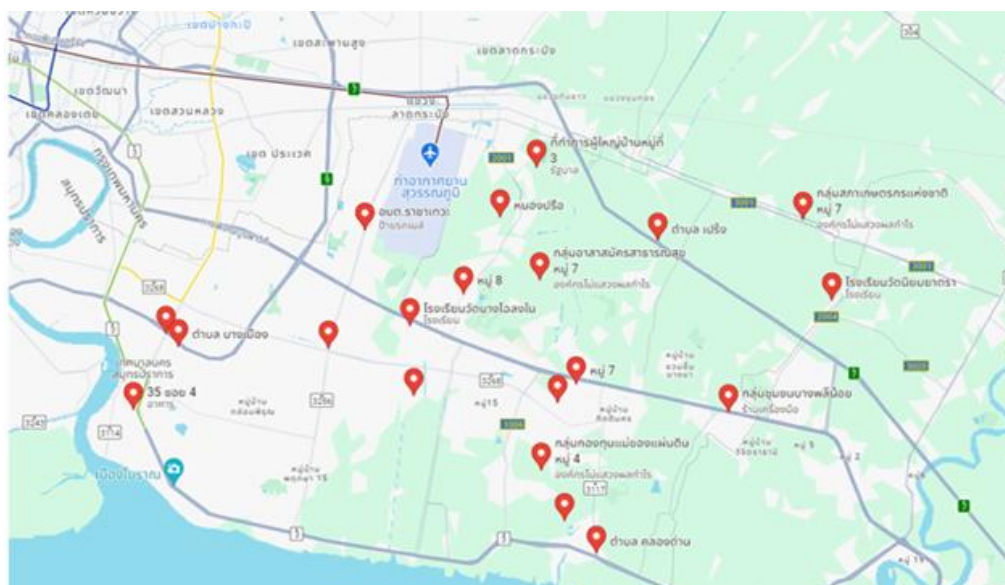
4.3 ตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาของตัวอย่างที่เก็บมาด้วยกล้องสเตอริโอ พร้อมบันทึกลักษณะต่าง ๆ ที่พบ

4.4 ตรวจสอบสีและบรรยายลักษณะชนิดของตัวอย่างชำทั้งหมดที่เก็บมาได้โดยใช้เอกสารทางวิชาการด้านพฤกษศาสตร์ [13-15] หรือนำไปตรวจสอบโดยเทียบจากตัวอย่างพรรณไม้แห้งในหอพรรณไม้ กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่า และพันธุ์พืช

4.5 นำข้อมูลที่ได้ทั้งหมดมาสร้างรูปฐานระบุชนิด เขียนบรรยายลักษณะพืช และสรุปผล

4.6 เก็บตัวอย่างพรรณไม้รักษาสภาพ (Herbarium Specimens) ในรูปแบบตัวอย่างพรรณไม้แห้งและตัวอย่างดอง โดยนำส่วนของลำต้นใต้ดิน ดอกและช่อดอก มาดองด้วยแอลกอฮอล์ 70% จากนั้นเก็บรวบรวมไว้ที่สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ

4.7 ดำเนินการใช้ประโยชน์จากชำโดยใช้แบบสอบถามข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ผ่านการพิจารณาเห็นชอบจากคณะกรรมการจริยธรรมการวิจัย (เลขที่รับรอง HCU-EC1373/2566 ลว.11 สิงหาคม 2566) กับตัวแทนชาวบ้านจำนวน 28 ราย ในเขตพื้นที่ศึกษา



ภาพที่ 2 แผนที่แสดงตำแหน่งในการรวบรวมตัวอย่างชำจากอำเภอบางบ่อ อำเภอบางพลี อำเภอบางเสาธง และอำเภอเมืองสมุทรปราการ จังหวัดสมุทรปราการ

ผลการวิจัย

การศึกษาความหลากหลายของชำที่ปลูกในจังหวัดสมุทรปราการ โดยผู้วิจัยได้เก็บตัวอย่างภาคสนามของพืชสกุลชำ (*Alpinia* Roxb.) ในพื้นที่ปลูกของจังหวัดสมุทรปราการ จำนวน 4 อำเภอ 18 ตำบล ได้แก่ อำเภอเมืองสมุทรปราการ (3 ตำบล) อำเภอบางเสาธง (3 ตำบล) อำเภอบางพลี (5 ตำบล) และอำเภอบางบ่อ (7 ตำบล) ตั้งแต่เดือนมิถุนายน – สิงหาคม พ.ศ. 2566 พบว่าพืชสกุลชำที่ปลูกในแต่ละพื้นที่มีชื่อเรียกพื้นเมืองทั่วไปแตกต่างกันออกไปในแต่ละท้องถิ่น แต่เมื่อศึกษา ลักษณะทางสัณฐานวิทยาอย่างละเอียดแล้วพบว่า พืชสกุลชำที่ปลูกในจังหวัดสมุทรปราการ มีทั้งหมด 2 ชนิด ได้แก่ *A. galanga* และ *A. siamensis* (ตารางที่ 1) โดยพบว่า *A. siamensis* เป็นชนิดที่มีการปลูกในพื้นที่จำนวนมากที่สุด ชำชนิดนี้พบในพื้นที่ปลูกทั้ง 4 อำเภอ 18 ตำบล ได้แก่ อำเภอเมืองสมุทรปราการ (3 ตำบล) อำเภอบางเสาธง (3 ตำบล) อำเภอบางพลี (5 ตำบล) และอำเภอบางบ่อ (7 ตำบล) และมีชื่อเรียกพื้นเมืองทั่วไปแตกต่างกันอย่างหลากหลายได้แก่ ชำแดง ชำลิง ชำเกสร ชำหยวก ชำเกสร ชำพื้นบ้าน ชำใหญ่ ชำเล็ก ชำหัวเล็ก ส่วน *A. galanga* พบในพื้นที่ปลูก 3 อำเภอ 4 ตำบล ได้แก่ อำเภอเมืองสมุทรปราการ (1 ตำบล) อำเภอบางเสาธง (2 ตำบล) และอำเภอบางบ่อ (1 ตำบล) มีชื่อเรียกพื้นเมืองทั่วไป ได้แก่ ชำหลวง ชำเหลือง และชำใหญ่



ตารางที่ 1 ชนิดของข่าในอำเภอบางบ่อ อำเภอบางพลี อำเภอบางเสาธง และอำเภอเมืองสมุทรปราการ จังหวัดสมุทรปราการ ที่สำรวจระหว่างเดือนมิถุนายน – สิงหาคม พ.ศ. 2566

หมายเลข ตัวอย่างข่า	สถานที่เก็บตัวอย่างในจังหวัดสมุทรปราการ	วัน เดือน ปี ที่เก็บ	ชื่อวิทยาศาสตร์	ชื่อพื้นเมือง
1	หมู่ 3 ต.ศิริษะจรเข้ น้อย อ.บางเสาธง	26 มิ.ย. 66	<i>A. siamensis</i>	ข่าแดง, ข่าลิง
2	หมู่ 3 ต.ศิริษะจรเข้ น้อย อ.บางเสาธง	26 มิ.ย. 66	<i>A. galanga*</i>	ข่าเหลือง
3	หมู่ 3 ต.ศิริษะจรเข้ น้อย อ.บางเสาธง	26 มิ.ย. 66	<i>A. galanga</i>	ข่าหลวง
4	หมู่ 7 ต.ศิริษะจรเข้ใหญ่ อ.บางเสาธง	26 มิ.ย. 66	<i>A. siamensis</i>	ข่าแดง, ข่าลิง
5	หมู่ 13 ต.บางปลา อ.บางพลี	27 มิ.ย. 66	<i>A. siamensis</i>	ข่า
6	หมู่ 2 ต.บางโฉลง อ.บางพลี	27 มิ.ย. 66	<i>A. siamensis</i>	ข่า
7	หมู่ 1 ต.หนองปรือ อ.บางพลี	27 มิ.ย. 66	<i>A. siamensis*</i>	ข่า
8	หมู่ 7 ต.บางเสาธง อ.บางเสาธง	28 มิ.ย. 66	<i>A. siamensis</i>	ข่าลิง
9	หมู่ 7 ต.บางเสาธง อ.บางเสาธง	28 มิ.ย. 66	<i>A. galanga*</i>	ข่าเหลือง
10	หมู่ 7 ต.บางเสาธง อ.บางเสาธง	28 มิ.ย. 66	<i>A. siamensis*</i>	ข่าหยวก
11	หมู่ 2 ต.บางเสาธง อ.บางเสาธง	5 ก.ค. 66	<i>A. siamensis*</i>	ข่า
12	หมู่ 3 ต.เปร็ง อ.บางบ่อ	29 มิ.ย. 66	<i>A. siamensis</i>	ข่าแดง
13	หมู่ 3 ต.เปร็ง อ.บางบ่อ	29 มิ.ย. 66	<i>A. galanga*</i>	ข่าเหลือง
14	หมู่ 3 ต.คลองนียมยาดรา อ.บางบ่อ	29 มิ.ย. 66	<i>A. siamensis*</i>	ข่า
15	หมู่ 3 ต.คลองนียมยาดรา อ.บางบ่อ	29 มิ.ย. 66	<i>A. siamensis</i>	ข่า
16	หมู่ 1 ต.ราชาเทวะ อ.บางพลี	29 มิ.ย. 66	<i>A. siamensis</i>	ข่า
17	หมู่ 4 ต.บางบ่อ อ.บางบ่อ	30 มิ.ย. 66	<i>A. siamensis</i>	ข่าแดง
18	หมู่ 4 ต.บางบ่อ อ.บางบ่อ	30 มิ.ย. 66	<i>A. siamensis</i>	ข่าแดง, ข่าลิง
19	หมู่ 4 ต.บางบ่อ อ.บางบ่อ	30 มิ.ย. 66	<i>A. siamensis</i>	ข่า
20	หมู่ 4 ต.คลองด่าน อ.บางบ่อ	3 ก.ค. 66	<i>A. siamensis*</i>	ข่าเกษตร
21	หมู่ 4 ต.บางเพรียง อ.บางบ่อ	3 ก.ค. 66	<i>A. siamensis</i>	ข่าพื้นบ้าน
22	หมู่ 4 ต.บางเพรียง อ.บางบ่อ	3 ก.ค. 66	<i>A. siamensis</i>	ข่าใหญ่
23	หมู่ 4 ต.บางเพรียง อ.บางบ่อ	3 ก.ค. 66	<i>A. siamensis</i>	ข่าเล็ก, ข่าหัวเล็ก
24	หมู่ 7 ต.คลองสวน อ.บางบ่อ	5 ก.ค. 66	<i>A. siamensis*</i>	ข่า
25	หมู่ 7 ต.คลองสวน อ.บางบ่อ	5 ก.ค. 66	<i>A. siamensis</i>	ข่า
26	หมู่ 11 ต.บางพลีน้อย อ.บางบ่อ	5 ก.ค. 66	<i>A. siamensis*</i>	ข่า
27	หมู่ 5 ต.บางด้วน อ.เมืองสมุทรปราการ	6 ก.ค. 66	<i>A. siamensis</i>	ข่า
28	หมู่ 10 ต.บางเมือง อ.เมืองสมุทรปราการ	6 ก.ค. 66	<i>A. siamensis</i>	ข่า
29	หมู่ 10 ต.บางเมือง อ.เมืองสมุทรปราการ	6 ก.ค. 66	<i>A. galanga*</i>	ข่าใหญ่
30	หมู่ 10 ต.บางพลีใหญ่ อ.บางพลี	7 ส.ค. 66	<i>A. siamensis</i>	ข่า
31	35 ซอย 4 (โบราณ) ต.ปากน้ำ อ.เมืองสมุทรปราการ	7 ส.ค. 66	<i>A. siamensis</i>	ข่า
32	หมู่ 8 ต.บางโฉลง อ.บางพลี	20 ส.ค. 66	<i>A. siamensis</i>	ข่า

หมายเหตุ: * หมายถึง ตัวอย่างที่ระบุชนิดจากส่วนของลำต้นใต้ดินและใบ ไม่มีตัวอย่างดอก



เมื่อพิจารณาจำนวนตัวอย่างที่เก็บเทียบกับตัวอย่างทั้งหมด พบว่าชนิด *A. siamensis* มากที่สุด ซึ่งพบในพื้นที่ปลูกทั้ง 4 อำเภอ ได้แก่ อำเภอบางบ่อ อำเภอบางพลี อำเภอบางเสาธง และอำเภอเมืองสมุทรปราการ โดยมีจำนวนตัวอย่าง 27 ตัวอย่าง จากทั้งหมด 32 ตัวอย่าง คิดเป็น 84 เปอร์เซ็นต์ ส่วนอีก 5 ตัวอย่าง เป็นชนิด *A. galanga* พบในพื้นที่ปลูก 3 อำเภอ ได้แก่ อำเภอบางบ่อ อำเภอบางเสาธง และอำเภอเมืองสมุทรปราการ คิดเป็น 16 เปอร์เซ็นต์ ของตัวอย่างที่เก็บทั้งหมด (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 2 ชนิดของชำและจำนวนตัวอย่างที่เก็บในพื้นที่ศึกษา

ชนิดของชำ	ชื่อพื้นเมือง	พื้นที่เก็บตัวอย่าง ในจังหวัดสมุทรปราการ	จำนวนตัวอย่างที่เก็บ (คิดเป็นเปอร์เซ็นต์)
<i>A. siamensis</i>	ชำแดง ชำลิง ชำหยวก ชำเกษตร	อำเภอบางบ่อ	27
	ชำพื้นบ้าน ชำเล็ก ชำหัวเล็ก	อำเภอบางพลี	(84 เปอร์เซ็นต์)
	ชำใหญ่	อำเภอบางเสาธง	
		อำเภอเมืองสมุทรปราการ	
<i>A. galanga</i>	ชำหลวง ชำเหลือง ชำใหญ่	อำเภอบางบ่อ	5
		อำเภอบางเสาธง	(16 เปอร์เซ็นต์)
		อำเภอเมืองสมุทรปราการ	

การศึกษานุกรมวิธานและลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของพืชสกุลชำ (*Alpinia* Roxb.) ในจังหวัดสมุทรปราการ

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของพืชสกุลชำ (*Alpinia* Roxb.) ในจังหวัดสมุทรปราการ

ต้น: ไม้ล้มลุกหลายปี ลำต้นใต้ดินเป็นเหง้า เหง้าทอดนอน กาบใบเรียงซ้อนกันเป็นลำต้นเทียม ตั้งตรง

ใบ: ใบเดี่ยว เรียงสลับระนาบเดียว ประกอบด้วยกาบใบ ลิ้นใบ (ligule) และแผ่นใบ

ช่อดอก: ช่อดอกแบบช่อแยกแขนง ออกที่ยอด มีใบประดับ (bract) และใบประดับย่อย (bracteole)

ดอก: ดอกสมบูรณ์เพศ สมมาตรตามแนวระนาบ กลีบเลี้ยงโคนเชื่อมติดกันเป็นหลอด ปลายแยกเป็นแฉกสั้น กลีบดอกหลอดกลีบดอกรูปทรงกระบอก ปลายแยกเป็น 3 แฉก แฉกบน (dorsal corolla lobe) 1 แฉก แฉกข้าง (lateral corolla lobes) 2 แฉก มักมีขนาดเล็กกว่าแฉกบน เกสรเพศผู้เป็นหมันคู่ข้าง (lateral staminodes) มีขนาดเล็ก เกสรเพศผู้เป็นหมันเปลี่ยนแปลงเป็นกลีบปาก (labellum) คล้ายกลีบดอก มักมีขนาดใหญ่กว่ากลีบดอก มีหลายสี มีเส้น หรือลวดลาย ขอบหยัก เกสรเพศผู้ที่สมบูรณ์มีก้านชูอับเรณูเจริญพัฒนาติ ฝังไข้อยู่ใต้วงกลีบ ก้านเกสรเพศเมียเรียว อยู่ในหลอดกลีบดอก

รูปรวิธานระบุชนิด (Key to the species) ของพืชสกุลชำ ในจังหวัดสมุทรปราการ

1. ลำต้นใต้ดินเป็นเหง้าขนาดใหญ่ สีขาวนวลหรือสีเหลืองอ่อน เส้นผ่านศูนย์กลาง 3-4 ซม. แกนกลางช่อดอกยาว 20-22 ซม. กลีบปากมีเส้นสีชมพู 2 ข้างของเส้นกลางกลีบ ยาว 2-2.4 ซม. ปลายแยกเป็น 2 แฉก..... 1. *A. galanga*

1. ลำต้นใต้ดินเป็นเหง้า สีขาวนวลหรือสีขาวอมชมพู เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.8-2.5 ซม. แกนกลางช่อดอกยาว 12-15 ซม. กลีบปากมีเส้นสีแดง 2 ข้างของเส้นกลางกลีบ ยาว 0.8-1 ซม. ปลายแยกเป็น 3 แฉก..... 2. *A. siamensis*

1. *Alpinia galanga* (L.) Willd.

ชื่อพ้อง : *Alpinia alba* (Retz.) Roscoe; *A. galanga* var. *pyramidata* (Blume) K. Schum.; *A. galanga* var. *zingiberina* (Hook. f.) Baker; *A. pyramidata* Blume; *A. Zingiberina* Hook. f.; *Amomum galanga* (L.) Lour.; *Heritiera alba* Retz.; *Languas pyramidata* (Blume) Merr.; *Maranta galanga* L.

ชื่อพื้นเมือง : ในพื้นที่ปลูกจังหวัดสมุทรปราการมีชื่อเรียก ชำหลวง ชำเหลือง ชำใหญ่ และมีชื่อพื้นเมืองอื่นดังนี้ กุฎกโรหิณี, ชำ (ทั่วไป); ชำใหญ่, ชำหยวก, ชำหลวง (ภาคเหนือ); สะเออเคย, สะเออเขย (กะเหรี่ยง-แม่ฮ่องสอน)



ชื่อสามัญ : Galangal, Greater galangal

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

ต้น: ไม้ล้มลุกหลายปี ลำต้นใต้ดินเป็นเหง้าขนาดใหญ่ สีขาวนวลหรือสีเหลืองอ่อน เส้นผ่านศูนย์กลาง 3-4 ซม. กาบใบเรียงซ้อนกันแน่นเป็นลำต้นเทียม ตั้งตรงเหนือดิน สูง 1.5-3 ม. (ภาพที่ 3 ก-ข)

ใบ: ใบเดี่ยว เรียงสลับระนาบเดียว รูปขอบขนานแกมรูปใบหอก กว้าง 5-10 ซม. ยาว 20-55 ซม. ปลายแหลมหรือเรียวแหลม โคนรูปลิ้น ขอบเรียบ แผ่นใบเกลี้ยง บริเวณโคนก้านใบและขอบมีขนสั้นนุ่ม เส้นใบรูปคล้ายสามเหลี่ยม กว้าง 4-5 มม. ยาว 5-7 มม. มีขนสั้นนุ่มเล็กน้อย ก้านใบยาว 5-6.5 มม. (ภาพที่ 3 ค)

ช่อดอก: ช่อดอกแบบช่อแยกแขนง ออกที่ยอด ก้านช่อดอกยาว 7-9 ซม. ค่อนข้างเกลี้ยงหรือมีขนสั้นประปราย แกนกลางช่อดอก 20-22 ซม. ค่อนข้างเกลี้ยงหรือมีขนสั้นประปราย ช่อวงสลับข้าง (incinnus) (ภาพที่ 3 ง)

ดอก: มี 3-5 ดอก ใบประดับย่อย กว้าง 1-1.5 มม. ยาว 6-7 มม. ปลายแหลม ค่อนข้างเกลี้ยง ก้านดอกยาว 5-6 มม. ค่อนข้างเกลี้ยงหรือมีขนสั้นประปราย ดอกสีขาว มีกลิ่นหอมอ่อน กลีบเลี้ยงสีขาวหรือสีขาวอมเขียว โคนเชื่อมติดกันเป็นหลอด กว้าง 3-4 มม. ยาวประมาณ 1 ซม. ปลายแยกเป็น 3 แฉก รูปคล้ายสามเหลี่ยม แฉกบน 2 แฉก ยาวประมาณ 3 มม. แฉกล่าง 1 แฉก ยาว 0.5-1 มม. เกือบหรือค่อนข้างเกลี้ยง กลีบดอกสีขาวหรือสีขาวอมเขียว โคนเชื่อมติดกันเป็นหลอด ยาวประมาณ 1 ซม. กว้าง 4-5 มม. ปลายแยกเป็น 3 แฉก แฉกบน 1 แฉก รูปขอบขนาน กว้าง 6-7 มม. ยาว 1.8-2 ซม. ปลายคู่ แฉกล่าง 2 แฉก รูปขอบขนาน กว้างประมาณ 5 มม. ยาวประมาณ 1.5 ซม. ปลายคู่ เกสรเพศผู้เป็นหมันคู่ข้างสีแดงหรือสีม่วงอมแดง รูปลิ้นแคบขนาดเล็ก เกสรเพศผู้เป็นหมันเปลี่ยนแปลงเป็นกลีบปากสีขาว มีเส้นสีชมพู 2 ข้างของเส้นกลางกลีบ กลีบปากรูปคล้ายช้อน กว้าง 6-8 มม. ยาว 2-2.4 ซม. ปลายแยกเป็น 2 แฉก ขอบหยัก มีปุ่มเล็ก ๆ หนาแน่นที่โคน เกสรเพศผู้ที่สมบูรณ์ มี 1 อัน ก้านชูอับเรณูยาว 1-1.5 ซม. อับเรณูสีเหลือง กว้าง 3-4 มม. ยาว 7-8 มม. ฝังอยู่ในตัวกลีบ ทรงรูปไข่ ยาวประมาณ 5 มม. มีขนสั้น ก้านเกสรเพศเมียเรียว ยอดเกสรเพศเมียมีขนสั้นประปราย (ภาพที่ 3 จ-ฎ)

การกระจายพันธุ์และนิเวศวิทยา

ในประเทศไทยมีการกระจายพันธุ์ทั่วทุกภาค พบในพื้นที่เปิดโล่ง ในป่าดิบแล้งและป่าเบญจพรรณที่ความสูงตั้งแต่ระดับน้ำทะเลจนถึงประมาณ 1,300 ม. นิยมปลูกทั่วทุกภาคของประเทศไทยเพื่อใช้ประโยชน์เป็นพืชอาหารและพืชสมุนไพร ในประเทศไทยออกดอกช่วงเดือนเมษายน-กันยายน ติดผลช่วงเดือนกรกฎาคม-ตุลาคม [13-15] ในจังหวัดสมุทรปราการ มีการเก็บตัวอย่างภาคสนามในช่วงเดือนมิถุนายน-กรกฎาคม พบว่ามีกรออกดอกในเดือนมิถุนายน ไม่พบการติดผลในทั้งสองเดือน (ภาพที่ 3 ฏ) สำหรับต่างประเทศพบกระจายพันธุ์ในประเทศอินเดีย บังคลาเทศ เมียนมาร์ จีน กัมพูชา ลาว มาเลเซีย อินโดนีเซีย เวียดนาม สิงคโปร์ และฟิลิปปินส์ [13-15]

แหล่งปลูกในจังหวัดสมุทรปราการ

A. galanga ที่พบในจังหวัดสมุทรปราการ เป็นพืชปลูกในแหล่งปลูกทั้งหมด ไม่มีการกระจายพันธุ์ในธรรมชาติ โดยพบการปลูก *A. galanga* ในพื้นที่อำเภอบางเสาธง (ตำบลศีรษะจรเข้น้อย ตำบลบางเสาธง) อำเภอบางบ่อ (ตำบลเปรี้ง) และอำเภอมะขาม (ตำบลบางเมือง) จากการเก็บตัวอย่างภาคสนามในช่วงเดือนมิถุนายน-สิงหาคม พบพืชชนิดนี้ออกดอกในเดือนมิถุนายน พบใน 1 แหล่งปลูก คือ ตำบลศีรษะจรเข้น้อย อำเภอบางเสาธง ส่วนในพื้นที่ปลูกอื่นไม่พบการออกดอกหรือติดผล



ภาพที่ 3 แสดงลักษณะของ *A. galanga*: ก. ลำต้นใต้ดิน (เหง้า); ข. ลำต้นเทียม; ค. ใบ; ง. ช่อดอก; จ. ดอก; ฉ. วงกลีบเลี้ยง (Calyx); ช. วงกลีบดอก (Corolla); ช. เกสรเพศผู้เป็นหมันเปลี่ยนแปลงเป็นกลีบปาก (labellum) คล้ายกลีบดอก และเกสรเพศผู้เป็นหมันคู่ข้าง (lateral staminodes) มีขนาดเล็ก; ฌ. เกสรเพศผู้ที่สมบูรณ์; ญ. เกสรเพศเมีย; ฎ. ตัวอย่างพรรณไม้แห้ง (Herbarium specimen); ฏ. ลักษณะวิสัย



2. *Alpinia siamensis* K. Schum.

ชื่อพ้อง : -

ชื่อพื้นเมือง : ในพื้นที่ปลูกจังหวัดสมุทรปราการมีชื่อเรียก ข้าแดง ข้าลิง ข้าหยวก ข้าเกษตร ข้าพื้นบ้าน ข้าใหญ่ ข้าเล็ก และข้าหัวเล็ก มีชื่อพื้นเมืองอื่นดังนี้ กฎกโรหิณี, ข้า, ข้าบ้าน (ภาคกลาง); ข้าหลวง, ข้าใหญ่ (ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ)

ชื่อสามัญ : -

ลักษณะทางพฤกษศาสตร์

ต้น: ไม้ล้มลุกหลายปี ลำต้นใต้ดินเป็นเหง้า สีขาวนวลหรือสีขาวอมชมพู ส่วนที่ติดกับลำต้นเทียมมักมีสีชมพูหรือสีชมพูอมแดง เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.8-2.5 ซม. กาบใบเรียงซ้อนกันแน่นเป็นลำต้นเทียม ตั้งตรงเหนือดิน สูง 1.5-2 ม. ส่วนที่ติดกับลำต้นใต้ดินมักมีสีชมพูหรือสีชมพูอมแดง (ภาพที่ 4 ก-ข)

ใบ: ใบเดี่ยว เรียงสลับระนาบเดียว รูปรี รูปรีแกมรูปขอบขนาน รูปใบหอกแกมรูปขอบขนาน หรือรูปใบหอกกลับแกมรูปขอบขนาน กว้าง 4-8 ซม. ยาว 18-35 ซม. ปลายเรียวแหลม โคนรูปสามเหลี่ยม ขอบเรียบ แผ่นใบเกลี้ยง บริเวณเส้นกลางใบและขอบมีขนสั้นประปราย เส้นใบรูปไข่ กว้างประมาณ 3 มม. ยาวประมาณ 5 มม. ก้านใบยาว 5-8 มม. (ภาพที่ 4 ค)

ช่อดอก: ช่อดอกแบบช่อแยกแขนง ออกที่ยอด ก้านช่อดอกยาว 3-4 ซม. ค่อนข้างเกลี้ยงหรือมีขนสั้นประปราย แกนกลางช่อดอกยาว 12-15 ซม. ค่อนข้างเกลี้ยงหรือมีขนสั้นประปราย ช่อวงสลับข้าง (ภาพที่ 4 ง)

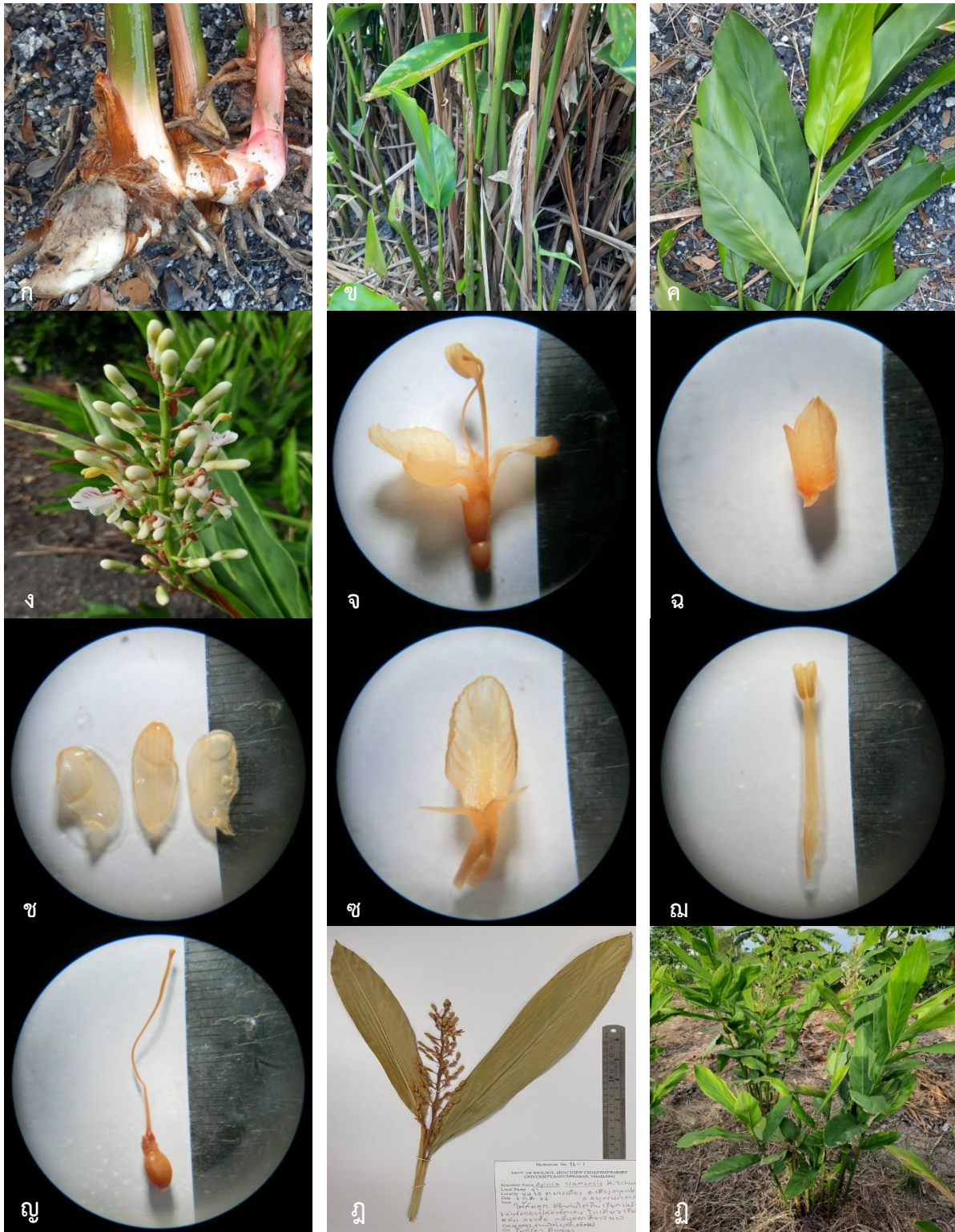
ดอก: มี 3 ดอก ใบประดับย่อย กว้างประมาณ 5 มม. ยาว 7-9 มม. ปลายตัดเฉียง ก้านดอกยาว 0.7-1 ซม. มีขนสั้นหนาแน่น ดอกสีขาวนวล มีกลิ่นหอมอ่อน กลีบเลี้ยงสีขาว โคนเชื่อมติดกันเป็นหลอด กว้างประมาณ 4 มม. ยาวประมาณ 5 มม. ปลายแยกเป็น 3 แฉก รูปคล้ายสามเหลี่ยม แฉกบน 2 แฉก ยาวประมาณ 3 มม. แฉกล่าง 1 แฉก ยาว 3-4 มม. ค่อนข้างเกลี้ยงหรือมีขนสั้นประปราย กลีบดอกสีขาวนวล โคนเชื่อมติดกันเป็นหลอด ยาว 5-7 มม. กว้างประมาณ 3 มม. ปลายแยกเป็น 3 แฉก แฉกบน 1 แฉก รูปขอบขนาน กว้างประมาณ 4 มม. ยาว 0.9-1 ซม. ปลายคู่ แฉกล่าง 2 แฉก รูปขอบขนาน กว้างประมาณ 4 มม. ยาว 7-8 มม. ปลายคู่ เกสรเพศผู้เป็นหมันคู่ข้างสีแดงหรือสีม่วงอมแดง รูปคล้ายแคบขนาดเล็ กว้างประมาณ 1 มม. ยาวประมาณ 3 มม. ปลายแหลม เกสรเพศผู้เป็นหมันเปลี่ยนแปลงเป็นกลีบปากสีขาว มีเส้นสีแดง 2 ข้างของเส้นกลางกลีบ กลางกลีบสีเหลือง กลีบปากรูปไข่กลับกว้าง กว้าง 6-7 มม. ยาว 0.8-1 ซม. ปลายแยกเป็น 3 แฉก ขอบหยัก เกสรเพศผู้ที่สมบูรณ์ มี 1 อัน ก้านชูอับเรณูสีเหลืองอมเขียว ยาว 7-8 มม. อับเรณูสีเหลือง รูปคล้ายสี่เหลี่ยม กว้าง 2.5-3 มม. ยาว 4-4.5 มม. รังไข่อยู่ใต้กลีบ ทรงรูปไข่ ยาว 3-4 มม. มีขนสั้น ก้านเกสรเพศเมียเรียวยาว สีเขียวอ่อน ยอดเกสรเพศเมียสีเขียวอ่อน (ภาพที่ 4 จ-ฎ)

การกระจายพันธุ์และนิเวศวิทยา

ในประเทศไทยมีการกระจายพันธุ์เกือบทุกภาค และปลูกโดยทั่วไปเพื่อใช้ประโยชน์เป็นพืชอาหารและพืชสมุนไพร พืชชนิดนี้ในประเทศไทยออกดอกช่วงเดือนเมษายน-สิงหาคม ติดผลช่วงเดือนกรกฎาคม-ตุลาคม [13-15] ในจังหวัดสมุทรปราการ มีการเก็บตัวอย่างภาคสนามในช่วงเดือนมิถุนายน-สิงหาคม พบว่ามีการออกดอกในเดือนมิถุนายน-สิงหาคม แต่ไม่พบการติดผล (ภาพที่ 4 ฏ) ต่างประเทศพบกระจายพันธุ์ในประเทศลาวและเวียดนาม [13-15]

แหล่งปลูกในจังหวัดสมุทรปราการ

A. siamensis ที่พบในจังหวัดสมุทรปราการ เป็นพืชปลูกในแหล่งปลูกทั้งหมด ไม่มีการกระจายพันธุ์ในธรรมชาติ โดยพบการปลูก *A. siamensis* ในพื้นที่อำเภอบางเสาธง (ตำบลศรีระจรเข้ชั้นน้อย ตำบลศรีระจรเข้ใหญ่ ตำบลบางเสาธง) อำเภอบางพลี (ตำบลบางปลา ตำบลบางโฉลง ตำบลหนองปรือ ตำบลราชาเทวะ ตำบลบางพลีใหญ่) อำเภอบางบ่อ (ตำบลเป็ริง ตำบลคลองนิมิตยาตรา ตำบลบางบ่อ ตำบลคลองด่าน ตำบลบางเปรี้ยว ตำบลคลองสวน) และอำเภอเมืองสมุทรปราการ (ตำบลบางด้วน ตำบลบางเมือง ตำบลปากน้ำ) จากการเก็บตัวอย่างภาคสนามในช่วงเดือนมิถุนายน-สิงหาคม พบพืชชนิดนี้ออกดอกในแหล่งปลูกทุกอำเภอ แต่ไม่พบการติดผล



ภาพที่ 4 แสดงลักษณะของ *A. siamensis*: ก. ลำต้นใต้ดิน (เหง้า); ข. ลำต้นเทียม; ค. ใบ; ง. ช่อดอก; จ. ดอก; ฉ. วงกลีบเลี้ยง (Calyx); ช. วงกลีบดอก (Corolla); ช. เกสรเพศผู้เป็นหมันเปลี่ยนแปลงเป็นกลีบปาก (labellum) คล้ายกลีบดอก และเกสรเพศผู้เป็นหมันคู่ข้าง (lateral staminodes) มีขนาดเล็ก; ฉ. เกสรเพศผู้ที่สมบูรณ์; ญ. เกสรเพศเมีย; ฎ. ตัวอย่างพรรณไม้แห้ง (Herbarium specimen); ฎ. ลักษณะวิสัย



การศึกษาข้อมูลการใช้ประโยชน์จากข่า

จากการสัมภาษณ์ชาวบ้านบริเวณพื้นที่อำเภอบางบ่อ อำเภอบางพลี อำเภอบางเสาธง และอำเภอเมืองสมุทรปราการ จังหวัดสมุทรปราการ พบว่ามีการนำข่ามาใช้ประโยชน์โดยนำมาทำเป็นอาหารมากที่สุด รองลงมาได้แก่ นำมาเป็นพืชสมุนไพรเพื่อรักษาอาการเจ็บป่วย ซึ่งความรู้ต่าง ๆ เหล่านี้ได้รับการถ่ายทอดจากบรรพบุรุษสืบต่อกันมา รายละเอียดดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 การใช้ประโยชน์จากข่า

ชื่อวิทยาศาสตร์	ชื่อพื้นเมือง	การใช้ประโยชน์	
		อาหาร	พืชสมุนไพร
1. <i>A. galanga</i>	ข่าหลวง ข่าเหลียง ข่าใหญ่	1. นำเหง้ามาประกอบอาหารเมนูต้มข่าไก่	1. ใช้เหง้าโขลกกับน้ำเล็กน้อย รักษาโรคที่เกิดจากเชื้อรา เช่น โรคกลากและเกลื้อน
		2. นำเหง้ามาประกอบอาหารเมนูต้มยำ	2. ใช้เหง้าต้มดื่มเพื่อขับลม แก้ท้องอืด จุกเสียดแน่นท้อง
2. <i>A. siamensis</i>	ข่าแดง ข่าลิง ข่าหยวก ข่าเกษตร ข่าพื้นบ้าน ข่าเล็ก ข่าหัวเล็ก ข่าใหญ่	3. นำเหง้ามาเป็นส่วนประกอบของน้ำพริก	3. ใช้เหง้าต้มดื่มเพื่อบรรเทาอาการไอ
		4. นำเหง้ามาเป็นส่วนประกอบของเครื่องพริกแกง	4. ใช้เหง้าต้มดื่มเพื่อช่วยย่อยอาหาร
		5. นำเหง้ามาประกอบอาหารโดยใส่ในข้าวต้มปลาเพื่อดับกลิ่นคาว	5. ใช้เหง้าสดตำให้ละเอียดรักษาอาการข้ออักเสบ
		6. นำเหง้ามาทำเครื่องต้มสมุนไพร	6. ใช้เหง้าเป็นส่วนประกอบทำลูกประคบสมุนไพรช่วยบรรเทาอาการปวดเมื่อยและเพิ่มการไหลเวียนของโลหิต
		7. นำช่อดอกมาลวกหรือกินสดจิ้มน้ำพริก	7. ใช้เหง้าเป็นส่วนประกอบในตำรับยา “พิภักตริกาพิช” มีสรรพคุณ บำรุงธาตุ บำรุงกำหนด ขับลม แก้ไข้สันนิบาต แก้เลือดเสีย
		8. นำเหง้าอ่อนมาต้มจิ้ม น้ำพริกหรือใส่ในอาหารประเภทยำ	8. ใช้เหง้าเป็นส่วนประกอบในตำรับยา “ประสะเจตพังคี” มีสรรพคุณ แก้อาการกรดไหลย้อน จุกเสียดเรื้อรัง มีลมเป็นก้อนบริเวณยอดอก ล้นปี ทำให้เจ็บระบมในช่องท้อง ช่วยย่อยอาหาร
		9. นำเหง้าอ่อนมาดองเพื่อกินแก้ลมกับเมนูอื่น	9. ใช้เหง้าเป็นส่วนประกอบในยาฆ่าแมลง
		10. นำเหง้ามาทำก๋วยเตี๋ยว	
		11. นำเหง้ามาประกอบอาหารเมนูลาบปลาตุก	

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

เมื่อพิจารณาถึงความหลากหลายชนิดของชาในอำเภอบางบ่อ อำเภอบางพลี อำเภอบางเสาธง และอำเภอเมืองสมุทรปราการ จังหวัดสมุทรปราการ พบชาจำนวน 2 ชนิด ได้แก่ *A. galanga* และ *A. siamensis* โดยพบว่า *A. siamensis* ที่มีชื่อเรียกต่าง ๆ กัน ได้แก่ ชาแดง ชาลิง ชาหยวก ชาเกษตร ชาพื้นบ้าน ชาเล็ก ชาหัวเล็ก ชาใหญ่ เป็นชนิดที่มีการปลูกในพื้นที่มากที่สุด พบในพื้นที่ปลูกทั้ง 4 อำเภอ ได้แก่ อำเภอบางบ่อ อำเภอบางพลี อำเภอบางเสาธง และอำเภอเมืองสมุทรปราการ ส่วน *A. galanga* เป็นชนิดที่มีการปลูกในพื้นที่รองลงมา มีชื่อเรียกต่าง ๆ กัน ได้แก่ ชาหลวง ชาเหลือง ชาใหญ่ พบในพื้นที่ปลูก 3 อำเภอ ได้แก่ อำเภอบางบ่อ อำเภอบางเสาธง และอำเภอเมืองสมุทรปราการ สำหรับการศึกษาครั้งนี้ได้มีการเก็บชาในตำบลบางเพรียง อ.บางบ่อ ทั้งหมด 3 ตัวอย่าง โดยผลการตรวจสอบพบว่าเป็น *A. siamensis* ทั้งหมด ซึ่งชาของตำบลบางเพรียงค่อนข้างมีชื่อเสียงเนื่องจากมีขนาดเหง้าใหญ่ ขาว สวยและอร่อย ทำให้มีพ่อค้ามารับซื้อทั้งจากในพื้นที่และนอกพื้นที่

จากการศึกษาลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของ *A. siamensis* และ *A. galanga* ในจังหวัดสมุทรปราการ อย่างละเอียด พบว่า *A. siamensis* ในแต่ละพื้นที่ปลูกมีลักษณะสัณฐานวิทยาแตกต่างกันในระดับต่ำกว่าชนิด ส่วน *A. galanga* มีลักษณะทางสัณฐานวิทยาแตกต่างกันแยกได้เป็น 2 กลุ่ม คือ ชาเหลือง ลำต้นใต้ดินเป็นเหง้า สีเหลืองอ่อน มีกลิ่นหอมแรง แผ่นใบด้านล่างมีขนสั้นประปราย ส่วนชาหลวงและชาใหญ่ ลำต้นใต้ดินเป็นเหง้าสีขาวนวล มีกลิ่นหอมอ่อนกว่า แผ่นใบเกลี้ยง ซึ่งเป็นลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่แตกต่างกันในระดับต่ำกว่าชนิด ดังนั้นควรมีการศึกษาต่ออย่างละเอียดในเรื่องพันธุ์ปลูกเพื่อกำหนดชื่อพันธุ์ปลูกที่ถูกต้องตามหลักพฤกษศาสตร์ต่อไป

ในปัจจุบันการศึกษาความหลากหลายของพืชมีหลายวิธีซึ่งการวิเคราะห์จากลักษณะทางสัณฐานวิทยาที่ต่างกันอย่างเห็นได้ชัดเป็นวิธีหนึ่งที่สามารถจำแนกชนิดของพืชได้ แต่ในบางกรณีอาจพบพืชที่มีลักษณะคล้ายคลึงกันมาก ซึ่งในกรณีเช่นนี้อาจต้องใช้วิธีอื่นมาตรวจสอบเพิ่มเติม เช่น การใช้กล้องจุลทรรศน์เพื่อดูรายละเอียดของเซลล์และเนื้อเยื่อ การพิสูจน์เอกลักษณ์ทางกายภาพและทางเคมี หรือการใช้วิธีตรวจทางพันธุกรรมซึ่งวิธีนี้สามารถใช้ในการจำแนกสายพันธุ์พืชเพื่อให้ได้สายพันธุ์ที่ชัดเจนขึ้น โดยเริ่มต้นจากการสกัดดีเอ็นเอของพืชที่ต้องการศึกษาและใช้เทคนิคทางอณูชีววิทยาช่วยพิสูจน์ว่าเป็นพืชชนิดใด [17] ดังเห็นได้จากงานวิจัยของอารีย์รัตน์ และคณะ [18] ที่มีการใช้วิธีการตรวจสอบความหลากหลายทางพันธุกรรมของชาพันธุ์ปลูกที่ได้รวบรวมจากแหล่งต่าง ๆ ในประเทศไทย จำนวน 30 ตัวอย่าง ด้วยเทคนิค amplified fragment length polymorphism (AFLP) จากผลการวิจัยพบว่าเมื่อใช้ลักษณะทางสัณฐานวิทยาพิจารณาพร้อมกับข้อมูลด้านพันธุกรรมของเทคนิค AFLP สามารถจำแนกกลุ่มชาที่มีขนาดของเหง้าแตกต่างกันได้

Saensouk [3] ได้รายงานพบชาในประเทศไทยจำนวน 18 ชนิด เมื่อเทียบกับผลการศึกษารัชนีพบชาในพื้นที่ศึกษา 2 ชนิด จากจำนวนทั้งหมด 18 ชนิด คิดเป็นร้อยละ 11.1 ของชาที่พบในประเทศไทย เมื่อทำการเปรียบเทียบจำนวนชนิดของการศึกษารัชนีพบความหลากหลายของชาน้อยกว่าการศึกษาของ Saensouk [19] ซึ่งพบชาจำนวน 8 ชนิด คิดเป็นร้อยละ 44.4 ของชาที่พบในประเทศไทย สาเหตุประการสำคัญมาจากระยะเวลา ความสม่ำเสมอในการสำรวจและเก็บตัวอย่างที่ต่างกันซึ่งการศึกษารัชนีเป็นการศึกษาที่มีเวลาและงบประมาณจำกัด รวมถึงจังหวัดสมุทรปราการ เป็นจังหวัดที่มีการผสมผสานระหว่างภาคการเกษตรและภาคอุตสาหกรรมจึงอาจทำให้ความหลากหลายของพืชถูกรบกวนจากกิจกรรมของมนุษย์ได้ อย่างไรก็ตามหากมีการเปรียบเทียบผลการสำรวจครั้งนี้กับฐานันดรศักดิ์ และคณะ [20] ที่ได้มีการสำรวจพืชวงศ์ขิง บริเวณอำเภอนองพอก จังหวัดร้อยเอ็ด รวมถึงงานวิจัยของอารีย์รัตน์ และคณะ [21] ที่ได้มีการศึกษาความหลากหลายและการใช้ประโยชน์พื้นบ้านของพืชวงศ์ขิงในอำเภอกำแพง จังหวัดมหาสารคาม และงานวิจัยของสุรพล และคณะ [22] ที่ได้มีการสำรวจในพื้นที่อำเภอบ้านฝาง จังหวัดอุดรธานี พบว่ามีจำนวนชนิดของชาเท่ากัน โดยพบชาจำนวน 2 ชนิด ได้แก่ *A. siamensis* และ *A. galanga*

จากข้อมูลการกระจายพันธุ์และนิเวศวิทยาของชา [7, 13-15] พบว่า *A. siamensis* และ *A. galanga* มีการกระจายพันธุ์เกือบทุกภาคและทั่วทุกภาคของประเทศไทยตามลำดับ และมีการปลูกโดยทั่วไปเพื่อใช้ประโยชน์เป็นพืชอาหารและพืชสมุนไพร โดย *A. siamensis* พบขึ้นกระจายทั่วไปและมีการปลูกเพื่อใช้ประโยชน์ในครัวเรือนและปลูกเพื่อการค้าในหลาย



จังหวัด เช่น อุตรดิตถ์ สุโขทัย และพิษณุโลก ส่วน *A. galanga* มีการพบในพื้นที่เปิดโล่ง ป่าดิบแล้ง และป่าเบญจพรรณ ที่ความสูงตั้งแต่ระดับน้ำทะเลจนถึงประมาณ 1,300 เมตร มีการปลูกกันมากในหลายจังหวัด เช่น พระนครศรีอยุธยา กาญจนบุรี และตาก ซึ่งการกระจายตัวที่กว้างขวางนี้บ่งชี้ถึงความสามารถในการปรับตัวของพืชเหล่านี้เข้ากับสภาพแวดล้อมที่หลากหลายในประเทศไทย

สำหรับข้อมูลการใช้ประโยชน์จากข่าได้มีการสอบถามจากชาวบ้านในพื้นที่ศึกษาพบว่ามีการนำข่าซึ่งปลูกไว้ใช้ประโยชน์ด้านอาหารมากที่สุด รองลงมาคือใช้เป็นพืชสมุนไพร ดังนี้

ด้านอาหาร ชาวบ้านมีการนำเหง้า และช่อดอกของ *A. siamensis* และ *A. galanga* มาทำอาหาร ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของอารีรัตน์ และคณะ [21] ที่กล่าวไว้ว่าชาวบ้านในอำเภอแคว้น จังหวัดมหาสารคาม มีการนำเหง้า ช่อดอกอ่อนของ *A. galanga* และ *A. siamensis* มาประกอบอาหารและเป็นเครื่องเทศปรุงอาหารเพื่อดับกลิ่นคาว และงานวิจัยของสุรพล และคณะ [22] ที่ระบุว่าชาวบ้านในอำเภอบ้านผือ จังหวัดอุดรธานี มีการนำเหง้า และช่อดอก ของ *A. siamensis* และ *A. galanga* มารับประทานเป็นอาหาร รวมถึงสอดคล้องกับบทวิเคราะห์ของ Arya และคณะ [23] ที่ระบุว่า *A. galanga* เป็นพืชที่นิยมนำมาใช้เป็นเครื่องเทศและเครื่องปรุงในอาหารหลากหลายชนิดของประเทศต่าง ๆ เช่น อินโดนีเซีย ไทย และมาเลเซีย เป็นต้น

พืชสมุนไพร ชาวบ้านมีการนำเหง้าของ *A. siamensis* และ *A. galanga* มาใช้เป็นยารักษาโรคเกี่ยวกับท้องอืดท้องเฟ้อ จุกเสียด แน่นท้อง กลาก เคลื่อน ติดเชื้อรา ข้ออักเสบ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยที่มีการศึกษาฤทธิ์ทางเภสัชวิทยาพบว่า ข่าสามารถยับยั้งอนุมูลอิสระ ลดการบีบตัวของลำไส้ ด้านเชื้อรา และด้านการอักเสบ ดังเช่นงานวิจัยของ Theanphong และคณะ [24] ได้ศึกษาองค์ประกอบทางเคมีของน้ำมันระเหยง่ายที่ได้จากการกลั่นด้วยน้ำของเหง้าสด *A. Siamensis* จากผลการวิจัยพบว่าน้ำมันหอมระเหยจากเหง้าแสดงศักยภาพในการต้านอนุมูลอิสระในระดับสูง รวมถึงมีความสามารถในการรื้อถอนอนุมูลอิสระได้อย่างมีประสิทธิภาพ หรือบทความของ Trimanto และคณะ [25] ที่ระบุว่าแทบทุกส่วนของ *A. galanga* ประกอบด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพหลายชนิดรวมถึงฤทธิ์ต้านจุลชีพ ด้านอนุมูลอิสระ ป้องกันแผลในกระเพาะ ด้านแบคทีเรียต้านมะเร็ง ด้านไวรัส HIV ด้านเชื้อรา ด้านการอักเสบ ด้านอาการแพ้ และด้านเบาหวาน รวมถึงบทความของ Arya และคณะ [23] ที่ระบุว่า *A. galanga* เป็นส่วนประกอบหลักในระบบการแพทย์แผนโบราณเพื่อรักษาอาการติดเชื้อที่ลำคอ โรคหอบหืด ความผิดปกติของระบบทางเดินปัสสาวะ การอักเสบ และโรคข้ออักเสบรูมาตอยด์ รวมถึงอาการอื่น ๆ อีกมากมาย

ข่าเป็นพืชที่มีความสำคัญทั้งในด้านอาหารและด้านสมุนไพร และด้วยกลิ่นอันเป็นเอกลักษณ์ รสชาติเผ็ดร้อน รวมถึงคุณสมบัติทางยาที่มีประโยชน์ต่อร่างกาย จึงมีการผสมผสานนำข่ามาใช้เป็นวัตถุดิบในเมนูอาหาร นับเป็นภูมิปัญญาที่ล้ำค่าอย่างหนึ่งของชาวไทยตั้งแต่สมัยโบราณเพราะนอกจากกลิ่นและรสของข่าจะช่วยชูรสของอาหารให้อร่อยขึ้นแล้วยังมีส่วนช่วยในการรักษาและป้องกันโรคภัยต่างๆ ให้กับร่างกายอีกด้วย [4, 6] จากประโยชน์ดังกล่าวจึงทำให้ข่ากลายเป็นหนึ่งในพืชสมุนไพรที่ได้รับการถ่ายทอดภูมิปัญญาจากบรรพบุรุษสู่ลูกหลานมาอย่างต่อเนื่อง ดังนั้นหน่วยงานที่เกี่ยวข้องจึงควรหาแนวทางในการอนุรักษ์และดูแลรักษาเพื่อให้ทรัพยากรที่มีคุณค่าได้คงอยู่ รวมถึงควรมีการศึกษาข้อมูลเพิ่มเติมด้านการนำข่าไปใช้ประโยชน์เพื่อเป็นแหล่งเรียนรู้ให้กับผู้สนใจต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ ที่สนับสนุนทุนวิจัยในครั้งนี้ และขอขอบคุณชาวบ้านจาก 4 อำเภอ ในจังหวัดสมุทรปราการ ที่อำนวยความสะดวกและให้ความช่วยเหลือในการเก็บข้อมูลภาคสนาม

เอกสารอ้างอิง

1. สำนักวิจัยการอนุรักษ์ป่าไม้และพันธุ์พืช กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่าและพันธุ์พืช. พืชวงศ์ขิงข่า. สวจ.จุลสารราย 4 เดือน 2558;7(3):4-5.



2. Larsen K. A Preliminary Checklist of the Zingiberaceae of Thailand. Thai Forest Bulletin (Botany) 1996;24:35-49.
3. Saensouk S. Biology and Taxonomy of the Genus *Alpinia* Roxb. (Zingiberaceae) in Thailand. A Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy, Khon Kaen University. Khon Kaen University. Khon Kaen; 2006.
4. สถาบันจัดตั้งสถาบันอุทยานธรรมชาติวิทยาสิริรุกษชาติ มหาวิทยาลัยมหิดล. ข้า อาหารเป็นยาคู่ครัวไทย [อินเทอร์เน็ต]. 2566 [เข้าถึงเมื่อ 16 ก.พ. 2566]. เข้าถึงได้จาก: <https://sr.mahidol.ac.th/hbe01/>
5. นิตดา หงษ์วิวัฒน์, ทวีทอง หงษ์วิวัฒน์, สุภาพรณ เยี่ยมชัยภูมิ. ผัก คุณค่าอาหารและการกิน 333 ชนิด. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: บริษัท สำนักพิมพ์แสงแดด จำกัด; 2550.
6. อุดลย์ เบญจวรรณกร. ประโยชน์มหัศจรรย์ ข้า. กรุงเทพฯ: บริษัทอมรินทร์พริ้นติ้งแอนด์พับลิชชิ่ง จำกัด (มหาชน); 2557.
7. อรุณ เกษประเสริฐ. พืชสมุนไพรวงศ์ ZINGIBERACEAE. กรุงเทพฯ: สำนักวิจัยพัฒนาเทคโนโลยีชีวภาพ กรมวิชาการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์; 2550.
8. ศุภยางค์ วรภูมิคุณชัย, สุกัลยา หลีแจ้. สมุนไพรไทยต้านจุลินทรีย์. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพฯ: สำนักพิมพ์แห่งจุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย; 2560.
9. วัชรภรณ์ ศรีพอ, ธนัท อ้วนอ่อน, ณัฏฐภัทร จินดา. ประสิทธิภาพของน้ำมันหอมระเหยจากข้าในการยับยั้งเชื้อแบคทีเรีย *Escherichia coli*, *Staphylococcus aureus* และ *Salmonella typhimurium*. ใน: เอกสารการประชุมวิชาการระดับชาติ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ตามรอยพระยุคลบาท เกษตรศาสตร์กำแพงแสน ครั้งที่ 12 วันที่ 9 ธันวาคม 2558. นครปฐม; 2558. หน้า 1837-43.
10. นำพน พิพัฒน์ไพบูลย์, นิรุต อ่อนสลุ, สมพร หงษ์คง, สุริยาโชค เพิ่มพูน, วัชรายุทธ ลำดวน, สุรเชษฐ์ สีขานานู. การกลั่นน้ำมันหอมระเหยจาก ผักแขยง ข้าป่า มะแขว่น และเปราะหอม เพื่อใช้เป็นส่วนผสมในอุตสาหกรรมน้ำหอม. วารสารเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี 2556;4(2):11-22.
11. กลุ่มงานยุทธศาสตร์และข้อมูลเพื่อการพัฒนาจังหวัด สำนักงานจังหวัดสมุทรปราการ. แผนพัฒนาจังหวัดสมุทรปราการ 5 ปี (พ.ศ.2566-2570). [อินเทอร์เน็ต]. [เข้าถึงเมื่อ 30 พ.ค. 2567]. เข้าถึงได้จาก: https://province.mots.go.th/ewtadmin/ewt/samutprakan/ewt_dl_link.php?nid=853
12. สำนักงานเกษตรจังหวัดสมุทรปราการ. [อินเทอร์เน็ต]. [เข้าถึงเมื่อ 16 ก.พ. 2566]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.samutprakan.doae.go.th/>
13. Larsen K, Larsen SS. Gingers of Thailand. Chiang Mai: Queen Sirikit Botanic Garden; 2006.
14. Saensouk S, Saensouk P. Flora of Thailand vol. 16 part 2, Zingiberaceae Alpinia Roxb. In Chayamarit K, Balslev H, Newman M, Sangvirodjanapat S, editor. Prachachon, Bangkok: Forest Herbarium, Royal Forest Department; 2023.
15. Zhao T, Yu Q, Lin C, Liu H, Dong L, Feng X, Liao J. Analyzing morphology, metabolomics, and transcriptomics offers invaluable Insights into the mechanisms of pigment accumulation in the diverse-Colored Labellum Tissues of *Alpinia*. Plants 2023;12(21):3766.
16. ก่องกานดา ชยามฤต. คู่มือจำแนกพรรณไม้. พิมพ์ครั้งที่ 2. กรุงเทพฯ: บริษัท ประชาชน จำกัด; 2545.
17. ธนวรรณ กุมมาลือ. กลไกการต้านเซลล์มะเร็งของพืชสมุนไพร. พิมพ์ครั้งที่ 1 กรุงเทพฯ: ห้างหุ้นส่วนสามัญ จรัสการพิมพ์; 2555.
18. อารีย์รัตน์ ขุนภิบาล, สุรินทร์ ปิยะโชคณากุล และ วิเชียร กิรตินิจกาล. การตรวจสอบความหลากหลายทางพันธุกรรมของข้า (*Alpinia* spp.) ที่ใช้บริโภคโดยเทคนิคเอเอฟแอลพี. Thai J Genet 2009;3(1):41-50.



19. Saensouk S, Saensouk P, Pasorn P, Chanshotikul N. Diversity and traditional uses of Zingiberaceae in Nakhon Phanom province, Thailand. *Research & Knowledge* 2018;4(1):47-55.
20. ฐนันต์ศักดิ์ เพชรภักดี, สุรพล แสนสุข, ปิยะพร แสนสุข. ความหลากหลาย สถานภาพการอนุรักษ์ และการใช้ประโยชน์พื้นบ้านของพืชวงศ์ขิงในอำเภอนองพอก จังหวัดร้อยเอ็ด. *วารสารวิทยาศาสตร์ คชสาร* 2563;4(2):70-82.
21. อาริรัตน์ รักษาศิลป์, วิไลจิตร นำพูลสุขสันต์, สุรพล แสนสุข. ความหลากหลายและการใช้ประโยชน์พื้นบ้านพืชวงศ์ขิงในอำเภอแกลง จังหวัดมหาสารคาม. *วารสารราชภัฏร้อยเอ็ด: วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี* 2563;1(1):31-5.
22. สุรพล แสนสุข, ปิยะพร แสนสุข, ธารา สังข์ทอง. พืชวงศ์ขิงในอุทยานประวัติศาสตร์ภูพระบาท อำเภอบ้านผือ จังหวัดอุดรธานี. *วารสารพฤกษศาสตร์ไทย* 2556;5(2):99-105.
23. Arya KR, Sheetu W, Monica G, Sukriti V, Rubiya K, Keshav RP, et al. Journey of *Alpinia galanga* from kitchen spice to nutraceutical to folk medicine to nanomedicine. *J Ethnopharmacol* 2022;291:115144.
24. Theanphong O, Jenjittikul T, Mingvanish W. Essential oil composition and antioxidant activity from *Alpinia siamensis* K. Schum. Rhizome. *Bull Health Sci Technol* 2018;16(2):125-34.
25. Trimanto T, Hapsari L, Dwiyantri D. *Alpinia galanga* (L.) Willd: Plant Morphological Characteristic, Histochemical Analysis and Review on Pharmacological. *AIP Conf Proc* 2021;2353: 030021-1–030021-10.



ประสิทธิภาพการเก็บกักอุณหภูมิของถุงประคบบรรจุธัญพืชตระกูลถั่ว
เพื่อการประยุกต์ใช้ในการแพทย์แผนไทย

Heat Retention Efficiency of Legume-Based Hot Compress Bags
for Thai Traditional Medicine Applications

พชรมน สอนเจริญ¹ อติศักดิ์ สุมาลี² สุธาสินี สงวนโกศล³ พชร ตริทิพย์ธนากุล³

เพ็ญจันทร์ ประจันตะเสน³ อชิรฤกษ์ วาสนารังษี⁴ วิรา นิลดำ¹ และอำภา คนเชื้อ^{1*}

¹หน่วยวิจัยการแพทย์ไทยเดิม สาขาแพทย์แผนไทยประยุกต์ คณะแพทยศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม

มหาสารคาม 44000

²สาขาวิชาวิทยาศาสตร์สุขภาพ มหาวิทยาลัยสุโขทัยธรรมาธิราช นนทบุรี 11120

³บริษัท อีแอลอี (ไทยแลนด์) จำกัด นนทบุรี 11120

⁴บริษัท อมตะ โอสธ จำกัด นนทบุรี 11120

Pacharamon Soncharoen¹, Adisak Sumalee², Suthasinee Sanguanphokai³,

Pachara Tritipphanakul³, Panchan Pajantasan³, Ashirkrit Vasetthirangsi⁴,

Vira Nindam¹, and Ampa Konsue^{1*}

¹Thai Traditional Medicinal Research Unit, Division of Applied Thai Traditional Medicine,

Faculty of Medicine, Mahasarakham University, Maha Sarakham 44000

²Health Science Program, Sukhothai Thammarat Open University, Nonthaburi 11120

³ELE (THAILAND) CO., LTD., Nonthaburi 11120

⁴AMATA OSOT CO., LTD., Nonthaburi 11120

*Corresponding author: ampa.k@msu.ac.th

Received: 30 May 2025/ Revised: 2 October 2025/ Accepted: 7 October 2025

บทคัดย่อ

การรักษาด้วยความร้อนเป็นวิธีการรักษาอย่างหนึ่งทางการแพทย์แผนไทยที่ใช้ในการบรรเทาอาการปวดของระบบกล้ามเนื้อ ข้อต่อ และระบบไหลเวียนได้อย่างมีประสิทธิภาพ การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเก็บกักอุณหภูมิของถุงประคบร้อนที่บรรจุธัญพืชตระกูลถั่วท้องถิ่นภาคตะวันออกเฉียงเหนือ คัดเลือกธัญพืชตระกูลถั่ว 7 สายพันธุ์ ได้แก่ ถั่วเขียว ถั่วพุ่ม ถั่วเหลือง ถั่วแปบ ถั่วขอ ถั่วลิสง และถั่วแดงหลวง นำมาผสมกับถั่วเขียวในอัตราส่วน 1:1 น้ำหนักถุงละ 200 กรัม บรรจุในถุงผ้าฝ้ายให้ความร้อนด้วยเครื่องไมโครเวฟ 850 วัตต์ เป็นเวลา 2 นาที วัดอุณหภูมิทุก 1 นาที เป็นเวลา 15 นาที ทำการทดลองซ้ำ 9 ครั้ง วิเคราะห์ข้อมูลด้วยสถิติเชิงพรรณนาและการทดสอบความแปรปรวนทางเดียว ผลการวิจัยพบว่าถุงประคบถั่วเขียวผสมถั่วพุ่มมีประสิทธิภาพการเก็บกักความร้อนดีที่สุด โดยมีอุณหภูมิเริ่มต้น $68.00 \pm 0.70^{\circ}\text{C}$ และอุณหภูมิมืดท้าย $37.33 \pm 1.41^{\circ}\text{C}$ การสูญเสียความร้อนเพียง 45.1% สามารถรักษาอุณหภูมิในช่วง $40-45^{\circ}\text{C}$ ได้นาน 12.5 นาที ซึ่งเป็นช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการบำบัดทางกายภาพ การวิจัยนี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของธัญพืชตระกูลถั่วที่สามารถ



ใช้เป็นสื่อเก็บกักความร้อนในถุงประคบร้อนที่มีประสิทธิภาพสำหรับการแพทย์แผนไทย และสร้างมูลค่าเพิ่มให้กับผลผลิตทางการเกษตรท้องถิ่น

คำสำคัญ: การบำบัดด้วยความร้อน ธัญพืชตระกูลถั่ว การเก็บกักอุณหภูมิ การแพทย์แผนไทย ความจุความร้อนจำเพาะ การแผ่รังสีความร้อน

Abstract

Heat therapy is a highly effective treatment modality in Thai traditional medicine, primarily used to alleviate musculoskeletal discomfort, joint diseases, and circulatory system conditions. This study aimed to assess the thermal retention efficacy of hot compress bags made from locally sourced legume grains in Northeast Thailand. Seven varieties of legumes were chosen: mung bean, cowpea, soybean, hyacinth bean, jicama bean, peanut, and kidney bean. Each was combined with mung beans in a 1:1 ratio, amounting to 200 grams per cotton bag. Heat treatment was conducted using an 850-watt microwave for 2 minutes, with temperature readings taken every minute over a total duration of 15 minutes. The experiment was conducted nine times and examined with descriptive statistics and one-way ANOVA. The mung bean-cowpea mixture exhibited exceptional heat retention, starting at $68.00 \pm 0.70^{\circ}\text{C}$ and concluding at $37.33 \pm 1.41^{\circ}\text{C}$, indicating a mere 45.1% heat loss. This combination sustained a therapeutic temperature range of $40-45^{\circ}\text{C}$ for 12.5 minutes, which is ideal for physiotherapy applications. Statistical analysis indicated significant differences ($p < 0.05$) among the different legume combinations. This research demonstrates the potential of legume grains as effective heat retention media for hot compress bags in Thai traditional medicine applications, thereby adding value to local agricultural products.

Keywords: Heat therapy, Legumes, Heat retention, Thai Traditional medicine, Specific heat capacity, Thermal radiation

บทนำ

การบำบัดด้วยความร้อน (thermotherapy) เป็นวิธีการรักษาเก่าแก่ที่มีหลักฐานการใช้งานตั้งแต่ปี ค.ศ. 1869 [1] โดยมีพื้นฐานทางวิทยาศาสตร์ในการเพิ่มการไหลเวียนของเลือด (vasodilation) บรรเทาความเจ็บปวด (pain threshold) และเพิ่มการเผาผลาญ (metabolic activity) [2] สามารถกระตุ้นการหลั่งเอนโดรฟิน ลดความเครียด และมีประโยชน์ต่อระบบหัวใจและหลอดเลือด [3] การประคบร้อนในการแพทย์แผนไทยเป็นเทคนิคการรักษาที่มีความสำคัญมาอย่างยาวนาน โดยเฉพาะอย่างยิ่งการประคบด้วยสมุนไพรร้อน (Thai herbal compress massage) หรือ "ลูกประคบ" ได้รับการยอมรับจากองค์การยูเนสโกให้เป็นมรดกทางวัฒนธรรมของมนุษยชาติในปี ค.ศ. 2019 [4] โดยผสมผสานหลักการความร้อนกับคุณสมบัติทางเภสัชกรรมของสมุนไพร เช่น ตะไคร้ กะเพรา ขมิ้น และการบูร ที่ช่วยด้านการอักเสบและส่งเสริมการหายของเนื้อเยื่อ [5] อย่างไรก็ตามการพัฒนาถุงประคบร้อนปัจจุบันยังเผชิญความท้าทายด้านประสิทธิภาพการเก็บกักความร้อน ความปลอดภัย และการกระจายความร้อน วัสดุทั่วไป เช่น เกลือหรือทราย มีข้อจำกัดเรื่องระยะเวลาเก็บความร้อนสั้นและอาจเป็นอันตรายหากควบคุมอุณหภูมิไม่เหมาะสม [6] จากการศึกษาพบว่าความร้อนชื้น มีประสิทธิภาพในการบรรเทาอาการปวดกล้ามเนื้อดีกว่าความร้อนแห้ง (dry heat) ถึง 4 เท่า [7] การวิเคราะห์อย่างเป็นระบบพบว่า การประคบสมุนไพรไทยสามารถลดความเจ็บปวดได้ร้อยละ 25-80 และปรับปรุงความยืดหยุ่นของกล้ามเนื้อและลดความวิตกกังวลอย่างมีนัยสำคัญ [8] การใช้ความร้อนเพื่อบำบัดอาการปวดกล้ามเนื้อและข้อต่อควรให้อยู่ในช่วง $40-45^{\circ}\text{C}$ เป็นช่วงที่ไม่ก่อให้เกิดความเสียหายกับผิวหนังและเนื้อเยื่อ

ระยะเวลาในการประคบ 5-20 นาทีต่อครั้ง นอกจากนี้ยังมีข้อควรระวังในผู้ป่วยที่มีปัญหาเกี่ยวกับผิวหนัง อาทิเช่น บริเวณที่มีแผลเปิด ผิวหนังอักเสบ หรือผู้ที่มีความรู้สึกไวต่อความร้อนลดลง [9, 10]

ธัญพืชตระกูลถั่วเป็นทรัพยากรธรรมชาติที่มีศักยภาพสูงในการใช้เป็นสื่อเก็บกักความร้อน เนื่องจากมีคุณสมบัติทางกายภาพที่เหมาะสมหลายประการ ได้แก่ ความจุความร้อนจำเพาะสูง $1.57\text{--}2.45\text{ kJ/kg}^{-1}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ ที่ช่วยดูดซับและกักเก็บพลังงานความร้อนได้ดี ค่าการนำความร้อนปานกลาง ($0.092\text{--}0.65\text{ W/mK}$) [11, 12] โครงสร้างโปรตีนและแป้งในถั่วสามารถสร้างเจลและอุ้มน้ำได้ดี ส่งผลให้ถั่วสามารถรักษาความร้อนได้นานขึ้น [13] โครงสร้างเนื้อเยื่อของถั่วที่หนาแน่นและสม่ำเสมอ ช่วยให้การกระจายและกักเก็บความร้อนมีประสิทธิภาพ [13, 14] โปรตีนในถั่วมีความเสถียรต่อความร้อนสูง ทนต่ออุณหภูมิที่ใช้ในการประคบหรือกระบวนการทางความร้อนได้โดยไม่เสื่อมสภาพง่าย [15] นอกจากนี้เมล็ดถั่วยังมีคุณสมบัติในการรักษาอุณหภูมิเมื่อได้รับความร้อน ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการบำบัด และมีความปลอดภัยต่อผู้ใช้ [16] ถั่วเขียวมีค่าความจุความร้อนจำเพาะ และค่าการนำความร้อนที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณความชื้นและอุณหภูมิ โดยมีค่าความจุความร้อนจำเพาะอยู่ระหว่าง $1.63\text{--}2.45\text{ kJ/kg}^{-1}\text{ }^{\circ}\text{C}^{-1}$ และค่าการนำความร้อนอยู่ระหว่าง $0.092\text{--}0.141\text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ เมื่อความชื้นเพิ่มจาก 9.9% เป็น 18.3% และอุณหภูมิเพิ่มจาก 10°C เป็น 50°C คุณสมบัติเหล่านี้ช่วยให้ถั่วเขียวสามารถดูดซับและปล่อยความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ [17] โครงสร้างโปรตีนและแป้งในถั่วเขียวมีปฏิสัมพันธ์กันผ่านแรงยึดเหนี่ยว hydrophobic และการเกิดเจลเมื่อได้รับความร้อน ส่งผลให้เกิดโครงสร้างที่สามารถกักเก็บน้ำและความร้อนได้ดี ทำให้เก็บกักความร้อนและรักษาอุณหภูมิได้นานขึ้น [18]

ภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทยถือเป็นแหล่งผลิตธัญพืชตระกูลถั่วที่สำคัญ โดยมีพื้นที่เพาะปลูกประมาณ 25% ของพื้นที่การเกษตรทั้งหมดในภูมิภาค [19] ภูมิภาคนี้ทั้งแห้งแล้งและดินทรายที่ระบายน้ำดีเอื้อต่อการปลูกถั่วหลากหลายสายพันธุ์ ได้แก่ ถั่วเขียว (*Vigna radiata*) ถั่วพุ่ม (*Vigna unguiculata*) ถั่วเหลือง (*Glycine max*) ถั่วแปบ (*Lablab purpureus*) ถั่วขอ (*Pachyrhizus erosus*) ถั่วลิสง (*Arachis hypogaea*) และถั่วแดงหลวง (*Phaseolus vulgaris*) [20] แต่ละสายพันธุ์มีลักษณะทางกายภาพแตกต่างกันในเรื่องขนาด รูปร่าง ความหนาแน่น และองค์ประกอบทางเคมี ซึ่งส่งผลต่อคุณสมบัติการเก็บกักความร้อน การใช้เมล็ดถั่วเป็นสื่อเก็บกักความร้อนมีข้อได้เปรียบหลายประการ ได้แก่ ความสามารถดูดซับและปลดปล่อยความร้อนค่อนข้างเป็นค่อยไป ให้ความร้อนคงที่ โครงสร้างเปลือกหุ้มรักษาความชื้นได้ดี ให้ความร้อนขึ้นที่มีประสิทธิภาพสูง และมีขนาดรูปร่างเหมาะสมต่อการขึ้นรูปถุงประคบที่ปรับตัวเข้ากับร่างกายได้ [21] จากผลการวิจัยที่ผ่านมาพบว่าถั่วประคบร้อนธัญพืชที่บรรจุเมล็ดถั่วเขียวมีประสิทธิภาพสูงที่สุดในการเตรียมและเก็บรักษาอุณหภูมิ โดยสามารถให้อุณหภูมิเฉลี่ย $52.2\text{--}91^{\circ}\text{C}$ ตามระยะเวลาการอุ่น และมีอัตราการลดลงของอุณหภูมิเพียง 0.44-0.95% หลังผ่านไป 15 นาที เมื่อเปรียบเทียบกับเมล็ดข้าวเหนียวดำ (0.98-2.57%) และเม็ดทราย (11.87-20.69%) [22] การผสมธัญพืชตระกูลถั่วหลายชนิดช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและความทนทานของถุงประคบร้อน ทั้งในด้านการเก็บกักและกระจายความร้อน ความยืดหยุ่นต่อการใช้งานซ้ำ และลดความเสี่ยงจากความเสียหายหรือกลิ่นอับ ทำให้เหมาะกับการนำไปใช้ในผลิตภัณฑ์ประคบร้อนที่ต้องการคุณภาพสูง [23, 24]

อย่างไรก็ตามการวิจัยเกี่ยวกับการใช้เมล็ดถั่วเป็นสื่อเก็บกักความร้อนสำหรับการบำบัดยังมีข้อจำกัด โดยเฉพาะในบริบทของการแพทย์แผนไทย การศึกษาส่วนใหญ่ที่ผ่านมามุ่งเน้นไปที่คุณสมบัติทางความร้อนของธัญพืชเพื่อการใช้งานในอุตสาหกรรมอาหารและการเก็บรักษา การวิจัยครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเก็บกักอุณหภูมิของถั่วเขียวที่ผสมกับธัญพืชตระกูลถั่วอื่นๆ จำนวน 7 ชนิด ในอัตราส่วน 1:1

ผลจากการวิจัยนี้คาดว่าจะให้ข้อมูลทางวิทยาศาสตร์ที่สำคัญสำหรับการคัดเลือกวัตถุดิบที่เหมาะสมที่สุดในการผลิตถุงประคบร้อนที่มีประสิทธิภาพสูง นำไปสู่การพัฒนาผลิตภัณฑ์ถุงประคบร้อนที่ปลอดภัย มีคุณภาพ และสามารถใช้ร่วมกับการแพทย์แผนไทยได้อย่างเหมาะสม นอกจากนี้ยังเป็นการส่งเสริมการใช้ประโยชน์จากทรัพยากรท้องถิ่นอย่างคุ้มค่า สนับสนุนเกษตรกรในภาคตะวันออกเฉียงเหนือ และสืบสานภูมิปัญญาการแพทย์แผนไทยให้คงอยู่และพัฒนาต่อไปในอนาคต



วิธีดำเนินการวิจัย

การเตรียมวัตถุดิบและการควบคุมคุณภาพ

การคัดเลือกและเตรียมเมล็ดข้าว ทำการคัดเลือกเมล็ดข้าวทั้ง 7 ชนิด จากตลาดเกษตรกรในจังหวัดมหาสารคาม ได้แก่ ข้าวขาว, ข้าวหอม, ข้าวเหนียว, ข้าวเหนียว, ข้าวเหนียว, ข้าวเหนียว และข้าวแดงหลวง แสดงในภาพที่ 1 การควบคุมคุณภาพเมล็ดข้าวดำเนินการตามมาตรฐาน International Seed Testing Association (ISTA) [25] การคัดเลือกเมล็ดตามมาตรฐาน ISTA ทำให้ได้เมล็ดที่มีขนาดใกล้เคียงกัน โดยเส้นผ่านศูนย์กลางของเมล็ดอยู่ในช่วง 4-8 มิลลิเมตร โดยคัดเลือกเฉพาะเมล็ดที่มีความสมบูรณ์ ไม่แตกหัก ไม่เสียหาย และไม่มีการปนเปื้อนของเชื้อโรค การกำหนดความชื้นมาตรฐานที่ $12 \pm 1\%$ โดยใช้วิธี air-oven method ตามมาตรฐาน ISTA ที่อุณหภูมิ 130°C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง [26] ความชื้นของเมล็ดข้าวมีความสำคัญต่อคุณสมบัติทางความร้อน (thermal properties) โดยเฉพาะความจุความร้อนจำเพาะ (specific heat capacity) และการนำความร้อน (thermal conductivity) การวัดความชื้นใช้เครื่องวัดความชื้นแบบดิจิทัล (digital moisture meter) ที่ผ่านการสอบเทียบ (calibration) ด้วยมาตรฐานอ้างอิง (reference standard) เพื่อให้แน่ใจว่าความแม่นยำอยู่ในช่วง $\pm 0.2\%$ [27] ก่อนการทดลอง เมล็ดข้าวทุกชนิดต้องผ่านกระบวนการทำความสะอาดด้วยการร่อนผ่านตะแกรงขนาด 2 มม. เพื่อกำจัดสิ่งแปลกปลอมและเมล็ดที่ไม่สมบูรณ์

การเตรียมถุงประคบ ถุงประคบทำจากผ้าฝ้าย 100% ที่มีความหนาแน่น 200 เส้นด้ายต่อตารางนิ้ว (thread count) รูปสี่เหลี่ยมผืนผ้าขนาด 12×10 ตารางเซนติเมตร การเลือกใช้ผ้าฝ้ายเนื่องจากมีคุณสมบัติทนความร้อนได้ดี มีการกระจายความร้อนสม่ำเสมอ และปลอดภัยต่อผิวหนัง การเย็บถุงใช้เส้นด้ายฝ้าย 100% ด้วยตะเข็บคู่ (double seam) การกำหนดน้ำหนัก 100 กรัม เป็นปริมาณที่เหมาะสมสำหรับการทดสอบความสามารถในการเก็บกักความร้อน [28] การบรรจุเมล็ดข้าวในถุงประคบกระทำอย่างระมัดระวังโดยใช้เครื่องชั่งดิจิทัลที่มีความละเอียด เมล็ดข้าวแต่ละชนิดหนัก 100 ± 0.01 กรัม ในอัตราส่วน 1:1 แสดงในตารางที่ 1

เครื่องมือและอุปกรณ์การทดลอง

การให้ความร้อนโดยใช้เตาไมโครเวฟ SAMSUNG รุ่น ME0113W1 ที่มีกำลังไฟฟ้า 850 วัตต์ ความถี่ 2.45 GHz การเลือกใช้ไมโครเวฟกำลังไฟฟ้านี้เนื่องจากมีการกระจายพลังงานสม่ำเสมอ ก่อนการทดลองทุกครั้งจะทำการตรวจสอบกำลังไฟฟ้าของไมโครเวฟด้วยวิธี water load test ตามมาตรฐาน IEC 60705 [30] โดยการให้ความร้อนกับน้ำกลั่น 1,000 มิลลิลิตร ที่อุณหภูมิเริ่มต้น $20 \pm 2^{\circ}\text{C}$ เป็นเวลา 2 นาที และคำนวณกำลังไฟฟ้าที่แท้จริงจากการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิของน้ำ

การวางถุงประคบในไมโครเวฟ โดยวางตรงกลางจานหมุน เพื่อให้ได้รับการกระจายพลังงานไมโครเวฟที่สม่ำเสมอ ระยะเวลาการให้ความร้อน 2 นาที ถูกกำหนดจากการศึกษาเบื้องต้น (pilot study) ด้วยการวัดอุณหภูมิ 9 จุดในถุงประคบ พบว่าระยะเวลา 2 นาที ให้การกระจายความร้อนสม่ำเสมอ โดยผลต่างอุณหภูมิระหว่างจุดต่าง ๆ ไม่เกิน $\pm 3^{\circ}\text{C}$

การวัดอุณหภูมิใช้เทอร์โมมิเตอร์แบบปรอทในแก้ว (mercury-in-glass thermometer) ที่มีช่วงการวัด -10°C ถึง 150°C ความละเอียด 0.5°C ตามมาตรฐาน ASTM E1 [30] การเลือกใช้เทอร์โมมิเตอร์ปรอทเนื่องจากมีความแม่นยำสูง เสถียรภาพดี และให้ผลการวัดที่สม่ำเสมอเมื่อเทียบกับเครื่องวัดอุณหภูมิดิจิทัล การควบคุมคุณภาพของเทอร์โมมิเตอร์โดยก่อนเริ่มการทดลองใช้จุดอ้างอิง (reference points) สองจุด คือ จุดหลอมเหลวของน้ำแข็ง (0°C) และจุดเดือดของน้ำกลั่น (100°C) ข้อผิดพลาดต้องไม่เกิน $\pm 0.2^{\circ}\text{C}$ ทำซ้ำทุก 5 วันหรือหลังจากการใช้งาน 50 ครั้ง การทดลองดำเนินการในห้องปฏิบัติการที่มีการควบคุมสภาพแวดล้อม อุณหภูมิห้องที่ $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$ และความชื้นสัมพัทธ์ $65 \pm 5\%$ ตลอดการทดลอง การควบคุมสภาพแวดล้อมเหล่านี้สำคัญต่อความแม่นยำของการวัดอุณหภูมิและการสูญเสียความร้อนของถุงประคบ

การทดลองแบ่งออกเป็น 4 ขั้นตอนหลัก ได้แก่ การเตรียมตัวอย่าง การให้ความร้อน การวัดอุณหภูมิ และการบันทึกข้อมูล ก่อนเริ่มการทดลองแต่ละครั้ง ถุงประคบจะถูกเก็บไว้ในสภาพแวดล้อมเดียวกับห้องทดลอง เป็นเวลาอย่างน้อย 30 นาที เพื่อให้มีสมดุลทางความร้อนกับสิ่งแวดล้อม การให้ความร้อนด้วยไมโครเวฟ โดยวางถุงประคบในตำแหน่งกึ่งกลางของจานหมุน เปิดเครื่องไมโครเวฟที่ กำลัง 850 วัตต์ เป็นเวลา 2 นาที จากนั้นนำถุงประคบออกมาทำการวัดอุณหภูมิทันที ด้วยการเสียบ

เทอร์โมมิเตอร์เข้าไปในกึ่งกลางของถุงประคบ เพื่อให้ได้อุณหภูมิแกนกลาง (core temperature) ที่แท้จริง การวัดอุณหภูมิทำทุก ๆ 1 นาที เป็นเวลา 15 นาที โดยแทงเทอร์โมมิเตอร์ลงไปในแต่ละตำแหน่งเดิมทุกครั้ง เพื่อความสม่ำเสมอของการวัด การอ่านค่าอุณหภูมิกระทำหลังจากที่เทอร์โมมิเตอร์คงที่เป็นเวลา 30 วินาที การทดลองดำเนินการในห้องปฏิบัติการที่ควบคุมอุณหภูมิ $25 \pm 2^{\circ}\text{C}$ และความชื้น $65 \pm 5\%$ ถุงประคบวางใส่ในกล่องฉนวนเพื่อป้องกันความร้อนกระจายตัวออกสู่สิ่งแวดล้อม ทุกการทดลองทำซ้ำ 9 ครั้ง ($n=9$) ระหว่างการทดลองแต่ละซ้ำมีการพักเว้นระยะเวลา 4 ชั่วโมง เพื่อให้อุปกรณ์และวัสดุกลับสู่อุณหภูมิห้อง

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การวิเคราะห์เบื้องต้นใช้สถิติเชิงพรรณนา (descriptive statistics) ประกอบด้วย ค่าเฉลี่ย (mean) ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (standard deviation) และช่วงความเชื่อมั่น 95% (95% confidence interval) เปรียบเทียบประสิทธิภาพการเก็บกักความร้อนด้วย One-way ANOVA เพื่อเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยอุณหภูมิของถุงประคบระหว่างชนิดเมล็ดถั่วต่าง ๆ และเวลา (นาที) ต่าง ๆ การทดสอบเปรียบเทียบรายคู่ ด้วย Tukey's Honestly Significant Difference (HSD) test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($\alpha = 0.05$) โดยใช้โปรแกรม SPSS วิเคราะห์ผลทางสถิติ

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบของถุงประคบร้อนที่บรรจุถั่วพืชตระกูลถั่วเขียวผสมกับเมล็ดถั่วชนิดอื่นสำหรับการศึกษาประสิทธิภาพการเก็บกักอุณหภูมิ

ถุงประคบที่	ชนิดธัญพืชตระกูลถั่วและน้ำหนัก	ชนิดธัญพืชตระกูลถั่วและน้ำหนัก
1	เมล็ดถั่วเขียว 100 กรัม	เมล็ดถั่วพุ่ม 100 กรัม
2	เมล็ดถั่วเขียว 100 กรัม	เมล็ดถั่วเหลือง 100 กรัม
3	เมล็ดถั่วเขียว 100 กรัม	เมล็ดถั่วแปบ 100 กรัม
4	เมล็ดถั่วเขียว 100 กรัม	เมล็ดถั่วขอ 100 กรัม
5	เมล็ดถั่วเขียว 100 กรัม	เมล็ดถั่วลิสง 100 กรัม
6	เมล็ดถั่วเขียว 100 กรัม	เมล็ดถั่วแดงหลวง 100 กรัม



ภาพที่ 1 เมล็ดถั่วที่ใช้ในการวิจัย A ถั่วแดงหลวง, B ถั่วลิสง, C ถั่วขอ, D ถั่วแปบดำ, E ถั่วเขียว, F ถั่วพุ่ม และ G ถั่วเหลือง



ผลการวิจัย

ผลการเก็บกักอุณหภูมิของถุงประคบธัญพืชตระกูลถั่ว

ถุงประคบบรรจุธัญพืชเมล็ดถั่วเขียวเมื่อนำมาผสมกับเมล็ดถั่วชนิดต่าง ๆ ถุงละ 2 ชนิด ๆ ละ 100 กรัม เมื่อนำไปอบด้วยเครื่องไมโครเวฟที่กำลังความร้อน 850 วัตต์ เป็นเวลา 2 นาที จากการทดลองเปรียบเทียบประสิทธิภาพการเก็บกักอุณหภูมิของถุงประคบร้อนที่บรรจุเมล็ดถั่วเขียวผสมกับเมล็ดถั่วชนิดต่าง ๆ เป็นเวลา 15 นาที พบว่าทุกการทดลองมีการเก็บกักความร้อนของถุงประคบชนิดต่าง ๆ ตลอดช่วงเวลา 15 นาที ได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยถุงประคบที่บรรจุเมล็ดถั่วเขียวผสมถั่วพุ่มแสดงประสิทธิภาพการเก็บกักความร้อนดีที่สุด โดยมีอุณหภูมิสูงสุดที่ $68.00 \pm 0.70^{\circ}\text{C}$ ในนาทีแรก และยังคงรักษาอุณหภูมิได้ถึง $37.33 \pm 1.41^{\circ}\text{C}$ ในนาทีสุดท้าย รองลงมาคือ ถุงประคบถั่วเขียวผสมถั่วเหลืองมีประสิทธิภาพการเก็บกักความร้อนดี เริ่มต้นที่ $65.67 \pm 0.70^{\circ}\text{C}$ และลดลงเป็น $37.89 \pm 1.45^{\circ}\text{C}$ ซึ่งแสดงความเสถียรของการเก็บกักความร้อนที่ดี รองลงมาคือ ถุงประคบถั่วเขียวผสมถั่วแปบ เริ่มต้นที่ $63.33 \pm 1.00^{\circ}\text{C}$ และลดลงเป็น $33.67 \pm 1.00^{\circ}\text{C}$ รองลงมาคือ ถุงประคบถั่วเขียวผสมถั่วแดงหลวงมีประสิทธิภาพปานกลาง เริ่มต้นที่ $61.44 \pm 0.88^{\circ}\text{C}$ และลดลงเป็น $32.33 \pm 1.00^{\circ}\text{C}$ ส่วนถุงประคบถั่วเขียวผสมถั่วขอมีประสิทธิภาพอยู่ในระดับที่ค่อนข้างน้อย เริ่มต้นที่ $62.78 \pm 0.66^{\circ}\text{C}$ และลดลงเป็น $36.22 \pm 1.39^{\circ}\text{C}$ ถั่วขอมและถุงประคบถั่วเขียวผสมถั่วลิสงมีประสิทธิภาพการเก็บกักความร้อนน้อยที่สุด เริ่มต้นที่ $63.67 \pm 0.86^{\circ}\text{C}$ และลดลงเป็น $29.67 \pm 1.00^{\circ}\text{C}$ แสดงผลในตารางที่ 2

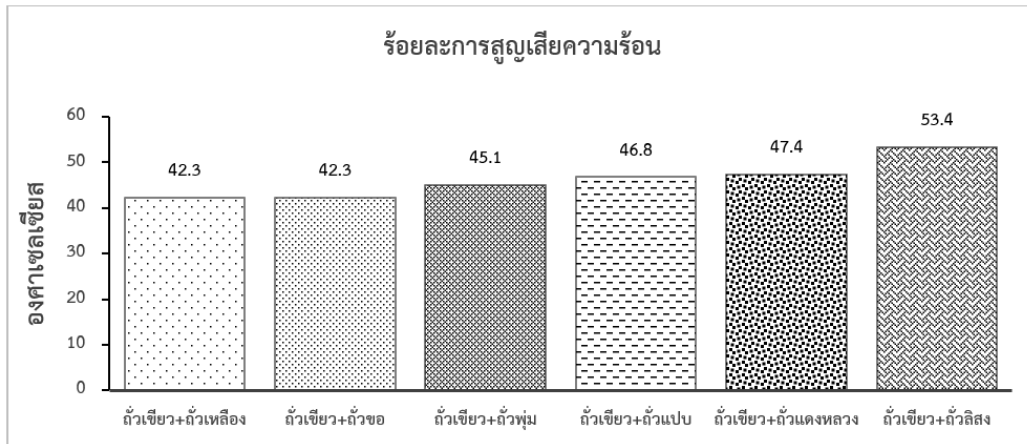
ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยและค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานการเก็บกักอุณหภูมิของถุงประคบธัญพืชตระกูลถั่ว (n=9)

เวลา (นาที)	อุณหภูมิของธัญพืชตระกูลถั่ว (องศาเซลเซียส) (mean $\pm$ SD)					
	ถั่วเขียว+ถั่วพุ่ม	ถั่วเขียว+ถั่วเหลือง	ถั่วเขียว+ถั่วแปบ	ถั่วเขียว+ถั่วขอม	ถั่วเขียว+ถั่วลิสง	ถั่วเขียว+ถั่วแดง
T1	68.00 $\pm$ 0.70*	65.67 $\pm$ 0.70*	63.33 $\pm$ 1.00*	62.78 $\pm$ 0.66*	63.67 $\pm$ 0.86*	61.44 $\pm$ 0.88*
T2	67.33 $\pm$ 1.00*	64.56 $\pm$ 0.72*	62.44 $\pm$ 1.01*	61.67 $\pm$ 0.70*	62.67 $\pm$ 0.86*	60.67 $\pm$ 0.70*
T3	65.78 $\pm$ 1.30*	62.78 $\pm$ 0.66*	61.44 $\pm$ 1.01*	60.11 $\pm$ 0.78*	61.33 $\pm$ 1.00*	59.11 $\pm$ 0.78*
T4	63.33 $\pm$ 1.32*	61.11 $\pm$ 0.78*	59.67 $\pm$ 1.00*	58.44 $\pm$ 0.88*	59.78 $\pm$ 0.97*	58.89 $\pm$ 0.60*
T5	61.00 $\pm$ 0.68	59.22 $\pm$ 1.09*	57.67 $\pm$ 0.70*	56.89 $\pm$ 0.92*	56.89 $\pm$ 1.05*	56.33 $\pm$ 0.89*
T6	58.44 $\pm$ 0.88	57.44 $\pm$ 1.01*	55.00 $\pm$ 1.00*	54.44 $\pm$ 1.13*	53.78 $\pm$ 1.48*	53.78 $\pm$ 1.20*
T7	55.78 $\pm$ 0.97	55.44 $\pm$ 0.88*	51.78 $\pm$ 0.83*	51.89 $\pm$ 0.78*	51.00 $\pm$ 1.22*	51.33 $\pm$ 1.00*
T8	52.44 $\pm$ 1.01*	52.78 $\pm$ 0.97*	48.44 $\pm$ 0.88*	50.22 $\pm$ 0.88*	48.56 $\pm$ 1.30*	49.67 $\pm$ 1.00*
T9	50.11 $\pm$ 0.78*	50.56 $\pm$ 0.88*	45.33 $\pm$ 1.00*	48.33 $\pm$ 1.00*	45.67 $\pm$ 1.22*	47.22 $\pm$ 0.83*
T10	48.11 $\pm$ 1.05*	48.11 $\pm$ 0.92*	41.89 $\pm$ 1.05*	46.56 $\pm$ 1.13*	42.89 $\pm$ 1.16*	44.11 $\pm$ 1.26*
T11	45.78 $\pm$ 1.20*	46.22 $\pm$ 0.97*	40.22 $\pm$ 0.83*	44.00 $\pm$ 1.32*	40.22 $\pm$ 1.20*	41.33 $\pm$ 1.00*
T12	43.00 $\pm$ 1.22*	43.56 $\pm$ 1.01*	38.33 $\pm$ 1.00*	41.44 $\pm$ 1.23*	38.00 $\pm$ 1.22*	39.67 $\pm$ 1.00*
T13	40.30 $\pm$ 1.00*	41.11 $\pm$ 1.05*	37.00 $\pm$ 0.86*	39.56 $\pm$ 1.13*	35.33 $\pm$ 1.22*	38.11 $\pm$ 0.78*
T14	38.67 $\pm$ 1.32*	39.78 $\pm$ 0.97*	35.44 $\pm$ 0.88*	37.78 $\pm$ 1.20*	32.33 $\pm$ 1.22*	35.89 $\pm$ 0.78*
T15	37.33 $\pm$ 1.41	37.89 $\pm$ 1.45	33.67 $\pm$ 1.00*	36.22 $\pm$ 1.39*	29.67 $\pm$ 1.00*	32.33 $\pm$ 1.00*

* อุณหภูมิมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ $p < 0.05$

ร้อยละการสูญเสียความร้อนของถุงประคบธัญพืชตระกูลถั่ว

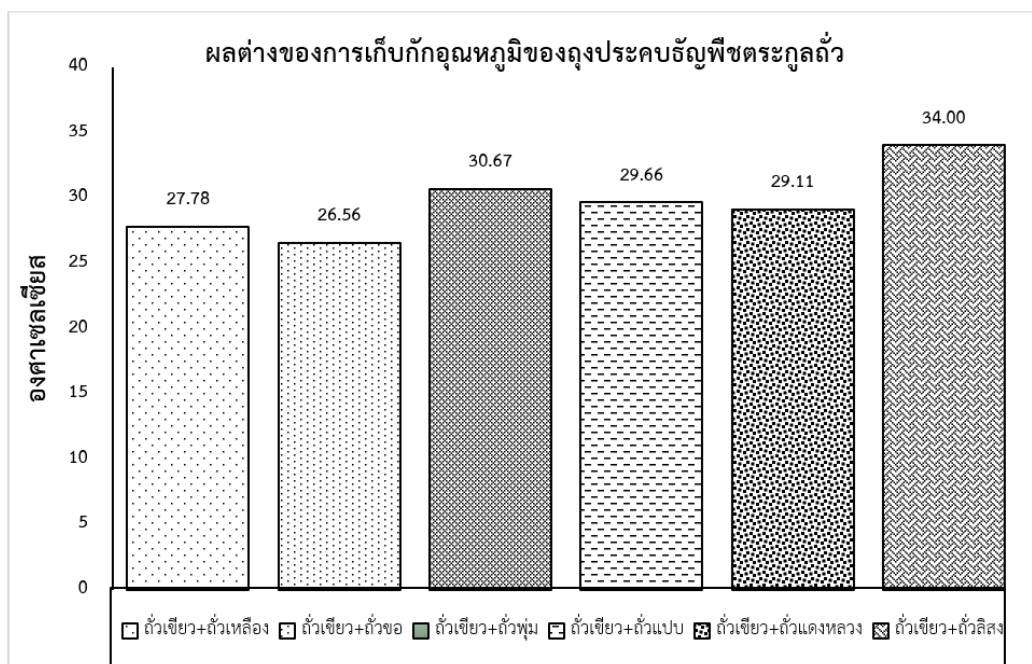
ผลการศึกษาร้อยละการสูญเสียความร้อนของถุงประคบธัญพืชตระกูลถั่วในระยะเวลา 15 นาที พบปฏิสัมพันธ์ระหว่างชนิดเมล็ดถั่วที่ผสมกับถั่วเขียวและช่วงเวลาทดลองอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยถุงประคบถั่วเขียวผสมถั่วลิสงมีการสูญเสียความร้อนสูงสุด (53.4%) รองลงมาคือ ถั่วแปบ (46.8%) ถั่วแดงหลวง (47.4%) และถั่วเหลืองมีการสูญเสียความร้อนน้อยที่สุด (42.3%) แสดงผลในภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ร้อยละการสูญเสียความร้อนของถุงประคบธัญพืชตระกูลถั่ว

ผลต่างของการเก็บกักอุณหภูมิของถุงประคบธัญพืชตระกูลถั่ว

ผลต่างของการเก็บกักอุณหภูมิของถุงประคบธัญพืชตระกูลถั่ว พบว่าการเปรียบเทียบผลต่างของการเก็บกักอุณหภูมิระหว่างถุงประคบธัญพืชตระกูลถั่วแต่ละชนิดเป็นระยะเวลา 15 นาที พบว่าถุงประคบถั่วเขียวผสมถั่วขาว มีผลต่างการเก็บกักอุณหภูมิน้อยที่สุดจากอุณหภูมิเริ่มต้นเฉลี่ยในนาที่ที่ 1 ถึง 15 มีค่าเท่ากับ 26.56°C รองลงมาคือ ถุงประคบถั่วเขียวผสมถั่วเหลือง (27.78°C) ถุงประคบถั่วเขียวผสมถั่วแดงหลวง (29.11°C) ถุงประคบถั่วเขียวผสมถั่วแปบ (29.66°C) ถุงประคบถั่วเขียวผสมถั่วพุ่ม (30.67°C) และถุงประคบถั่วเขียวผสมถั่วลิสงมีผลต่างการเก็บกักอุณหภูมิมากที่สุด (34.00°C) ตามลำดับ แสดงผลในภาพที่ 3

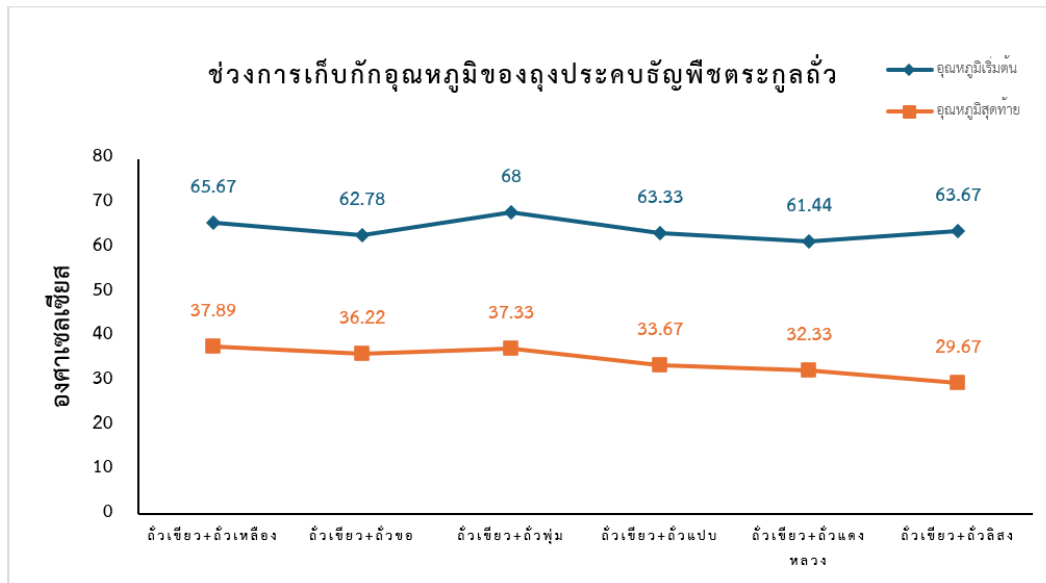


ภาพที่ 3 ผลต่างของการเก็บกักอุณหภูมิของถุงประคบธัญพืชตระกูลถั่วในช่วงระยะเวลา 15 นาที



ผลของช่วงการเก็บกักอุณหภูมิของอุ้งประคบธัญพืชตระกูลถั่วจากอุณหภูมิเริ่มต้นจนถึงอุณหภูมิสุดท้าย

ผลการวิเคราะห์ช่วงการเก็บกักอุณหภูมิ ระยะเวลา 15 นาที พบความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) อุ้งประคบถั่วเขียวผสมถั่วลิสงมีช่วงการเก็บกักอุณหภูมิกว้างที่สุด โดยมีอุณหภูมิลดลงจาก $63.67 \pm 0.86^{\circ}\text{C}$ เป็น $29.67 \pm 1.00^{\circ}\text{C}$ คิดเป็นช่วงการเก็บกัก 34.00°C รองลงมาคือ ถั่วเขียวผสมถั่วพุ่ม (30.67°C) ถั่วเขียวผสมถั่วแปบ (29.66°C) ถั่วเขียวผสมถั่วแดงหลวง (29.11°C) ถั่วเขียวผสมถั่วเหลือง (27.78°C) และถั่วเขียวผสมถั่วหอมมีช่วงการเก็บกักอุณหภูมิแคบที่สุด (26.56°C) ตามลำดับ การเปรียบเทียบรายคู่พบว่าอุ้งประคบถั่วเขียวผสมถั่วขอและถั่วเขียวผสมถั่วเหลืองมีช่วงการเก็บกักอุณหภูมิแคบกว่าอุ้งประคบชนิดอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) แสดงผลในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 ผลของช่วงการเก็บกักอุณหภูมิของอุ้งประคบธัญพืชตระกูลถั่วระยะเวลา 15 นาที

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

การศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงประสิทธิภาพการเก็บกักความร้อนระหว่างธัญพืชตระกูลถั่วชนิดต่างๆ ซึ่งสะท้อนถึงคุณสมบัติทางกายภาพเฉพาะของแต่ละสายพันธุ์ที่มีผลต่อการประยุกต์ใช้ในการแพทย์แผนไทย ผลการวิจัยพบว่าอุ้งประคบถั่วเขียวผสมถั่วพุ่มมีประสิทธิภาพสูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัย Ravikanth และคณะ [17] ที่ระบุว่าถั่วเขียวมีค่าความจุความร้อนจำเพาะ และค่าการนำความร้อนที่เพิ่มขึ้นตามปริมาณความชื้นและอุณหภูมิ โดยมีค่าความจุความร้อนจำเพาะอยู่ระหว่าง $1.63\text{--}2.45 \text{ kJ/kg}^{\circ}\text{C}^{-1}$ และค่าการนำความร้อนอยู่ระหว่าง $0.092\text{--}0.141 \text{ W/mK}$ เมื่อความชื้นเพิ่มจาก 9.9% เป็น 18.3% และอุณหภูมิเพิ่มจาก 10°C เป็น 50°C คุณสมบัติเหล่านี้ช่วยให้ถั่วเขียวสามารถดูดซับและปล่อยความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ [17] สอดคล้องกับการศึกษาของ Arku และคณะ [16] ที่ระบุว่าธัญพืชตระกูลถั่วมีคุณสมบัติในการรักษารูปทรงเมื่อได้รับความร้อน ไม่เกิดการเปลี่ยนแปลงทางเคมีในช่วงอุณหภูมิที่ใช้ในการบำบัด และมีความปลอดภัยต่อผู้ใช้นอกจากนี้ โครงสร้างของถั่วพุ่มมีการกระจายตัวของแป้งและโปรตีนอย่างสม่ำเสมอส่งเสริมให้เกิดการเก็บกักความร้อนได้อย่างมีประสิทธิภาพ การที่อุ้งประคบถั่วเขียวผสมถั่วลิสงแสดงประสิทธิภาพน้อยที่สุดนั้นอาจเป็นผลมาจากคุณสมบัติทางกายภาพของถั่วลิสง มีการกระจายความร้อน (thermal diffusivity) สูง ซึ่งแม้จะช่วยให้ความร้อนกระจายตัวได้เร็วภายในเมล็ด แต่กลับทำให้การสูญเสียความร้อนสู่สิ่งแวดล้อมเกิดขึ้นได้เร็วตามไปด้วย [27] นอกจากนี้แม้ว่าผู้วิจัยจะคัดเลือกเฉพาะเมล็ดที่มีความสมบูรณ์ ไม่แตกหัก ไม่เสียหาย และไม่มีอาการปนเปื้อนของเชื้อโรค แต่รูปร่างและขนาดที่หลากหลายตามธรรมชาติของถั่วลิสงยังคงส่งผลให้เกิดช่องว่างของอากาศมากขึ้นเมื่อบรรจุในอุ้งประคบ ซึ่งเพิ่มการสูญเสียความร้อนผ่านการพาความร้อน (convection) และการแผ่รังสี (radiation) การที่อุ้งประคบถั่วเขียวผสมถั่วพุ่มสามารถรักษาอุณหภูมิในช่วง $40\text{--}45^{\circ}\text{C}$ ได้นาน

ถึง 12.5 นาที่ นั้นมีความสำคัญอย่างยิ่งเนื่องจากช่วงอุณหภูมิดังกล่าวเป็นช่วงที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการบำบัดอาการปวดกล้ามเนื้อด้วยความร้อน (thermotherapy) ตามหลักการทางกายภาพบำบัด [2] ในช่วงอุณหภูมิดังกล่าวความร้อนจะกระตุ้นการขยายตัวของหลอดเลือด (vasodilation) เพิ่มการไหลเวียนของเลือด และส่งเสริมการเผาผลาญ (metabolic activity) โดยไม่ก่อให้เกิดความเสียหายต่อเนื้อเยื่อ [7] การศึกษาของ Petrofsky และคณะ [7] ที่วิเคราะห์ประสิทธิภาพของความร้อนขึ้นเปรียบเทียบกับความร้อนแห้งในการบำบัดอาการปวดกล้ามเนื้อ พบว่าการประยุกต์ใช้ความร้อนในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสามารถส่งผลต่ออาการปวดและการเคลื่อนไหวได้อย่างมีนัยสำคัญ สอดคล้องกับผลการวิจัยนี้ที่แสดงให้เห็นว่าการผสมเมล็ดถั่วที่เหมาะสมสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการเก็บกักความร้อนในช่วงอุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการบำบัด สอดคล้องกับการศึกษาของ Matouk และคณะ [11] ที่วิเคราะห์ความจุความร้อนจำเพาะของถั่ว $1.57\text{--}2.45 \text{ kJ/kg}^{-1}\text{C}^{-1}$ นอกจากนี้โครงสร้างโปรตีนและแป้งในถั่วยังมีปฏิสัมพันธ์กันผ่านแรงยึดเหนี่ยว hydrophobic และการเกิดเจล เมื่อได้รับความร้อน ส่งผลให้เกิดโครงสร้างที่สามารถกักเก็บน้ำและความร้อนได้ดี ทำให้เก็บกักความร้อนและรักษาอุณหภูมิได้นานขึ้น [18] งานวิจัยก่อนหน้านี้แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการประคบสมุนไพรไทยในการลดอาการปวดได้อย่างมีประสิทธิภาพ [5] การวิจัยนี้ทำให้ได้ข้อมูลทางวิชาการสำคัญที่การศึกษาก่อนหน้านี้มุ่งเน้นเฉพาะคุณสมบัติทางเภสัชกรรมของสมุนไพร โดยให้ความสำคัญกับคุณสมบัติทางกายภาพของตัวกลางในการเก็บกักความร้อนน้อย การศึกษาการเลือกใช้วัสดุธรรมชาติที่มีประสิทธิภาพสูงสุดในการเก็บกักความร้อนจึงมีความสำคัญต่อการบำบัด

การวิจัยครั้งนี้สร้างองค์ความรู้ใหม่เกี่ยวกับการใช้ธัญพืชตระกูลถั่วเป็นสื่อเก็บกักความร้อน โดยผลการวิจัยนี้สามารถนำไปใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานในการพัฒนาอุปกรณ์ประคบร้อนเชิงพาณิชย์โดยใช้ถั่วเขียวผสมถั่วพุ่มเป็นสื่อเก็บกักความร้อนหลัก การบูรณาการ ภูมิปัญญาดั้งเดิมเข้ากับความรู้ทางวิทยาศาสตร์สมัยใหม่เป็นตัวอย่างการพัฒนาองค์ความรู้ที่ยั่งยืนที่สร้างประโยชน์ทั้งทางวิชาการ เศรษฐกิจ และสังคม ผลการวิจัยยังเป็นข้อมูลพื้นฐานสำคัญในการพัฒนาและยกระดับการแพทย์แผนไทยให้มีมาตรฐานเทียบเท่าสากล พร้อมทั้งเป็นรากฐานในการสร้างนวัตกรรมสุขภาพที่มีเอกลักษณ์ความเป็นไทย

ข้อเสนอแนะ

1. ควรทำการเปรียบเทียบกับสื่อเก็บกักความร้อนที่ใช้กันทั่วไป เช่น เจลซิลิกา rice sock หรือ hot water bottle เพื่อให้เห็นข้อได้เปรียบที่ชัดเจน
2. ควรทำการประเมินความปลอดภัยในการใช้งานจริงและประสิทธิผลทางคลินิก

เอกสารอ้างอิง

1. Daga H, Raval S, Toshikhane H, Jethava N. Material and methods of different heat therapy. World J Pharm Res 2019;8(13):152-68.
2. Chou R, Gordon DB, de Leon-Casasola OA, Rosenberg JM, Bickler S, Brennan T, et al. Management of postoperative pain: A clinical practice guideline from the American pain society, the American Society of Regional Anesthesia and Pain Medicine, and the American Society of Anesthesiologists' committee on regional anesthesia, executive committee, and administrative council. J Pain 2016;17:131-57.
3. Brewer GJ, Chen M, Rodriguez K. The science of heat therapy. Biomedical Odyssey [Internet]. 2023 [cited 2025 May 27]. Available from: <https://biomedicalodyssey.blogs.hopkinsmedicine.org/2023/12/the-science-of-heat-therapy/>
4. กระทรวงการต่างประเทศ. นวดไทย ได้รับการขึ้นทะเบียนเป็นมรดกวัฒนธรรมที่จับต้องไม่ได้ขององค์การยูเนสโก [อินเทอร์เน็ต]. 2565 [เข้าถึงเมื่อ 27 พ.ค. 258]. เข้าถึงได้จาก: <https://www.mfa.go.th/th/content/113200-“นวดไทย”-ได้รับการขึ้นทะเบียนเป็นมรดกวัฒนธรรมที่จับต้องไม่ได้ขององค์การยูเนสโก%3Fpage=5d5bd3c915e39c306002a90d&menu=5d5bd3c915e39c306002a90e>



5. Ayurah. Thai herbal compress massage for herbal healing. Ayurah Spa & Wellness Centre [Internet]. 2023 [cited 2025 May 27]. Available from: <https://www.aleenta.com/blog/thai-herbal-compress-massage-for-herbal-healing/>
6. How to make a warm compress at home and when to use it. Healthline [Internet]. 2023 [cited 2025 May 27]. Available from: <https://www.healthline.com/health/how-to-make-a-warm-compress>
7. Petrofsky J, Berk L, Bains G, Khowailed IA, Hui T, Granado M, et al. Moist heat or dry heat for delayed onset muscle soreness. *J Clin Med Res* 2013;5(6):416-25.
8. Healthline. Hot and cold packs A thermochemistry activity. Carolina Biological Supply [Internet]. 2024 [cited 2025 May 27]. Available from: <https://www.carolina.com/teacher-resources/Interactive/hot-and-cold-packs-a-thermochemistry-activity/tr29415.tr>
9. Lee G. Evidence-Based Strategies for Warm Compress Therapy in Meibomian Gland Dysfunction. *Ophthalmol Ther* 2024;13:2481-93.
10. Chan KY, Tsai WC, Chiang CY, Sheu ML, Huang CY, Tsai YC, et al. Ameliorative Potential of Hot Compress on Sciatic Nerve Pain in Chronic Constriction Injury-Induced Rat Model. *Front Synaptic Neurosci* 2022;14:1-12.
11. Matouk A, El-Kholy M, Tharwat A, Shamala S. Thermal Properties of some Legume Seeds. *j soil sci agric eng* 2018;9(7):261-7.
12. Adeyanju J, Abioye A, Adekunle A, Ajala A, Oloyede A, Afolayan E. Assessment of Physical and Thermal Properties of Velvet Bean (*Mucuna pruriens*) as Potentials for Development of Processing Machines. *FUOYE J Eng Technol* 2022;7(2):122-5.
13. Ge J, Sun C, Chang Y, Li S, Zhang Y, Fang Y. Understanding the differences in heat-induced gel properties of twelve legume proteins: A comparative study. *Food Res Int* 2022;163:112134.
14. Fasina O, Tyler B, Pickard M, Zheng G, Wang N. Effect of infrared heating on the properties of legume seeds. *Int J Food Sci Technol* 2001;36:79-90.
15. Ricci L, Umiltà E, Righetti M, Messina T, Zurlini C, Montanari A, et al. On the thermal behavior of protein isolated from different legumes investigated by DSC and TGA. *J Sci Food Agric* 2018;98(14):5368-77.
16. Arku AY, Aviara NA, Ahamefula SC. Specific heat of selected legumes and cereal grains grown in North Eastern Nigeria. *Arid Zone J Eng Technol Environn* 2012;8:105-44.
17. Ravikanth L, Jayas D, Alagusundaram K, Chelladurai V. Measurement of thermal properties of mung bean (*Vigna radiata*). *Transactions of the ASABE* 2012;55: 2245-50.
18. Gu Y, Chen B, Xu R, Liu T, Huangfu J, Zhou F, et al. Effects of heat treatment at different moisture of mung bean flour on the structural, gelation and in vitro digestive properties of starch. *Food chemistry* 2024;443:1-11.
19. องค์การสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. ข้อมูลทรัพยากร : สถิติการเกษตรของประเทศไทย ปี 2567. [อินเทอร์เน็ต]. 2567 [เข้าถึงเมื่อ 27 พ.ค. 2568]. เข้าถึงได้จาก: <https://data.go.th/dataset/dataoae3101>



20. Jongdee S, Fukai S, Cooper M. Identification of superior soybean cultivars through the indication of specific adaptabilities within duo-environments for year-round soybean production in Northeast Thailand. *Agronomy* 2021;11(3):585.
21. How to make a warm compress: Wet and dry options. Verywell Health [Internet]. 2024 [cited 2025 May 27]. Available from: <https://www.verywellhealth.com/how-to-make-a-warm-compress-8706876>
22. ไอลดา ชินทร์นัลย์, มารศรี เกตุสรีระ, น้ำทิพย์ สาสีพวง. ประสิทธิภาพของถุงร้อนธัญพืชในการเตรียมอุณหภูมิและเก็บรักษาอุณหภูมิ. *TUH Journal online* 2564;6(3):1-11.
23. Liu Y, Li J, Zhu Y, Jones A, Rose R, Song Y. Heat Stress in Legume Seed Setting: Effects, Causes, and Future Prospects. *Front.Plant Sci* 2019;10:938.
24. Dutta A, Trivedi A, Nath C, Gupta D, Hazra K. A comprehensive review on grain legumes as climate-smart crops: challenges and prospects. *Environ Chall* 2022;7:1-13.
25. Allen E, Alvarez S. International Rules for Seed Testing 2020; The International Seed Testing Association: Bassersdorf, Switzerland, 2020.
26. Rishi A, Huff K, Han S, Mai T, Zhao Y, Jang Y, et al. Validation of the Atlas™ Campylobacter Detection Assay: AOAC Performance Tested Method SM 032101. *Journal of AOAC International* 2021;104(6):1620-33.
27. Branković-Radojčić D, Milivojević M, Petrović T. Differences in national and international seed testing rules. *Selekcija i semenarstvo* 2023;29(2):25-38.
28. Tang J, Feng H, Lau M. Microwave heating in food processing. In: Sun DW, editor. Thermal food processing: new technologies and quality issues. Boca Raton: CRC Press; 2006.
29. FDA U.S. Food and Drug Administration. Microwave Ovens [Internet]. 2023 [cited 2025 May 27]. Available from: [https://www.fda.gov/radiation-emitting-products/resources-you-radiation-emitting-products/microwave-ovens#:~:text=Microwave%20Oven%20Safety%20Standard,-Through%20its%20Center&text=A%20Federal%20standard%20\(21%20CFR,level%20known%20to%20harm%20people](https://www.fda.gov/radiation-emitting-products/resources-you-radiation-emitting-products/microwave-ovens#:~:text=Microwave%20Oven%20Safety%20Standard,-Through%20its%20Center&text=A%20Federal%20standard%20(21%20CFR,level%20known%20to%20harm%20people).
30. ASTM E1-14 (2020). Standard specification for ASTM liquid-in-glass thermometers. West Conshohocken, PA: ASTM International; 2020.



ความหนืดของกลีเซอรินตามกฎของสโตกส์และสมการลันเดา-ลิฟชิตซ์ที่ทดสอบ

ด้วยการทดลองการสั่นแบบฮาร์โมนิกที่หน่วงต่ำ

The Viscosity of Glycerin Based on Stokes's Law and the Landau-Lifshitz Equation Tested with the Underdamped Harmonic Oscillation Experiment

อนันต์ อาแว¹ ปรัชญา ตั้งจิตสมบุญ² จามร วสุรัตน์มณี¹ พินธุติฐ กลิ่นขจร^{1*}

เกวลี นิลกำแหง³ และ ดุสิต งามรุ่งโรจน์¹

¹วิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ กรุงเทพฯ 10800

²ภาควิชาการศึกษาทั่วไป คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีสุขภาพ มหาวิทยาลัยนวมินทราธิราช กรุงเทพฯ 10300

³ศูนย์วิศวกรรมและเทคโนโลยีนิวเคลียร์ขั้นสูง ฝ่ายนิวเคลียร์ฟิวชันและพลาสมา

สถาบันเทคโนโลยีนิวเคลียร์แห่งชาติ (องค์การมหาชน) กรุงเทพฯ 10900

Anan Awae¹, Prajya Tangjitsomboon², Jamon Wasuratmanee¹, Pinthudit Klinkajorn^{1*},

Kewalee Nilgumhangand³ and Dusit Ngamrungronj¹

¹College of Industrial Technology, King Mongkut's University of Technology North, Bangkok 10800

²Department of General Education, Faculty of Science and Health Technology, Navamindradhiraj University, Bangkok 10300

³Advanced Engineering and Nuclear Technology Center, Nuclear Fusion and Plasma Section, Thailand Institute of Nuclear Technology (Public Organization), Bangkok 10900

*Corresponding author: Pinthudit.k@cit.kmutnb.ac.th

Received: 30 July 2025/ Revised: 16 October 2025/ Accepted: 20 October 2025

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ศึกษาค่าความหนืดระหว่างแบบจำลองสมการลันเดา-ลิฟชิตซ์ (Landau-Lifshitz) และกฎของสโตกส์ โดยการสั่นแบบฮาร์โมนิกที่หน่วงต่ำโดยเก็บข้อมูลการเคลื่อนที่ของลูกเหล็กแล้วประมวลผลด้วยโปรแกรม tracker เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทาน (γ) ความถี่เชิงมุมของการสั่น (ω) เปรียบเทียบค่าความหนืดจากเครื่องวัดความหนืดผลการทดลองพบว่าค่า γ และค่าความหนืดเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของกลีเซอรินแต่ค่า ω ลดลง ค่าความหนืดจากสมการของลันเดา-ลิฟชิตซ์มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากเครื่องมือวัดโดยกฎของสโตกส์สามารถใช้สำหรับอธิบายค่าความหนืดในขณะความเร็วคงที่ ซึ่งแตกต่างจากสมการแบบจำลองลันเดา-ลิฟชิตซ์ที่มีการพิจารณาผลของวัตถุที่ความเร็วไม่คงที่ เมื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างค่า γ กับค่าความหนืด พบว่ามีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะยัดของสปริง ที่ระยะยัดของสปริงเท่ากับ 2 cm มีการส่ายบนระนาบน้อยที่สุดและมีค่าความหนืดใกล้เคียงกับเครื่องมือวัด แต่ที่กลีเซอรินความเข้มข้น 70% โดยปริมาตรมีค่าที่แตกต่างเทียบกับเครื่องมือวัดมากกว่า 70 % โดยหนึ่งในสาเหตุเกิดจากการที่ของเหลวเกาะที่ผิววัตถุส่งผลทำให้มวลโดยรวมของวัตถุมี



การเปลี่ยนแปลงส่งผลต่อการคำนวณหาค่าความหนืด จึงได้ข้อสรุปว่าที่ระยะยืดของสปริงเท่ากับ 2 cm และความเข้มข้น 10% 30% และ 50% ที่คำนวณด้วยสมการแบบจำลองลันเดา-ลิฟชิตซ์ค่าความหนืดจากการทดลองสอดคล้องกับเครื่องมือวัดซึ่งเหมาะสำหรับการพัฒนาการเรียนการสอนในชั้นเรียน

คำสำคัญ: กลีเซอริน, แบบจำลองสมการลันเดา-ลิฟชิตซ์, กฎของสโตกส์, ค่าความหนืด, ฮาร์มอนิกที่หน่วงต่ำ

Abstract

This research aimed to study the viscosity between the Landau-Lifshitz equation model and Stokes' law by underdamped harmonic oscillation. The data of the steel ball's movement is collected and processed by tracker program to find the resistance coefficient (γ) and the angular velocity of the vibration (ω). Comparison of viscosity values from viscosity meter. The results showed that γ and the viscosity value increased with the concentration of glycerin, but the ω value decreased. The viscosity values from the Landau-Lifshitz equation are close to the values obtained from the instrument. The Stokes' law can be used to describe the viscosity values while constant velocity, unlike the Landau-Lifshitz model equations which consider the effect of objects at non-constant velocity. When studying the relationship between the value of γ and viscosity, it was found that the tendency increased with the length of spring extension. At the stretch distance of 2 cm, there was less in-plane oscillation. Hence, the viscosity at the stretch distance of 2 cm close to the measured instrument, but at 70% glycerin concentration, the value was more than 70% different from the measured instrument. However, at 70% glycerin concentration, the value is more than 70% different from the measurement device. One of the reasons is that at high concentrations, some of the glycerin is attached to the object's surface. Therefore, it was concluded that the stretch distance of 2 cm and the concentration of 10%, 30%, and 50%, the experimental viscosity was consistent with the measuring instruments which are suitable for developing classroom teaching.

Keywords: Glycerin, Landau-lifshitz model equation, Stokes' law, Viscosity, Underdamped harmonic oscillation

บทนำ

การเรียนรู้เนื้อหาเกี่ยวกับของไหลทั้งในระดับมัธยมศึกษาและระดับปริญญาตรีได้มีการสอนและการทดลองเรื่องความหนืดซึ่งทำการศึกษาภายใต้แรงต้านในของเหลว ในระดับมัธยมศึกษาได้คำนวณหาค่าความหนืดด้วยกฎของสโตกส์ (Stoke's law) [1] โดยพิจารณาจากการปล่อยลูกเหล็กลงสู่ของเหลวโดยทำการบันทึกผลการทดลองในช่วงที่ลูกเหล็กมีอัตราเร็วคงที่ซึ่งลูกเหล็กต้องเคลื่อนที่ในหลอดบรรจุของเหลวที่มีความยาวมาก [2, 3] อย่างไรก็ตามนอกจากการทดลองปล่อยลูกเหล็กเพื่อหาค่าความหนืด ได้มีอีกวิธีที่สามารถหาความหนืด นั่นคือ การพิจารณาสมการการสั่นแบบฮาร์มอนิกอย่างง่ายภายใต้แรงหนืดที่กระทำกับวัตถุซึ่งอยู่ในเนื้อหาระดับปริญญาตรี โดยการสันนิษฐานว่าไม่จำเป็นต้องใช้ระยะในการสั่นที่มาก [4, 5] ซึ่งเป็นจุดที่แตกต่างกับการทดลองหาความหนืดในการเรียนการสอนตั้งแต่ระดับมัธยมศึกษาถึงระดับปริญญาตรีชั้นปีที่ 1 ที่ส่วนใหญ่ทำการปล่อยลูกเหล็กด้วยข้อจำกัดของอุปกรณ์ทดลองที่ไม่สามารถหาภาชนะบรรจุของเหลวที่มีความยาวมากๆ ได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงเสนอแนวทางปรับปรุงการหาค่าความหนืดด้วยวิธีการสั่นภายใต้แรงหนืดเพื่อตัดข้อจำกัดระยะทางในการเคลื่อนที่ของลูกเหล็กตามกฎของสโตกส์

การศึกษาหาค่าความหนืดมีความสำคัญอย่างยิ่งต่องานด้านต่างๆ เช่น ด้านอุตสาหกรรมยานยนต์ อาหาร ยา และอื่นๆ ดังนั้น จึงมีการพัฒนาเครื่องมือตลอดจนวิธีการในการหาค่าดังกล่าว ในงานวิจัยนี้ทำการวิจัยพัฒนาการเรียนการสอน

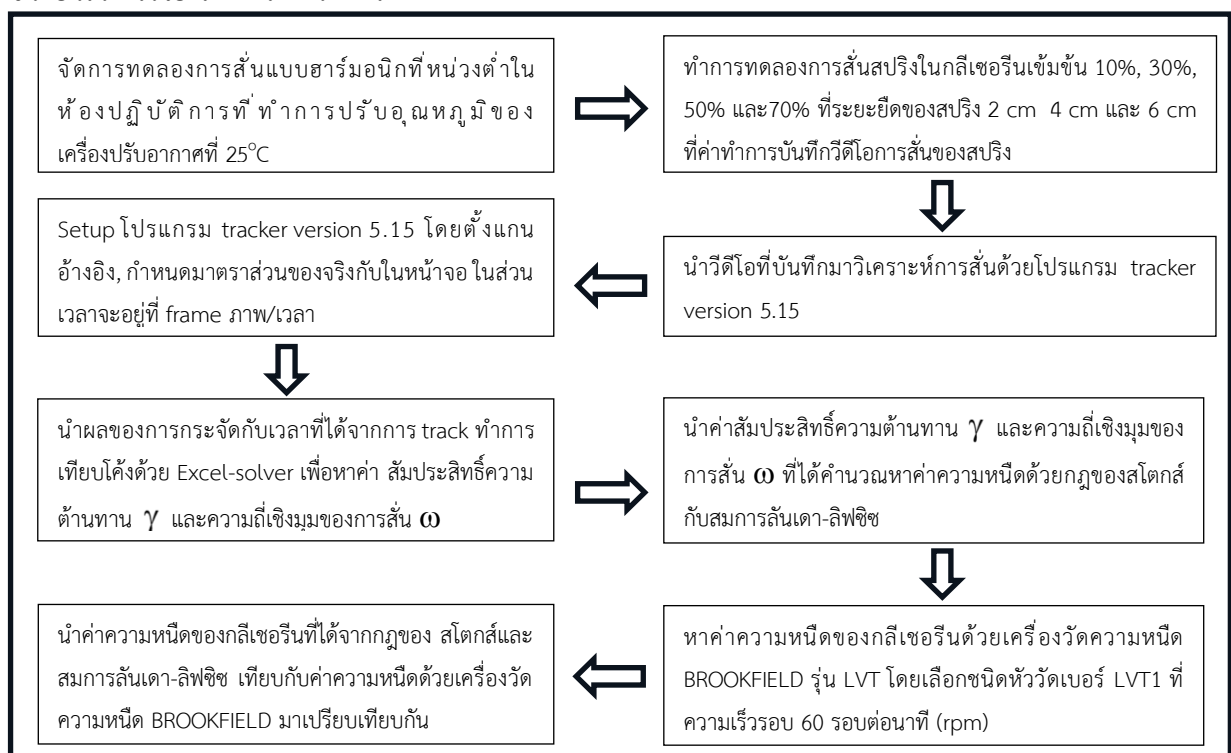


ในห้องปฏิบัติการ โดยเลือกหัวข้อการศึกษาหาค่าความหนืดของกสิเซอริน ที่มีความเข้มข้นที่แตกต่างกัน ซึ่งการวิจัยเชิงการศึกษานี้ได้มีวิธีการเก็บข้อมูลแบบต่างๆ ได้แก่ การปล่อยลูกเหล็กทรงกลมรัศมีต่างกันลงในของเหลวโดยมีเซนเซอร์ตรวจจับรังสีอินฟราเรดที่ควบคุมด้วยไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino [3] และการใช้กล้องดิจิทัลถ่ายภาพติดตาม (Track) การเคลื่อนที่ของลูกเหล็กในของเหลวและดึงข้อมูลความสัมพันธ์ระหว่างระยะทางที่เคลื่อนที่ได้กับเวลา [5-7] นอกเหนือจากการหาค่าความหนืดด้วยการปล่อยลูกเหล็กลงในของเหลวแล้ว ได้มีวิธีการทดลองโดยให้วัตถุเคลื่อนที่ฮาร์มอนิกแบบหน่วงปกติ (Under damped Oscillation) ในของเหลว ได้แก่ การปล่อยลูกเหล็กให้เคลื่อนที่แบบเพนดูลัมในน้ำและใช้กล้องดิจิทัลถ่ายภาพ [8] และมีการทดลองการสั่นของลูกเหล็กติดสปริงในของเหลว [9,10] และนอกจากนี้ได้มีการทดลองเปรียบเทียบหาค่าความหนืดด้วยวิธีปล่อยลูกเหล็กและการสั่น พบว่าค่าที่ได้มีความแตกต่างกันไม่เกิน 5% [11] อย่างไรก็ตามการทดลองหาค่าความหนืดในงานวิจัยที่ผ่านมาได้ใช้กฎของสโตกส์เหมาะสำหรับการเคลื่อนที่ของวัตถุที่มีความเร็วคงที่ในของไหลซึ่งทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนได้ ดังนั้น จึงมีการวิจัยที่น่าสนใจการของแรงต้านที่ใช้กับการเคลื่อนที่แบบมีความเร่งซึ่งเรียกว่าสมการแบบจำลองลันเดา-ลิฟชิตซ์ (Landau-Lifshitz) จากผลการวิจัยพบว่าผลที่ได้สอดคล้องกับค่าจริง [8]

จากการทบทวนวรรณกรรมที่ผ่านมาพบว่า การพัฒนาวิธีการหาค่าความหนืดจึงมีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการปรับปรุงแนวทางการเรียนการสอนในห้องปฏิบัติการทั้งในระดับมัธยมศึกษา และระดับปริญญาตรี ทำให้นักเรียนนักศึกษาได้เห็นผลจากการทดลองว่าสอดคล้องกับทฤษฎีอย่างไร และได้เห็นถึงลักษณะของการเคลื่อนที่กับการคำนวณค่าความหนืดที่ได้จากการทดลอง ดังนั้น คณะผู้วิจัยจึงสนใจการหาค่าความหนืดเดิมนิยมใช้วิธีการปล่อยลูกเหล็กคำนวณตามกฎของสโตกส์ ปกติใช้ในการทดลองหาค่าความหนืดทั้งในระดับมัธยมศึกษาและระดับปริญญาตรี เป็นการทดลองโดยการสั่นของสปริงภายใต้แรงหนืดจากของเหลวจะเทียบเท่าการคำนวณตามกฎของสโตกส์เทียบกับสมการแบบจำลอง ลันเดา-ลิฟชิตซ์ (Landau-Lifshitz) ของเหลวที่ใช้จะใช้กสิเซอริน โดยใช้การถ่ายวิดีโอการเคลื่อนที่ด้วยกล้องถ่ายภาพแบบดิจิทัลแล้วใช้โปรแกรม tracker version 5.15 [12] สำหรับการสั่นของมวลติดปลายสปริงในของเหลวแบบฮาร์มอนิกที่หน่วงต่ำซึ่งใช้สมการกฎของสโตกส์เปรียบเทียบกับสมการแบบจำลองลันเดา-ลิฟชิตซ์ (Landau-Lifshitz) ภายใต้ของเหลวกสิเซอรินที่มีความเข้มข้นแตกต่างกันและทำการเปรียบเทียบค่าความหนืดกับเครื่องวัดความหนืดมาตรฐาน (BROOKFIELD รุ่น LVT)

วิธีดำเนินการวิจัย

ขั้นตอนในการวิจัยแสดงตามแผนผังดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 ขั้นตอนการดำเนินงานวิจัย

งานวิจัยนี้กลีเซอรินที่ใช้มีมวลโมเลกุล 92.1 g/mol มีจุดเดือด 290°C และจุดหลอมเหลว 18°C ดังภาพที่ 2 ในทดลองหาความหนืดของกลีเซอรินจะผสมน้ำที่มีอัตราส่วนปริมาตรกลีเซอรินต่อปริมาตรน้ำที่ 10%, 30%, 50% และ 70%



ภาพที่ 2 กลีเซอริน (กลีเซอรอล) ที่ใช้ในการทดลอง มีสูตรทางเคมี $C_3H_8O_3$

ในงานวิจัยนี้ได้คำนวณหาความหนืดตามกฎของสโตกส์ (โดยเครื่องหมายลบแสดงถึงแรงต้านหรือมีทิศตรงข้ามกับทิศการเคลื่อนที่ของลูกเหล็ก) ซึ่งแสดงในสมการที่ 1 เปรียบเทียบกับสมการแบบจำลองลันเดา-ลิฟชิตซ์ (Landau-Lifshitz) [8, 13] ที่ปรับปรุงจากกฎของสโตกส์ซึ่งแสดงดังสมการที่ 2 (โดยเครื่องหมายลบแสดงถึงแรงต้านหรือมีทิศตรงข้ามกับทิศการเคลื่อนที่ของลูกเหล็ก)

$$F_D = -6\pi\eta r v \quad (1)$$

$$F_D = -\left[6\pi\eta r \left(1 + \frac{r}{\delta}\right) v + 3\pi r^2 \left(1 + \frac{2r}{9\delta}\right) \rho \delta \frac{dv}{dt}\right] \quad (2)$$

กำหนดให้

$$\delta = \sqrt{\frac{2\eta}{\rho\omega}} \quad (3)$$

F_D คือ แรงต้านการเคลื่อนที่ (Drag Force ; N)

η คือ ค่าความหนืดของของไหล (mPa.s)

r คือ รัศมีของลูกเหล็กทรงกลม (m)

ρ คือ ความหนาแน่นของของไหล (kg/m^3)

v คือ ความเร็วของลูกเหล็กทรงกลมที่เคลื่อนที่ในของไหล (m/s)

ω คือ ความถี่เชิงมุมของการสั่น (rad/s)

δ คือ ความลึกการแทรกซึมเป็นค่าประมาณความหนาของชั้นขอบเขตรอบทรงกลม (m)

อุปกรณ์ของงานวิจัยนี้ประกอบด้วย สปริงที่มีค่าคงที่ของสปริง 5 N/m มวล 15.79 g โดยแขวนสปริงไว้ในแนวตั้งโดยที่ปลายสปริงติดวัตถุทรงกลมมวล 67.90 g ซึ่งมีรัศมี 1.27 cm โดยการทดลองนี้ทำการสั่นสปริงที่ระยะยืดสปริงเท่ากับ 2 cm, 4 cm และ 6 cm การสั่นดังกล่าวเป็นการสั่นแบบฮาร์มอนิกหน่วงปกติภายใต้แรงหนืดที่อธิบายได้ด้วยสมการแบบจำลองลันเดา-ลิฟชิตซ์ เมื่อนำแรงต้านเนื่องจากของเหลวซึ่งแสดงดังสมการที่ 2 และ 3 แทนลงในสมการกฎการเคลื่อนที่ของนิวตันสำหรับวัตถุทรงกลมมวล m ที่ติดกับปลายสปริงซึ่งให้มวลดังกล่าวเคลื่อนที่แบบสั่นในแนวตั้งพบว่า แรงที่กระทำต่อมวล (แสดงดังภาพที่ 3) และสมการการเคลื่อนที่ที่สามารถแสดงได้ดังนี้

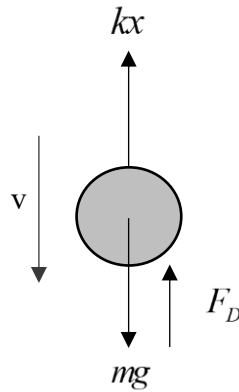
$$m \frac{dv}{dt} = mg - kx + F_D \quad (4)$$

จากสมการที่ (4) สามารถหาผลเฉลยของการสั่นตามเงื่อนไขกฎของสโตกส์คือ

$$X = x - \frac{g}{\omega^2} = Ae^{-\gamma t} \sin(\omega t + \phi)$$

โดย

$$\gamma = \frac{3\pi\eta r}{m}, \quad \omega^2 = \frac{k}{m} - \gamma^2$$



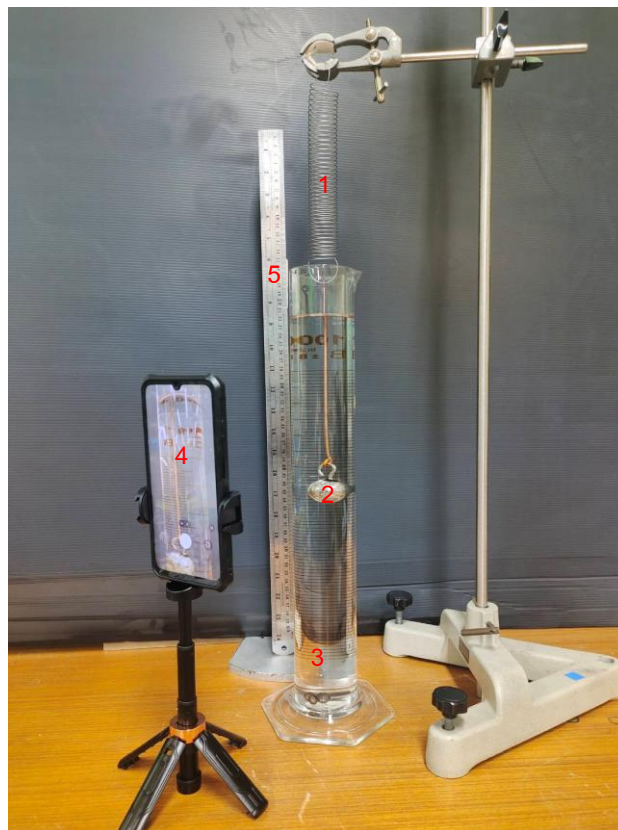
ภาพที่ 3 แรงที่กระทำต่อมวลขณะสั่นในกสิเซอร์ริน

และสมการที่ (4) สามารถหาผลเฉลยของการสั่นตามแบบจำลองลันเดา-ลิฟชิตซ์ (Landau-Lifshitz) คือ

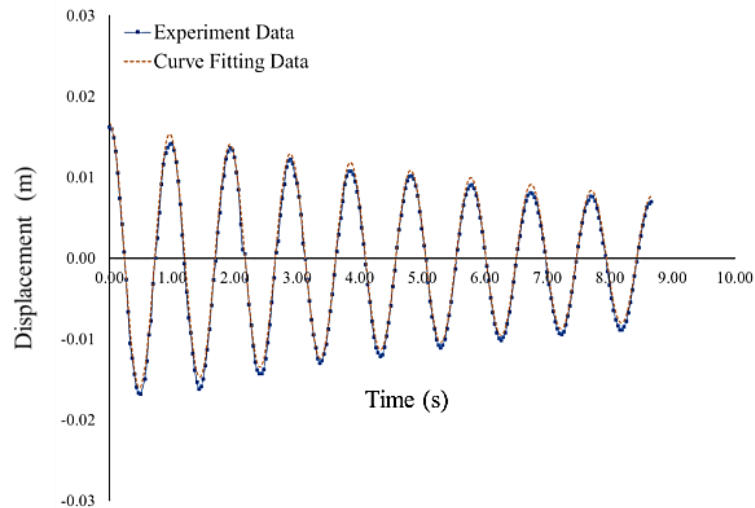
$$X = x - \frac{mg}{(m + 3\pi r^2(1 + \frac{2r}{9\delta})\rho\delta)} = Ae^{-\gamma t} \sin(\omega t + \phi) \quad (5)$$

$$\gamma = \frac{3\pi\eta r(1 + \frac{r}{\delta})}{(m + 3\pi r^2(1 + \frac{2r}{9\delta})\rho\delta)}, \omega^2 = \frac{k}{(m + 3\pi r^2(1 + \frac{2r}{9\delta})\rho\delta)} - \gamma^2 \quad (6)$$

การเก็บข้อมูลการเคลื่อนที่แบบฮาร์มอนิกของลูกเหล็กสามารถเก็บข้อมูลด้วยการบันทึกภาพเคลื่อนไหวจากกล้องวิดีโอ ภาพที่ได้ดังกล่าวถูกประมวลผลด้วยโปรแกรม tracker V5.1.5 การติดตั้งอุปกรณ์ดังกล่าวได้แสดงดังภาพที่ 4



ภาพที่ 4 การจัดอุปกรณ์ในการทดลอง 1. สปริง 2. ลูกเหล็ก 3. กสิเซอร์ริน 4. กล้องถ่ายภาพ 5. ไม้บรรทัด



ภาพที่ 5 ผลที่เกิดจากการปรับเส้นโค้งเพื่อหาค่า γ และ ω ที่แสดงดังสมการที่ (5)

การบันทึกภาพเคลื่อนไหวเพื่อใช้โปรแกรม tracker เพื่อหาค่าการกระจัดกับเวลาของการสั่นของสปริงในกลีเซอรินจำเป็นจะต้องมีระยะความยาวจริงอ้างอิง ในการจัดทดลองจะใช้ไม้บรรทัดที่มีความละเอียดสุดของเครื่องมือ 1 มิลลิเมตร และเวลาจะขึ้นอยู่กับอัตราเร็วการบันทึกภาพของกล้องวิดีโอที่ใช้ในงานวิจัยนี้จะมีอัตราการบันทึกภาพของกล้องวิดีโอที่ 30 FPS (เฟรมต่อวินาที) จะได้ระยะเวลาต่อภาพที่ 33 ms/F (มิลลิวินาทีต่อภาพ) จากใช้โปรแกรม tracker จะได้ค่าการกระจัดกับเวลาของการสั่นของสปริงในสารละลายกลีเซอรินและนำผลการกระจัดกับเวลาที่ได้จากโปรแกรม tracker ปรับเส้นโค้ง (Curve Fitting) กับผลเฉลี่ยของสมการที่ (4) ด้วยโปรแกรม Excel-solver (ภาพที่ 5) เพื่อหาค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทาน γ และความถี่เชิงมุมของการสั่น ω ตามสมการที่ (3) และนำค่า γ และ ω หาได้แทนลงในสมการที่ (5) เพื่อหาค่าความหนืดของของไหล ในการทดลองหาความหนืดการติดตั้งการทดลองแสดงดังภาพที่ 4 และค่าความหนืดที่ได้ถูกแสดงในหัวข้อผลการทดลองการเก็บข้อมูลจากผลการทดลองได้ทำการทดลองซ้ำจำนวน 5 ครั้ง นำมาหาค่าเฉลี่ยและหาความคลาดเคลื่อนจากการหาส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation, S.D.)

ผลการวิจัย

การทดลองหาค่าความหนืดในการสั่นของวัตถุทรงกลมติดปลายสปริงโดยผลการทดลองที่ได้ถูกนำไปเทียบกับสมการที่ (3) ที่ปรับเส้นโค้งเพื่อหาค่าความถี่เชิงมุมของการสั่น ω ดังตารางที่ 1 และ ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทาน γ โดยผลดังกล่าวแสดงดังตารางที่ 2 และกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะยึดกับ γ กับกราฟความสัมพันธ์ระหว่างระยะยึดกับ ω แสดงดังภาพที่ 6 จากผลการทดลองพบว่าค่า γ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของกลีเซอรินที่เพิ่มขึ้นแต่ค่าความถี่เชิงมุมของการสั่นมีแนวโน้มลดลงซึ่งผลที่ได้แสดงให้เห็นว่าความเข้มข้นของกลีเซอรินส่งผลต่อการเคลื่อนที่ของวัตถุโดยทำให้วัตถุเคลื่อนที่ได้ช้าลงเมื่อความเข้มข้นเพิ่มขึ้น

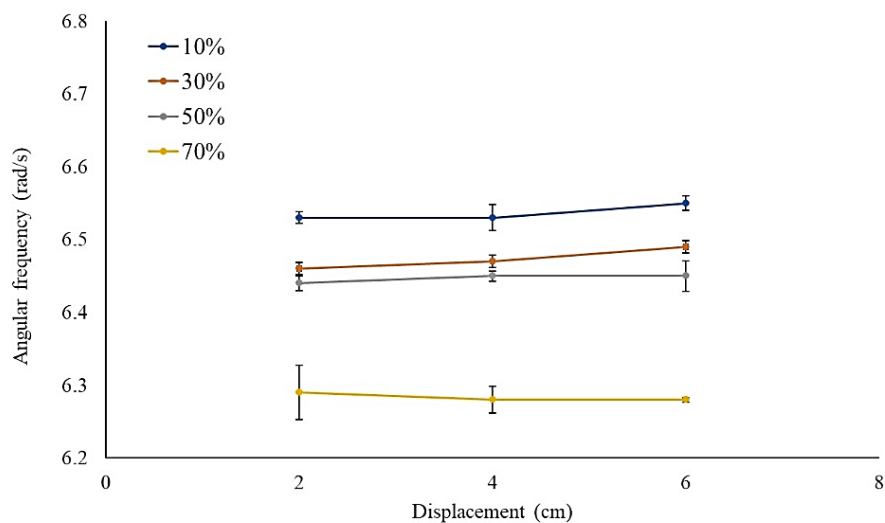
ตารางที่ 1 แสดงค่าความถี่เชิงมุมของการสั่นที่ความเข้มข้นและระยะยึดต่างๆ (จากการปรับโค้ง)

ชนิดของของเหลว	ความถี่เชิงมุมของการสั่นที่ระยะยึดของสปริงค่าต่างๆ (rad/s)		
	2 cm	4 cm	6 cm
กลีเซอริน เข้มข้น 10%	6.53 ± 0.01	6.53 ± 0.02	6.55 ± 0.01
กลีเซอริน เข้มข้น 30%	6.46 ± 0.02	6.47 ± 0.02	6.49 ± 0.03
กลีเซอริน เข้มข้น 50%	6.44 ± 0.01	6.45 ± 0.01	6.45 ± 0.03
กลีเซอริน เข้มข้น 70%	6.29 ± 0.04	6.28 ± 0.02	6.28 ± 0.01

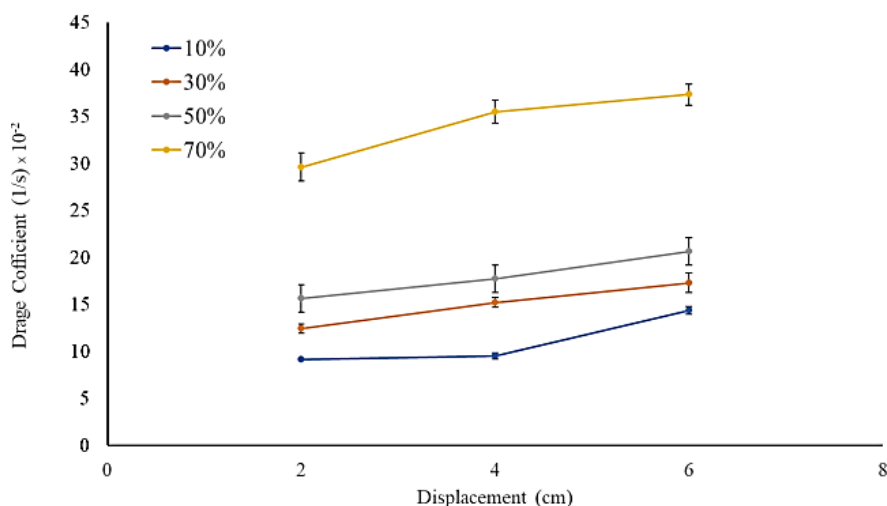


ตารางที่ 2 แสดงค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทาน และระยะยืดของสปริงค่าต่างๆ

ชนิดของของเหลว	สัมประสิทธิ์ความต้านทานที่ระยะยืดของสปริงค่าต่างๆ ($1/s) \times 10^{-2}$		
	2 cm	4 cm	6 cm
กลีเซอริน เข้มข้น 10%	9.12 ± 0.11	9.53 ± 0.36	14.41 ± 0.41
กลีเซอริน เข้มข้น 30%	12.43 ± 0.47	15.23 ± 0.59	17.32 ± 1.04
กลีเซอริน เข้มข้น 50%	15.63 ± 0.13	17.76 ± 0.77	20.65 ± 0.37
กลีเซอริน เข้มข้น 70%	29.60 ± 1.48	35.49 ± 1.23	37.31 ± 1.15



ภาพที่ 6 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างความถี่เชิงมุมของการสั่น ω ของกลีเซอรินที่ความเข้มข้นต่างๆ กับระยะยืดของสปริง



ภาพที่ 7 กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างสัมประสิทธิ์ความต้านทาน γ ของกลีเซอรินที่ความเข้มข้นต่างๆ กับระยะยืดของสปริง

จากการทดลองหาค่า γ แสดงดังตารางที่ 2 เมื่อนำค่าดังกล่าวมาคำนวณหาค่าความหนืด η ด้วยสมการของสโตกส์ กับสมการของลันเดา-ลิฟชิตซ์ (Landau-Lifshitz) แสดงค่าดังตารางที่ 3 ,ตารางที่ 4 และภาพที่ 6, ภาพที่ 7 เทียบกับการหาค่าความหนืดด้วยเครื่องวัดแสดงค่าดังตารางที่ 5 พบว่าแนวโน้มของความหนืดมีค่าเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นของกลีเซอริน

พิจารณาเปรียบเทียบค่าความหนืดที่คำนวณด้วยสมการตามกฎของสโตกส์เปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากสมการของลันเดา-ลิฟชิตซ์ (Landau-Lifshitz) มีความแตกต่างกัน โดยที่การคำนวณตามสมการมีค่าใกล้เคียงกับค่าที่ได้จากเครื่องมือวัดความหนืดรุ่น BROOKFIELD รุ่น LVT (ในการวัดความหนืดด้วยเครื่องวัด BROOKFIELD จะเลือกหัววัดและอัตราเร็วรอบโดยจะมีตารางเฉพาะของเครื่องมือเพื่อเป็นค่าตัวคูณ(factor) ตามเบอร์หัววัดและอัตราเร็วรอบ เมื่อคูณกับค่าที่อ่านได้จากเครื่องมือจะได้ค่าความหนืดที่เท่า ๆ กันแต่จะมีความละเอียดที่ได้ต่างกัน โดยอาจพิจารณาจาก ถ้าความหนืดน้อยจะเลือก หัววัดที่เบอร์ LVT3 หรือ LVT4 และอัตราเร็วรอบต่ำ แต่ถ้าความหนืดสูงต้องเลือกหัววัดที่เบอร์ LVT1 หรือ LVT2 และอัตราเร็วรอบสูง ในการทดลองนี้ได้ทำการทดสอบที่หัววัดต่าง ๆ ให้สามารถอ่านค่าได้โดยทำการเลือกที่เหมาะสมที่สุดคือในการวัดสามารถอ่านค่าสเกลได้ และหัววัดสามารถหมุนได้ โดยได้เลือกหัววัดเบอร์ LVT1 ที่อัตราเร็วรอบ 60 รอบต่อนาที ในการหาความหนืดด้วยวิธีการทดลองการสั่นในของเหลวของวัตถุที่ติดปลายสปริงจึงต้องคำนวณสมการลันเดา-ลิฟชิตซ์ (Landau-Lifshitz) เนื่องจากการที่วัตถุเคลื่อนที่แบบมีความเร่งในของไหลสิ่งที่เกิดขึ้นคือของไหลได้มีความเร่งสัมพัทธ์เทียบกับวัตถุส่งผลต่อแรงต้านที่กระทำกับวัตถุ การคิดแรงต้านด้วยกฎของสโตกส์เพียงอย่างเดียวสมการจะขึ้นกับความเร็วยังอย่างเดียวจึงแตกต่างจากสมการลันเดา-ลิฟชิตซ์ (Landau-Lifshitz) ที่คิดความเร่งสัมพัทธ์ที่ของไหลกระทำกับวัตถุ นั่นคือ กฎของสโตกส์สามารถใช้กับของไหลที่มีความหนาแน่นน้อยๆ เมื่อเทียบกับความหนาแน่นของวัตถุ โดยความหนาแน่นของกลีเซอรินมีค่า 1.26 g/cm^3 และความหนาแน่นของเหล็กประมาณ 7.874 g/cm^3 ในการทดลองหาความหนืดในชั้นเรียนด้วยวิธีการปล่อยวัตถุให้ตกอิสระในของเหลวต้องให้วัตถุมีระยะเคลื่อนที่ยาวมากหรือเคลื่อนที่ในของไหลที่มีความหนืดมากเพื่อให้ความเร่งเป็นศูนย์นำไปสู่การใช้ความเร็วสุดท้ายคำนวณหาความหนืด แต่การทดลองในชั้นเรียนด้วยข้อจำกัดเกี่ยวกับความยาวของอุปกรณ์บรรจุของเหลว ดังนั้นการใช้สมการลันเดา-ลิฟชิตซ์ (Landau-Lifshitz) จึงเป็นหนึ่งในตัวเลือกที่เหมาะสมสำหรับการคำนวณหาความหนืดด้วยวิธีการสั่นของวัตถุติดปลายสปริงที่สั่นในของไหลในชั้นเรียน เมื่อพิจารณาความสัมพันธ์ระหว่างระยะยืดของสปริงกับค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานกับความหนืดพบว่าระยะยืดที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อค่าทั้งสองที่เพิ่มขึ้น โดยจากการทดลองที่ระยะยืดน้อย ๆ ได้แก่ ระยะ 2 cm วัตถุมีการเคลื่อนที่แบบสั่นบนแกนแนวดิ่งแตกต่างจากที่ระยะยืด 4 cm และ 6 cm ที่มีการส่ายบนระนาบแนวราบทำให้มีการรบกวนการเคลื่อนที่แบบสั่นของวัตถุและมีการกระเพื่อมของผิวกลีเซอรินที่มากกว่าระยะยืดของสปริง 2 cm ทำให้ผลที่ได้จึงแตกต่างจากเครื่องมือวัดนั่นคือ ค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานและความหนืดที่เพิ่มขึ้น ดังนั้น ที่ระยะการยืดของสปริงเท่ากับ 2 cm มีการก่อกวนการเคลื่อนที่ในแนวราบเล็กน้อยทำให้ค่าความหนืดที่ได้มีค่าใกล้เคียงกับค่าที่วัดได้จากเครื่องมือ เมื่อพิจารณาผลการทดลองการสั่นที่ความเข้มข้นของกลีเซอริน 70% พบว่าค่าความหนืดที่ได้มีค่าที่แตกต่างกับเครื่องมือวัดมากกว่า 70 % โดยหนึ่งในสาเหตุดังกล่าวเกิดจากที่ของเหลวความเข้มข้นสูงวัตถุมีการลากมวลของกลีเซอรินบางส่วนติดที่ผิววัตถุเพิ่มขึ้นทำให้ค่าความหนืดที่ได้จึงแตกต่างจากเครื่องมือวัด

ตารางที่ 3 แสดงค่าความหนืดที่คำนวณด้วยกฎของสโตกส์

ความเข้มข้นกลีเซอริน	ค่าความหนืดที่คำนวณด้วยกฎของสโตกส์ (mPa.s)		
	2 cm	4 cm	6 cm
10%	51.75±0.61	54.08±2.07	81.76±2.33
30%	70.58±2.65	86.42±3.36	98.24±5.92
50%	88.72±7.18	100.77±4.38	117.18±1.91
70%	167.91±10.68	201.34±7.00	211.63±6.50



ตารางที่ 4 แสดงค่าความหนืดที่คำนวณด้วยสมการแบบจำลองลันเดา-ลิฟชิตซ์ (Landau-Lifshitz)

ความเข้มข้นกลีเซอริน	ค่าความหนืดที่คำนวณด้วยสมการแบบจำลองลันเดา-ลิฟชิตซ์ (Landau-Lifshitz) (mPa.s)		
	2 cm	4 cm	6 cm
10%	4.93±0.06	5.35±0.21	11.52±0.35
30%	8.58±0.34	12.47±0.53	15.73±1.05
50%	12.75±1.16	16.09±0.80	21.15±0.34
70%	40.03±2.97	55.18±2.34	60.20±2.40

ตารางที่ 5 แสดงค่าความหนืดที่วัดด้วยเครื่อง BROOKFIELD รุ่น LVT หัววัด LV1 speed 60

ความเข้มข้นกลีเซอริน	ค่าความหนืดที่วัดด้วยเครื่องBROOKFIELD (mPa.s)
10%	6.3±1.03
30%	8.3±0.24
50%	12.3±0.62
70%	25.8±3.12

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ทำการหาค่าความหนืดเป็นสมบัติพื้นฐานของของไหลเพื่อพัฒนาการเรียนการสอนในห้องปฏิบัติการ โดยเลือกหัวข้อการศึกษาหาค่าความหนืดของกลีเซอรินที่มีความเข้มข้นที่ 10% 30% 50% และ 70% โดยปริมาตร ด้วยวิธีการให้วัตถุทรงกลมติดสปริงเส้นแบบฮาร์โมนิกอย่างง่ายในของไหล การเก็บข้อมูลดังกล่าวเก็บข้อมูลด้วยการบันทึกภาพจากกล้องวิดีโอซึ่งภาพการสั่นของวัตถุในของไหลและประมวลผลด้วยโปรแกรม tracker V5.1.5 นำข้อมูลไปปรับโค้งเพื่อหาค่า γ และ ω โดยค่าที่ได้ถูกนำไปคำนวณหาความหนืดด้วยสมการแบบจำลองลันเดา-ลิฟชิตซ์เทียบกับกฎของสโตกส์ ผลการทดลองพบว่าค่าสัมประสิทธิ์ความต้านทานและความหนืดเพิ่มขึ้นแปรตามความเข้มข้นที่เพิ่มขึ้นของกลีเซอริน

เมื่อทดลองที่ระยะยัดของสปริง 6 cm ความเข้มข้นของกลีเซอริน 10% 30% 50% และ 70% โดยปริมาตร พบว่าค่าความหนืดได้มีค่าที่แตกต่างกับเครื่องมือวัดมากกว่า 70 % สาเหตุหนึ่งมาจากการส่ายบนระนาบแนวราบมีผลต่อการรบกวนการเคลื่อนที่ของวัตถุส่งผลต่อการคำนวณหาความหนืด ทำให้ค่าความหนืดแตกต่างจากเครื่องมือวัด และที่ความเข้มข้นของกลีเซอริน 70% ทุกระยะยัดของสปริงที่ทดลองค่าความหนืดได้มีค่าที่แตกต่างกับเครื่องมือวัดมากกว่า 70 % เช่นกัน หนึ่งสาเหตุเกิดจากการที่ของเหลวเกาะที่ผิววัตถุทำให้มวลโดยรวมของวัตถุมีการเปลี่ยนแปลงส่งผลต่อการคำนวณหาความหนืด

จากการเปรียบเทียบสมการแบบจำลองลันเดา-ลิฟชิตซ์เทียบกับกฎของสโตกส์ พบว่าค่าความหนืดที่คำนวณโดยสมการแบบจำลองลันเดา-ลิฟชิตซ์ มีความใกล้เคียงกับเครื่องมือวัดความหนืดจากการหาความหนืดจากกฎของสโตกส์ โดยกฎของสโตกส์สามารถใช้สำหรับอธิบายการค่าความหนืดในขณะความเร็วคงที่ แตกต่างสมการแบบจำลองลันเดา-ลิฟชิตซ์ที่มีการพิจารณาผลของวัตถุที่ความเร็วไม่คงที่ งานวิจัยนี้ทำการทดลองการสั่นของสปริงเป็นการเคลื่อนที่แบบมีความเร่ง ค่าความหนืดที่ได้จากสมการแบบจำลองลันเดา-ลิฟชิตซ์มีค่าใกล้เคียงกับเครื่องมือวัดความหนืดเมื่อเทียบกับกรณีคำนวณด้วยกฎของสโตกส์ ในงานวิจัยนี้แสดงให้เห็นว่าที่ระยะยัดของสปริง 2 cm ความเข้มข้น 10% 30% และ 50% ที่คำนวณด้วยสมการแบบจำลองลันเดา-ลิฟชิตซ์ให้ค่าความหนืดที่สอดคล้องกับเครื่องมือวัดเงื่อนไขดังกล่าวเหมาะสมสำหรับการพัฒนาการเรียนการสอนในชั้นเรียน



กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากวิทยาลัยเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือตามสัญญาเลขที่ Res CIT0540/2024

เอกสารอ้างอิง

1. รัชดา สุขพันธุ์. การเปรียบเทียบการหาความหนืดของของเหลวโดยใช้วิธีการวิเคราะห์ภาพวิดีโอดิจิทัลและวิธีการจับเวลา วิทยานิพนธ์มหาบัณฑิต, มหาวิทยาลัยบูรพา. ชลบุรี; 2558.
2. Sarah H Ali, Ali Abid D Al-Zuky, Anwar H Al-Saleh, Haidar J Mohamad. Measure liquid viscosity by tracking falling ball Automatically depending on image processing algorithm. J Phys Conf Ser 2019;1294:6-20.
3. อภินิหารรัตน์ ชันแก้ว, มนูญชัย ไชยเพชร, วิรยา หลั่งหลี่, พิษญา ทิพย์ศรี. การวัดความเร็วปลายในการตกของโลหะทรงกลมรัศมีแตกต่างกันในก๊ลิเซอรินโดยใช้ตัวตรวจจับเวลาที่ควบคุมด้วยคอมพิวเตอร์. Wichcha J NSTRU 2022;41(2):1-15.
4. Richard MP III, Richard MP Jr. The effect of viscous drag on damped simple harmonic motion. JEI 2023; 6:1-10.
5. Poonyawatpornkul J, Wattanakasiwich P. High-speed video analysis of damped harmonic motion. Phys Educ 2013;48(6):782-9.
6. Susilawati S, Satriawan M, Rizal R, Sutarno S. Fluid experiment design using video tracker and ultrasonic sensor devices to improve understanding of viscosity concept. JPCS 2022;1521(2):22-39.
7. Kesaulya N, Amahoru AH, Hertavi MA. Analysis of liquid viscosity value using falling ball method using digital image technology based on long exposure feature. Edu Sciences J 2020;1:108-17.
8. Leme JC, Oliveira A. Pendulum underwater—An approach for quantifying viscosity. TPT 2017;55(9):555-7.
9. Putranta H, Wiyatmo Y, Supahar XX, Dwandaru WSB. A simple liquid density measuring instrument based on Hooke's law and hydrostatic pressure. Phys Educ J 2020;55(2):025010.
10. Mananghaya MR, Yu D. Study of underdamped oscillations of a spring-mass system via directly measured acceleration time series. Phys Educ J 2022;57(4):045009.
11. El Malki M, Bria A, Amraquib S, Bria D. A SIMPLE WAY TO MEASURE THE DYNAMIC VISCOSITY OF A FLUID. NJSV 2021;1(2):38-48.
12. Douglas B, Wolfgang C, Robert M. H. Tracker. Computer [Internet]. 2024 [cited 2024 May 15]. Available from: <https://opensourcephysics.github.io/tracker-website/>
13. Landau L.D, Lifshitz E.M, Fluid Mechanics. Oxford: Pergamon press; 6; 1987.



Solution of the exponential Diophantine Equation $n^x + (2p - 1)^y = z^2$

Vipawadee Moonchaisook

Department of Mathematics, Faculty of Science and Technology Surindra Rajabhat University, Surin 32000

*Corresponding author: mathmodern@gmail.com

Received: 19 May 2025/ Revised: 20 October 2025/ Accepted: 22 October 2025

Abstract

This study investigates the exponential Diophantine equation

$$n^x + (2p - 1)^y = z^2,$$

where p is a prime number and n, x, y, z are non-negative integers, subject to the modular condition

$$n \equiv 5 \pmod{12} \text{ with } \gcd(n, 2p - 1) = 1.$$

The primary objective is to determine all non-negative integer solutions of this equation by employing quadratic residue theory, modular arithmetic, and its connections to Pell-type equations.

The results demonstrate that the equation admits a unique non-negative integer solution given by

$$(n, p, x, y, z) = (n, 2, 0, 1, 2).$$

For all other values of p , no non-negative integer solutions exist, and it can be rigorously proven that z cannot be a perfect square outside this solution. These findings provide a clear classification of the solution set structure and offer theoretical insights beneficial for further studies on exponential Diophantine equations, including potential applications in computational number theory and cryptographic systems.

Keywords: Diophantine equations, congruence, integer solutions, number theory

Introduction

The study of Diophantine equations holds enduring theoretical importance and serves as a cornerstone in advancing applied mathematics. Systematic investigation of these equations reveals fundamental solution patterns, establishes general problem-solving frameworks, and extends classical results—thereby providing a robust foundation for both pure and applied research. Insights into the integer solutions and their structures empower researchers to develop methods applicable to more complex equations and contribute to future mathematical discoveries.

Over the past decade, researchers have devoted considerable effort to analyzing various forms of exponential Diophantine equations, focusing on uncovering the properties and structure of integer solutions through systematic strategies. Achievements in this domain are noteworthy, as illustrated by several pivotal studies:



In 2004, Catalan's Conjecture which had been proposed in 1844 by Catalan [2], stating that the only solution $(a, b, x, y) = (3, 2, 2, 3)$ satisfies the equation $a^x - b^y = 1$, with $\min\{a, b, x, y\} > 1$ was finally proven by Mihăilescu [7].

In 2011, Suvarnamani [11] considered the equation in the form $2^x + p^y = z^2$ and found that solutions of this equation follows the value of p for example, $(3, 0, 3)$ is a solution for $p > 2$, besides, $(4, 2, 5)$ is another solution to the equation for $p = 3$.

Later in 2012, Sroysang [9] proved that the Diophantine equation $3^x + 5^y = z^2$ has a unique non-negative integer solution. The solution (x, y, z) is $(1, 0, 2)$.

In 2014, Sroysang [10] showed that the Diophantine equations $7^x + 31^y = z^2$ has no non-negative integer solution.

Additionally, in 2018, Kumar, Gupta and Kishan [6] showed that the Non-Linear Diophantine equation $p^x + (p + 6)^y = z^2$, when p and $p + 6$ both are primes, has no solution in non-negative integers. Moreover, Fernando [5] demonstrated that the Diophantine equation $p^x + (p + 8)^y = z^2$ when $p > 3$ and $p + 8$ are primes, admits no solution (x, y, z) in positive integers. In 2020, Burshtein [1] proved that the Diophantine equation $p^x + (p + 5)^y = z^2$, when $p + 5 = 2^{2u}$ where x, y, z and u are positive integer, has no solution (x, y, z) in positive integers. In 2021, N. Viriyapong and C. Viriyapong [12] studied a Diophantine equation $n^x + 13^y = z^2$ which has exactly one solution $(n, x, y, z) = (2, 3, 0, 3)$, where x, y and z are non-negative integers and n is a positive integer with $n \equiv 2 \pmod{39}$ and $n + 1$ is not a square number. In the same year. Tangjai and Chubthaisong [13] investigated non-negative integer solutions of the Diophantine equation $3^x + p^y = z^2$, where $p \equiv 2 \pmod{3}$. They found that for $y = 0$, the unique solution is $(p, x, y, z) = (p, 1, 0, 2)$, and for y not divisible by 4, the unique solution is $(p, x, y, z) = (2, 0, 3, 3)$. Later in 2022, Pakapongpun and Chattae [8] had demonstrated how to find the solution of the equation $p^x + 7^y = z^2$, it was found that there was a unique solution for the equation, $(x, y, z) = (3, 0, 3)$ when $p \equiv 2 \pmod{6}$. In 2023 Tadee and Siraworakun [14] studied the Diophantine equation $p^x + (p + 2q)^y = z^2$ where p, q and $p + 2q$ are prime numbers and showed that the equation has no positive integer solution.

After reviewing previous research on exponential Diophantine equations, it is evident that this topic remains both challenging and highly intriguing, particularly in the search for non-negative integer solutions. Several earlier studies have demonstrated that certain forms of these equations possess either a unique solution or no solution at all under specific conditions. Motivated by these findings, this study aims to investigate all non-negative integer solutions of the Diophantine equation

$$n^x + (2p - 1)^y = z^2 \quad (1)$$

where p is a prime number and n, x, y, z are non-negative integers, under the modular condition $n \equiv 5 \pmod{12}$ and $\gcd(n, 2p - 1) = 1$.

The principal objectives are to find all nonnegative integer solutions under these conditions, analyze the structural features imposed by modular and coprimality constraints, and close an existing gap in the literature



since this particular formulation has yet to be thoroughly explored. Beyond its theoretical contributions, this line of research has potential implications in cryptography. Modern encryption schemes such as RSA, ElGamal, and Diffie–Hellman rely on the computational difficulty of solving exponential equations modulo large primes. Understanding the intricate behavior and structure of such equations can inform the development or security assessment of cryptographic protocols in the future.

1. Preliminaries

Definition 1. [4] Let a and b be two integers such that $b \neq 0$. We say that a divides b , and write $a|b$, if $b = ac$ for some integer c .

Definition 2. [4] Let a, b and m be three integers such that $m \geq 1$. We say that a is congruent to b modulo m , and write $a \equiv b \pmod{m}$, if $m|a - b$.

Definition 3. [4] Let n be a positive integer and a be an integer such that $(a, n) = 1$. It can be explained that a is the quadratic residue of n if it is an integer. $x \in \{1, 2, 3, \dots, n-1\}$ that makes $x^2 \equiv a \pmod{n}$ have a solution, but if $x^2 \not\equiv a \pmod{n}$ has no solution, we can say that a is not the quadratic non-residue of n .

Theorem 1. $(a, b, x, y) = (3, 2, 2, 3)$ is a unique solution of the Diophantine equation $a^x - b^y = 1$, where a, b, x and y are integers with $\min\{a, b, x, y\} > 1$.

Proof see Mihăilescu [7].

Lemma 1. [4] Let a, b, c, d and m are integers such $m \geq 1$. Then the following statement hold.

1. $a \equiv a \pmod{m}$.
2. If $a \equiv b \pmod{m}$, then $b \equiv a \pmod{m}$.
3. If $a \equiv b \pmod{m}$ and $c \equiv d \pmod{m}$, then $ac \equiv bd \pmod{m}$.
4. If $a \equiv b \pmod{m}$ and $c \equiv d \pmod{m}$, then $a + c \equiv b + d \pmod{m}$.
5. If $a \equiv b \pmod{m}$, then $a^k \equiv b^k \pmod{m}$ for all integer $k \geq 0$.

Lemma 2. Let $z \in \mathbb{Z}$ is a positive integer. Then $z^2 \equiv 0, 1, 4, 9 \pmod{12}$.

Proof. Since z is a positive integer, Then $z \equiv r \pmod{12}$ for $r \in \{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11, 12\}$.

Case 1: $z \equiv 0 \pmod{12}$. Then $z^2 \equiv 0 \pmod{12}$.

Case 2: $z \equiv 1 \pmod{12}$. Then $z^2 \equiv 1 \pmod{12}$.

Case 3: $z \equiv 2 \pmod{12}$. Then $z^2 \equiv 4 \pmod{12}$.

Case 4: $z \equiv 3 \pmod{12}$. Then $z^2 \equiv 9 \pmod{12}$.

Case 5: $z \equiv 4 \pmod{12}$. Then $z^2 \equiv 4 \pmod{12}$.

Case 6: $z \equiv 5 \pmod{12}$. Then $z^2 \equiv 1 \pmod{12}$.

Case 7: $z \equiv 6 \pmod{12}$. Then $z^2 \equiv 0 \pmod{12}$.

Case 8: $z \equiv 7 \pmod{12}$. Then $z^2 \equiv 1 \pmod{12}$.

Case 9: $z \equiv 8 \pmod{12}$. Then $z^2 \equiv 4 \pmod{12}$.

Case 10: $z \equiv 9 \pmod{12}$. Then $z^2 \equiv 9 \pmod{12}$.

Case 11: $z \equiv 10 \pmod{12}$. Then $z^2 \equiv 4 \pmod{12}$.



Case 12: $z \equiv 11(\text{mod } 12)$. Then $z^2 \equiv 1(\text{mod } 12)$.

Thus, for every $z \in \mathbb{Z}$ is a positive integer. Then $z^2 \equiv 0,1,4,9(\text{mod } 12)$.

This completes the proof.

Lemma 3. Let $A \in \mathbb{Z}$, and let $n \in \mathbb{Z}^+$ be a positive integer. Then $(12A + 9)^n \equiv 9(\text{mod } 12)$ for all $n \geq 1$.

Proof. We will prove the lemma using mathematical induction on $n \in \mathbb{Z}^+$.

Base case: For $n = 1$, we have $(12A + 9)^1 \equiv 12A + 9 \equiv 9(\text{mod } 12)$,

which satisfies the claim. Inductive hypothesis: Assume that for some $k \in \mathbb{Z}^+$, $(12A + 9)^k \equiv 9(\text{mod } 12)$.

By the inductive hypothesis, $(12A + 9)^k \equiv 9(\text{mod } 12)$, and since $12A + 9 \equiv 9(\text{mod } 12)$,

it follows that $(12A + 9)^{k+1} \equiv (9)(9) \equiv 81 \equiv 9(\text{mod } 12)$.

Thus, by the principle of mathematical induction, $(12A + 9)^n \equiv 9(\text{mod } 12)$, for all $n \in \mathbb{Z}^+$.

This completes the proof.

Lemma 4. Let A be a positive integer. Then for any positive integer n , we have:

$$(12A + 5)^n = \begin{cases} 12M + 1, & \text{if } n \text{ is even.} \\ 12N + 5, & \text{if } n \text{ is odd} \end{cases}$$

For some positive integers M and N .

Proof. For some positive integers M and N , we divide the proof into two cases:

Case 1. Let n be a positive even number, i.e., $n = 2k$ for some positive integer k .

Since $12A + 5 \equiv 5(\text{mod } 12)$, we have $(12A + 5)^{2k} = ((12A + 5)^2)^k = (144A^2 + 120A + 25)^k$.

Reducing modulo 12, note that $144A^2 \equiv 0(\text{mod } 12)$, $120A \equiv 0(\text{mod } 12)$ and $25 \equiv 1(\text{mod } 12)$.

Therefore, $(12A + 5)^2 \equiv 1(\text{mod } 12)$. It follows that $(12A + 5)^{2k} \equiv 1(\text{mod } 12)$, can be written in the form $12M + 1$ for some positive integer M .

Case 2. Let n be a positive odd integer, i.e., $n = 2k + 1$ for some positive integer k .

Assume that $(12A + 5)^{2k+1} = 12N + 5$ for some positive integer N .

Then, $(12A + 5)^{2(k+1)+1} = (12A + 5)^{2k+1}(12A + 5)^2$

$$\begin{aligned} &= (12N + 5)(144A^2 + 120A + 25) \\ &= 12(144NA^2 + 120NA + 25N + 60A^2 + 50A + 10) + 5. \end{aligned}$$

Since $144NA^2 + 120NA + 25N + 60A^2 + 50A + 10$ is a positive integer,

by the principle of mathematical induction, it follows that for every positive even integer $n > 0$, we have $(12A + 5)^n = 12N + 5$ for some positive integer N .

This completes the proof.

Lemma 5. Let n, x and z be non-negative integers. The Diophantine equation $n^x + 1 = z^2$ has no solution in non-negative integers when $n \equiv 5(\text{mod } 12)$.

Proof. Assume, for the sake of contradiction (n, x, z) is a solution in non-negative integers to the equation $n^x + 1 = z^2$. Since $n \equiv 5(\text{mod } 12)$, it follows that $n^x \equiv 5^x(\text{mod } 12)$. By Lemma 4, we know that $5^x \equiv 1(\text{mod } 12)$ (if x is even) or $5^x \equiv 5(\text{mod } 12)$ (if x is odd) Therefore $z^2 \equiv 2(\text{mod } 12)$ or $z^2 \equiv 6(\text{mod } 12)$. This contradicts



Lemma 2, which states that no perfect square can be congruent to 2 or 6 (mod 12). Hence, no solution exists under the given conditions.

This completes the proof.

Lemma 6. Let p be a prime number. Then the Diophantine equation $1 + (2p - 1)^y = z^2$ has a unique solution $(p, y, z) = (2, 1, 2)$ where y, z are non-negative integers.

Proof. Let p be a prime number and y, z are non-negative integers.

We divide the proof into two cases based on the value of y .

Case 1. $y = 0$, then $z^2 = 2$. It is impossible.

Case 2. $y \geq 1$, let p be an odd prime, and let y be an integer. Consider the Diophantine equation, $1 + (2p - 1)^y = z^2$.

We rewrite the equation $(2p - 1)^y = z^2 - 1 = (z - 1)(z + 1)$. (2)

let $(2p - 1)^k = z - 1$ and $(2p - 1)^{y-k} = z + 1$, $k \geq 0$, substituting these expressions into equation (2),

we obtain $(2p - 1)^k((2p - 1)^{y-2k} - 1) = 2$.

Since $2p - 1 \geq 3$, the only possible value for this equation to equal (2) is when $(2p - 1)^k = 1$,

which implies $k = 0$. Substituting $k = 0$ into the equation yields $(2p - 1)^y - 1 = 2$,

or equivalently $(2p - 1)^y = 3$. Thus, $y = 1, 2p - 1 = 3$, which implies $p = 2$.

Therefore, the solution is $(p, y, z) = (2, 1, 2)$.

Lemma 7. Let p be an odd prime then $p \equiv 1, 3, 5, 7, 11 \pmod{12}$.

Proof. Every integer modulo 12 is congruent to one of the integers in the complete residue system modulo 12, namely $\{0, 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9, 10, 11\}$. We now examine each of these residue classes and determine whether it is possible for a prime number $p \geq 3$ to be congruent to each of them modulo 12.

Case 1. If $p \equiv 0 \pmod{12}$, then p is divisible by 12, and hence divisible by both 3 and 4. Since a prime number has no divisors other than 1 and itself, p cannot be prime.

Case 2. If $p \equiv 2, 4, 6, 8, 10 \pmod{12}$, Since 2, 4, 6, 8, and 10 are all divisible by 2, it follows that p is divisible by 2. As a prime number can only have 1 and itself as positive divisors, this implies that p cannot be a prime number.

Case 3. $p \equiv 9 \pmod{12}$, since 9 is divisible by 3, this implies that p is divisible by 3. The only prime divisible by 3 is $p = 3$, but $3 \equiv 3 \pmod{12}$, not 9. Hence, p cannot be congruent to 9 modulo 12.

Case 4. $p \equiv 3 \pmod{12}$, this is only true for $p = 3$, which satisfies both $p \geq 3$ and primality.

Thus, the only congruence classes modulo 12 that a prime number $p \geq 3$ can belong to are $1, 3, 5, 7, 11 \pmod{12}$.

This completes the proof.

Lemma 8. Let n is a non-negative integer. If $n \equiv 5 \pmod{12}$, then $n \equiv 2 \pmod{3}$ and $n \equiv 1 \pmod{4}$.

Proof. Assume that n is a non-negative integer.

Such that $n \equiv 5 \pmod{12}$, this means by definition of congruence: $n = 12k + 5$ for some integer k .

It follows that $n = 3(4k + 1) + 2$ and $n = 4(3k + 1) + 1$.



Thus, $n \equiv 2(\text{mod } 3)$ and $n \equiv 1(\text{mod } 4)$.

Main Results

Throughout our main results part, let p be an odd prime and let n, x, y, z be non-negative integers such that $n \equiv 5(\text{mod } 12)$. We investigate the solutions of the Diophantine equation $n^x + (2p - 1)^y = z^2$ by considering various cases based on the values of p and n^x . To ensure the logical continuity of the proofs, we present several supporting lemmas 4 and lemma 9 in this section, which will be used as auxiliary results in the main proofs that follow.

Lemma 9. If p be an odd prime such that $p \equiv 1, 5, 7, 11(\text{mod } 12)$. Then for any positive integer y , the following congruence holds $(2p - 1)^y \equiv 1(\text{mod } 12)$ or $(2p - 1)^y \equiv 9(\text{mod } 12)$.

Proof. Let us consider the possible congruence classes of odd primes modulo 12. Since p is an odd prime, it cannot be divisible by 2 or 3, so the only possible values of $p \pmod{12}$ are $p \equiv 1, 5, 7, 11(\text{mod } 12)$.

We will compute $2p - 1$ modulo 12 for each of these congruence classes.

Case 1. $p \equiv 1(\text{mod } 12)$ then $(2p - 1)^y \equiv 1(\text{mod } 12)$.

Case 2. $p \equiv 5(\text{mod } 12)$ then $(2p - 1)^y \equiv 9^y \equiv 9(\text{mod } 12)$.

Case 3. $p \equiv 7(\text{mod } 12)$ then $(2p - 1)^y \equiv 13^y \equiv 1(\text{mod } 12)$.

Case 4. $p \equiv 11(\text{mod } 12)$ then $(2p - 1)^y \equiv 21^y \equiv 9^y \equiv 9(\text{mod } 12)$. For all $y \geq 1$ (this can be proved by induction, if $y = k, 9^y = 9^k \equiv 9(\text{mod } 12)$, then $9^{k+1} \equiv 9 \cdot 9 \equiv 81 \equiv 9(\text{mod } 12)$).

In all four cases, $(2p - 1)^y \equiv 1(\text{mod } 12)$ or $(2p - 1)^y \equiv 9^y \equiv 9(\text{mod } 12)$.

Thus, $(2p - 1)^y \equiv 1(\text{mod } 12)$ or $(2p - 1)^y \equiv 9^y \equiv 9(\text{mod } 12)$. For all $y \in \mathbb{Z} > 0$, completing the proof.

Lemma 10. For any integer A and non-negative integer n , the following congruence holds:

$$(12A + 3)^x \equiv \begin{cases} 1(\text{mod } 12), & x = 0, \\ 3(\text{mod } 12), & \text{if } x \text{ is odd,} \\ 9(\text{mod } 12), & \text{if } x \text{ is even, } x \geq 2 \end{cases}$$

Proof. Since $12A + 3 \equiv 3(\text{mod } 12)$.

Hence $(12A + 3)^x \equiv 3^x(\text{mod } 12)$, and it suffices to determine the residue of 3^x modulo 12.

For $x = 0$, clearly $3^0 = 1 \equiv 1(\text{mod } 12)$.

For $x = 1$, we have $3^1 = 3 \equiv 3(\text{mod } 12)$, establishing the initial case.

Assume now that for some $n \geq 1$,

$$3^n \equiv \begin{cases} 3(\text{mod } 12), & n \text{ is odd,} \\ 9(\text{mod } 12), & n \text{ is even.} \end{cases}$$

Multiplying both sides by 3 gives

$$3^{n+1} \equiv 3 \cdot 3^n (\text{mod } 12).$$

If n is odd, then $3^n \equiv 3$, so $3^{n+1} \equiv 9 (\text{mod } 12)$, as required for an even exponent.

If n is even, then $3^n \equiv 9$, so $3^{n+1} \equiv 27 \equiv 3(\text{mod } 12)$, as required for an odd exponent.

Thus, the statement holds for $n + 1$ whenever it holds for n . By the principle of mathematical induction, the claim is established for all $x \geq 0$.



Theorem 2. Let p be prime number and let n, x, y, z are non-negative integers, such that $n \equiv 5 \pmod{12}$ and $\gcd(n, 2p - 1) = 1$. Then the exponential Diophantine equation $n^x + (2p - 1)^y = z^2$ has the unique solution $(n, p, x, y, z) = (n, 2, 0, 1, 2)$.

Proof. Let p be a prime number and n, x, y, z are non-negative integers, when $n \equiv 5 \pmod{12}$.

We divide the proof into 4 cases:

Case 1. $x = 0$ and $y = 0$, the equation becomes $z^2 = 2$. It is impossible.

Case 2. $x = 0, y \geq 1$. By Lemma 6, the solution to the equation (1) is $(n, p, x, y, z) = (n, 2, 0, 1, 2)$.

Case 3. $y = 0$ and $x \geq 1$. By Lemma 5, there is no solution.

Case 4. $x \geq 1, y \geq 1$.

Case 4.1 x is odd and $y \geq 1$

Let $p = 2$. Then $(2p - 1)^y = 3^y$. From Lemma 10, we know that for any integer A and non-negative integer y .

$$(12A + 3)^y \equiv \begin{cases} 3 \pmod{12}, & \text{if } y \text{ is odd,} \\ 9 \pmod{12}, & \text{if } y \geq 2 \text{ and even.} \end{cases}$$

Since $n \equiv 5 \pmod{12}$, by Lemma 4, we obtain $n^x \equiv 5 \pmod{12}$.

Therefore, $z^2 = n^x + 3^y \equiv 5 + 3 = 8 \pmod{12}$ or $z^2 = n^x + 3^y \equiv 5 + 9 = 14 \equiv 2 \pmod{12}$. But from Lemma 2, a square modulo 12 must be in the set $\{0, 1, 4, 9\}$. So $z^2 \equiv 8$ or $2 \pmod{12}$ is a contradiction.

Therefore, the equation admits no non-negative integer solution under these conditions.

Case 4.2 x is even and $y \geq 1$

Case 4.2.1 Let $p = 2$,

from equation (1), we have $n^x + 3^y = z^2$. Suppose $x = 2f$, where f is a non-negative integer.

Then $n^x = (n^f)^2$. We consider the Diophantine $(n^f)^2 + 3^y = z^2$. We can rewrite this as a difference of squares

$$3^y = z^2 - (n^f)^2 = (z + n^f)(z - n^f).$$

Let $3^{y-h} = z + n^f$ and $3^h = z - n^f$, where $y > h$ and y, h are non-negative integers.

This yields $3^h[3^{y-2h} - 1] = 2 \cdot n^f$. Since $y > 2h$, it follows that $3^{y-2h} - 1$ is a positive integer.

We now consider three cases for h :

Case (i): $h = 1$.

Therefore, 3 must divide $2n^f$, i.e., $3|2n^f$.

However, since $\gcd(n, 3) = 1$ and 1 and 3 does not divide 2 (because 2 is a prime number not divisible by 3), it follows that $3 \nmid 2n^f$. Which is a contradiction and cannot hold.

Case (ii): $h \geq 2$.

In this case, the equation becomes $3^h(3^{y-2h} - 1) = 2n^f$.

Since $h \geq 2$, it follows that $3^2 = 9|3^h$, and hence $3|2n^f$.

This implies that $3|2n^f$, which is impossible because $\gcd(3, 2n^f) = 1$ under the assumption $\gcd(n, 3) = 1$.

Therefore, this case leads to a contradiction.

Case (iii): $h = 0$.

The equation simplifies to $3^y - 1 = 2n^f$.



We analyze this congruence modulo 3. Note that:

$3^y \equiv 0 \pmod{3}$, it follows that $3^y - 1 \equiv -1 \pmod{3}$.

Thus, $2n^f \equiv -1 \pmod{3}$, Which implies that $3 \nmid 2n^f + 1$.

However, since $\gcd(n, 3) = 1$, it follows that $3 \nmid 2n^f$, leading to a contradiction.

Alternatively, if y is even, then $3^y \equiv 1 \pmod{4}$, so that

$3^y - 1 \equiv 0 \pmod{4}$, which implies that $2n^f \equiv 0 \pmod{4}$.

This implies $n^f \equiv 0 \pmod{2}$, i.e., n is even.

But this contradicts the assumption that n is odd and $\gcd(n, 2) = 1$.

Hence, no solution exists in the case either.

Case 4.2.2 Let $p \geq 3$,

from Lemma 9, $(2p - 1)^y \equiv 1 \pmod{12}$ or $(2p - 1)^y \equiv 9 \pmod{12}$, from Lemma 4, we have $n^x \equiv 1 \pmod{12}$.

Thus, $z^2 = n^x + (2p - 1)^y \equiv 6 \pmod{12}$ or $z^2 \equiv 2 \pmod{12}$, which contradicts Lemma 2. Therefore, in this case, there is no solution.

This completes the proof.

Corollary 1. Let n be a positive number such that $n \equiv 5 \pmod{12}$. Then the Diophantine equation $n^x + (2p - 1)^y = u^{2w}$ has a unique solution $(n, p, x, y, u) = (n, 2, 0, 1, 2)$ where p be prime number and x, y, u, w are non-negative integers.

Proof. Let p be an odd prime and x, y, u are non-negative integers. Suppose that $u^{2w} = z^2$,

Then Diophantine equation $n^x + (2p - 1)^y = u^{2w} = z^2$ has a unique solution $(n, p, x, y, u) = (n, 2, 0, 1, 2)$.

By Theorem 2.

Corollary 2. The Diophantine equation $5^{2x} + 13^y = z^2$ has no non-negative integer solutions,

where x, y and z are non-negative integers.

Proof. By Lemma 4, $5^{2x} \equiv 1 \pmod{12}$ and by Lemma 9, $(2p - 1)^y \equiv 1, 9 \pmod{12}$.

Therefore, $z^2 \equiv 2, 10 \pmod{12}$, which contradicts Lemma 2. Hence, by Theorem 2, the Diophantine equation $5^{2x} + 13^y = z^2$ has no non-negative integer solution.

Corollary 3. The Diophantine equation $29^x + (2p - 1)^{2m+1} = k^{2t+2}$, where p be prime, has no non-negative integer solution, where m, t, x, y and k are non-negative integers.

Proof. Let p be prime number.

Suppose that $y = 2m + 1$, $z = k^{t+1}$, so $29^x + (2p - 1)^y = k^{2t+2} = z^2$. From Theorem 2,

Then the Diophantine equation $29^x + (2p - 1)^{2m+1} = k^{2t+2}$ has no non-negative integer solutions.

Corollary 4. The Diophantine equation $17^x + (2p - 1)^y = h^{2t}$, where p be prime, has no non-negative integer solution, where t, x, y and h are non-negative integers.

Proof. Let p be prime number.

Suppose that $z = h^t$, so $17^x + (2p - 1)^y = h^{2t} = z^2$. From Theorem 2,

then the Diophantine equation $17^x + (2p - 1)^y = h^{2t}$ has no non-negative integer solution.



Discussion

This study provides an in-depth analysis of the exponential Diophantine equation

$$n^x + (2p - 1)^y = z^2,$$

This study provides an in-depth analysis of the exponential Diophantine equation $n^x + (2p - 1)^y = z^2$,

under the modular condition $n \equiv 5 \pmod{12}$ and $\gcd(n, 2p - 1) = 1$. The results indicate that the equation admits a single non-trivial solution when $p = 2$, reflecting the rarity of non-negative integer solutions under these constraints. Moreover, it is confirmed that for other values of p , no non-negative integer solutions exist, and z cannot be a perfect square outside of this solution. These findings align with previous studies on related Diophantine equations. For instance, Kumar et al. [6] and Fernando [5] showed that certain non-linear Diophantine equations with prime parameters admit no positive integer solutions, while Viriyapong and Sroysang [9, 12] found that unique solutions exist under specific conditions. Despite these advances, several questions remain open regarding the behavior of such equations under broader conditions and more complex structures. To address these gaps, future research may focus on:

1. Extending the analysis to other modular conditions, such as $n \equiv 1 \pmod{4}$ or $n \equiv 3 \pmod{8}$, to examine whether the uniqueness of solutions persists or varies under different arithmetic constraints.
2. Exploring additional families of exponential Diophantine equations, particularly those involving multiple exponential terms or higher-degree exponents, to gain deeper insight into the general structure of solutions and to potentially formulate new theoretical conjectures.
3. Investigating computational methods using modern mathematical software such as SageMath, Python (with SymPy or NumPy), or Mathematica to empirically verify the uniqueness of solutions over broader parameter ranges, especially in cases where theoretical proofs are difficult to obtain.

Recommendations

Based on the results and the scope of this study, the researcher offers several recommendations for future research and educational applications.

1. Broaden the investigation of exponential Diophantine equations by exploring more diverse modular conditions and wider parameter ranges. This could help uncover new solution structures or unexpected behaviors. For instance, future studies may examine equations of the form $a^x + b^y \equiv c \pmod{m}$ across varying values of m , to analyze patterns of solvability and periodicity under modular constraints.
2. Utilize computational techniques to support theoretical work and explore related number-theoretic equations such as Pell-type equations or exponential forms involving recurrence relations. Performing exhaustive searches for small integer parameters (e.g., $a, b, x, y \leq 1000$) may reveal special or exceptional solutions that can guide the formulation of more general conjectures or proofs.
3. Incorporate these methods into mathematics education, particularly in teaching number theory and problem-solving strategies. Computational tools, such as Python, PARI/GP, or SageMath, could be used to help



students visualize and analyze Diophantine equations, thereby strengthening logical reasoning and conceptual understanding through hands-on experimentation.

Conclusions

This study examined the exponential Diophantine equation $n^x + (2p - 1)^y = z^2$, where p is a prime number and n, x, y, z are non-negative integers, under the conditions $n \equiv 5(\text{mod}12)$ and $\gcd(n, 2p - 1) = 1$.

The analysis shows that the equation has a unique non-trivial solution given by

$$(n, p, x, y, z) = (n, 2, 0, 1, 2).$$

No other prime numbers yield non-negative integer solutions, and z^2 cannot be a perfect square in any other case. These results highlight the rarity of solutions for this type of equation and provide a framework for exploring more complex cases. They also offer clear and illustrative examples for teaching number theory and Diophantine equations.

References

1. Burshtein N. On the Diophantine equation $p^x + (p + 5)^y = z^2$. Ann Pure Appl Math 2020;9(1):41-4.
2. Catalan E. Note extradite dune letter adreesee a l'editeur. J Reine Angew Math 1844;27:192.
3. Chotchaistith S. On the Diophantine equation $4^x + p^y = z^2$ where p is a prime number. Am J Math Sci. 2012;1:191-3.
4. Burton DM. Elementary Number Theory. 6th ed. Singapore: McGraw-Hill; 2007.
5. Fernando N. On the solvability of the Diophantine equation $p^x + (p + 8)^y = z^2$. when $p > 3$ and $p + 8$ are primes. Ann Pure Appl Math 2018;18(1):9-13.
6. Kumar S, Gupta S, Kishan H. On the non-linear Diophantine equation $p^x + (p + 6)^y = z^2$. Ann Pure Appl Math 2018;8(1):125-8.
7. Mihăilescu P. Primary cyclotomic units and a proof of Catalan's conjecture. J Reine Angew Math. 2004;27:167-95.
8. Pakapongpun T, Chattae C. On the Diophantine equation $p^x + 7^y = z^2$ where p is prime and x, y, z are non-negative integers. Int J Math Comput Sci 2022;17(4):1535-40.
9. Sroysang B. The Diophantine equation $3^x + 5^y = z^2$. Int J Pure Appl Math 2012;81(4):605-8.
10. Sroysang B. On the Diophantine equation $7^x + 31^y = z^2$. Int J Pure Appl Math 2014;92(1):109-12.
11. Suvarnamani A. Solutions of the Diophantine equation $2^x + q^y = z^2$. Int J Pure Appl Math 2011;1(3):1415-9.
12. Viriyapong N, Viriyapong C. On a Diophantine equation $n^x + 13^y = z^2$ where $n \equiv 2(\text{mod} 39)$ and $n + 1$ is not a square number. J Appl Math 2021;29(1):33-41.
13. Tanjai W, Chubthaisong C. On the Diophantine equation $3^x + p^y = z^2$ where $p \equiv 2(\text{mod} 3)$. WSEAS Trans Math 2020:245-56.
14. Tadee S, Siraworakun A. Non-existence of positive integer solutions of the Diophantine equation $p^x + (p + 2q)^y = z^2$ where p, q and $p + 2q$ are prime numbers. Eur J Pure Appl Math 2023;16(2): 724-35.



กลไกการดื้อยาและการแพร่กระจายยีนดื้อของแบคทีเรียแกรมลบในระบบบำบัดน้ำเสีย:

มุมมองเชิงสิ่งแวดล้อมเพื่อการจัดการความเสี่ยง

Resistance Mechanisms and Dissemination of Resistance Genes in Gram-negative Bacteria from Wastewater Treatment Systems: Environmental Risk Management Perspective

สุรีย์พร เอี่ยมศรี

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ชีวภาพ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ สมุทรปราการ 10540

Sureepohn Aemsri

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

Corresponding author: shigella_01@hotmail.com

Received: 24 June 2025/ Revised: 27 October 2025/ Accepted: 6 November 2025

บทคัดย่อ

เชื้อแบคทีเรียดื้อยาปฏิชีวนะ (Antimicrobial Resistance: AMR) เป็นปัญหาสาธารณสุขระดับโลก โดยเฉพาะเชื้อแบคทีเรียแกรมลบซึ่งมีกลไกการดื้อยาหลายรูปแบบ เช่น การสร้างเอนไซม์ย่อยสลายยา การเปลี่ยนแปลงโครงสร้างเป้าหมายของยา และการขับยาปฏิชีวนะออกจากเซลล์ โดยพบว่าระบบบำบัดน้ำเสียจากโรงพยาบาล โรงงานอุตสาหกรรม และชุมชนถือเป็น “จุด hotspot” สำคัญที่ส่งเสริมการสะสมและแพร่กระจายของเชื้อดื้อยา (Antibiotic-Resistant Bacteria: ARB) และยีนดื้อยา (Antibiotic-Resistance Genes: ARGs) เนื่องจากมีสภาพแวดล้อมที่เอื้อต่อการถ่ายทอดยีนในแนวนอน (Horizontal Gene Transfer: HGT) บทความนี้เป็นการทบทวนวรรณกรรมเชิงบรรยาย (Narrative Review) ที่สรุปกลไกการดื้อยา การแพร่กระจายของยีนดื้อยาในระบบบำบัดน้ำเสีย และเทคโนโลยีใหม่ในการจัดการเชิงสิ่งแวดล้อม พบว่าระบบบำบัดแบบดั้งเดิมยังไม่สามารถกำจัดยีนดื้อยาได้สมบูรณ์ จำเป็นต้องเสริมด้วยกระบวนการฆ่าเชื้อขั้นสูง เช่น รังสีอัลตราไวโอเลต โอโซน และกระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง รวมทั้งควบคุมการปล่อยยาปฏิชีวนะและโลหะหนักจากแหล่งกำเนิด แนวทาง “One Health” จึงเป็นกรอบสำคัญในการบูรณาการสุขภาพมนุษย์ สัตว์ และสิ่งแวดล้อม เพื่อควบคุมการแพร่กระจายของเชื้อดื้อยาอย่างยั่งยืน

คำสำคัญ: เชื้อดื้อยาปฏิชีวนะ แบคทีเรียแกรมลบ ระบบบำบัดน้ำเสีย กลไกการดื้อยา การแพร่กระจายในสิ่งแวดล้อม

Abstract

Antimicrobial resistance (AMR) is a global public health threat, particularly among Gram-negative bacteria that possess multiple resistance mechanisms, including enzymatic degradation, target modification, and antibiotic efflux. Wastewater treatment systems receiving discharges from hospitals, pharmaceutical industries, and community wastewater are recognized as major hotspots for the accumulation and

dissemination of antibiotic-resistant bacteria (ARB) and resistance genes (ARGs) through horizontal gene transfer (HGT). This narrative review summarizes current knowledge on bacterial resistance mechanisms, environmental dissemination pathways, and recent technologies for AMR mitigation in wastewater systems. Evidence indicates that conventional treatment processes cannot completely remove resistance genes, highlighting the need for advanced disinfection methods such as ultraviolet irradiation, ozonation, and advanced oxidation processes. Strengthening source control by limiting the discharge of antibiotics and heavy metals and adopting the “One Health” framework that integrates human, animal, and environmental health are essential for effective and sustainable AMR management.

Keyword: Antimicrobial resistance, Gram negative bacteria, Wastewater treatment, Resistance mechanisms, Environmental dissemination

บทนำ

สถานการณ์ปัจจุบันของปัญหาเชื้อดื้อยาปฏิชีวนะทั่วโลก

เชื้อแบคทีเรียดื้อยาปฏิชีวนะ (Antimicrobial Resistance: AMR) หนึ่งในภัยคุกคามสำคัญของสุขภาพมนุษย์ องค์การอนามัยโลก (WHO) จัดให้ AMR เป็น 1 ใน 10 ภัยคุกคามเร่งด่วนด้านสุขภาพของมนุษยชาติ โดยในปี ค.ศ. 2019 การติดเชื้อแบคทีเรียดื้อยาทำให้มีผู้เสียชีวิตโดยตรงถึงประมาณ 1.27 ล้านราย และการติดเชื้อที่ทำให้เสียชีวิตแบบสัมพันธ์กับเชื้อดื้อยา ประมาณ 4.95 ล้านรายทั่วโลก ซึ่งสูงกว่าผู้เสียชีวิตจากโรคเอดส์หรือมาลาเรียในปีเดียวกัน [1] ปรากฏการณ์นี้เกิดจากการที่แบคทีเรียสามารถปรับตัว “ดื้อ” ต่อยาต้านจุลชีพที่เคยใช้รักษาได้ผลดีมาก่อน ส่งผลทำให้การรักษาโรคติดเชื้อยิ่งยากขึ้น ผู้ป่วยมีความเสี่ยงต่อผลลัพธ์ทางคลินิกที่ลดลง ต้องใช้เวลารักษานานขึ้น และมีค่าใช้จ่ายด้านสุขภาพเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับการติดเชื้อจากสายพันธุ์ที่ไม่ดื้อยาปฏิชีวนะ

ผลกระทบทางเศรษฐกิจของ AMR มีความรุนแรง โดยธนาคารโลก (World Bank) ระบุว่าภายในปี ค.ศ. 2030 การดื้อยาอาจทำให้เกิดความสูญเสียทางเศรษฐกิจทั่วโลกถึง 3.4 ล้านล้านเหรียญสหรัฐ [2] และผลักดันให้คนยากจนเพิ่มขึ้นอีกประมาณ 24 ล้านคน หากไม่มีการดำเนินการแก้ไขอย่างจริงจัง มีการคาดการณ์ว่าในปี ค.ศ. 2050 เชื้อดื้อยาอาจคร่าชีวิตผู้คนถึงประมาณ 10 ล้านรายต่อปี [3] ตัวเลขคาดการณ์ทางเศรษฐกิจเหล่านี้ชี้ให้เห็นว่า AMR ไม่ใช่เพียงวิกฤตด้านสุขภาพเท่านั้น แต่ยังเป็นความท้าทายทางเศรษฐกิจและสังคมที่ลึกซึ้ง โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับประเทศที่มีรายได้ต่ำและปานกลาง การรับรู้ถึงผลกระทบในวงกว้างนี้ทำให้การแก้ไขปัญหา AMR จำเป็นต้องอาศัยความร่วมมือจากหน่วยงานที่เกี่ยวข้องกับเศรษฐกิจและการพัฒนา นอกเหนือจากกระทรวงสาธารณสุข เพื่อรับมือกับความเสี่ยงเชิงระบบที่ AMR มีต่อเสถียรภาพระดับโลกและความพยายามในการลดความยากจน

เชื้อแบคทีเรียแกรมลบเป็นกลุ่มเชื้อก่อโรคที่น่ากังวลในวิกฤตนี้ เนื่องจากแบคทีเรียแกรมลบ เช่น *Escherichia coli*, *Klebsiella pneumoniae*, *Acinetobacter baumannii*, *Pseudomonas aeruginosa* เป็นต้น มีโครงสร้างผนังเซลล์สองชั้นโดยมีเยื่อหุ้มชั้นนอกที่เป็นไขมันและชั้นเพปทิโดไกลแคนบาง ต่างจากแบคทีเรียแกรมบวกที่มีชั้นเพปทิโดไกลแคนหนา การมีเยื่อหุ้มชั้นนอก ทำให้แกรมลบมีความทนทานต่อสารเคมีมากกว่า และพัฒนากลไกการดื้อยาได้หลากหลายรูปแบบ หลายสายพันธุ์ของแกรมลบที่ดื้อยาหลายขนาน (Multidrug-resistant bacteria; MDR) เช่น *Klebsiella pneumoniae* ที่ผลิตเอนไซม์คาร์บาเพนิเมส (Carbapenemase-producing *K. pneumoniae*) หรือ *Pseudomonas aeruginosa* ที่ดื้อยาเกือบทุกกลุ่มยากต่อการรักษาด้วยยาปฏิชีวนะที่มีอยู่ ทำให้องค์การอนามัยโลกจัดแบคทีเรียเหล่านี้ไว้ในกลุ่มเชื้อดื้อยาวิกฤตที่ต้องพัฒนาแนวทางรักษาใหม่อย่างเร่งด่วน

นอกจากนี้แบคทีเรียแกรมลบและยีนดื้อยายังสามารถแพร่กระจายออกสู่สิ่งแวดล้อมผ่านทางน้ำเสีย มูลสัตว์ และของเสียจากกิจกรรมมนุษย์ กลายเป็นแหล่งสะสม “คลังยีนดื้อยาในสิ่งแวดล้อม” (environmental resistome) ที่อาจถ่ายทอด



กลับมาสู่มนุษย์และสัตว์ได้ในภายหลัง ปัจจัยเหล่านี้ชี้ให้เห็นว่าการแก้ปัญหาเชื้อดื้อยาจำเป็นต้องมองในมุมมองรวม ทั้งมิติด้านสิ่งแวดล้อมเข้ากับมิติด้านการแพทย์ และการเกษตร ตามหลักการ One Health ที่เน้นความเชื่อมโยงระหว่างสุขภาพมนุษย์ สัตว์ และสิ่งแวดล้อม [1] การให้ความสำคัญกับมิติสิ่งแวดล้อมภายใต้กรอบแนวคิด One Health ถือเป็นการเปลี่ยนแปลงแนวคิดที่สำคัญในการรับมือกับ AMR การควบคุม AMR จะไม่เพียงพอหากแหล่งสะสมและเส้นทางการแพร่กระจายในสิ่งแวดล้อมยังคงไม่ได้รับการแก้ไข ซึ่งหมายความว่า การปกป้องสิ่งแวดล้อมและการสุขภาพไม่ได้เป็นเพียงส่วนเสริม แต่เป็นหัวใจหลักสำหรับความมั่นคงด้านสุขภาพระดับโลก ที่ต้องอาศัยการลงทุนและการบูรณาการนโยบายอย่างจริงจัง

บทความวิชาการนี้ชี้ให้เห็นภาพรวมของปัญหาเชื้อแบคทีเรียดื้อยาในสิ่งแวดล้อม โดยเน้นที่เชื้อแกรมลบ ซึ่งครอบคลุมตั้งแต่กลไกการดื้อยาไปจนถึงการแพร่กระจายในระบบบำบัดน้ำเสีย แหล่งที่มาของเชื้อดื้อยาในชุมชนและอุตสาหกรรม ตลอดจนผลกระทบต่อสุขภาพและระบบนิเวศ นอกจากนี้ยังกล่าวถึงแนวทางควบคุมและเทคโนโลยีใหม่สำหรับลดปริมาณเชื้อดื้อยาในสิ่งแวดล้อม ผู้เขียนหวังว่าบทความนี้จะประโยชน์ต่อนักวิจัยและผู้กำหนดนโยบายในการพัฒนาแนวทางแก้ไขวิกฤตเชื้อดื้อยาอย่างบูรณาการและยั่งยืน

1. กลไกการดื้อยาของแบคทีเรียแกรมลบ แบคทีเรียได้พัฒนากลไกต่อต้านฤทธิ์ยาปฏิชีวนะอย่างหลากหลาย ซึ่งในแบคทีเรียแกรมลบพบกลไกสำคัญ ดังนี้:

การสร้างเอนไซม์ย่อยสลายหรือปรับเปลี่ยนยา

แบคทีเรียผลิตเอนไซม์ที่สามารถทำลายหรือปรับโครงสร้างทางเคมีของยาปฏิชีวนะ ทำให้นั้นหมดฤทธิ์ ตัวอย่างเช่น เอนไซม์เบตาแลคเตมเมส (β -lactamase) ซึ่งแบคทีเรียแกรมลบหลายชนิดสร้างขึ้นเพื่อย่อยสลายยาในกลุ่มเบตาแลคแทม เช่น Penicillins, Cephalosporins, และ Carbapenems เอนไซม์เบตาแลคเตมเมสมีหลายชนิดและกลายพันธุ์แตกแขนงไปมากมาย เช่น Extended-Spectrum β -lactamases (ESBLs) ที่ย่อยสลายยาได้กว้างขึ้น และ carbapenemases ที่ย่อยสลายคาร์บาเพนิมซึ่งเป็นยาทางเลือกสุดท้ายได้ นอกจากนี้ยังมีเอนไซม์อื่น ๆ เช่น Aminoglycoside-Modifying Enzymes (AMEs) ที่เติมหมู่เคมีลงบนยาอะมิโนไกลโคไซด์ ทำให้ยาจับเป้าหมายไม่ได้ผล เป็นต้น [4]

การป้องกันไม่ให้ยาเข้าสู่เซลล์ (ลดการซึมผ่านเข้าของยา)

เยื่อหุ้มชั้นนอกของแบคทีเรียแกรมลบมีประตูโปรตีนที่เรียกว่า พอริน (porin) ทำหน้าที่ควบคุมการผ่านเข้าออกของโมเลกุลต่าง ๆ [5] ยาปฏิชีวนะหลายชนิดโดยเฉพาะกลุ่มที่มีโมเลกุลขนาดใหญ่ จึงจำเป็นต้องผ่านช่องพอรินเหล่านี้เพื่อเข้าไปในเซลล์ แบคทีเรียสามารถปรับลดปริมาณหรือเปลี่ยนโครงสร้างของพอริน เพื่อลดการนำเข้าของยา ส่งผลให้ยาเข้าสู่เซลล์ได้น้อยลงจนไม่ถึงระดับที่ออกฤทธิ์ การกลายพันธุ์ที่ยีนสร้างพอรินหรือการปิดกั้นช่องพอรินพบได้ในเชื้อ Enterobacteriaceae ที่ดื้อยา Carbapenems ซึ่งมักจะเกิดร่วมกับการมีเอนไซม์เบตาแลคเตมเมส ส่งผลให้ดื้อยาอย่างรุนแรง [6-7]

การเพิ่มการขับยาออกจากเซลล์ (Efflux pumps)

แบคทีเรียแกรมลบมีระบบปั๊มขับดันสาร (efflux pump) บนเยื่อหุ้มเซลล์ ซึ่งโดยปกติช่วยกำจัดสารพิษออกนอกเซลล์ แต่หลายชนิดสามารถขับยาปฏิชีวนะออกนอกเซลล์ก่อนที่จะออกฤทธิ์ได้อย่างมีประสิทธิภาพ [8-9] กลไกนี้ทำให้ความเข้มข้นของยาภายในเซลล์ต่ำกว่าระดับฆ่าเชื้อหรือยับยั้งการเจริญ ปั๊มเหล่านี้มีความจำเพาะต่อยาต่ำ จึงสามารถขับไล่ยาได้หลากหลายกลุ่ม (multi-drug efflux) เช่น การปั๊มแบบ AcrAB-TolC ใน *E. coli* และสายพันธุ์ใกล้เคียง ที่พบว่าเกี่ยวข้องกับการดื้อยาหลายชนิดในแบคทีเรียแกรมลบ การเพิ่มการแสดงออกของยีนที่ควบคุม efflux pump หรือการกลายพันธุ์ให้ปั๊มมีประสิทธิภาพมากขึ้น ล้วนเป็นสาเหตุให้เซลล์ทนต่อยาปฏิชีวนะได้สูงขึ้นทั้งสิ้น [3, 8]

การปรับเปลี่ยนเป้าหมายการออกฤทธิ์ของยา

ยาปฏิชีวนะแต่ละชนิดมีเป้าหมายจำเพาะในเซลล์ เช่น ผนังเซลล์ ไรโบโซม และเอนไซม์สังเคราะห์ดีเอ็นเอ เป็นต้น แบคทีเรียสามารถกลายพันธุ์หรือดัดแปลงโครงสร้างของเป้าหมายเหล่านี้ ทำให้จับยาหรือยับยั้งไม่ได้ เช่น การกลายพันธุ์ที่ยีน DNA gyrase หรือ Topoisomerase IV ซึ่งเป็นเป้าหมายของยาควิโนโลน ทำให้เชื้อแกรมลบทนต่อยา ciprofloxacin หรือ



levofloxacin ได้ อีกตัวอย่างคือการดัดแปลงโปรตีนจับเพนิซิลลิน (Penicillin-Binding Proteins, PBP) ซึ่งเป็นเอนไซม์สร้างผนังเซลล์ ให้มีโครงสร้างเปลี่ยนไปจนยากกลุ่มเบตาแลคแทมจับไม่ได้ เช่น PBP-3 ที่กลายพันธุ์ใน *Pseudomonas aeruginosa* ลดความไวต่อ ceftazidime เป็นต้น หรือการเติมหมู่เมทิลที่ตำแหน่งสำคัญบน ไรโบโซม 23S rRNA โดยเอนไซม์ methyltransferase ที่เข้ารหัสจากยีน *erm* ทำให้ไรโบโซมไม่จับกับยา Macrolides และ Lincosamides จึงดื้อยาเหล่านี้ เป็นต้น [4]

กลไกที่ทำงานร่วมกัน

กลไกที่กล่าวมาก่อนหน้านี้ไม่ได้เกิดกลไกแยกเดี่ยว ๆ แต่เชื่อดื้อยาส่วนใหญ่มักใช้หลายกลไกประกอบกันเพื่อเพิ่มระดับการต้านทาน ตัวอย่าง *Klebsiella pneumoniae* ที่ดื้อ carbapenem สายพันธุ์หนึ่งอาจสร้างเอนไซม์ class A carbapenemase ร่วมกับการกลายพันธุ์สูญเสียโปรตีนพอริน 2 ชนิด และมีการแสดงออกของปั๊ม AcrAB-TolC มากผิดปกติ ส่งผลให้ดื้อต่อยากลุ่มคาร์บาเพนิมเกือบทั้งหมด รวมทั้งยาใหม่อย่าง meropenem-vaborbactam [4] การที่แบคทีเรียแกรมลบมีกลไกการดื้อยาที่ทำงานร่วมกันหลายรูปแบบ ทำให้เกิดความท้าทายอย่างยิ่งในการพัฒนาและการวางแผนการรักษา การพึ่งพายาปฏิชีวนะที่ออกฤทธิ์ต่อเป้าหมายเดียวจึงมีความเสี่ยงสูงที่จะถูกแบคทีเรียปรับตัวจนดื้อยาได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งแนวทางการรักษาในอนาคตจำเป็นต้องมุ่งเน้นไปที่การใช้ยาผสมผสานที่ออกฤทธิ์ผ่านกลไกที่แตกต่างกัน หรือการพัฒนาใหม่ที่สามารถเอาชนะการดื้อยาได้หลายกลไก เพื่อให้การต่อสู้กับ AMR ยังคงมีประสิทธิภาพ โดยสามารถสรุปกลไกการดื้อยาดังแสดงในตารางที่

1

ตารางที่ 1 กลไกการดื้อยาของแบคทีเรียแกรมลบ (Antibiotic Resistance Mechanisms in Gram-negative Bacteria)

กลไกการดื้อยา	หลักการ / กระบวนการ	กลุ่มยาที่ได้รับผลกระทบ	ยีนหรือเอนไซม์ที่เกี่ยวข้อง	ตัวอย่างสายพันธุ์
1. การสร้างเอนไซม์ย่อยสลายยา	ผลิตเอนไซม์ที่ทำลายโครงสร้างยาปฏิชีวนะ เช่น β -lactamase	β -lactams (penicillins, cephalosporins, carbapenems)	<i>blaTEM</i> , <i>blaCTX-M</i> , <i>blaNDM-1</i> , <i>blaKPC</i>	<i>E. coli</i> , <i>Klebsiella pneumoniae</i>
2. ลดการซึมผ่านของยาเข้าสู่เซลล์	ปรับลดหรือกลายพันธุ์ของโปรตีนพอริน (porin) บนเยื่อหุ้มชั้นนอก	Carbapenems, Cephalosporins	<i>ompC</i> , <i>ompF</i> (porin genes)	<i>Enterobacter cloacae</i> , <i>K. pneumoniae</i>
3. การเพิ่มการขับยาออกจากเซลล์ (Efflux pumps)	ใช้ระบบปั๊มขับยาออกจากเซลล์ก่อนยาออกฤทธิ์	Quinolones, Tetracyclines, Macrolides	<i>acrAB-tolC</i> , <i>mexAB-oprM</i>	<i>E. coli</i> , <i>Pseudomonas aeruginosa</i>
4. การปรับเปลี่ยนเป้าหมายของยา	กลายพันธุ์ที่ยีนเป้าหมาย ทำให้ยาจับไม่ได้	Fluoroquinolones, β -lactams, Macrolides	<i>gyrA</i> , <i>parC</i> , <i>pbp</i> , <i>erm</i>	<i>A. baumannii</i> , <i>E. coli</i>
5. การทำงานร่วมกันหลายกลไก	ใช้หลายกลไกพร้อม เช่น เอนไซม์ + efflux + การกลายพันธุ์	หลายกลุ่มยา (multidrug-resistant)	รวมหลายยีนดื้อยาในพลาสมิดเดียวกัน	<i>K. pneumoniae</i> (carbapenem-resistant), <i>P. aeruginosa</i>



2. การแพร่กระจายของยีนดื้อยาในระบบบำบัดน้ำเสีย แหล่งสิ่งแวดล้อมที่ถูกระบุว่าเป็น “ฮอตสปอต (Hotspot)” การรวมตัวและแพร่กระจายของเชื้อดื้อยาและยีนดื้อยา (ARB & ARGs) ที่สำคัญคือ โรงบำบัดน้ำเสีย (Wastewater Treatment Plants – WWTPs)

โรงบำบัดน้ำเสีย "ฮอตสปอต"

เนื่องจากน้ำเสียจากหลากหลายแหล่ง เช่น ชุมชน โรงพยาบาล อุตสาหกรรม การเกษตร เป็นต้น จะถูกส่งมารวมกันที่โรงบำบัดน้ำเสียทำให้กลายเป็นจุดรวมที่มีแบคทีเรียปริมาณมากและหลายสายพันธุ์อยู่ร่วมกันภายใต้สภาพแวดล้อมที่เอื้ออำนวย ทั้งมีสารอินทรีย์และสารอาหาร ตลอดจนมีสารปนเปื้อนต่าง ๆ รวมถึงยาปฏิชีวนะในระดับความเข้มข้นต่ำ ๆ อยู่ด้วย สภาพดังกล่าวเอื้อต่อการถ่ายทอดยีนดื้อยาในแนวนอน (Horizontal Gene Transfer: HGT) อย่างมาก ซึ่งแบคทีเรียต่างสายพันธุ์สามารถแลกเปลี่ยนยีนดื้อยาผ่าน Plasmids, Transposons และ Integrons ได้รวดเร็วกว่าอาศัยการกลายพันธุ์เองหลายเท่า โรงบำบัดน้ำเสียไม่ได้เป็นเพียงจุดรวบรวมน้ำเสียและยีนดื้อยาเท่านั้น แต่ยังทำหน้าที่เป็น “แหล่งบ่มเพาะจุลินทรีย์สำหรับการวิวัฒนาการการดื้อยา” โดยความหนาแน่นของแบคทีเรียที่สูง ความหลากหลายของสายพันธุ์ และการมีอยู่ของการคัดเลือกแบบกดดัน เช่น ยาปฏิชีวนะ โลหะหนัก สารฆ่าเชื้อ ล้วนเสริมสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมสำหรับการถ่ายทอดยีนในแนวนอนอย่างรวดเร็ว ซึ่งเร่งการเกิดขึ้นของเชื้อดื้อยาสายพันธุ์ใหม่ ๆ การบำบัดน้ำเสียจึงอาจกลายเป็นการเร่งวิฤต AMR โดยไม่ตั้งใจ หากไม่มีการจัดการที่เหมาะสม [7-9]

กลไกการถ่ายทอดยีนดื้อยาในแนวนอน

โดย HGT มี 3 รูปแบบหลัก ได้แก่ การเชื่อมต่อกันโดยตรงของแบคทีเรีย เพื่อส่งพลาสมิดที่มียีนดื้อยาให้กัน การรับ DNA เปลือยจากสิ่งแวดล้อมเข้าสู่เซลล์ เช่น แบคทีเรียบางชนิดสามารถเก็บชิ้นส่วน DNA ที่มียีนดื้อยาจากน้ำทิ้งเข้ามาและบรรจุเข้าในจีโนมตัวเอง และการถ่ายทอดผ่านไวรัสแบคทีเรีย (transduction) ซึ่งฟาจสามารถเก็บยีนของแบคทีเรียดื้อยาจากโฮสต์หนึ่งและนำไปปล่อยสู่แบคทีเรียอีกตัวเมื่อมีการติดเชื้อฟาจ กลไก HGT ทั้งสามนี้เกิดขึ้นได้ในโรงบำบัดน้ำเสียที่มีความหนาแน่นของแบคทีเรียสูง อีกทั้งกระบวนการบำบัดหลายขั้นตอน (ตั้งแต่ถังตะกอนขั้นต้น ถึงเติมอากาศ ถังตกตะกอนขั้นสุดท้าย) ก็เอื้อต่อการที่แบคทีเรียจากแหล่งต่าง ๆ มาอยู่ใกล้ชิดและมีโอกาสแลกเปลี่ยนสารพันธุกรรมกันมากขึ้น งานวิจัยชี้ว่า HGT เป็นปัจจัยสำคัญที่สุดในการกระจายยีนดื้อยาในระบบบำบัดน้ำเสีย เมื่อเทียบกับการดื้อยาผ่านการกลายพันธุ์แบบสายตรง [7-9]

ประสิทธิภาพของระบบบำบัดน้ำเสียแบบดั้งเดิม

แม้ระบบบำบัดน้ำเสียออกแบบมาเพื่อกำจัดสารอินทรีย์และเชื้อจุลินทรีย์ แต่งานวิจัยพบว่าปัจจุบันน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วยังคงมีปริมาณเชื้อแบคทีเรียดื้อยาและยีนดื้อยาสูงกว่าน้ำธรรมชาติทั่วไปมาก [7] แล้วพบว่าแม้หน้าที่ใช้เป็นแหล่งรองรับน้ำทิ้งจากระบบบำบัดน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดจะสามารถลดจำนวนเชื้อแบคทีเรียทั้งหมดลงได้หลายเท่า แต่ยีนดื้อยาก็ยังคงตกค้างออกสู่สิ่งแวดล้อม การออกแบบระบบบำบัดน้ำเสียแบบดั้งเดิมที่เน้นการกำจัดสารอินทรีย์เป็นหลัก ไม่ได้มุ่งเป้าไปที่การกำจัดยาปฏิชีวนะหรือยีนดื้อยา [7] ทำให้ระบบเหล่านี้กลายเป็นแหล่งที่มีแรงกดดันคัดเลือก (Selective pressure) โดยไม่ตั้งใจ ซึ่งหมายความว่าในระหว่างกระบวนการบำบัด แบคทีเรียที่ไวต่อยาจะถูกกำจัดไปเป็นจำนวนมาก ในขณะที่แบคทีเรียดื้อยาจะสามารถอยู่รอดและเพิ่มจำนวนขึ้นได้ ทำให้สัดส่วนของแบคทีเรียดื้อยาในน้ำทิ้งที่ปล่อยออกสู่สิ่งแวดล้อมอาจเพิ่มขึ้นเมื่อเทียบกับน้ำเสียดิบที่เข้ามา ซึ่งเปลี่ยนระบบบำบัดน้ำเสียจากการเป็นเพียงจุดรวบรวมน้ำเสียไปสู่การเป็นแหล่งที่สามารถเร่งการพัฒนาและแพร่กระจายของเชื้อดื้อยาที่อันตรายยิ่งขึ้นได้

การตกค้างของเชื้อดื้อยาและยีนดื้อยาในน้ำทิ้งและกากตะกอน

มีหลักฐานว่ายีนดื้อยาที่ตรวจพบในน้ำเสียมักอยู่ในเชื้อก่อโรคที่เกี่ยวข้องทางคลินิก กล่าวคือเป็นยีนชนิดเดียวกับที่พบในเชื้อดื้อยาจากผู้ป่วยนั่นเอง เช่น ยีนกลุ่ม *bla*CTX-M (ดีออกซีฟอสฟอไรลทรานสเฟอเรส 3) หรือ *bla*NDM-1 (ดีคาร์บาเพนิม) ซึ่งเดิมพบในโรงพยาบาล [8] สามารถพบได้ในเชื้อ *E. coli* และ *K. pneumoniae* ที่แยกจากน้ำทิ้งชุมชนและน้ำในสิ่งแวดล้อมทั่วไป นอกจากนี้ Class 1 integrons (อินทิกรอน) (*int1*) ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้การรวมยีนดื้อยาแบบหลายชุดในจีโนม ก็พบได้ในแบคทีเรีย

จากน้ำเสียที่ผ่านการบำบัดแล้วในสัดส่วนที่ไม่น้อย ยีนดื้อยาหลากหลายกลุ่ม เช่น tetracycline resistance gene (*tet*), sulfonamide resistance gene (*sul1*), quinolone resistance gene (*qnr*), β -lactam resistance genes และ aminoglycoside resistance genes เป็นต้น มักตรวจพบในน้ำเสียดิบและน้ำปล่อยออกจากโรงบำบัด (Treated effluent) ด้วยปริมาณระดับ 10^2 – 10^1 copy ต่อยีน 16S ซึ่งถือว่าสูงมาก [8-10] ยิ่งไปกว่านั้นเชื้อแบคทีเรียและยีนดื้อยาส่วนใหญ่จะสะสมอยู่ในภาคตะกอนที่แยกออกจากระบบบำบัดน้ำเสียด้วยวิธีการบำบัดตกตะกอนแบบดั้งเดิม เช่น การทำให้ข้นและการรีดน้ำ มักไม่มีประสิทธิภาพในการกำจัดยีนดื้อยาอย่างมีนัยสำคัญ [11] ซึ่งหมายความว่าภาคตะกอนเหล่านี้สามารถทำหน้าที่เป็นแหล่งสะสมเชื้อดื้อยาที่สำคัญ และอาจเป็นเส้นทางการแพร่กระจายสู่สิ่งแวดล้อมหากไม่มีการจัดการที่เหมาะสม

3. แหล่งที่มาสำคัญของเชื้อดื้อยา: โรงพยาบาล อุตสาหกรรม และชุมชน ปัญหาเชื้อดื้อยาในสิ่งแวดล้อมทวีความรุนแรงขึ้นจากการปล่อยยาปฏิชีวนะและจุลินทรีย์ดื้อยาอย่างต่อเนื่องจากแหล่งกำเนิดต่าง ๆ ที่เกิดจากกิจกรรมของมนุษย์

น้ำเสียจากโรงพยาบาล

น้ำเสียจากโรงพยาบาล (Hospital wastewater หรือ HWW) ถือเป็นแหล่งปล่อยเชื้อดื้อยาและยาปฏิชีวนะที่สำคัญ เนื่องจากผู้ป่วยในโรงพยาบาลมักได้รับยาปฏิชีวนะขนาดสูงอย่างต่อเนื่อง ทำให้มีการขับถ่ายทั้งเชื้อดื้อยาและยาปฏิชีวนะส่วนเกินออกมาพร้อมกับของเสีย [12, 13] งานวิจัยของ Hassoun-Kheir และคณะ [7] พบว่าตัวอย่างน้ำเสีย 81% ของการศึกษารายงานว่าน้ำเสียจากโรงพยาบาลมีระดับการปนเปื้อนเชื้อและยีนดื้อยาสูงกว่าน้ำเสียชุมชนทั่วไปอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ในจำนวน 32 ตัวอย่างที่ตรวจสอบผลกระทบของน้ำเสียจากโรงพยาบาลต่อสิ่งแวดล้อม และพบ 25 ตัวอย่าง (ประมาณ 78%) ที่สรุปตรงกันว่าน้ำเสียจากโรงพยาบาลเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งเชื้อดื้อยาออกสู่สภาพแวดล้อมภายนอก [7] เชื้อดื้อยาที่พบบ่อยในน้ำเสียจากโรงพยาบาล เช่น Enterobacteriaceae ที่สร้าง ESBL และ Carbapenemase (เช่น ยีน *blaCTX-M*, *blaKPC*, *blaNDM-1*), Enterococcus ดื้อยากลุ่ม Glycopeptide (Vancomycin-resistant Enterococcus; VRE), Staphylococcus aureus ดื้อเมทิซิลลิน (Methicillin-resistant Staphylococcus aureus; MRSA) เป็นต้น สามารถตรวจพบได้ในน้ำทิ้งโรงพยาบาลในระดับที่สูงกว่าแหล่งอื่น [13] ตัวอย่างเช่น ยีน *blaNDM-1* พบใน 71% ของตัวอย่างน้ำเสียจากโรงพยาบาล เทียบกับ 12% ในน้ำเสียชุมชน หรือยีน *mecA* (ดื้อเมทิซิลลินใน MRSA) พบปริมาณ 3.26×10^7 copy/100 มิลลิลิตร ในน้ำเสียโรงพยาบาล แต่กลับกันคณะผู้วิจัยไม่พบยีน *mecA* จากน้ำเสียเทศบาลทั่วไป [11] อีกตัวอย่างหนึ่งคือ ยีน ESBL เช่น *blaCTX-M* พบในน้ำเสียโรงพยาบาลที่ความเข้มข้น $7.96 \log \text{ copy/100 มิลลิลิตร}$ สูงกว่าในน้ำเสียเมือง ($6.86 \log \text{ copy/100 มิลลิลิตร}$) อย่างมีนัยสำคัญ [11, 12] ซึ่งชี้ให้เห็นว่าโรงพยาบาลเป็นแหล่งสะสมเชื้อและยีนดื้อยาที่หนาแน่นกว่าน้ำเสียจากชุมชนทั่วไป น้ำเสียจากโรงพยาบาลยังมีปริมาณ Mobile Genetic Elements (MGEs) สูง เช่น ฟาจ (สูงกว่า 2 เท่า) และพลาสมิด (สูงกว่า 3.8 เท่า) เมื่อเทียบกับน้ำเสียชุมชน ซึ่งบ่งชี้ถึงความเสี่ยงสูงของการถ่ายทอดยีนในแนวนอน [11] แม้ว่าน้ำเสียโรงพยาบาลเป็นสัดส่วนเพียงเล็กน้อย (น้อยกว่า 2%) ของปริมาณน้ำเสียเทศบาลทั้งหมด แต่การที่น้ำเสียเหล่านี้มีเชื้อดื้อยาที่รุนแรงและเกี่ยวข้องกับการรักษาทางคลินิกในระดับที่สูงกว่าอย่างเห็นได้ชัด [11] ทำให้เกิดความเข้าใจว่าการบำบัดน้ำเสีย ณ แหล่งกำเนิด (on-site pre-treatment) ของโรงพยาบาล อาจเป็นมาตรการที่มีประสิทธิภาพและคุ้มค่าอย่างยิ่งในการยับยั้งการแพร่กระจายของ AMR ที่อันตรายที่สุด ก่อนที่เชื้อเหล่านี้จะปะปนไปกับน้ำเสียชุมชนในปริมาณมาก

น้ำเสียจากภาคอุตสาหกรรม (โดยเฉพาะอุตสาหกรรมเภสัชกรรม)

ภาคอุตสาหกรรมที่เกี่ยวข้องกับการผลิตหรือการใช้ยาปฏิชีวนะในปริมาณมาก เป็นอีกแหล่งหนึ่งที่มีบทบาทในปัญหาเชื้อดื้อยา ตัวอย่างที่ชัดเจนคือ โรงงานผลิตยาปฏิชีวนะ ซึ่งหากมีการจัดการน้ำเสียไม่ดี อาจปล่อยทั้งตัวยาสำคัญและเชื้อดื้อยาออกสู่สิ่งแวดล้อมโดยตรง [14] ระดับความเข้มข้นของยาปฏิชีวนะในน้ำทิ้งจากโรงงานยาบางแห่งสูงกว่าค่า C_{MAX} ในพลาสมาของผู้ป่วยที่ได้รับยาเสียอีก ทำให้แหล่งน้ำใกล้เคียงกลายเป็นแหล่งเพาะ “Superbug (ซูเปอร์บั๊ก)” ตามธรรมชาติ รายงานวิจัยโดย Kotwani และคณะ [9] ระบุว่าน้ำทิ้งจากโรงงานยา มักปนเปื้อนด้วยความเข้มข้นสูงของทั้งยาปฏิชีวนะและยีนดื้อยา และทำหน้าที่เสมือน “ฮอตสปอต” ของการปนเปื้อนเชื้อดื้อยาในสิ่งแวดล้อม หากน้ำทิ้งเหล่านี้ไม่ได้รับการบำบัดอย่างเหมาะสม



การปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมนำไปสู่การปนเปื้อนของยาปฏิชีวนะในระดับที่สูง และยาปฏิชีวนะคงทนอยู่นาน ส่งผลให้เกิดแรงกดดันเชิงวิวัฒนาการต่อจุลินทรีย์ในธรรมชาติอย่างต่อเนื่องจนเกิดและกระจายยีนดื้อยาเพิ่มขึ้น [10] ที่น่ากังวลคือ ปัจจุบันหลายประเทศยังไม่มีมาตรการมาตรฐานความเข้มข้นสูงสุดของยาปฏิชีวนะในน้ำทิ้งโรงงานยาอย่างเป็นรูปธรรม [15] ทำให้การควบคุมการปล่อยสารเหล่านี้เป็นไปอย่างยากลำบาก บริษัทเภสัชกรรมหลายแห่งยังคงใช้ความสนใจที่แนะนำโดย AMR Industry Alliance และการติดตามการปฏิบัติตามข้อกำหนด [16] การปล่อยของเสียที่มีความเข้มข้นสูงจากโรงงานผลิตยาโดยไม่มีการควบคุมที่เพียงพอ แสดงถึงความล้มเหลวทางจริยธรรมและกฎระเบียบที่สำคัญ ซึ่งสร้าง "แหล่งเพาะเชื้อแบคทีเรีย" ที่เร่งการวิวัฒนาการของเชื้อดื้อยาในสิ่งแวดล้อมอย่างเข้มข้น และอาจบ่อนทำลายความพยายามระดับโลกในการลดการใช้ยาปฏิชีวนะและการจัดการยาอย่างรอบคอบ สิ่งนี้ชี้ให้เห็นถึงความจำเป็นเร่งด่วนสำหรับกฎระเบียบระหว่างประเทศที่มีผลผูกพันและกลไกการบังคับใช้ที่เข้มแข็ง เพื่อให้บริษัทเภสัชกรรมต้องรับผิดชอบต่อผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม

สิ่งปลูกจากชุมชนและเมือง

แม้ชุมชนทั่วไปที่ไม่ใช่โรงพยาบาลมีการใช้ยาปฏิชีวนะน้อยกว่า แต่การใช้ยาปฏิชีวนะอย่างแพร่หลายในมนุษย์ เช่น การซื้อยาเกินสั่ง การใช้ในคลินิกเอกชน เป็นต้น ทำให้น้ำเสียชุมชนหรือสิ่งปลูกจากครัวเรือนก็มีเชื้อดื้อยาไม่น้อยเช่นกัน [6] ความแตกต่างคือ น้ำเสียชุมชนมักมีความหลากหลายของสายพันธุ์แบคทีเรียสูงกว่า แต่ความเข้มข้นของยาปฏิชีวนะอาจต่ำกว่าเมื่อเทียบกับโรงพยาบาล อย่างไรก็ตามเมื่อรวมปริมาณประชากรจำนวนมาก ยีนดื้อยาหลายชนิดก็ถูกปล่อยจากชุมชนสู่ระบบท่อรวม โดยเฉพาะในประเทศที่มีการใช้ยาปฏิชีวนะสูง มีงานวิจัยพบว่าน้ำเสียชุมชนในบางประเทศมีการปนเปื้อนยีนดื้อยาไม่ต่างจากน้ำเสียโรงพยาบาลมากนัก (ขึ้นอยู่กับอัตราการใช้ยาและสุขอนามัย) เช่น การศึกษาของ Alexander และคณะ ที่สวีเดน พบยีนดื้อยาหลายชนิดในน้ำเสียเมืองในระดับใกล้เคียงกับน้ำเสียโรงพยาบาล ยกเว้นบางยีนที่จำเพาะโรงพยาบาลเท่านั้น [11]

นอกจากนี้การที่น้ำเสียชุมชนมีแหล่งที่มาหลากหลาย เช่น บ้านเรือน ร้านขายยา ฟาร์มขนาดเล็ก เป็นต้น ทำให้ส่วนผสมของสารอินทรีย์และสารเคมี เช่น สารฆ่าเชื้อที่ใช้ตามบ้าน โลหะหนักจากโรงงาน สารซักล้าง เป็นต้น ซึ่งสารเหล่านี้บางอย่างก็มีฤทธิ์ในการคัดเลือกเชื้อดื้อยาเช่นกัน [7] การปล่อยสิ่งปลูกของมนุษย์ที่ไม่ได้บำบัดหรือบำบัดไม่เพียงพอโดยตรงสู่สิ่งแวดล้อมเป็นปัญหาสำคัญระดับโลก โดยเฉพาะในประเทศกำลังพัฒนา ซึ่งอำนวยความสะดวกในการแพร่กระจายของ AMR ในวงกว้าง [12] ในขณะที่โรงพยาบาลและโรงงานอุตสาหกรรมเป็น "แหล่งกำเนิดเฉพาะจุดที่มีความเสี่ยงสูง" สำหรับ AMR ที่มีความรุนแรงหรือความเข้มข้นสูง น้ำเสียชุมชนทำหน้าที่เป็น "แหล่งสะสมปริมาณมากที่กระจายตัว" ซึ่งกระจายยีนดื้อยาหลากหลายชนิดไปทั่วสิ่งแวดล้อม ซึ่งหมายความว่า การควบคุม AMR ที่มีประสิทธิภาพไม่เพียงแต่มุ่งเป้าไปที่แหล่งกำเนิดความเสี่ยงสูงเท่านั้น แต่ต้องปรับปรุงโครงสร้างพื้นฐานด้านสุขาภิบาลในเขตเทศบาลและการจัดการยาปฏิชีวนะของประชาชนในวงกว้าง เพื่อลดปริมาณรวมของเชื้อดื้อยาในสิ่งแวดล้อม

4. ผลกระทบของเชื้อดื้อยาต่อสุขภาพมนุษย์และสิ่งแวดล้อม การมีอยู่ของเชื้อแบคทีเรียดื้อยาในสิ่งแวดล้อมอย่างแพร่หลายก่อให้เกิดภัยคุกคามที่ร้ายแรงและหลากหลายต่อทั้งสุขภาพของมนุษย์และความสมบูรณ์ของระบบนิเวศ

ผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์

การติดเชื้อจากแบคทีเรียดื้อยาทำให้การรักษายุ่งยากและได้ผลการรักษาน้อย ผู้ป่วยที่ติดเชื้อดื้อยามักมีอัตราการเสียชีวิตสูงกว่าปกติ และมีระยะเวลาการรักษาในโรงพยาบาลนานขึ้น งานวิจัยประเมินว่าผู้ป่วยที่ติดเชื้อแบคทีเรียดื้อยาจะมีความเสี่ยงต่อผลลัพธ์ทางคลินิกที่เลวร้ายลงอย่างชัดเจน และต้องใช้ทรัพยากรทางการแพทย์มากกว่าผู้ป่วยที่ติดเชื้อสายพันธุ์ที่ไวต่อยาอย่างมีนัยสำคัญ [1] ยกตัวอย่างเช่น การติดเชื้อกระแสเลือดด้วย *K. pneumoniae* คือการบาปเนมมีอัตราการเสียชีวิตประมาณ 50% เทียบกับการติดเชื้อสายพันธุ์ที่ยังไวต่อการบาปเนม (20%) นอกจากนี้เชื้อดื้อยามักต้องใช้ยาแพงหรือยาที่เป็นพิษกว่า เช่น colistin ซึ่งมีผลข้างเคียงต่อไต ทำให้ค่าใช้จ่ายในการรักษาพุ่งสูงขึ้น และเพิ่มภาระงานของบุคลากรทางการแพทย์ ค่าใช้จ่ายด้านสุขภาพที่เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องอันเนื่องมาจาก AMR ก่อให้เกิดวงจรที่ระบบดูแลสุขภาพต้องแบกรับภาระที่หนัก

ขึ้น ซึ่งอาจนำไปสู่การใช้ทรัพยากรจากบริการสาธารณสุขที่จำเป็นอื่น ๆ สิ่งนี้ชี้ให้เห็นว่า AMR ไม่เพียงแต่ส่งผลกระทบต่อโดยตรงต่อผู้ป่วยเท่านั้น แต่ยังคุกคามความยั่งยืนและการเข้าถึงบริการสุขภาพทั่วโลก

ความเสี่ยงทางอ้อมจากการสัมผัสสิ่งแวดล้อม

เมื่อเชื้อดื้อยาแพร่สู่สิ่งแวดล้อมแล้ว มนุษย์สามารถรับเชื้อดื้อยากลับมาได้หลายทาง เช่น การบริโภคน้ำหรืออาหารที่ปนเปื้อนเชื้อดื้อยา การสัมผัสผ่านกิจกรรมสันทนาการอย่างการว่ายน้ำในแหล่งน้ำธรรมชาติที่มีเชื้อดื้อยา มีงานวิจัยพบว่า นักเล่นเซิร์ฟมีโอกาสได้รับ *E. coli* ดื้อยาทางการกลืนกินน้ำทะเลมากกว่าคนทั่วไป และผ่านห่วงโซ่อาหาร ผัก ผลไม้ หรือสัตว์น้ำที่เพาะเลี้ยง เติบโตในสภาพแวดล้อมที่มีเชื้อดื้อยาสามารถนำเชื้อเหล่านั้นมาสู่ผู้บริโภคได้ [12] นอกจากการติดเชื้อโดยตรงแล้ว สิ่งที่น่ากังวลคือการที่แบคทีเรียในร่างกายของคนเรา เช่น แบคทีเรียในลำไส้ ไปรับยีนดื้อยาจากแบคทีเรียสิ่งแวดล้อม ทำให้กลายเป็นพาหะยีนดื้อยาโดยไม่ก่อโรค แต่หากเชื้อเหล่านี้แพร่ไปยังผู้อื่นหรือกลายเป็นเชื้อฉวยโอกาสภายหลังที่การรักษาดังนั้นเชื้อดื้อยาในสิ่งแวดล้อมจึงถือเป็นภัยคุกคามต่อสุขภาพมนุษย์ทั้งทางตรงและทางอ้อม เส้นทางการสัมผัส AMR จากสิ่งแวดล้อมโดยอ้อมเหล่านี้ ผ่านน้ำ อาหาร และการเป็นพาหะในร่างกาย แสดงให้เห็นว่า AMR ไม่ใช่เพียงปัญหาการติดเชื้อในโรงพยาบาล แต่เป็นความเสี่ยงด้านสุขภาพที่แพร่กระจายในชุมชน ดังนั้นงานด้านสาธารณสุขต้องขยายขอบเขตออกไปนอกสถานพยาบาล ครอบคลุมถึงการสุขาภิบาลสิ่งแวดล้อม ความปลอดภัยของอาหาร และการรณรงค์สร้างความตระหนักรู้แก่สาธารณชนเกี่ยวกับความเสี่ยงจากสิ่งแวดล้อม โดยเน้นย้ำว่า "สิ่งที่ถูกปล่อยสู่สิ่งแวดล้อมสามารถย้อนกลับมาสู่เราได้"

ผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและระบบนิเวศ

นอกเหนือจากผลต่อมนุษย์แล้ว การมีอยู่ของยาปฏิชีวนะและเชื้อดื้อยาในสิ่งแวดล้อมยังส่งผลกระทบต่อสมดุลของระบบนิเวศจุลชีพและสิ่งแวดล้อมโดยรวม งานวิจัยในช่วงหลังชี้ว่าการปนเปื้อนของยาปฏิชีวนะและยีนดื้อยาในสิ่งแวดล้อมสามารถรบกวนกระบวนการนิเวศวิทยาที่สำคัญ เช่น วงจรการหมุนเวียนธาตุอาหารและการย่อยสลายอินทรีย์สาร โดยทำให้ชุมชนจุลินทรีย์เปลี่ยนแปลงไปจากเดิม ตัวอย่างเช่น การปนเปื้อนยาปฏิชีวนะในดินและน้ำอาจฆ่าหรือยับยั้งแบคทีเรียบางกลุ่มที่มีบทบาทย่อยสลายสารอินทรีย์หรือตรึงไนโตรเจน ส่งผลให้กระบวนการหมุนเวียนสารอาหาร (nutrient cycling) และการย่อยสลายสารอินทรีย์บกพร่อง ดินเสื่อมคุณภาพและน้ำเสียสมดุล ลดผลผลิตการเกษตรและคุณภาพน้ำ ซึ่งท้ายที่สุดกระทบต่อความมั่นคงทางอาหารและสุขภาพของระบบนิเวศโดยรวม [7]

นอกจากนี้เชื้อดื้อยาเมื่อแพร่ในธรรมชาติ อาจไปแข่งขันและไล่ล่าแบคทีเรียประจำถิ่น ที่มีประโยชน์อันเป็นพินเฟืองในระบบนิเวศ ทำให้ความหลากหลายทางชีวภาพของจุลินทรีย์ลดลง เกิดการเสียสมดุลในจุลินทรีย์กลุ่มดินและน้ำ นักนิเวศวิทยาบางส่วนจึงมองว่า ยีนดื้อยา ควรถูกจัดให้เป็น "สารมลพิษชนิดใหม่" (Emerging Contaminant) ในสิ่งแวดล้อม เช่นเดียวกับไมโครพลาสติกหรือสารเคมีอื่นๆ [23] เพราะแม้ยีนจะไม่ใช่สารเคมี แต่การแพร่กระจายของยีนดื้อยามีผลกระทบเป็นวงกว้างและยาวนานต่อระบบนิเวศอย่างมีนัยสำคัญ ยีนดื้อยาแตกต่างจากสารมลพิษทางเคมีทั่วไปตรงที่มันเป็นสิ่งมีชีวิตและสามารถถ่ายทอดผ่านกระบวนการทางพันธุกรรมไปยังสิ่งมีชีวิตหลายชนิดและแพร่กระจายไปได้ในระยะทางไกล การจัดหมวดหมู่ยีนดื้อยาให้เป็น "สารมลพิษสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นใหม่" ถือเป็นการเปลี่ยนแปลงแนวคิดที่สำคัญ ซึ่งยกระดับยีนดื้อยาจากปรากฏการณ์ทางชีวภาพไปสู่รูปแบบหนึ่งของมลพิษสิ่งแวดล้อมที่ได้รับการยอมรับ ซึ่งหมายความว่ากฎระเบียบด้านสิ่งแวดล้อมและกรอบการเฝ้าระวังที่เคยใช้กับสารมลพิษทางเคมี ต้องขยายขอบเขตให้ครอบคลุมถึงสารมลพิษทางชีวภาพอย่างยีนดื้อยาด้วย ซึ่งเรียกร้องให้มีการจัดการสิ่งแวดล้อมแบบบูรณาการมากขึ้นที่ตระหนักถึงความเชื่อมโยงระหว่างมลพิษทางเคมีและชีวภาพ

5. แนวทางควบคุมและเทคโนโลยีใหม่ในการจัดการเชื้อดื้อยาในน้ำเสีย

เนื่องจากระบบบำบัดน้ำเสียแบบทั่วไป เช่น ระบบตะกอนเร่ง บ่อเติมอากาศ เป็นต้น ไม่สามารถกำจัดเชื้อดื้อยาและยีนดื้อยาได้อย่างมีประสิทธิภาพเพียงพอ แนวทางการควบคุมปัญหานี้จำเป็นต้องอาศัยทั้งมาตรการจัดการแหล่งกำเนิดและการปรับปรุงเทคโนโลยีการบำบัด



การควบคุมที่แหล่งกำเนิด

“ป้องกันก่อนเกิด ดีกว่าแก้ไขทีหลัง” เป็นหลักการสำคัญในการสกัดกั้นการแพร่กระจายเชื้อดื้อยา มาตรการนี้รวมถึง:

(1) **การใช้ยาปฏิชีวนะอย่างเหมาะสม:** ในโรงพยาบาลและปศุสัตว์ ควรลดการใช้โดยไม่จำเป็นเพื่อลดการเกิดเชื้อดื้อยาใหม่ (19) โครงการบริหารจัดการการใช้ยาปฏิชีวนะ (Antimicrobial Stewardship Programs - ASPs) มีบทบาทสำคัญในการส่งเสริมการใช้ยาอย่างสมเหตุสมผล

(2) **การบำบัดน้ำเสียเฉพาะจุดที่แหล่งกำเนิด:** เช่น ติดตั้งระบบบำบัดขั้นสูงขนาดย่อมที่ทางออกของน้ำเสียโรงพยาบาลหรือโรงงานผลิตยาก่อนปล่อยลงสู่รวมเทศบาล [11] มาตรการเช่นนี้ดีและคุ้มค่ากว่าการปรับปรุงทั้งระบบบำบัดน้ำเสียของเทศบาล เพราะปริมาณน้ำเสียจากจุดกำเนิดเหล่านี้น้อยกว่าและมีความเข้มข้นของมลสารสูง เหมาะแก่การจัดการแยกต่างหาก แนวทางนี้มีความสำคัญอย่างยิ่งสำหรับประเทศกำลังพัฒนาที่มีโครงสร้างพื้นฐานแบบรวมศูนย์จำกัด [19]

(3) **การกำหนดค่ามาตรฐานการระบาย:** รัฐควรกำหนด “ค่าธรรมาภิบาลยาปฏิชีวนะในน้ำทิ้ง” เช่น ระดับความเข้มข้นสูงสุดของยาปฏิชีวนะที่อนุญาตให้มีในน้ำเสียโรงพยาบาลหรือโรงงาน รวมถึงควบคุมการปล่อยโลหะหนักและสารฆ่าเชื้อบางชนิดที่ทราบว่าเป็นปัจจัยร่วมในการเลือกเชื้อดื้อยา (co-selective agents) มาตรฐานเหล่านี้จะกระตุ้นให้แหล่งกำเนิดต้องปรับปรุงการบำบัดและลดการปล่อยสารเสี่ยง [11]

การมุ่งเน้นการควบคุมที่แหล่งกำเนิด โดยเฉพาะอย่างยิ่งสำหรับแหล่งกำเนิดความเสี่ยงสูง เช่น โรงพยาบาลและโรงงานผลิตยา แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงเชิงกลยุทธ์จากการบำบัดแบบ “ปลายท่อ” ที่เป็นการตอบสนอง ไปสู่การป้องกันเชิงรุกที่ “ต้นน้ำ” ซึ่งหมายความว่ากรอบนโยบายของรัฐ ควรให้ความสำคัญกับการกำหนดให้มีการบำบัดที่ต้นกำเนิดแบบภาคบังคับ และกฎระเบียบการระบายที่เข้มงวด ณ จุดวิกฤตเหล่านี้ เนื่องจากสามารถป้องกันการคัดเลือกแบบกดดันที่รุนแรงและเชื้อดื้อยาที่มีความรุนแรงสูงจากการเข้าสู่ระบบสิ่งแวดล้อม ซึ่งจะให้ผลตอบแทนจากการลงทุนที่สูงขึ้นสำหรับการควบคุม AMR

การปรับปรุงกระบวนการบำบัดน้ำเสีย

ปัจจุบันมีการศึกษาหาวิธีเพิ่มประสิทธิภาพการกำจัดเชื้อดื้อยา/ยีนดื้อยาในการบำบัดน้ำเสีย ดังตัวอย่างแนวทางต่อไปนี้:

(1) **การเติมขั้นตอนฆ่าเชื้อ/ทำลายสารพันธุกรรมขั้นสูง:** WWTP บางแห่งได้เพิ่มหน่วยฆ่าเชื้อโรคในขั้นปลายน้ำ เช่น คลอรีน (เติมก๊าซคลอรีน/โซเดียมไฮโปคลอไรท์), รังสีอัลตราไวโอเลต (UV) หรือ โอโซน เพื่อฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ที่หลงเหลือในน้ำทิ้ง นอกจากนี้ยังมีการใช้กระบวนการออกซิเดชันขั้นสูง (Advanced Oxidation Processes, AOPs) เช่น การใช้อนุมูลไฮดรอกซิลจากปฏิกิริยา Fenton, การฉายรังสี UV ร่วมกับเปอร์ออกไซด์ เป็นต้น เพื่อทำลายสารอินทรีย์และบางส่วนอาจทำลาย DNA อิสระที่มียีนดื้อยา กระบวนการ Fenton/UV และ UV-activated persulfate มีประสิทธิภาพสูงเป็นพิเศษ และ AOPs ที่ใช้แร่ธาตุเป็นส่วนประกอบก็แสดงศักยภาพในการลดความต้องการพลังงาน [25]

(2) **การกรองระดับสูง:** การใช้เมมเบรนกรองระดับไมโครหรืออัลตราฟิลเตรชันในขั้นตอนสุดท้าย เช่น การใช้ระบบ MBR – Membrane Bioreactor สามารถกรองขจัดแบคทีเรียออกไปจากน้ำทิ้งได้อย่างมีประสิทธิภาพมากกว่า settling แบบเดิม ลดการหลุดรอดของ ARB (แต่ ARG ในรูป DNA อิสระขนาดเล็กมากยังอาจผ่านได้) จึงอาจต้องผสมกับ AOPs ในการทำลาย DNA [19]

(3) **การจัดการกากตะกอน:** เนื่องจากเชื้อแบคทีเรียและ ARG มักสะสมอยู่ในกากตะกอนที่แยกออกในระบบบำบัด การจัดการ biosolids หลังจากนั้นจึงมีความสำคัญ การใช้เทคโนโลยี เช่น การอบแห้งด้วยความร้อน การใช้ปูนขาว (lime stabilization) การย่อยสลายแบบไม่ใช้ออกซิเจน (anaerobic digestion) หรือการเผาไหม้ไร้ออกซิเจน ล้วนมีรายงานว่าช่วยลดปริมาณเชื้อดื้อยาและยีนดื้อยาในกากตะกอนลงได้อย่างมาก

(4) **เทคโนโลยีชีวภาพใหม่:** หนึ่งในแนวทางที่กำลังได้รับความสนใจคือการใช่วิรัสฆ่าแบคทีเรียหรือแบคทีเรียโอฟาจ (Bacteriophages) เป็นเครื่องมือกวาดล้างเชื้อดื้อยาในน้ำเสีย [10] แนวคิดนี้คือ การคัดเลือกฟาจที่เจาะจงต่อแบคทีเรียก่อโรคดื้อยาที่สำคัญ แล้วเติมลงไปในระบบบำบัดหรือในแหล่งน้ำเพื่อกำจัดเชื้อเหล่านั้น รายงานวิจัยล่าสุดพบว่า ฟาจสามารถลดปริมาณเชื้อดื้อยาในน้ำเสียได้จริงโดยไม่สร้างผลกระทบ เช่น การทดลองใช้ฟาจไลติกกับ *Aeromonas* spp. ดื้อยาที่แยกจาก



น้ำเสียฟาร์มเลี้ยงสัตว์ พบว่าฟางที่คัดมาสามารถฆ่าแบคทีเรียเป้าหมาย ลดการเกิดฟิล์มชีวภาพ และที่สำคัญเมื่อทดลองในถังปฏิกรณ์ที่มีกลุ่มจุลินทรีย์หลายชนิด ฟางก็ช่วยลดสัดส่วน *Aeromonas* ได้อย่างมีนัยสำคัญ ทำให้ผู้วิจัยเสนอว่า ฟางไผ่ตากอาจใช้เป็นวิธีควบคุม ARB ในระบบน้ำเสีย [19] อีกเทคโนโลยีหนึ่งที่อยู่ในขั้นแนวคิดคือ การใช้เอนไซม์ย่อยสลาย DNA หรือนาโนเทคโนโลยีในการทำลาย ARG โดยตรง เช่น ใส่เอนไซม์ที่เรียกว่าที่มีคุณสมบัติเพิ่มปฏิกิริยา Fenton เพื่อช่วยทำลาย DNA ในระบบ [25]

การพัฒนาเทคโนโลยีการบำบัดขั้นสูงและเทคโนโลยีชีวภาพใหม่ ๆ เช่น การบำบัดด้วยฟาง แสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงไปสู่แนวทางแก้ไขปัญา AMR ในน้ำเสียที่มีเป้าหมายเฉพาะเจาะจงและอาจยั่งยืนมากขึ้น อย่างไรก็ตามข้อจำกัดที่ยังคงอยู่คือ การไม่สามารถกำจัดเชื้อได้อย่างได้ 100% และต้นทุนที่สูง [11] ซึ่งหมายความว่า การพึ่งพาเพียงการแก้ไขปัญาทางเทคโนโลยีอย่างเดียวไม่เพียงพอ และตอกย้ำความจำเป็นของแนวทางแบบองค์รวมที่บูรณาการการควบคุมที่แหล่งกำเนิด การสุขาภิบาลที่ดีขึ้น และการใช้ยาปฏิชีวนะอย่างรอบคอบ แทนที่จะพึ่งพาเพียงแค่การแก้ไขปัญาที่ปลายท่อ โดยได้แสดงเทคโนโลยีที่สำคัญเพื่อช่วยบำบัดดังแสดงในตารางที่ 2

ประสิทธิภาพและข้อจำกัด

ไม่มีวิธีใดวิธีหนึ่งที่แก้ปัญาได้อย่างสมบูรณ์ ระบบบำบัดขั้นสูงทุกแบบไม่สามารถกำจัด ARG และ ARB ได้ 100% และมักมีค่าใช้จ่ายสูง การเลือกใช้ควรเป็นลักษณะบูรณาการหลายวิธีร่วมกัน เช่น การจัดการแบบผสมผสานศูนย์กลางและกระจาย (centralized & decentralized mix) ซึ่งให้บำบัดขั้นสูงเฉพาะที่ในโรงพยาบาล/โรงงานยา (decentralized) ควบคู่กับการยกระดับบางขั้นตอนในโรงบำบัดกลาง (centralized) แนวทางนี้จะลดทั้งปริมาณเชื้อดื้อยาในน้ำเสียเข้าระบบและเพิ่มอัตราการกำจัดออก อย่างไรก็ตามก็จำเป็นต้องพิจารณาถึงผลกระทบสิ่งแวดล้อมอื่น เช่น พลังงานที่ใช้ ปริมาณก๊าซเรือนกระจก เพื่อให้แน่ใจว่ามาตรการที่ใช้นั้นคุ้มค่าโดยรวม

การเฝ้าระวังและติดตาม

ส่วนสำคัญของการพัฒนามาตรการเฝ้าระวังเชิงปริมาณของ ARG/ARB ในระบบน้ำเสียและสิ่งแวดล้อม เช่น การพัฒนามาตรฐานวิธีตรวจวัดยีนดื้อยา ผ่าน qPCR หรือ Metagenomic sequencing ที่เป็นที่ยอมรับ เพื่อใช้เปรียบเทียบและติดตามแนวโน้มได้ [20] ปัจจุบันหน่วยงานหลายประเทศเริ่มบรรจุการตรวจ ARG ในน้ำเสียเป็นส่วนหนึ่งของโปรแกรมเฝ้าระวัง AMR ระดับชาติ เช่น โครงการนำร่องของ WHO GLASS ในบางประเทศที่ตรวจยีนดื้อยาในน้ำเสียชุมชนเพื่อติดตาม AMR ในระดับประชากร การมีข้อมูลเฝ้าระวังจะช่วยให้ประเมินประสิทธิผลของมาตรการต่าง ๆ และปรับปรุงนโยบายได้ทันทั่วทั้ง

ตารางที่ 2 เทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียและประสิทธิภาพในการกำจัดเชื้อดื้อยา / ยีนดื้อยา

กระบวนการบำบัด	หลักการทำงาน	ประสิทธิภาพ		
		โดยประมาณในการลด ARB/ARG (%)	ข้อดี	ข้อจำกัด
Activated sludge / Conventional aeration	ย่อยสลายสารอินทรีย์โดยจุลินทรีย์	50–80%	ต้นทุนต่ำ, ใช้แพร่หลาย	ไม่กำจัดยีนอิสระ (free DNA) ได้
Membrane bioreactor (MBR)	การกรองระดับไมโคร-อัลตรา ร่วมกับชีวภาพ	90–99%	ลดการหลุดรอดของเชื้อได้ดี	ค่าใช้จ่ายสูง, ต้องบำรุงรักษา
UV disinfection	ทำลาย DNA ของจุลินทรีย์ด้วยรังสีอัลตราไวโอเลต	70–95%	ไม่สร้างของเสียเคมี	ประสิทธิภาพลดลงในน้ำขุ่น



กระบวนการบำบัด	หลักการทำงาน	ประสิทธิภาพ		
		โดยประมาณในการลด ARB/ARG (%)	ข้อดี	ข้อจำกัด
Ozonation / AOPs (Advanced Oxidation Processes)	สร้างอนุมูลอิสระ (•OH) เพื่อทำลายสารและ DNA	90–99%	ทำลาย ARG ได้ดี	ต้นทุนพลังงานสูง
Phage therapy / Biocontrol	ใช้แบคทีเรียฟาจทำลายเชื้อดื้อยาเฉพาะกลุ่ม	80–95% (เฉพาะเป้าหมาย)	ไม่สร้างสารเคมีตกค้าง	ต้องเลือกฟาจจำเพาะและควบคุมผลกระทบสิ่งแวดล้อม

6. งานวิจัยใหม่และแนวโน้มปัจจุบันด้านสิ่งแวดล้อมกับเชื้อดื้อยา

ความเข้าใจเกี่ยวกับ AMR ในสิ่งแวดล้อมกำลังพัฒนาอย่างรวดเร็ว โดยมีประเด็นวิจัยใหม่ ๆ และแนวโน้มเชิงนโยบายระดับโลกที่กำลังกำหนดทิศทางของกลยุทธ์ในอนาคต

การวิจัยด้าน Co-selective pressures

ประเด็นที่ได้รับความสนใจมากคือ การที่สารมลพิษอื่น ๆ ในสิ่งแวดล้อมนอกจากยาปฏิชีวนะ ก็สามารถมีส่วนเร่งให้เกิดและคงอยู่ของ AMR ได้เช่นกัน [7] สารเหล่านี้อาจไม่ได้ฆ่าเชื้อโดยตรงในระดับเข้มข้นต่ำ แต่ก็กดดันให้แบคทีเรียต้องปรับตัวด้วยวิธีที่ไปพ่วงกับการดื้อยาปฏิชีวนะ เรียกว่า co-resistance หรือ cross-resistance [17]

โลหะหนัก: งานวิจัยพบว่าแบคทีเรียที่สัมผัสทองแดงหรือสังกะสีในความเข้มข้นสูงในน้ำนั้น พัฒนาการดื้อยาปฏิชีวนะควบคู่ไปด้วย เนื่องจากยีนดื้อโลหะบางครั้งอยู่ร่วมกับยีนดื้อยาปฏิชีวนะบนพลาสมิดเดียวกัน หรือยีนที่ขับโลหะออกจากเซลล์ก็บังเอิญขับยาปฏิชีวนะออกได้ด้วย [27] โลหะหนักได้ส่งผลต่อการวิวัฒนาการของจุลชีพมานานนับพันล้านปี ซึ่งมีมาก่อนการใช้ยาปฏิชีวนะเสียอีก

สารฆ่าเชื้อ (Biocides): สารฆ่าเชื้อที่ใช้เป็นยาฆ่าเชื้อ สารฆ่าเชื้อโรค และสารกันบูด ก็สามารถคัดเลือกกลไกการดื้อยาที่ทำให้ความไวต่อยาปฏิชีวนะลดลงได้

ไมโครพลาสติก (Microplastics - MPs): การวิจัยที่เกิดขึ้นใหม่ระบุว่าไมโครพลาสติกเป็น "แพลตฟอร์ม" หรือ "ฮอตสปอต" สำหรับการกักตัวของไบโอฟิล์มของแบคทีเรียและการถ่ายทอดยีนในแนวนอน ซึ่งอาจทำหน้าที่เป็น "พาหะ" สำหรับการขนส่งยีนดื้อยาในสภาพแวดล้อมทางน้ำ [18] "plastisphere" ซึ่งเป็นระบบนิเวศไบโอฟิล์มที่ก่อตัวบนเศษพลาสติก สามารถดักจับเชื้อก่อโรคที่มาจากอาหารและทำหน้าที่เป็นฮอตสปอตสำหรับการถ่ายทอดยีนในแนวนอน

ความเข้าใจที่เพิ่มขึ้นเกี่ยวกับ "Co-selective pressures" จากโลหะหนัก สารฆ่าเชื้อ และไมโครพลาสติก เผยให้เห็นปัจจัยที่ซับซ้อนในการควบคุม AMR สิ่งนี้บ่งชี้ว่าแม้จะลดการใช้ยาปฏิชีวนะลงอย่างมาก แต่หากยังคงมีการปนเปื้อนสิ่งแวดล้อมด้วยสารที่ไม่ใช่ยาปฏิชีวนะเหล่านี้ การดื้อยาก็ยังคงถูกขับเคลื่อนและคงอยู่ได้ ซึ่งหมายความว่าจำเป็นต้องมีกลยุทธ์การควบคุมมลพิษสิ่งแวดล้อมที่กว้างขึ้น ซึ่งนอกเหนือไปจากการควบคุมยาปฏิชีวนะเพียงอย่างเดียว เพื่อยับยั้ง AMR ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การใช้เทคโนโลยี Omics และข้อมูลขนาดใหญ่

เทคโนโลยี Metagenomics และ Sequencing ราคาถูกลงและเร็วขึ้น ทำให้นักวิจัยสามารถถอดรหัส resistome (ชุดยีนดื้อยาทั้งหมด) ของสิ่งแวดล้อมต่าง ๆ ได้อย่างครอบคลุม แนวโน้มนี้เผยให้เห็นว่าจริง ๆ แล้วยีนดื้อยามีอยู่ในธรรมชาติมาแต่ดั้งเดิม (สิ่งแวดล้อมที่ไม่ถูกรบกวนก็มียีนเหล่านี้ในระดับพื้นฐาน) แต่กิจกรรมของมนุษย์ทำให้ความหลากหลายและปริมาณของ ARG ในระบบเพิ่มขึ้นผิดธรรมชาติ การศึกษาจีโนมยังช่วยติดตามการแพร่ของยีนดื้อยาระหว่างสภาพแวดล้อมและคน เช่น พบว่าชุดยีนดื้อยาบางชนิดในแบคทีเรียในโรงพยาบาลมีความใกล้เคียงกับที่พบในแบคทีเรียน้ำเสีย บ่งชี้การเคลื่อนย้าย

ถ่ายเทระหว่างสองแหล่งนี้ การใช้ WGS (Whole Genome Sequencing) ในการระบาดวิทยาของ AMR กำลังกลายเป็นมาตรฐาน และมีการพัฒนาฐานข้อมูล ARG ระดับสากล เช่น CARD, ResFinder, MEGARes เป็นต้น ที่ช่วยให้นักวิจัยทั่วโลกแลกเปลี่ยนข้อมูลการพบ ARG ใหม่ ๆ ได้ การเข้าถึงที่เพิ่มขึ้นและความซับซ้อนของเทคโนโลยี Omics โดยเฉพาะอย่างยิ่ง quantitative metagenomics กำลังเปลี่ยนแปลงการเฝ้าระวัง AMR ในสิ่งแวดล้อมจากการตรวจจับแบบมีเป้าหมายไปสู่การทำแผนที่ resistome อย่างครอบคลุม สิ่งนี้แสดงถึงการเปลี่ยนแปลงกระบวนทัศน์ในความสามารถของเราที่จะเข้าใจภูมิทัศน์ของการดื้อยาในระบบนิเวศที่หลากหลายได้อย่างสมบูรณ์ ซึ่งช่วยให้สามารถระบุภัยคุกคามที่เกิดขึ้นใหม่ได้อย่างแม่นยำยิ่งขึ้น และนำไปสู่การแทรกแซงที่ขับเคลื่อนด้วยข้อมูลที่มีประสิทธิภาพมากขึ้น [26]

การเฝ้าระวัง AMR ผ่านน้ำเสีย (Wastewater surveillance)

ปัจจุบันหลายประเทศเริ่มใช้การตรวจยีน/เชื้อดื้อยาในน้ำเสียเป็นเครื่องมือเฝ้าระวังระดับชุมชน ซึ่งแนวโน้มนี้ได้รับแรงผลักดันจากความสำเร็จของ “ตรวจโควิดในน้ำเสีย” ในช่วงโรคระบาด COVID-19 ที่ผ่านมา แนวคิดเดียวกันถูกนำมาประยุกต์ใช้กับ AMR โดยตรวจพบเทรนด์ความชุกของยีนดื้อยาบางตัวเพิ่มขึ้นหรือลดลงตามการใช้ยาในชุมชนนั้น ๆ วิธีนี้มีศักยภาพในการใช้เป็นสัญญาณเตือนเร็ว (early warning) ของการระบาดในเชื้อดื้อยา หรือประเมินประสิทธิภาพของมาตรการควบคุมการใช้ยาปฏิชีวนะในพื้นที่ ตัวอย่างโครงการเช่น ในสหภาพยุโรปมีการร่วมมือวิจัยเฝ้าระวังยีนดื้อยาในน้ำเสียของเมืองใหญ่หลายเมือง เพื่อเปรียบเทียบระดับ AMR และหาความสัมพันธ์กับข้อมูลทางคลินิก การเฝ้าระวัง AMR ที่อิงจากน้ำเสียนำเสนอแนวทางที่ไม่รุกราน ประหยัดค่าใช้จ่าย และครอบคลุมระดับประชากรสำหรับการเฝ้าระวัง AMR ซึ่งเสริมการเฝ้าระวังทางคลินิกแบบดั้งเดิม ซึ่งหมายความว่า การเฝ้าระวังน้ำเสียสามารถทำหน้าที่เป็นระบบเตือนภัยล่วงหน้าที่มีประสิทธิภาพสำหรับแนวโน้มการดื้อยาที่เกิดขึ้นใหม่ในชุมชน ทำให้สามารถแทรกแซงด้านสาธารณสุขได้ทันทั่วทั้งที่มากขึ้น และประเมินโปรแกรมการจัดการยาปฏิชีวนะได้ดีขึ้น ซึ่งจะช่วยให้การตอบสนองและความเท่าเทียมของกลยุทธ์การควบคุม AMR [28-31]

7. One Health และนโยบายระดับโลก

สหประชาชาติ (UNEP) ได้เตือนว่ามลพิษสิ่งแวดล้อม เช่น น้ำเสียปนเปื้อนยาปฏิชีวนะ เป็นปัจจัยเร่งให้เกิดและแพร่ AMR มากขึ้น และสร้างความเสียหายต่อความหลากหลายทางชีวภาพของโลก เนื่องจากสิ่งแวดล้อมสามารถเป็นทั้งพาหะในการกระจายเชื้อดื้อยา และเหยื่อที่ได้รับผลกระทบ [5] ปัจจุบันแนวคิดการแก้ปัญหา AMR แบบ One Health จึงได้รับการสนับสนุน ซึ่งเน้นว่าการลดปัญหาเชื้อดื้อยาต้องทำพร้อมกันในทุกภาคส่วน ทั้งลดการใช้ยาปฏิชีวนะในคนและสัตว์ ป้องกันการติดเชื้อในโรงพยาบาลและฟาร์ม ตลอดจนลดการปล่อยมลพิษที่เป็นปัจจัยร่วมก่อกวนการดื้อยาในสิ่งแวดล้อม [1]

มีการเน้นย้ำมุมมอง One Health มากขึ้นในการแก้ปัญหา AMR โดยเฉพาะการยกระดับสิ่งแวดล้อมให้เป็นเสาหลักที่สามควบคู่กับคนและสัตว์ หน่วยงานระหว่างประเทศอย่าง UN Environment Programme (UNEP) ได้ออกเอกสาร “สิ่งแวดล้อมกับการต้านทานจุลชีพ” [13] และเรียกร้องให้ทุกประเทศจัดการมลพิษสิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับ AMR อย่างจริงจัง ในปี ค.ศ. 2023 UNEP ยังเผยแพร่รายงาน “Bracing for Superbugs” ที่ระบุว่าโลกจำเป็นต้องเสริมมาตรการด้านสิ่งแวดล้อมในการตอบสนองต่อ AMR อย่างเร่งด่วน มิฉะนั้นความก้าวหน้าในการควบคุม AMR อาจหยุดชะงัก [21] แนวคิด One Health คือ กรอบการทำงานแบบบูรณาการที่เชื่อมโยงสุขภาพของมนุษย์ สัตว์ และสิ่งแวดล้อมเข้าด้วยกัน เพื่อให้เกิดผลลัพธ์ด้านสุขภาพที่ยั่งยืนและสมดุลในทุกมิติ การใช้แนวทางนี้มีความสำคัญยิ่งในการควบคุมปัญหาเชื้อดื้อยาด้านจุลชีพ (AMR) ซึ่งมีปัจจัยขับเคลื่อนหลายด้าน ทั้งจากการแพทย์ การเกษตร และสิ่งแวดล้อม จำเป็นต้องให้ทุกภาคส่วนสื่อสารและทำงานประสานกันอย่างใกล้ชิด ในช่วงไม่กี่ปีที่ผ่านมาหน่วยงานวิชาการและองค์การระหว่างประเทศได้เน้นย้ำมุมมอง One Health มากขึ้นในการแก้ปัญหา AMR โดยยกระดับสิ่งแวดล้อมให้เป็นเสาหลักที่สามเคียงคู่กับสุขภาพมนุษย์และสัตว์ มากกว่าการมุ่งเฉพาะด้านการแพทย์หรือปศุสัตว์เพียงลำพัง แนวคิดนี้สะท้อนให้เห็นว่าหากปล่อยมิติใดไป ความพยายามในการควบคุม AMR ย่อมไม่มีประสิทธิภาพเท่าที่ควร

บนเวทีระดับโลก มีการขับเคลื่อนนโยบายและความร่วมมือหลายประการภายใต้หลักการ One Health เพื่อควบคุมการดื้อยาอย่างยั่งยืน องค์การอนามัยโลก (WHO) ได้จัดทำ แผนปฏิบัติการระดับโลกว่าด้วยการดื้อยาด้านจุลชีพ (Global



Action Plan on AMR) ขึ้นในปี ค.ศ. 2015 ซึ่งผลักดันให้ทุกประเทศพัฒนาแผนยุทธศาสตร์ชาติในการจัดการ AMR แบบบูรณาการหลายภาคส่วน แผนดังกล่าวได้รับการรับรองและสนับสนุนโดย องค์การอาหารและเกษตรแห่งสหประชาชาติ (FAO), องค์การสุขภาพสัตว์โลก (WOAH, เดิมชื่อ OIE) และ โครงการสิ่งแวดล้อมแห่งสหประชาชาติ (UNEP) ซึ่งสะท้อนถึงการยอมรับร่วมกันว่าการแก้ปัญหา AMR ต้องดำเนินการพร้อมกันในภาคมนุษย์ สัตว์ และสิ่งแวดล้อม ปัจจุบันองค์กรทั้งสี่หน่วยงานนี้ทำงานร่วมกันในฐานะ “Quadripartite” ภายใต้กลไกเลขานุการร่วมด้าน AMR เพื่อประสานยุทธศาสตร์ One Health ในระดับโลกอย่างเป็นระบบ การประสานงานดังกล่าวช่วยเสริมสร้างธรรมาภิบาลข้ามสาขา และเอื้อให้เกิดความเข้าใจปัจจัยเสี่ยงร่วม ตลอดจนแลกเปลี่ยนแนวทางแก้ไขระหว่างภาคส่วนต่าง ๆ อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น นอกจากนี้ WHO แล้ว FAO และ WOAH ยังได้จัดทำนโยบายเฉพาะด้าน เช่น แผนปฏิบัติการ AMR ของ FAO (พ.ศ. 2564–2568) ที่มุ่งลดการใช้ยาปฏิชีวนะในภาคการเกษตร และมาตรฐานของ WOAH เพื่อส่งเสริมการใช้ยาต้านจุลชีพอย่างรับผิดชอบในสัตว์ ขณะเดียวกัน UNEP ได้เข้ามาบทบาทเติมเต็มมิติสิ่งแวดล้อม เช่น การรณรงค์ลดมลพิษจากยาและสารเคมีในระบบนิเวศ ที่อาจเป็นสาเหตุร่วมของการดื้อยา [32-35]

มิติด้านสิ่งแวดล้อมของปัญหา AMR ได้รับความสนใจเป็นพิเศษในช่วงหลัง เนื่องจากหลักฐานเชิงประจักษ์ชี้ว่าสิ่งแวดล้อมเป็นแหล่งบ่มเพาะและแพร่กระจายของเชื้อดื้อยาที่สำคัญ รายงาน “Bracing for Superbugs” ที่ UNEP เผยแพร่ในปี ค.ศ. 2023 [30] นำเสนอข้อมูลวิชาการล่าสุดว่าการปนเปื้อนเชื้อดื้อยาในสิ่งแวดล้อมเกิดขึ้นผ่านมลพิษจากหลายภาคส่วน เช่น อุตสาหกรรมยา การเกษตร และระบบสาธารณสุข โดยเฉพาะของเสียและน้ำทิ้งจากชุมชน ซึ่งล้วนเป็นช่องทางสำคัญที่เอื้อให้จุลินทรีย์ปรับตัวดื้อยาและแพร่กระจายต่อต้านยาปฏิชีวนะ UNEP จึงเรียกร้องให้ทุกประเทศดำเนินการควบคุมมลพิษสิ่งแวดล้อมที่เกี่ยวข้องกับการดื้อยาอย่างเร่งด่วน เพื่อไม่ให้ความก้าวหน้าในการควบคุม AMR ที่ทำมาต้องหยุดชะงักหรือสูญเสียไปโดยเปล่าประโยชน์ หลายประเทศได้นำนโยบายระดับโลกเหล่านี้ไปแปลงเป็นเป้าหมายเชิงรุกในระดับชาติ เช่น กำหนดเป้าหมายลดการปล่อยยาปฏิชีวนะสู่สิ่งแวดล้อมภายในประเทศให้ได้อย่างมีนัยสำคัญภายในทศวรรษหน้า และการลงทุนวิจัยพัฒนาเทคโนโลยีบำบัดน้ำเสียรุ่นใหม่เพื่อกำจัดเชื้อดื้อยาอย่างมีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น การจัดการด้านสิ่งแวดล้อม เช่น การควบคุมมลพิษที่แหล่งกำเนิดและการยกระดับระบบบำบัดน้ำเสีย กลายเป็นองค์ประกอบเชิงนโยบายที่จำเป็นของยุทธศาสตร์ One Health ในการลดแหล่งสะสมและแพร่กระจายของยีนดื้อยาในธรรมชาติ [35]

8. ข้อเสนอแนะ มาตรการเชิงนโยบายและการปฏิบัติ

เพื่อรับมือกับวิกฤตเชื้อแบคทีเรียดื้อยาในสิ่งแวดล้อมอย่างมีประสิทธิภาพ จำเป็นต้องมีมาตรการเชิงนโยบายและการปฏิบัติที่ครอบคลุมและประสานงานกันในหลายภาคส่วน ดังนี้:

เสริมสร้างธรรมาภิบาล One Health: จัดตั้งและเสริมสร้างศักยภาพของหน่วยงานระดับชาติและนานาชาติแบบหลายภาคส่วน เพื่อประสานงานความพยายามในการควบคุม AMR ข้ามสาขาสุขภาพมนุษย์ สัตว์ และสิ่งแวดล้อม โดยมีอำนาจหน้าที่และงบประมาณที่ชัดเจน

บังคับใช้การควบคุมที่แหล่งกำเนิดอย่างเข้มงวด: เพื่อให้เป็นรูปแบบเดียวกันกำหนดและบังคับใช้การบำบัดล่วงหน้า ณ แหล่งกำเนิดสำหรับน้ำเสียจากโรงพยาบาลและโรงงานอุตสาหกรรมยา โดยมีขีดจำกัดการปล่อยยาปฏิชีวนะและสารร่วมกีดกันที่มีผลผูกพันทางกฎหมาย ส่งเสริมและบังคับใช้การใช้ยาปฏิชีวนะอย่างรอบคอบในทุกภาคส่วน มนุษย์ สัตว์ และการเกษตร ผ่านโครงการบริหารจัดการยาปฏิชีวนะที่แข็งแกร่งและการให้ความรู้แก่สาธารณสุข

ยกระดับโครงสร้างพื้นฐานการบำบัดน้ำเสีย: ลงทุนและนำเทคโนโลยีการบำบัดน้ำเสียขั้นสูงมาใช้ เช่น AOPs, MBR, การฆ่าเชื้อขั้นสูง และการจัดการกากตะกอนที่มีประสิทธิภาพ เพื่อลดการปล่อยเชื้อดื้อยาและยีนดื้อยาอย่างมีนัยสำคัญ โดยเฉพาะในประเทศที่มีรายได้ต่ำและปานกลาง พิจารณาแนวทาง "การจัดการแบบผสมผสานศูนย์กลางและกระจาย"

เพิ่มประสิทธิภาพการเฝ้าระวังสิ่งแวดล้อม: พัฒนาและวางมาตรฐานโปรแกรมการเฝ้าระวังเชิงปริมาณด้วยเทคโนโลยี metagenomic และ Wastewater-Based Epidemiology (WBE) เพื่อติดตามแนวโน้มของยีนดื้อยา/เชื้อดื้อยาในน้ำเสียและสิ่งแวดล้อมธรรมชาติ ซึ่งจะทำหน้าที่เป็นระบบเตือนภัยล่วงหน้าและประเมินประสิทธิภาพของการแทรกแซง



ส่งเสริมการวิจัยและนวัตกรรม: เพิ่มงบประมาณสำหรับการวิจัยและพัฒนาแนวทางการรักษาด้านจุลชีพทางเลือกใหม่ เช่น การบำบัดด้วยฟาจ และเปปไทด์ต้านจุลชีพ และเพื่อทำความเข้าใจเชิงลึกเกี่ยวกับพลวัตของ AMR ในสิ่งแวดล้อม รวมถึงผลกระทบของแรงกดดันร่วมต่าง ๆ เช่น ไมโครพลาสติกและโลหะหนัก

ความร่วมมือและความโปร่งใสระหว่างประเทศ: ส่งเสริมความร่วมมือระดับโลกในการแบ่งปันข้อมูล การประสานงาน กฎระเบียบ และกลไกทางการเงินเพื่อสนับสนุนความพยายามในการควบคุม AMR โดยเฉพาะในประเทศกำลังพัฒนา

บทสรุป

วิกฤตเชื้อแบคทีเรียดื้อยาในสิ่งแวดล้อมเป็นภัยคุกคามระดับโลกที่ซับซ้อนและเร่งด่วน โดยมีกลไกการดื้อยาหลากหลายรูปแบบในแบคทีเรียแกรมลบเป็นตัวขับเคลื่อนหลัก กิจกรรมของมนุษย์ โดยเฉพาะการปล่อยน้ำเสียจากโรงพยาบาล อุตสาหกรรมยา และชุมชน ได้เปลี่ยนโรงบำบัดน้ำเสียให้กลายเป็น "ฮอตสปอต" สำหรับการรวมตัว การคัดเลือก และการแพร่กระจายยีนดื้อยาผ่านกลไกการถ่ายทอดยีนในแนวนอน ระบบบำบัดน้ำเสียแบบดั้งเดิมไม่สามารถรับมือกับความท้าทายนี้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ ทำให้เชื้อดื้อยาและยีนดื้อยายังคงหลุดรอดสู่สิ่งแวดล้อม ก่อให้เกิดผลกระทบที่ร้ายแรงต่อสุขภาพมนุษย์ (ทั้งทางตรงและทางอ้อมผ่านการสัมผัสสิ่งแวดล้อม) และระบบนิเวศ (โดยการรบกวนวงจรธาตุอาหารและความหลากหลายทางชีวภาพ) การรับรู้ว่ายีนดื้อยาเป็น "สารมลพิษสิ่งแวดล้อมที่เกิดขึ้นใหม่" ตอกย้ำความจำเป็นในการจัดการปัญหานี้อย่างบูรณาการและองค์รวม

วิกฤตเชื้อแบคทีเรียดื้อยาในสิ่งแวดล้อมเป็นภัยคุกคามระดับโลก โดยมีแบคทีเรียแกรมลบเป็นตัวขับเคลื่อนหลัก การปล่อยน้ำเสียจากโรงพยาบาล อุตสาหกรรมยา และชุมชน ทำให้โรงบำบัดน้ำเสียกลายเป็นแหล่งสะสมและแพร่กระจายยีนดื้อยา เนื่องจากระบบบำบัดแบบดั้งเดิมไม่มีประสิทธิภาพเพียงพอ เชื้อดื้อยาจึงหลุดรอดสู่สิ่งแวดล้อม ส่งผลกระทบต่อสุขภาพมนุษย์และระบบนิเวศ การแก้ไขปัญหานี้ต้องอาศัยแนวทางแบบบูรณาการตามหลัก "One Health" ซึ่งรวมถึงการเสริมสร้างธรรมาภิบาล การควบคุมที่แหล่งกำเนิดอย่างเข้มงวด การยกระดับโครงสร้างพื้นฐานการบำบัดน้ำเสีย การเพิ่มประสิทธิภาพการเฝ้าระวังสิ่งแวดล้อม การส่งเสริมการวิจัยและนวัตกรรม รวมถึงความร่วมมือและความโปร่งใสระหว่างประเทศ เพื่อจัดการกับปัญหานี้อย่างยั่งยืนและรอบด้าน

เอกสารอ้างอิง

1. Eichenberger EM, Thaden JT. Epidemiology and mechanisms of resistance of extensively drug-resistant Gram-negative bacteria. *Antibiotics* 2019;8(2):37.
2. Uluseker C, Kaster KM, Thorsen K, Wick A, Ternes T, Nielsen JL, et al. A review on occurrence and spread of antibiotic resistance in wastewaters and in wastewater treatment plants: mechanisms and perspectives. *Front Microbiol* 2021;12:717809.
3. Halawa EM, Safadi D, Fajardo-Muñoz R, Kheir WA, Ait LF, Gawhary S, et al. Antibiotic action and resistance: updated review of mechanisms, spread, influencing factors, and alternative approaches. *Front Pharmacol* 2024;14:1305294.
4. Fernández J, Montero I, Martínez O, González C, Segovia M. Resistance mechanisms in Gram-negative bacteria. *Med Intensiva (Engl Ed)* 2022;46(7):392-402.
5. Džidić S, Šušković J, Kos B. Antibiotic resistance mechanisms in bacteria: biochemical and genetic aspects. *Period Biol* 2008;110(4):317-25.
6. Miraji H, Ripanda AS. Pollution by antimicrobials and antibiotic resistance genes in East Africa: occurrence, sources, and potential environmental implications. *Toxicol Rep* 2025;14:101969.



7. Hassoun-Kheir N, Stabholz Y, Kreft JU, Davidovitch N, Kassem E, et al. Hospital wastewater contributions to the spread of antibiotic resistance. *J Infect Public Health* 2020;13(5):709-16.
8. Rowe WPM, Baker-Austin C, Verner-Jeffreys DW, Ryan JJ, Micallef C, Maskell DJ, et al. Overexpression of antibiotic resistance genes in hospital effluents over time. *J Antimicrob Chemother* 2017;72(6):1617-23.
9. Kotwani A, Joshi J, Kaloni D, Sethi P, Mahendru D, et al. Pharmaceutical effluent: a critical link in the interconnected ecosystem promoting antimicrobial resistance. *Environ Sci Pollut Res Int* 2021;28(25):32111-24.
10. Ory EM, Krüger N, Shakoor S, Hasan R, Klugman KP. The impact of pharmaceutical industry effluent on the spread of antimicrobial resistance. *Lancet Planet Health* 2020;4(7):e279-80.
11. Nappier SP, Hong T, Ichida A, Goldstein RER. Antibiotic resistance in recreational waters: state of the science. *Int J Environ Res Public Health* 2020;17(21):8034.
12. Alexander J, Hembach N, Schwartz T. Identification of critical control points for antibiotic resistance discharge in sewers. *Sci Total Environ* 2022;820:153186.
13. World Health Organization. No time to wait: securing the future from drug-resistant infections. Geneva: WHO; 2019.
14. Murray CJL, Ikuta KS, Sharara F, Swetschinski L, Robles Aguilar G, Gray A, et al. Global burden of bacterial antimicrobial resistance in 2019: a systematic analysis. *Lancet* 2022;399(10325):629-55.
15. World Bank. Drug-resistant infections: a threat to our economic future. Washington DC: World Bank Group; 2017.
16. Manaia CM, Rocha J, Scaccia N, Marano R, Radu E, Biancullo F, et al. Antibiotic resistance in wastewater treatment plants: Tackling the black box. *Environ Int* 2018 Jun;115:312-24.
17. Auerbach EA, Seyfried EE, McMahon KD. Tetracycline resistance genes in activated sludge wastewater treatment plants. *Water Res* 2007;41(5):1143-51.
18. Zheng Ji, Su C, Zhou J, Xu L, Qian Y, Chen H. Effects and mechanisms of ultraviolet, chlorination, and ozone disinfection on antibiotic resistance genes in secondary effluents of municipal wastewater treatment plants. *Chem Eng J* 2017;317:309-16.
19. Pallavali RR, Degati VK, Nagaraja T, Krupanidhi S, Krishna SR, Putcha UK, et al. Phage-based biocontrol of antibiotic-resistant bacterium isolated from livestock wastewater treatment plant. *Water (Basel)* 2023;15(8):1616.
20. Leonard AFC, Zhang L, Balfour AJ, Garside R, Gaze WH. Monitoring microbial hazard and antibiotic resistance genes in wastewater: the burgeoning role of wastewater-based epidemiology. *Clin Microbiol Infect* 2022;28(8):1050-1.
21. United Nations Environment Programme (UNEP). Environmental dimensions of antimicrobial resistance: summary for policymakers. Nairobi: UNEP; 2022.
22. Wellington EMH, Boxall ABA, Cross P, Feil EJ, Gaze WH, Hawkey PM, et al. The role of the natural environment in the emergence of antibiotic resistance in Gram-negative bacteria. *Lancet Infect Dis* 2013;13(2):155-65.



23. Berglund B. Environmental dissemination of antibiotic resistance genes and correlation to anthropogenic contamination. *FEMS Microbiol Ecol* 2015;91(4): 28564.
24. Chen H, Zhang M. Occurrence and removal of antibiotic resistance genes in municipal wastewater and rural domestic sewage treatment systems in eastern China. *Environ Int* 2013;55:9-14.
25. Rizzo L, Manaia C, Merlin C, Schwartz T, Dagot C, Ploy M-C, et al. Urban wastewater treatment plants as hotspots for antibiotic resistant bacteria and genes spread into the environment: a review. *Sci Total Environ* 2013;447:345-60.
26. Abreu VAC, Perdigão J, Matos RV. Metagenomic approaches to analyze antimicrobial resistance: an overview. *Front Genet* 2021;11:575592.
27. Baker AC, Wright MS, Stepanauskas R, McArthur JV. Co-selection of antibiotic and metal resistance. *Trends Microbiol* 2006;14(4):176-82.
28. Gutiérrez JL. Wastewater-Based Epidemiology as a Complementary Tool for Antimicrobial Resistance Surveillance: Overcoming Barriers to Integration. *BioEssays* 2025;47(8):e70034.
29. Pandey S, Salerno JL, Dumre SP. Practical Approaches for Combating Antibiotic-Resistant Bacteria and Genes in Wastewater Within Developing Countries. *Arch Microbiol Immunol* 2025;9:21-30.
30. United Nations Environment Programme (UNEP). Bracing for Superbugs: Strengthening Environmental Action in the One Health Response to Antimicrobial Resistance. Nairobi: UNEP; 2023.
31. World Health Organization (WHO). Global Action Plan on Antimicrobial Resistance. Geneva: WHO; 2015.
32. World Health Organization (WHO). Implementation Handbook for the Global Action Plan on Antimicrobial Resistance: guidance for the human health sector. Geneva: WHO; 2022.
33. Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO). FAO Action Plan on Antimicrobial Resistance 2021–2025. Rome: FAO; 2021.
34. World Organisation for Animal Health (WOAH). OIE Strategy on Antimicrobial Resistance and the Prudent Use of Antimicrobials. Paris: WOAH; 2022.
35. United Nations Environment Programme (UNEP). Strengthening the environmental dimension of National Action Plans on Antimicrobial Resistance: A guidance note. Nairobi: UNEP; 2024.



Application of the Simple Equation Method with Jumarie's Modified Riemann–Liouville Derivative to Space–Time Fractional Nonlinear mBBM and ZKBBM

Orapan Janngam¹, Supinan Janma¹ and Jiraporn Sanjun^{2*}

¹Faculty of Sciences and Agricultural Technology, Rajamangala University of Technology Lanna, Lampang 52000

²Department of Mathematics, Faculty of Science and Technology, Suratthani Rajabhat University, Suratthani 84100

*Corresponding author: Jiraporn.san@sru.ac.th

Received: 14 July 2025/ Revised: 3 November 2025/ Accepted: 6 November 2025

Abstract

This paper employs the Simple Equation (SE) method in conjunction with Jumarie's modified Riemann–Liouville fractional derivative to derive exact solutions for the space–time fractional modified Benjamin–Bona–Mahony (mBBM) and Zakharov–Kuznetsov Benjamin–Bona–Mahony (ZKBBM) equations. The obtained exponential-type solutions describe kink-shaped traveling waves, which are illustrated through 2D, 3D, and contour plots using suitable parameters. The results confirm the efficiency and reliability of the proposed method as a robust analytical technique for deriving traveling wave solutions in nonlinear fractional models encountered in science and engineering. This study extends the SE method within the framework of Jumarie's modified Riemann–Liouville fractional derivative, broadening its applicability to space–time fractional systems. The approach establishes a new analytical framework for fractional traveling wave solutions, and the derived results uncover additional dynamical behaviors of the mBBM and ZKBBM equations, demonstrating both the originality and effectiveness of the proposed method.

Keywords: Space-time fractional mBBM equation, Space-time fractional ZKBBM equation, Simple equation method, Jumarie's modified Riemann–Liouville fractional derivative, Kink wave

Introduction

In applied and engineering mathematics, nonlinear fractional partial differential equations (PDEs) have gained significant attention as effective tools for modeling complex real-world phenomena. These equations are widely used in fields such as fluid mechanics, chemical kinetics, solid-state physics, and plasma wave dynamics, as well as in air pollutant dispersion and chemical physics. In recent years, various powerful analytical methods have been developed to solve nonlinear fractional PDEs, such as the Kudryashov method [1], the G'/G-expansion method [2-3], the simple equation method [4-5], the modified

simple equation method [6], the Riccati sub-equation method [7-8], the modified extended tanh-function method [9], the improved modified Sardar sub-equation method [10], the improved Riccati equation method [11-12], Riccati-Bernoulli sub-ODE [13], the first integral method [14], the unified method [15], etc.

In this work, we employ Jumarie's modified Riemann-Liouville fractional derivative (JMRL derivative) in combination with the simple equation method to obtain analytic solutions for the space-time fractional modified Benjamin-Bona-Mahony (mBBM) equation and the space-time fractional Zakharov-Kuznetsov Benjamin-Bona-Mahony (ZKBBM) equation. Some fundamental properties of Jumarie's fractional derivative used in this study are presented below.

The definition of the JMRL derivative [16] of order ϕ is expressed as:

$$f^{(\phi)}(x) = \lim_{h \rightarrow 0} \left(\frac{\sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \binom{\phi}{k} f(x + (\phi - k)h)}{h^\phi} \right), \quad \phi \in \mathbb{R}, 0 < \phi \leq 1, \quad (1.1)$$

which can be written as

$$D_x^\phi f(x) = \begin{cases} \frac{1}{\Gamma(-\phi)} \int_0^x (x-\beta)^{(-\phi-1)} [f(\beta) - f(0)] d\beta, & \text{if } \phi < 0 \\ \frac{1}{\Gamma(1-\phi)} \frac{d}{dx} \int_0^x (x-\beta)^{(-\phi)} [f(\beta) - f(0)] d\beta, & \text{if } 0 < \phi < 1 \\ [f^{(\phi-n)}(x)]^{(n)} & \text{if } n \leq \phi < n+1, n \geq 1, \end{cases} \quad (1.2)$$

where β denotes the dummy variable of integration.

The definition satisfies the properties of the modified Riemann-Liouville derivative [17] as follows:

$$\begin{aligned} D_x^\phi x^\gamma &= \frac{\Gamma(\gamma+1)x^{\gamma-\phi}}{\Gamma(\gamma+1-\phi)}, \quad \gamma > 0, \quad x > 0, \\ D_x^\phi (f(x)g(x)) &= g(x)D_x^\phi f(x) + f(x)D_x^\phi g(x), \\ D_x^\phi f(g(x)) &= f'_g[g(x)]D_x^\phi g(x) = D_g^\phi f[g(x)](g'(x))^\phi. \end{aligned} \quad (1.3)$$

The simple equation (SE) method, introduced by Nikolai Kudryashov [18], is based on two main ideas: using general solutions of simple nonlinear differential equations and accounting for all possible singularities in the equations. The SE method has been successfully used to find exact solutions for various nonlinear equations. These include the (2+1)-dimensional breaking soliton equation and the modified generalized Vakhnenko equation (2016) [19], the nonlinear space-time fractional Estevez-Mansfield-Clarkson (EMC) and Ablowitz-Kaup-Newell-Segur (AKNS) equations [20], and the (1+1)-dimensional dispersive modified Benjamin-Bona-Mahony (DMBBM) equation as well as the (2+1)-dimensional cubic Klein-Gordon (cKG) equation (2022) [4].

The SE method is particularly advantageous for solving fractional space-time PDEs because it provides exact and straightforward solutions, even for complex nonlinear equations where other analytical



or numerical techniques may struggle. Unlike some methods that cannot handle fractional operators effectively or produce cumbersome results, the SE method directly yields clear kink- or exponential-type solutions, demonstrating its suitability for addressing challenges in the mBBM and ZKBBM equations.

In particular, combining the SE method with Jumarie's modified Riemann–Liouville fractional derivative allows for a more efficient handling of fractional-order derivatives, which are otherwise challenging to treat analytically. This integration reduces limitations associated with traditional SE method applications by enabling the derivation of exact analytical solutions in a more systematic and compact form.

Algorithm of SE method

In this section, we present a systematic approach for obtaining traveling wave solutions of nonlinear fractional partial differential equations (PDEs) using the simple equation (SE) method in conjunction with the Bernoulli equation [4, 20]. The general form of a fractional PDE considered in this study is given by:

$$G(u, D_x^\phi u, D_t^\phi u, D_x^{2\phi} u, D_t^{2\phi} u, D_t^\phi D_x^\phi u, \dots) = 0, \quad t > 0, \quad 0 < \phi \leq 1, \quad (2.1)$$

Here, $u(x, t)$ is an unknown function and G is a polynomial of $u(x, t)$. The main steps of the SE method [4, 20] are as follows:

Step 1. Wave transformation

We suppose that

$$u(x, t) = u(\beta), \quad \beta = \frac{kx^\phi}{\Gamma(\phi+1)} - \frac{\omega t^\phi}{\Gamma(\phi+1)}, \quad (2.2)$$

Here, β represents a general traveling wave function, and ω is the wave velocity constant. When $\omega = 0$, the solution corresponds to a stationary wave. If $\omega > 0$, the wave propagates in the positive direction, whereas for $\omega < 0$, it travels in the negative direction.

To transform the fractional partial differential equation into an ordinary differential equation, we apply the chain rule for fractional derivatives to calculate the derivatives of $u(x, t)$ with respect to x and t . First, we compute the fractional derivatives of β with respect to x and t :

$$\begin{aligned} D_t^\phi \beta &= D_t^\phi \left(\frac{kx^\phi}{\Gamma(\phi+1)} - \frac{\omega t^\phi}{\Gamma(\phi+1)} \right) = -\frac{\omega}{\Gamma(\phi+1)} D_t^\phi (t^\phi) = -\omega, \\ D_x^\phi \beta &= D_x^\phi \left(\frac{kx^\phi}{\Gamma(\phi+1)} - \frac{\omega t^\phi}{\Gamma(\phi+1)} \right) = \frac{k}{\Gamma(\phi+1)} D_x^\phi (x^\phi) = k, \end{aligned}$$

using the chain rule, the fractional derivatives of $u(x, t)$ are then given by:

$$\begin{aligned} D_t^\phi u &= D_t^\phi u(\beta) = \frac{du}{d\beta} D_t^\phi \beta = -\omega \frac{du}{d\beta}, \\ D_x^\phi u &= D_x^\phi u(\beta) = \frac{du}{d\beta} D_x^\phi \beta = k \frac{du}{d\beta}. \end{aligned}$$

By applying the traveling wave transformation described above, we obtain the following ordinary differential equation

$$Q(u, ku', -\omega u', k^2 u'', \dots) = 0, \quad (2.3)$$

where Q represents a polynomial involving $u(\beta)$ and its derivatives, the prime symbol ($'$) indicates differentiation with respect to β .

Applying this wave transformation, the partial differential equation (2.3) is reduced to an ordinary differential equation (ODE) in $u(\beta)$. By performing algebraic simplifications (and integrating once if necessary), the resulting ODE can be expressed in the form of a well-known nonlinear Bernoulli equation:

$$u' + pu = qu^n,$$

Where p , q and n are constants, and the Bernoulli equation can be solved using standard methods [21].

Step 2. Reduced ODE Form

Assume that Eq. (2.3) admits the following formal solution:

$$u(\beta) = \sum_{j=0}^M a_j F^j(\beta), \quad (2.4)$$

where $a_j (j=0,1,2,\dots,M)$ is a constant parameter to be determined later. The functions involved satisfy simple ordinary differential equations (ODEs). In this study, we use the well-known nonlinear Bernoulli equation, whose solutions can be expressed in terms of elementary functions. Specifically, for the Bernoulli equation:

$$F'(\beta) = pF(\beta) + qF^2(\beta). \quad (2.5)$$

Step 3. Balance Principle

The balance number M in Eq. (2.4) is determined by equating the highest-order derivative term with the nonlinear terms present in the equation.

Step 4. Solution attainment

The general solutions of the simple Eq. (2.4) are given as follows [4]:

Case I: if $p > 0$ and $q < 0$, we get

$$F(\beta) = \frac{pe^{p(\beta+\beta_0)}}{1 - qe^{p(\beta+\beta_0)}}, \quad (2.6)$$

where β_0 denotes a constant arising from the integration process.

Case II: if $p < 0$ and $q > 0$, we get

$$F(\beta) = -\frac{pe^{p(\beta+\beta_0)}}{1 + qe^{p(\beta+\beta_0)}}, \quad (2.7)$$

where β_0 denotes a constant arising from the integration process.



Application of the method

We investigate the traveling wave solutions of the nonlinear space-time fractional modified Benjamin-Bona-Mahony (mBBM) equation and the space-time fractional Zakharov-Kuznetsov Benjamin-Bona-Mahony (ZKBBM) equation.

The space-time fractional mBBM equation

The nonlinear space-time fractional mBBM equation [22] is

$$D_t^\phi u + D_x^\phi u - \delta u^2 D_x^\phi u + D_x^{3\phi} u = 0, \quad t > 0, \quad 0 < \phi \leq 1, \quad (3.1.1)$$

where δ is a nonzero constant. Using the traveling wave variable $\beta = \frac{kx^\phi}{\Gamma(\phi+1)} - \frac{\omega t^\phi}{\Gamma(\phi+1)}$.

By applying the transformation to Eq. (3.1.1), the equation is reduced to an ordinary differential equation (ODE):

$$(k - \omega)u' - \delta k u^2 u' + k^3 u''' = 0. \quad (3.1.2)$$

Integrating Eq. (3.1.2) with zero constants, we get

$$(k - \omega)u - \frac{\delta k u^3}{3} + k^3 u'' = 0. \quad (3.1.3)$$

Using the SE method, the solution is assumed in the form of Eq. (2.4). Next, we balance the highest-order derivative terms with the leading nonlinear terms in Eq. (3.1.3). Consequently, the solution of Eq. (3.1.3) is obtained as follows:

$$u(\beta) = a_0 + a_1 F, \quad (3.1.4)$$

where F satisfies Eq. (2.5), Therefore, the following is an expression for u'' and u^3 :

$$u'' = a_1 p^2 F + 3a_1 p q F^2 + 2a_1 q^2 F^3, \quad (3.1.5)$$

$$u^3 = a_0^3 + 3a_0^2 a_1 F + 3a_0 a_1^2 F^2 + a_1^3 F^3.$$

By substituting Eqs. (3.1.4) and (3.1.5) into Eq. (3.1.3), all terms with the same power of $F(\beta)$ were collected, and their coefficients were then set to zero, where $j \geq 0$, yields yields

$$\begin{aligned} F^0(\beta): \quad & (k - \omega)a_0 - \frac{\delta k}{3}a_0^3 = 0, \\ F^1(\beta): \quad & (k - \omega)a_1 - \delta k a_0^2 a_1 + k^3 a_1 p^2 = 0, \\ F^2(\beta): \quad & 3k^3 a_1 p q - \delta k a_0 a_1^2 = 0, \\ F^3(\beta): \quad & 2k^3 a_1 q^2 - \frac{\delta k}{3}a_1^3 = 0. \end{aligned} \quad (3.1.6)$$

Solving this system of algebraic equations (Eq. 3.1.6) gives:

$$a_0 = \sqrt{\frac{3(k-\omega)}{\delta k}}, a_1 = \sqrt{\frac{6k^2 q^2}{\delta}} \text{ and } \omega = \frac{2k - k^3 p^2}{2}, \quad (3.1.7)$$

or

$$a_0 = -\sqrt{\frac{3(k-\omega)}{\delta k}}, a_1 = -\sqrt{\frac{6k^2 q^2}{\delta}} \text{ and } \omega = \frac{2k - k^3 p^2}{2}, \quad (3.1.8)$$

By substituting Eqs. (3.1.7) and (3.1.8) into Eq. (3.1.4) and using the general solutions of the Bernoulli equations (2.6) and (2.7), we obtain the exact traveling wave solutions of the nonlinear space-time fractional modified mBBM equation, expressed as follows:

Case I: if $p > 0$ and $q < 0$, we get

$$u_1(x, t) = k\sqrt{\frac{6}{\delta}} \left(\frac{p}{2} + q \left(\frac{pe^{p(\beta+\beta_0)}}{1 - qe^{p(\beta+\beta_0)}} \right) \right), \quad (3.1.9)$$

$$u_2(x, t) = -k\sqrt{\frac{6}{\delta}} \left(\frac{p}{2} + q \left(\frac{pe^{p(\beta+\beta_0)}}{1 - qe^{p(\beta+\beta_0)}} \right) \right). \quad (3.1.10)$$

Case II: if $p < 0$ and $q > 0$, we get

$$u_3(x, t) = k\sqrt{\frac{6}{\delta}} \left(\frac{p}{2} - q \left(\frac{pe^{p(\beta+\beta_0)}}{1 + qe^{p(\beta+\beta_0)}} \right) \right), \quad (3.1.11)$$

$$u_4(x, t) = -k\sqrt{\frac{6}{\delta}} \left(\frac{p}{2} - q \left(\frac{pe^{p(\beta+\beta_0)}}{1 + qe^{p(\beta+\beta_0)}} \right) \right), \quad (3.1.12)$$

where $\beta = \frac{kx^\phi}{\Gamma(\phi+1)} - \phi \frac{\omega t^\phi}{\Gamma(\alpha+1)}$ and β_0 denotes a constant arising from the integration process.

The space-time fractional ZKBBM equation

The nonlinear space-time fractional Zakharov-Kuznetsov Benjamin-Bona-Mahony (ZKBBM) equation is given by [23]:

$$D_t^\phi u + D_x^\phi u - 2auD_x^\phi u - bD_t^\phi (D_x^{2\phi} u) = 0, \quad t > 0, \quad 0 < \phi \leq 1, \quad (3.2.1)$$

where a and b are arbitrary constants. By employing the traveling wave variable

$\beta = \frac{kx^\phi}{\Gamma(\phi+1)} - \phi \frac{\omega t^\phi}{\Gamma(\phi+1)}$, the equation is reduced to an ordinary differential equation (ODE).

Substituting the transformation into Eq. (3.2.1) yields the following result:

$$(k - \omega)u' - 2akuu' + b\omega k^2 u''' = 0. \quad (3.2.2)$$

Integrating Eq. (3.2.2) with zero constants gives:

$$(k - \omega)u - aku^2 + b\omega k^2 u'' = 0. \quad (3.2.3)$$



By balancing the highest-order derivatives and nonlinear terms, we obtain $M = 2$. Thus, Eq. (2.4) becomes:

$$u(\beta) = a_0 + a_1 F + a_2 F^2, \quad (3.2.4)$$

Here, F satisfies Eq. (2.5). Therefore, the expressions for u'' and u^2 are:

$$u'' = a_1 p^2 F + 3a_1 p q F^2 + 2a_1 q^2 F^3, \quad (3.2.5)$$

$$u^2 = a_0^2 + 2a_0 a_1 F + 2a_0 a_2 F^2 + a_1^2 F^2 + 2a_1 a_2 F^3 + a_2^2 F^4.$$

Substituting Eq. (3.2.4) and (3.2.5) into Eq. (3.2.3), all terms with the same power of $F(\beta)$ were collected, and their coefficients were then set to zero, where $j \geq 0$, yields

$$\begin{aligned} F^0(\beta): & (k - \omega)a_0 - a a_0^2 k = 0, \\ F^1(\beta): & (k - \omega)a_1 - 2a a_0 a_1 k + a_1 b p^2 \omega k^2 = 0, \\ F^2(\beta): & (k - \omega)a_2 - 2a a_0 a_2 k - a a_1^2 k + 3a_1 b p q \omega k^2 + 4a_2 b p^2 \omega k^2 = 0, \\ F^3(\beta): & 2a_1 b q^2 \omega k^2 - 2a a_1 a_2 k + 10a_2 b p q \omega k^2 = 0, \\ F^4(\beta): & 6a_2 b q^2 \omega k^2 - a a_2^2 k = 0. \end{aligned} \quad (3.2.6)$$

Solving this system of algebraic equations (Eq. 3.2.6) gives:

$$a_0 = 0, a_1 = \frac{6bpq\omega k}{a}, a_2 = \frac{6bq^2\omega k}{a} \text{ and } \omega = \frac{k}{1 - bp^2 k^2}, \quad (3.2.7)$$

or

$$a_0 = \frac{k - \omega}{ak}, a_1 = \frac{6bpq\omega k}{a}, a_2 = \frac{6bq^2\omega k}{a} \text{ and } \omega = \frac{k}{1 + bp^2 k^2}, \quad (3.2.8)$$

By substituting Eqs. (3.2.7) and (3.2.8) into Eq. (3.2.4) and using the general solutions of the Bernoulli equations (2.6) and (2.7), we obtain the exact traveling wave solutions of the nonlinear space-time fractional ZKBBM equation, expressed as follows:

Case I: if $p > 0$ and $q < 0$, we get

$$u_5(x, t) = \frac{6bqk^2}{a(1 - bp^2 k^2)} \left(p \left(\frac{pe^{p(\beta + \beta_0)}}{1 - qe^{p(\beta + \beta_0)}} \right)^2 + q \left(\frac{pe^{p(\beta + \beta_0)}}{1 - qe^{p(\beta + \beta_0)}} \right) \right), \quad (3.2.9)$$

$$u_6(x, t) = \frac{bp^2 k^2}{a(1 + bp^2 k^2)} + \frac{6bqk^2}{a(1 + bp^2 k^2)} \left(p \left(\frac{pe^{p(\beta + \beta_0)}}{1 - qe^{p(\beta + \beta_0)}} \right)^2 + q \left(\frac{pe^{p(\beta + \beta_0)}}{1 - qe^{p(\beta + \beta_0)}} \right) \right). \quad (3.2.10)$$

Case II: if $p < 0$ and $q > 0$, we get

$$u_7(x, t) = \frac{6bqk^2}{a(1 - bc^2 k^2)} \left(p \left(\frac{pe^{p(\beta + \beta_0)}}{1 + qe^{p(\beta + \beta_0)}} \right)^2 - q \left(\frac{pe^{p(\beta + \beta_0)}}{1 + qe^{p(\beta + \beta_0)}} \right) \right), \quad (3.2.11)$$

$$u_8(x, t) = \frac{bp^2k^2}{a(1+bp^2k^2)} + \frac{6bqk^2}{a(1+bp^2k^2)} \left(p \left(\frac{pe^{p(\beta+\beta_0)}}{1+qe^{p(\beta+\beta_0)}} \right)^2 - q \left(\frac{pe^{p(\beta+\beta_0)}}{1+qe^{p(\beta+\beta_0)}} \right) \right), \quad (3.2.12)$$

where $\beta = \frac{kx^\phi}{\Gamma(\phi+1)} - \frac{\omega t^\phi}{\Gamma(\phi+1)}$ and β_0 denotes a constant arising from the integration process.

Graphical representation of the solution

By applying the SE method, the resulting wave solutions are represented as ratios of exponential functions. Physical interpretations and graphical representations are also provided by assigning specific values to the constants p and q .

Graphical representation of the space-time fractional mBBM equation

We applied the SE method to obtain traveling wave solutions of the nonlinear space-time fractional mBBM equation in the form of exponential functions. Using the parameters listed in Table 1, the solutions were visualized graphically. Table 1 shows the effects of these parameters on Eqs. (3.1.9)–(3.1.12), illustrating the wave behaviors as kink waves, which are depicted in Figures 1–4.

Table 1. Parameter values of Eqs. (3.1.9)–(3.1.12)

Eqs.	Parameters	Figures	Wave effects
(3.1.9)	$p = 1, q = -1, \phi = 0.5, \delta = 2, k = 1,$ $\omega = \frac{2k - k^3p^2}{2}, 0 \leq x, t \leq 100$	1	Kink
(3.1.10)	$p = 1, q = -1, \phi = 0.5, \delta = 2, k = 1,$ $\omega = \frac{2k - k^3p^2}{2}, 0 \leq x, t \leq 100$	2	Kink
(3.1.11)	$p = -1, q = 1, \phi = 0.5, \delta = 2, k = 1,$ $\omega = \frac{2k - k^3p^2}{2}, 0 \leq x, t \leq 100$	3	Kink
(3.1.12)	$p = -1, q = 1, \phi = 0.5, \delta = 2, k = 1,$ $\omega = \frac{2k - k^3p^2}{2}, 0 \leq x, t \leq 100$	4	Kink

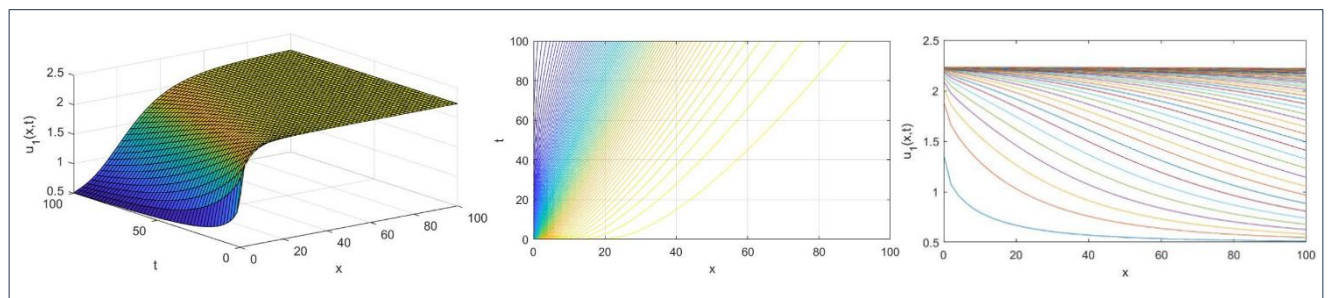


Figure 1. The kink wave solution 3D, contour, and 2D plots of (3.1.9) for the fractional mBBM equation.

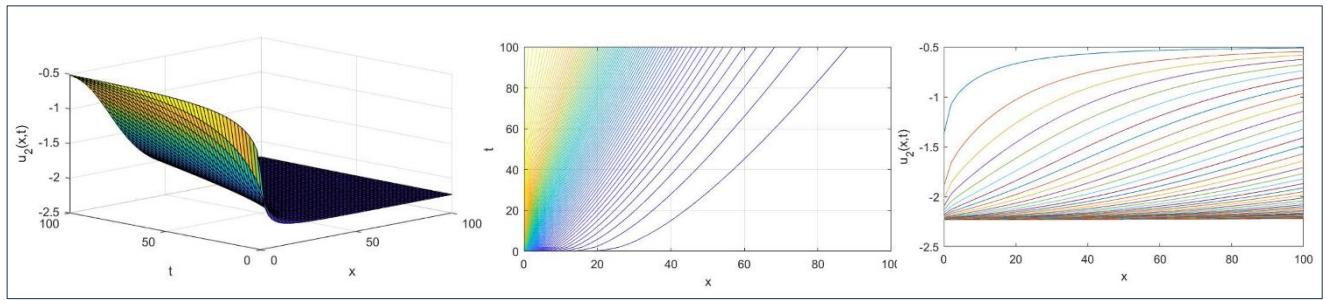


Figure 2. The kink wave solution 3D, contour, and 2D plots of (3.1.10) for the fractional mBBM equation.

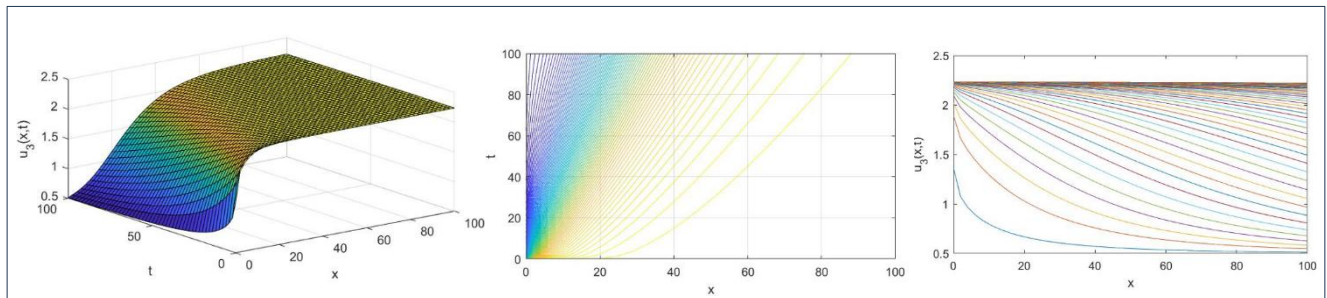


Figure 3. The kink wave solution 3D, contour, and 2D plots of (3.1.11) for the fractional mBBM equation.

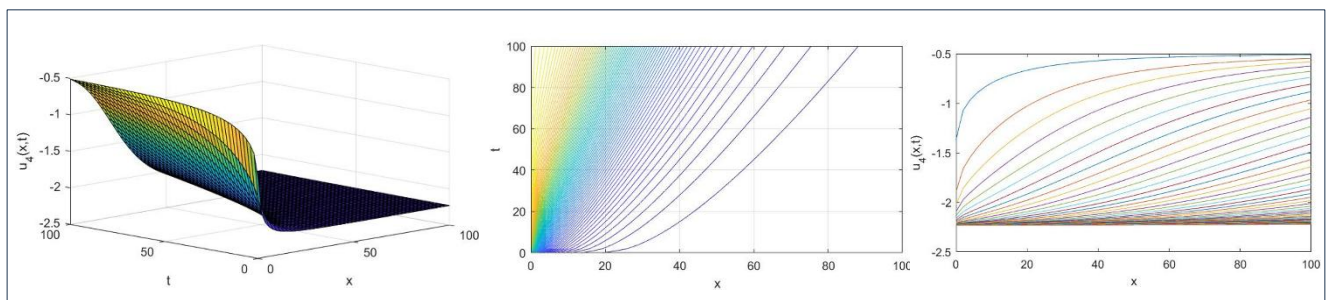


Figure 4. The kink wave solution 3D, contour, and 2D plots of (3.1.12) for the fractional mBBM equation.

Table 2. Parameter values of Eqs. (3.2.9)-(3.2.12)

Eqs.	Parameters	Figures	Wave effects
(3.2.9)	$p = 1, q = -1, \phi = 0.5, a = 6, b = -0.5,$ $k = 1, \omega = \frac{k}{1 - bp^2k^2}, 0 \leq x, t \leq 100$	5	Kink
(3.2.10)	$p = 1, q = -1, \phi = 0.5, a = 6, b = -0.5,$ $k = 1, \omega = \omega = \frac{k}{1 + bp^2k^2}, 0 \leq x, t \leq 100$	6	Kink
(3.2.11)	$p = -1, q = 1, \phi = 0.5, a = 6, b = 0.5,$ $k = 1, \omega = \frac{k}{1 + bp^2k^2}, 0 \leq x, t \leq 100$	7	Kink
(3.2.12)	$p = -1, q = 1, \phi = 0.5, a = 6, b = 0.5,$ $k = 1, \omega = \frac{k}{1 - bp^2k^2}, 0 \leq x, t \leq 100$	8	Kink

Graphical representation of the space-time fractional ZKBBM equation

The traveling wave solutions of the nonlinear space-time fractional ZKBBM equation, given by Eqs. (3.2.9)–(3.2.12), were analyzed using the SE method. Table 2 summarizes the effects of the chosen parameters on these solutions, illustrating the corresponding kink wave behaviors in Figures 5–8.

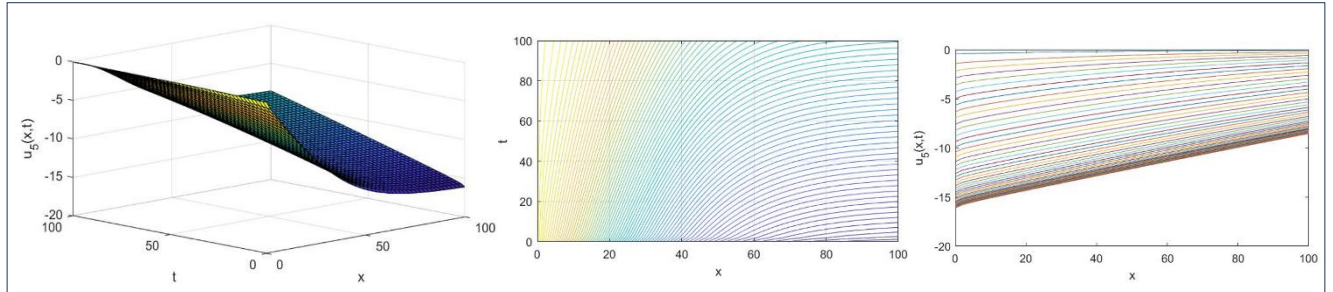


Figure 5. The kink wave solution 3D, contour, and 2D plots of (3.2.9) for the fractional ZKBBM equation.

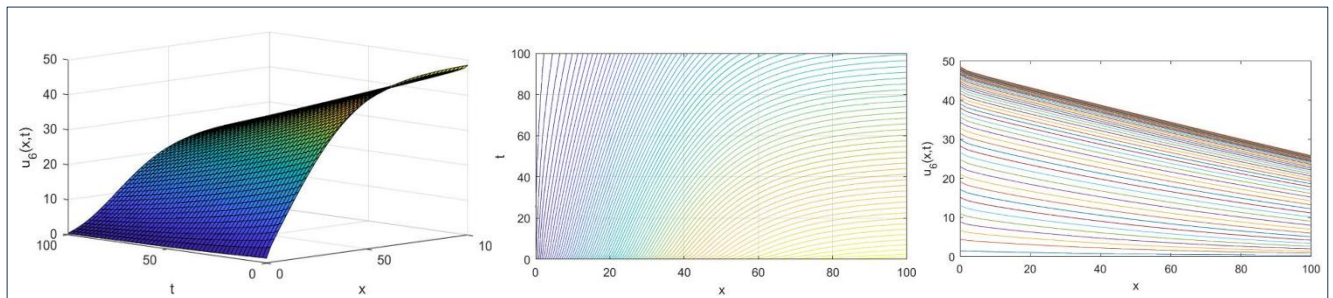


Figure 6. The kink wave solution 3D, contour, and 2D plots of (3.2.10) for the fractional ZKBBM equation.

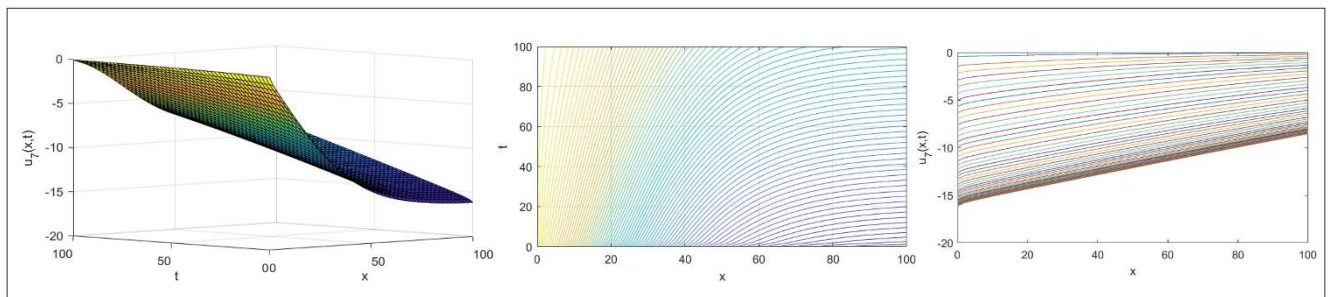


Figure 7. The kink wave solution 3D, contour, and 2D plots of (3.2.11) for the fractional ZKBBM equation.

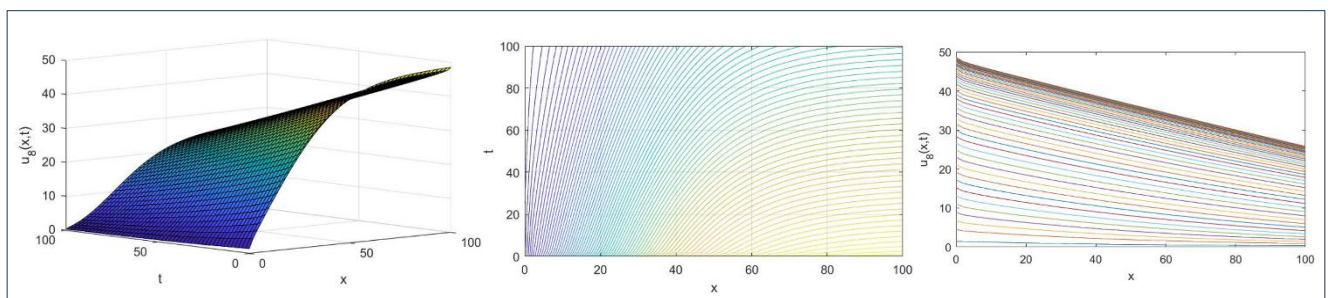


Figure 8. The kink wave solution 3D, contour, and 2D plots of (3.2.12) for the fractional ZKBBM equation.



Figures 1–8 show the solutions of the space-time fractional mBBM and ZKBBM equations, which exhibit kink-type wave behavior. A kink wave is a smooth, monotonic traveling wave that connects two different constant states, rather than forming a localized peak. The graphs clearly illustrate these stable transitions, confirming the presence of kink waves in the studied models. This behavior provides insight into the dynamics of the fractional equations and can be applied to model nonlinear wave propagation in various physical systems, including fluid dynamics, plasma physics, and optical fiber systems, highlighting the practical relevance of these solutions in science and technology.

Solutions Comparison

This section compares the solutions of the space-time fractional mBBM equation obtained by the SE method with those derived using the first integral method [24], as shown in Table 3. It also compares the SE method results for the space-time fractional ZKBBM equation with those obtained by the complete discriminant system [25], as presented in Table 4.

Table 3 shows that the solutions of the space-time fractional mBBM equation obtained by the SE method possess simpler and more compact analytical forms compared with those derived using the first integral method. The SE method expresses the solutions in exponential form, which makes them easier to manipulate and analyze. In contrast, the solutions obtained by the first integral method involve trigonometric and fractional power terms, leading to more complicated structures. Overall, these results demonstrate that the SE method offers a simpler analytical structure and greater computational efficiency compared with the first integral method.

Table 4 shows that the solutions of the space-time fractional ZKBBM equation obtained by the SE method are clearly simpler and more compact. These solutions appear in a direct exponential form, which makes them easier to interpret and analyze. In contrast, the complete discriminant system produces significantly more complex solutions involving layered trigonometric and hyperbolic functions, making the physical interpretation of the wave structures considerably more difficult.

Table 3. Solutions comparison of the space-time fractional mBBM equation

The SE method	The first integral method
$u_1(x, t) = k\sqrt{\frac{6}{\delta}} \left(\frac{p}{2} + q \left(\frac{pe^{p(\beta+\beta_0)}}{1-qe^{p(\beta+\beta_0)}} \right) \right),$	$u_1(x, t) = \sqrt{-\frac{3(k+c)}{vk}} \tan \left(\sqrt{-\frac{(k+c)}{2k^3}} \left(\frac{kx^\alpha + ct^\alpha}{\Gamma(1+\alpha)} \right) + \sqrt{-\frac{(k+c)}{2k^3}} \gamma \right),$
$u_2(x, t) = -k\sqrt{\frac{6}{\delta}} \left(\frac{p}{2} + q \left(\frac{pe^{p(\beta+\beta_0)}}{1-qe^{p(\beta+\beta_0)}} \right) \right),$	$u_2(x, t) = -\sqrt{-\frac{3(k+c)}{vk}} \tan \left(\sqrt{-\frac{(k+c)}{2k^3}} \left(\frac{kx^\alpha + ct^\alpha}{\Gamma(1+\alpha)} \right) + \sqrt{-\frac{(k+c)}{2k^3}} \gamma \right),$
$u_3(x, t) = k\sqrt{\frac{6}{\delta}} \left(\frac{p}{2} - q \left(\frac{pe^{p(\beta+\beta_0)}}{1+qe^{p(\beta+\beta_0)}} \right) \right),$	$u_3(x, t) = \sqrt{-\frac{3(k+c)}{vk}} \tan \left(\sqrt{-\frac{(k+c)}{2k^3}} \left(\frac{kx^\alpha}{\alpha} + \frac{ct^\alpha}{\alpha} \right) + \sqrt{-\frac{(k+c)}{2k^3}} \gamma \right),$
$u_4(x, t) = -k\sqrt{\frac{6}{\delta}} \left(\frac{p}{2} - q \left(\frac{pe^{p(\beta+\beta_0)}}{1+qe^{p(\beta+\beta_0)}} \right) \right),$	$u_4(x, t) = -\sqrt{-\frac{3(k+c)}{vk}} \tan \left(\sqrt{-\frac{(k+c)}{2k^3}} \left(\frac{kx^\alpha}{\alpha} + \frac{ct^\alpha}{\alpha} \right) + \sqrt{-\frac{(k+c)}{2k^3}} \gamma \right).$

Table 4. Solutions comparison of the space–time fractional ZKBBM equation

The SE method	The complete discriminant system
$u_5(x, t) = \frac{6bqk^2}{a(1 - bp^2k^2)} \times \left(p \left(\frac{pe^{p(\beta + \beta_0)}}{1 - qe^{p(\beta + \beta_0)}} \right)^2 + q \left(\frac{pe^{p(\beta + \beta_0)}}{1 - qe^{p(\beta + \beta_0)}} \right) \right)$	$\Theta_1(x, t) = - \left(\frac{3bpq}{2a} \right)^{\frac{1}{3}} \left\{ R_1 \tanh^2 \left[\frac{R_1^2}{2} \left(-\frac{2a}{3bpq} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{pt^\alpha}{\alpha} + \frac{qx^\beta}{\beta} - \zeta_0 \right) \right] + R_2 \right\},$
$u_6(x, t) = \frac{bp^2k^2}{a(1 + bp^2k^2)} + \frac{6bqk^2}{a(1 + bp^2k^2)} \times \left(p \left(\frac{pe^{p(\beta + \beta_0)}}{1 - qe^{p(\beta + \beta_0)}} \right)^2 + q \left(\frac{pe^{p(\beta + \beta_0)}}{1 - qe^{p(\beta + \beta_0)}} \right) \right),$	$\Theta_2(x, t) = - \left(\frac{3bpq}{2a} \right)^{\frac{1}{3}} \left\{ R_1 \coth^2 \left[\frac{R_1^2}{2} \left(\frac{2a}{3bpq} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{pt^\alpha}{\alpha} + \frac{qx^\beta}{\beta} - \zeta_0 \right) \right] + R_2 \right\},$
$u_7(x, t) = \frac{6bqk^2}{a(1 - bc^2k^2)} \times \left(p \left(\frac{pe^{p(\beta + \beta_0)}}{1 - qe^{p(\beta + \beta_0)}} \right)^2 - q \left(\frac{pe^{p(\beta + \beta_0)}}{1 - qe^{p(\beta + \beta_0)}} \right) \right),$	$\Theta_3(x, t) = - \left(\frac{3bpq}{2a} \right)^{\frac{1}{3}} \left\{ -R_1 \tanh^2 \left[\frac{(-R_1)^2}{2} \left(-\frac{2a}{3bpq} \right)^{\frac{1}{3}} \left(\frac{pt^\alpha}{\alpha} + \frac{qx^\beta}{\beta} - \zeta_0 \right) \right] + R_2 \right\},$
$u_8(x, t) = \frac{bp^2k^2}{a(1 + bp^2k^2)} + \frac{6bqk^2}{a(1 + bp^2k^2)} \times \left(p \left(\frac{pe^{p(\beta + \beta_0)}}{1 + qe^{p(\beta + \beta_0)}} \right)^2 - q \left(\frac{pe^{p(\beta + \beta_0)}}{1 + qe^{p(\beta + \beta_0)}} \right) \right).$	$\Theta_4(x, t) = 4 \left(\frac{3bpq}{2a} \right)^{\frac{2}{3}} \left(\frac{pt^\alpha}{\alpha} + \frac{qx^\beta}{\beta} - \zeta_0 \right)^{-2} - \frac{p + q}{(12a^2bpq^4)^{\frac{1}{3}}},$
	$\Theta_5(x, t) = - \left(\frac{3bpq}{2a} \right)^{\frac{1}{3}} \left[\frac{-p - q}{(12a^2bpq^4)^{\frac{1}{3}}} - \frac{2}{3} R_1 \cos \frac{\theta}{3} + \frac{\sqrt[3]{3} R_1}{3} \cos \left(\frac{\pi + 2\theta}{6} \right) \times \right.$ $\left. \operatorname{sn}^2 \left(-\frac{a^{\frac{1}{3}} \cos^2 \left(\frac{\pi - 2\theta}{6} \right)}{(12bpq)^{\frac{1}{3}}} \left(\frac{pt^\alpha}{\alpha} + \frac{qx^\beta}{\beta} - \zeta_0 \right), m \right) \right],$
	$\Theta_6(x, t) = - \left(\frac{3bpq}{2a} \right)^{\frac{1}{3}} \left[\frac{9 - \mu \operatorname{sn}^2 \left(-\frac{a^{\frac{1}{3}} \cos^2 \left(\frac{\pi - 2\theta}{6} \right)}{(12bpq)^{\frac{1}{3}}} \left(\frac{pt^\alpha}{\alpha} + \frac{qx^\beta}{\beta} - \zeta_0 \right), m \right)}{\operatorname{cn}^2 \left(-\frac{a^{\frac{1}{3}} \cos^2 \left(\frac{\pi - 2\theta}{6} \right)}{(12bpq)^{\frac{1}{3}}} \left(\frac{pt^\alpha}{\alpha} + \frac{qx^\beta}{\beta} - \zeta_0 \right), m \right)} \right].$

Overall, the integration of the SE method with Jumarie’s modified Riemann–Liouville fractional derivative plays a key role in achieving these simplified and compact solutions. This combination allows fractional-order derivatives to be handled more effectively than in previous approaches [24–25], enabling the derivation of exact analytical solutions in a systematic and concise form. In contrast, solutions obtained in other studies typically take more complex forms involving layered trigonometric and hyperbolic functions, as illustrated in Tables 3 and 4. This highlights the advantage of the current approach in producing clearer and more manageable analytical results.

Conclusions

In this study, we successfully applied the simple equation (SE) method combined with JMRL derivative to obtain exact traveling wave solutions for two significant nonlinear space-time fractional PDEs: the modified Benjamin-Bona-Mahony (mBBM) equation and the Zakharov-Kuznetsov Benjamin-Bona-Mahony (ZKBBM) equation. The solutions, expressed in exponential form, exhibit kink-type wave structures



and were effectively visualized using 2D, 3D, and contour plots, demonstrating the robustness and practicality of the SE method in analyzing fractional models. These results provide valuable insights for applied mathematics by offering direct and exact solutions to complex nonlinear equations. They also demonstrate clear applicability in real-world systems.

The SE method employs simple procedures that yield exact closed-form results, highlighting its analytical strength and versatility. This approach not only reinforces its usefulness in applied mathematics but also opens avenues for extending its application to other nonlinear fractional equations, including coupled systems and variable-coefficient models. Future research may focus on modifying the SE method or integrating it with other symbolic approaches to further enhance its applicability in practical modeling across physics, engineering, and applied mathematics.

References

1. Thadee W, Chankaew A, Phoosree S. Effects of wave solutions on shallow-water equation, optical-fibre equation and electric-circuit equation. *Maejo Int J Sci Technol* 2022;16(3):262-74.
2. Djilali M, Ali H. (G'/G) -expansion method to seek traveling wave solutions for some fractional nonlinear PDEs arising in natural sciences. *Adv Theory Nonlinear Anal Appl* 2013;7(2):303-18.
3. Krishnan E, Ghabshi MA, Alquran M. (G'/G) -expansion method and Weierstrass elliptic function method applied to coupled wave equation. *Nonlinear Dyn Syst Theory* 2019;19(4):512-22.
4. Sanjun J, Chankaew A. Wave solutions of the DMBBM equation and the cKG equation using the simple equation method. *Front Appl Math Stat* 2022;8:952668.
5. Janma S, Janngam O, Sanjun J. Kink wave solutions for the (1+1)-dimensional nonlinear evolution equation by the simple method with the bernoulli equation. *RMUTSB Sci Technol J* 2025;9(1):19-28.
6. Sheikh MAN, Taher MA, Hossain MM, Akter S, Roshid HO. Variable coefficient exact solution of Sharma–Tasso–Olver model by enhanced modified simple equation method. *Partial Differ Equ Appl Math* 2023;7:100527.
7. Thadee W, Phoosree S. New wave behaviors generated by simple equation method with Riccati equation of some fourth-order fractional water wave equations. *J Phys Soc Japan* 2024;93(1):014002.
8. Sanjun J, Promkwan K, Korkiatsakul T, Janma S. Closed form exact solutions to the combined kdv-mkdv equation and the (2+1)-dimensional gbs equation via the Riccati sub-equation method. *RMUTSB Sci Technol J* 2024;8(2):46-60.
9. Sanjun J, Muenduang K, Phoosree S. Wave solutions to the combined KdV-mKdV equation via two methods with the Riccati equation. *J Appl Sci Emerg Technol* 2024;23(2):e256328.
10. Khan MI, Marwat DNK, Sabi'u J, Inc M. Exact solutions of Shynaray-IIA equation (S-IIAE) using the improved modified Sardar sub-equation method. *Opt Quantum Electron* 2024;56(3):459.
11. Ibrahim IS, Sabi'u J, Gambo YY, Rezapour S, Inc M. Dynamic soliton solutions for the modified complex Korteweg-de Vries system. *Opt Quantum Electron* 2024;56(6):954.
12. Sabi'u J, Sirisubtawee S, Sungnul S, Inc M. Wave dynamics for the new generalized (3+1)-D Painlevé-type nonlinear evolution equation using efficient techniques. *AIMS Math* 2024;9(11):32366-98.



13. Sanjun J, Aphaisawat W, Korkiatsakul T. Wave solutions to the Landau-Ginzburg-Higgs equation and modified KdV-Zakharov-Kuznetsov equation by the Riccati-Bernoulli sub-ODE method. *J Appl Sci Emerg Technol* 2024;23(1):e253520.
14. Hossain AKMKS, Akbar MA. Traveling wave solutions of Benny Luke equation via the enhanced (G'/G) -expansion method. *Ain Shams Eng J* 2021;12(4):4181-7.
15. Abdel-Gawad HI, Tantawy M, Abdelwahab AM. A new technique for solving Burgers-Kadomtsev-Petviashvili equation with an external source. Suppression of wave breaking and shock wave. *Alex Eng J* 2023;69:167-76.
16. Jumarie G. Modified Riemann-Liouville derivative and fractional Taylor series of nondifferentiable functions further results. *Comp Math Appl* 2006;51:1367-76.
17. Jumarie G. Table of some basic fractional calculus formulae derived from a modified Riemann-Liouville derivative for non-differentiable functions. *Appl Math Lett* 2009;22(3):378-85.
18. Kudryashov NA. Simplest equation method to look for exact solutions of nonlinear differential equations. *Chaos Solit Fract* 2005;24(5):1217-31.
19. Nofal TA. Simple equation method for nonlinear partial differential equations and its applications. *J Egypt Math Soc* 2016;24(2):204-9.
20. Poosree S, Thadee W. Wave effects of the fractional shallow water equation and the fractional optical fiber equation. *Front Appl Math Stat* 2022;8:900369.
21. Parker AE. Who solved the Bernoulli differential equation and how did they do it?. *Coll Math J* 2013;44(2):89-97.
22. Arefin MA, Zaman UHM, Uddin MH, Inc M. Consistent travelling wave characteristic of space-time fractional modified Benjamin-Bona-Mahony and the space-time fractional Duffing models. *Opt Quantum Electron* 2024;56(4):588.
23. Islam MN, Parvin R, Pervin MR, Akbar MA. Adequate soliton solutions to the time fractional Zakharov-Kuznetsov equation and the space-time fractional Zakharov-Kuznetsov-Benjamin-Bona-Mahony equation. *Arab J Basic Appl Sci* 2021;28(1):370-85.
24. Javeed S, Saif S, Waheed A, Baleanu D. Exact solutions of fractional mBBM equation and coupled system of fractional Boussinesq-Burgers. *Results Phys* 2018;9:1275-81.
25. Zhao S, Li Z. Bifurcation, chaotic behavior, and traveling wave solutions of the space-time fractional Zakharov-Kuznetsov-Benjamin-Bona-Mahony equation. *Front Phys* 2025;13:1502570.



ผลิตภัณฑ์ขนมมาเดอลีนทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วขาว
Madeleine Dessert Products Substituted Wheat Flour with
White Kidney Beans Flour

ชวิน เสร็จกิจ¹ เจตนิพัทธ์ บุญยสวัสดิ์² จักรวูธ ภู่อสม² ศิวกร ตลับนาค² และจักรกฤษณ์ ทองคำ^{2*}

¹สาขาวิชาคหกรรมศาสตร์ คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

กรุงเทพมหานคร 10300

²สาขาวิชาอาหารและโภชนาการ คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร

กรุงเทพมหานคร 10300

Chawin Setkit¹, Jetniphat Bunyasawat², Chakkrawut Bhoosem², Siwakron Talapnark²,
and Chukkrit Thongkham^{2*}

¹Home Economics Program, Faculty of Home Economics Technology, Rajamangala University of
Technology Phra Nakhon, Bangkok 10300

²Department Food and Nutrition, Faculty of Home Economics Technology, Rajamangala University of
Technology Phra Nakhon, Bangkok 10300

*Corresponding author: Chukkrit.t@rmutp.ac.th

Received: 3 September 2025/ Revised: 3 December 2025/ Accepted: 8 December 2025

บทคัดย่อ

ถั่วขาวมีสารฟอสโฟลัมบานยับยั้งเอนไซม์อะไมเลสที่ช่วยลดระดับน้ำตาลและไขมันในเลือด อีกทั้งมีคุณค่าทางโภชนาการสูง การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาขนมมาเดอลีน โดยใช้แป้งถั่วขาวทดแทนแป้งสาลีในระดับต่าง ๆ ได้แก่ ร้อยละ 0 25 50 และ 75 ของน้ำหนักแป้งสาลีในสูตร เพื่อประเมินผลต่อคุณภาพทางประสาทสัมผัส คุณสมบัติทางกายภาพ คุณค่าทางโภชนาการ และฤทธิ์ในการยับยั้งเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (α -amylase) ผลการศึกษาคุณลักษณะทางประสาทสัมผัส พบว่าการใช้แป้งถั่วขาวทดแทนแป้งสาลีในปริมาณร้อยละ 50 ได้รับคะแนนความชอบในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ และเนื้อสัมผัส ไม่แตกต่างจากสูตรพื้นฐานอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) โดยอยู่ในระดับความชอบปานกลาง ด้านคุณสมบัติทางกายภาพพบว่าการเพิ่มปริมาณแป้งถั่วขาวส่งผลให้ค่าความสว่าง (L^*) ลดลง ในขณะที่ค่าความเป็นสีแดง (a^*) และสีเหลือง (b^*) เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p\leq 0.05$) ลักษณะเนื้อสัมผัสแสดงค่าความแข็ง (Hardness) เพิ่มขึ้น และค่าความยืดหยุ่น (Springiness) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p\leq 0.05$) น้ำหนักที่หายไปหลังการอบเพิ่มขึ้น ขณะที่ปริมาตรและปริมาตรจำเพาะไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p>0.05$) ด้านคุณค่าทางโภชนาการ พบว่าการเพิ่มแป้งถั่วขาวส่งผลให้ปริมาณโปรตีนใยอาหาร และเส้นใย เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p\leq 0.05$) โดยสูตรที่เหมาะสมที่สุด (MD50) มีปริมาณโปรตีนเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 6.38 เป็นร้อยละ 8.34 ใยอาหารเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 0.41 เป็นร้อยละ 1.48 และเส้นใยเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 1.42 เป็นร้อยละ 1.96 เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรพื้นฐาน อย่างไรก็ตามตัวอย่างที่ใช้แป้งถั่วขาวทดแทนร้อยละ 50 ไม่แสดงฤทธิ์ยับยั้งเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (α -amylase) งานวิจัยนี้สามารถใช้เป็นแนวทางพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารจากแป้งถั่วขาว และยังเป็นส่งเสริมการ

ใช้แป้งถั่วขาวในผลิตภัณฑ์อาหารต่าง ๆ เพื่อเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ และมีความหลากหลายเป็นทางเลือกให้กับผู้บริโภคมากยิ่งขึ้น

คำสำคัญ: การพัฒนา มาเดอลีน แป้งถั่วขาว

Abstract

White kidney bean contains phaseolamine, inhibits the enzyme amylase. The blood sugar and lipid levels of this nutritional quality part to develop Madeleine pastry. By using white kidney bean flour in different levels of wheat flour, including 0, 25, 50 and 75 of the weight of wheat flour in the formula to evaluate the effect on the sensory quality, main properties, nutritional value and nutrition in inhibiting the enzyme alpha-amylase (α -amylase). The results of the sensory clinical research study. White kidney bean for wheat flour in parts of 50, the score is mainly the appearance of color, aroma, taste and texture that are different in the basic formula, no statistical significance ($p>0.05$), especially the neutral texture for the outstanding properties of the white flour content shows the value of the medium (L^*). Check the redness (a^*) and yellowness (b^*) values more ($p\leq 0.05$), the texture shows the values of the region (hardness), university and city (Springiness) significantly ($p\leq 0.05$). The story that disappears after baking increases. Taste consideration and thought were not different ($p>0.05$). In terms of nutritional value, it was found that the white bean protein components in the amount of protein, dietary fiber and protein content ($p\leq 0.05$). The most appropriate formula (MD50) had a protein content of 6.388 8.34 from this part, dietary fiber increased from 0.41 to 1.48 and additional details from the center 1.42 to 1.96. Previously, the basic formula, meaning white bean flour itself, 50 did not show any inhibitory activity against the enzyme alpha-amylase. This research is important in the development of food products from white bean flour and the campaign for the use of white bean flour in various food products to increase nutritional value and importantly to most consumers.

Keywords: Development, Madeleine, White Bean Flour

บทนำ

โรคไม่ติดต่อเรื้อรัง (Non-communicable diseases; NCDs) เป็นปัญหาสาธารณสุขระดับโลกที่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพชีวิตของประชากรและก่อให้เกิดภาระทางเศรษฐกิจอย่างมหาศาล โดยองค์การอนามัยโลก (WHO) รายงานว่าโรค NCDs เป็นสาเหตุของการเสียชีวิตมากกว่าร้อยละ 70 ของการเสียชีวิตทั้งหมดทั่วโลก โดยเฉพาะโรคหัวใจ โรคเบาหวาน และโรคอ้วน [1] ในประเทศไทย สถานการณ์โรคเบาหวานและโรคอ้วนมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นอย่างต่อเนื่อง จากรายงานของกรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข (2566) พบว่าประชากรไทยอายุ 15 ปีขึ้นไป มีอัตราการเป็นโรคเบาหวานร้อยละ 10-12 และมีภาวะน้ำหนักเกินหรืออ้วนมากกว่าร้อยละ 40 [2] โรคเหล่านี้มีความสัมพันธ์อย่างใกล้ชิดกับพฤติกรรมการบริโภคอาหาร โดยเฉพาะการบริโภคอาหารที่มีค่าดัชนีน้ำตาล (Glycemic Index: GI) สูง เช่น ข้าวขาว [3] ของหวานชนิดต่าง ๆ [4] และผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ [5]

ขนมมาเดอลีน (Madeleine) เป็นผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ในกลุ่มเค้กที่มีต้นกำเนิดจากฝรั่งเศส องค์ประกอบหลักของมาเดอลีนประกอบด้วยแป้ง น้ำตาล ไข่ เนย และสารเพิ่มความฟู ซึ่งองค์ประกอบเหล่านี้อาจมีผลต่อสุขภาพหากบริโภคในปริมาณมาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งปริมาณน้ำตาล ไขมัน และแป้งขัดขาว ซึ่งเกี่ยวข้องกับความเสี่ยงต่อโรคไม่ติดต่อเรื้อรัง เช่น โรค



อ้วน โรคเบาหวาน และโรคหัวใจ จากข้อมูลวิจัยก่อนหน้านี้พบว่า การบริโภคน้ำตาล และไขมันในปริมาณมากสามารถเพิ่มความเสี่ยงต่อภาวะ metabolic syndrome และโรคหัวใจได้ [6, 7] ขณะเดียวกันการบริโภคแป้งขัดขาวในปริมาณสูงก็อาจมีผลต่อระดับน้ำตาลในเลือดและความเสี่ยงต่อโรคเบาหวาน [8] ปัจจุบันแนวทางการพัฒนาอาหาร โดยการใช้วัตถุดิบจากพืชตระกูลถั่ว เช่น ถั่วขาว (White kidney bean) ซึ่งมีสารสำคัญชื่อ “ฟาซีโอลามิน” (Phaseolamin) ที่สามารถยับยั้งเอนไซม์อะไมเลส ทำให้การย่อยแป้งเป็นน้ำตาลลดลง ส่งผลให้ระดับน้ำตาลในเลือดหลังมื้ออาหารเพิ่มขึ้นช้าลงและช่วยลดการสะสมไขมันในร่างกาย [9] นอกจากนี้ถั่วขาวยังมีคุณค่าทางโภชนาการสูง โดยให้พลังงาน 333 กิโลแคลอรีต่อ 100 กรัม ประกอบด้วยโปรตีน 23.40 กรัม ไขมัน 0.85 กรัม คาร์โบไฮเดรต 60.30 กรัม โยอาหาร 15.20 กรัม แคลเซียม 240 มิลลิกรัม และมีวิตามินบีรวมหลายชนิด เช่น โทอะมิน ไบโอฟลาวัน และไนอะซิน [10, 11]

การนำแป้งถั่วขาวมาใช้ทดแทนแป้งสาลีในผลิตภัณฑ์เบเกอรี่จึงเป็นแนวทางที่น่าสนใจ การประยุกต์ใช้ถั่วขาวซึ่งมีสารฟาซีโอลามิน โปรตีน เส้นใยอาหาร และวิตามินสูง จึงสามารถช่วยเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการและพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ทางเลือกสำหรับผู้บริโภคที่ต้องการควบคุมระดับน้ำตาลในเลือด เช่น ผู้ป่วยเบาหวาน หรือผู้ที่ต้องการควบคุมน้ำหนัก

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การศึกษาการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วขาวในขนมมาเดอลีน

1.1 ขั้นตอนการเตรียมแป้งถั่วขาว

- ขั้นตอนในการเตรียมถั่วขาวด้วยวิธีการให้ความร้อนขึ้น ตัดแปลงจากพรทิพย์ และเดือนฉาย [12] ซึ่งมีขั้นตอนดังนี้
- (1) ชั่งถั่วขาว (ตราไร้พิภพ) ปริมาณ 1,500 กรัม และนำถั่วขาวที่ชั่งแล้วมาล้างด้วยน้ำสะอาด 2-3 ครั้ง
 - (2) นำถั่วขาวไปแช่น้ำประปาในอัตราส่วนระหว่างถั่วกับน้ำ 1 ต่อ 3 แช่ทิ้งไว้ประมาณ 10 ชั่วโมง จากนั้นจึงนำขึ้นมาล้างด้วยน้ำประปา 2 ครั้ง
 - (3) นำถั่วขาวไปนึ่งในตู้อบลมร้อนระบบหมุนเวียนที่อุณหภูมิ 100°C นาน 30 นาที
 - (4) นำถั่วขาวที่สุกแล้วมาบดในเครื่องบดผสมความเร็วสูงนาน 1 นาที
 - (5) นำถั่วขาวที่บดแล้วเกลี่ยใส่ถาดนำเข้าอบที่อุณหภูมิ 70°C โดยเกลี่ยและพลิกกลับถั่วขาวทุก 1 ชั่วโมง เป็นเวลาประมาณ 6 ชั่วโมง
 - (6) อบถั่วขาวจนกระทั่งมีค่าปริมาณน้ำอิสระ (Water activity, a_w) น้อยกว่า 0.6
 - (7) พักถั่วขาวให้เย็นแล้วนำไปปั่นด้วยเครื่องปั่นความเร็วสูงนาน 1 นาที หยุดและปั่นต่ออีก 1 นาที
 - (8) นำถั่วขาวมาร้อนผ่านตะแกรงขนาด 250 ไมครอน (micron)
 - (9) นำแป้งถั่วขาวที่ได้มาผสมในขนมมาเดอลีนตามอัตราส่วนที่กำหนดไว้ ดังตารางที่ 1

1.2 ขั้นตอนการศึกษาการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วขาวในขนมมาเดอลีน

นำผลิตภัณฑ์ขนมมาเดอลีน สูตรพื้นฐาน [13] แสดงดังตารางที่ 1 มาศึกษาการทดแทนแป้งถั่วขาวในอัตราส่วนร้อยละ 0 25 50 และ 75 ของน้ำหนักแป้งสาลีในสูตรพื้นฐาน ซึ่งมีวิธีการทดลองดังนี้

- (1) ชั่งส่วนผสมตามสูตร ดังในตารางที่ 1 สูตรขนมมาเดอลีนที่ทดแทนด้วยแป้งถั่วขาว 4 ระดับ
- (2) ร่อนแป้งสาลี แป้งถั่วขาว และผงฟู ลงในชามผสมสแตนเลส แล้วพักไว้
- (3) ละลายเนยด้วยวิธีการหม้อต้มสองชั้น (Double boiler) ใช้อุณหภูมิประมาณ 50°C แล้วพักไว้ให้เย็น
- (4) นำไข่ไก่ ไข่แดง น้ำตาลทรายขาว และน้ำตาลทรายแดง มาตีให้ละลายและเข้ากัน เครื่องผสมด้วยความเร็วระดับ 4 นาน 30 วินาที หลังจากนั้นเพิ่มความเร็วเป็นระดับ 8 นาน 1 นาที
- (5) เมื่อส่วนผสมที่อยู่ภายในโถปั่นผสมเข้ากันดีแล้ว จึงเติมกลิ่นวานิลลา กลิ่นนมเนย แป้งและผงฟูที่ร่อนเตรียมไว้ จากนั้นตีต่อด้วยความเร็วระดับ 2 เป็นเวลา 1 นาที
- (6) เติมน้ำมันที่ละลายทิ้งไว้และนมสด และตีด้วยความเร็วระดับ 2 เป็นเวลา 1 นาที



(7) พักส่วนผสมอย่างน้อย 1 ชั่วโมง

(8) ทาเนยลงบนพิมพ์เพฟลอนที่ใช้สำหรับอบขนมมาเดอลีน แล้วบีบแป้งที่ผสมไว้ ลงตรงกลางพิมพ์ 15 กรัมต่อชิ้น

(9) นำเข้าอบที่อุณหภูมิ 180°C เป็นเวลา 13 นาที

2. การศึกษาการทดสอบทางประสาทสัมผัสของขนมมาเดอลีนที่มีการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วขาว

นำผลิตภัณฑ์ขนมมาเดอลีนบรรจุใส่ถุงซีลด้วยเครื่องสุญญากาศ เก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 2-5°C จากนั้นจึงนำตัวอย่างไปทดสอบคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ด้วยวิธีการทดสอบแบบให้คะแนนความชอบ 9 ระดับ (9 Points Hedonic Test) โดยใช้ผู้ทดสอบทางประสาทสัมผัสจำนวน 70 คน ซึ่งเป็นอาจารย์และนักศึกษา สาขาวิชาอาหารและโภชนาการ คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร นำสูตรที่ได้รับการยอมรับจากผู้ชิมวิเคราะห์ลักษณะทางกายภาพ คุณสมบัติทางเคมี และฤทธิ์ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (α -amylase)

ตารางที่ 1 สูตรขนมมาเดอลีนที่ทดแทนด้วยแป้งถั่วขาว 4 ระดับ

ส่วนผสม	ปริมาณส่วนผสมแป้งถั่วขาวในแต่ละสูตร							
	MDC		MD25		MD50		MD75	
	กรัม	ร้อยละ	กรัม	ร้อยละ	กรัม	ร้อยละ	กรัม	ร้อยละ
แป้งสาลี	240	25.23	180	18.92	120	12.62	60	6.31
แป้งถั่วขาว	0	0	60	6.31	120	12.62	180	18.92
ไข่ไก่	220	23.13	220	23.13	220	23.13	220	23.13
น้ำตาลทรายขาว	100	10.51	100	10.51	100	10.51	100	10.51
น้ำตาลทรายแดง	100	10.51	100	10.51	100	10.51	100	10.51
เนยเค็มแท้	250	26.28	250	26.28	250	26.28	250	26.28
นมสด	30	3.15	30	3.15	30	3.15	30	3.15
ผงฟู	7	0.75	7	0.75	7	0.75	7	0.75
เกลือ	0.5	0.05	0.5	0.05	0.5	0.05	0.5	0.05
กลิ่นวานิลลา	2.5	0.26	2.5	0.26	2.5	0.26	2.5	0.26
กลิ่นนมเนย	1.25	0.13	1.25	0.13	1.25	0.13	1.25	0.13

หมายเหตุ: MDC MD25 MD50 MD75 หมายถึง ขนมมาเดอลีนสูตรพื้นฐาน ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วขาว ร้อยละ 0 25 50 และ 75 ตามลำดับ

3. การศึกษาสมบัติทางกายภาพของขนมมาเดอลีนที่มีการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วขาว

การศึกษาลักษณะทางกายภาพของขนมมาเดอลีนที่มีการทดแทนด้วยแป้งถั่วขาว มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

3.1 วิเคราะห์ค่าสี (Color analysis)

วัดค่าสีของขนมมาเดอลีนที่มีการทดแทนด้วยแป้งถั่วขาวในระบบ CIELAB ด้วยเครื่องวัดค่าสี (ยี่ห้อ KONIKA MINOLTA รุ่น CM-3500d) วัดค่า L^* a^* และ b^* โดยนำขนมมาเดอลีนบดให้ละเอียดรวมกันแล้ววัดตัวอย่างละ 5 กรัม วัดโดยตรงจากผลิตภัณฑ์ขนมมาเดอลีน

3.2 วิเคราะห์น้ำหนักที่หายไปหลังการอบ (Baking loss)

ชั่งน้ำหนักของตัวอย่างขนมมาเดอลีนหลังอบด้วยเครื่องชั่งดิจิทัล ทศนิยมสองตำแหน่ง โดยชั่งน้ำหนักขนมมาเดอลีนที่พักจนเย็นแล้ว บันทึกน้ำหนักของขนมมาเดอลีนด้วยหน่วยกรัม (g)



3.3 วิเคราะห์ปริมาตรของขนมหลังการอบ (Volume)

วัดปริมาตรตัวของตัวอย่าง โดยการแทนที่ด้วยเมล็ดงาขาว ตัดแปลงวิธีจาก AACC [14] เริ่มจากวัดปริมาตรของภาชนะที่จะใช้วัดปริมาตรของขนมมาเดอลีน (ภาชนะที่สามารถใส่ตัวอย่างขนมมาเดอลีนได้ทั้งชิ้น) โดยใส่เมล็ดงาขาวให้เต็มภาชนะ แล้วปาดผิวด้านบนให้เรียบ เทเมล็ดงาออกจากภาชนะ จากนั้นนำตัวอย่างขนมมาเดอลีนวางลงในภาชนะเดิมเทเมล็ดงาขาวลงไปให้เต็มภาชนะ แล้วปาดผิวด้านบนให้เรียบวัดปริมาตรของเมล็ดงาขาวที่เหลืออยู่โดยใช้กระบอกตวงบันทึกปริมาตรเมล็ดงาขาวที่เหลืออยู่เป็นค่าปริมาตรของตัวอย่างขนมมาเดอลีนในหน่วยของ 1 มิลลิลิตร (mL) โดย 1 มิลลิลิตร มีค่าเท่ากับ 1 ลูกบาศก์เซนติเมตร (cm³)

3.4 วิเคราะห์ปริมาตรจำเพาะของขนมมาเดอลีน (Specific volume)

คำนวณค่าปริมาตรจำเพาะของตัวอย่างขนมมาเดอลีนในหน่วยของกรัมต่อมิลลิลิตร (g/mL) ดังสมการที่ (1)

$$\text{ปริมาตรจำเพาะ (g/mL)} = \frac{\text{น้ำหนักของตัวอย่างขนมมาเดอลีน (g)}}{\text{ปริมาตรของตัวอย่างขนมมาเดอลีน (mL)}} \quad (1)$$

(จากข้อ 3.3)

3.5 วิเคราะห์เนื้อสัมผัส (Texture analysis)

วิเคราะห์ลักษณะเนื้อสัมผัส (Texture Profile Analysis, TPA) ด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (ยี่ห้อ Stable Micro Systems รุ่น TA.XT plus) ด้วยหัววัดอลูมิเนียมทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลาง 100 มม. (P/100) การทดสอบเป็นการบีบอัดสองรอบ (double compression) โดยตั้งความเร็วหัววัดที่ 1.0 มม./วินาที และบีบลงจนตัวอย่างถูกยุบเป็นร้อยละ 50 ของความสูงเริ่มต้นของตัวอย่าง ขนมมาเดอลีนแต่ละชิ้น ทำการตรวจวัดตัวอย่างละ 10 ชิ้น ค่าแรงจากโค้งแรง-เวลาใช้คำนวณค่าความแข็ง (hardness; ได้จากจุดสูงสุดของแรงในการกดครั้งแรก) และค่าความยืดหยุ่น (springiness; คำนวณตามสัดส่วนการคืนตัวระหว่างการบีบครั้งแรกและครั้งที่สอง) วิธีการนี้ดัดแปลงจาก Bourne [15] และปรับพารามิเตอร์เพื่อให้เหมาะสมกับขนาดและโครงสร้างของตัวอย่าง โดยอ้างอิงตามแนวทางของ Casas-Moreno et al. [16] และคู่มือของ Stable Micro Systems [17]

4. การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและฤทธิ์ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (α -amylase) ในขนมมาเดอลีนที่มีการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วขาว

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและฤทธิ์ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (α -amylase) ในขนมมาเดอลีนทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วขาว มีขั้นตอนดังต่อไปนี้

4.1 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณ (Proximate analysis)

โดยทำการวิเคราะห์ปริมาณความชื้นด้วยตู้อบลมร้อน (Hot Air Oven) (รุ่น FD115, Binder, German) วิเคราะห์ปริมาณโปรตีนด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนแบบ Kjeldahl (รุ่น Vapodest 20, Gerhardt, German) วิเคราะห์ปริมาณไขมันด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ปริมาณไขมัน (รุ่น SER148, velp scientifica, Italy) วิเคราะห์ปริมาณใยอาหารด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณใยอาหารหยาบ (VELP SCIENTIFICA, Italy) และวิเคราะห์ปริมาณเถ้าด้วยเตาเผาวิเคราะห์เถ้า (Lenton, England) จากนั้นนำมาคำนวณหาปริมาณคาร์โบไฮเดรต และพลังงาน ตามวิธีการของ AOAC [18, 19] ตามสูตรที่ (2) และ (3)

$$\text{ปริมาณคาร์โบไฮเดรต} = [100 - (\text{ความชื้น} + \text{โปรตีน} + \text{ไขมัน} + \text{ใยอาหารหยาบ} + \text{เถ้า})] \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \text{พลังงาน} &= (\text{ร้อยละของปริมาณโปรตีน} \times 4) + (\text{ร้อยละของปริมาณคาร์โบไฮเดรต} \times 4) \\ &+ (\text{ร้อยละของปริมาณไขมัน} \times 9) \end{aligned} \quad (3)$$

[กิโลแคลอรี] (kcal)/100 กรัม

4.2 วิเคราะห์ฤทธิ์ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (Alpha-amylase)

โดยใช้วิธีการวิเคราะห์แบบ 2-chloro-4-nitrophenol colorimetric ในการทดลองเริ่มจากการชั่งตัวอย่างมาเดอลินเฉลี่ย 13 g แล้วละลายในน้ำกลั่นปริมาตร 30 mL จากนั้นเจือจางสารละลายตัวอย่างให้ได้ความเข้มข้น 40 และ 80 mg/mL สำหรับเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน Acarbose ที่ความเข้มข้น 40 mg/mL ในขณะที่เอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (α -amylase) ถูกเตรียมให้มีความเข้มข้น 0.4 U/mL โดยละลายในน้ำกลั่น การทดสอบแบ่งออกเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ Negative control (น้ำ DI 75 μ L), Positive control (น้ำ DI 50 μ L ร่วมกับเอนไซม์ 25 μ L), Sample reaction (น้ำ DI 25 μ L, เอนไซม์ 25 μ L และสารตัวอย่างหรือ Acarbose 25 μ L) และ Blank of sample (น้ำ DI 50 μ L และสารตัวอย่างหรือ Acarbose 25 μ L) จากนั้นนำสารละลายทั้ง 4 กลุ่มไปบ่มที่อุณหภูมิ 37°C เป็นเวลา 10 นาที แล้วเติมสารตั้งต้น 2-chloro-4-nitrophenyl- α -D-maltotriose (CNPG3) ที่ความเข้มข้น 4 mM ปริมาตร 25 μ L ในแต่ละหลุม ผสมให้เข้ากัน และบ่มต่อที่อุณหภูมิห้องอีก 10 นาที สุดท้ายทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 405 nm ด้วยเครื่อง microplate reader ยี่ห้อ BioTek รุ่น Synergy LX (BioTek) และนำข้อมูลที่ได้มาคำนวณหาค่าร้อยละการยับยั้งเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (α -amylase) โดยเปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน Acarbose เพื่อประเมินประสิทธิภาพของตัวอย่างมาเดอลินในการยับยั้งเอนไซม์ดังกล่าว

5. การวิเคราะห์ทางสถิติ

วิเคราะห์ผลทางสถิติ โดยใช้โปรแกรมวิเคราะห์สถิติสำเร็จรูป (Statistical Package for the Social Sciences, SPSS) IBM SPSS Statistics Version 29

5.1 การวิเคราะห์การประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัสวางแผนการทดลองแบบ Randomized Complete Block Design, RCBD วิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (Analysis of variance, ANOVA) รายงานผลเป็นค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เปรียบเทียบความแตกต่างด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) กำหนดนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น ($p \leq 0.05$) [20]

5.2 การวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณ คุณสมบัติทางกายภาพ วางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design, CRD วิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (Analysis of variance, ANOVA) รายงานผลเป็นค่าเฉลี่ยและส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน เปรียบเทียบความแตกต่างด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) กำหนดนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น ($p \leq 0.05$) [20]

ผลการวิจัย

1. ผลการศึกษาการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวในขนมมาเดอลิน

การทดลองครั้งนี้ได้ศึกษาปริมาณแป้งข้าวที่แตกต่างกัน 4 ระดับ คือ ร้อยละ 0 25 50 และ 75 ของน้ำหนักแป้งสาลีในสูตร โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ (Randomized Complete Block Design, RCBD) และนำไปประเมินคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส และความชอบโดยรวม ด้วยวิธีการชิมแบบให้คะแนนความชอบ 9 ระดับ (9-Point Hedonic Scale) โดยให้ผู้ชิมจำนวน 70 คน ซึ่งเป็นอาจารย์และนักศึกษาศาขาวิชาอาหารและโภชนาการ คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร วิเคราะห์ผลด้วยโปรแกรมวิเคราะห์สถิติสำเร็จรูป (Statistical Package for the Social Sciences, SPSS)

จากตารางที่ 2 พบว่าค่าคะแนนทดสอบคุณภาพทางประสาทสัมผัสของขนมมาเดอลินที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าว ผู้ทดสอบให้การยอมรับสูงสุดในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ และความชอบโดยรวมที่ MD25 ค่าคะแนนอยู่ที่ 8.37 8.23 8.06 8.13 และ 7.91 ตามลำดับ อยู่ในระดับชอบมากถึงชอบปานกลาง ขณะที่ด้านเนื้อสัมผัสผู้ทดสอบให้การยอมรับสูงสุดที่ MD50 ค่าคะแนนอยู่ที่ 7.83 ซึ่งอยู่ในระดับชอบปานกลาง เมื่อนำผลการทดสอบที่ได้มาวิเคราะห์ค่าความแปรปรวน และเปรียบเทียบความแตกต่างทางสถิติพบว่า ระหว่าง MD25 และ MD50 ในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ



ตารางที่ 2 ผลการประเมินคุณลักษณะทางประสาทสัมผัสของขนมมาเดอลีนทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วขาว

คุณลักษณะทางประสาทสัมผัส	ค่าคะแนนความชอบเฉลี่ย			
	MDC	MD25	MD50	MD75
ลักษณะปรากฏ	8.11 ± 0.94 ^{ab}	8.37 ± 0.62 ^a	8.17 ± 0.78 ^{ab}	7.97 ± 1.02 ^b
สี	8.01 ± 0.92 ^{ab}	8.23 ± 0.73 ^a	7.97 ± 0.74 ^{ab}	7.83 ± 0.98 ^b
กลิ่น	7.83 ± 0.99 ^a	8.06 ± 0.76 ^a	8.04 ± 0.91 ^a	7.86 ± 1.12 ^a
รสชาติ	7.86 ± 0.87 ^{ab}	8.13 ± 0.82 ^a	8.01 ± 0.83 ^{ab}	7.76 ± 1.07 ^b
เนื้อสัมผัส	7.67 ± 0.97 ^a	7.81 ± 0.86 ^a	7.83 ± 0.90 ^a	7.26 ± 1.25 ^b
ความชอบโดยรวม	7.76 ± 0.92 ^a	7.91 ± 0.94 ^a	7.33 ± 1.09 ^b	7.39 ± 1.24 ^b

หมายเหตุ: ^{a,b} ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละแถว หมายถึง ค่าที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

MDC MD25 MD50 MD75 หมายถึง ขนมมาเดอลีนสูตรพื้นฐาน ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วขาว ร้อยละ 0 25 50 และ 75 ตามลำดับ

และเนื้อสัมผัส ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) เช่นเดียวกับ MD50 และ MD75 ในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ และความชอบโดยรวมไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) แต่ MD75 มีเนื้อสัมผัสแตกต่างจากสูตรพื้นฐาน MD25 และ MD 50 อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) อีกทั้งในทางปฏิบัติพบว่า MD75 มีความแข็งไม่คงลักษณะที่ดีของขนมมาเดอลีน ดังนั้นจึงไม่สามารถทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วขาวในสัดส่วนร้อยละ 75 ผู้วิจัยจึงใช้การทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วขาวที่ร้อยละ 50 ในการทำวิจัยต่อไป

2. ผลการศึกษาคุณลักษณะทางกายภาพของขนมมาเดอลีนทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วขาว

นำขนมมาเดอลีนทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วขาวที่ต่างกัน 4 ระดับ คือ ร้อยละ 0 25 50 และ 75 ของน้ำหนักแป้งสาลีในสูตร มาทำการศึกษาคูณภาพทางกายภาพ ได้แก่ ค่าสี (L^* , a^* , b^*) น้ำหนักที่หายไปหลังการอบ ปริมาตร-ปริมาตรจำเพาะ และค่าเนื้อสัมผัสของขนมมาเดอลีนหลังการอบ ดังแสดงในตารางที่ 3 4 5 และ 6 ตามลำดับ

2.1 ผลการวิเคราะห์ค่าสีขนมมาเดอลีนทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วขาวที่ต่างกัน 4 ระดับ

การใช้แป้งถั่วขาวทดแทนแป้งสาลีส่งผลต่อค่าสีของขนมมาเดอลีน จากตารางที่ 3 พบว่าค่าสี (L^* และ b^*) ของขนมมาเดอลีนทั้ง 4 สูตร มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรพื้นฐาน ขณะที่ a^* พบว่าที่ MD50 ไม่แตกต่างจากสูตรพื้นฐาน (MCD) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) โดยค่าความสว่าง (L^*) มีค่าลดลงในขณะที่ค่าความเป็นสีแดง (a^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับสูตรพื้นฐานดังภาพที่ 1

ตารางที่ 3 ค่าสี (L^* , a^* , b^*) ของขนมมาเดอลีนทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วขาวที่ต่างกัน 4 ระดับ

ระดับการทดแทน	สี		
	L^*	a^*	b^*
MDC	59.32 ± 0.01 ^a	11.69 ± 0.02 ^c	34.45 ± 0.19 ^d
MD25	58.69 ± 0.05 ^b	11.79 ± 0.02 ^b	36.06 ± 0.10 ^c
MD50	58.67 ± 0.02 ^b	11.72 ± 0.01 ^c	36.37 ± 0.04 ^b
MD75	57.83 ± 0.03 ^c	12.27 ± 0.02 ^a	36.89 ± 0.02 ^a

หมายเหตุ: ^{a,b,c} ตัวอักษรที่ต่างกันในแต่ละแถว หมายถึง ค่าที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

MDC MD25 MD50 MD75 หมายถึง ขนมมาเดอลีนสูตรพื้นฐาน ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วขาว ร้อยละ 0 25 50 และ 75 ตามลำดับ



MDC

MD25

MD50

MD75

ภาพที่ 1 ลักษณะของขนมมาเดอลินทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวที่แตกต่างกัน 4 ระดับ

หมายเหตุ: MDC MD25 MD50 MD75 หมายถึง ขนมมาเดอลินสูตรพื้นฐาน ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าว ร้อยละ 0 25 50 และ 75 ตามลำดับ

2.2 ผลการวิเคราะห์น้ำหนักที่หายไปหลังอบของขนมมาเดอลินทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวที่แตกต่างกัน 4 ระดับ

จากตารางที่ 4 พบว่าค่าเฉลี่ยของน้ำหนักที่หายไปของขนมมาเดอลินทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวที่มีการใช้ปริมาณแป้งข้าวที่มากขึ้นส่งผลให้ค่าเฉลี่ยของน้ำหนักที่หายไปมีค่าเพิ่มขึ้น

ตารางที่ 4 น้ำหนักของขนมมาเดอลินทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวที่แตกต่างกัน 4 ระดับ หลังผ่านการอบ

รายการ	ปริมาณแป้งทดแทน			
	MDC	MD25	MD50	MD75
ค่าเฉลี่ยของน้ำหนักก่อนอบ (กรัม)	15.00 ± 0.00	15.00 ± 0.00	15.00 ± 0.00	15.00 ± 0.00
ค่าเฉลี่ยของน้ำหนักหลังอบ (กรัม)	13.64 ± 0.11 ^a	13.58 ± 0.16 ^a	13.50 ± 0.10 ^a	13.30 ± 0.07 ^b
ค่าเฉลี่ยของน้ำหนักที่หายไป (กรัม)	1.36 ± 0.11 ^b	1.42 ± 0.16 ^b	1.50 ± 0.10 ^b	1.70 ± 0.07 ^a
น้ำหนักที่หายไป (ร้อยละ)	9.07±0.76	9.47±1.09	10.00±0.67	11.33±0.47

หมายเหตุ: ^{a,b} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวนอน หมายถึง ค่าที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)
MDC MD25 MD50 MD75 หมายถึง ขนมมาเดอลินสูตรพื้นฐาน ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าว ร้อยละ 0 25 50 และ 75 ตามลำดับ

2.3 ผลการวิเคราะห์ปริมาตรและปริมาตรจำเพาะของขนมมาเดอลินทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวที่แตกต่างกัน 4 ระดับ

จากตารางที่ 5 พบว่าปริมาตรและปริมาตรจำเพาะของขนมมาเดอลินที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวที่แตกต่างกัน 4 ระดับ ได้แก่ ร้อยละ 0 25 50 และ 75 ของน้ำหนักแป้งสาลีในสูตร ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) โดยขนมมาเดอลินในแต่ละระดับการทดแทนมีปริมาตรเท่ากับ 30.60 32.40 29.40 และ 30.40 มิลลิลิตร และมีปริมาตรจำเพาะเท่ากับ 2.24 2.38 2.18 และ 2.29 มิลลิลิตร/กรัม ตามลำดับ

ตารางที่ 5 ปริมาตรและปริมาตรจำเพาะของขนมมาเดอลินทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าวที่แตกต่างกัน 4 ระดับ

รายการ	ปริมาตรของ บีกเกอร์ (มิลลิลิตร)	ปริมาตรหลัง ใส่ชิ้นขนม ^{ns} (มิลลิลิตร)	ปริมาตรของ ชิ้นขนม ^{ns} (มิลลิลิตร)	น้ำหนัก (กรัม)	ปริมาตรจำเพาะ (มิลลิลิตร/ กรัม) ^{ns}
MDC	190.00 ± 0.00	159.40 ± 2.30	30.60 ± 2.30	13.64 ± 0.11 ^a	2.24 ± 0.17
MD25	190.00 ± 0.00	157.60 ± 5.18	32.40 ± 5.18	13.58 ± 0.16 ^a	2.38 ± 0.36
MD50	190.00 ± 0.00	160.60 ± 1.94	29.40 ± 1.94	13.50 ± 0.10 ^a	2.18 ± 0.15
MD75	190.00 ± 0.00	159.60 ± 2.19	30.40 ± 2.19	13.30 ± 0.07 ^b	2.29 ± 0.17

หมายเหตุ: ^{ns} หมายถึง ค่าที่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

MDC MD25 MD50 MD75 หมายถึง ขนมมาเดอลินสูตรพื้นฐาน ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งข้าว ร้อยละ 0 25 50 และ 75 ตามลำดับ



2.4 ผลการวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของขนมมาเดอลีนทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วขาวที่แตกต่างกัน 4 ระดับ

จากตารางที่ 6 พบว่าเนื้อสัมผัสของขนมมาเดอลีนทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วขาว ที่มีการใช้แป้งถั่วขาวทดแทนแป้งสาลีในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้มีลักษณะเนื้อสัมผัสของขนมมาเดอลีนทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วขาวในด้าน Hardness มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ในขณะที่ค่า Springiness มีค่าลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 6 ค่าเนื้อสัมผัสของขนมมาเดอลีนทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วขาวที่แตกต่างกัน 4 ระดับ

ค่าเนื้อสัมผัส	MDC	MD25	MD50	MD75
Hardness (N)	1633.10 $\pm$ 133.39 ^d	2036.05 $\pm$ 181.24 ^c	2933.54 $\pm$ 217.46 ^b	3255.08 $\pm$ 414.65 ^a
Springiness	45.50 $\pm$ 0.74 ^a	42.73 $\pm$ 0.55 ^b	40.88 $\pm$ 0.57 ^c	38.98 $\pm$ 0.86 ^d

หมายเหตุ: ^{a,b,c,d} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวนอน หมายถึง ค่าที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

MDC MD25 MD50 MD75 หมายถึง ขนมมาเดอลีนสูตรพื้นฐาน ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วขาว ร้อยละ 0 25 50 และ 75 ตามลำดับ

3. การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและฤทธิ์ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (α -amylase) ในขนมมาเดอลีนทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วขาว

3.1 ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณ (Proximate analysis)

องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของขนมมาเดอลีนทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วขาวที่แตกต่างกัน 4 ระดับ คือ ร้อยละ 0 25 50 และ 75 ของน้ำหนักแป้งสาลีในสูตร ดังแสดงในตารางที่ 7

ตารางที่ 7 องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของขนมมาเดอลีนทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วขาวที่แตกต่างกัน 4 ระดับ

องค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณ	ปริมาณ (ร้อยละ)			
	MDC	MD25	MD50	MD75
ความชื้น (ร้อยละ)	15.18 $\pm$ 0.01 ^a	15.41 $\pm$ 0.10 ^a	14.82 $\pm$ 0.17 ^b	13.10 $\pm$ 0.11 ^c
โปรตีน (ร้อยละ)	6.38 $\pm$ 0.08 ^d	7.26 $\pm$ 0.04 ^c	8.34 $\pm$ 0.04 ^b	9.59 $\pm$ 0.16 ^a
ไขมัน (ร้อยละ)	27.47 $\pm$ 0.23 ^b	27.19 $\pm$ 0.11 ^b	25.51 $\pm$ 0.11 ^c	28.06 $\pm$ 0.04 ^a
ใยอาหาร (ร้อยละ)	0.41 $\pm$ 0.11 ^d	0.88 $\pm$ 0.08 ^c	1.48 $\pm$ 0.03 ^b	1.92 $\pm$ 0.01 ^a
เถ้า (ร้อยละ)	1.42 $\pm$ 0.01 ^d	1.65 $\pm$ 0.01 ^c	1.96 $\pm$ 0.01 ^b	2.17 $\pm$ 0.06 ^a
คาร์โบไฮเดรต (ร้อยละ)	49.14 $\pm$ 0.05 ^a	47.61 $\pm$ 0.11 ^b	47.89 $\pm$ 0.36 ^b	45.17 $\pm$ 0.19 ^c
พลังงาน (Kcal)	469.31 $\pm$ 1.59 ^a	464.19 $\pm$ 1.00 ^b	454.51 $\pm$ 0.25 ^c	471.58 $\pm$ 0.46 ^a

หมายเหตุ: ^{a,b,c,d} ตัวอักษรที่แตกต่างกันในแนวนอน หมายถึง ค่าที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

MDC MD25 MD50 MD75 หมายถึง ขนมมาเดอลีนสูตรพื้นฐาน ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วขาว ร้อยละ 0 25 50 และ 75 ตามลำดับ

จากตารางที่ 7 พบว่าองค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของขนมมาเดอลีนทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วขาวที่แตกต่างกัน 4 ระดับ คือ ร้อยละ 0 25 50 และ 75 ของน้ำหนักแป้งสาลีในสูตร มีความชื้น 15.18 15.41 14.82 และ 13.10 ตามลำดับ ขนมมาเดอลีนทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วขาวที่ร้อยละ 25 มีปริมาณความชื้นและไขมันไม่แตกต่างจากสูตรพื้นฐาน ที่ร้อยละ 50 และ 75 ปริมาณความชื้นลดลงจากสูตรพื้นฐานอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ไขมันที่ระดับร้อยละ 50 ลดลงจากสูตรพื้นฐาน แต่กลับเพิ่มขึ้นที่ระดับร้อยละ 75 อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โปรตีน ใยอาหาร และเถ้า ในขนมมาเดอลีนที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วขาวที่ร้อยละ 25 50 และ 75 เพิ่มขึ้นจากสูตรพื้นฐานอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) คาร์โบไฮเดรตในขนมมาเดอลีนที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วขาวที่ร้อยละ 25 50 และ 75 ลดลงจากสูตรพื้นฐานอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ขนมมาเดอลีนทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วขาวที่ร้อยละ 25 50 และ 75 ลดลงจากสูตรพื้นฐานอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)



แทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วขาวที่ร้อยละ 25 และ 50 มีพลังงานลดลงจากสูตรพื้นฐานอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ขณะที่ร้อยละ 75 มีพลังงานไม่แตกต่างจากสูตรพื้นฐาน ($p > 0.05$)

3.2 ผลการวิเคราะห์ฤทธิ์ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (α -amylase)

การศึกษาความสามารถในการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (α -amylase) ของสารตัวอย่างขนมมาเดอลีนทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วขาวที่ร้อยละ 50 พบว่าสารตัวอย่างทดสอบที่ความเข้มข้น 10 และ 20 mg/mL ไม่มีฤทธิ์ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (α -amylase) แต่มีกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (α -amylase) เพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของตัวอย่างทดสอบ ดังในตารางที่ 8 และเมื่อเทียบกับสารมาตรฐาน Acarbose ที่ความเข้มข้น 10 mg/mL มีฤทธิ์ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (α -amylase) โดยมีค่าร้อยละความสามารถในการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (α -amylase) อยู่ที่ 64.27 ± 3.50

ตารางที่ 8 ร้อยละความสามารถในการทำงานของเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (α -amylase) และการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (α -amylase) หลังทำการทดสอบด้วยสารตัวอย่างขนมมาเดอลีนเทียบสารมาตรฐาน Acarbose

สารทดสอบ	ความเข้มข้น (mg/mL)	ร้อยละการทำงานของเอนไซม์ α -amylase	ร้อยละการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์ α -amylase
Positive control	-	100	0.00 ± 0.00
Acarbose	10	35.73 ± 3.50	64.27 ± 3.50
มาเดอลีน	10	393.18 ± 7.07	0.00 ± 0.00
	20	433.04 ± 5.85	0.00 ± 0.00

จากตารางที่ 8 พบว่าตัวอย่างมาเดอลีนที่ใช้ถั่วขาวทดแทนแป้งข้าวสาลีในสัดส่วนร้อยละ 50 ไม่แสดงประสิทธิภาพในการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (α -amylase) ซึ่งอาจเกิดจากการที่สารออกฤทธิ์ในแป้งถั่วขาวสูญเสียประสิทธิภาพระหว่างกระบวนการผลิตที่ใช้ความร้อนสูง

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาขนมมาเดอลีนโดยใช้แป้งถั่วขาวทดแทนแป้งสาลี ในระดับที่แตกต่างกัน 4 ระดับ คือ ร้อยละ 0 25 50 และ 75 ของน้ำหนักแป้งสาลีในสูตรพื้นฐาน พบว่าปริมาณการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วขาวที่ร้อยละ 25 ได้รับค่าคะแนนการทดสอบความชอบทางประสาทสัมผัสของผู้ทดสอบสูงสุด แต่เมื่อพิจารณาผลการทดสอบความแตกต่างทางสถิติพบว่า การทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วขาวที่ร้อยละ 50 ไม่แตกต่างจากการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วขาวที่ร้อยละ 25 ($p > 0.05$) ในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ และเนื้อสัมผัส เช่นเดียวกับการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วขาวที่ร้อยละ 50 ไม่แตกต่างจากการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วขาวที่ร้อยละ 75 ($p > 0.05$) ในด้านลักษณะปรากฏ สี กลิ่น รสชาติ และความชอบโดยรวม แต่ MD75 มีเนื้อสัมผัสแตกต่างจากสูตรพื้นฐาน MD25 และ MD50 อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ทำให้ MD75 ไม่คงลักษณะที่ดีของขนมมาเดอลีน สอดคล้องกับผลการศึกษาของ วิลาวัณี และคณะ [21] ที่ศึกษาปริมาณที่เหมาะสมในการใช้แป้งถั่วขาวทดแทนปริมาณแป้งสาลีในขนมปัง พบว่าปริมาณการเสริมแป้งถั่วขาวร้อยละ 0 ถึงร้อยละ 50 คือช่วงที่ผู้บริโภคให้ยอมรับสูงสุด จึงสรุปว่า MD 50 เป็นระดับการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วขาวที่เหมาะสมที่สุดที่ผู้ทดสอบให้การยอมรับ

การศึกษาคุณสมบัติทางกายภาพ พบว่าเมื่อมีการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วขาวจะมีผลทำให้ค่าความสว่าง (L^*) มีค่าลดลง และค่าความเป็นสีแดง (a^*) และสีเหลือง (b^*) มีค่าเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรพื้นฐาน ซึ่งอาจเป็นผลมาจากปฏิกิริยาเมลลาร์ด (Maillard reaction) เป็นปฏิกิริยาระหว่างกรดอะมิโน (หรือโปรตีน) กับน้ำตาลรีดิวซ์ที่เกิดขึ้นเมื่อให้ความ



ร้อน ส่งผลให้เกิดสารประกอบสีน้ำตาล (Melanoidins) และแป้งถั่วขาวมีปริมาณโปรตีนที่สูงกว่าแป้งสาลี ทำให้มีกรดอะมิโนมากขึ้นที่สามารถเข้าร่วมปฏิกิริยา Maillard กับน้ำตาลรีดิวซ์ ความเข้มของสีจึงเด่นชัดขึ้น (ค่าความสว่าง (L^*) มีค่าลดลง และค่าความเป็นสีแดง (a^*) และสีเหลือง (b^*) มีค่าเพิ่มขึ้น) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ เนตรนรินทร์ และคณะ [22] และ Han et al. [23] ศึกษาเรื่องการใช้แป้งถั่วขาวทดแทนแป้งข้าวเจ้าในผลิตภัณฑ์อาหาร พบว่าการใช้แป้งถั่วขาวทดแทนแป้งข้าวเจ้าในระดับที่มากขึ้น จะส่งผลให้ค่าความสว่าง (L^*) มีค่าลดลง ส่วนค่าสีเหลือง (b^*) และค่าสีแดง (a^*) มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับผลิตภัณฑ์สูตรพื้นฐาน อย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ค่าเฉลี่ยของน้ำหนักที่หายไปของขนมมาเดอรินที่มีการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วขาวในปริมาณที่มากขึ้นจะส่งผลให้ น้ำหนักหลังอบมีค่าเฉลี่ยของน้ำหนักที่หายไปเพิ่มขึ้น เนื่องจากปริมาณความชื้นในถั่วขาวมีมากกว่าในแป้งสาลี โดยที่ถั่วขาวมีความชื้นร้อยละ 15.38 [24] แป้งสาลีมีความชื้นร้อยละ 14.0 ตามมาตรฐานของ Codex Alimentarius Commission (1985) [25] ดังนั้นขนมมาเดอรินที่มีการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วขาวในปริมาณที่มากขึ้น จึงส่งผลให้น้ำหนักหลังการอบมีค่าเฉลี่ยน้ำหนักที่หายไปเพิ่มขึ้น อีกทั้งยังพบว่าปริมาตร และปริมาตรจำเพาะของชิ้นขนมมาเดอรินที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วขาวที่แตกต่างกัน 4 ระดับ ได้แก่ ร้อยละ 0 25 50 และ 75 ของน้ำหนักแป้งสาลีในสูตรพื้นฐานมีปริมาตรอยู่ที่ 30.60 32.40 29.40 และ 30.40 มิลลิลิตร ตามลำดับ ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) และมีปริมาตรจำเพาะอยู่ที่ 2.24 2.38 2.18 และ 2.29 มิลลิลิตรต่อกรัม ตามลำดับ ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ($p > 0.05$) นอกจากนี้ยังพบว่าค่าเนื้อสัมผัสของขนมมาเดอริน ที่มีการใช้แป้งถั่วขาวทดแทนแป้งสาลีในปริมาณที่มากขึ้นส่งผลให้มีลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์ในด้านความแข็ง (Hardness) มีค่าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เนื่องจากแป้งสาลีมีปริมาณโปรตีนร้อยละ 10.30 ซึ่งมีไกลอะดิน (Gliadin) และกลูเตนิน (Glutenin) เป็นโปรตีนเมื่อผสมกับน้ำหรือของเหลวอื่น ๆ จะเกิดเป็นกลูเตนที่เป็นคุณสมบัติเฉพาะของแป้งสาลี ทำให้เกิดลักษณะเนื้อสัมผัสที่มีความยืดหยุ่นได้ดีกว่า จึงทำให้ผลิตภัณฑ์มีความแข็งน้อยกว่า [26] ในขณะที่แป้งถั่วขาวมีปริมาณโปรตีนร้อยละ 23.40 ที่มากกว่า แต่ไม่มีคุณสมบัติดังกล่าว โปรตีนที่สูงจะสร้างเมทริกซ์แน่นขึ้น ทำให้แป้งไม่สามารถพองตัวได้เต็มที่ ประกอบกับเส้นใยอาหารในแป้งถั่วขาวที่มาก ทำให้ขนมมาเดอรินที่ใช้แป้งถั่วขาวทดแทนแป้งสาลีในปริมาณที่มากขึ้นมีความแข็งเพิ่มขึ้น ในขณะที่ค่าความยืดหยุ่น (Springiness) พบว่าการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วขาวในระดับการทดแทนที่ต่ำ เนื้อของขนมจะยังคงมีความยืดหยุ่นใกล้เคียงกับสูตรพื้นฐาน แต่เมื่อสัดส่วนแป้งถั่วขาวสูงขึ้น โครงสร้างของกลูเตนที่ลดลง จะส่งผลทำให้ความยืดหยุ่น (Springiness) ของเนื้อขนมลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Güler & Köse [27] และ วิลาวินี และคณะ [21] ที่พบว่าการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งจากถั่วขาวจะส่งผลให้ค่า Springiness ลดลง เมื่อแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วขาวในระดับที่มากขึ้นไป เนื่องจากโครงสร้างกลูเตนที่ลดลง ทำให้เนื้อของผลิตภัณฑ์เกิดการคืนรูปช้าลง และยืดหยุ่นน้อยลง

การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีและฤทธิ์ทางชีวภาพของขนมมาเดอรินทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วขาว พบว่าองค์ประกอบทางเคมีโดยประมาณของขนมมาเดอรินที่ทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วขาวที่แตกต่างกัน 4 ระดับ ได้แก่ ร้อยละ 0 25 50 และ 75 ของน้ำหนักแป้งสาลีในสูตรพื้นฐาน จะมีโปรตีน ใยอาหาร และเถ้า ที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยมีโปรตีนร้อยละ 6.38 7.26 8.34 และ 9.59 ตามลำดับ ใยอาหารร้อยละ 0.41 0.88 1.48 และ 1.92 ตามลำดับ และเถ้าร้อยละ 1.42 1.65 1.96 และ 2.17 ตามลำดับ มีคาร์โบไฮเดรตร้อยละ 49.14 47.61 47.89 และ 45.17 ตามลำดับ ลดลงอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ข้อมูลจากกองโภชนาการ กรมอนามัย กระทรวงสาธารณสุข พบว่าแป้งสาลีมีคาร์โบไฮเดรต โปรตีน ใยอาหาร และเถ้า ร้อยละ 76.30 10.30 2.70 และ 0.60 กรัม ตามลำดับ ในขณะที่แป้งถั่วขาวมีปริมาณคาร์โบไฮเดรต โปรตีน ใยอาหาร และเถ้าร้อยละ 60.30 23.40 15.20 และ 4.20 กรัม ตามลำดับ [11] จะเห็นได้ว่าแป้งถั่วขาวมีปริมาณโปรตีน ใยอาหาร และเถ้ามากกว่าแป้งสาลี แต่มีปริมาณคาร์โบไฮเดรตน้อยกว่าแป้งสาลี ด้วยเหตุนี้การทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วขาวในระดับที่เพิ่มขึ้น ส่งผลให้ขนมมาเดอรินทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วขาวมีปริมาณโปรตีน ใยอาหาร และเถ้าที่เพิ่มขึ้น คาร์โบไฮเดรตลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Hoxha และคณะ [28] และ Movahhed และคณะ [29] ที่กล่าวว่าการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วขาวในขนมปัง จะช่วยเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการ โดยเฉพาะในด้านโปรตีน ใยอาหาร และแร่ธาตุของขนมปังเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ อีกทั้งยังช่วยลดปริมาณคาร์โบไฮเดรต ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อผู้บริโภคที่ต้องการ

ควบคุมระดับน้ำตาลในเลือด และเพิ่มการบริโภคโยอาหารอีกด้วย นอกจากนี้ยังพบอีกว่าขนมมาเดอลีนที่มีการใช้แป้งถั่วขาวทดแทนแป้งสาลีในสัดส่วนร้อยละ 50 ไม่แสดงประสิทธิภาพในการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (α -amylase) จากงานวิจัยของ Maghsoudi และคณะ [30] พบว่าหลังการสัมผัสความร้อนที่อุณหภูมิ 70 °C 30 นาที การยับยั้งการทำงานของเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (α -amylase) ลดลงอย่างมากเหลือเพียงร้อยละ 20 และที่อุณหภูมิมากกว่า 70 °C เป็นเวลา 30 นาที จะเป็นอุณหภูมิที่ยับยั้งการทำงานของเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (α -amylase) ถูกทำลายหมดแล้ว ดังนั้นขนมมาเดอลีนที่ใช้ความร้อนอุณหภูมิในการอบถึง 180 °C เป็นสาเหตุให้สารออกฤทธิ์ในถั่วขาวเกิดการสูญเสียประสิทธิภาพระหว่างกระบวนการผลิต สอดคล้องกับผลการศึกษาของ Oboh และคณะ [31] และ Wang และคณะ [32] ที่รายงานว่าโปรตีนยับยั้งเอนไซม์ α -amylase (α -amylase inhibitor; α -AI) ซึ่งพบมากในถั่วขาว (*Phaseolus vulgaris*) เป็นโปรตีนที่มีโครงสร้างจำเพาะ สามารถจับกับเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (α -amylase) ในระบบทางเดินอาหาร ทำให้กระบวนการย่อยสลายแบ่งไปเป็นกลูโคสช้าลง และส่งผลให้ระดับกลูโคสหลังมื้ออาหารเพิ่มขึ้นอย่างค่อยเป็นค่อยไป อย่างไรก็ตามการปรุงด้วยความร้อน เช่น การต้ม (boiling), การอัดความดัน (autoclaving) หรือการอบ (baking) ทำให้โปรตีนเกิดการเสียสภาพ (denaturation) และสูญเสียโครงสร้างการทำงานที่จำเป็นต่อการยับยั้งเอนไซม์ ส่งผลให้ฤทธิ์ยับยั้งลดลงอย่างมีนัยสำคัญ โดยการต้มสามารถทำให้โปรตีนสูญเสียฤทธิ์ไปมากกว่าร้อยละ 80-93 ดังนั้นในผลิตภัณฑ์อาหารที่ผ่านการใช้ความร้อนสูง เช่น ขนมอบ เบเกอรี่ หรืออาหารปรุงสุกทั่วไป ความสามารถในการยับยั้งการทำงานของเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (α -amylase) มักลดลงอย่างมาก

ดังนั้นการทดแทนแป้งสาลีด้วยแป้งถั่วขาวในขนมมาเดอลีนในสัดส่วนร้อยละ 50 จะยังสามารถคงคุณภาพทางประสาทสัมผัสของตัวขนมให้ใกล้เคียงกับสูตรมาตรฐาน และช่วยเพิ่มคุณค่าทางโภชนาการด้านโปรตีน โยอาหาร และแร่ธาตุได้ ซึ่งเป็นประโยชน์ต่อผู้บริโภคที่ต้องการอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการมากขึ้น โดยไม่กระทบต่อปริมาณและปริมาณจำเพาะของผลิตภัณฑ์ อย่างไรก็ตามผลการทดลองพบว่าแป้งถั่วขาวที่ผ่านการอบจะไม่สามารถคงฤทธิ์การยับยั้งเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (α -amylase) ได้ เนื่องจากความร้อนทำให้โปรตีนสูญเสียโครงสร้างการทำงาน

ผลการวิจัยจึงชี้ให้เห็นว่าการใช้แป้งถั่วขาวเป็นแนวทางพัฒนาผลิตภัณฑ์เบเกอรี่เพื่อสุขภาพได้จริง แต่ควรพิจารณาถึงเทคนิคในการผลิตที่จะสามารถรักษาสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพของถั่วขาวเพื่อเพิ่มคุณประโยชน์ทางสุขภาพต่อไปในอนาคต

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสาขาวิชาอาหารและโภชนาการ คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร ที่สนับสนุนสถานที่ในการทดลองงานวิจัยนี้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

1. World Health Organization. Noncommunicable diseases: key facts. [Internet]. 2023 [cited 2025 Oct 25]. Available from: <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/noncommunicable-diseases>
2. กรมอนามัย. รายงานสถานการณ์โรคไม่ติดต่อเรื้อรังของประเทศไทย พ.ศ. 2566. กรุงเทพฯ: กระทรวงสาธารณสุข; 2566.
3. Jenkins DJ, Wolever TM, Taylor RH, Barker H, Fielden H, Baldwin JM, et al. Glycemic index of foods: a physiological basis for carbohydrate exchange. Am J Clin Nutr 1981;34(3):362-6.
4. Atkinson FS, Brand-Miller JC, Foster-Powell K, Buyken AE, Goletzke J. International tables of glycemic index and glycemic load values 2021: a systematic review. Am J Clin Nutr 2021;114(5):1625-32.
5. Brand-Miller JC, Holt SHA, Pawlak DB, McMillan J. Glycemic index and obesity. Am J Clin Nutr 2002;76(1):281S-5S.



6. Te Morenga L, Mallard S, Mann J. Dietary sugars and body weight: systematic review and meta-analyses of randomised controlled trials and cohort studies. *BMJ* 2013;346:e7492.
7. Malik VS, Schulze MB, Hu FB. Intake of sugar-sweetened beverages and weight gain: a systematic review. *Am J Clin Nutr* 2010;89(4): 1034-41.
8. Mohan V, Spiegelman D, Sudha V, Gayathri R, Hong B, Praseena K, et al. Effect of brown rice, white rice, and brown rice with legumes on blood glucose and insulin responses in overweight Asian Indians: a randomized controlled trial. *Diabetes technology & therapeutics* 2014;16(5):317-25.
9. Nolan R, Shannon OM, Robinson N, Joel A, Houghton D, Malcomson FC. It's no has bean: a review of the effects of white kidney bean extract on body composition and metabolic health. *Nutrients* 2020;12(5):1398.
10. Celleno L, Tolaini MV, D'Amore A, Perricone NV, Preuss HG. A dietary supplement containing standardized *Phaseolus vulgaris* extract influences body composition of overweight men and women. *Int J Med Sci* 2007;4(1):45-52.
11. Barrett ML, Udani JK. A proprietary alpha-amylase inhibitor from white bean (*Phaseolus vulgaris*): a review of clinical studies on weight loss and glycemic control. *Nutr J* 2011;10(1):24
12. พรทิพย์ วิริยะวัฒนา, เตือนฉาย ตันนารัตน์. การพัฒนาผลิตภัณฑ์เวจเจี้ยนักเก็ตเพื่อสุขภาพจากถั่วขาว (*Phaseolus vulgaris* L.). วารสารมหาวิทยาลัยคริสเตียน 2564;27(4):1-15.
13. เจตนิพัทธ์ บุญยสวัสดิ์. การผลิตเบเกอรี่. กรุงเทพฯ: โอ.เอส. พรีนตติ้ง เฮาส์: 2561.
14. AACC. Approved Method of the American Association of Cereal Chemists. 8th ed. St Paul MN: The American Association of Cereal Chemists; 2000.
15. Bourne MC. Texture profile analysis. *Food Technol* 1978;32(7):62-6.
16. Casas Moreno MM, Barreto-Palacios V, Gonzalez-Carrascosa R, Iborra-Bernad C, Andres-Belloa A, Martinez-Monzó J, et al. Evaluation of textural and sensory properties on typical Spanish small cakes designed using alternative flours. *J Culin Sci Technol* 2015;13(1):19-28.
17. Stable Micro Systems. Texture profile analysis: application note and user manual [Internet]. 2024 [cited 2025 Oct 25]. Available from: <https://www.stablemicrosystems.com>
18. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Food energy – methods of analysis and conversion factors: report of a technical workshop. Rome: FAO; 2003.
19. AOAC International. Official methods of analysis of AOAC International. 20th ed. Rockville MD: AOAC International; 2016.
20. ผ่องศรีกุล อิศรา. การวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปสำหรับอุตสาหกรรมเกษตร. พิมพ์ครั้งที่ 3. เชียงใหม่: ภาควิชาเทคโนโลยีการพัฒนาลิขสิทธิ์ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเชียงใหม่; 2545.
21. วิลาสินี มีมุข, ระพี กาญจนะ, อรุณรักษ์ อุปลัมภานนท์. การพัฒนาผลิตภัณฑ์ขนมแป้งเสริมแป้งถั่วขาวโดยประยุกต์ใช้เทคนิคการออกแบบทดลอง. วารสารวิศวกรรมศาสตร์ ราชชมงคลธัญบุรี 2555;10(2):13-21.
22. เนตรนรินทร์ สุวรรณเดช, รัชมี พันธศรี, ธนวัฒน์ นกหงส์, วุฒิชัย ดวงจันทร์, ผกาวดี เอี่ยมกำแพง, ไสร์จรรย์ อิ่มเกตุ. การใช้แป้งถั่วขาวทดแทนแป้งข้าวเจ้าในผลิตภัณฑ์ขนมชั้น. ใน: เอกสารประกอบการประชุมวิชาการระดับชาติ SAC ครั้งที่ 2 วันที่ 13 กุมภาพันธ์ 2561. มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม. พิษณุโลก; 2561. หน้า 208-17.



23. Han X, Zheng M, Chen C, Wang S, Guo J, Wang J, et al. Effect of White Kidney Bean (*Phaseolus vulgaris* L.) Flour on the Rheological Properties and Starch Digestion Characteristics of Noodles. *Foods* 2022;11(22):3680.
24. Marquezi M, Gervin VM, Watanabe LB, Bassinello PZ, Amante ER. Physical and chemical properties of starch and flour from different common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars. *Braz J Food Technol* 2016;19:e2015088.
25. Codex Alimentarius Commission. Standard for wheat flour (CODEX STAN 152-1985). Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations/World Health Organization; 1985.
26. Yodmanee S, Karrila TT, Pakdeechanuan P. Physical, chemical and antioxidant properties of pigmented rice grown in Southern Thailand. *Int Food Res J* 2011;18(3):901-6.
27. Güler S, Köse E. The Impact of Flour from White Bean (*Phaseolus vulgaris*) on Rheological, Qualitative and Nutritional Properties of the Bread. *Food Nutr Sci* 2020;11:146–61.
28. Hoxha I, Xhabiri G, Deliu R. The Impact of Flour from White Bean (*Phaseolus vulgaris*) on Rheological, Qualitative and Nutritional Properties of the Bread. *Open Access Library Journal* 2020;7:e6059.
29. Ramezani S, Movahhed S, Rajaei P. Effect of additional white bean flour on chemical and staling properties of Iranian Barbari bread. *Ann Biol Res* 2013;4(3):109-12.
30. Maghsoudi S, Khodarahmi R, Zare H. Isolation and comparative characterization of α -amylase inhibitor from white common bean (*Phaseolus vulgaris*). *J Reports in Pharmaceutical Sciences* 2015;4(2):181-90.
31. Oboh HA, Muzquiz M, Burbano C, Cuadrado C, Pedrosa MM, Ayet G, et al. Effect of soaking, cooking and germination on the oligosaccharide and antinutritional factor contents of selected Nigerian legume seeds. *Plant Foods Hum Nutr* 2000;55(2):97–110.
32. Wang N, Hatcher DW, Tyler RT, Toews R, Gawalko EJ. Effect of cooking on the composition of beans (*Phaseolus vulgaris* L.) and chickpeas (*Cicer arietinum* L.). *Food Res Int* 2010;43(2):589-94.



คำแนะนำในการเตรียมต้นฉบับบทความเพื่อตีพิมพ์ใน วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ

(Huachiew Chalermprakit Science and Technology Journal)

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ เป็นสื่อกลางในการเผยแพร่ผลงานวิชาการทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 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 ซึ่งจะรับพิจารณาตีพิมพ์ผลงานวิชาการทั้งจากบุคคลภายในและภายนอกมหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ

หลักเกณฑ์การพิจารณาบทความ

บทความที่ส่งมาพิจารณาควรมีคุณค่าทางวิชาการ โดยผู้เขียนเป็นผู้ทำการทดลอง สร้างสรรค์ หรือเกี่ยวข้องกับงาน โดยปราศจากการคัดลอกผลงานวิจัยหรือบทความของผู้อื่นนำเสนอถึงแนวความคิดหรือหลักการใหม่ที่เป็นไปได้ซึ่งสอดคล้องกับทฤษฎี และนำไปสู่การพัฒนาหรือเป็นประโยชน์ต่อการศึกษาและการวิจัย มีความสมบูรณ์ในเนื้อหา ภาษา ตลอดจนความชัดเจนของสมมติฐานหรือวัตถุประสงค์

บทความจะได้รับการประเมินจากผู้ทรงคุณวุฒิผู้เชี่ยวชาญในสาขาวิชานั้น ๆ จำนวน 3 คน ซึ่งกองบรรณาธิการสงวนสิทธิ์ในการตรวจแก้ไขบทความ และอาจส่งกลับคืนให้ผู้เขียนแก้ไขเพิ่มเติมหรือพิมพ์ต้นฉบับใหม่ แล้วแต่กรณี เพื่อปรับปรุงบทความให้สมบูรณ์ยิ่งขึ้นก่อนการตีพิมพ์ ทั้งนี้ต้นฉบับที่ถูกต้องตามหลักเกณฑ์ของการเขียนที่กำหนดเท่านั้นจึงจะได้รับการพิจารณา และดำเนินการประเมินบทความก่อนการตีพิมพ์

การยอมรับบทความที่จะตีพิมพ์เป็นสิทธิของกองบรรณาธิการ และกองบรรณาธิการไม่รับผิดชอบความถูกต้องของเนื้อหา หรือความถูกต้องของบทความที่ส่งมาตีพิมพ์ทุกเรื่อง

ข้อกำหนดทั่วไปของการพิมพ์บทความ

1. พิมพ์ด้วยโปรแกรม Microsoft Word for Windows
2. พิมพ์บนกระดาษ A4 หนึ่งหน้าเดียว โดยมีระยะห่างจากขอบกระดาษด้านละ 1 นิ้ว (2.54 เซนติเมตร) และจัดพิมพ์เป็น 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	ตัวปกติ	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
- 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)

- **บทนำ** นำเสนอความสำคัญหรือที่มาของปัญหาวิจัย สาระสำคัญจากงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และสำหรับวัตถุประสงค์ของการวิจัยให้นำเสนอไว้ตอนท้ายของบทนำ
- **วิธีดำเนินการวิจัย** นำเสนอรายละเอียดที่เป็นของการทดลองและการวิเคราะห์ข้อมูล
- **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

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 ระบุลำดับที่ของรูปภาพ โดยใช้คำว่า “ภาพที่.....” (Figure.....) และคำบรรยายใต้ภาพอยู่ส่วนล่างกึ่งกลางของภาพ ส่วนที่เป็นสัญลักษณ์ให้นำเสนอในส่วนของคำบรรยายใต้ภาพ พร้อมทั้งแนบไฟล์รูปภาพที่ประกอบในเนื้อหาร่วมกับไฟล์เอกสารปกติดด้วย

ตาราง

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

การเขียนเอกสารอ้างอิง

1. การอ้างอิงในเนื้อหา

การอ้างอิงในเนื้อหาใช้ระบบ Vancouver style ให้อ้างเลขลำดับที่ที่กำกับชื่อผู้แต่ง โดยระบุเลขลำดับที่ไว้ในวงเล็บท้ายข้อความตามลำดับการอ้างอิงก่อน-หลัง เช่น จิราวรรณ และคณะ [1] พบว่า *Geobacillus stearothermophilus* PTL38 ผลิตภัณฑ์เอนไซม์ไลเปสที่สามารถทำงานได้ดีที่ค่าพีเอชเท่ากับ 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 ปิยะโชคณากุล. 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. ชื่อวารสาร. ปีที่พิมพ์. ปีที่ (ฉบับที่): หน้า.

1. วรางคณา วิเศษมณี, กาญจนา หิรัญเพ็ง. 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: ชื่อคณะกรรมการ, editors. ชื่อเอกสารรายงานการสัมมนา วันที่ เดือน ปี; เมืองที่สัมมนา, ประเทศ. เมืองที่พิมพ์: สำนักพิมพ์; ปีที่พิมพ์. หน้า.

1. วรณา ศักดิ์สงส์, หิรัญญา จันทร์เกลี้ยง, 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. มาลาเรียลาม 3 จว.ได้ตอบนบ 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 ของเว็บไซต์
ที่อ้างอิงข้อมูลสืบค้น



1. ชีรเกียรติ 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. เอกสารแสดงผลการตรวจการลอกวรรณกรรม (Plagiarism checking report) เช่น ระบบตรวจสอบอักขระวิสุทธิ และ

Turnitin

5. เอกสารการขอจริยธรรมงานวิจัย (โดยเฉพาะงานวิจัยที่เกี่ยวข้องกับการทดสอบในคนและสัตว์ทดลอง)

ทั้งนี้หากพบปัญหาในการส่งเอกสารแบบออนไลน์ โปรดติดต่อสอบถามมายังกองบรรณาธิการวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ

การติดต่อสอบถามข้อมูล

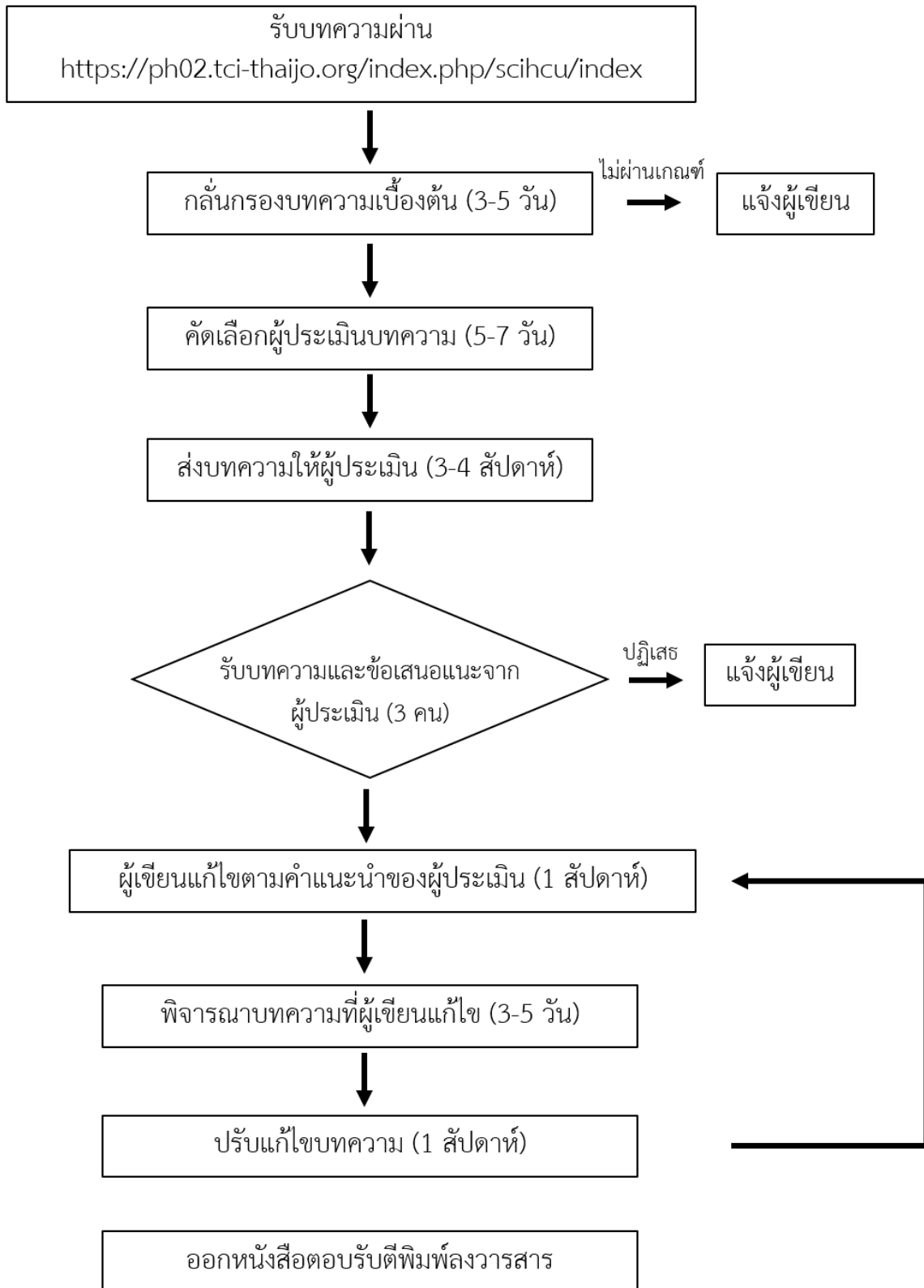
สามารถติดต่อสอบถามข้อมูลได้ที่ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ เลขที่ 18/18 ถนนเทพรัตน กม.18 ตำบลบางโฉลง อำเภอบางพลี สมุทรปราการ 10540 โทรศัพท์ 02-312-6300 ต่อ 1180, 1213 โทรศัพท์มือถือ 084-9091766 อีเมล hcujournal.sci@gmail.com



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



ขั้นตอนการส่งบทความลงวารสาร
วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ





แบบเสนอบทความเพื่อพิจารณาตีพิมพ์ใน
วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ
(Huachiew Chalermprakiet 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

โดยบทความนี้ยังไม่ได้เคยได้รับการตีพิมพ์และไม่ได้อยู่ระหว่างการพิจารณาตีพิมพ์ในวารสารอื่นใด ข้าพเจ้าและผู้เขียนร่วมยอมรับหลักเกณฑ์การพิจารณาต้นฉบับ ทั้งยินยอมให้กองบรรณาธิการมีสิทธิ์พิจารณาและตรวจแก้ไขต้นฉบับได้ตามที่เห็นสมควร พร้อมทั้งมอบลิขสิทธิ์บทความที่ได้รับการตีพิมพ์ให้แก่คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ 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