



วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ Huachiew Chalermprakiet Science and Technology Journal

เรียนรู้เพื่อรับใช้สังคม

ปีที่ 10 ฉบับที่ 1 มกราคม-มิถุนายน 2567

ISSN 2985-1653 (Online)

Volume 10 No.1 January-June 2024



บทความวิจัย

- ผลของเอนไซม์ แอลฟา-อะไมเลส อัลคาเลส และอะไมโลกลูโคซิเดสต่อการสกัดเส้นใยอาหารจากหน่อไม้ฝรั่งเศษเหลือ
- การผลิตเชื้อเพลิงขยะจากขยะพลาสติกภายในมหาวิทยาลัย
- การหาปริมาณซัลไฟด์เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบผลิตแก๊สชีวภาพ
- การวิเคราะห์ปริมาณรูตินในน้ำผลไม้ด้วยการตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้าโดยใช้ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนไส้ดินสอที่ดัดแปรด้วยอนุภาคทอง
- ฤทธิ์ต้านอักเสบและความเป็นพิษของสารสกัดใบลำพูและลำแพนต่อเซลล์มะเร็งเม็ดเลือดขาวเพาะเลี้ยง
- ผลของการสวมหน้ากากอนามัยที่มีต่อตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ SEIR สำหรับการแพร่ระบาดของโรคไข้หวัดใหญ่ตามฤดูกาลในกรุงเทพมหานคร
- การศึกษาประสิทธิภาพของการรักษาภาวะเสื่อมสมรรถภาพทางเพศด้วยการฝังเข็ม

บทความวิชาการ

- การเตรียมโปรตีนไฮโดรไลเสตจากสาหร่ายสไปรูลีนาและคุณสมบัติเชิงหน้าที่



วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ

ปีที่ 10 ฉบับที่ 1 มกราคม - มิถุนายน 2567

ISSN 2985-1653 (Online)

วัตถุประสงค์

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

กำหนดเผยแพร่ ปีละ 2 ฉบับ

ฉบับที่ 1 มกราคม-มิถุนายน

ฉบับที่ 2 กรกฎาคม-ธันวาคม

เจ้าของ

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ

ที่ปรึกษา

รองศาสตราจารย์ ดร.อุไรพรรณ เจนวาณิชยานนท์

อาจารย์ ดร.จำรูญศรี พุ่มเทียน

หัวหน้ากองบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรสิริ วนรัฐกุล

รองหัวหน้ากองบรรณาธิการ

อาจารย์ ดร.สุกัญญา เพชรศิริเวทย์

กองบรรณาธิการ

รองศาสตราจารย์ ดร.บังอร ฉางทรัพย์

มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ

รองศาสตราจารย์ ดร.ประยูรศักดิ์ เปลื้องผล

มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ

อาจารย์ ดร.สุรีย์พร หอมวิเศษวงศา

มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ

อาจารย์ ดร.ชัชวาลย์ ช่างทำ

มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ

อาจารย์ ดร.นพมาศ อัครจันทโชติ

มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ

ศาสตราจารย์ ดร.อภิชาติ สุขสำราญ

มหาวิทยาลัยรามคำแหง

ศาสตราจารย์ ดร.ศิริรัตน์ เร่งพิพัฒน์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศาสตราจารย์ ดร.อรรพวรรณ ชัยลภากุล

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ศาสตราจารย์ ดร.พีรพรรณ ตันอารีย์

มหาวิทยาลัยมหิดล

ศาสตราจารย์ ดร.โกสุม จันทศิริ

มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ

ศาสตราจารย์ ดร.อรสา สุตเธียรกุล

มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์

ศาสตราจารย์ ดร.วราวุฒิ ครูส่ง

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง



ศาสตราจารย์ ดร.วิไล รังสาดทอง
รองศาสตราจารย์ ดร.วิมลยุตต์ วรรณสว่าง
รองศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ ภาวนันต์
รองศาสตราจารย์ ดร.จันทร์เพ็ญ วิวัฒน์
รองศาสตราจารย์ ดร.เบญจภรณ์ ประภักดี
รองศาสตราจารย์ ดร.สิริธร สโมสร
รองศาสตราจารย์ ดร.สมฤดี สายหยุดทอง
รองศาสตราจารย์ ดร.มาลินี พงศ์เสวี
รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติพงศ์ ไชยนอก
รองศาสตราจารย์ ดร.กิตติการ สายธนู
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
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
สถาบันวิทยสิริเมธี
มหาวิทยาลัยมหิดล
มหาวิทยาลัยมหิดล
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
มหาวิทยาลัยศรีนครินทรวิโรฒ
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
มหาวิทยาลัยบูรพา
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 วนรัฐกาล

คุณอริศรา สิทธิพงษ์

ฝ่ายสมาชิการสารและประชาสัมพันธ์

อาจารย์ตติภรณ์ ภัทรานุรักษ์โยธิน

เลขานุการกองบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กรรณิการ์ แก้วกิม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์จันทเพ็ญ 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.ปรินทร์ ชัยวิสุทธางกูร	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 เศรษฐสุเสถียร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.วีไลลักษณ์ ศิริพรอดุลศิลป์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.พรพรม ย่อยสูงเนิน	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.ภทวรรณ แสงนวกิจ	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.อรพินท์ จินตสถาพร	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.อริชัญญ์ กุมพล	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รองศาสตราจารย์ ดร.วิจิตรา เตือนฉาย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.วิราวรรณ ชินวิริยสิทธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.มนฤดี ผ่องอักษร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.ชานนท์ พรหมสกล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
รองศาสตราจารย์ ดร.อัชมา อระวีพร	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.นพรัตน์ โพธิ์ชัย	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริพร จำเนียรสวัสดิ์	มหาวิทยาลัยบูรพา
รองศาสตราจารย์ พรณิภา ศิริเพิ่มพูล	มหาวิทยาลัยบูรพา
รองศาสตราจารย์ ดร.รัชฎาพร อนุศิริไธ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รองศาสตราจารย์ ดร.กรรณิการ์ ขำพึงสน	มหาวิทยาลัยพะเยา
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิโรจน์ บุญรัตนกรกิจ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิราพรพรรณ สุนทรโชติ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพจน์ กนกกันขพงษ์	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภก.วีรวัฒน์ ตีระชัยดีกุล	มหาวิทยาลัยมหิดล
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุศราภา ลีละวัฒน์	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภารดี แสงวัฒนกุล	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ทิวธวัฒน์ นาพิรุณ	มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริญดา เพ็ญโรจน์	มหาวิทยาลัยศิลปากร



ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จิตศิริ ราชตะนัพันธ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เยาวภา อร่ามศิริจุเวทย์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กนิษฐพร วังโน	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กฤษมกล ณ จอม	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุวิมล เจริญสิทธิ์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภาวิณี อารีศรีสม	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.แสงอรุณ อิศระมัลย์	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นราทิพย์ จันสกุล	มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พัชรินทร์ ชัยสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัชฎาพร อุ่นศิริไย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ ปันรัตน์	มหาวิทยาลัยรามคำแหง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สาวิตรี เจียมพานิชยกุล	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐจิรา อินตะใส	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ศรัณย์ อินทโกสุม	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สมพิศ สอนโยธา	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนากานต์ เกียรติอร่ามกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จรัญ แสนราช	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิษฎา สวัสดิ์	มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณพัชร บัวฉุน	มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐินี ดีแท้	มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภาพร มัชฌิมะปุระ	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นุชนาถ แซ่มซ้อย	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เกรียงศักดิ์ เตมีย์	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภาพร แนวบุตร	มหาวิทยาลัยนเรศวร
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เหมือนหมาย อภินทนาพงศ์	มหาวิทยาลัยหอการค้าไทย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรวัฒน์ พรหมเด่น	มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ สุวรรณา จันคณา	มหาวิทยาลัยราชภัฏบุรีรัมย์
อาจารย์ ดร.พจ.พินันท์ พัฒนมงคล	มหาวิทยาลัยแม่ฟ้าหลวง
อาจารย์ ดร.เฉลิมขวัญ รุ่งสว่าง	มหาวิทยาลัยสยาม
อาจารย์ พจ.รัชนิกร สิมมาอ่อน	มหาวิทยาลัยราชภัฏสวนสุนันทา
ดร.นันทน์ภัส ลายทิพย์	สถาบันมาตรวิทยาแห่งชาติ

ผู้ทรงคุณวุฒิกลั่นกรองบทความภายใน

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กิตติพัฒน์ โสภิตธรรมคุณ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กรรณิการ์ แก้วกิม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อัญชลี ชุ่มบัวทอง
อาจารย์ ดร.มธุรส อ่อนไทย



บรรณาธิการแถลง

วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ ในฐานะเป็นสื่อกลางสำคัญในการแลกเปลี่ยนความรู้ทางด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี รวมทั้งเผยแพร่บทความวิจัย บทความวิชาการของคณาจารย์ นักศึกษา นักวิจัย และนักวิชาการ เพื่อก่อให้เกิดการสร้างสรรค์ผลงานวิชาการทั้งทางด้านการศึกษาและการวิจัยให้ก้าวหน้าต่อไป วารสารฉบับนี้เป็นฉบับที่ 1 ของปี พ.ศ. 2567 (มกราคม - มิถุนายน) ซึ่งเป็นปีที่ 10 ของการดำเนินงานวารสาร ประกอบด้วยบทความวิจัยจำนวน 8 เรื่อง ประกอบด้วยบทความวิจัย 7 เรื่อง และบทความวิชาการ 1 เรื่อง ซึ่งบทความเหล่านี้ได้ผ่านกระบวนการกลั่นกรองทางวิชาการจากผู้ทรงคุณวุฒิในแต่ละสาขาวิชา เพื่อให้ได้คุณภาพและถูกต้องทางวิชาการ ตามเกณฑ์มาตรฐานของศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (Thai Journal Citation Index-TCI) โดยวารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ ได้ผ่านการรับรองคุณภาพอยู่ในฐานข้อมูล TCI กลุ่มที่ 1 จากการประเมินคุณภาพวารสารวิชาการที่อยู่ในฐานข้อมูล TCI รอบที่ 4 พ.ศ. 2563-2567 ครั้งที่ 2 (2564-2567)

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

กองบรรณาธิการหวังเป็นอย่างยิ่งว่าวารสารฉบับนี้จะก่อให้เกิดประโยชน์ต่อผู้อ่านและผู้สนใจ เพื่อนำประโยชน์ไปใช้ในการอ้างอิง พัฒนางานวิจัย ตลอดจนสามารถนำมาปรับปรุงเพื่อนำไปใช้ประโยชน์ในชีวิตประจำวัน ทั้งนี้กองบรรณาธิการใคร่ขอเชิญชวนท่านผู้สนใจส่งบทความมาตีพิมพ์ที่วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ โดยสามารถส่งต้นฉบับตามรายละเอียดในท้ายเล่มนี้ หวังเป็นอย่างยิ่งว่าจะได้รับความอนุเคราะห์จากท่าน ขอขอบคุณมา ณ โอกาสนี้

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พรสิริ วนรัฐกาล

หัวหน้ากองบรรณาธิการ



สารบัญ

บทความวิจัย	หน้า
● ผลของเอนไซม์ แอลฟา-อะไมเลส อัลคาเลส และอะไมโลกลูโคซิเดสต่อการสกัดเส้นใยอาหาร..... จากหน่อไม้ฝรั่งเศษเหลือ Effect of α -amylase, Alcalase and Amyloglucosidase on Dietary Fiber Extraction from Asparagus by-products เรวดี มีสตัย์ ภัทรวดี จ้อยสระคู และ ยุทธศักดิ์ สุกการี	1
● การผลิตเชื้อเพลิงขยะจากขยะพลาสติกภายในมหาวิทยาลัย..... Production of Refuse Derived Fuel from Plastic Waste within University ธรรพร บุศย์น้ำเพชร และ นิพนธ์ ต้นไพบูลย์กุล	14
● การหาปริมาณซัลไฟด์เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบผลิตแก๊สชีวภาพ..... Analysis of Sulfide Content for the Enhancement of Biogas Production System พัชรี อินธนู และ ณัฐวรรณ สืบนันตา	29
● การวิเคราะห์ปริมาณรูตินในน้ำผลไม้ด้วยการตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้าโดยใช้ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนไส้ดินสอด ที่ดัดแปรด้วยอนุภาคทอง Determination of Rutin in Fruit Juice by Electrochemical Detection Using a Gold Particle-Modified Pencil Carbon Electrode จุฬามาศ มนต์เดช กุลวดี ปิ่นวัฒนะ อนุรักษ จิตต์บึงพร้าว ธาณินทร์ แดงกวารัมย์ และ อัญญา ปรีชาวรรณ	44
●ฤทธิ์ต้านอักเสบและความเป็นพิษของสารสกัดใบลำพูและลำแพนต่อเซลล์มะเร็งเม็ดเลือดขาวเพาะเลี้ยง..... Anti-inflammation Activities and Cytotoxicity of <i>Sonneratia caseolaris</i> (L) (Lamphu) and <i>Sonneratia ovata</i> (Lampan) leaves Extracts on Leukemic Cell สุวรรณา เสมศรี และ สุรีย์พร หอมวิเศษวงศา	57
● ผลของการสวมหน้ากากอนามัยที่มีต่อตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ SEIR สำหรับการแพร่ระบาดของโรคไข้หวัดใหญ่..... ตามฤดูกาลในกรุงเทพมหานคร The Effect of Mask-Wearing on the SEIR Mathematical Model of Influenza with Seasons in Bangkok จุฑารัตน์ โพธิ์หลวง และ ณัฐกาญจน์ นำพันธุ์วิวัฒน์	83
● การศึกษาประสิทธิผลของการรักษาภาวะเสื่อมสมรรถภาพทางเพศด้วยการฝังเข็ม..... The Efficacy of Acupuncture in Erectile Dysfunction ธนกร ขาญนวงศ์ จิตติกร พิมลเศรษฐพันธ์ และ เสาวลักษณ์ มีศิลป์	94
บทความวิชาการ	
● การเตรียมโปรตีนไฮโดรไลเสตจากสาหร่ายสไปรูลีนาและคุณสมบัติเชิงหน้าที่..... Preparation of Protein Hydrolysates from <i>Spirulina</i> and Their Functional Properties สุพรรณิ เบเชกู และ วนิดา ปานอุทัย	68



ผลของเอนไซม์ แอลฟา-อะไมเลส อัลคาเลส และอะไมโลกลูโคซิเดส

ต่อการสกัดเส้นใยอาหารจากหน่อไม้ฝรั่งเศษเหลือ

Effect of α -amylase, Alcalase and Amyloglucosidase on Dietary Fiber Extraction from Asparagus by-products

เรวดี มีสตัย* ภัทรวดี จ้อยสระคู และ ยุทธศักดิ์ สุกการี

ศูนย์เชี่ยวชาญนวัตกรรมอาหารสุขภาพ (ศนอ.) สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งประเทศไทย (วว.)

ปทุมธานี 12120

Rewadee Meesat*, Phattarawadee Joysakoo, and Yuttasak Subkaree

Expert Centre of Innovative Health Food (InnoFood), Thailand Institute of Scientific and Technological

Research (TISTR), Pathum Thani 12120

*Corresponding author: Rewadee@tistr.or.th

Received: 27 September 2023/ Revised: 12 January 2024/ Accepted: 19 January 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส อัลคาเลส และ อะไมโลกลูโคซิเดสต่อการสกัดเส้นใยอาหารจากหน่อไม้ฝรั่งเศษเหลือ (Asparagus by-product) จากการศึกษาพบว่า การเพิ่มปริมาณเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส อัลคาเลส และ อะไมโลกลูโคซิเดสไม่สามารถเพิ่มปริมาณเส้นใยอาหาร และไม่มีผลต่อคุณสมบัติของเส้นใยอาหารเชิงหน้าที่ในการอุ้มน้ำ อุ้มน้ำมัน การพองตัว และการละลายน้ำได้อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) นอกจากนั้นการสกัดด้วยเอนไซม์ทั้งสามชนิดให้ปริมาณเส้นใยอาหารไม่แตกต่างจากการสกัดโดยไม่ใช้เอนไซม์ แต่การสกัดด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสและอัลคาเลส จะให้เส้นใยอาหารที่มีคุณสมบัติเชิงหน้าที่ในการอุ้มน้ำ อุ้มน้ำมัน และการพองตัวสูงกว่าการสกัดโดยไม่ใช้เอนไซม์อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) ยกเว้นการสกัดด้วยเอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดสที่ให้คุณสมบัติเชิงหน้าที่ไม่แตกต่างจากการสกัดโดยไม่ใช้เอนไซม์ การสกัดเส้นใยอาหารด้วยวิธีการใช้และไม่ใช้เอนไซม์จะให้ปริมาณเส้นใยอาหารทั้งหมด และคุณสมบัติเชิงหน้าที่ในการอุ้มน้ำและอุ้มน้ำมันสูงกว่าวัตถุดิบหน่อไม้ฝรั่งเศษเหลือเริ่มต้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) โดยวัตถุดิบหน่อไม้ฝรั่งเศษเหลือเริ่มต้นมีปริมาณเส้นใยอาหารทั้งหมดร้อยละ 62.4 – 66.9 โดยน้ำหนัก จะเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 74.7 – 86.8 โดยน้ำหนัก หลังผ่านการสกัด ส่งผลให้เส้นใยอาหารที่ได้มีคุณสมบัติเชิงหน้าที่ในการอุ้มน้ำเพิ่มขึ้นจาก 5.6 – 6.3 กรัม/น้ำต่อกรัมเส้นใย เป็น 7.3 – 8.8 กรัม/น้ำต่อกรัมเส้นใย และคุณสมบัติในการอุ้มน้ำมันเพิ่มขึ้นจาก 1.4 – 1.9 กรัม/น้ำมันต่อกรัมเส้นใย เป็น 4.0 – 5.7 กรัม/น้ำมันต่อกรัมเส้นใย ผลนี้แสดงให้เห็นว่าชนิดของเอนไซม์มีผลต่อคุณสมบัติเชิงหน้าที่ในการอุ้มน้ำ อุ้มน้ำมัน และการพองตัวของเส้นใยอาหาร และการสกัดมีผลทำให้ได้ปริมาณเส้นใยอาหารและคุณสมบัติเชิงหน้าที่ในการอุ้มน้ำและอุ้มน้ำมันเพิ่มขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุดิบที่ไม่ผ่านการสกัด

คำสำคัญ: เส้นใยอาหาร หน่อไม้ฝรั่งเศษเหลือ การสกัดด้วยเอนไซม์ คุณสมบัติเชิงหน้าที่

Abstract

This research aimed to investigate the effect of α -amylase, alcalase and amyloglucosidase on dietary fiber extraction from asparagus by-product. The results showed that increasing dosage in α -amylase, alcalase and amyloglucosidase did not significantly increase dietary fiber content ($p \leq 0.05$) and did not significantly affect the functional properties of dietary fiber including water holding capacity (WHC), oil holding capacity (OHC), swelling capacity (SC) and water-soluble index (WSI). Moreover, there were no significant differences in dietary fiber content between enzymatic of all enzymes and non-enzymatic extraction. However, the dietary fiber from α -amylase and alcalase extraction had significantly greater WHC, OHC, and SC ($p \leq 0.05$) compared with non-enzymatic extraction, whereas no significant differences were observed from amyloglucosidase extraction. The dietary fiber after enzymatic and non-enzymatic extraction presented a significantly higher content of total dietary fiber (TDF) and functional properties of WHC and OHC ($p \leq 0.05$) than initial asparagus by-products. The TDF content of initial asparagus by-products increased from 62.4 – 66.9 % (w/w) to 74.7 – 86.8 % (w/w) after extraction. The WHC increased from 5.6 – 6.3 to 7.3 – 8.8 g water/g fiber and OHC increased from 1.4 – 1.9 to 4.0 – 5.7 g oil/g fiber. These results indicate that the enzyme type has the effect on the functional properties of WHC, OHC and SC of dietary fiber. In addition, the extraction plays an important role in the increase of TDF content and greater functional properties of WHC and OHC in comparison with non-extraction material.

Keywords: Dietary fibers, asparagus by-product, enzymatic extraction, functional properties

บทนำ

หน่อไม้ฝรั่งเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญและนิยมปลูกกันมากในประเทศไทย เป็นพืชที่มีราคาดี (120 – 140 บาทต่อกิโลกรัม) มีความต้องการในตลาดสูง [1, 2] ปัจจุบันประเทศไทยมีพื้นที่การเพาะปลูกหน่อไม้ฝรั่ง 8,908 ไร่ มีผลผลิตออกสู่ตลาด 8,271 ตันต่อปี [3] อย่างไรก็ตามในระหว่างการผลิตหน่อไม้ฝรั่งจะมีวัสดุเศษเหลือรวมถึงผลผลิตที่ไม่ได้มาตรฐาน (เกรดต่ำ/ตกเกรด) ประมาณร้อยละ 30 – 50 [4] วัสดุเศษเหลือเหล่านี้บางส่วนจะถูกทิ้งเกิดเป็นมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อม และบางส่วนถูกนำไปใช้เป็นอาหารสัตว์และปุ๋ย ทั้งๆ ที่หน่อไม้ฝรั่งเศษเหลือมีสารอาหารและสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพสูง อีกทั้งมีปริมาณเส้นใยอาหารค่อนข้างสูงด้วย โดยหน่อไม้ฝรั่งเศษเหลือมีปริมาณเส้นใยอาหารทั้งหมด (Total dietary fiber) ประมาณร้อยละ 58 – 79 โดยน้ำหนักแห้ง ดังนั้นหน่อไม้ฝรั่งเศษเหลือจึงเป็นวัตถุดิบที่มีความน่าสนใจในการนำมาผลิตเป็นเส้นใยอาหารที่มีมูลค่าสูง โดยเฉพาะเส้นใยอาหารที่มีฤทธิ์ทางชีวภาพ (Bioactive dietary fiber) [4-8]

เส้นใยอาหารเป็นโพลิเมอร์ที่ต้านทานต่อการย่อยด้วยเอนไซม์ในลำไส้เล็ก แต่สามารถหมักได้เล็กน้อยหรือหมักทั้งหมดในลำไส้ใหญ่ เส้นใยอาหารมีคุณสมบัติเชิงหน้าที่ในการอุ้มน้ำและการพองตัวช่วยให้รู้สึกอิ่มนานกว่าปกติทำให้สามารถลดได้ทั้งปริมาณอาหารและพลังงาน ซึ่งจะช่วยลดคอเลสเตอรอล ลดน้ำตาลในเลือด และลดโรคอ้วนได้ อีกทั้งช่วยให้กากอาหารนิ่ม ปริมาตรมาก ขับถ่ายสะดวก ช่วยป้องกันโรคในระบบทางเดินอาหารได้ เส้นใยอาหารมีคุณสมบัติในการอุ้มน้ำมัน ช่วยดึงน้ำมันจากอาหารที่รับประทานด้วยการขับถ่ายซึ่งจะช่วยป้องกันโรคหลอดเลือดและหัวใจ [9]

การสกัดเส้นใยอาหารสามารถทำได้หลายวิธี ไม่ว่าจะเป็น การสกัดด้วยน้ำ (Water extraction) การสกัดด้วยเอทานอล (Ethanol extraction) การสกัดด้วยกรด (Acid extraction) การสกัดด้วยด่าง (Alkaline extraction) และการสกัดด้วยเอนไซม์ (Enzymatic extraction) เป็นต้น [10] อย่างไรก็ตามการสกัดด้วยน้ำ (Water extraction) และการสกัดด้วยเอนไซม์ (Enzymatic extraction) เป็นแนวทางที่ดีและมีศักยภาพ สามารถให้เส้นใยอาหารที่มีความปลอดภัยและมีความ



เหมาะสมต่อการนำไปประยุกต์ใช้เป็นวัสดุเจือปนในอาหาร การสกัดเส้นใยอาหารจากหน่อไม้ด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสร่วมกับโปรติเอสจะให้เส้นใยอาหารที่มีความบริสุทธิ์สูงและมีคุณสมบัติเชิงหน้าที่ดีกว่าการสกัดด้วยน้ำ การสกัดด้วยกรดซิตริก และการสกัดด้วยเอทานอลร่วมกับเบสและกรด ทั้งนี้เพราะการสกัดด้วยเอนไซม์จะให้ปริมาณเส้นใยอาหารละลายน้ำสูงกว่าการสกัดด้วยวิธีอื่นๆ โดยเส้นใยอาหารที่ได้มีปริมาณเส้นใยอาหารละลายน้ำสูงถึงร้อยละ 34.72 มีความสามารถในการอุ้มน้ำและการพองตัว 15.08 กรัม/น้ำต่อกรัมเส้นใย และ 7.23 มิลลิลิตรต่อกรัม ตามลำดับ [10]

อย่างไรก็ตามยังไม่มีรายงานการศึกษาการสกัดเส้นใยอาหารจากหน่อไม้ฝรั่งเศษเหลือด้วยเอนไซม์ วัตถุประสงค์ของหน่อไม้ฝรั่งเศษเหลือนอกจากจะมีปริมาณเส้นใยอาหารสูงแล้วยังมีองค์ประกอบอื่นๆ ด้วย โดยเฉพาะคาร์โบไฮเดรตและโปรตีน [7, 9, 11, 12] การใช้เอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสและอะไมโลกลูโคซิเดสจะช่วยกำจัดคาร์โบไฮเดรตจำพวกแป้ง ส่วนการใช้เอนไซม์อัลคาเลสจะช่วยกำจัดโปรตีนส่งผลให้ได้ปริมาณเส้นใยอาหารที่มีความบริสุทธิ์มากขึ้นและมีคุณสมบัติเชิงหน้าที่ในการอุ้มน้ำและอุ้มน้ำมันดีขึ้น ดังนั้นในงานวิจัยฉบับนี้จะศึกษาผลของเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส อัลคาเลส และอะไมโลกลูโคซิเดส ต่อการสกัดเส้นใยอาหารจากหน่อไม้ฝรั่งเศษเหลือสายพันธุ์ *Asparagus officinalis* L. เพื่อให้ได้เส้นใยอาหารที่มีความบริสุทธิ์สูงขึ้นและมีคุณสมบัติเชิงหน้าที่ในการอุ้มน้ำและอุ้มน้ำมันดีขึ้น สามารถนำไปใช้เป็นวัสดุเจือปนในอาหารและเครื่องสำอาง

วิธีดำเนินการวิจัย

วัตถุดิบและเอนไซม์

วัตถุดิบหน่อไม้ฝรั่งเศษเหลือ (Asparagus by-products) สายพันธุ์ *Asparagus officinalis* L. ได้รับจากกลุ่มเกษตรกรจังหวัดเพชรบูรณ์ ขนาดประมาณ 1 – 15 เซนติเมตร นำไปล้างทำความสะอาดและหั่นเป็นชิ้นขนาดประมาณ 1 – 5 เซนติเมตร จากนั้นนำไปอบแห้งด้วยตู้อบลมร้อน (Memmert, เยอรมัน) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง แล้วบดให้ละเอียดด้วยเครื่องบดสมุนไพร (Spring Green Evolution PG2500, จีน) และร่อนผ่านตะแกรงขนาด 30 เมช (0.60 มิลลิเมตร) ใส่ถุงซิปล็อคและเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิห้อง

เอนไซม์ แอลฟา-อะไมเลส (α -amylase BAN 480L) และ อะไมโลกลูโคซิเดส (Amyloglucosidase AMG® 1100 BG IF) ยี่ห้อ Brenntag ได้รับความอนุเคราะห์จากบริษัท Brenntag Ingredients (Thailand) Public Company Limited สภาวะที่เหมาะสมในการทำงานพีเอช 6.0 – 7.0 อุณหภูมิ 70 – 90 องศาเซลเซียส และ พีเอช 4.5 อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ตามลำดับ เอนไซม์อัลคาเลส (Alcalase 2.4 FG) ยี่ห้อ Brenntag บริษัท Brenntag Ingredients (Thailand) Public Company Limited สภาวะที่เหมาะสมในการทำงานพีเอช 7.0 – 9.0 อุณหภูมิ 30 – 65 องศาเซลเซียส

การสกัดเส้นใยอาหารด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (α -amylase)

นำหน่อไม้ฝรั่งเศษเหลือที่ผ่านการบดและร่อนแยกขนาดเดิม น้ำกลั่นให้ได้อัตราส่วน 1:10 (หน่อไม้ฝรั่งเศษเหลือต่อ น้ำ) ปรับพีเอชเป็น 7.0 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 1.0 นอร์มอล จากนั้นเติมเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (α -amylase BAN 480L) ปริมาณ 0.010, 0.025 และ 0.050 มิลลิลิตรต่อกรัม บ่มที่อุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส ด้วยอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Memmert, เยอรมัน) เป็นระยะเวลา 60 นาที การสกัดโดยไม่ใช้เอนไซม์ (non-enzymatic extraction) ดำเนินการที่พีเอช 7.0 และอุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส กรองตัวอย่างด้วยผ้ากรองโนลอน แล้วนำกากที่เหลือไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง บดให้เป็นผงด้วยเครื่องปั่นผลไม้ (Philips, เนเธอร์แลนด์) นำไปวิเคราะห์ปริมาณเส้นใยอาหาร และคุณสมบัติในการอุ้มน้ำ, อุ้มน้ำมัน, การพองตัว และการละลายน้ำ

การสกัดเส้นใยอาหารด้วยเอนไซม์อัลคาเลส (Alcalase)

ดำเนินการทดลองเช่นเดียวกับข้างต้น แต่ปรับพีเอชเป็น 8.0 และบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เติมเอนไซม์อัลคาเลส (Alcalase 2.4 FG) ปริมาณ 0.025, 0.050 และ 0.100 มิลลิลิตรต่อกรัม การสกัดโดยไม่ใช้เอนไซม์ (non-enzymatic extraction) ดำเนินการที่พีเอช 8.0 และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส



การสกัดเส้นใยอาหารด้วยเอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดส (Amyloglucosidase)

ดำเนินการทดลองเช่นเดียวกับข้างต้น แต่ปรับพีเอชเป็น 4.5 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 1.0 นอร์มอล และบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เติมเอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดส (Amyloglucosidase AMG® 1100 BG IF) ปริมาณ 0.13, 0.27 และ 0.40 มิลลิกรัมต่อกรัม การสกัดโดยไม่ใช้เอนไซม์ (non-enzymatic extraction) ดำเนินการที่พีเอช 4.5 และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

การวิเคราะห์ปริมาณเส้นใยอาหาร (Dietary fiber; DF)

การวิเคราะห์ปริมาณเส้นใยอาหารทั้งหมด (Total dietary fiber; TDF) เส้นใยอาหารไม่ละลายน้ำ (Insoluble dietary fiber; IDF) และเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำ (Soluble dietary fiber; SDF) ดำเนินการด้วยวิธี Enzymatic and gravimetric method ตามวิธีของ Prosky และคณะ [13] โดยใช้ Total Dietary Fiber Assay Kit (TDF-100A) ของบริษัท Megazyme โดยการชั่งตัวอย่างปริมาณ 1.0000 กรัม จากนั้นเติมฟอสเฟตบัพเฟอร์พีเอช 6.0 ปริมาณ 50 มิลลิลิตร แล้วเติมเอนไซม์อะไมเลสปริมาณ 0.1 มิลลิลิตร บ่มที่อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส (Mettler, เยอรมัน) เขย่าทุกๆ 5 นาที เป็นระยะเวลา 30 นาที ทำให้เย็นและปรับพีเอชเป็น 7.5 ด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 0.275 นอร์มอล แล้วเติมเอนไซม์โปรติเอส ปริมาณ 0.1 มิลลิลิตร บ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Mettler, เยอรมัน) เป็นเวลา 30 นาที แล้วปรับพีเอชเป็น 4.0 – 4.6 ด้วยสารละลายกรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 0.325 นอร์มอล แล้วเติมเอนไซม์กลูโคอะไมเลสปริมาณ 0.1 มิลลิลิตร บ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส ในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ (Mettler, เยอรมัน) เป็นเวลา 30 นาที กรองแยกสารละลายด้วยกรวยกรองแก้วที่มีสารช่วยกรอง ของแข็งที่เหลือ (เส้นใยไม่ละลายน้ำ) นำไปล้างด้วยเอทานอลร้อยละ 78 ปริมาณ 20 มิลลิลิตร 3 รอบ ต่อด้วยเอทานอลร้อยละ 95 ปริมาณ 10 มิลลิลิตร 2 รอบ และอะซิโตน 1 รอบ นำไปอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส แล้วชั่งน้ำหนัก และนำของแข็งที่เหลือไปวิเคราะห์ปริมาณโปรตีนและเถ้า สำหรับสารละลายที่กรองแยกได้ (เส้นใยละลายน้ำ) นำมาเติมเอทานอลร้อยละ 95 ปริมาณ 4 เท่าของปริมาตรสารละลาย แล้วบ่มที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส (Mettler, เยอรมัน) เป็นเวลา 60 นาที กรองแยกและทำตามกระบวนการข้างต้น คำนวณปริมาณเส้นใยอาหารทั้งหมด เส้นใยอาหารไม่ละลายน้ำ และเส้นใยอาหารละลายน้ำในรูปร้อยละตามสมการ

$$\text{ปริมาณเส้นใยไม่ละลายน้ำ (\%w/w)} = \frac{(\text{น้ำหนักเส้นใยไม่ละลายน้ำหลังอบ} - \text{โปรตีน} - \text{เถ้า}) \times 100}{\text{ตัวอย่างแห้ง (กรัม)}}$$

$$\text{ปริมาณเส้นใยละลายน้ำ (\%w/w)} = \frac{(\text{น้ำหนักเส้นใยละลายน้ำหลังอบ} - \text{โปรตีน} - \text{เถ้า}) \times 100}{\text{ตัวอย่างแห้ง (กรัม)}}$$

$$\text{ปริมาณเส้นใยทั้งหมด (\%w/w)} = \text{ปริมาณเส้นใยไม่ละลายน้ำ} + \text{ปริมาณเส้นใยละลายน้ำ}$$

การวิเคราะห์คุณสมบัติเชิงหน้าที่ (Functional properties)

การวิเคราะห์ความสามารถในการอุ้มน้ำ (Water holding capacity; WHC)

การวิเคราะห์ความสามารถในการอุ้มน้ำประยุกต์จากวิธีของ Fuentes-alventosa และคณะ [6] โดยการชั่งตัวอย่าง 0.25 กรัมตัวอย่างแห้ง ใส่ในหลอดสำหรับปั่นเหวี่ยงแล้วเติมน้ำกลั่นปริมาตร 5 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันแล้วบ่มที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง (HERMLE, เยอรมัน) ที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที เทส่วนใสทิ้งแล้วชั่งน้ำหนักส่วนที่ตกตะกอน คำนวณความสามารถในการอุ้มน้ำในรูป กรัม น้ำต่อกรัมตัวอย่าง (g/g) ตามสูตรดังนี้

$$\text{ความสามารถในการอุ้มน้ำ (g/g)} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างที่เพิ่มขึ้นหลังปั่นเหวี่ยง (กรัม น้ำ)}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง (กรัม เส้นใย)}}$$



การวิเคราะห์ความสามารถในการอุ้มน้ำมัน (Oil holding capacity; OHC)

การวิเคราะห์ความสามารถในการจับน้ำมันประยุกต์จากวิธีของ Fuentes-alventosa และคณะ [6] โดยการชั่งตัวอย่าง 0.25 กรัมตัวอย่างแห้ง ใส่ในหลอดสำหรับปั่นเหวี่ยงแล้วเติมน้ำมันถั่วเหลืองปริมาตร 5 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันแล้วปั่นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำไปปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง (HERMLE, เยอรมัน) ที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที เทส่วนใสทิ้งแล้วชั่งน้ำหนักส่วนที่ตกตะกอน คำนวณความสามารถในการอุ้มน้ำมันในรูปกรัมไขมันต่อกรัมตัวอย่าง (g/g) ตามสูตรดังนี้

$$\text{ความสามารถในการอุ้มน้ำมัน (g/g)} = \frac{\text{น้ำหนักตัวอย่างที่เพิ่มขึ้นหลังปั่นเหวี่ยง (กรัมไขมัน)}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง (กรัมเส้นใย)}}$$

การวิเคราะห์ความสามารถในการพองตัว (Swelling capacity; SC)

การวิเคราะห์ความสามารถในการพองตัวประยุกต์จากวิธีของ Cadavid และคณะ [14] โดยการชั่งตัวอย่าง 0.25 กรัมตัวอย่างแห้ง ใส่ในหลอดสำหรับปั่นเหวี่ยงแล้วเติมน้ำกลั่นปริมาตร 5 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันแล้วตั้งทิ้งไว้ที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง คำนวณความสามารถในการพองตัวในรูป มิลลิลิตรต่อกรัมตัวอย่าง (mL/g) ตามสูตรดังนี้

$$\text{ความสามารถในการพองตัว (mL/g)} = \frac{\text{ปริมาตรที่เพิ่มขึ้น (มิลลิลิตร)}}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง (กรัม)}}$$

การวิเคราะห์ความสามารถในการละลาย (Water Solubility Index; WSI)

การวิเคราะห์ความสามารถในการละลายประยุกต์จากวิธีของ Cadavid และคณะ [14] โดยใช้กระบวนการเดียวกับการวิเคราะห์ความสามารถในการอุ้มน้ำ โดยการชั่งตัวอย่าง 0.25 กรัมตัวอย่างแห้ง ใส่ในหลอดสำหรับปั่นเหวี่ยงแล้วเติมน้ำกลั่นปริมาตร 5 มิลลิลิตร ผสมให้เข้ากันแล้วปั่นที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องปั่นเหวี่ยง (HERMLE, เยอรมัน) ที่ความเร็ว 3,000 รอบต่อนาที เป็นเวลา 20 นาที เทส่วนใสในครู่ซีบีลอะลูมิเนียมแล้วนำไปอบที่ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ชั่งน้ำหนักตะกอนที่ได้ และคำนวณความสามารถในการละลายน้ำในรูป ร้อยละโดยน้ำหนัก (%w/w) ตามสูตรดังนี้

$$\text{ความสามารถในการละลายน้ำ (\%w/w)} = \frac{\text{น้ำหนักตะกอนที่ได้หลังอบ (กรัม)} \times 100}{\text{น้ำหนักตัวอย่างแห้ง (กรัม)}}$$

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ทำการทดลองจำนวน 3 ซ้ำ วิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance; ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของแต่ละทรีทเมนต์โดยวิธี Duncan's new multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS Statistic (Version 19.0) แสดงผลในรูป ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน

ผลการวิจัย

วัตถุดิบหน่อไม้ฝรั่งเศษเหลือ (Asparagus byproduct)

วัตถุดิบหน่อไม้ฝรั่งเศษเหลือที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีปริมาณเส้นใยอาหารทั้งหมด (TDF) ร้อยละ 63.83 ± 0.37 โดยน้ำหนัก (ตารางที่ 1) ใกล้เคียงกับการศึกษาของ Iwassa และคณะ [11] (เส้นใยอาหารทั้งหมดร้อยละ 63.4 โดยน้ำหนัก) แต่สูงกว่าการศึกษาอื่นๆ ที่มีเส้นใยอาหารทั้งหมดร้อยละ 47.86 – 58.10 โดยน้ำหนัก [7, 9, 12] นอกจากนั้นปริมาณเส้นใยอาหารทั้งหมดจะใกล้เคียงกับปริมาณคาร์โบไฮเดรตปริมาณร้อยละ 72.69 โดยน้ำหนัก บ่งบอกว่าคาร์โบไฮเดรตเกือบทั้งหมดใน



หน่อไม้ฝรั่งเศษเหลือเป็นเส้นใยอาหาร โดยส่วนที่เหลืออีกเล็กน้อยอาจจะเป็นแป้งและน้ำตาล [9, 11, 12, 15] เส้นใยอาหารในหน่อไม้ฝรั่งเศษเหลือส่วนใหญ่เป็นเส้นใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำสูงถึงร้อยละ 58.30 ± 0.15 โดยน้ำหนักแห้ง โดยมีเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำเพียงร้อยละ 5.54 ± 0.32 โดยน้ำหนักแห้ง ปริมาณเส้นใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำใกล้เคียงกับการศึกษาของ Iwassa และคณะ [9, 11] (เส้นใยอาหารไม่ละลายน้ำร้อยละ $55.85 - 57.2$ โดยน้ำหนัก) แต่สูงกว่าการศึกษาของ Laidens และคณะ [12] และ Redondo-Cuenca และคณะ [7] ที่มีเส้นใยอาหารไม่ละลายน้ำร้อยละ $44.42 - 45.72$ โดยน้ำหนัก ส่วนปริมาณเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำสูงกว่าการศึกษาของ Iwassa และคณะ [9] และ Laidens และคณะ [12] (เส้นใยอาหารละลายน้ำร้อยละ $1.33 - 2.99$ โดยน้ำหนัก) แต่ต่ำกว่าการศึกษาของ Redondo-Cuenca และคณะ [7] ที่มีเส้นใยอาหารละลายน้ำร้อยละ 12.38 โดยน้ำหนัก ทั้งนี้ปริมาณเส้นใยอาหารจะแตกต่างกันขึ้นอยู่กับแหล่งผลิตและสภาวะการปลูก [15]

หน่อไม้ฝรั่งเศษเหลือมีปริมาณองค์ประกอบของเส้นใยอาหารที่แตกต่างกันส่งผลให้มีคุณสมบัติเชิงหน้าที่ในการอุ้มน้ำ อุดมไขมัน การพองตัว และการละลายน้ำแตกต่างกันด้วย หน่อไม้ฝรั่งเศษเหลือที่ใช้ในการศึกษานี้มีความสามารถในการอุ้มน้ำและอุ้มน้ำมันต่ำกว่าหน่อไม้ฝรั่งเศษเหลือจากการศึกษาอื่นๆ (ตารางที่ 1) โดยเฉพาะความสามารถในการอุ้มน้ำมันที่ต่ำกว่าการศึกษาอื่นๆ หลายเท่าตัว ทั้งนี้อาจเป็นเพราะหน่อไม้ฝรั่งเศษเหลือที่ใช้ในการศึกษานี้มีความเป็นรุกรุนต่ำ มีโครงสร้างส่วนไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) หรือโครงสร้างที่สามารถจับกับน้ำมันต่ำ และโครงสร้างที่สามารถจับกับน้ำมันอาจถูกปิดกั้นจากองค์ประกอบอื่นโดยเฉพาะน้ำตาล แป้ง โปรตีน ไขมัน และเถ้าที่แทรกอยู่ การสกัดองค์ประกอบเหล่านี้จะออกจะทำให้เส้นใยอาหารมีคุณสมบัติเชิงหน้าที่ดีขึ้น [6, 9, 11, 12, 14]

ตารางที่ 1 ปริมาณเส้นใยอาหารและคุณสมบัติเชิงหน้าที่ของวัตถุดิบหน่อไม้ฝรั่งเศษเหลือเปรียบเทียบกับงานวิจัยอื่นๆ

Properties	This project	Iwassa และคณะ [9]	Iwassa และคณะ [11]	Laidens และคณะ [12]	Redondo-Cuenca และคณะ [7]
Protein (%w/w)	16.56 ± 0.04	16.63 ± 0.12	11.3 ± 0.4	19.91 ± 0.14	11.92 ± 0.08
Carbohydrate (%w/w)	72.51 ± 0.18	17.10 ± 0.34 (sugar)	3.4 ± 0.1 (Sugar)	28.44 ± 0.46 (sugar)	28.88 ± 0.08
Fat (%w/w)	2.29 ± 0.01	-	-	-	1.38 ± 0.28
Ash (%w/w)	8.39 ± 0.02	6.37 ± 0.03	6.4 ± 0.1	6.10 ± 0.39	4.89 ± 0.07
TDF (%w/w)	63.83 ± 0.37	57.18	63.4	47.86 ± 0.63	58.10 ± 0.35
IDF (%w/w)	58.30 ± 0.15	55.85 ± 0.15	57.2 ± 0.2	44.42 ± 0.63	45.72 ± 0.28
SDF (%w/w)	5.54 ± 0.32	1.33 ± 0.11	6.2 ± 0.3	2.99 ± 0.02	12.38 ± 0.56
WHC (g/g)	6.02 ± 0.34	8.64 ± 0.09	11.8 ± 0.1	7.12 ± 0.10	-
OHC (g/g)	1.64 ± 0.19	3.31 ± 0.19	6.1 ± 0.3	3.70 ± 0.50	-
SC (mL/g)	6.31 ± 0.41	3.31 ± 0.19	-	17.60 ± 0.10	-
WSI (%w/w)	23.30 ± 1.92	4.47 ± 0.10	7.6 ± 0.3	27.92 ± 0.04	-

หมายเหตุ : TDF คือ Total Dietary Fiber, IDF คือ Insoluble Dietary Fiber, SDF คือ Soluble Dietary Fiber, WHC คือ Water Holding Capacity, OHC คือ Oil Holding Capacity, SC คือ Swelling Capacity, WSI คือ Water Soluble Index

การสกัดเส้นใยอาหารด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (α -amylase)

จากการศึกษาการสกัดเส้นใยอาหารจากหน่อไม้ฝรั่งเศษเหลือด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส พบว่าการเพิ่มปริมาณเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสไม่สามารถเพิ่มปริมาณเส้นใยอาหารได้ (ตารางที่ 2) อีกทั้งปริมาณเส้นใยอาหารที่ได้จากการสกัดด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสไม่แตกต่างจากการสกัดโดยไม่ใช้เอนไซม์ (non-Enzymatic extraction) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะหน่อไม้ฝรั่งเศษเหลือมีปริมาณแป้งน้อย โดยจากการศึกษาของ Takahashi และคณะ [15] พบว่าหน่อไม้ฝรั่งมีปริมาณแป้งเพียงร้อยละ



1.0 – 1.5 โดยน้ำหนักแห้ง ด้วยเหตุนี้จึงอาจจะส่งผลให้การสกัดด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสที่มีเป้าหมายในการกำจัดแป้งให้ผลไม่แตกต่างจากการสกัดโดยไม่ใช้เอนไซม์ การเพิ่มปริมาณเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสจะให้เส้นใยอาหารที่มีคุณสมบัติเชิงหน้าที่ในการอุ้มน้ำ อุ้มน้ำมัน การพองตัว และการละลายน้ำไม่แตกต่างกัน ทั้งนี้เป็นเพราะเส้นใยอาหารที่ได้หลังผ่านการสกัดมีปริมาณเส้นใยอาหารทั้งหมด เส้นใยอาหารไม่ละลายน้ำ และเส้นใยอาหารละลายน้ำไม่แตกต่างกัน แต่อย่างไรก็ตามเส้นใยอาหารที่ผ่านการสกัดด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสมีคุณสมบัติเชิงหน้าที่ในการอุ้มน้ำ อุ้มน้ำมัน และการพองตัวสูงกว่าการสกัดโดยไม่ใช้เอนไซม์เล็กน้อย อาจเนื่องมาจากการใช้เอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสทำให้โครงสร้างที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) และโครงสร้างที่ชอบน้ำมัน (Hydrophobic) มีประสิทธิภาพมากขึ้น [9]

ในการศึกษาครั้งนี้ใช้เอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสปริมาณ 0.01 – 0.05 มิลลิลิตรต่อกรัม ซึ่งเป็นปริมาณที่น้อยกว่าปริมาณที่ให้ผลดีในการสกัดเส้นใยอาหารจากเปลือกกล้วย (0.10 มิลลิลิตรต่อกรัม) ที่มีปริมาณแป้งค่อนข้างสูง [16] เป็นปริมาณที่เหมาะสมและเพียงพอต่อการสกัดเส้นใยอาหารจากหน่อไม้ฝรั่งเศษเหลือที่มีปริมาณแป้งไม่สูงมาก ดังนั้นในการศึกษาครั้งนี้สรุปได้ว่าการใช้เอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสไม่สามารถเพิ่มปริมาณเส้นใยอาหารได้ แต่สามารถเพิ่มคุณสมบัติเชิงหน้าที่ในการอุ้มน้ำ อุ้มน้ำมัน และการพองตัวของเส้นใยอาหารได้เมื่อเทียบกับการสกัดโดยไม่ใช้เอนไซม์

การสกัดโดยใช้และไม่ใช้เอนไซม์เอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสจะให้ปริมาณเส้นใยอาหารและคุณสมบัติเชิงหน้าที่ในการอุ้มน้ำและอุ้มน้ำมันเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุดิบหน่อไม้ฝรั่งเศษเหลือเริ่มต้น ทั้งนี้เพราะการสกัดสามารถกำจัดน้ำตาล เกลือ ไขมัน และโปรตีน ส่งผลให้มีเส้นใยอาหารที่สามารถจับกับน้ำและน้ำมันได้มากขึ้น [6, 9, 11, 12, 14] อย่างไรก็ตามการสกัดจะทำให้เส้นใยอาหารที่ได้มีความสามารถในการพองตัวและการละลายน้ำน้อยลง โดยการพองตัวน้อยลงเพราะเส้นใยอาหารที่ได้มีปริมาณเริ่มต้นสูงส่วนวัตถุดิบหน่อไม้ฝรั่งมีปริมาณเริ่มต้นต่ำแต่ปริมาณสุดท้ายหลังแช่น้ำไม่แตกต่างกันมาก การละลายน้ำน้อยลงเพราะในระหว่างการสกัดองค์ประกอบที่ละลายน้ำได้ (น้ำตาล โปรตีน และเกลือ) ถูกกำจัดออกไป [9, 11]

ตารางที่ 2 ปริมาณเส้นใยอาหารและคุณสมบัติเชิงหน้าที่ของเส้นใยอาหารที่ได้จากการสกัดหน่อไม้ฝรั่งเศษเหลือด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส (α -amylase)

Dietary fiber and properties	non- Extraction	non-Enzymatic extraction	α -amylase-Enzymatic extraction		
			0.010 mL/g	0.025 mL/g	0.050 mL/g
TDF (%w/w)	66.89 $\pm$ 1.05a	84.51 $\pm$ 0.27c	86.80 $\pm$ 1.59d	83.85 $\pm$ 0.16c	85.44 $\pm$ 0.50cd
IDF (%w/w)	59.68 $\pm$ 0.36a	80.45 $\pm$ 0.45b	82.81 $\pm$ 1.40c	80.12 $\pm$ 0.34b	81.83 $\pm$ 0.18c
SDF (%w/w)	7.20 $\pm$ 0.80b	4.06 $\pm$ 0.18a	3.99 $\pm$ 0.27a	3.73 $\pm$ 0.18a	3.61 $\pm$ 0.32a
WHC (g water/g)	5.92 $\pm$ 0.12a	8.02 $\pm$ 0.03b	8.82 $\pm$ 0.07c	8.88 $\pm$ 0.15b	8.82 $\pm$ 0.09bc
OHC (g oil/g)	1.89 $\pm$ 0.01a	5.33 $\pm$ 0.15b	5.67 $\pm$ 0.06c	5.54 $\pm$ 0.09c	5.67 $\pm$ 0.13c
SC (mL/g)	6.19 $\pm$ 0.52c	3.47 $\pm$ 0.17a	4.45 $\pm$ 0.20b	4.37 $\pm$ 0.08b	4.47 $\pm$ 0.32b
WSI (%w/w)	25.38 $\pm$ 0.44b	8.73 $\pm$ 0.43a	8.24 $\pm$ 1.00a	8.35 $\pm$ 0.03a	8.23 $\pm$ 0.59a

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน a, b และ c แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในแนวนอนเดียวกัน, การสกัดโดยไม่ใช้เอนไซม์ (non-enzymatic extraction) ดำเนินการที่พีเอช 7.0 และอุณหภูมิ 75 องศาเซลเซียส

การสกัดเส้นใยอาหารด้วยเอนไซม์อัลคาเลส (Alcalase)

จากการสกัดเส้นใยอาหารจากหน่อไม้ฝรั่งเศษเหลือด้วยเอนไซม์อัลคาเลส พบว่าการเพิ่มปริมาณเอนไซม์อัลคาเลสไม่สามารถเพิ่มปริมาณเส้นใยอาหารหลังการสกัดได้ อีกทั้งปริมาณเส้นใยอาหารที่ได้จากการสกัดด้วยเอนไซม์อัลคาเลสไม่แตกต่างจากการสกัดโดยไม่ใช้เอนไซม์ (non-Enzyme extraction) (ตารางที่ 3) เอนไซม์อัลคาเลสเป็นเอนไซม์ชนิดเอนโดโปรตีเอส (Endoprotease) ที่มีประสิทธิภาพในการย่อยโปรตีนและมีการนำไปใช้ในการสกัดโปรตีนจากพืชหลายชนิดไม่ว่าจะเป็นรำข้าว

ถั่วเหลือง และเปลือกกล้วย เป็นต้น [17] แต่ในการสกัดครั้งนี้กลับส่งผลให้ได้ปริมาณเส้นใยอาหารหลังจากการสกัดไม่แตกต่างจากการสกัดโดยไม่ใช้เอนไซม์ (non-Enzyme extraction) บ่งบอกได้ว่าเอนไซม์อัลคาเลสไม่สามารถกำจัดโปรตีนออกจากหน่อไม้ฝรั่งเศษเหลือได้ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะวัตถุดิบหน่อไม้ฝรั่งเศษเหลือไม่ผ่านการปรับสภาพวัตถุดิบ (Pretreatment) ซึ่งเป็นขั้นตอนสำคัญทำให้วัตถุดิบอ่อนนุ่มและเป็นรูปทรงเพิ่มขึ้นทำให้เอนไซม์อัลคาเลสสามารถเข้าถึงและย่อยโปรตีนได้ [16, 18] การใช้เอนไซม์อัลคาเลสเพิ่มขึ้นจะให้เส้นใยอาหารที่มีคุณสมบัติเชิงหน้าที่ในการอุ้มน้ำ อุ้มน้ำมัน การพองตัว และการละลายน้ำไม่แตกต่างกัน ทั้งนี้เพราะเส้นใยอาหารที่ได้มีปริมาณเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำและเส้นใยอาหารที่ละลายน้ำไม่แตกต่างกัน แต่อย่างไรก็ตามเส้นใยอาหารที่ได้จากการสกัดด้วยเอนไซม์อัลคาเลสมีคุณสมบัติในการอุ้มน้ำ อุ้มน้ำมัน และการพองตัวสูงกว่าเส้นใยอาหารที่ผ่านการสกัดโดยไม่ใช้เอนไซม์เล็กน้อย ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการใช้เอนไซม์อัลคาเลสทำให้โครงสร้างที่ถูกปิดกั้นจากโปรตีนโดยเฉพาะโครงสร้างที่สามารถจับกับน้ำและน้ำมันมีประสิทธิภาพดีขึ้นเล็กน้อย [6, 9, 11, 12, 14]

ในการศึกษานี้ใช้เอนไซม์อัลคาเลสช่วง 0.025 – 0.100 มิลลิกรัมต่อกรัม เป็นปริมาณที่ใกล้เคียงกับที่ใช้ในการวิเคราะห์ปริมาณเส้นใยอาหาร [13] เป็นปริมาณที่เหมาะสมและเพียงพอต่อการสกัดเส้นใยอาหารจากหน่อไม้ฝรั่งเศษเหลือ ดังนั้นในการศึกษานี้สรุปได้ว่าการใช้เอนไซม์อัลคาเลสไม่สามารถเพิ่มปริมาณเส้นใยอาหารได้ แต่สามารถเพิ่มคุณสมบัติเชิงหน้าที่ในการอุ้มน้ำ อุ้มน้ำมัน และการพองตัวของเส้นใยอาหารได้เมื่อเทียบกับการสกัดโดยไม่ใช้เอนไซม์

การสกัดโดยใช้และไม่ใช้เอนไซม์อัลคาเลสจะให้ปริมาณเส้นใยอาหารและคุณสมบัติเชิงหน้าที่ในการอุ้มน้ำและอุ้มน้ำมันเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับวัตถุดิบหน่อไม้ฝรั่งเศษเหลือเริ่มต้น ทั้งนี้เพราะการสกัดสามารถกำจัดน้ำตาล เถ้า ไขมัน และโปรตีน ส่งผลให้มีเส้นใยอาหารที่สามารถจับกับน้ำและน้ำมันได้มากขึ้น [6, 9, 11, 12, 14] อย่างไรก็ตามการสกัดจะทำให้เส้นใยอาหารที่มีความสามารถในการพองตัวและการละลายน้ำน้อยลง โดยการพองตัวน้อยลงเพราะเส้นใยอาหารที่ได้มีปริมาตรเริ่มต้นสูงส่วนวัตถุดิบหน่อไม้ฝรั่งมีปริมาตรเริ่มต้นต่ำแต่ปริมาตรสุดท้ายหลังแช่น้ำไม่แตกต่างกันมาก การละลายน้ำน้อยลงเพราะในระหว่างการสกัดต้องประกอบที่ละลายน้ำได้ (น้ำตาล โปรตีน และเถ้า) ถูกกำจัดออกไป [9, 11]

ตารางที่ 3 ปริมาณเส้นใยอาหารและคุณสมบัติเชิงหน้าที่ของเส้นใยอาหารที่ได้จากการสกัดหน่อไม้ฝรั่งเศษเหลือด้วยเอนไซม์อัลคาเลส

Dietary fiber and properties	non-Extraction	non-Enzymatic extraction	Alcalase-Enzymatic extraction		
			0.025 mL/g	0.050 mL/g	0.100 mL/g
TDF (%w/w)	66.89 ± 1.05a	79.75 ± 0.81c	78.85 ± 0.93bc	78.00 ± 0.69b	77.81 ± 0.56b
IDF (%w/w)	59.68 ± 0.36a	75.57 ± 1.00d	74.13 ± 0.50c	73.14 ± 0.46bc	72.90 ± 0.46b
SDF (%w/w)	7.20 ± 0.80b	4.17 ± 0.19a	4.73 ± 0.43a	4.86 ± 0.38a	4.91 ± 0.19a
WHC (g water/g)	5.59 ± 0.17a	7.98 ± 0.35b	8.53 ± 0.20c	8.50 ± 0.39c	8.51 ± 0.24c
OHC (g oil/g)	1.40 ± 0.04a	4.15 ± 0.24b	4.95 ± 0.39c	5.05 ± 0.06c	5.08 ± 0.13c
SC (mL/g)	5.97 ± 0.24b	5.01 ± 0.23a	6.30 ± 0.47b	5.83 ± 0.75b	5.92 ± 0.06b
WSI (%w/w)	22.86 ± 1.51b	10.24 ± 0.50a	11.21 ± 0.68a	11.47 ± 0.22a	11.20 ± 0.13a

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน a, b และ c แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในแนวนอนเดียวกัน, การสกัดโดยไม่ใช้เอนไซม์ (non-enzymatic extraction) ดำเนินการที่พีเอช 8.0 และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

การสกัดเส้นใยอาหารด้วยเอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดส (Amyloglucosidase)

จากการศึกษาการสกัดเส้นใยอาหารจากหน่อไม้ฝรั่งเศษเหลือด้วยเอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดส พบว่าการเพิ่มปริมาณเอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดสไม่สามารถเพิ่มปริมาณเส้นใยอาหารได้ อีกทั้งปริมาณเส้นใยอาหารที่ได้ไม่แตกต่างจากการสกัดโดยไม่ใช้เอนไซม์ (non-Enzymatic extraction) (ตารางที่ 4) ผลที่ได้มีลักษณะเดียวกันกับการใช้เอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส ทั้งนี้เป็นเพราะเอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดสเป็นเอนไซม์ย่อยแป้งเช่นเดียวกับเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส แต่จะตัดตรงตำแหน่งที่



แตกต่างกัน และเนื่องจากหน่อไม้ฝรั่งเศษเหลือที่ใช้อาจจะมีปริมาณแป้งน้อยจึงส่งผลให้การสกัดด้วยเอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดส ให้ผลไม่แตกต่างจากการสกัดโดยไม่ใช้เอนไซม์ [15] นอกจากนั้นการเพิ่มปริมาณเอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดสจะให้เส้นใยอาหาร ที่มีคุณสมบัติเชิงหน้าที่ในการอุ้มน้ำ อุ้มน้ำมัน การพองตัว และการละลายน้ำไม่แตกต่างกัน และไม่แตกต่างจากการสกัดโดยไม่ใช้เอนไซม์ (non-enzymatic extraction) ทั้งนี้เพราะเส้นใยอาหารที่ได้หลังผ่านการสกัดมีปริมาณเส้นใยอาหารไม่แตกต่างกัน จึงมีคุณสมบัติเชิงหน้าที่ไม่แตกต่างกัน

ในการศึกษาครั้งนี้ใช้เอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดสปริมาณ 0.13 – 0.40 มิลลิกรัมต่อกรัม เป็นปริมาณที่ใกล้เคียงกับที่ ให้ผลดีในการสกัดเส้นใยอาหารจากเปลือกกล้วย (0.1 มิลลิกรัมต่อกรัม) [16] เป็นปริมาณที่เหมาะสมและเพียงพอต่อการสกัด เส้นใยอาหารจากหน่อไม้ฝรั่งเศษเหลือ ดังนั้นในการศึกษานี้สรุปได้ว่าการใช้เอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดสไม่สามารถเพิ่ม ปริมาณเส้นใยอาหารและคุณสมบัติเชิงหน้าที่ในการอุ้มน้ำ อุ้มน้ำมัน การพองตัว และการละลายน้ำได้เมื่อเทียบกับการสกัดโดย ไม่ใช้เอนไซม์ (non-enzymatic extraction)

การสกัดโดยใช้และไม่ใช้เอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดสจะให้ปริมาณเส้นใยอาหารเพิ่มขึ้นและมีคุณสมบัติเชิงหน้าที่ใน การอุ้มน้ำและอุ้มน้ำมันดีขึ้นเมื่อเทียบกับวัตถุดิบหน่อไม้ฝรั่งเศษเหลือที่ไม่ผ่านการสกัด ทั้งนี้เพราะการสกัดสามารถกำจัด น้ำตาล เถ้า ไขมัน และโปรตีน ส่งผลให้มีเส้นใยอาหารที่สามารถจับกับน้ำและน้ำมันได้มากขึ้น [6, 9, 11, 12, 14] อย่างไรก็ตาม การสกัดจะทำให้เส้นใยอาหารที่ได้มีความสามารถในการพองตัวและการละลายน้ำน้อยลง โดยการพองตัวน้อยลงเพราะ เส้นใยอาหารที่ได้มีปริมาตรเริ่มต้นสูงส่วนวัตถุดิบหน่อไม้ฝรั่งมีปริมาตรเริ่มต้นต่ำแต่ปริมาตรสุดท้ายหลังแช่น้ำไม่แตกต่างกัน มาก การละลายน้ำน้อยลงเพราะในระหว่างการสกัดองค์ประกอบที่ละลายน้ำได้ (น้ำตาล โปรตีน และเถ้า) ถูกกำจัดออกไป

ตารางที่ 4 ปริมาณเส้นใยอาหารและคุณสมบัติเชิงหน้าที่ของเส้นใยอาหารที่ได้จากการสกัดหน่อไม้ฝรั่งเศษเหลือด้วยเอนไซม์ อะไมโลกลูโคซิเดส

Dietary fiber	non-	non-Enzymatic	AMG-Enzymatic extraction		
And properties	Extraction	extraction	0.13 mg/g	0.27 mg/g	0.40 mg/g
TDF (%w/w)	62.35 ± 0.56a	82.96 ± 0.67b	82.87 ± 0.81b	84.10 ± 0.22b	82.06 ± 0.53b
IDF (%w/w)	56.69 ± 0.31a	78.33 ± 0.84b	78.09 ± 0.98b	79.35 ± 0.18b	77.45 ± 0.22b
SDF (%w/w)	5.66 ± 0.25b	4.63 ± 0.19a	4.78 ± 0.18a	4.75 ± 0.06a	4.60 ± 0.33a
WHC (g water/g)	6.28 ± 0.14a	7.35 ± 0.25b	7.39 ± 0.07b	7.53 ± 0.11b	7.28 ± 0.03b
OHC (g oil/g)	1.59 ± 0.14a	4.03 ± 0.11b	4.12 ± 0.21b	4.01 ± 0.07b	3.99 ± 0.28b
SC (mL/g)	6.55 ± 0.12b	5.51 ± 0.32a	5.83 ± 0.47a	6.28 ± 0.31ab	6.24 ± 0.32ab
WSI (%w/w)	21.64 ± 1.17b	6.49 ± 0.49a	6.63 ± 1.08a	5.73 ± 0.36a	6.85 ± 0.32a

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ย ± ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน a, b และ c แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในแนวนอนเดียวกัน, การสกัด โดยไม่ใช้เอนไซม์ (non-enzymatic extraction) ดำเนินการที่พีเอช 4.5 และอุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

หน่อไม้ฝรั่งเศษเหลือมีปริมาณเส้นใยอาหารสูงประมาณร้อยละ 63.83 ± 0.37 โดยน้ำหนัก มีความเหมาะสมในการ นำมาผลิตเส้นใยอาหาร แต่อย่างไรก็ตามวัตถุดิบหน่อไม้ฝรั่งเศษเหลือยังมีคุณสมบัติเชิงหน้าที่ในการอุ้มน้ำและอุ้มน้ำมัน ค่อนข้างต่ำ โดยเฉพาะคุณสมบัติเชิงหน้าที่ในการอุ้มน้ำมัน กระบวนการสกัดเส้นใยอาหารนอกจากจะช่วยให้สามารถเพิ่ม ปริมาณเส้นใยอาหารแล้วยังสามารถเพิ่มคุณสมบัติเชิงหน้าที่ในการอุ้มน้ำและอุ้มน้ำมันได้ด้วย ซึ่งการเพิ่มคุณสมบัติเชิงหน้าที่ เหล่านี้ให้สูงขึ้นจะทำให้เส้นใยอาหารมีคุณค่าทางอาหารในการช่วยป้องกันโรคในระบบทางเดินอาหาร ลดคอเลสเตอรอล ลดน้ำตาลในเลือด ลดโรคอ้วน และป้องกันโรคหลอดเลือดและหัวใจได้เพิ่มขึ้นด้วย [9]

การสกัดเส้นใยอาหารจากหน่อไม้ฝรั่งเศษเหลือด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส อัลคาเลส และอะไมโลกลูโคซิเดสให้ ปริมาณเส้นใยไม่แตกต่างจากการสกัดโดยไม่ใช้เอนไซม์ ทั้งนี้อาจเป็นเพราะหน่อไม้ฝรั่งเศษเหลือมีปริมาณแป้งต่ำทำให้การสกัด

ด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลส และอะไมโลกลูโคซิเดสมีผลต่อการสกัดเล็กน้อย ทำให้ได้ปริมาณเส้นใยอาหารไม่แตกต่างจากการสกัดโดยไมใช้เอนไซม์ ส่วนการสกัดด้วยเอนไซม์อัลคาเลสเนื่องจากวัตถุดิบหน่อไม้ฝรั่งเศษเหลือไม่ผ่านการปรับสภาพทำให้เอนไซม์อัลคาเลสเข้าถึงและย่อยโปรตีนได้ยากส่งผลให้ได้ปริมาณเส้นใยอาหารไม่แตกต่างจากการสกัดโดยไมใช้เอนไซม์ อย่างไรก็ตามการสกัดด้วยเอนไซม์แอลฟา-อะไมเลสและอัลคาเลสจะให้เส้นใยอาหารที่มีคุณสมบัติเชิงหน้าที่ในการอุ้มน้ำ อุดมไขมัน และการพองตัวสูงกว่าการสกัดโดยไมใช้เอนไซม์ ส่วนการสกัดด้วยเอนไซม์อะไมโลกลูโคซิเดสให้คุณสมบัติเชิงหน้าที่ไม่แตกต่างจากการสกัดโดยไมใช้เอนไซม์

การสกัดไม่ว่าจะเป็นการสกัดโดยใช้หรือไมใช้เอนไซม์จะให้ปริมาณเส้นใยอาหารเพิ่มขึ้น และมีคุณสมบัติเชิงหน้าที่ในการอุ้มน้ำและอุดมไขมันเพิ่มอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) เมื่อเทียบกับวัตถุดิบหน่อไม้ฝรั่งเศษเหลือที่ไม่ผ่านการสกัด ทั้งนี้เพราะการสกัดสามารถกำจัดองค์ประกอบต่างๆ เช่น น้ำตาล เถ้า สารประกอบฟีนอลิก และโปรตีน ที่คอยปิดกั้นโครงสร้างที่สามารถจับกับน้ำและน้ำมัน ซึ่งนอกจากจะทำให้เส้นใยอาหารที่ได้มีปริมาณเส้นใยอาหารเพิ่มขึ้นแล้ว ยังทำให้เส้นใยอาหารที่ได้มีประสิทธิภาพในการจับกับน้ำและน้ำมันเพิ่มขึ้นด้วย องค์ประกอบเหล่านี้ (น้ำตาล เถ้า สารประกอบฟีนอลิก และโปรตีน) เป็นองค์ประกอบที่สามารถละลายน้ำได้ดี โดยจากการศึกษาความสามารถในการละลายน้ำพบว่าวัตถุดิบหน่อไม้ฝรั่งเศษเหลือมีความสามารถในการละลายน้ำสูงถึงร้อยละ 23.30 โดยน้ำหนัก โดยเฉพาะน้ำตาลที่มีปริมาณสูงถึงร้อยละ 17 – 28 โดยน้ำหนัก [9, 12] ซึ่งอาจจะมียังน้ำตาลโมเลกุลเดี่ยวและโมเลกุลคู่ เช่น กลูโคส ฟรุคโตส และซูโครส เป็นต้น [7, 8]

เส้นใยอาหารหลังผ่านการสกัดจะมีปริมาณเส้นใยอาหารทั้งหมดเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 62.4 – 66.9 เป็นร้อยละ 74.7 – 86.8 โดยน้ำหนัก ส่งผลให้เส้นใยอาหารที่ได้มีคุณสมบัติเชิงหน้าที่ในการอุ้มน้ำเพิ่มขึ้นจาก 5.6 – 6.3 กรัม/น้ำต่อกรัมเส้นใย เป็น 7.3 – 8.8 กรัม/น้ำต่อกรัมเส้นใย และคุณสมบัติในการอุ้มน้ำมันเพิ่มขึ้นจาก 1.4 – 1.9 กรัม/น้ำมันต่อกรัมเส้นใย เป็น 4.0 – 5.7 กรัม/น้ำมันต่อกรัมเส้นใย ตามลำดับ ทั้งนี้เป็นเพราะเส้นใยอาหารที่ผ่านการสกัดอาจมีรูพรุนมากขึ้นเนื่องจากการกำจัดองค์ประกอบที่แทรกอยู่ทั้งในและนอกเซลล์ออกไปทำให้สามารถอุ้มน้ำและอุ้มน้ำมันได้เพิ่มขึ้น [6, 9, 11, 12, 14] และเนื่องจากการกำจัดองค์ประกอบบางอย่างออกไปทำให้โครงสร้างของเส้นใยอาหารที่สามารถจับกับน้ำ หรือ โครงสร้างส่วนที่ชอบน้ำ (Hydrophilic) และโครงสร้างที่สามารถจับกับน้ำมัน หรือ โครงสร้างส่วนไม่ชอบน้ำ (Hydrophobic) มีประสิทธิภาพในการจับน้ำและน้ำมันเพิ่มมากขึ้น [9, 11] นอกจากนั้นหลังผ่านการสกัดจะมีปริมาณเส้นใยอาหารเพิ่มขึ้นทำให้มีโครงสร้างในการจับกับน้ำและน้ำมันเพิ่มขึ้นตามไปด้วย เส้นใยอาหารที่ไม่ละลายน้ำได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และ ลิกนินมีส่วนช่วยเพิ่มความสามารถในการอุ้มน้ำและอุ้มน้ำมัน [19] อย่างไรก็ตามเส้นใยอาหารหลังผ่านการสกัดจะมีความสามารถในการพองตัวและความสามารถในการละลายน้ำต่ำกว่าวัตถุดิบหน่อไม้ฝรั่งเศษเหลือเริ่มต้น โดยความสามารถในการพองตัวของเส้นใยอาหารที่ลดลงหลังผ่านการสกัดเกิดจากเส้นใยอาหารที่ผ่านการสกัดมีปริมาตรเริ่มต้นสูงกว่าวัตถุดิบหน่อไม้ฝรั่งเศษเหลือค่อนข้างมากทำให้เมื่อเติมน้ำจึงเกิดการพองตัวได้น้อยกว่า แต่อย่างไรก็ตามปริมาตรทั้งหมดของเส้นใยอาหารที่ผ่านการสกัดสูงกว่าวัตถุดิบหน่อไม้ฝรั่งเศษเหลือเมื่อเทียบในน้ำหนักที่เท่ากัน ส่วนคุณสมบัติในการละลายน้ำของเส้นใยอาหารที่ผ่านการสกัดจะลดลงเนื่องจากองค์ประกอบที่สามารถละลายน้ำได้ถูกกำจัดออกไประหว่างกระบวนการสกัด

ในการสกัดเส้นใยอาหารจากหน่อไม้ฝรั่งเศษเหลือในครั้งนี้จะให้ปริมาณเส้นใยอาหารทั้งหมดสูงกว่าจากการศึกษาของ Laidens และคณะ [12] และ Iwassa และคณะ [11] ใกล้เคียงกับการศึกษาของ Fuentes-alventosa และคณะ [6] แต่ต่ำกว่าจากการศึกษาของ Iwassa และคณะ [9] ส่วนคุณสมบัติเชิงหน้าที่ในการอุ้มน้ำและอุ้มน้ำมันจะต่ำกว่าการศึกษาที่ผ่านมาโดยส่วนใหญ่ (ตารางที่ 5) ทั้งนี้อาจเป็นเพราะหลังจากการเตรียมจะมีโครงสร้างในการจับกับน้ำและน้ำมันต่ำกว่า อีกทั้งวัตถุดิบหน่อไม้ฝรั่งเศษเหลือเริ่มต้นที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีคุณภาพต่ำกว่า อย่างเช่น จากการศึกษาศึกษาของ Iwassa และคณะ [9, 11] และ Laidens และคณะ [12] พบว่าวัตถุดิบหน่อไม้ฝรั่งเศษเหลือเริ่มต้นก่อนการสกัดค่อนข้างมีคุณภาพในการจับกับน้ำและน้ำมันสูง ส่วนวัตถุดิบที่ใช้ในการศึกษาครั้งนี้มีคุณภาพในการจับกับน้ำกับน้ำมันต่ำ โดยเฉพาะคุณภาพในการจับกับน้ำมันที่มีเพียง 1.64 ± 0.19 กรัม/น้ำมันต่อกรัมเส้นใย ต่ำกว่าการศึกษาอื่นๆ หลายเท่าตัว (ตารางที่ 1)



ตารางที่ 5 ปริมาณและคุณสมบัติเชิงหน้าที่ของเส้นใยอาหารหลังจากการสกัดหน่อไม้ฝรั่งเศษเหลือด้วยวิธีการต่างๆ

Processes	This project	Laidens และ คณะ [12]	Iwasssa และ คณะ [9]	Iwasssa และ คณะ [11]	Fuentes- Alventosa และคณะ [6]	Cadavid และ คณะ [14]
Material preparation	Wash, cut, dried 80°C, 48h, ground, sieves to 0.60 mm	Cut, dried 60°C, 24h, ground, sieves to 0.4 mm	Cut, dried 60°C, 24h, ground, sieves to 32 mesh	Cut and ground with domestic blender	Fresh asparagus, kept at 4°C, 24h and cut	Wash with 2%(v/v) detergent, organic solution, cut, homogenized
Extraction condition	S/L ratio 1:10 (w/v), pH 4.5 – 8.0, 60 – 75°C, 60 min (Enzyme)	S/L ratio 1:20 (w/v) 125 rpm, 60°C, 30 min	Subcritical extraction 100°C, 100 bar, 30 min	S/L ratio 1:1 (w/v), Homogenizer 1.67 Hz, 25°C, 30 min	S/L ration 1:1 (w/v), Homogenized, 60°C, 90 min	S/L ratio 1:1 (w/v), Homogenized, 55.1°C, 60 min
TDF (%w/w)	74.7 – 86.8	69.74±0.34	93.08	67.7	75.4-77.5	78.0
IDF (%w/w)	77.2 – 82.8	63.07±0.33	74.87±0.15	61.3±1.2	65.2-66.8	-
SDF (%w/w)	3.6 – 4.9	6.67±0.49	18.21±0.35	6.4±0.4	10.3-10.7	-
WHC (g water/g)	7.3 – 8.8	10.50±0.28	13.43±0.41	13.2±0.5	18.8-20.3	11.29
OHC (g oil/g)	4.0 – 5.7	7.77±0.21	6.76±0.07	7.2±0.1	7.61-8.19	5.12
SC (mL/g)	3.5 – 6.3	23.90±0.10	30.50±0.71	-	-	3.0
WSI (%w/w)	5.8 – 12.0	5.98±0.03	0.85±0.21	4.1±0.2	22.6-23.4	10.99

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณกลุ่มเกษตรกรจังหวัดเพชรบูรณ์ที่ให้การสนับสนุนหน่อไม้ฝรั่งเศษเหลือเพื่อใช้เป็นวัตถุดิบในงานวิจัยครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

1. วรณัฐ เสนิงค์ ณ อยุธยา, วรณัฐ สนั่นพานิชกุล. หน่อไม้ฝรั่งไทยกระจายไกลไปทั่วโลกด้วยวิธีการเพาะเลี้ยงเนื้อเยื่อพืช. [อินเทอร์เน็ต]. 2562 [เข้าถึงเมื่อ 29 ก.ย. 2565]. เข้าถึงได้จาก:
https://www.technologychaoban.com/bullet-news-today/article_74713,
2. ตลาดไท. หน่อไม้ฝรั่ง B (ดอกตูม). [อินเทอร์เน็ต]. 2566 [เข้าถึงเมื่อ 16 ธ.ค. 2566]. เข้าถึงได้จาก:
<https://talaadthai.com/products/asparagus-9614-2537>
3. สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. หน่อไม้ฝรั่ง: เนื้อที่เพาะปลูก เนื้อที่เก็บเกี่ยว ผลผลิตและผลผลิตต่อไร่ รวมทั้งประเทศ ปี 2565. [อินเทอร์เน็ต]. 2566 [เข้าถึงเมื่อ 13 ธ.ค. 2566]. เข้าถึงได้จาก :
<https://www.oae.go.th/assets/portals/1/fileups/prcaidata/files/asparagus65.pdf>



4. Chitrakar B, Zhang M, Adhikari B. Asparagus (*Asparagus officinalis*): Processing effect on nutritional and phytochemical composition of spear and hard-stem byproducts. Trends in Food Sci Technol 2019;93:1–11.
5. Pegiou E, Mumm R, Acharya P, de Vos RCH, Hall RD. Green and White Asparagus (*Asparagus officinalis*): A Source of Developmental, Chemical and Urinary Intrigue. Metabolites 2019;10(1):17.
6. Fuentes-Alventosa JM, Rodriguez-Gutierrez G, Jaramillo-Carmona S, Espejo-Calvo JA, Rodriguez-Arcos R, Fernandez-Bolanos J, Guillin-Bejarano R, Jimenez-Araujo A. Effect of extraction method on chemical composition and functional characteristics of high dietary fibre powders obtained from asparagus by-products. Food Chem 2009;113(2):665–71.
7. Redondo-Cuenca A, García-Alonso A, Rodríguez-Arcos R, Castro I, Alba C, Miguel Rodríguez J, Goni I. Nutritional composition of green asparagus (*Asparagus officinalis* L.), edible part and by-products, and assessment of their effect on the growth of human gut-associated bacteria. Food Res Int 2023;163:112284.
8. DiNardo A, Wu P, Chang S. Protein and polysaccharides extraction from discarded asparagus base. In: CSBE/SCGAB 2016 Annual Conference Halifax World Trade and Convention Centre, July 3-6, 2016; Nova Scotia, Canada; 2016. p. 1-8.
9. Iwassa IJ, Ribeiro IMS, Meurer EC, Cardozo-Filho L, Bolanho BC, Silva C. Effect of subcritical water processing on the extraction of compounds, composition, and functional properties of asparagus by-product. J Food Process Eng 2019;42(4):e13060.
10. กมลลักษณ์ วิชาเร็ว. ผลของวิธีการสกัดต่อสมบัติทางเคมีกายภาพและสมบัติเชิงหน้าที่ของเส้นใยอาหารจากหน่อไม้เสขเหลือ. วิทยานิพนธ์หลักสูตรปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัยพะเยา. พะเยา; 2563.
11. Iwassa IJ, Piai JF, Bolanho BC. Fiber concentrates from asparagus by-products: Microstructure, composition, functional and antioxidant properties. Food Sci Technol 2019;43:1-9.
12. Laidens CP, Iwassa IJ, Stevanato N, Zampar IC, Barros BCB, Silva C. Obtaining fermentable sugars and fiber concentrate from asparagus byproduct. J Food Process Preserv 2021;45(7):e15640.
13. Prosky L, Asp NG, Schweizer TF, Devries JW, Furda I. Determination of insoluble, soluble and total dietary fiber in foods and food products: Interlaboratory Study. J Assoc Off Anal Chem 1988;71(5):1017-23.
14. Cadavid ELA, Molina DAR, Cartagena J. Chemical, physicochemical and functional characteristics of dietary fiber obtained from asparagus Byproducts (*Asparagus officinalis* L.). Rev Fac Nal Agr Medellín 2015;68(1):7533-44.
15. Takahashi H, Yoshida C, Takeda T. Sugar composition in asparagus spears and its relationship to soil chemical properties. J Appl Glycosci 2019;66(1):47–50.
16. Wachirasiri P, Julakarangka S, Wanlapa S. The effects of banana peel preparations on the properties of banana peel dietary fibre concentrate. Songklanakarin J Sci Technol 2009;31(6):605-11.



17. กุศลภัส วชิรศิริ, โศรดา วัลภา, มณีรัตน์ มีพลอย, ดำรงชัย สิทธิสำอาง, ยุทธศักดิ์ สุขการี. ผลของปริมาณรำข้าวและเอนไซม์อัลคาเลสต่อระดับการย่อยโปรตีน ผลผลิต และฤทธิ์ทางชีวภาพในการกำจัดอนุมูลอิสระของเพปไทด์ไฮโดรไลเซตจากรำข้าวสกัดน้ำมัน. วารสารวิจัยและพัฒนา มจร. 2564;44(3):427-42.
18. Daou C, Zhang H. Optimization of processing parameters for extraction of total, insoluble and soluble dietary fibers of defatted rice bran. Emir J Food Agric 2013;25(8):562-75.
19. โศรดา วัลภา, กุศลภัส วชิรศิริ, ดำรงชัย สิทธิสำอางค์, ฐิติชญา สุวรรณทัฬ. ผลของกระบวนการเตรียมต่อองค์ประกอบทางเคมีและสมบัติเชิงหน้าที่ของใยอาหารจากเปลือกมะม่วงแก้ว. ว วิทย กษ 2552;40(3)(พิเศษ):141-4.



การผลิตเชื้อเพลิงขยะจากขยะพลาสติกภายในมหาวิทยาลัย

Production of Refuse Derived Fuel from Plastic Waste within University

ธรรพร บุศย์น้ำเพชร และ นิพนธ์ ตันไพบุณกุล*

คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม มหาสารคาม 44150

Tharaporn Budnumpetch and Nipon Tanpaiboonkul*

Faculty of Environment and Resource Studies, Mahasarakham University, Maha Sarakham 44150

*Corresponding author: nipon.t@msu.ac.th

Received: 20 November 2023/ Revised: 10 January 2024/ Accepted: 19 January 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการทำเชื้อเพลิงอัดก้อนจากมูลฝอยพลาสติกที่ได้จากโรงคัดแยกขยะภายในมหาวิทยาลัย โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาองค์ประกอบของขยะ สภาวะที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูปและคุณสมบัติของเชื้อเพลิงขยะอัดก้อนที่ขึ้นรูปเป็นก้อนแข็ง จากการศึกษาองค์ประกอบเบื้องต้นของขยะที่ผ่านกระบวนการเชิงกลชีวภาพภายในโรงคัดแยกมีพลาสติกมากถึง 47.50 เปอร์เซ็นต์ จึงนำมาทำเป็นก้อนเชื้อเพลิงขยะขึ้นรูปในแบบทรงกระบอกเส้นผ่านศูนย์กลางขนาด 4 เซนติเมตร และยาว 10 เซนติเมตร ใช้แรงดัน 10, 30, 50 และ 70 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ควบคุมอุณหภูมิ 100 และ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที จากการศึกษาพบว่าการใช้แรงขึ้นรูปที่ 10, 30 และ 50 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ร่วมกับอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที ก้อนเชื้อเพลิงขยะมีลักษณะสมบูรณ์ ความหนาแน่นอยู่ระหว่าง 0.80 ถึง 0.90 กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร ความต้านทานแรงกดตามแนวยาวสูงสุดอยู่ระหว่าง 224.43 ± 7.52 ถึง 273.27 ± 8.14 นิวตันต่อมิลลิเมตร มีค่าความร้อน 41.57 ± 0.29 เมกะจูลต่อกิโลกรัม และทนทานต่อการขัดสีและการแตกร่วนตามเกณฑ์ที่กำหนดของเชื้อเพลิงอัดแท่ง ดังนั้นที่สภาวะอุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ร่วมกับแรงดันที่ 10 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็นเวลา 5 นาที จึงเป็นสภาวะที่เหมาะสมทำให้ได้ก้อนเชื้อเพลิงที่มีคุณภาพดีตรงตามข้อกำหนดมาตรฐานของประเทศยุโรปและนำไปใช้เป็นพลังงานทดแทนเพื่อลดปริมาณขยะพลาสติก ซึ่งเป็นแนวทางการจัดการที่อยู่ในเป้าหมายของการพัฒนาที่ยั่งยืนทางด้านสิ่งแวดล้อมตามแนวทางขององค์การสหประชาชาติ

คำสำคัญ: เชื้อเพลิงขยะอัดก้อน เชื้อเพลิงขยะมูลฝอย ขยะพลาสติก

Abstract

This research aims to study the production of densified fuel (RDF-5) obtained from plastic waste generated within the university's waste separation facility. The objectives are to investigate the composition of the waste, the suitable conditions for forming the plastic waste, and the properties of these compressed densified fuels. A preliminary examination of the waste components that underwent Mechanical and Biological Waste Treatment within the waste separation facility revealed that plastic accounted for up to



47.50% of the composition. This plastic waste was then molded into RDF-5 using cylindrical molds with a diameter of 4 centimeters and a length of 10 centimeters. The shaping process involved applying pressures of 10, 30, 50 and 70 kilograms per square centimeter while maintaining a temperature of 100 and 120 degrees Celsius for duration of 5 minutes. The study found that using a pressure of 10, 30 and 50 kilograms per square centimeter, combined with a temperature of 120 degrees Celsius for 5 minutes to produce RDF-5 with desirable characteristics. These densified fuels had a bulk density ranging from 0.80 to 0.90 g/cm³, a maximum longitudinal crushing strength between 224.43±7.52 and 273.27±8.14 N/mm, a calorific value of 41.57±0.29 MJ/kg, and exhibited resistance to abrasion and impact, meeting the standards set for fuel briquettes. Therefore, the conditions of 120 degrees Celsius and a pressure of 10 kilograms per square centimeter for 5 minutes are suitable for producing high-quality densified fuel that meets European standards. These densified fuels can be used as a renewable energy source to reduce the volume of plastic waste, aligning with the sustainable development goals (SDG) related to environmental conservation, as outlined by the United Nations.

Keywords: Densified fuel, Refuse Derive Fuel, Plastic waste

บทนำ

การจัดการขยะมูลฝอยในปัจจุบันพบปัญหาการดำเนินการที่ไม่ถูกต้องตามแนวทางการจัดการมูลฝอยชุมชน ซึ่งอาจก่อให้เกิดปัญหาตามมา ส่งผลทำให้เกิดปัญหาผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและนำมาซึ่งความเดือดร้อน รำคาญและการร้องเรียน จากข้อมูลสถานการณ์ปริมาณขยะมูลฝอยชุมชนที่เกิดขึ้นในประเทศไทยปี พ.ศ.2563 มีปริมาณขยะมูลฝอยชุมชนเกิดขึ้นประมาณ 25.37 ล้านตัน หรือประมาณ 69,322 ตันต่อวัน โดยมีอัตราการเกิดขยะมูลฝอยชุมชนโดยเฉลี่ยเท่ากับ 1.05 กิโลกรัม/คน/วัน ถึงแม้ว่ากระทรวงมหาดไทยโดยกรมส่งเสริมการปกครองส่วนท้องถิ่นส่งเสริมการใช้งานผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมแต่ก็ยังพบการจัดการมูลฝอยชุมชนที่ไม่ถูกต้องมากถึง 31 เปอร์เซ็นต์ หรือ 7.88 ล้านตัน [1] ดังนั้นจึงต้องเพิ่มประสิทธิภาพและให้เกิดการบูรณาการของการจัดการขยะมูลฝอยควรมุ่งเน้นให้มีการนำขยะมูลฝอยที่มีศักยภาพกลับมาใช้ให้เกิดประโยชน์มากที่สุด ได้แก่ การเลือกใช้เทคโนโลยีที่เหมาะสมหรือเทคโนโลยีที่เป็นทางเลือกมาตรฐานในการสร้างระบบกำจัดขยะมูลฝอยเน้นการแปรรูปขยะมูลฝอยที่ติดไฟได้ให้กลายเป็นพลังงาน การส่งเสริมธุรกิจรีไซเคิลหรือการแปรรูปใช้ใหม่ รวมถึงการสร้างจิตสำนึกในการคัดแยกขยะมูลฝอยโดยเป็นแนวทางการจัดการขยะมูลฝอย [2] ขยะมูลฝอยจำนวนมาก ได้แก่ บรรจุภัณฑ์ที่ใช้แล้วทิ้งของขยะประเภทพลาสติก เช่น ขวดน้ำพลาสติก โฟม ถุงพลาสติก พบว่ามีปริมาณเพิ่มขึ้น ซึ่งมาจากพฤติกรรมผู้บริโภคในพื้นที่ของมหาวิทยาลัยแห่งหนึ่งในจังหวัดมหาสารคาม การจัดการขยะมูลฝอยของมหาวิทยาลัย ดำเนินงานโดยเริ่มจากแยกขยะมูลฝอยออกเป็น 3 ส่วน โดยส่วนที่ 1 ขยะที่ไม่ย่อยสลาย เช่น ขวดพลาสติก ขวดแก้ว เศษเหล็ก และอื่น ๆ ซึ่งจะถูกคัดแยกโดยคนงานผ่านสายพานลำเลียง ส่วนที่ 2 สารอินทรีย์ที่เป็นเศษอาหาร เช่น เศษพืชผักและผลไม้ที่แยกนำไปเลี้ยงไส้เดือนที่โรงหมักปุ๋ยมูลไส้เดือน และส่วนที่ 3 เป็นขยะส่วนที่ไม่สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เช่น ถุงขนม คุกกี้ หรือขยะที่อาจปะปนทั้งสารประกอบอินทรีย์และอนินทรีย์ที่จัดการโดยนำเข้าระบบการบำบัดขยะมูลฝอยเชิงกลชีวภาพ (MBT, Mechanical and Biological Waste Treatment) เป็นระบบที่ดำเนินการปรับสภาพขยะโดยวิธีการทางชีวภาพ ซึ่งระบบทำหน้าที่ผสมและเติมอากาศทำให้มีประสิทธิภาพการย่อยสลายสูงใช้ระยะเวลาการย่อยสลายเร็ว ทั้งนี้ใช้ระยะเวลาประมาณ 1 เดือน ภายหลังการหมักสิ้นสุดลงขยะมีกลิ่นน้อยลงและมีส่วนประกอบสำคัญคือ 1) อินทรีย์สารที่เป็นผงละเอียด (ปุ๋ยอินทรีย์) ซึ่งสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการเป็นวัสดุปรับปรุงดิน 2) อินทรีย์สารที่มีส่วนผสมพลาสติกรวมถึงพลาสติกที่ไม่ถูกย่อยสลาย ขยะมูลฝอยที่ผ่านกระบวนการบำบัดนี้จะมีน้ำหนักลดลงประมาณ 65 เปอร์เซ็นต์ และมีความชื้นเฉลี่ยที่ 20 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งองค์ประกอบส่วนใหญ่ที่เหลือเป็นขยะมูลฝอยจำพวกพลาสติกประมาณ 80 เปอร์เซ็นต์ [3] เมื่อพิจารณาถึง

สัดส่วนที่เกิดขึ้นมีความเป็นไปได้ต่อการนำพลาสติกหลังจากเสร็จสิ้นจากกระบวนการหมักเชิงกลชีวภาพดังกล่าวมาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงขยะอัดก้อน (Densified fuel) สำหรับใช้ในเตาเผาเพื่อนำพลังงานกลับมาใช้ประโยชน์ใหม่ โดยการผลิตเชื้อเพลิงจากขยะ (Refuse Derived Fuel, RDF) หมายถึงการปรับปรุงและแปลงสภาพของขยะมูลฝอยให้เป็นเชื้อเพลิงแข็งที่มีคุณสมบัติในด้านความร้อน ความชื้น ขนาดและความหนาแน่นให้เหมาะสมต่อการใช้เป็นเชื้อเพลิงในเตาเผา [4]

เชื้อเพลิงขยะมีการจำแนกออกเป็น 7 ประเภท ตามลักษณะของเชื้อเพลิงและกระบวนการที่ใช้ผลิตตามมาตรฐาน American Society for Testing and Materials (ASTM) ตั้งแต่ RDF-1 ถึง RDF-7 โดย RDF-5 เป็นการนำขยะมูลฝอยที่แยกส่วนเผาไหม้ไม่ได้เช่น โลหะ แก้ว หรืออื่น ๆ สับหรือบดให้มีขนาดเล็กมาผ่านกระบวนการเพิ่มความหนาแน่นให้เป็นเม็ดเป็นก้อนหรือแท่ง โดยเรียกว่า Densified RDF เพื่อให้ง่ายต่อการนำไปใช้งานและการขนส่ง การนำขยะมูลฝอยที่เผาไหม้ได้นี้ผ่านกระบวนการขึ้นรูปก่อนนำไปใช้ในเตาเผาแบบปิดนั้นควบคุมง่ายกว่าการเผาทั้งกลางแจ้งแบบเปิด เนื่องจากองค์ประกอบทางเคมีภายหลังการเผาไหม้อาจก่อให้เกิดมลพิษ ส่งผลกระทบต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อมได้ นอกจากนี้เชื้อเพลิงขยะอัดก้อนยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้จากการผ่านกระบวนการความร้อนในรูปแบบที่แตกต่างกัน เช่น การเผาไหม้แบบใช้อากาศ (Incineration) การเผาแบบไม่ใช้อากาศ (Pyrolysis) และการเผาแบบใช้อากาศบางส่วน (Gasification) ขึ้นอยู่กับความต้องการใช้ประโยชน์จากการเผาไหม้ในรูปแบบใด [5]

ประเทศไทยและประเทศในทวีปเอเชียยังคงไม่มีข้อกำหนดถึงคุณลักษณะของขยะเชื้อเพลิง RDF ไว้เป็นมาตรฐาน แต่ประเทศในแถบยุโรป เช่น ฟินแลนด์ อิตาลี และสหราชอาณาจักร ได้มีการกำหนดคุณลักษณะไว้เป็นการเฉพาะ เช่น สหราชอาณาจักรกำหนดค่าความร้อนไม่ต่ำกว่า 18 MJ/Kg ปริมาณความชื้นอยู่ระหว่าง 7 - 28 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณเถ้าไม่เกิน 12 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณกำมะถันอยู่ระหว่าง 0.1 - 0.5 เปอร์เซ็นต์ และปริมาณคลอรีนอยู่ระหว่าง 0.3 -1.2 เปอร์เซ็นต์ เป็นต้น [6] โดยมีงานวิจัยที่นำขยะมูลฝอยชุมชนมาแปรรูปเป็นเชื้อเพลิงแข็งในรูป RDF-5 ได้ก่อนเชื้อเพลิงขยะที่มีสมบัติด้านความร้อนสูงสุดที่ 26.35 MJ/Kg [7] และจากการศึกษาการนำเชื้อเพลิงขยะนำกลับไปเป็นพลังงานความร้อน กรณีศึกษาของเมืองเดป็อกประเทศอินโดนีเซีย เพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทน ผลปรากฏว่าค่าความร้อนของเสียอยู่ที่ 35.04 MJ/kg ซึ่งค่าความร้อนทั้งหมดที่ได้รับเทียบเท่ากับพลังงานไฟฟ้า 6,635.2 GWh/ปี [8] นอกจากนี้การศึกษาศักยภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงขยะที่นำมาคัดแยกก่อนผลิตเชื้อเพลิง RDF ได้ 32.24 เปอร์เซ็นต์ โดยเชื้อเพลิงมีค่าความร้อนเฉลี่ยที่ 4,010.6 Kcal/kg แต่เมื่อพิจารณาถึงต้นทุนการผลิตและการใช้ประโยชน์จากเชื้อเพลิง RDF นั้นควรผลิตใช้ในระบบเตาเผาและมีโรงไฟฟ้าตั้งอยู่ใกล้เคียงกับโรงงานคัดแยกจึงจะทำให้คุ้มค่าต่อการลงทุน [9] ซึ่งขยะเชื้อเพลิงนั้นนับมีบทบาทสำคัญต่อระบบเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) ที่สามารถนำขยะที่ไม่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่กลับมาใช้ประโยชน์ได้และยังสามารถช่วยลดปริมาณ CO₂ ได้ถึง 2155.3106 Kt CO₂/ปี รวมถึงนำกลับความร้อนได้ 2-5.5 GCal/t [10] การใช้ประโยชน์จากเชื้อเพลิงขยะสามารถใช้ได้ทั้งในรูปแบบการผลิตเป็นพลังงานไฟฟ้าและ/หรือความร้อนโดยที่อาจจะมีการนำไปใช้ประโยชน์ในสถานที่ผลิตเชื้อเพลิงขยะเองหรือขนส่งไปใช้ในที่อื่นได้

ดังนั้น การศึกษาวิจัยนี้จึงเป็นการศึกษาการผลิตเชื้อเพลิงขยะอัดก้อน (RDF-5) โดยใช้วัตถุดิบจากวัสดุที่เป็นพลาสติกส่วนที่ได้รับจากโรงคัดแยกขยะภายหลังการบำบัดด้วยกระบวนการเชิงกล-ชีวภาพ และศึกษาองค์ประกอบเบื้องต้นรวมถึงออกแบบการทดลองเพื่อหาสภาวะที่เหมาะสมต่อการขึ้นรูป ได้แก่ แรงดันขึ้นรูป (1-10 MPa) และอุณหภูมิที่เหมาะสมซึ่งอุณหภูมิที่ใช้มีค่าใกล้เคียงกับจุดหลอมเหลวของพลาสติกส่วนใหญ่ที่มีในมูลฝอยได้แก่ HDPE (120 - 130 องศาเซลเซียส) [11] เพื่อนำไปใช้เป็นเชื้อเพลิงทางเลือกจากขยะเพื่อทดแทนเชื้อเพลิงชนิดอื่น ๆ และเป็นการใช้ประโยชน์จากขยะพลาสติกตามแนวทางของระบบเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) และการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable Development Goals: SDGs) ต่อไป



วิธีดำเนินการวิจัย

1. การจัดเตรียมวัสดุ

นำขยะพลาสติกที่อยู่ในระบบบำบัดเชิงกลชีวภาพ (MBT) ภายในพื้นที่มหาวิทยาลัย ทำการศึกษองค์ประกอบ (ภาพที่ 1) ก่อนนำไปสับด้วยเครื่องสับละเอียดขนาด 10 แรงม้า ที่มีกำลังการผลิต 100 - 140 กิโลกรัมต่อชั่วโมง นำมาร่อนผ่านตะแกรงเบอร์ 8 หรือขนาดช่อง 2.36 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปอบเพื่อไล่ความชื้นที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส ให้แห้งหรืออบจนมีน้ำหนักที่ ซึ่งเป็นขนาดที่เหมาะสมต่อการทำเชื้อเพลิงขยะอัดก้อน [12]

เตรียมบล็อกขึ้นรูปทรงกระบอก 2 ขนาด ได้แก่ ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร ยาว 15 เซนติเมตร และ 25 เซนติเมตร พร้อมฮีตเตอร์ทรงกระบอก 2 ขนาด ได้แก่ ขนาดความสูง 3 และ 10 เซนติเมตร เพื่อควบคุมอุณหภูมิของบล็อกขึ้นรูป



ภาพที่ 1 การคัดแยกองค์ประกอบขยะ

2. การศึกษองค์ประกอบขยะพลาสติก

ศึกษองค์ประกอบเบื้องต้นของขยะมูลฝอยส่วนที่ผ่านการบำบัดด้วยระบบเชิงกลชีวภาพ (MBT) โดยการสุ่มตัวอย่างเศษขยะที่อยู่ในกองระบบบำบัดเชิงกลชีวภาพจากจุดต่าง ๆ แบบสุ่มจุดละ 2 กิโลกรัม ทั้งหมด 6 จุด ก่อนนำมาผสมรวมกัน จากนั้นแบ่งออกเป็น 4 ส่วนให้เท่ากัน เลือกขยะส่วนที่อยู่ตรงข้ามกัน 2 กอง นำมาชั่งน้ำหนักก่อนนำมาแยกองค์ประกอบพลาสติกแต่ละประเภทและบันทึกน้ำหนัก [13]

3. การขึ้นรูปตัวอย่างก้อนเชื้อเพลิงจากขยะพลาสติก

เติมขยะพลาสติกปริมาณ 10 กรัม ในบล็อกขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร สูง 15 เซนติเมตร ประกอบฮีตเตอร์ขนาดสูง 3 เซนติเมตร เพื่ออัดขึ้นรูปก้อนตัวอย่างด้วยเครื่องอัดไฮดรอลิก รุ่น GA7500001 ขนาด 100 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เพื่อทดสอบความหนาแน่น (Density) การดูดซึมน้ำ (Water Absorption) [11] วิเคราะห์องค์ประกอบของขยะ (Proximate Analysis) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D3172-13 [14] และค่าความร้อน (Heating Value) ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D 5865M-19 [15] ใช้บล็อกรูปทรงกระบอกขนาดสูง 25 เซนติเมตร และเส้นผ่าศูนย์กลาง 4 เซนติเมตร ฮีตเตอร์ขนาดสูง 10 เซนติเมตร เติมขยะพลาสติก 100 กรัม อัดขึ้นรูปเพื่อทดสอบ ค่าดัชนีการขัดสี (Tumbling resistance test) ดัชนีการแตกกรว่น (Drop shatter test) ตามมาตรฐาน ASTM D3038-93 [16] และความต้านทานแรงกด (Compression test) [11] ตามแนวยาวของเชื้อเพลิงแสดงดังภาพที่ 2 และภาพที่ 3 ออกแบบการทดลองโดยกำหนดตัวแปรต้นที่ใช้ ได้แก่ อุณหภูมิขึ้นรูป (อุณหภูมิห้อง 100 องศาเซลเซียส และ 120 องศาเซลเซียส) แรงดันขึ้นรูป (10, 30, 50 และ 70 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร) ที่ระยะเวลา 5 นาที



ภาพที่ 2 บล็อกทรงกระบอกพร้อมฮีตเตอร์ความยาว 10 เซนติเมตร



ภาพที่ 3 ก้อนตัวอย่างขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส แรงขึ้นรูป 10 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร
ระยะเวลา 5 นาที

4. วิธีการทดสอบ

4.1 การทดสอบความหนาแน่น (Density)

เพื่อทราบน้ำหนักต่อปริมาตรของเชื้อเพลิง โดยการหาความหนาแน่นของก้อนตัวอย่าง คำนวณจากสมการที่ 1

$$\text{ความหนาแน่น} = \frac{\text{มวลก้อนตัวอย่าง (กรัม)}}{\text{ปริมาตรก้อนตัวอย่าง (ลบ.ซม.)}} \quad (1)$$

4.2 การทดสอบการดูดซึมน้ำ (Water Absorption)

ทดสอบความคงตัวของก้อนตัวอย่างเมื่อได้รับความชื้นโดยทำการชั่งน้ำหนักตัวอย่างก่อนแช่ก้อนตัวอย่าง ในถังน้ำที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบกำหนดใช้กระดาษทิชชูซับก้อนตัวอย่างให้แห้งก่อนนำมาชั่งน้ำหนักอีกครั้ง คำนวณปริมาณน้ำในก้อนตัวอย่างโดยใช้สมการที่ 2

$$W_u(\%) = \frac{W_t - W_i}{W_i} \times 100 \quad (2)$$

เมื่อ W_u = เปอร์เซนต์น้ำในตัวอย่าง, W_i = น้ำหนักเริ่มต้นของตัวอย่างก่อนแช่น้ำ และ W_t = น้ำหนักของตัวอย่างหลังแช่น้ำ 24 ชั่วโมง



4.3 การวิเคราะห์องค์ประกอบขยะ (Proximate Analysis)

ทดสอบหาเปอร์เซ็นต์ของความชื้น ถ้า สารระเหย และคาร์บอนคงตัว ตามวิธีมาตรฐาน ASTM D3172-13 โดยใช้ตัวอย่าง 1 กรัม ดังนี้

- เปอร์เซ็นต์ความชื้น (%) โดยการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง คำนวณเปอร์เซ็นต์ของความชื้นโดยสมการที่ 3

$$W_M(\%) = \frac{W_t - W_d}{W_i} \times 100 \quad (3)$$

เมื่อ W_M = เปอร์เซ็นต์ความชื้นของตัวอย่าง (%), W_t = น้ำหนักของตัวอย่างก่อนอบ (g), W_i = น้ำหนักเริ่มต้นของตัวอย่าง (g) และ W_d = น้ำหนัก (g) ของตัวอย่างหลังจากการอบที่อุณหภูมิ 105 องศาเซลเซียส

- เปอร์เซ็นต์สารระเหย (%) เพื่อหาการสูญเสียน้ำหนักของตัวอย่างหลังจากการเผาไหม้ในสภาวะที่มีออกซิเจนน้อยโดยการปิดด้วยฝาครอบตัวอย่างเพื่อหลีกเลี่ยงการได้รับออกซิเจนเผาที่อุณหภูมิ 925 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 7 นาที คำนวณเปอร์เซ็นต์การสูญเสียน้ำหนักตัวอย่างจากสมการที่ 4

$$W_L(\%) = \frac{W_t - W_h}{W_i} \times 100 \quad (4)$$

เมื่อ W_L = เปอร์เซ็นต์ของการสูญเสียน้ำหนักตัวอย่าง (%), W_t = น้ำหนักของตัวอย่างก่อนเผา (g) W_i = น้ำหนักเริ่มต้นของตัวอย่าง (g) และ W_h = น้ำหนัก (g) ของตัวอย่างหลังจากได้รับความร้อนที่อุณหภูมิ 925 องศาเซลเซียส

คำนวณเปอร์เซ็นต์สารระเหยจากสมการที่ 5

$$W_V(\%) = W_L - W_M \quad (5)$$

เมื่อ W_V = เปอร์เซ็นต์สารระเหยในตัวอย่าง (%), W_L = เปอร์เซ็นต์ของการสูญเสียน้ำหนักตัวอย่าง (%) และ W_M = เปอร์เซ็นต์ความชื้นในของตัวอย่าง (%)

- เปอร์เซ็นต์เถ้า (%) เพื่อนำไปวิเคราะห์สารตกค้างที่คงเหลือหลังจากการเผาไหม้ของเชื้อเพลิงโดยเผาตัวอย่างที่อุณหภูมิ 720 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมงคำนวณเปอร์เซ็นต์ของเถ้าจากสมการที่ 6

$$W_A(\%) = \frac{W_t - W_b}{W_i} \times 100 \quad (6)$$

เมื่อ W_A = เปอร์เซ็นต์เถ้าของตัวอย่าง (%), W_t = น้ำหนักของตัวอย่างก่อนเผา (g), W_i = น้ำหนักเดิมของตัวอย่างที่ใช้ (g) และ W_b = น้ำหนัก (g) ของเถ้าหลังจากการเผาตัวอย่าง

- เปอร์เซ็นต์คาร์บอนคงตัว (%) คำนวณเปอร์เซ็นต์ค่าคาร์บอนคงตัวจากสมการที่ 7

$$F_C(\%) = 100 - (W_M + W_A + W_V) \quad (7)$$

เมื่อ F_C = เปอร์เซ็นต์คาร์บอนคงตัวของตัวอย่าง (%), W_M = เปอร์เซ็นต์ความชื้นในของตัวอย่าง (%), W_A = เปอร์เซ็นต์เถ้าของตัวอย่าง (%) และ W_V = เปอร์เซ็นต์สารระเหยในตัวอย่าง

4.4 การทดสอบเปอร์เซ็นต์น้ำหนักสูญเสียหลังการขัดสี (Tumbling resistance test)

ใช้ตัวอย่าง 300 - 500 กรัม นำไปใส่ในถังหมุนที่ความเร็ว 50 รอบต่อนาที เป็นเวลา 15 นาที จากนั้นนำส่วนของเชื้อเพลิงขยะอัดก้อนที่แตกไปชั่งน้ำหนัก คำนวณเปอร์เซ็นต์น้ำหนักสูญเสียจากสมการที่ 8

$$W_1(\%) = \frac{W_1 - W_2}{W_1} \times 100 \quad (8)$$



เมื่อ W_i = เปอร์เซ็นต์สูญเสียน้ำหนักของก้อนตัวอย่าง (%), W_1 = น้ำหนักของตัวอย่างก่อนทดสอบ (g) และ W_2 = น้ำหนักของตัวอย่างหลังทดสอบ (g)

4.5 การทดสอบค่าดัชนีการแตกร่วน (Drop Shatter test)

ทดสอบโดยนำก้อนเชื้อเพลิงซึ่งน้ำหนักใส่ถุงพลาสติกประมาณ 300 กรัม จากนั้นปล่อยจากที่สูง 2 เมตร ลงสู่พื้นซีเมนต์ซ้ำ ๆ กัน 3 ครั้ง นำตัวอย่างไปร่อนด้วยตะแกรงขนาดช่อง 20 มิลลิเมตร นำส่วนของเชื้อเพลิงอัดแท่งที่เหลือไปชั่งน้ำหนัก คำนวณหาดัชนีการแตกร่วนหรือดัชนีการแตกละเอียดได้จากสมการที่ 9

$$R = \frac{W_f}{W_i} \quad (9)$$

เมื่อ R = ดัชนีการแตกร่วน W_f = น้ำหนักของเชื้อเพลิงที่เหลือหลังทดสอบ (g) และ W_i = น้ำหนักของเชื้อเพลิงก่อนทดสอบ(g)

4.6 การทดสอบความต้านทานแรงกดตามแนวยาว (Compressive Strength)

การทดสอบการต้านทานแรงกดหรือความแข็งแรงของก้อนตัวอย่าง โดยเครื่องทดสอบแรงกด รุ่น KD-3D ขนาด 300 กิโลนิวตัน วางก้อนตัวอย่างไว้ระหว่างแท่นอัดและใช้แรงอัดในทิศทางตั้งฉากจนกว่าก้อนตัวอย่างเกิดรอยแตกหรือแยกออกจากกันอ่านค่ากำลังอัดสูงสุดเพื่อระบุความแข็งแรงของก้อนตัวอย่าง คำนวณแรงอัดสูงสุดกับความยาวของก้อนตัวอย่างจากสมการที่ 10

$$\sigma_c = \frac{P_m}{L} \quad (10)$$

เมื่อ σ_c = การต้านทานแรงกดตามแนวความยาวก้อนตัวอย่าง (N/mm), P_m = แรงอัดสูงสุด (N) และ L = ความยาวก้อนตัวอย่าง (mm)

4.7 การทดสอบค่าความร้อน (Heating Value)

การทดสอบหาค่าความร้อนได้จากเครื่องบอมบ์แคลอรีมิเตอร์ รุ่น 2k e2k Combustion Calorimeter ทดสอบตัวอย่าง 3 ก้อนของแต่ละชุดการทดลอง

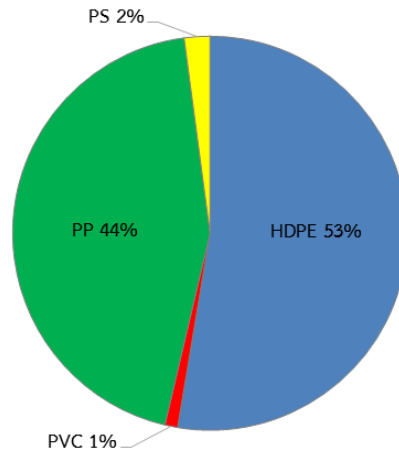
4.8 การวิเคราะห์ข้อมูล

บันทึกค่าเฉลี่ย และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (Standard Deviation; SD) วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลด้วยวิธี Analysis of variance (ANOVA) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ จากการแปลผลของโปรแกรม SPSS

ผลการวิจัย

1. องค์ประกอบเบื้องต้นของขยะมูลฝอย

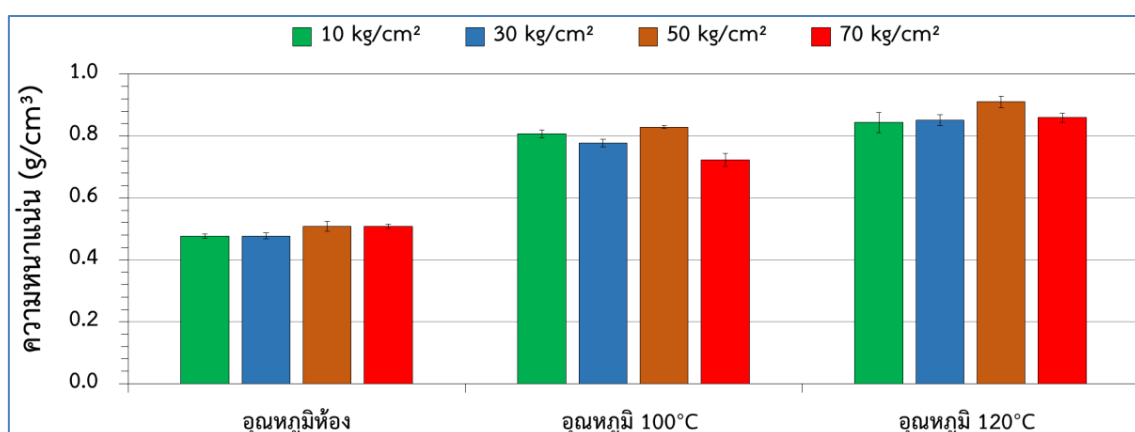
จากการสำรวจและคัดแยกองค์ประกอบเบื้องต้นของวัสดุเหลือทิ้งภายในโรงคัดแยกขยะที่ผ่านกระบวนการการคัดแยกเบื้องต้นนั้นประกอบด้วย พลาสติก เศษอาหาร และสารอินทรีย์ ซึ่งยังพบองค์ประกอบอื่น ๆ เช่น เศษกระดาษ เศษยาง เป็นต้น จากผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเบื้องต้นทำให้ทราบถึงวัสดุที่พบมากที่สุดคือ พลาสติก ปริมาณ 47 เปอร์เซนต์ รองลงมาคือ เศษอาหารและสารอินทรีย์ รวมกันได้ปริมาณ 44 เปอร์เซนต์ ซึ่งเห็นได้ชัดว่าวัสดุที่เป็นพลาสติกนั้นมีปริมาณมากกว่าเศษอาหารและสารอินทรีย์ เมื่อนำส่วนที่เป็นพลาสติกมาแยกองค์ประกอบโดยละเอียดเทียบกับปริมาณพลาสติกที่พบทั้งหมดพบพลาสติกชนิด HDPE มากถึง 53 เปอร์เซนต์ พลาสติกชนิด PP 44 เปอร์เซนต์ และโพลีเอทิลีน PS 2 เปอร์เซนต์ ดังแสดงในภาพที่ 4 ดังนั้น จึงมีความเป็นไปได้ที่จะนำขยะพลาสติกที่ปะปนอยู่ในระบบบำบัดเชิงกลชีวภาพ (MBT) มาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตเชื้อเพลิงขยะอัดก้อน หรือ RDF-5 โดยคัดแยกพลาสติกชนิด PVC ออกไป เนื่องจากมีองค์ประกอบของคลอรีนหากเผาไหม้สามารถทำให้เกิดก๊าซที่เป็นกรดสารพิษไดออกซินและสารออกาโนคลอรีนอื่น ๆ ที่เป็นอันตรายต่อสุขภาพ [17]



ภาพที่ 4 องค์ประกอบของวัสดุที่เป็นพลาสติก

2. ความหนาแน่นของเชื้อเพลิงขยะอัดก้อนจากขยะ

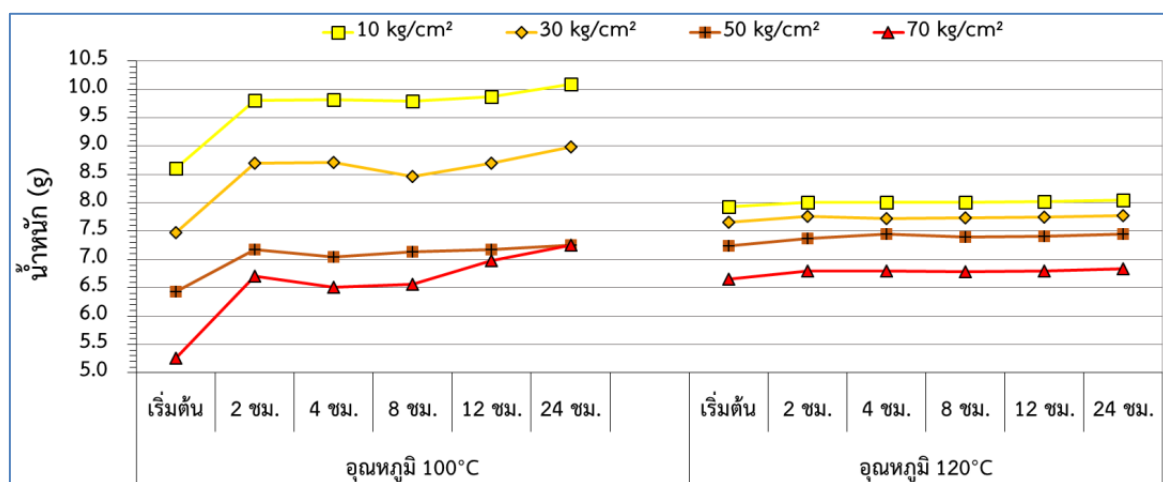
จากการขึ้นรูปในสภาวะที่ต่างกันความหนาแน่นของก้อนเชื้อเพลิงแสดงดังภาพที่ 5 จากการศึกษาพบว่าความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างในแต่ละช่วงอุณหภูมิมีค่าใกล้เคียงกันแต่เมื่อเพิ่มแรงดันถึง 70 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ทำให้มีค่าความหนาแน่นลดลง เนื่องจากการใช้แรงขึ้นรูปสูงร่วมกับอุณหภูมิการขึ้นรูปสูงนั้นมีส่วนทำให้พลาสติกในแบบมีความอ่อนตัวและมีบางส่วนละลายไหลล้นออกทางด้านบนและด้านล่างของแบบขึ้นรูปทำให้น้ำหนักของก้อนตัวอย่างลดลง เชื้อเพลิงขยะอัดก้อนที่มีความหนาแน่นสูงมีข้อดีคือ สามารถขนย้ายสะดวกและลดค่าใช้จ่ายในการจัดเก็บได้มาก นอกจากนี้ทำให้การเผาไหม้มีความสม่ำเสมอและมีเสถียรภาพมากขึ้น [18] จากงานวิจัยพบว่าเชื้อเพลิงขยะอัดก้อนที่ผลิตได้นั้นผ่านข้อกำหนด RDF5 (Densified RDF) ทั้ง 2 อุณหภูมิในการขึ้นรูปที่ 100 และ 120 องศาเซลเซียส และใช้แรงขึ้นรูปตั้งแต่ 10 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เป็นต้นไป ทั้งนี้เนื่องจากข้อกำหนดของก้อนเชื้อเพลิงขยะอัดก้อน (RDF-5) ต้องมีความหนาแน่นมากกว่า 600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร [19] ดังนั้นจากการศึกษาจึงทำให้ทราบถึงแนวทางการออกแบบการใช้แรงดันขึ้นรูปให้เหมาะสมกับช่วงอุณหภูมิที่กำหนดได้



ภาพที่ 5 ความหนาแน่นของก้อนตัวอย่างในสภาวะที่อุณหภูมิและแรงขึ้นรูปที่ต่างกันเป็นระยะเวลา 5 นาที

3. การดูดซึมน้ำ

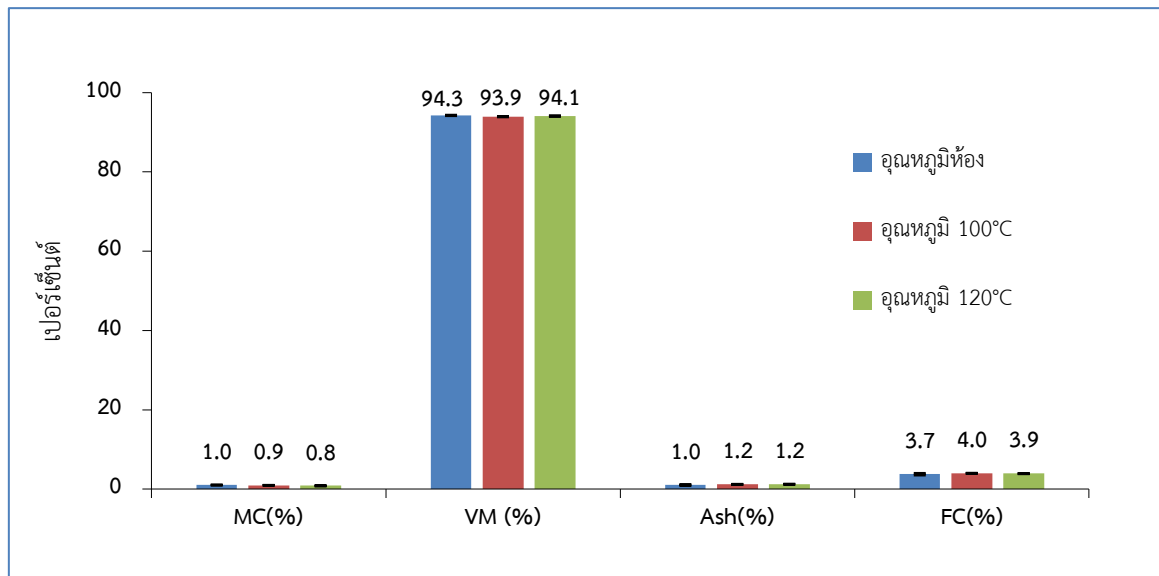
จากการทดสอบการดูดซึมน้ำของก้อนเชื้อเพลิงขยะด้วยการแช่น้ำ 24 ชั่วโมง แสดงในภาพที่ 6 จากการทดลองพบว่า ชุดการทดลองขึ้นรูปที่อุณหภูมิห้อง ก้อนตัวอย่างทั้งหมดเกิดการเปื่อยยุ่ยเสียรูปไม่สามารถทนต่อสภาวะที่มีน้ำและความชื้นสูงได้ ส่วนชุดการทดลองที่ขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 100 และ 120 องศาเซลเซียส พบว่าก้อนตัวอย่างมีการพองตัวน้อยมาก และชุดการทดลองที่ใช้อุณหภูมิการขึ้นรูป 100 องศาเซลเซียส พบว่าน้ำหนักของก้อนตัวอย่างมีค่าเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วใน 2 ชั่วโมงแรก และคงที่จนครบ 24 ชั่วโมง เนื่องจากผิวด้านนอกของก้อนตัวอย่างยังไม่สามารถประสานเชื่อมต่อกันได้ทั้งหมด ยังคงมีช่องว่างภายในก้อนตัวอย่างที่น้ำสามารถซึมผ่านเข้าไปได้ ส่วนชุดการทดลองอุณหภูมิการขึ้นรูป 120 องศาเซลเซียส มีการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักน้อยมากหรือไม่เปลี่ยนแปลงเลยเนื่องจากที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ทำให้บริเวณผิวก้อนตัวอย่างเกิดการหลอมประสานเป็นเนื้อเดียวกันทำให้น้ำไม่สามารถซึมผ่านไปได้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ GuG และคณะ (2015) [11] เมื่อใช้อุณหภูมิการอัดขึ้นรูปก้อนตัวอย่างสูงชันสามารถลดการดูดซึมน้ำได้เป็นอย่างดี การใช้แรงดันขึ้นรูปที่แตกต่างกันตั้งแต่ 10 - 70 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร พบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส มีน้ำซึมผ่านมากกว่าการใช้อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ทั้งนี้เนื่องจากการใช้อุณหภูมิสูงช่วยลดการซึมผ่านของก้อนตัวอย่างเพราะพลาสติกที่อยู่บริเวณผิวด้านนอกมีการประสานเป็นเนื้อเดียวกันได้ดีกว่าทำให้เกิดจากการหลอมของพลาสติกเมื่อได้รับความร้อนซึ่งพลาสติกที่นำมาใช้ทำเชื้อเพลิงขยะอัดก้อนนี้ส่วนใหญ่เป็นพลาสติกชนิด HDPE ที่มีจุดหลอมเหลวอยู่ระหว่าง 120 - 130 องศาเซลเซียส [11]



ภาพที่ 6 น้ำหนักของก้อนตัวอย่างในชุดอัดขึ้นรูปด้วยแรง 10 30 50 และ 70 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร โดยใช้อุณหภูมิ 100 และ 120 องศาเซลเซียส เมื่อแช่น้ำครบ 24 ชั่วโมง

4. การวิเคราะห์องค์ประกอบเชื้อเพลิงขยะอัดก้อน

การวิเคราะห์องค์ประกอบเชื้อเพลิงขยะอัดก้อน (Proximate Analysis) เป็นการศึกษาคุณสมบัติของเชื้อเพลิง โดยการวิเคราะห์ปริมาณความชื้น ปริมาณสารระเหย ปริมาณเถ้า และปริมาณคาร์บอนคงตัวของก้อนตัวอย่างในชุดการอัดขึ้นรูปทั้ง 3 อุณหภูมิ โดยใช้แรงขึ้นรูปที่ 10 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ซึ่งเป็นแรงที่ต่ำที่สุดในชุดการทดลองเนื่องจากการศึกษานี้ การใช้แรงขึ้นรูปที่ 10 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร นั้นเพียงพอที่จะทำให้คุณสมบัติของเชื้อเพลิงขยะอัดก้อนเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดแสดงดังภาพที่ 7 จากการทดสอบพบว่าปริมาณสารระเหยระหว่าง 93.9 ± 0.10 ถึง 94.3 ± 0.15 เปอร์เซ็นต์ ปริมาณคาร์บอนคงตัวระหว่าง 3.7 ± 0.41 ถึง 4.0 ± 0.08 เปอร์เซ็นต์ และปริมาณเถ้าระหว่าง 1.0 ± 0.29 ถึง 1.2 ± 0.09 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งทั้งสารระเหยและคาร์บอนคงตัวเป็นองค์ประกอบสำคัญที่ส่งผลต่อค่าความร้อนของเชื้อเพลิง สารระเหยที่มีปริมาณสูงจะทำให้เกิดควันในปริมาณมากในระหว่างการเผาไหม้ในเตาเผาหากมีค่าคาร์บอนคงตัวสูงจะทำให้มีช่วงเวลาการลุกไหม้นานขึ้น ส่วนปริมาณความชื้นมีแนวโน้มลดลงตามการใช้อุณหภูมิการอัดขึ้นรูปสูงขึ้นซึ่งมีค่าไม่เกิน 1.0 เปอร์เซ็นต์



ภาพที่ 7 การวิเคราะห์องค์ประกอบเชื้อเพลิงขยะอัดก้อน (Proximate Analysis) ของก้อนตัวอย่างในชุดการอัดขึ้นรูปทั้ง 3 อุณหภูมิด้วยแรง 10 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร

เนื่องจากความชื้นถูกระเหยออกไประหว่างการขึ้นรูปที่อุณหภูมิสูง เมื่อนำผลการวิเคราะห์องค์ประกอบเชื้อเพลิงขยะอัดก้อนเทียบกับข้อมูลงานวิจัยการผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากชีวมวล [20] และเชื้อเพลิงถ่านหิน [21] (ตารางที่ 1) นั้นพบว่ามีปริมาณความชื้นน้อยกว่าเชื้อเพลิงทั้ง 2 รูปแบบ สอดคล้องกับงานวิจัยของ GuG และคณะ (2015) [11] ซึ่งกล่าวว่าปริมาณความชื้นต่ำเป็นปัจจัยสำคัญที่ส่งผลดีสามารถทำให้ก้อนเชื้อเพลิงมีค่าความร้อนสูงขึ้น

ตารางที่ 1 การวิเคราะห์องค์ประกอบเชื้อเพลิงขยะอัดก้อน (Proximate Analysis) เทียบกับเชื้อเพลิงชีวมวลและถ่านหิน

ตัวอย่าง		ปริมาณความชื้น (%) (Moisture Content)	ปริมาณสารระเหย (%) (Volatile Matter)	ปริมาณเถ้า (%) (Ash)	ปริมาณคาร์บอนคงตัว (%) (Fixed Carbon)	การอ้างอิง
อุณหภูมิการอัดขึ้นรูป	อุณหภูมิห้อง	1.0 ^a ±0.04	94.3 ^a ±0.15	1.0 ^a ±0.29	3.7±0.41	จากการทดลอง
	อุณหภูมิ 100°C	0.9 ^a ±0.02	93.9 ^b ±0.10	1.2 ^a ±0.09	4.0±0.08	
	อุณหภูมิ 120°C	0.8 ^a ±0.17	94.1 ^{ab} ±0.22	1.2 ^a ±0.08	3.9±0.09	
ชีวมวล	เปลือกพืสดาเซีย	8.75	82.50	1.30	7.45	Garcia,et.al (2013)
	เปลือกข้าวสาลี	10.30	80	2.80	6.90	
	เศษไม้	7.96	82	1.30	8.74	
ถ่านหิน	แอนทราไซต์	0.40	6.20	6.10	87.40	Donahue,et.al (2009)
	บิทูมินัส	1.40	38.50	7.70	52.40	
	ลิกไนต์	7.60	36.80	7.90	47.70	

ที่มา : Garcia,et.al.(2013) [20], Donahue and Rais (2009) [21]

นำเสนอข้อมูลด้วยค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรเหมือนกันในแนวสดมภ์ (แนวดิ่ง) ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p > 0.05$)

5. การขัดสีและดัชนีการแตกร่วน

จากการศึกษาน้ำหนักสูญเสียจากการขัดสีและค่าดัชนีการแตกร่วน พบว่าน้ำหนักสูญเสียหลังการขัดสีจะมีค่าลดลงเมื่อใช้แรงดันและอุณหภูมิในการขึ้นรูปมากขึ้น โดยเฉพาะการใช้แรงดันขึ้นรูป 10 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ที่อุณหภูมิ 100 และ 120 องศาเซลเซียส มีค่าเปอร์เซ็นต์สูญเสียน้ำหนักที่ 5.276 ± 0.024 และ 0.011 ± 0.007 ในขณะที่แรงดันขึ้นรูป 50 กิโลกรัมต่อตารางเมตร มีค่าเท่ากับ 2.433 ± 0.016 และ 0.013 ± 0.008 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ทั้งนี้เนื่องจากการอัดขึ้นรูปของอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส ก้อนตัวอย่างยังไม่สามารถหลอมละลายเชื่อมเป็นเนื้อเดียวกันทั้งก้อน เมื่อเกิดการหมุนกระแทกทำให้เกิดการแตกมีเศษหลุดร่วงออกทางด้านบนและล่างของก้อนตัวอย่าง ส่วนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส สามารถทนทานต่อการหมุนหรือกระแทกได้ดีกว่า เมื่อนำผลทดสอบไปวิเคราะห์ดัชนีการแตกร่วน พบว่าทุกชุดการทดลองมีค่าดัชนีการแตกร่วนอยู่ระหว่าง 0.50 - 1.00 ซึ่งเป็นไปตามเกณฑ์ที่กำหนดของเชื้อเพลิงอัดแท่ง ดังนั้นเพื่อเป็นการประหยัดพลังงานและต้นทุนสามารถใช้สภาวะการขึ้นรูปที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส และแรงเป็น 10 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ซึ่งเพียงพอต่อคุณสมบัติที่เหมาะสมของเชื้อเพลิงขยะอัดก้อนในการนำไปใช้งานดังแสดงข้อมูลในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ดัชนีการขัดสีของก้อนตัวอย่างในชุดอัดขึ้นรูปอุณหภูมิ 100 และ 120 องศาเซลเซียส

อุณหภูมิการอัดขึ้นรูป (°C)	แรงดันขึ้นรูป (kg/cm ²)	เปอร์เซ็นต์น้ำหนักสูญเสีย หลังการขัดสี (%)	ดัชนีการแตกร่วน
อุณหภูมิ 100°C	10	$5.276^a \pm 0.024$	$0.993^a \pm 0.02$
	30	$4.576^b \pm 0.018$	$0.992^b \pm 0.001$
	50	$2.433^c \pm 0.016$	$0.997^c \pm 0.003$
	70	$0.290^d \pm 0.009$	$0.998^d \pm 0.002$
อุณหภูมิ 120°C	10	$0.011^e \pm 0.007$	$0.999^e \pm 0.001$
	30	$0.007^e \pm 0.003$	$0.999^e \pm 0.001$
	50	$0.013^e \pm 0.008$	$0.999^e \pm 0.001$
	70	nd	nd

nd : ก้อนเชื้อเพลิงไหลออกจากแบบขึ้นรูปและมีรูปทรงไม่สมบูรณ์

นำเสนอข้อมูลด้วยค่าเฉลี่ย $\pm$ ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน

หมายเหตุ : ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรเหมือนกันในแนวสทมภ์ (แนวตั้ง) ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p > 0.05$)

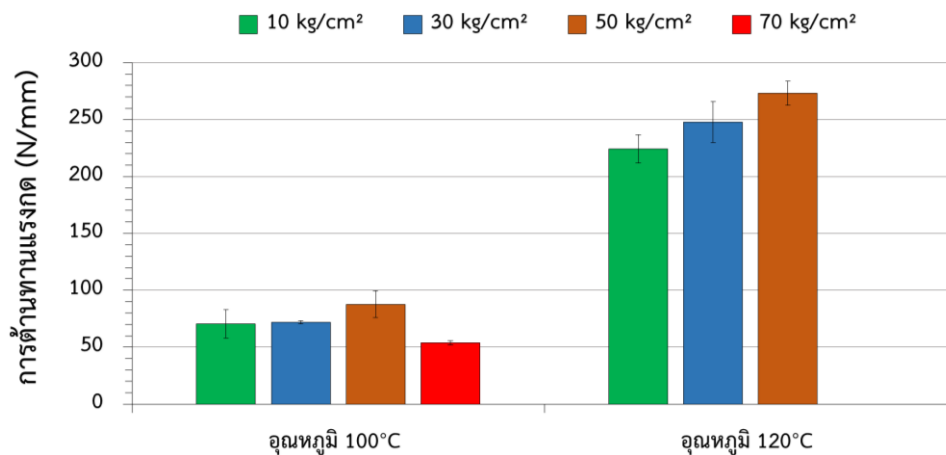
6. การต้านทานแรงกดตามแนวความยาวของเชื้อเพลิงขยะอัดก้อน

จากการทดสอบการต้านทานแรงกดตามแนวความยาวของเชื้อเพลิงขยะอัดก้อนในสภาวะการขึ้นรูปที่แตกต่างกัน ดังแสดงในภาพที่ 8 พบว่าชุดการอัดขึ้นรูปอุณหภูมิ 100 องศาเซลเซียส มีค่าการต้านทานแรงกดน้อยกว่าที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส โดยมีค่าสูงสุดที่ 87.64 ± 5.32 นิวตันต่อมิลลิเมตร ที่แรงดันขึ้นรูป 50 กิโลกรัมต่อตารางเมตร ส่วนที่อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส มีค่าสูงสุดที่ 273.27 ± 8.14 นิวตันต่อมิลลิเมตร ที่แรงดันเดียวกัน ซึ่งการใช้อุณหภูมิและแรงดันที่เหมาะสมสามารถทำให้มีการต้านทานแรงกดของก้อนตัวอย่างสูง มีคุณสมบัติเชิงกลที่ดีสะดวกต่อการจัดเก็บและขนย้าย ง่ายต่อการจัดการและการเก็บรักษาได้เป็นอย่างดี [11] ถ้าหากต้องการนำไปใช้งานจริงผู้ใช้งานสามารถพิจารณาถึงปัจจัยเรื่องการประหยัดพลังงานเพื่อลดต้นทุนร่วมด้วย ซึ่งจากการศึกษานี้เห็นได้ชัดเจนว่าสามารถใช้แรงกดขึ้นรูปต่ำสุดที่ 10 กิโลกรัมต่อตารางเมตร อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส นั้นเพียงพอต่อการขึ้นรูปและนำไปใช้งานได้

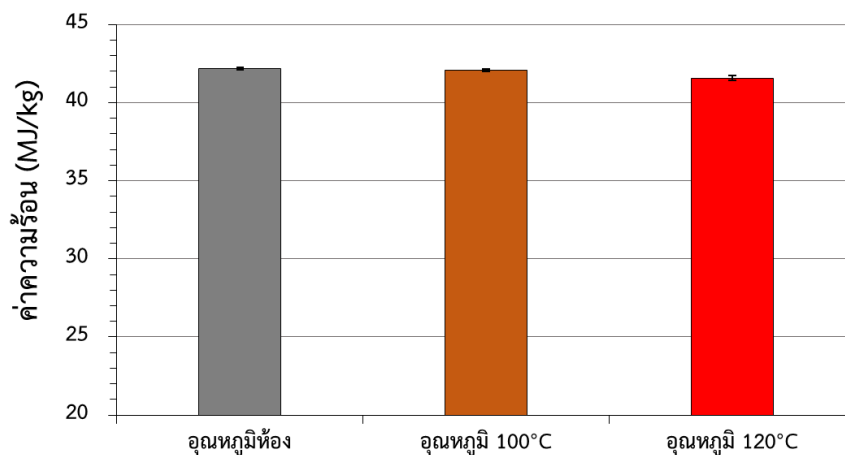


7. ค่าความร้อน

จากการทดสอบค่าความร้อนของเชื้อเพลิงขยะอัดก้อน ที่สภาวะแรงดันขึ้นรูปที่ 10 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร และอุณหภูมิการอัดขึ้นรูปทั้ง 3 สภาวะ ดังแสดงในภาพที่ 9 พบว่าเมื่ออุณหภูมิการอัดขึ้นรูปแตกต่างกัน เชื้อเพลิงขยะอัดก้อนมีค่าความร้อนระหว่าง 41.57 ± 0.29 ถึง 42.18 ± 0.10 เมกะจูลต่อกิโลกรัม เมื่อนำไปเปรียบเทียบกับค่าพลังงานความร้อนจากงานวิจัยอื่นตามข้อมูลอ้างอิงพบว่ามีค่าความร้อนใกล้เคียงกับกลุ่มพลาสติกและปิโตรเลียมที่ 41.4-48.6 เมกะจูลต่อกิโลกรัม [22] รวมถึงก๊าซธรรมชาติที่ 46.50 - 51.20 เมกะจูลต่อกิโลกรัม



ภาพที่ 8 การต้านทานแรงกดตามแนวยาว (N/mm) ที่แรงดันขึ้นรูปที่แตกต่างกัน อุณหภูมิ 100 และ 120 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 5 นาที



ภาพที่ 9 ค่าความร้อน (MJ/kg) ของเชื้อเพลิงขยะอัดก้อน ในชุดการอัดขึ้นรูปทั้ง 3 อุณหภูมิ ที่แรงดันขึ้นรูป 10 กิโลกรัมต่อตารางเมตร เป็นเวลา 5 นาที

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาการทำเชื้อเพลิงอัดก้อนขยะพลาสติกที่ได้จากระบบบำบัดเชิงกลชีวภาพ (MBT) ขยะส่วนใหญ่ที่นำมาขึ้นรูปเป็นก้อนเชื้อเพลิงมีองค์ประกอบเป็นพลาสติกมากถึง 47.50 เปอร์เซ็นต์ จากองค์ประกอบขยะทั้งหมด เมื่อนำพลาสติกมาแยกองค์ประกอบพบพลาสติกชนิด HDPE 52.63 เปอร์เซ็นต์ พลาสติกชนิด PP 44.21 เปอร์เซ็นต์ และพลาสติก PS (โฟม) 2.11 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งเป็นองค์ประกอบที่เหมาะสมต่อการนำมาทำเป็นเชื้อเพลิงขยะอัดก้อน RDF ประเภทที่ 5

หรือ RDF-5 ที่ถูกจำแนกไว้ในมาตรฐาน ASTM เพื่อสะดวกต่อการนำไปรีไซเคิลเป็นพลังงาน [23] และจากการศึกษากระบวนการขึ้นรูปเชื้อเพลิงขยะอัดก้อนนั้นสามารถขึ้นรูปโดยใช้แรงอัดที่ 10 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร ควบคุมอุณหภูมิที่ 120 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 5 นาที นั้นเพียงพอที่จะทำให้ได้ก้อนเชื้อเพลิงที่มีรูปทรงสมบูรณ์มีการดูดซึมน้ำต่ำ เนื่องจากความร้อนที่ใช้สามารถทำให้พลาสติกหลอมละลายเชื่อมติดกันส่งผลให้ก้อนเชื้อเพลิงมีความแข็งแรงมากขึ้น เมื่อเทียบจากผลการศึกษาแรงกดตามแนวยาวของก้อนตัวอย่างมีค่าเฉลี่ยสูงถึง 220 นิวตันต่อมิลลิเมตร โดยผลการศึกษาที่ได้เป็นไปในทิศทางเดียวกับงานวิจัยของ Gug และคณะ (2015) [11] ที่มีผลการศึกษาการทำเชื้อเพลิงขยะอัดก้อนจากพลาสติกประเภทต่าง ๆ ที่อุณหภูมิเหมาะสมจะช่วยลดการดูดซึมน้ำของก้อนเชื้อเพลิงทำให้สะดวกต่อการนำไปใช้งานในพื้นที่กลางแจ้งหรือบริเวณที่มีความชื้นสูง

นอกจากนี้เมื่อพิจารณาจากผลการศึกษาคุณสมบัติของเชื้อเพลิงขยะอัดก้อน ได้แก่ ความหนาแน่น ค่าความร้อน ค่าดัชนีการแตกร่วนนั้น พบว่าก้อนเชื้อเพลิงมีคุณสมบัติที่มีความหนาแน่นเป็นไปตามเกณฑ์มาตรฐาน RDF-5 ที่ความหนาแน่นไม่น้อยกว่า 600 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร (ดังผลการศึกษาที่แสดงในภาพที่ 5) ส่วนค่าดัชนีการแตกร่วนของก้อนเชื้อเพลิง พบว่ามีค่าอยู่ 0.999 แสดงถึงก้อนเชื้อเพลิงมีความทนทานต่อการกระแทกได้ดีเหมาะแก่การขนส่งทางไกลหรือได้รับการกระทบกระเทือนในระหว่างการขนส่ง ค่าความร้อนของก้อนเชื้อเพลิงจากขยะมีค่าสูงกว่า 41 เมกะจูลต่อกิโลกรัม เนื่องจากองค์ประกอบของพลาสติกเป็นสารประกอบไฮโดรคาร์บอน [22] การที่เชื้อเพลิงขยะอัดก้อนจากขยะพลาสติกมีค่าความร้อนสูงจึงมีความเหมาะสมแก่การนำมาใช้เป็นพลังงานเพื่อประโยชน์ในด้านต่าง ๆ อีกทั้งยังเป็นการลดปริมาณขยะพลาสติกได้เป็นอย่างดี ตอบสนองนโยบายระดับประเทศเป็นหนึ่งในรูปแบบเศรษฐกิจ BCG (BCG Model) ได้แก่ เศรษฐกิจชีวภาพ (Bio economy) เศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) และเศรษฐกิจสีเขียว (Green Economy) เพราะการนำขยะกลับมาใช้ประโยชน์ถือว่าตอบโจทย์ระบบเศรษฐกิจหมุนเวียน (Circular Economy) และเป็นส่วนหนึ่งของการพัฒนาที่ยั่งยืน (Sustainable Development Goals: SDGs) ต่อไป

ข้อเสนอแนะ

ในการขึ้นรูปก้อนเชื้อเพลิงจากพลาสติกหากมีการใช้อุณหภูมิ 120 องศาเซลเซียส ไม่จำเป็นต้องใช้แรงกดขึ้นรูปมากถึง 70 กิโลกรัมต่อตารางเซนติเมตร เนื่องจากจะทำให้ตัวอย่างไหลล้นออกมาจากแบบหล่อระหว่างทำการขึ้นรูปทำให้มีรูปทรงไม่สมบูรณ์

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยครั้งนี้ได้รับงบประมาณสนับสนุนการวิจัยประเภทบุคลากรสายวิชาการจากงบประมาณรายได้ คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2565

เอกสารอ้างอิง

1. กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. รายงานสถานการณ์สถานที่กำจัดมูลฝอยชุมชนของประเทศไทย ปี พ.ศ. 2563. กรุงเทพฯ: ธนสิริปริ้นติ้ง จำกัด; 2564.
2. กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. การจัดการขยะมูลฝอยชุมชนอย่างครบวงจร คู่มือสำหรับผู้บริหารองค์กรปกครองส่วนท้องถิ่น. [อินเทอร์เน็ต]. 2564 [เข้าถึงเมื่อ 3 พ.ย. 2566]. เข้าถึงได้จาก: <https://reo02.mnre.go.th/attachment/iu/download.php?WP=qUlcNktjpQlgZKqCGWOghJstqTgcWat2pQAgAaplGQAgG2rDqYyc4Uux>



3. ศูนย์ความเป็นเลิศทางด้านชีวมวล มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี. ระบบบำบัดขยะด้วยวิธีเชิงกลและชีวภาพ MBT เทคโนโลยีการจัดการขยะแบบครบวงจร. [อินเทอร์เน็ต]. 2560 [เข้าถึงเมื่อ 20 ก.ค. 2566]. เข้าถึงได้จาก: <http://biomass.sut.ac.th/biomass/?page=WebInfoMenu/webInfoShow&id=18>
4. กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. ขยะเชื้อเพลิง หมายเหตุมลพิษ. [อินเทอร์เน็ต]. 2554 [เข้าถึงเมื่อ 20 ก.ค. 2566]. เข้าถึงได้จาก: https://www.pcd.go.th/wp-content/uploads/2020/05/pcdnew-2020-05-31_06-13-42_030952.pdf
5. Chavando JAM, Silva VB, Tarelho L, Cardoso JS, Eusébio D. Snapshot review of refuse-derived fuels. Utilities Policy 2022;74(1):101316.
6. Nithikul J. Potential of Refuse Derived Fuel Production from Bangkok Municipal Solid Waste. MSc. Thesis, Asian Institute of Technology. Thailand; 2007.
7. วสันต์ ปินะเต, ดวงกมล ดังโพนทอง. การผลิตเชื้อเพลิง RDF-5 จากขยะชุมชน: กรณีศึกษามหาวิทยาลัยราชภัฏมหาสารคาม. วารสารวิชาการคณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏลำปาง 2559;9(1):72-86.
8. Sarwono A, Septiariva IY, Qonitan FD, Zahra NL, Sari MM, Fauziah EN, et al. Refuse Derived Fuel for Energy Recovery by Thermal Processes. A Case Study in Depok City, Indonesia. J Adv Res Fluid Mech Therm Sci 2021;88(1):12-23.
9. รัตติกร เจริญพจน์. ศักยภาพการผลิตกระแสไฟฟ้าจากเชื้อเพลิงขยะ. ใน: เอกสารประกอบการประชุมวิชาการระดับชาติ การประชุมวิชาการเครือข่ายวิศวกรรมเครื่องกลแห่งประเทศไทย ครั้งที่ 33 วันที่ 2 - 5 กรกฎาคม 2562. คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหาสารคาม. อุตรธานี; 2562. หน้า 701-6.
10. Shehata N, Obaideen K, Sayed ET, Abdelkareem MA, Mahmoud MS, Salamony AH, Mahmoud H, et al. Role of refuse-derived fuel in circular economy and sustainable development goals. Process Saf. Environ. Prot. 2022;163:558-73.
11. Gug J, Cacciola D, Sobkowicz M. Processing and properties of a solid energy fuel from municipal solid waste (MSW) and recycled plastics. Waste Management 2015;35:283-92.
12. อุกฤต สมัครสมาน. การผลิตเชื้อเพลิงอัดแท่งจากของเสียและกากตะกอนของกระบวนการบดย่อยขวดพลาสติกรีไซเคิล. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ [อินเทอร์เน็ต]. 2561 [เข้าถึงเมื่อ 4 ม.ค. 2567]. เข้าถึงได้จาก: <https://nuir.lib.nu.ac.th/dspace/bitstream/123456789/3061/1/Fulltext.pdf>
13. กรมควบคุมมลพิษ กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. คู่มือการคัดแยกองค์ประกอบขยะมูลฝอย ณ สถานที่กำจัดขยะมูลฝอย. [อินเทอร์เน็ต]. 2565 [เข้าถึงเมื่อ 7 พ.ย. 2566]. เข้าถึงได้จาก: <https://www.pcd.go.th/publication/26771>
14. American Society for Testing and Materials. Standard Practice for Proximate Analysis of Coal and Coke. [Internet]. 2002 [cited 2023 Dec 12]. Available from: https://www.kelid1.ir/FilesUp/ASTM_STANDARS_971222/D3172.pdf
15. American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Gross Calorific Value of Coal and Coke. [Internet]. 2003 [cited 2023 Dec 12]. Available from: https://www.kelid1.ir/FilesUp/ASTM_STANDARS_971222/D5865.pdf
16. American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Drop Shatter Test for Coke. [Internet]. 1999 [cited 2023 Dec 12] Available from: www.kelid1.ir/FilesUp/ASTM_STANDARS_971222/D3038.pdf



17. วลัยพร มุขสุวรรณ. พลาสติกในชีวิตประจำวัน : ตอนที่ 2 โพลีไวนิลคลอไรด์ ฐานความรู้เรื่องความปลอดภัยด้านสารเคมี. [อินเทอร์เน็ต]. 2551 [เข้าถึงเมื่อ 20 ก.ค. 2566]. เข้าถึงได้จาก: <http://www.chemtrack.org/News-Detail.asp?TID=4&ID=12>
18. Krizan P, Matuš M, Šooš L, Peetsalu P, Kask Ü, Menind A. Briquetting of municipal solid waste by different technologies in order to evaluate its quality and properties. *Agron Res* 2011;9(Special Issue I):115-23.
19. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. พลังงานขยะ คู่มือการพัฒนาและการลงทุนผลิตพลังงานทดแทน ชุดที่ 6. [อินเทอร์เน็ต]. 2554 [เข้าถึงเมื่อ 20 ก.ค. 2566]. เข้าถึงได้จาก: <https://webkc.dede.go.th/testmax/sites/default/files/พลังงาน%20ขยะ.pdf>
20. García R, Pizarro C, Lavín G, Bueno L. Biomass proximate analysis using Thermogravimetry. *Bioresour Technol* 2013;139:1–4.
21. Donahue J, Rais A. Proximate analysis of coal. *J Chem Educ* 2009;86(2):222-4.
22. Subramanian P. Plastics recycling and waste management in the US. *Resour Conserv Recycl* 2000;28(3-4):253–63.
23. วีรชัย ออาจหาญ. การศึกษาแนวทางบริหารจัดการขยะชุมชนเพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทนแบบครบวงจร (ระดับชุมชน). รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ [อินเทอร์เน็ต]. 2564 [เข้าถึงเมื่อ 3 พ.ย. 2566]. เข้าถึงได้จาก: <https://webkc.dede.go.th/testmax/sites/default/files/รายงานฉบับสมบูรณ์%20การศึกษาแนวทางบริหารจัดการขยะชุมชน.pdf>



การหาปริมาณซัลไฟด์เพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบผลิตแก๊สชีวภาพ

Analysis of Sulfide Content for the Enhancement of Biogas Production System

พัชรี อินธนู^{1*} และ ณัฐวรรณ สืบนันตา²

¹สาขาวิชานวัตกรรมเคมีอุตสาหกรรม คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50290

²สาขาวิชาเคมีอุตสาหกรรมและเทคโนโลยีสิ่งทอ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50290

Patcharee Intanoo^{1*} and Nuttawan Suebnanta²

¹Department of Industrial Chemistry Innovation, Faculty of Science, Maejo University, Chiang Mai 50290

²Department of Industrial Chemistry and Textile Technology Faculty of Science, Maejo University,
Chiang Mai 50290

*Corresponding author: patchareeintanoo@gmail.com

Received: 28 August 2024/ Revised: 19 January 2024/ Accepted: 23 January 2024

บทคัดย่อ

ในงานวิจัยนี้มีการศึกษาปริมาณซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพเพื่อเป็นแนวทางในการพัฒนาระบบผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารด้วยระบบตกตะกอนไร้อากาศไหลขึ้นชั้นตอนเดียว (single-stage upflow anaerobic sludge blanket, UASB) ณ อุณหภูมิเมโซฟิลิก (37 องศาเซลเซียส) โดยไม่ควบคุมค่าความเป็นกรดต่าง จากการศึกษพบว่าในกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพนอกจากจะพบองค์ประกอบของแก๊สมีเทน แก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ และแก๊สไฮโดรเจนแล้วยังพบองค์ประกอบของไฮโดรเจนซัลไฟด์ซึ่งไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่พบมี 2 วัฏภาค คือ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ในวัฏภาคแก๊สหรือแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์และไฮโดรเจนซัลไฟด์ในวัฏภาคของเหลวหรือซัลไฟด์ส่วนที่ละลาย (dissolved sulfide) ที่เกิดจากการละลายของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ในน้ำ ปริมาณซัลไฟด์ส่วนที่ละลายและปริมาณแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่พบอยู่ในช่วง 10-30 และ 120-180 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าปริมาณแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์เป็นปริมาณที่ไม่ส่งผลต่อคุณสมบัติของแก๊สชีวภาพหากนำไปใช้งานด้านพลังงาน คือ องค์ประกอบของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ในแก๊สชีวภาพจะไม่ส่งผลต่อค่าความร้อนของแก๊สชีวภาพ ในขณะที่ปริมาณซัลไฟด์ส่วนที่ละลายจะส่งผลต่อประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพด้วยการเกิดสารประกอบโลหะซัลไฟด์จากซัลไฟด์ไอออนที่แตกตัวจากซัลไฟด์ส่วนที่ละลายจนทำให้สารอาหารรองในระบบตกตะกอนกับซัลไฟด์ไอออนซึ่งจะเห็นได้จากสีที่ค่อย ๆ เข้มขึ้นของเศษอาหารที่ผ่านการหมักเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นจึงเป็นสาเหตุให้ปริมาณสารอาหารรองในระบบลดลงอยู่ในระดับที่ไม่เพียงพอต่อความต้องการของเชื้อจุลินทรีย์ที่ใช้สารอาหารรองสำหรับการสร้างน้ำย่อยหรือเอนไซม์ทำให้ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพลดต่ำลงส่งผลให้ปริมาณแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้ลดลง

คำสำคัญ: แก๊สชีวภาพ ไฮโดรเจนซัลไฟด์ โลหะซัลไฟด์ เศษอาหาร ระบบตกตะกอนไร้อากาศไหลขึ้นชั้นตอนเดียว

Abstract

The research investigated the quantity of sulfide generated in the process of producing biogas as a guideline for developing a biogas production system from food waste using a single-stage upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor at mesophilic temperature (37 °C), without pH control. The study revealed that in the biogas production process, along with the identified gas components such as CH₄, CO₂, and H₂, hydrogen sulfide (H₂S) components were also found. These H₂S components existed in two forms: hydrogen sulfide in the gas phase and in the liquid phase known as dissolved hydrogen sulfide, which resulted from the dissolution of hydrogen sulfide gas in water. The quantities of dissolved sulfide and hydrogen sulfide gas were observed in the ranges of 10-30 and 120-180 mg/L, respectively. It was evident that the quantity of hydrogen sulfide gas did not significantly affect the characteristics of the biogas in term of reducing a heating value of biogas if it were to be utilized for energy. On the other hand, the quantity of dissolved sulfide impacted the efficiency of biogas production due to the formation of metal sulfide complexes from the dissolved sulfide ions. These complexes gradually intensified in color as the rate of organic substrate feeding increased. This phenomenon caused a reduction in the levels of micronutrients in the anaerobic system, resulting in insufficient supply for the microbial enzymes responsible for biogas production. Consequently, the biogas production efficiency decreased, as evidenced by the reduced yield of biogas.

Keywords: Biogas, hydrogen sulfide, metal sulfide, food waste, upflow anaerobic sludge blanket (UASB)

บทนำ

ในปัจจุบันปริมาณความต้องการการใช้พลังงานมีแนวโน้มเพิ่มสูงขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของจำนวนประชากรจนทำให้เกิดปัญหาด้านพลังงานทั้งทางตรงและทางอ้อม เช่น ราคาของน้ำมัน แก๊สธรรมชาติ แก๊สหุงต้มเพิ่มสูงขึ้น และแหล่งพลังงานสำรอง โดยเฉพาะอย่างยิ่งแหล่งพลังงานฟอสซิลมีปริมาณลดลง เป็นต้น จากปัญหาด้านพลังงานดังกล่าวจึงมีการคิดค้นแหล่งพลังงานใหม่ที่สามารถผลิตพลังงานได้เทียบเท่ากับแหล่งพลังงานฟอสซิลและมีความยั่งยืน หนึ่งในตัวเลือกที่น่าสนใจ คือ แก๊สชีวภาพ แก๊สชีวภาพเป็นแก๊สที่มีแก๊สมีเทนเป็นองค์ประกอบหลักจึงทำให้แก๊สชีวภาพมีคุณสมบัติเช่นเดียวกับแก๊สธรรมชาติ มากไปกว่านั้นการนำแก๊สชีวภาพมาใช้ประโยชน์ยังถือเป็นการลดปริมาณการปล่อยแก๊สเรือนกระจกชนิดแก๊สมีเทนออกสู่บรรยากาศ เนื่องจากแก๊สมีเทนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สที่ได้จากการหมักหมมของเสียอินทรีย์ในที่โล่งประกอบกับการกำจัดของเสียอินทรีย์ในประเทศไทยมักใช้วิธีการฝังกลบหรือนำของเสียอินทรีย์มากองรวมกันในที่โล่งจนเกิดการหมักหมมและปล่อยแก๊สมีเทนในปริมาณสูงออกสู่บรรยากาศโดยตรงจึงทำให้สาเหตุของภาวะโลกร้อนในปัจจุบันเกิดมาจากปริมาณแก๊สมีเทนในปริมาณสูงในบรรยากาศ [1] ดังนั้นหากนำแก๊สชีวภาพที่ได้จากการหมักหมมของเสียอินทรีย์มาใช้ประโยชน์แทนการปล่อยออกสู่บรรยากาศโดยตรงจะช่วยลดปริมาณแก๊สเรือนกระจกได้ เช่น การใช้แก๊สชีวภาพ 1 กิโลกรัม ในการประกอบอาหารแทนแก๊สหุงต้ม 1 กิโลกรัม สามารถลดปริมาณการปล่อยแก๊สเรือนกระจกได้สูงถึงร้อยละ 54.00 [2] อีกทั้งในการผลิตแก๊สชีวภาพด้วยการหมักของเสียอินทรีย์นอกจากจะเกิดแก๊สมีเทนแล้วยังเกิดแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ซึ่งอาจถูกกำจัดออกจากกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพด้วยการปลดปล่อยออกสู่บรรยากาศ อย่างไรก็ตามปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพนั้นจัดอยู่ในระดับที่ต่ำมากเมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ที่เกิดขึ้นในภาคพลังงานและในภาคอุตสาหกรรม [3] ดังนั้นปริมาณแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์จากกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพจึงไม่ส่งผลต่อการเกิดภาวะโลกร้อน



ในการติดตั้งระบบผลิตแก๊สชีวภาพมักติดตั้งภายใต้สภาวะไร้อากาศ (anaerobic fermentation) ณ อุณหภูมิเมโซฟิลิก (37 องศาเซลเซียส) ซึ่ง ณ อุณหภูมิเมโซฟิลิกถือเป็นอุณหภูมิที่นิยมมากในระดับครัวเรือนและระดับอุตสาหกรรมเนื่องจากเป็นช่วงอุณหภูมิที่ใช้พลังงานน้อยจึงมีต้นทุนในการติดตั้งต่ำและยังมีประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สชีวภาพใกล้เคียงกับสภาวะอื่น อีกทั้ง ณ อุณหภูมิเมโซฟิลิกยังเป็นสภาวะแวดล้อมที่เป็นมิตรต่อเชื้อจุลินทรีย์ชนิดผลิมีเทนอีกด้วย [4] การผลิตแก๊สชีวภาพจะอาศัยกลไกทางชีววิทยาผ่านปฏิกิริยาชีวเคมี และวัตถุดิบที่นิยมนำมาใช้เป็นสารตั้งต้นในการผลิตแก๊สชีวภาพจัดอยู่ในกลุ่มของเสียอินทรีย์ที่ประกอบด้วยสารกลุ่มคาร์โบไฮเดรต โปรตีน และไขมันที่สามารถย่อยสลายเพื่อเปลี่ยนไปเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สได้ง่ายด้วยเชื้อจุลินทรีย์ [5]

ประสิทธิภาพของกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพจะขึ้นอยู่กับความสามารถของเชื้อจุลินทรีย์ในการเปลี่ยนวัตถุดิบเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สซึ่งสัมพันธ์กับการดำรงอยู่ได้ของเชื้อจุลินทรีย์ในระบบ กล่าวคือสภาวะของระบบต้องเป็นสภาวะที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตและมีปริมาณสารอาหารที่เพียงพอต่อการทำกิจกรรมของเชื้อจุลินทรีย์ โดยการควบคุมสภาวะให้มีความเหมาะสมต่อการดำรงอยู่ของเชื้อจุลินทรีย์สามารถดำเนินการได้ ในขณะที่การควบคุมปริมาณสารอาหารให้อยู่ในระดับที่เพียงพอนั้นทำได้ยาก เนื่องจากสารอาหารมักเกิดการสูญหายระหว่างการดำเนินงานของระบบโดยเฉพาะอย่างยิ่งสารอาหารรองที่เชื้อจุลินทรีย์ต้องการในปริมาณน้อยและขาดไม่ได้แม้ว่าความต้องการของสารอาหารรองจะอยู่ในระดับหน่วยส่วนในพันล้านส่วน (ppb) [6] สารอาหารรองเป็นสารประกอบกลุ่มโลหะที่มีประจุสองบวก (M^{2+}) และวัตถุดิบจำพวกขยะอินทรีย์และน้ำเสียในอุตสาหกรรมมักมีสารอาหารรองในระดับที่สมดุลจึงไม่จำเป็นต้องเพิ่มปริมาณสารอาหารรองด้วยการเติมสารเคมีกลุ่มออกไซด์หรือกลุ่มคลอไรด์ของโลหะ อย่างไรก็ตามในระหว่างกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพมักพบปัญหาปริมาณสารอาหารรองที่ไม่เพียงพอต่อความต้องการของเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งมีสาเหตุมาจากแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ (H_2S) ที่เกิดขึ้นพร้อมกับแก๊สมีเทนในปริมาณที่ส่งผลเสียต่อเชื้อจุลินทรีย์ (ความเข้มข้นประมาณ 1,000-20,000 มิลลิกรัมต่อลิตร) หรืออาจมีสาเหตุมาจากการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของซัลเฟตในสารอินทรีย์ประเภทโปรตีนในสภาวะความเป็นกรดต่ำ ($pH < 7$) แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่เกิดขึ้นในระบบบางส่วนสามารถละลายได้น้ำเนื่องจากแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์มีความสามารถในการละลายน้ำที่ดี (ณ อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์สามารถละลายน้ำได้ 3.40×10^{-3} มิลลิกรัมต่อลิตร หรือ 100 มิลลิโมลาร์) เมื่อแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ละลายน้ำจะเกิดการแตกตัวให้ซัลไฟด์ไอออน (S^{2-}) ที่สามารถทำปฏิกิริยากับสารอาหารรอง เช่น Fe^{2+} , Co^{2+} , Mn^{2+} , Mo^{2+} , Cd^{2+} , Cr^{2+} และ Ni^{2+} เป็นต้น [7] จนเกิดเป็นสารประกอบโลหะซัลไฟด์ตกตะกอนบริเวณด้านล่างของถังปฏิกรณ์ส่งผลให้เชื้อจุลินทรีย์ไม่สามารถนำสารอาหารรองไปใช้ประโยชน์ในด้านการสร้างน้ำย่อยหรือเอนไซม์ได้เป็นสาเหตุให้ระบบผลิตแก๊สชีวภาพล้มเหลว เพื่อป้องกันความล้มเหลวของระบบผลิตแก๊สชีวภาพและลดการสูญหายของสารอาหารรองสามารถดำเนินการได้ด้วยการเติมสารอินทรีย์ เรียกว่า สารคีเลตลงไปในระบบซึ่งเป็นการป้องกันการเกิดซัลไฟด์ไอออน [8]

ในงานวิจัยนี้ศึกษาการเกิดซัลไฟด์และปริมาณซัลไฟด์ในกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารด้วยระบบตกตะกอนไร้อากาศไหลขึ้นชั้นตอนเดียว (Single-stage upflow anaerobic sludge blanket, UASB) ภายใต้สภาวะไร้อากาศที่อุณหภูมิเมโซฟิลิก (37 องศาเซลเซียส) และไม่ควบคุมค่าความเป็นกรดต่ำ (pH) เพื่อเป็นแนวทางในการลดและการป้องกันการเกิดซัลไฟด์ไอออนให้อยู่ในระดับที่ต่ำกว่าระดับความเป็นพิษต่อเชื้อจุลินทรีย์ตลอดจนเป็นแนวทางในการพัฒนากระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพให้มีประสิทธิภาพมากยิ่งขึ้น

วิธีดำเนินการวิจัย

ตะกอนหัวเชื้อในการวิจัยนี้ได้มาจากกระบวนการบำบัดน้ำเสียของโรงงานผลิตเอทานอลจากมันสำปะหลังของบริษัท ทรัพย์ทิพย์ จำกัด จังหวัดลพบุรี ตะกอนหัวเชื้อจะถูกนำมากำจัดเศษหินดินและทรายด้วยการร่อนผ่านตะแกรงขนาด 250 ไมครอน และเก็บที่อุณหภูมิ 1 องศาเซลเซียส ก่อนนำไปใช้งาน ตะกอนหัวเชื้อที่ใช้ในการวิจัยนี้มีความเข้มข้นเริ่มต้น 70,880 มิลลิกรัมต่อลิตร



เศษอาหารในการวิจัยนี้ได้มาจากครัวอ่างทอง อาคารจุฬารักษ์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ จังหวัดเชียงใหม่ และเป็นเศษอาหารที่ประกอบด้วยเศษข้าว เศษพืชผัก และเศษเนื้อสัตว์ในอัตราส่วน 72.89 : 18.75 : 8.36 โดยน้ำหนักตามลำดับ จากการศึกษาส่วนประกอบของเศษอาหารจะเห็นว่าเศษอาหารที่ใช้จัดเป็นของเสียอินทรีย์ที่อยู่กลุ่มคาร์โบไฮเดรต (carbohydrate-rich material) เศษอาหารจะถูกนำมาลดขนาดด้วยเครื่องป่นอิเล็กทรอนิกส์ที่มีความเร็วรอบ 14,000 ต่อนาที เป็นเวลา 5 นาที และเก็บที่อุณหภูมิ 1 องศาเซลเซียส ก่อนนำไปใช้งาน จากคุณลักษณะของเศษอาหารเริ่มต้นพบว่าเศษอาหารมีอัตราส่วนของค่าซีโอดี (chemical oxygen demand, COD) ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (total nitrogen content, N) และปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (total phosphorous content, P) (COD:N:P) คือ 100 : 1.6 : 1.08 ซึ่งมีค่ามากกว่าอัตราส่วนระหว่าง COD:N:P ทางทฤษฎีแสดงให้เห็นว่าเศษอาหารที่ใช้ในการวิจัยนี้มีสารอาหารหลักประเภทไนโตรเจนและฟอสฟอรัสเพียงพอต่อการเจริญเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ภายใต้สภาวะไร้อากาศ (ตารางที่ 1) (อัตราส่วนระหว่าง COD:N:P ทางทฤษฎีของสารอินทรีย์ที่เหมาะสมต่อการผลิตแก๊สชีวภาพด้วยกระบวนการหมักภายใต้สภาวะไร้อากาศคือ 100:1.0:0.2 [4])

ตารางที่ 1 คุณสมบัติของเศษอาหารที่ใช้ในงานวิจัยนี้

คุณสมบัติ	หน่วย	ค่า
ซีโอดี (COD)	มิลลิกรัมต่อลิตร	149,493
ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total nitrogen content)	มิลลิกรัมต่อลิตร	2,391.76
ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (Total phosphorous content)	มิลลิกรัมต่อลิตร	1,620.00
ปริมาณของแข็งทั้งหมด (Total solid, TS)	มิลลิกรัมต่อลิตร	908,000
ปริมาณของแข็งระเหยได้ทั้งหมด (Volatile solid, VS)	มิลลิกรัมต่อลิตร	69,680
ค่าความเป็นกรดต่าง (pH)	-	4.30
ปริมาณซัลไฟด์ทั้งหมด (Total sulfide content)	มิลลิกรัมต่อลิตร	124
อัตราส่วน COD:N:P:S	-	100 : 1.6 : 1.08 : 0.00083

ระบบตกตะกอนไร้อากาศไหลขึ้นขึ้นตอนเดียวที่ใช้ในการวิจัยนี้เป็นถังปฏิกรณ์ขนาด 16 ลิตร ทำมาจากพลาสติกทึบแสงชนิดพอลิเอทิลีน (polyethylene, PE) เพื่อช่วยในการป้องกันแสง เนื่องจากไม่ต้องการแหล่งพลังงานแสงในกระบวนการผลิตและแสงถือเป็นปัจจัยที่ทำให้ประสิทธิภาพการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์ลดลง ในกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพด้วยระบบหมักตกตะกอนไหลขึ้นขึ้นตอนเดียวนั้นเศษอาหารจะป้อนเข้าสู่ระบบทางด้านล่างของถังปฏิกรณ์อย่างต่อเนื่องที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ (หรือ COD loading rate) แตกต่างกันในช่วง 4.27-13.92 กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตรต่อวัน ($\text{kg}/\text{m}^3\text{day}$) ณ อุณหภูมิเมโซฟิลิก คือ 37 องศาเซลเซียส ด้วยอ่างควบคุมอุณหภูมิหมุนเวียนภายนอก (water jacket) และไม่ควบคุมค่าความเป็นกรดต่าง โดยในแต่ละอัตราการป้อนสารอินทรีย์ระบบหมักจะทำงานจนถึงสภาวะคงตัว คือ สภาวะที่ค่าซีโอดีของเศษอาหารที่ผ่านกระบวนการหมักและอัตราการผลิตแก๊สคงที่ (ไม่เปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาผ่านไป) จากนั้นจะนำเศษอาหารที่ผ่านการหมักมาวิเคราะห์คุณสมบัติต่าง ๆ ซึ่งจะอธิบายในหัวข้อการวิเคราะห์ผลต่อไป

ในกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพจะพบผลิตภัณฑ์ 2 ประเภท คือ ผลิตภัณฑ์แก๊สและผลิตภัณฑ์ของเหลว ซึ่งผลิตภัณฑ์แก๊สที่ผลิตได้จะวิเคราะห์อัตราการผลิตในแต่ละวันด้วยเครื่องนับแก๊ส (gas counter) ที่อาศัยหลักการการแทนที่น้ำ ส่วนองค์ประกอบแก๊สจะวิเคราะห์ด้วยเทคนิคแก๊สโครมาโทกราฟีที่ประกอบด้วยคอลัมน์ 2 ชนิด คือ molecular sieve 5A (2.0 m×3.00 ID) และ Porapak Q (2.0 m×3.00 ID) โดยการพาแก๊สตัวอย่างเข้าสู่คอลัมน์ ณ สภาวะอุณหภูมิคงที่ (isothermal) จะอาศัยแก๊สอาร์กอนเป็นตัวพาและมีเครื่องตรวจวัดชนิดการนำความร้อน (thermal conductivity detector, TCD) เป็นตัวตรวจวัด สำหรับผลิตภัณฑ์ของเหลวจะวิเคราะห์ค่าซีโอดีด้วยวิธีไดโครเมตและเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (HACH, DR2700)

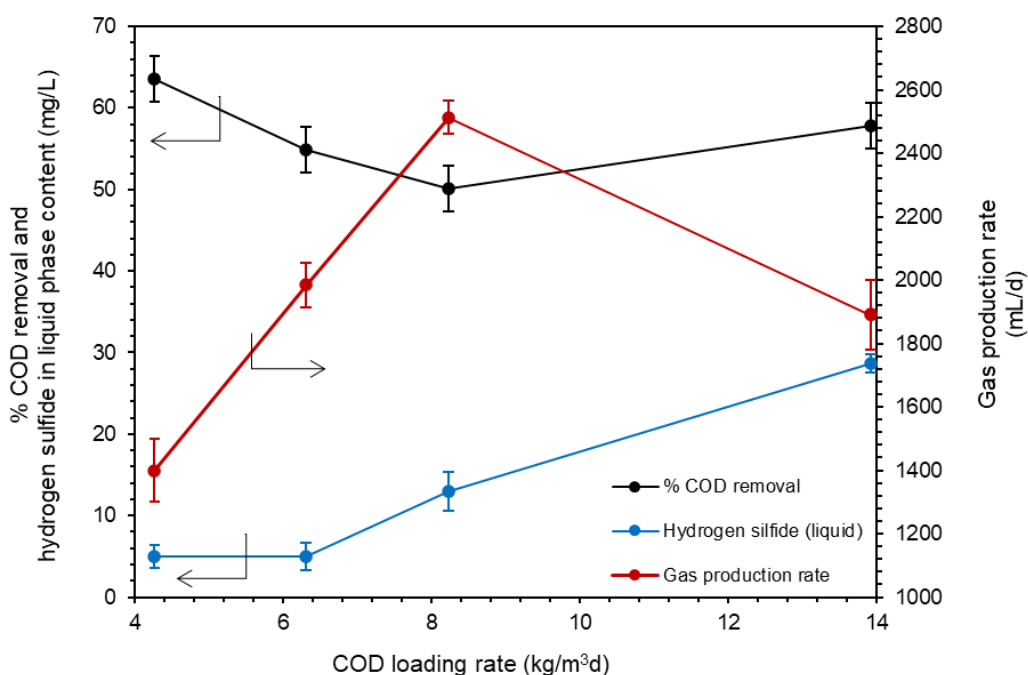


ส่วนปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมด (total volatile fatty acid) และองค์ประกอบจะวิเคราะห์ด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (HPLC, Aminex HPX-87H column) โดยมีตัวตรวจวัดชนิดดัชนีหักเหของแสง (Refractive Index detector) ซึ่งอาศัยการวัดค่าทางเคมีไฟฟ้าของสารที่จะถูกแยกออกจากคอลัมน์ [9] ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (total nitrogen) ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด (total phosphorous) ความเข้มข้นของเชื้อจุลินทรีย์ในระบบ (mixed liquor volatile suspended solids, MLVSS) และความเข้มข้นของเชื้อจุลินทรีย์ที่ถูกชะล้าง (effluent volatile suspended solids, Effluent VSS) จะวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐานที่อาศัยความแตกต่างของน้ำหนักก่อนและหลังเผาที่อุณหภูมิ 550 องศาเซลเซียส ซึ่งได้ระบุในงานวิจัยก่อนหน้า [4] ส่วนการวิเคราะห์ปริมาณซัลไฟด์ทั้งหมด (total sulfides) และแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ละลายน้ำหรือซัลไฟด์ส่วนที่ละลาย (dissolved sulfides) ในเศษอาหารเริ่มต้นและเศษอาหารที่ผ่านการหมักจะใช้วิธีไอโอดเมตริก (iodometric titration method)

ผลการวิจัย

1. ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ (% COD removal) ปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ในวัฏภาคของเหลวหรือซัลไฟด์ส่วนที่ละลายและอัตราการผลิตแก๊สชีวภาพ (biogas production rate)

ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์มีการเปลี่ยนแปลงตลอดช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่ศึกษาซึ่งสัมพันธ์กับการเพิ่มขึ้นของอัตราการผลิตแก๊สชีวภาพ (ภาพที่ 1) และที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่มากกว่า 8.23 kg/m³day คือ ณ อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 13.92 kg/m³day อัตราการผลิตแก๊สชีวภาพมีค่าลดลงอย่างรวดเร็วและสอดคล้องกับการเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วของปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ในวัฏภาคของเหลวหรือซัลไฟด์ส่วนที่ละลาย (ภาพที่ 1) โดยไฮโดรเจนซัลไฟด์ในวัฏภาคของเหลวสามารถแตกตัวให้ซัลไฟด์ไอออน (S²⁻) ที่เป็นสาเหตุทำให้เกิดการสูญเสียของสารอาหารรองในระบบ โดยจะส่งผลเสียโดยตรงต่อประสิทธิภาพการปล่อยเอนไซม์ของเชื้อจุลินทรีย์เพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ที่ลดลง จากประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์และอัตราการผลิตแก๊สชีวภาพ พบว่าเศษอาหารสามารถย่อยสลายได้ภายใต้สภาวะไร้อากาศ ณ อุณหภูมิเมโซฟิลิก [10] จึงแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์แตกต่างกันมากไปกว่านั้นอัตราการผลิตแก๊สสูงสุดพบ ณ อัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่ 8.23 kg/m³day (ภาพที่ 1)

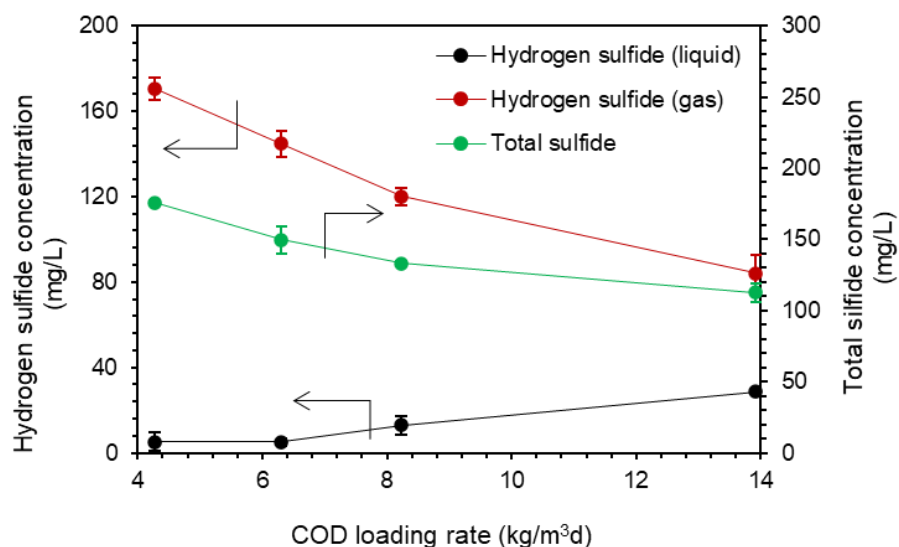


ภาพที่ 1 ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ ปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ในวัฏภาคของเหลวหรือซัลไฟด์ส่วนที่ละลายและอัตราการผลิตแก๊สชีวภาพ ณ อัตราการป้อนสารอินทรีย์แตกต่างกันที่อุณหภูมิเมโซฟิลิกและไม่ควบคุมความเป็นกรดต่าง

2. ปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ในวัฏภาคของเหลวหรือซัลไฟด์ส่วนที่ละลาย (dissolved sulfide) ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ และปริมาณซัลไฟด์ทั้งหมด (total sulfides)

แก๊สชีวภาพที่ผลิตผ่านกระบวนการหมักไร้อากาศด้วยกลไกทางชีวเคมีส่วนใหญ่จะพบองค์ประกอบของแก๊สมีเทนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เป็นหลัก ซึ่งอาจมีแก๊สอื่น เช่น แก๊สไฮโดรเจน แก๊สไนโตรเจน และแก๊สออกซิเจนในปริมาณเล็กน้อย นอกจากแก๊สที่ได้กล่าวมาข้างต้นในแก๊สชีวภาพแล้ว ยังพบองค์ประกอบของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ซึ่งพบในระดับพีพีเอ็ม (part per million; ppm) และมีอิทธิพลต่อประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ของเชื้อจุลินทรีย์เป็นอย่างมาก โดยในงานวิจัยนี้มีการวิเคราะห์หาปริมาณซัลไฟด์ทั้งหมดและปริมาณซัลไฟด์ส่วนที่ละลายหรือไฮโดรเจนซัลไฟด์ในวัฏภาคของเหลวซึ่งแสดงถึงปริมาณแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ละลายน้ำ จากการศึกษากการผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารด้วยระบบหมักไร้อากาศไหลขึ้นชั้นตอนเดียวนี้ พบว่ามีแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์เกิดขึ้นและปริมาณของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่พบมากกว่าไฮโดรเจนซัลไฟด์ในวัฏภาคของเหลว

ภาพที่ 2 แสดงปริมาณของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ ณ อัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่แตกต่างกัน พบว่าแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์มีปริมาณลดลงเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นจาก 4.34-13.92 $\text{kg/m}^3\text{day}$ ในขณะที่ไฮโดรเจนซัลไฟด์ในวัฏภาคของเหลวมีปริมาณเพิ่มขึ้นตลอดช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่ศึกษา (ภาพที่ 2) ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่พบในงานวิจัยนี้อยู่ในช่วง 120-180 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งถือเป็นระดับความเข้มข้นต่ำพอที่จะไม่ส่งผลต่อสมบัติทางความร้อนของแก๊สชีวภาพเมื่อนำไปประยุกต์ใช้ในงานด้านเชื้อเพลิงเพื่อให้ได้มาซึ่งพลังงานจากการเผาไหม้แก๊สชีวภาพอย่างสมบูรณ์ [11] กล่าวคือปริมาณแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ในช่วงความเข้มข้น 120-180 มิลลิกรัมต่อลิตร ไม่ทำให้ค่าความร้อน (heating value) ของแก๊สชีวภาพลดลง อย่างไรก็ตามปริมาณแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ในช่วงดังกล่าวอาจส่งผลกระทบต่อการกัดกร่อนอุปกรณ์โลหะเนื่องจากแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์มีฤทธิ์ของการกัดกร่อน [12] ส่วนปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ในวัฏภาคของเหลวนั้นจะพบในช่วงความเข้มข้น 10-30 มิลลิกรัมต่อลิตร ซึ่งถือเป็นปริมาณที่ส่งผลเสียโดยตรงต่อประสิทธิภาพการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์เนื่องจากเชื้อจุลินทรีย์ไม่สามารถนำสารอาหารรองไปใช้ประโยชน์ได้เพราะสารอาหารรองไม่ได้อยู่ในรูปของสารแขวนลอยหรือสารประกอบที่ละลายน้ำได้ (water soluble complex) แต่ตกตะกอนอยู่ในรูปของโลหะซัลไฟด์ (MS) จากซัลไฟด์ไอออนส่งผลให้ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์สูงสุดที่ 13.92 $\text{kg/m}^3\text{day}$ มีอัตราการเกิดแก๊สต่ำที่สุด (ภาพที่ 1) สัมพันธ์กับปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ในวัฏภาคของเหลวสูงสุดและสีของเศษอาหารที่เข้มมากขึ้นเมื่อเปรียบเทียบกับเศษอาหารที่ผ่านการหมัก ณ อัตราการป้อนสารอินทรีย์ระหว่าง 4.24-8.23 $\text{kg/m}^3\text{day}$ (ภาพที่ 3)



ภาพที่ 2 ปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ในวัฏภาคของเหลวหรือซัลไฟด์ที่ละลาย ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ และปริมาณซัลไฟด์ทั้งหมดในระบบหมัก ณ อัตราการป้อนสารอินทรีย์แตกต่างกันที่อุณหภูมิเมโซฟิลิกและไม่ควบคุมความเป็นกรดต่าง



(ก)



(ข)



(ค)



(ง)



(จ)

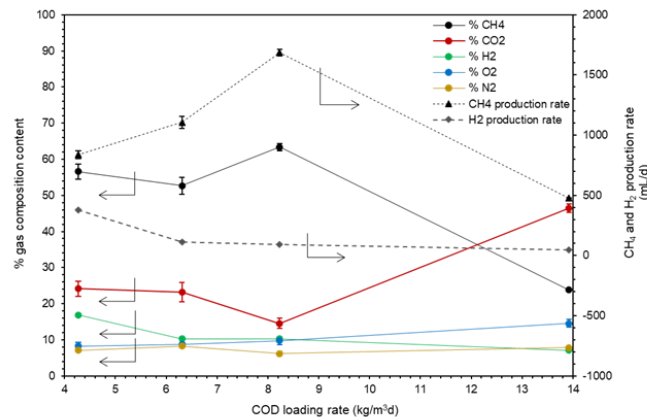
ภาพที่ 3 ลักษณะทางกายภาพด้านสีของ (ก) เศษอาหารเริ่มต้นและเศษอาหารที่ผ่านการหมัก ณ อัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่ (ข) $4.27 \text{ kg/m}^3\text{day}$ (ค) $6.31 \text{ kg/m}^3\text{day}$ (ง) $8.23 \text{ kg/m}^3\text{day}$ และ (จ) $13.92 \text{ kg/m}^3\text{day}$

3. องค์ประกอบแก๊สที่ผลิตได้ (gas composition) อัตราการผลิตแก๊สชนิดแก๊สมีเทน (methane and hydrogen production rate) ผลได้ของแก๊สชนิดแก๊สมีเทนและแก๊สไฮโดรเจน (methane and hydrogen yield) และอัตราการผลิตแก๊สชนิดแก๊สมีเทนและแก๊สไฮโดรเจนแบบจำเพาะ (specific methane and hydrogen production rate, SGPR)

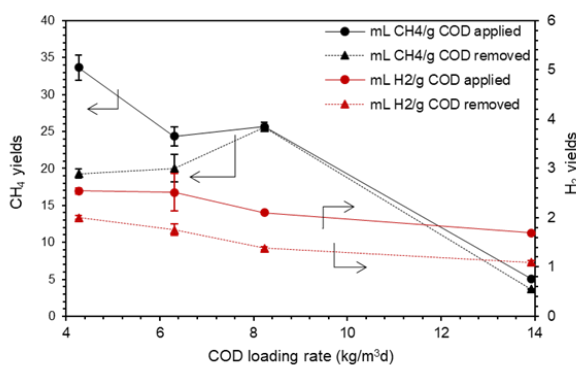
องค์ประกอบของแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้ในการวิจัยแสดงดังภาพที่ 4 (ก) ซึ่งพบว่าองค์ประกอบหลักของแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้ คือ แก๊สมีเทนและแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ โดยพบแก๊สไฮโดรเจน แก๊สออกซิเจน และแก๊สไนโตรเจนในปริมาณเล็กน้อย (น้อยกว่าร้อยละ 20 โดยปริมาตร) ปริมาณแก๊สมีเทนและอัตราการผลิตแก๊สมีเทนเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นจาก 4.27 - $8.23 \text{ kg/m}^3\text{day}$ และมีค่าลดลงเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์มากกว่า $8.23 \text{ kg/m}^3\text{day}$ คือ ณ อัตราการป้อนสารอินทรีย์ $13.92 \text{ kg/m}^3\text{day}$ ปริมาณแก๊สมีเทนและอัตราการผลิตแก๊สมีเทนมากที่สุดพบที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ $8.23 \text{ kg/m}^3\text{day}$ ในขณะที่ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนและอัตราการผลิตแก๊สไฮโดรเจนมีแนวโน้มลดลงตลอดช่วงการเปลี่ยนแปลงของอัตราการป้อนสารอินทรีย์ ปริมาณแก๊สมีเทนที่พบในแก๊สชีวภาพมากกว่าแก๊สไฮโดรเจนคิดเป็นร้อยละโดยเฉลี่ย 75 โดยปริมาตร ซึ่งเป็นผลมาจากการควบคุมอุณหภูมิให้อยู่ที่อุณหภูมิเมโซฟิลิกและไม่ควบคุมความเป็นกรดต่าง จึงทำให้เมื่อระบบดำเนินไประบบจะเริ่มเข้าสู่สภาวะเหมาะสม คือ สภาวะที่ความเป็นกรดลดลง ซึ่งแสดงให้เห็นถึงการเปลี่ยนกรดไขมันระเหยง่ายเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สโดยปราศจากการสะสมในระบบทำให้ค่า pH เพิ่มขึ้นจาก 6.04 เป็น 6.57 (โดยจะกล่าวในหัวข้อต่อไป) ค่า pH 6.57 ถือเป็นค่าที่เหมาะสมต่อการทำกิจกรรมของเชื้อจุลินทรีย์ชนิดผลิตมีเทนในงานวิจัยนี้และสัมพันธ์กับองค์ประกอบของแก๊สที่ผลิตได้ส่วนใหญ่ คือ แก๊สมีเทน อย่างไรก็ตาม ณ สภาวะความเป็นกรดที่ 6.57 เชื้อจุลินทรีย์ชนิดผลิตไฮโดรเจนไม่สามารถดำรงอยู่ได้ส่งผลให้ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนมีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มขึ้นของอัตราการป้อนสารอินทรีย์ (ภาพที่ 4 (ก)) สำหรับประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สจะแสดงในรูปผลได้ของแก๊สและอัตราการผลิตแก๊สแบบจำเพาะ ผลได้ของแก๊สแสดงถึงประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ด้วยเชื้อจุลินทรีย์เพื่อเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สในขณะอัตราการผลิตแก๊สแบบจำเพาะแสดงถึงความสามารถของเชื้อจุลินทรีย์ในการเปลี่ยนสารอินทรีย์เป็นผลิตภัณฑ์แก๊ส

ผลได้ของแก๊สมีเทนสามารถแสดงได้สองหน่วย คือ $\text{mL CH}_4/\text{g COD}_{\text{applied}}$ และ $\text{mL CH}_4/\text{g COD}_{\text{removed}}$ เช่นเดียวกับอัตราการเกิดแก๊สแบบจำเพาะที่สามารถแสดงได้สองหน่วย คือ $\text{mL CH}_4/\text{L d}$ และ $\text{mL CH}_4/\text{g MLVSS d}$ ซึ่งทั้งสองหน่วยให้ผลที่แตกต่างกันดังนี้ ผลได้ของแก๊สมีเทนหน่วย $\text{mL CH}_4/\text{g COD}_{\text{removed}}$ (ภาพที่ 4 (ข)) มีแนวโน้มเช่นเดียวกับอัตราการผลิตแก๊สมีเทนแบบจำเพาะในหน่วย $\text{mL CH}_4/\text{L d}$ (ภาพที่ 4 (ค)) กล่าวคือ มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นจาก 4.23 - $8.23 \text{ kg/m}^3\text{day}$ และมีค่าสูงสุดที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ $8.23 \text{ kg/m}^3\text{day}$ สอดคล้องกับอัตราการเกิดแก๊สมีเทนและปริมาณแก๊สมีเทนสูงสุด (ภาพที่ 4(ก)) ในขณะที่ผลได้ของแก๊สมีเทนหน่วย $\text{mL CH}_4/\text{g COD}_{\text{applied}}$ และอัตราการผลิตแก๊สมีเทนแบบจำเพาะหน่วย $\text{mL CH}_4/\text{g MLVSS d}$ มีแนวโน้มที่แตกต่างกันออกไปดังแสดงในภาพที่ 4 (ข) – (ค) คือ ผลได้ของแก๊สมีเทนหน่วยของ $\text{mL CH}_4/\text{g COD}_{\text{applied}}$ มากที่สุดและอัตราการผลิตแก๊สมีเทนแบบจำเพาะหน่วย $\text{mL CH}_4/\text{g MLVSS d}$ สูงสุด พบที่

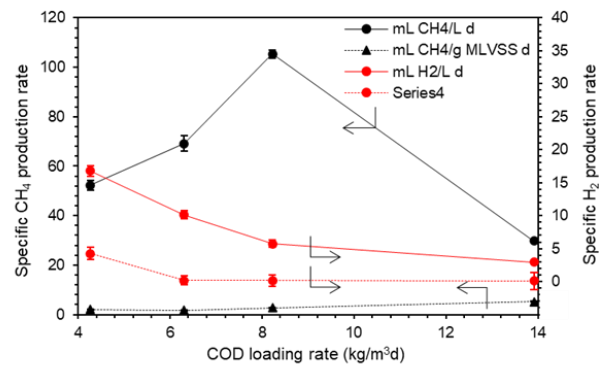
อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 4.32 และ 13.92 kg/m³day ตามลำดับ เนื่องจากในช่วงเริ่มต้นของการดำเนินงานของระบบ เชื้อจุลินทรีย์ยังต้องการระยะเวลาในการปรับตัวให้เข้ากับสภาวะ แวดล้อมจึงทำให้การทำกิจกรรมของเชื้อจุลินทรีย์ไม่เต็มประสิทธิภาพเท่าที่ควร ในทำนองเดียวกันที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์สูงสุดระบบอยู่ในสภาวะความเป็นกรดมากขึ้นจากการสะสมของกรดไขมันระเหยง่ายจนเชื้อจุลินทรีย์ไม่สามารถดำรงอยู่ได้และตายในที่สุด สำหรับผลได้ของแก๊สไฮโดรเจนและอัตราการผลิตแก๊สไฮโดรเจนแบบจำเพาะมีแนวโน้มตรงกันข้ามกับประสิทธิภาพการผลิตแก๊สมีเทน (ภาพที่ 4 (ข) – (ค)) ซึ่งเกิดจากสภาวะของความเป็นกรดต่างของระบบไม่เหมาะต่อการเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์ชนิดผลิตไฮโดรเจน กล่าวคือความเป็นกรดต่างที่เหมาะสมต่อการดำรงอยู่ของเชื้อจุลินทรีย์ชนิดผลิตไฮโดรเจนอยู่ที่ค่า pH เท่ากับ 5.5 [4]



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 4 (ก) องค์ประกอบของแก๊สที่ผลิตได้ อัตราการผลิตแก๊สชนิดแก๊สมีเทนและแก๊สไฮโดรเจน (ข) ผลได้ของแก๊สชนิดแก๊สมีเทนและแก๊สชนิดแก๊สไฮโดรเจน และ (ค) อัตราการผลิตแก๊สชนิดแก๊สมีเทนและแก๊สไฮโดรเจนแบบจำเพาะ ณ อัตราการป้อนสารอินทรีย์แตกต่างกันที่อุณหภูมิเมโซฟิลิกและไม่ควบคุมความเป็นกรดต่าง

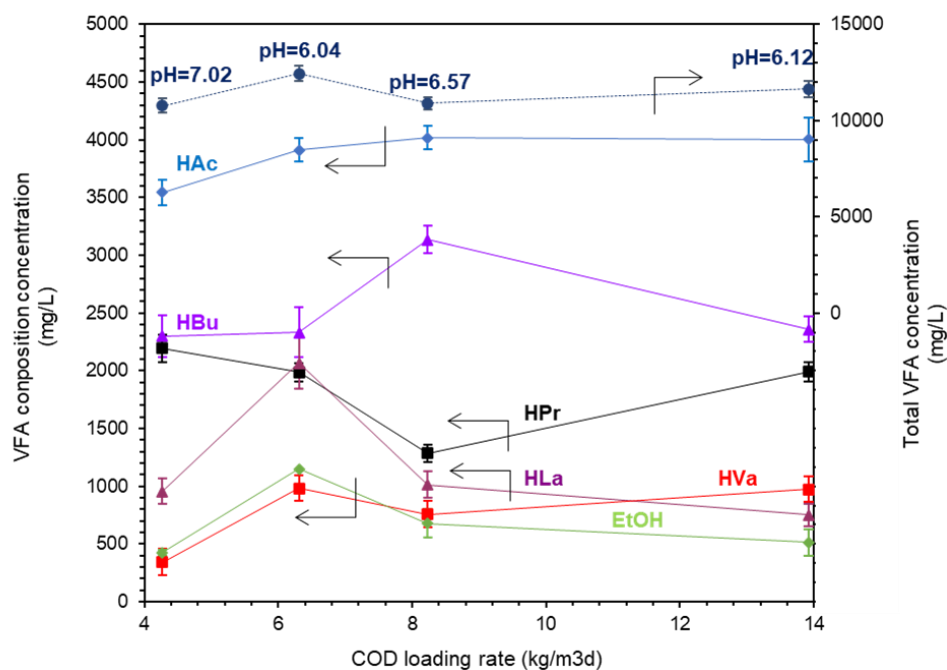
4. ปริมาณของกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมด (total volatile fatty acid, VFA) และองค์ประกอบ (VFA composition)

ปริมาณของกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมดและองค์ประกอบของกรดไขมันระเหยง่ายแสดงในภาพที่ 5 ปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นจาก 4.23 เป็น 6.31 kg/m³day ซึ่งสอดคล้องกับประสิทธิภาพในการผลิตแก๊สมีเทนที่ลดลงในรูปของอัตราการผลิตแก๊สมีเทน ผลได้ของแก๊สมีเทน อัตราการผลิตแก๊สมีเทนแบบจำเพาะลดลงในช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ 4.23-6.31 kg/m³day (ภาพที่ 4) และที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่มากกว่า 6.31 kg/m³day ปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมดมีค่าลดลงในขณะที่ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สมีเทนมีแนวโน้ม



เพิ่มขึ้นเช่นกัน (ภาพที่ 4) ในทางตรงกันข้ามประสิทธิภาพการผลิตแก๊สมีเทนมีแนวโน้มลดลงอีกครั้งเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์มากกว่า $8.23 \text{ kg/m}^3\text{day}$ สัมพันธ์กับปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายที่เพิ่มขึ้น (ภาพที่ 5)

สำหรับองค์ประกอบของกรดไขมันระเหยง่ายที่พบ ได้แก่ กรดอะซิติก (acetic acid, HAc) กรดโพรพิโอนิก (propionic acid, HPr) กรดบิวทีริก (butyric acid, HBU) กรดวาเลริก (valeric acid, HVa) และกรดแลคติก (lactic acid, HLa) ตลอดจนยังพบสารประกอบแอลกอฮอล์ชนิดเอทานอล (ethanol, EtOH) ในกรดไขมันระเหยง่ายที่เกิดขึ้นด้วย ปริมาณองค์ประกอบของกรดไขมันระเหยง่ายแต่ละชนิดรวมถึงเอทานอลมีแนวโน้มเช่นเดียวกับปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมด (ภาพที่ 5) โดยกรดไขมันระเหยง่ายชนิดอะซิติกจะพบในปริมาณมากที่สุด มากไปกว่านั้นยังพบระดับความเป็นพิษของกรดไขมันระเหยง่ายต่อประสิทธิภาพการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์ของงานวิจัยนี้ คือ ระดับของกรดไขมันระเหยง่ายที่ $11,000$ มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมดที่มากขึ้นแสดงถึงโอกาสของกรดไขมันระเหยง่ายที่ไม่ถูกเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สด้วยเชื้อจุลินทรีย์สูงจนถูกสะสมในระบบ ซึ่งอาจมีสาเหตุมาจากระยะเวลาที่สารอินทรีย์อยู่ในระบบสั้นเกินไปจนทำให้เชื้อจุลินทรีย์ไม่สามารถย่อยสลายได้ทันหรือปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ลดลง

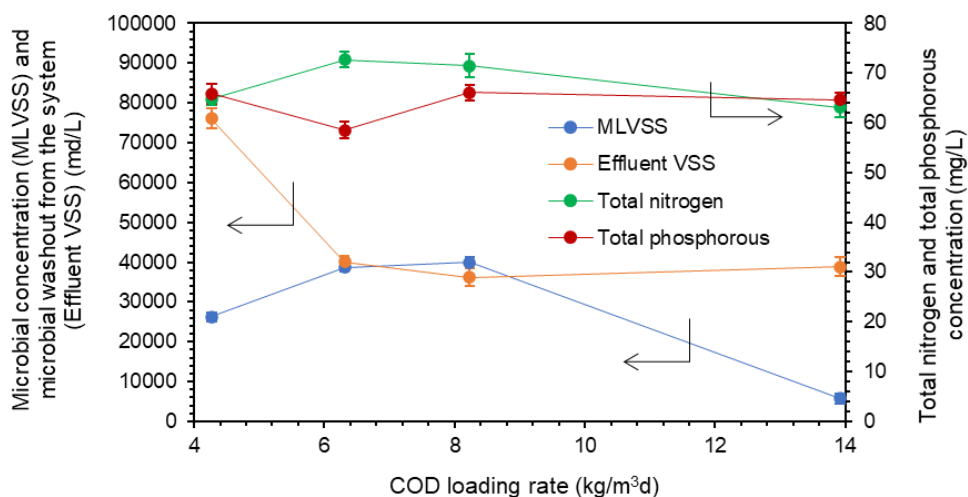


ภาพที่ 5 ปริมาณของกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมดและองค์ประกอบของกรดไขมันระเหยง่าย ณ อัตราการป้อนสารอินทรีย์แตกต่างกันที่อุณหภูมิเมโซฟิลิกและไม่ควบคุมความเป็นกรดต่ำ

5. ความเข้มข้นของเชื้อจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบ (MLVSS) ความเข้มข้นของเชื้อจุลินทรีย์ที่ถูกชะล้างออกจากระบบ (effluent VSS) ความเข้มข้นของไนโตรเจน (total nitrogen concentration) และความเข้มข้นของฟอสฟอรัส (total phosphorous concentration)

ความเข้มข้นของเชื้อจุลินทรีย์ในระบบและความเข้มข้นของเชื้อจุลินทรีย์ที่ถูกชะล้างออกจากระบบแสดงในภาพที่ 6 จากภาพที่ 6 จะเห็นว่าเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นจาก 4.27 เป็น $8.23 \text{ kg/m}^3\text{day}$ ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพเพิ่มขึ้นในรูปของอัตราการผลิตแก๊สมีเทน ปริมาณแก๊สมีเทน ผลได้ของแก๊สมีเทน และอัตราการเกิดแก๊สมีเทนแบบจำเพาะ (ภาพที่ 4) ซึ่งสอดคล้องกับความเข้มข้นของเชื้อจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบมีค่ามากขึ้น แสดงให้เห็นว่าตั้งแต่ช่วงเริ่มต้นคือ ที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ $4.27 \text{ kg/m}^3\text{day}$ จนถึงช่วงกลาง คือ อัตราการป้อนสารอินทรีย์ $6.31\text{-}8.23 \text{ kg/m}^3\text{day}$ เชื้อจุลินทรีย์สามารถดำเนินกิจกรรมได้ เช่น การปล่อยเอนไซม์ การเติบโต เป็นต้น จึงทำให้การทำงานของเชื้อจุลินทรีย์ค่อยๆ

มีประสิทธิภาพมากขึ้นและมีปริมาณเพิ่มขึ้นซึ่งสอดคล้องกับการใช้ประโยชน์ของสารอาหารหลักชนิดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของเชื้อจุลินทรีย์ที่เพิ่มมากขึ้นในช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ 4.27-8.23 kg/m³day (ภาพที่ 6) เป็นผลให้การผลิตแก๊สมีเทนเพิ่มขึ้นด้วยในช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ระหว่าง 4.23-8.23 kg/m³day (ภาพที่ 4) ส่วนความเข้มข้นของเชื้อจุลินทรีย์ที่ถูกชะล้างออกจากระบบมีแนวโน้มตรงกันข้ามกับความเข้มข้นของเชื้อจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบ และยังพบว่าเชื้อจุลินทรีย์ที่ไม่สามารถทำงานได้ (inactive bacteria) หรือเชื้อจุลินทรีย์ที่ตายแล้วเท่านั้นที่จะถูกชะล้างออกจากระบบด้วยการลอยขึ้นและล้นออกเมื่อปริมาณทำงานมากกว่า 16 ลิตร [4] ซึ่งอาจเกิดมาจากเชื้อจุลินทรีย์หยุดการเติบโตที่มีสาเหตุมาจากปริมาณสารอาหารมีไม่เพียงพอเนื่องจากมีปริมาณไฮโดรเจนซัลไฟด์ในวัฏภาคของเหลวมากเกินไปจนเป็นแหล่งของซัลไฟด์ไอออน (ภาพที่ 2)



ภาพที่ 6 ความเข้มข้นของเชื้อจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบ ความเข้มข้นของเชื้อจุลินทรีย์ที่ถูกชะล้างออกจากระบบ การใช้ไนโตรเจนและการใช้ฟอสฟอรัสของเชื้อจุลินทรีย์ ณ อัตราการป้อนสารอินทรีย์แตกต่างกันที่อุณหภูมิเมโซฟิลิกและไม่ควบคุมความเป็นกรดต่าง

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

การผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารภายใต้สภาวะปราศจากออกซิเจนอิสระด้วยกระบวนการหมักขั้นตอนเดียวโดยใช้ระบบตกตะกอนแบบไร้อากาศไหลขึ้น ณ อุณหภูมิเมโซฟิลิกโดยไม่มีการควบคุมค่าความเป็นกรดต่าง จะเห็นว่าเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นจาก 4.23 เป็น 8.23 kg/m³day ส่งผลให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์มีการเปลี่ยนแปลงพร้อมกับอัตราการผลิตแก๊สชีวภาพเพิ่มขึ้น โดยแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้จะมีแก๊สมีเทนเป็นองค์ประกอบหลักและปริมาณของแก๊สมีเทนที่พบยังมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของอัตราการป้อนสารอินทรีย์จาก 4.23 เป็น 8.23 kg/m³day อีกด้วย (ภาพที่ 4 (ก)) จากการเปลี่ยนแปลงของประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์แสดงให้เห็นว่าเชื้อจุลินทรีย์สามารถปล่อยเอนไซม์เพื่อย่อยสลายสารอินทรีย์ในเศษอาหารเพื่อเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สได้ แม้ว่าในช่วงเริ่มต้น คือ อัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่ 4.27 kg/m³day จะมีอัตราการย่อยสลายช้า ซึ่งอาจเป็นผลมาจากระยะเวลาที่เชื้อจุลินทรีย์ต้องการในการปรับตัวเพื่อเติบโตไม่เหมาะสมจึงทำให้มีอัตราการผลิตแก๊สมีเทนต่ำ (ภาพที่ 4 (ก)) อย่างไรก็ตามหลังจากช่วงเริ่มต้น คือ ช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ 4.27-8.23 kg/m³day อัตราการผลิตแก๊สมีเทนมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นจึงสามารถสรุปได้ว่าปริมาณสารอินทรีย์หรือปริมาณเศษอาหารที่ป้อนเข้าสู่ระบบรวมถึงระยะเวลาที่สารอินทรีย์อยู่ในระบบเพียงพอและเหมาะสมต่อเชื้อจุลินทรีย์ในการย่อยสลายโดยปราศจากการสะสมของกรดไขมันระเหยง่าย ในทางตรงกันข้ามหากปริมาณสารอินทรีย์ที่ป้อนเข้าสู่ระบบมากเกินไป คือ ป้อนด้วยอัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่มากกว่า 8.23 kg/m³day จะทำให้อัตราการผลิตแก๊สในรูปของปริมาณแก๊ส



มีเทนและอัตราการเกิดแก๊สมีเทนลดลง เนื่องจากเมื่อเศษอาหารถูกบ้อนเข้าสู่ระบบแล้วจะถูกเปลี่ยนให้เป็นกรดไขมันระเหยง่ายก่อนที่จะถูกเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สตามกระบวนการทางชีวเคมี (biological process) และกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมดที่เกิดขึ้นหากเกิดในปริมาณที่มากเกินไปจะเกิดการสะสมในระบบจนทำให้ระบบไม่สามารถต้านทานสภาวะความเป็นกรดสูงจากกรดไขมันระเหยง่ายที่สะสมได้และก่อให้เกิดระดับที่เป็นพิษ (toxicity level) ต่อเชื้อจุลินทรีย์ คือ ปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายในระดับความเข้มข้น 11,000 มิลลิกรัมต่อลิตร ด้วยการไปยับยั้งการเติบโตเป็นสาเหตุให้ประสิทธิภาพการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์ลดลงแสดงในรูปอัตราการผลิตแก๊สที่ลดลงและปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ในระบบต่ำลง (ภาพที่ 6) [4, 13, 14] จากผลการวิจัยชี้ให้เห็นว่าสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารด้วยระบบตกตะกอนไร้อากาศไหลขึ้นชั้นตอนเดียว คือ สภาวะที่เชื้อจุลินทรีย์สามารถดำรงอยู่ได้และมีอัตราการเติบโตสูงสุด ซึ่งสภาวะดังกล่าวในงานวิจัยนี้จะเป็นสภาวะที่มีค่าความเป็นกรดต่างที่ 6.57 และพบที่อัตราการบ้อนสารอินทรีย์ 8.23 kg/m³day

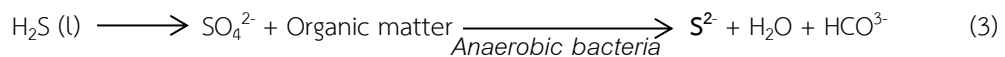
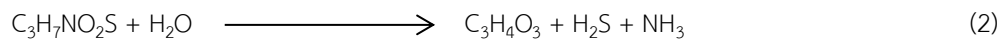
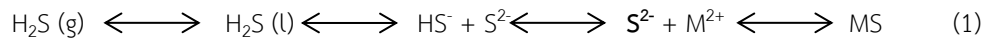
สภาวะที่เหมาะสม (optimum condition) คือ สภาวะที่แสดงถึงประสิทธิภาพการผลิตแก๊สสูงสุดในรูปของผลได้ของแก๊สมีเทนและอัตราการผลิตแก๊สมีเทนแบบจำเพาะที่สูงสุด อย่างไรก็ตามผลได้ของแก๊สมีเทนและอัตราการผลิตแก๊สมีเทนแบบจำเพาะนั้นสามารถแสดงได้สองหน่วยดังในภาพที่ 4 (ข) – (ค) และพบว่าผลได้ของแก๊สมีเทนหน่วย ml CH₄/g COD_{removed} สูงสุดและอัตราการผลิตแก๊สมีเทนแบบจำเพาะหน่วย ml CH₄/L d ที่มากที่สุดพบ ณ สภาวะเหมาะสม คือ ณ อัตราการบ้อนสารอินทรีย์ 8.23 kg/m³day ซึ่งสัมพันธ์กับอัตราการเกิดแก๊สมีเทนสูงสุดและปริมาณแก๊สมีเทนสูงสุด (ภาพที่ 4 (ก)) มากไปกว่านั้นยังมีความสอดคล้องกับปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่มีอยู่ในระบบสูงสุดด้วย (ภาพที่ 6) ในขณะที่ผลได้ของแก๊สมีเทนหน่วย ml CH₄/g COD_{applied} ที่สูงสุดและอัตราการผลิตแก๊สมีเทนแบบจำเพาะหน่วย ml CH₄/g MLVSS d ที่สูงที่สุดพบ ณ สภาวะที่แตกต่างกันออกไปดังในภาพที่ 4 (ข) และภาพที่ 4 (ค) ตามลำดับ เนื่องจากในช่วงต้นของการดำเนินไปของระบบ คือ ที่อัตราการบ้อนสารอินทรีย์เริ่มต้นที่ 4.23 kg/m³day เชื้อจุลินทรีย์มีการเติบโตอยู่ในช่วงระยะพัก (lag phase) โดยจะมีการปรับตัวให้เข้ากับสิ่งแวดล้อมใหม่จึงต้องใช้เวลาในการปรับตัว ในช่วงระยะพักนี้เชื้อจุลินทรีย์ยังไม่ได้มีการเพิ่มจำนวนและไม่เกิดการแบ่งเซลล์ แต่เซลล์จะเตรียมพร้อมสำหรับการเติบโตต่อไป จึงเป็นผลให้สารอินทรีย์ที่บ้อนเข้ามายังไม่เกิดการย่อยสลายหรืออาจเกิดการย่อยสลายไปบางส่วนด้วยอัตราที่ช้าและไม่สมบูรณ์ จนทำให้ประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ (% COD removal) ณ อัตราการบ้อนสารอินทรีย์ที่ 4.23 kg/m³day นั้นสูงสุด (ภาพที่ 1) เป็นสาเหตุให้ผลได้ของแก๊สมีเทนในหน่วย ml CH₄/g COD_{applied} มีค่าสูงที่สุดนั่นเอง (ภาพที่ 4 (ข)) สำหรับอัตราการผลิตแก๊สมีเทนแบบจำเพาะในหน่วย ml CH₄/g MLVSS d ที่มากที่สุดนั้นพบที่อัตราการบ้อนสารอินทรีย์สูงสุด คือ 13.92 kg/m³day นั้นเกิดจากปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่อยู่ในระบบ (MLVSS) ณ อัตราการบ้อนสารอินทรีย์ที่สูงสุดนี้มีปริมาณต่ำที่สุด (ภาพที่ 6) ซึ่งมีสาเหตุมาจาก ณ สภาวะดังกล่าวเป็นสภาวะแวดล้อมที่เป็นพิษต่อเชื้อจุลินทรีย์ในการดำรงอยู่จึงส่งผลเสียโดยตรงต่ออัตราการแบ่งเซลล์เพื่อการเจริญที่ลดต่ำลงของเชื้อจุลินทรีย์ นั่นคือสภาวะความเป็นกรดต่างที่ 6.12 ตลอดจนเศษอาหารที่ใช้ในงานวิจัยนี้จัดเป็นของเสียอินทรีย์ประเภทคาร์โบไฮเดรตจึงมีอัตราการย่อยสลายด้วยเชื้อจุลินทรีย์ (hydrolysis rate) ที่ดีกว่าเศษอาหารประเภทโปรตีนและประเภทไขมันตามลำดับ ดังนั้นกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมดที่เกิดขึ้นรวมถึงองค์ประกอบของแก๊สมีเทนที่ได้ส่วนใหญ่มาจากการย่อยสลายสารกลุ่มคาร์โบไฮเดรตในเศษอาหารเป็นหลัก

เมื่อพิจารณาแนวโน้มของปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมดตลอดช่วงอัตราการบ้อนสารอินทรีย์ที่ศึกษาแล้วพบว่าปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมดมีแนวโน้มลดลงในช่วงอัตราการบ้อนสารอินทรีย์ 6.31-8.23 kg/m³day (ภาพที่ 5) ในขณะที่ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สเพิ่มสูงขึ้น (ภาพที่ 4) ทำให้สามารถสรุปได้ว่าแก๊สมีเทนที่ผลิตได้ในงานวิจัยนี้เกิดผ่านกระบวนการอะซิโดคลาสติคมากกว่ากระบวนการรีดักชันของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์ [11] โดยยืนยันได้จากชนิดและปริมาณของกรดไขมันระเหยง่ายชนิดกรดอะซิติกที่พบในปริมาณมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกรดไขมันระเหยง่ายชนิดอื่น (ภาพที่ 5) ซึ่งกรดอะซิติกที่เกิดขึ้นมาจากการแตกตัวของไขมันระเหยง่ายชนิดกรดโพรพิโอนิก กรดบิวทิริก กรดวาเลริก และกรดแลคติก [4] และกรดอะซิติกนี้จะถูกเปลี่ยนเป็นผลิตภัณฑ์แก๊สโดยไม่หลงเหลือในระบบหรือเหลือในปริมาณน้อย ดังนั้นจึงสรุปได้ว่าประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพที่ดีขึ้นจะสอดคล้องกับกรดอะซิติกที่เกิดขึ้นในปริมาณมากและเกิดการสะสมใน

ระบบต่ำ [12] โดยทั่วไปการผลิตแก๊สมีเทนจะเกิดผ่านกลไกการเปลี่ยนรูปกรดอะซิติกคิดเป็นร้อยละ 70 โดยปริมาตรของแก๊สมีเทนที่ผลิตจากกระบวนการอะซิโดคลาสติกและกระบวนการรีดักชันของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์รวมกัน ดังนั้นสถานะของการผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารด้วยระบบหมักไร้อากาศไหลขึ้นขึ้นตอนเดียวที่มีการสะสมของกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมดอยู่ในระดับต่ำกว่าระดับที่เป็นพิษต่อเชื้อจุลินทรีย์ในงานวิจัยนี้ คือ สถานะที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ $8.23 \text{ kg/m}^3\text{day}$ และมีความเป็นกรดต่ำกว่า 6.57 [13] (ภาพที่ 5) สัมพันธ์กับการนำสารอาหารหลักชนิดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสไปใช้ประโยชน์ด้านการเติบโตโดยแสดงในรูปปริมาณการใช้สารอาหารหลักชนิดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสที่เพิ่มสูงขึ้นเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นจาก 4.23 เป็น $8.23 \text{ kg/m}^3\text{day}$ (ภาพที่ 6) กล่าวคือเชื้อจุลินทรีย์มีการดูดซึมสารอาหารเข้าสู่เซลล์จนเกิดการเพิ่มจำนวนเซลล์เป็น 2 เท่า สำหรับอัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่มากกว่า $8.23 \text{ kg/m}^3\text{day}$ ปริมาณการใช้สารอาหารหลักชนิดไนโตรเจนและฟอสฟอรัสของเชื้อจุลินทรีย์คงที่หรือมีการเปลี่ยนแปลงน้อยมากซึ่งเป็นผลมาจากการสะสมของเสียและสารพิษจากกระบวนการหมักบอลลิม นั้นคือกรดไขมันระเหยง่าย จึงทำให้การเติบโตของเชื้อจุลินทรีย์อยู่ในช่วงระยะเซลล์ตาย (death phase) ที่เชื้อจุลินทรีย์จะมีการตายอย่างรวดเร็ว สัมพันธ์กับปริมาณเชื้อจุลินทรีย์ที่ถูกชะล้างออกจากระบบมากที่สุด (ภาพที่ 6)

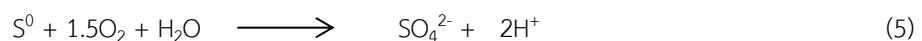
สำหรับการศึกษาปริมาณซัลไฟด์ทั้งหมดของการผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารด้วยระบบหมักไร้อากาศไหลขึ้นขึ้นตอนเดียวนั้นจะพบไฮโดรเจนซัลไฟด์ 2 ภูมิภาค คือ ภูมิภาคของเหลวและภูมิภาคแก๊ส โดยไฮโดรเจนซัลไฟด์ในภูมิภาคของเหลวมาจากการละลายของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ในน้ำ ซึ่งมักส่งผลโดยตรงต่อประสิทธิภาพการทำงานของเชื้อจุลินทรีย์จนก่อให้เกิดผลกระทบต่อการผลิตแก๊สชีวภาพในที่สุด เนื่องจากไฮโดรเจนซัลไฟด์ในภูมิภาคของเหลวสามารถแตกตัวให้ไฮโดรเจนซัลไฟด์ไอออน (HS^-) และซัลไฟด์ไอออน (S^{2-}) โดยซัลไฟด์ไอออนที่ได้มักจะไปทำปฏิกิริยากับสารอาหารรองที่เชื้อจุลินทรีย์ต้องการในปริมาณน้อยแต่ขาดไม่ได้เพื่อใช้ในการสร้างน้ำย่อยชนิดต่างๆ จนเกิดเป็นสารประกอบโลหะซัลไฟด์ (สมการที่ (1)) และในระบบผลิตแก๊สชีวภาพส่วนใหญ่มักพบปัญหาการสูญหายของสารอาหารรองบางชนิดจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างซัลไฟด์ไอออนและสารอาหารรองจนทำให้ปริมาณสารอาหารรองลดลงอยู่ในระดับที่ไม่เพียงพอต่อความต้องการของเชื้อจุลินทรีย์ที่ไม่อาจหลีกเลี่ยงได้ เพราะซัลไฟด์ไอออนนอกจากจะเกิดจากการแตกตัวของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ละลายน้ำดังสมการที่ (1) แล้วยังเกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์กลุ่มโปรตีนที่มีองค์ประกอบของซัลเฟอร์ในรูปของซัลเฟตได้อีกด้วย (สมการที่ (2) – (3)) [14] หากสารอินทรีย์ประกอบด้วยสารกลุ่มโปรตีนในปริมาณสูง โอกาสในการเกิดการแข่งขันกันระหว่างเชื้อจุลินทรีย์ชนิดผลิตมีเทนและเชื้อจุลินทรีย์ชนิดผลิตไฮโดรเจนซัลไฟด์ (sulfate reducing bacteria, SRB) เพื่อแย่งชิงสารอินทรีย์ในการผลิตผลิตภัณฑ์ที่ต้องการก็จะมีมากขึ้นด้วย และอาจเป็นผลให้อัตราการผลิตแก๊สมีเทนมีแนวโน้มที่ลดลงซึ่งเศษอาหารที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วยสารกลุ่มโปรตีนคิดเป็นร้อยละ 16.25 โดยน้ำหนัก ซึ่งถือเป็นปริมาณที่ต่ำต่อการรีดิวซ์ซัลเฟตให้เป็นซัลไฟด์ไอออน เนื่องจากปริมาณซัลไฟด์ที่เพิ่มขึ้นในช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ระหว่าง 4.24 – $8.23 \text{ kg/m}^3\text{day}$ ทำให้อัตราการผลิตแก๊สมีเทนเพิ่มขึ้น เป็นผลมาจากระดับความเข้มข้นของซัลไฟด์ไอออนที่พบไม่มากพอที่จะส่งผลต่อการสูญหายของสารอาหารรอง ดังนั้นปริมาณสารกลุ่มโปรตีนในเศษอาหารจึงไม่ส่งผลต่อปริมาณซัลเฟตและปริมาณซัลไฟด์ไอออน จากการศึกษากระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพจากเศษอาหารของงานวิจัยนี้ยังพบการเกิดสารประกอบโลหะซัลไฟด์ตกตะกอนในระบบ ซึ่งสังเกตได้จากการเปลี่ยนสีของเศษอาหารที่ผ่านการหมัก คือ เศษอาหารมีสีเข้มขึ้นจากสีเหลืองอ่อนเป็นสีน้ำตาลจนถึงสีน้ำตาลเข้มเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มขึ้น (ภาพที่ 3) ส่วนแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่พบในแก๊สชีวภาพที่ผลิตได้ไม่ส่งผลต่อสมบัติของแก๊สชีวภาพในด้านความเป็นเชื้อเพลิง แต่ส่งผลต่อสมบัติทางเคมีของแก๊สชีวภาพ คือ มีค่าความเป็นกรดเพิ่มขึ้นประมาณ 1.12 เท่า ซึ่งส่งผลด้านการกัดกร่อนชิ้นส่วนของอุปกรณ์ขณะใช้งานได้

สมการที่ (1) – (3) แสดงถึงแหล่งของการเกิดซัลไฟด์ไอออน (S^{2-}) ซึ่งเป็นสาเหตุหลักของการสูญเสียของสารอาหารรองในรูปของโลหะซัลไฟด์ (MS) โดยซัลไฟด์ไอออนในสมการที่ (1) เกิดจากการแตกตัวของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ละลายน้ำ (หรือ dissolved sulfide) ในขณะที่ซัลไฟด์ไอออนของสมการที่ (3) ได้มาจากการย่อยสลายสารอินทรีย์กลุ่มโปรตีนคือ $\text{C}_3\text{H}_7\text{NO}_2\text{S}$ และให้แก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ในสมการที่ (2)



ในการป้องกันและการลดการสูญเสียสารอาหารรองในระบบถือเป็นการเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตด้วยการเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ของเชื้อจุลินทรีย์ ซึ่งสามารถดำเนินการได้โดยการควบคุมปริมาณซัลไฟด์ไอออนให้อยู่ในระดับที่เป็นมิตรต่อเชื้อจุลินทรีย์ด้วยการเติมออกซิเจนหรืออากาศในปริมาณจำกัด (microaeration) [15] และการใช้สารคีเลชัน (chelation technique) โดยการเติมออกซิเจนหรืออากาศในปริมาณจำกัดนั้น ปริมาณออกซิเจนหรืออากาศต้องอยู่ในระดับที่เชื้อจุลินทรีย์กลุ่มออกซิไดซ์ไฮโดรเจนซัลไฟด์สามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ทั้งหมด (สมการที่ (4) – (6)) [15] ดังนั้นหากเติมในปริมาณที่มากเกินไปจนหลงเหลืออยู่ในระบบจะส่งผลเสียต่อเชื้อจุลินทรีย์ชนิดผลิตมีเทน เนื่องจากเชื่อกันว่าเป็นจุลินทรีย์ชนิดที่ไม่สร้างสปอร์ (non-spore forming bacteria) จึงไม่อาศัยออกซิเจนในการหายใจ ดังนั้นการลดปริมาณซัลไฟด์ไอออนด้วยการเติมออกซิเจนหรืออากาศในปริมาณน้อยจะส่งผลให้มีปริมาณซัลไฟด์ไอออนอยู่ในระดับต่ำหรืออาจไม่มีซัลไฟด์ไอออนเกิดขึ้นในระบบ จึงถือเป็นวิธีที่สามารถลดการสูญเสียสารอาหารรองในรูปการเกิดสารประกอบโลหะซัลไฟด์ได้ และสอดคล้องกับงานวิจัยนี้ที่ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ลดน้อยลงเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นในช่วง 4.23-8.23 kg/m³day เนื่องจากภายใต้สภาวะดังกล่าวพบองค์ประกอบของแก๊สออกซิเจนประมาณร้อยละ 8-9 โดยปริมาตร ซึ่งถือเป็นปริมาณที่เหมาะสมต่อเชื้อจุลินทรีย์ในการออกซิไดซ์ไฮโดรเจนซัลไฟด์ให้เป็นธาตุซัลเฟอร์จึงไม่หลงเหลืออยู่ในระบบ ในขณะที่ ณ อัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่ 13.92 kg/m³day พบแก๊สออกซิเจนในปริมาณมาก คือ ร้อยละ 14.55 โดยปริมาตร (ภาพที่ 4 (ก)) จากปริมาณแก๊สออกซิเจนที่พบในระบบทำให้สภาวะในช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ระหว่าง 4.23-8.23 kg/m³day ทำให้ระบบอยู่ในสภาวะ microaeration จึงทำให้ปริมาณซัลไฟด์ไอออนที่เกิดขึ้นอยู่ในระดับต่ำกว่า ณ อัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่ 13.92 kg/m³day อีกทั้งสีของเศษอาหารที่ผ่านการหมักในช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ 4.23-8.23 kg/m³day อ่อนกว่าเศษอาหารที่ผ่านการหมักที่อัตราการป้อนสารอินทรีย์ 13.92 kg/m³day แต่เข้มกว่าสีของเศษอาหารเริ่มต้น จึงสามารถสรุปได้ว่าระบบผลิตแก๊สชีวภาพในงานวิจัยนี้เกิดสารประกอบโลหะซัลไฟด์ในปริมาณมากขึ้นเมื่ออัตราการป้อนสารอินทรีย์เพิ่มขึ้นจาก 4.23-13.92 kg/m³day ในขณะที่ปริมาณแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ลดลง ซึ่งแสดงถึงการละลายของแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ที่ลดต่ำลงจึงทำให้โอกาสในการเกิดสารประกอบโลหะซัลไฟด์ในช่วงอัตราการป้อนสารอินทรีย์ที่ศึกษาลดลงตามลำดับ เป็นผลให้ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพเพิ่มขึ้นคิดเป็นร้อยละ 70-80 จากการเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายสารอินทรีย์ได้เพิ่มขึ้นร้อยละ 40-50 (ภาพที่ 2 และภาพที่ 4)

สมการที่ (4) – (6) แสดงถึงการเติมออกซิเจนหรืออากาศในปริมาณจำกัด เพื่อลดและ/หรือป้องกันการเกิดซัลไฟด์ไอออนโดยการเปลี่ยนซัลไฟด์ไอออนให้อยู่ในรูปกำมะถัน (S⁰)



การเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการผลิตแก๊สชีวภาพด้วยเทคนิคซีเลชันนั้นจะอาศัยสารคีเลชันที่มีหน้าที่ตรึงสารอาหารรองที่เป็นประจุสองบวกไม่ให้เกิดการสูญเสียไปจากระบบและยังช่วยลดการเกิดสารประกอบโลหะซัลไฟด์ [16] โดยสารคีเลชันจะเป็นสารเคมีกลุ่มที่มีฤทธิ์เป็นกรดที่สามารถเกิดปฏิกิริยาเชิงซ้อนกับไอออนบวกของสารอาหารรองเพื่อทำให้อาหารอาหารรองละลายน้ำได้มากขึ้น (water soluble complex) ตัวอย่างของสารคีเลชันที่นิยมใช้ เช่น กรดเอทิลีนไดอะมีนเตตระอะซิติก (ethylene diamine tetraacetic acid; EDTA) และกรดกลูตามิกไดอะซิเตต (glutamic acid diacetate; GLDA)

เป็นต้น เทคนิคคิลเลชันเป็นเทคนิคที่อาศัยการเกิดสารประกอบโคออร์ดิเนชันที่ประกอบด้วยลิแกนด์ประเภทโพลีเดนที่สามารถให้อิเล็กตรอนได้มากกว่า 2 อิเล็กตรอนในโมเลกุลเดียวกันของสารคีเลนต์ จากงานวิจัยการเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพด้วยเทคนิคคิลเลชัน ณ สภาวะที่เหมาะสม ด้วยการเติมสารคีเลนต์ชนิดกรดไดคาร์บอกซิลิกตามีความเข้มข้น 5 มิลลิกรัมต่อลิตร ลงไปในระบบ พบว่าหลังการเติมกรดไดคาร์บอกซิลิกตามีผลทำให้ประสิทธิภาพการผลิตแก๊สชีวภาพเพิ่มสูงขึ้นคิดเป็นร้อยละ 2.00 ในขณะที่ปริมาณกรดไขมันระเหยง่ายทั้งหมดและแก๊สไฮโดรเจนซัลไฟด์ลดลงคิดเป็นร้อยละ 34.65 และ 10.00 ตามลำดับมากไปกว่านั้นการใช้เทคนิคคิลเลชันสามารถป้องกันการตกตะกอนโลหะซัลไฟด์ได้ [17]

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณวิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย และคณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ที่สนับสนุนงบประมาณการวิจัยและอุปกรณ์ ตลอดจนเครื่องมือสำหรับการดำเนินการวิจัยให้เสร็จสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

1. Andersson J, Helander-Claesson J, Olsson J. Study on reduced process temperature for energy optimisation in mesophilic digestion: A lab to full-scale study. *Appl Energy* 2020;271:115108.
2. กรมพัฒนาพลังงานทดแทนและอนุรักษ์พลังงาน กระทรวงพลังงาน. คู่มือความปลอดภัยในการผลิตและการใช้พลังงานก๊าซชีวภาพ [อินเทอร์เน็ต]. 2557 [เข้าถึงเมื่อ 18 พ.ค. 2566]. เข้าถึงได้จาก: <http://e-lib.dede.go.th/mm-data/Bib15372.pdf>
3. Zhong C, Liu Y, Xu X, Yang B, Amer M, Zhang P, Huang G. Paddy-upland rotation with Chinese milk vetch retention reduced the global warming potential and greenhouse gas emissions intensity of double rice cropping system. *Environ Pollut* 2021;276:116696.
4. Intanoo P, Chaimongkol P, Chavadej S. Hydrogen and methane production from cassava wastewater using two-stage upflow anaerobic sludge blanket reactors (UASB) with an emphasis on maximum hydrogen production. *Int J Hydrog Energy* 2016;41(14):6107-14.
5. Ratanatamskul C, Manpetch P. Comparative assessment of prototype digester configuration for biogas recovery from anaerobic co-digestion of food waste and rain tree leaf as feedstock. *Int Biodeterior Biodegradation* 2016;113:367-74.
6. Menon A, Wang J-Y, Giannis A. Optimization of micronutrient supplement for enhancing biogas production from food waste in two-phase thermophilic anaerobic digestion. *Waste Manag* 2017;59:465-75.
7. Ilangovan K, Noyola A. Availability of micronutrients during anaerobic digestion of molasses stillage using an upflow anaerobic sludge blanket (UASB) reactor. *Environ Technol* 1993;14(8):795-9.
8. Thanh PM, Ketheesan B, Yan Z, Stuckey D. Trace metal speciation and bioavailability in anaerobic digestion: A review. *Biotechnol Adv* 2016;34(2):122-36.
9. Seneesrisakul K, Sutabutr T, Chavadej S. The effect of temperature on the methanogenic activity in relation to micronutrient availability. *Energies* 2018;11(5):1057.
10. Chandra R, Vijay VK, Subbarao PMV, Khura K. Production of methane from anaerobic digestion of jatropha and pongamia oil cakes. *Appl Energy* 2012;93:148-59.



11. Khan IU, Othman MHD, Hashim H, Matsuura T, Ismail AF, DashtArzhandi M, et al. Rezaei-DashtArzhandi M, Azelee IW. Biogas as a renewable energy fuel – A review of biogas upgrading, utilization and storage. *Energy Convers Manag* 2017;150:277-94.
12. Nhut HH, Thanh VLT, Le LT. Removal of H₂S in biogas using biotrickling filter: Recent development. *Process Saf Environ Prot* 2020;144:297-309.
13. วรณพร วัฒนสุนทร, วิษณุ สี่โหนด, เฉลิมชัย เรืองชัยนาค, ปัญญา สัจจกมล, อรทัย ขวาลภาฤทธิ์, สุภางค์ จุฬาลักษณ์นกุล, วรวิทย์ จุฬาลักษณ์นกุล. การลดก๊าซไฮโดรเจนซัลไฟด์ในระบบผลิตก๊าซด้วยกระบวนการทางชีวภาพ. *วารสารวิทยาศาสตร์ มศว.* 2557;30(2):187-202.
14. พัชรินทร์ ราโช, บุญชัย วิจิตรเสถียร. การเพิ่มประสิทธิภาพการย่อยสลายแบบไร้ออกซิเจนเพื่อบำบัดตะกอนส่วนเกินจากระบบตะกอนเร่งด้วยกระบวนการหมุนเวียนค่าความเป็นด่าง. *รายงานการวิจัย สาขาวิศวกรรมสิ่งแวดล้อม, สำนักวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี; 2558 สัญญาเลขที่ SUT7-715-55-12-47.*
15. Chen Q, Wu W, Qi D, Ding Y, Z Zhao. Review on microaeration-based anaerobic digestion: State of the art, challenges, and prospectives. *Sci Total Environ* 2020;710:136388.
16. Jiraprasertwong A, Seneesrisakul K, Pornmai K, Chavadej S. High methanogenic activity of a three-stage UASB in relation to the granular sludge formation. *Sci Total Environ* 2020;724:138145.
17. ยสุภณีจ เอี่ยมจินดา. การเพิ่มประสิทธิภาพการผลิตก๊าซมีเทนจากน้ำกากส่าที่มีปริมาณของโพแทสเซียมและซัลเฟตสูงโดยการเจือจางและควบคุมปริมาณของธาตุอาหารเสริม. *วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีปิโตรเคมี, วิทยาลัยปิโตรเลียมและปิโตรเคมี จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย. กรุงเทพฯ; 2562.*



การวิเคราะห์ปริมาณรูตินในน้ำผลไม้ด้วยการตรวจวัดทางเคมีไฟฟ้า
โดยใช้ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนไส้ดินสอดัดแปรด้วยอนุภาคทอง

Determination of Rutin in Fruit Juice by Electrochemical Detection
Using a Gold Particle-Modified Pencil Carbon Electrode

จุฑามาศ มนต์เดช¹ กุลวดี ปิ่นวัฒนะ¹ อนรรักษ์ จิตต์บึงพร้าว¹ ธาณินทร์ แดงกวารัมย์²
และ อัญชนา ปรีชาวรพันธ์^{1*}

¹สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม พิษณุโลก 65000

²สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยแม่โจ้ เชียงใหม่ 50290

Jutamat Mondech¹, Kulwadee Pinwattana¹, Anurak Chitbuengphrao¹, Tanin Tangkuaram²,
and Anchana Preechaworapun^{1*}

¹Program of Chemistry, Faculty of Science and Technology, Pibulsongkram Rajabhat University,
Phitsanulok 65000

²Program of Chemistry, Faculty of Science, Maejo University, Chiangmai 50290

*Corresponding author: e-mail: anchaph@psru.ac.th

Received: 16 January 2024/Revised: 31 March 2024/Accepted: 8 April 2024

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาปฏิกิริยาออกซิเดชันของรูตินบนขั้วไฟฟ้าคาร์บอนไส้ดินสอดัดแปรด้วยอนุภาคทอง ติดตามการตรวจวัดโดยใช้เทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี และตรวจวัดเชิงปริมาณด้วยเทคนิคสแควร์เวฟแอนโอดิกสทริปปิงโวลแทมเมตรี จากการศึกษาพบว่าขั้วไฟฟ้าคาร์บอนไส้ดินสอดัดแปรด้วยอนุภาคทองมีความสามารถที่ดีในการเพิ่มสัญญาณการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของรูตินในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ (pH 4.0) เป็น 1.4 เท่าของขั้วไฟฟ้าคาร์บอนไส้ดินสอดัดแปร และ 475 เท่าของขั้วไฟฟ้าแกรสสคาร์บอนที่ดัดแปรด้วยอนุภาคทอง พบว่าให้ผลของการตรวจวัดรูตินช่วงความเข้มข้นที่เป็นเส้นตรง 2 ช่วง คือ 3 - 96 และ 96 - 235 ไมโครโมลาร์ ด้วยความชันที่สูงถึง 1,070 และ 102 ไมโครแอมแปร์ต่อมิลลิโมลาร์ ชัดจำกัดในการตรวจวัดเท่ากับ 3 ไมโครโมลาร์ ยิ่งไปกว่านั้นขั้วไฟฟ้าคาร์บอนไส้ดินสอดัดแปรด้วยอนุภาคทองยังมีความสามารถในการประยุกต์วิเคราะห์หาปริมาณรูตินในน้ำผลไม้ได้

คำสำคัญ: รูติน เคมีไฟฟ้า ออกซิเดชัน น้ำผลไม้ อนุภาคทอง



Abstract

This research, an electrochemical investigation of rutin oxidation on gold particle-modified pencil carbon electrode (Au/PCE) was carried out using cyclic voltammetry and square-wave voltammetry for quantitative analysis. The results indicated that the modified electrode showed the excellent enhanced the oxidation signal of rutin in phosphate buffer solution (pH 4) to be 1.4 times and 475 times higher than bare pencil carbon electrode and gold particle-modified glassy carbon electrode (Au/GCE), respectively. The result showed two linearities at concentration of 3 - 96 μM , and 96 - 1,314 μM with high sensitivity at 1,070 and 102 $\mu\text{A}/\text{mM}$ The limit of detection was found to be 3 μM . Furthermore, Au/PCE can applied for the rutin determination in fruit juices.

Keywords: Rutin, Electrochemistry, Oxidation, Fruit juice, Gold particles

บทนำ

รูติน (Rutin) คือ สารพฤกษเคมีที่จัดอยู่ในกลุ่ม ไบโอฟลาโวนอยด์ (Bioflavonoid) ชนิดหนึ่ง ที่พบได้ในธรรมชาติทั้งผักและผลไม้ ได้แก่ แอปเปิ้ล มะกอก ส้ม ชาเขียว ใบแปะก๊วย หัวหอม และองุ่น เป็นต้น สารประกอบรูตินสามารถละลายในน้ำมีคุณสมบัติต้านอนุมูลอิสระ ด้านการอักเสบ ด้านไวรัส ด้านจุลินทรีย์ ด้านเซลล์มะเร็ง [1] ใช้เสริมสร้างสุขภาพที่ดีของหลอดเลือด ปรับปรุงการไหลเวียนโลหิต ลดคอเลสเตอรอล บรรเทาอาการของโรคข้ออักเสบ และช่วยต้านอาการภูมิแพ้ได้ดี ช่วยให้หลอดเลือดฝอยและหลอดเลือดดำแข็งแรง จึงมีผลในการรักษาอาการเส้นเลือดขอด เส้นเลือดอุดตัน และอาการของโรคหลอดเลือดหัวใจได้อย่างมีประสิทธิภาพ

การวิเคราะห์หาปริมาณรูตินทำได้หลายเทคนิค ซึ่งแต่ละเทคนิคมีข้อดีและข้อเสียในการวิเคราะห์แตกต่างกัน จากการศึกษางานวิจัย พบว่าเทคนิคที่นิยมใช้ ได้แก่ เทคนิคโครมาโทกราฟีของเหลวสมรรถนะสูง (High Performance Liquid Chromatography; HPLC) [2, 3] มีความสามารถในการแยกสูง สามารถวิเคราะห์สารกลุ่มฟลาโวนอยด์ได้รวมทั้งการตรวจวัดรูติน HPLC เป็นเทคนิคที่ต้องอาศัยผู้ที่มีความชำนาญในเครื่องมือสำหรับวิเคราะห์ โดยใช้ตัวตรวจวัดเป็นเทคนิคอัลตราไวโอเลตสเปกโตรโฟโตเมตรี (UV spectrophotometry) [3] นอกจากนี้รูตินสามารถสกัดด้วยตัวดูดซับของแข็งนาโนคอมโพสิตของพอลิเมอร์ไฮโดรเจลร่วมกับ Fe_3O_4 ร่วมกับเทคนิคตัวตรวจวัด UV-visible (UV-VIS) spectrophotometry [4] กลุ่มวิจัยของ Xu (2010) [5] ได้ทำการตรวจวัดรูตินด้วยเทคนิค UV-VIS spectrophotometry ร่วมกับเทคนิคเลเซอร์-อินดิคซ์ ฟลูออริเมตริก (Laser-Induced Fluorimetric Detection) ซึ่งสามารถตรวจวัดรูตินได้ด้วยความเข้มข้นต่ำๆ การวิเคราะห์รูตินยังมีเทคนิคเคมีลูมิเนสเซนซ์ (Chemiluminescence) [6] เทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโตรสโกปี (Fourier Transform Infrared Spectroscopy; FT-IR) [7] ซึ่งเทคนิคที่กล่าวเบื้องต้นนี้จัดได้ว่าเป็นเทคนิคที่มีความจำเพาะกับสารที่ต้องการวิเคราะห์ แต่เนื่องจากเป็นเครื่องมือที่มีราคาสูง ต้องตรวจวัดในห้องปฏิบัติการ และมีผู้เชี่ยวชาญในการตรวจวัด ด้วยข้อจำกัดของเทคนิคที่กล่าวมานั้นจึงมีการพัฒนาการตรวจวัดรูติน โดยใช้เทคนิคทางเคมีไฟฟ้า บนขั้วไฟฟ้าที่ดัดแปรด้วยวัสดุที่หลากหลาย และใช้ฐานของขั้วไฟฟ้าที่เป็นโลหะ และคาร์บอน จากการสืบค้นพบว่าขั้วไฟฟ้าคาร์บอน เช่น กลาสสิคาร์บอน และ กราไฟต์ กลุ่มวิจัยของ Jin (2018) [8] ตรวจวัดรูตินด้วยเทคนิคเคมีไฟฟ้าบนขั้วไฟฟ้ากลาสสิคาร์บอนที่ดัดแปรด้วยซีโอไลติกอิมิดาโซเลตเฟรมเวิร์ก-8 (zeolitic imidazolate framework-8) และอะเซทิลีนแบล็ค (acetylene black) ร่วมกับไคโตซาน (chitosan) ได้ช่วงความเข้มข้นที่เป็นเส้นตรงความเข้มข้น 0.1 ถึง 10 ไมโครโมลาร์ ขีดจำกัดในการตรวจวัด 0.004 ไมโครโมลาร์ และกลุ่มวิจัยของ Zhen (2021) [9]

ได้นำขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอนมาดัดแปรด้วยคาร์บอนนาโนสเฟียร์และกราฟีน พบว่าสามารถตรวจวัดรูตินได้ในช่วงความเข้มข้น 0.5 ถึง 189 ไมโครโมลาร์ ชีตจำกัดในการตรวจวัด 0.05 ไมโครโมลาร์ นอกจากนี้ยังมีขั้วไฟฟ้าคาร์บอนไส้ดินสอ เช่น กลุ่มวิจัยของ En-Nakra (2021) [10] ได้ใช้ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนจากดินสอในการตรวจวัดรูตินในน้ำผลไม้โดยดัดแปรขั้วไฟฟ้าด้วย 2-เมอร์แคปโทเบนโซไทโธโซล (2-mercaptobenzothiazole) พบว่าสามารถตรวจวัดรูตินได้ในช่วงของความเข้มข้น 0.039 ถึง 10.5 ไมโครโมลาร์ ซึ่งขั้วไฟฟ้าสามารถนำมาประยุกต์วิเคราะห์ตัวอย่างในน้ำผลไม้ได้ วัสดุคาร์บอนจากไส้ดินสอเป็นขั้วไฟฟ้าหนึ่งที่สามารถหาได้ง่าย มีราคาไม่แพง สามารถใช้แล้วทิ้งได้

ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงมีแนวคิดนำคาร์บอนไส้ดินสอมาเป็นฐานในการดัดแปรขั้วไฟฟ้า โดยนำอนุภาคทองมาดัดแปรบนขั้วไฟฟ้าคาร์บอนด้วยกระบวนการทางเคมีไฟฟ้า ซึ่งจากการทบทวนงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่ามีนักวิจัยบางกลุ่มได้นำอนุภาคทองมาตรึงร่วมกับวัสดุอื่นๆ เพื่อตรวจวัดรูติน เช่น การสังเคราะห์อนุภาคทองร่วมกับท่อนาโนทิวป์และหยดลงบนขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอน [11] การดัดแปรขั้วไฟฟ้าทำงานกลาสคาร์บอนด้วยอนุภาคนาโนทอง/เอทิลีนไดเอมีน/คาร์บอนนาโนทิวป์ [1] การตรึงอนุภาคนาโนของทองร่วมกับกราฟีนดัดแปรบนฐานขั้วไฟฟ้าของเหลวไอออนิกคาร์บอน ประกอบไปด้วย 3 ขั้นตอน การสร้างฐานขั้วไฟฟ้าของเหลวไอออนิกคาร์บอน การตรึงอนุภาคทองด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี และการตรึงกราฟีนบนทองด้วยเทคนิคแอมเปอร์โรเมตรี [12] จากผลของการดัดแปรขั้วไฟฟ้าร่วมกับอนุภาคทองบนฐานขั้วไฟฟ้าใช้งานคาร์บอน พบว่าให้สัญญาณในการตรวจวัดที่มีความไว และสามารถตรวจวัดได้ในช่วงของความเข้มข้นรูตินได้ถึงไมโครโมลาร์ จากการสืบค้นยังไม่พบขั้วไฟฟ้าใช้งานคาร์บอนไส้ดินสอเป็นฐานที่ดัดแปรด้วยอนุภาคทอง ดังนั้นคณะผู้วิจัยสนใจพัฒนาเทคนิคการตรวจวัดรูตินด้วยเคมีไฟฟ้าบนขั้วไฟฟ้าคาร์บอนไส้ดินสอที่ดัดแปรด้วยอนุภาคทองอย่างง่ายด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยข้อดีของเทคนิคทางเคมีไฟฟ้าคือใช้สารในการตรวจวัดปริมาณน้อยในระดับไมโครลิตร วัดได้ที่มีความเข้มข้นต่ำ และมีความไวในการตรวจวัดสูง

วัตถุประสงค์ของการวิจัย

เพื่อพัฒนาขั้วไฟฟ้าคาร์บอนไส้ดินสอที่ดัดแปรด้วยอนุภาคทองสำหรับตรวจวัดรูตินในน้ำผลไม้พร้อมดื่ม

วิธีดำเนินการวิจัย

1. เครื่องมือและอุปกรณ์

เครื่องวิเคราะห์ทางเคมีไฟฟ้า Potentiostat AUTOLAB, model PGSTAT204 บริษัท Metrohm, ประเทศเนเธอร์แลนด์ เครื่องพีเอชมิเตอร์ (pH meter) รุ่น MP 220, บริษัท Mettler Toledo, ประเทศจีน, ระบบขั้วไฟฟ้า 3 ขั้ว ประกอบด้วย ขั้วไฟฟ้าใช้งานกลาสคาร์บอน (เส้นผ่านศูนย์กลาง 3 มิลลิเมตร) และคาร์บอนไส้ดินสอ (Staedtler 2B Hi-polymer เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5 มิลลิเมตร ความสูงของคาร์บอนไส้ดินสอที่จมอยู่ในสารละลาย 2 มิลลิเมตร) ขั้วไฟฟ้าอ้างอิงเป็นซิลเวอร์/ซิลเวอร์คลอไรด์ (Ag/AgCl) และขั้วไฟฟ้าช่วยเป็นแพลทินัม

2. สารเคมี

เอทานอล (Ethanol, C_2H_6O) จากบริษัท Carlo Erba, ประเทศอิตาลี โพแทสเซียมคลอไรด์ (Potassium Chloride, KCl) โพแทสเซียม เฮกซะไซยาโนเฟอเรต (III) AR, $K_3[Fe(CN)_6]$ จากบริษัท MERCK KGaA, ประเทศเยอรมัน กรดฟอสฟอริก (Phosphoric acid, H_3PO_4) จากบริษัท RCL Labscan, ประเทศไทย รูติน (Rutin hydrate, $C_{27}H_{30}O_{16} \cdot H_2O$) สารละลายมาตรฐานทอง (Gold standard AAS, in 5-10% HCl) โซเดียมฟอสเฟตไดเบสิกโดเดคาไฮเดรต (Sodium phosphate dibasic dodecahydrate, $HNa_2O_4P \cdot 12H_2O$) จากบริษัท SIGMA-ALDRICH, ประเทศสหรัฐอเมริกา โซเดียมไฮดรอกไซด์ (Sodium hydroxide, NaOH) จากบริษัท KemAus ประเทศออสเตรเลีย โพแทสเซียม เพอร์โรซียานาต์



(Potassium ferrocyanide AR, $K_4[Fe(CN)_6 \cdot 3H_2O]$ จากบริษัท LoBa Chemie, ประเทศอินเดีย กรดไฮโดรคลอริก (Hydrochloric acid 37%, HCl) จากบริษัท Qrec, ประเทศนิวซีแลนด์

3. การตรึงอนุภาคทองบนขั้วไฟฟ้าใช้งาน

การตรึงอนุภาคทองด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี โดยนำขั้วไฟฟ้าใช้งาน ได้แก่ ขั้วไฟฟ้าคาร์บอนไส้ดินสอ (PCE) และ ขั้วไฟฟ้ากลาสคาร์บอน (GCE) ใส่ลงในเซลล์เคมีไฟฟ้าที่ประกอบไปด้วยขั้วไฟฟ้าใช้งาน ขั้วไฟฟ้าอ้างอิง และขั้วไฟฟ้าช่วยเติมสารละลายมาตรฐานทองความเข้มข้น 10 พีพีเอ็ม ใส่ลงในเซลล์เคมีไฟฟ้า ที่เจือจางในสารละลาย 0.1 โมลาร์ KCl ที่ละลายอยู่ในสารละลาย 0.1 โมลาร์ HCl ตั้งศักย์ไฟฟ้าช่วง -0.6 ถึง 1.2 โวลต์ ด้วยอัตราการสแกน 50 มิลลิโวลต์ต่อวินาที ทำการศึกษาจำนวนรอบของการตรึงอนุภาคทองที่ให้สัญญาณในการตรวจวัดรูติน ให้จำนวนรอบเป็น 1, 2, 3 และ 4 รอบ จากนั้นนำขั้วไฟฟ้าที่ผ่านการตรึงมาติดลางสารละลายส่วนเกินออกด้วยน้ำปราศจากไอออน จะได้ขั้วไฟฟ้าใช้งาน Au/PCE และ Au/GCE ที่พร้อมใช้งาน

4. การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมสำหรับการตรวจวัดรูตินด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า

เทคนิคทางเคมีไฟฟ้าที่ใช้ศึกษาการตรวจวัดรูตินประกอบด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี และสแควร์เวฟแอนโนติกสทริปปิงโวลแทมเมตรี โดยนำขั้วไฟฟ้าที่ผ่านการตรึงอนุภาคทองเป็นขั้วไฟฟ้าใช้งาน ใส่สารละลายอิเล็กโทรไลต์ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ ปริมาตร 3 มิลลิลิตร ลงในเซลล์ที่ประกอบด้วยขั้วไฟฟ้าระบบ 3 ขั้วไฟฟ้า และติดตั้งอุปกรณ์ตรวจวัดด้วยเทคนิคเคมีไฟฟ้า โดยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรีตั้งศักย์ไฟฟ้าอยู่ในช่วง 0 ถึง 1 โวลต์ ศึกษา pH ของอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสมจาก pH 2 ถึง pH 8 สำหรับการตรวจวัดรูติน

การศึกษาระบวนการทางเคมีไฟฟ้าบนผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าใช้งานทำการตรวจวัดด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรีในสารละลาย 5 mM $Fe(CN)_6^{3-}/Fe(CN)_6^{4-}$ ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ 0.1 โมลาร์ KCl ตั้งอัตราการสแกน 0.01 ถึง 0.50 โวลต์/วินาที ให้ศักย์ไฟฟ้าในช่วง 0.0 ถึง 1.2 โวลต์

เทคนิคสแควร์เวฟแอนโนติกสทริปปิงโวลแทมเมตรีเป็นการเพิ่มความเข้มข้นของรูตินโดยการให้ศักย์ไฟฟ้า และเวลาที่เหมาะสม โดยตั้งศักย์ไฟฟ้าก่อนการตรวจวัดเป็น -0.8, -0.9, -1.0, และ -1.1 โวลต์ ตามลำดับ และให้เวลาในการสะสมรูตินบนผิวหน้าขั้วไฟฟ้าเป็น 15, 30, 45, 60 และ 90 นาที ตามลำดับ และทำการตรวจวัดด้วยเทคนิคสแควร์เวฟโวลแทมเมตรีด้วยศักย์ไฟฟ้าเริ่มต้น -0.4 โวลต์ ศักย์ไฟฟ้าสุดท้าย 1.2 โวลต์ แต่ละขั้นของการเพิ่มศักย์ไฟฟ้า (step potential) 0.005 โวลต์ ช่วงความสูงของศักย์ไฟฟ้า (Modulation amplitude) 0.02 โวลต์ ความถี่ (Frequency) 25 เฮิรตซ์

5. การศึกษาตัวรบกวนการตรวจวัดรูติน

ตรวจวัดโดยใช้เทคนิคสแควร์เวฟแอนโนติกสทริปปิงโวลแทมเมตรีด้วยสภาวะที่เหมาะสมจากข้อ 4 ตรวจวัดรูตินที่ความเข้มข้น 100 ไมโครโมลาร์ ทำการวัดความสูงของกระแสออกซิเดชันเป็น I_0 จากนั้นเติมตัวรบกวนประกอบด้วยสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ดังนี้ K^+ Mg^{2+} Zn^{2+} และกลูโคสมีความเข้มข้นเป็น 5 มิลลิโมลาร์ และกรดแอสคอร์บิกมีความเข้มข้น 1 มิลลิโมลาร์ ตามลำดับ และทำการวัดความสูงของกระแสออกซิเดชันหลังเติมตัวรบกวนแต่ละตัวให้กระแสเป็น I ทำการคำนวณร้อยละของ I/I_0

6. การตรวจวัดรูตินในตัวอย่างน้ำผลไม้

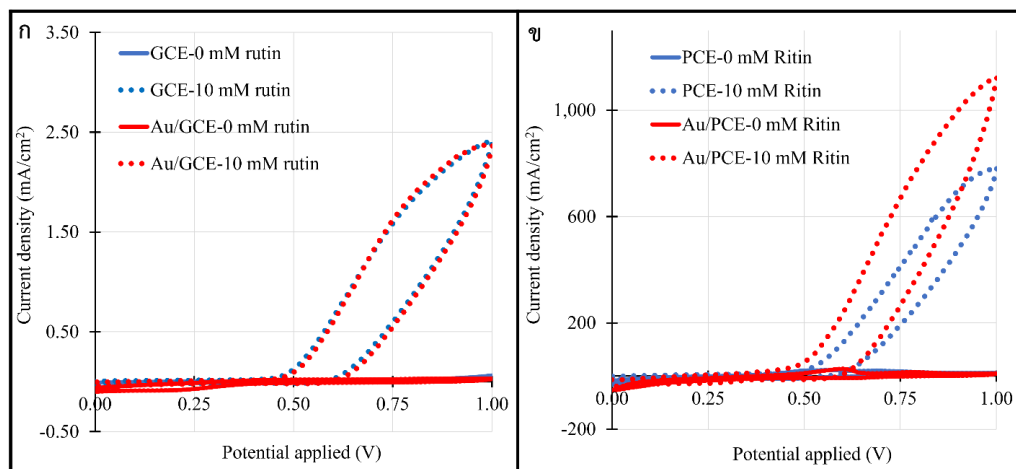
ตัวอย่างมีดังนี้ น้ำส้มเขียวหวาน และน้ำองุ่น ใส่สารละลายอิเล็กโทรไลต์ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ที่เหมาะสม ปริมาตร 3 มิลลิลิตร ลงในเซลล์ ต่อขั้วไฟฟ้า Au/PCE เป็นขั้วไฟฟ้าใช้งาน ขั้วไฟฟ้า Ag/AgCl เป็นขั้วไฟฟ้าอ้างอิง และขั้วไฟฟ้าแพลทินัมเป็นขั้วไฟฟ้าช่วย จุ่มลงในเซลล์ และทำการตรวจวัดสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ด้วยเทคนิคสแควร์เวฟแอนโนติกสทริปปิงโวลแทมเมตรีที่สภาวะเหมาะสม ให้ศักย์ไฟฟ้าสำหรับเพิ่มความเข้มข้นของรูตินเป็น -0.9 โวลต์ เป็นเวลา 30 วินาที และตรวจวัดในช่วงศักย์ไฟฟ้า -0.4 ถึง 1.2 โวลต์ จากนั้นนำตัวอย่างใส่ลงในเซลล์ปริมาตร 50 ไมโครลิตร และทำการตรวจวัด

ผลการวิจัย

การตรวจวัดรูตินด้วยเทคนิคทางเคมีไฟฟ้า บนขั้วไฟฟ้าคาร์บอนที่เปรียบเทียบกับสัญญาณการตรวจวัด 2 ขั้วไฟฟ้าคือ PCE และ GCE โดยทำการตรึงอนุภาคทองด้วยเทคนิคโซลิกโวลแทมเมตรี และนำไปทำการตรวจวัดรูติน ด้วยเทคนิคโซลิกโวลแทมเมตรี และสแควร์เวฟแอนอดิกสทริปปิงโวลแทมเมตรี โดยเทคนิคโซลิกโวลแทมเมตรีใช้สำหรับศึกษาสภาวะที่เหมาะสมกับการตรวจวัดรูติน ซึ่งจะศึกษาจำนวนรอบในการตรึงอนุภาคทอง pH ของอิเล็กโทรไลต์ที่เหมาะสม และศึกษากระบวนการเกิดปฏิกิริยาบนผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าใช้งาน และเทคนิคสแควร์เวฟแอนอดิกสทริปปิงโวลแทมเมตรีใช้สำหรับศึกษาการวิเคราะห์เชิงปริมาณที่ให้สัญญาณในการวิเคราะห์ที่มีกระแสสูงและสามารถตรวจวัดได้ที่มีความเข้มข้นต่ำ โดยใช้ศักย์ไฟฟ้าและเวลาช่วยในการเพิ่มความเข้มข้นที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า และนำขั้วไฟฟ้าที่เหมาะสมมาทำการตรวจวัดรูตินในตัวอย่างน้ำผลไม้ ซึ่งผลการวิจัยได้ผลดังนี้

ผลของอนุภาคทองดัดแปรบนขั้วไฟฟ้าที่มีต่อการตรวจวัดรูตินด้วยเทคนิคโซลิกโวลแทมเมตรี

เมื่อนำขั้วไฟฟ้าทั้ง 2 ชนิด คือ PCE และ GCE ตรึงด้วยอนุภาคทองได้เป็น Au/PCE และ Au/GCE นำมาตรวจวัดรูตินที่ความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ ได้ผลดังภาพที่ 1 พบว่ารูตินสามารถเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันได้บนขั้วไฟฟ้า PCE และ GCE โดย GCE และ Au/GCE เริ่มเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของรูตินบนขั้วไฟฟ้าที่ตำแหน่งเดียวกันคือ 0.48 โวลต์ และความสูงของความหนาแน่นกระแสที่ตำแหน่งศักย์ไฟฟ้า 1.0 โวลต์ เท่ากับ 2.37 มิลลิแอมแปร์ ของขั้วไฟฟ้า GCE และ Au/GCE ในขณะที่ PCE และ Au/PCE เริ่มเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ศักย์ไฟฟ้า 0.50 และ 0.45 โวลต์ ตามลำดับ และให้สัญญาณของความหนาแน่นกระแสเท่ากับ 799 และ 1125 มิลลิแอมแปร์ ตามลำดับ ซึ่ง Au/PCE สูงกว่า PCE 326 มิลลิแอมแปร์ นั้นเป็นผลมาจากการติดของอนุภาคทองบน PCE ส่งผลให้มีพื้นที่ในการตรวจวัดเพิ่มขึ้นทำให้กระแสแอนอดิกพีคสูงขึ้น เมื่อสังเกตตำแหน่งของฐานพีคศักย์ไฟฟ้าของการเริ่มเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันพบว่า Au/PCE สามารถเกิดปฏิกิริยาได้ที่ศักย์ไฟฟ้าต่ำกว่า PCE อยู่ 0.05 โวลต์ แสดงให้เห็นถึงอนุภาคทองมีคุณสมบัติช่วยในการส่งผ่านอิเล็กตรอนเร็วขึ้น ส่งผลให้ตำแหน่งของศักย์ไฟฟ้าออกซิเดชันขีฟเข้าใกล้ 0 โวลต์ เมื่อเปรียบเทียบความสูงของความหนาแน่นกระแสระหว่าง Au/PCE และ Au/GCE พบว่า Au/PCE มีความสูงของความหนาแน่นกระแสมากกว่าประมาณ 475 เท่าของ Au/GCE ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงใช้ Au/PCE เป็นขั้วไฟฟ้าใช้งานสำหรับตรวจวัดรูติน

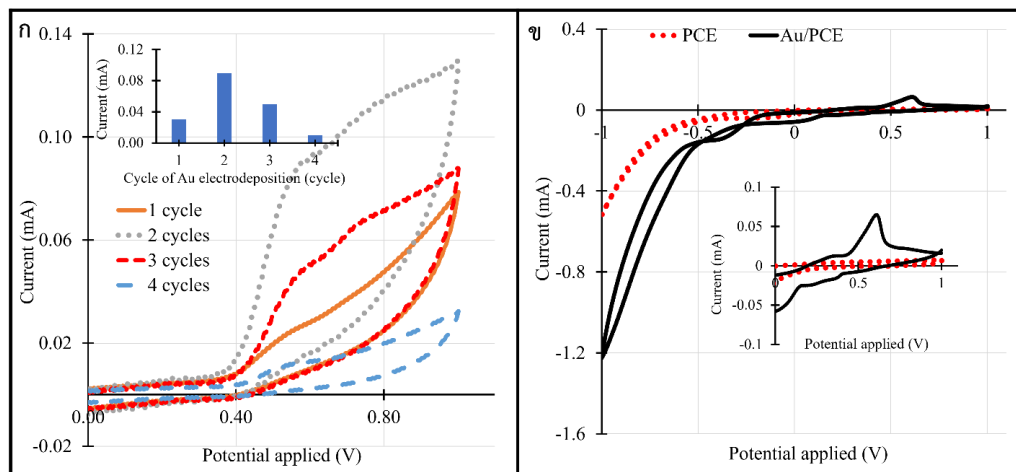


ภาพที่ 1 โซลิกโวลแทมโมแกรมของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 2.3 ที่ไม่มี (เส้นทึบ) และมีรูตินความเข้มข้น 10 มิลลิโมลาร์ (เส้นประ) โดยขั้วไฟฟ้าใช้งานเป็น GCE (A) และ PCE (B) ที่ไม่ตรึง (เส้นสีน้ำเงิน) และตรึงอนุภาคทอง (เส้นสีแดง)

คณะผู้วิจัยเลือกทำการศึกษากการตรึงอนุภาคทองบน PCE ด้วยเทคนิคโซลิกโวลแทมเมตรีที่จำนวนรอบ 1, 2, 3 และ 4 รอบ เมื่อนำไปตรวจวัดรูตินที่ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ ได้ผลดังโซลิกโวลแทมโมแกรมภาพที่ 2 (ก) จากผลการตรวจวัดรูตินบน



Au/PCE พบว่าจำนวนรอบของการตรึงอนุภาคทองให้กระแสในการตรวจวัดที่สูงขึ้นตามจำนวนรอบที่เพิ่มขึ้นในจำนวนรอบที่ 1 และ 2 รอบ โดยที่ 2 รอบ ให้ความสูงของกระแสออกซิเดชันสูงสุด เมื่อเพิ่มจำนวนรอบเป็น 3 และ 4 รอบ พบว่าความสูงของกระแสออกซิเดชันของรูตินค่อยๆ ลดลง ตามลำดับ น่าจะเป็นเพราะว่าผลจากการตรึงอนุภาคทองถูกจำกัดด้วยพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าคาร์บอนไส้ดินสอด ดังนั้นการตรึงอนุภาคทองจึงเลือกใช้ที่จำนวน 2 รอบสแกน สำหรับการวิเคราะห์รูติน เมื่อเราศึกษาการติดของอนุภาคทองบน PCE ด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรีในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฟอสเฟตบัฟเฟอร์บนขั้วไฟฟ้าใช้งานของ PCE และ Au/PCE ดังภาพที่ 2 (ข) พบว่าบน PCE ไม่ปรากฏฟิสิกในช่วงของศักย์ไฟฟ้าที่สแกน -1 ถึง +1 โวลต์ ในขณะที่ Au/PCE พบฟิสิกออกซิเดชันของทองที่อยู่บนพื้นผิวที่ศักย์ไฟฟ้า 0.62 โวลต์ [13-15] และปฏิกิริยารีดักชันที่ 0 [14-16] เป็นการเกิดรีดักชันของ Au(III) ได้เป็น Au แสดงให้เห็นถึงพื้นผิวของขั้วไฟฟ้ามีอนุภาคทองติดบนขั้วไฟฟ้าใช้งาน PCE



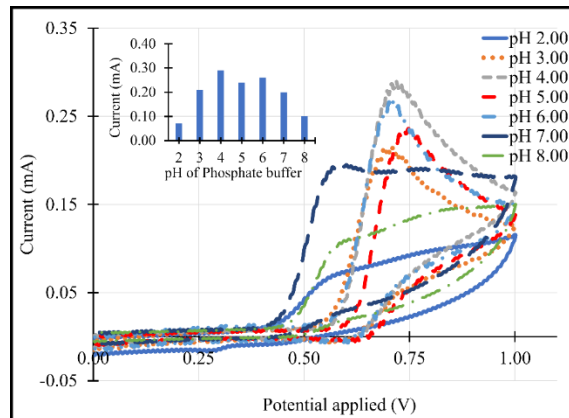
ภาพที่ 2 (ก) ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของ 5 มิลลิโมลาร์ รูตินที่ได้จากการตรวจวัดบนขั้วไฟฟ้า Au/PCE ด้วยจำนวนรอบในการตรึงอนุภาคทองต่างกัน 1, 2, 3 และ 4 รอบ และกราฟแผนภูมิแท่งแทรกแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับจำนวนรอบการตรึงอนุภาคทอง (ข) ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฟอสเฟตบัฟเฟอร์บนขั้วไฟฟ้าใช้งาน PCE และ Au/PCE

อิทธิพลของอิเล็กโทรไลต์ที่ pH ต่างกัน กับการตรวจวัดรูตินด้วยเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรี

การศึกษามูลของความเป็นกรดเบสที่มีผลต่อการตรวจวัดรูตินที่ความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ บนขั้วไฟฟ้าใช้งาน Au/PCE พบว่าค่าของ pH ตั้งแต่ pH 2.0 ถึง 8.0 มีผลต่อตำแหน่งของการเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันของรูติน และความสูงของกระแสออกซิเดชัน ได้ผลดังภาพที่ 3 โดยความสูงของกระแสสูงสุด 0.29 มิลลิแอมแปร์ ที่ pH 4.0 โดยจะเกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันที่ศักย์ไฟฟ้า 0.69 โวลต์

พฤติกรรมของกระบวนการเกิดปฏิกิริยาบนขั้วไฟฟ้า Au/PCE

การศึกษากฎการเกิดปฏิกิริยาที่มีต่อผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าที่พัฒนาขึ้น โดยศึกษาจากการให้อัตราการสแกนจากเทคนิคไซคลิกโวลแทมเมตรีโดยใช้สารละลาย $[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{3-}/[\text{Fe}(\text{CN})_6]^{4-}$ และตั้งค่าอัตราการสแกนเป็น 0.01, 0.05, 0.10, 0.25 และ 0.50 โวลต์ต่อวินาที ตามลำดับ ได้ไซคลิกโวลแทมโมแกรมดังภาพที่ 4 (ก) เมื่อพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของกระแสปฏิกิริยาออกซิเดชัน และปฏิกิริยาออกซิเดชัน กับรากที่สองของอัตราการสแกน ได้ผลดังภาพที่ 4 (ข) ซึ่งกระแสของปฏิกิริยารีดอกซ์เป็นสัดส่วนโดยตรงกับรากที่สองของอัตราการสแกน ด้วยสมการเชิงเส้น $I_{pa} \text{ (mA)} = 0.6042\sqrt{\nu} + 0.0145$ ($R^2=0.9979$) และ $I_{pc} \text{ (mA)} = 0.4041\sqrt{\nu} - 0.0465$ ($R^2= 0.9973$) ดังนั้นผลจากการตรวจวัดทำให้ทราบว่ากระบวนการเกิดปฏิกิริยาที่ผิวหน้าของขั้วไฟฟ้า Au/PCE เป็นแบบกระบวนการแพร่ (diffusion-control process) จากสมการความสัมพันธ์เชิงเส้นตรงระหว่างกระแส

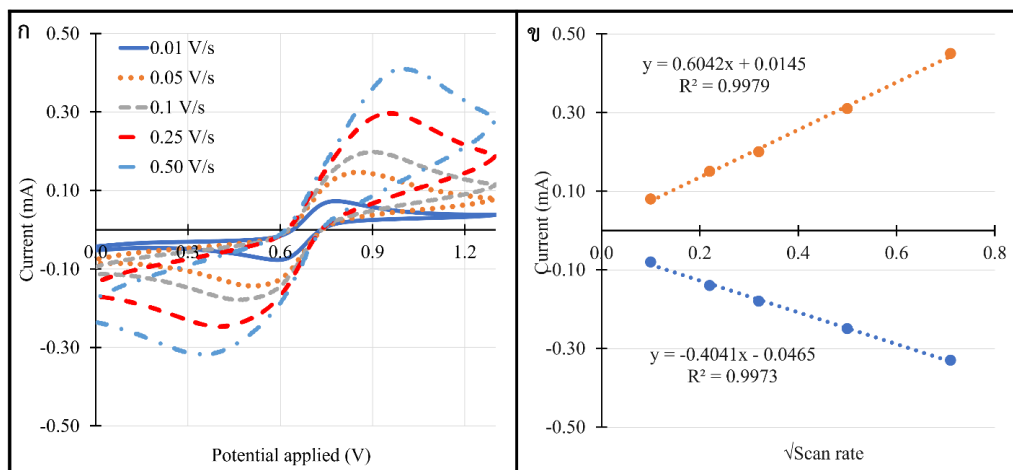


ภาพที่ 3 ไซคลิกโวลแทมโมแกรมของสารละลายรูติน 5 มิลลิโมลาร์ ในสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฟอสเฟตบัฟเฟอร์ pH 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 และภาพแทรกแสดงกราฟแผนภูมิแท่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับค่า pH ต่างๆ ของสารละลายอิเล็กโทรไลต์ฟอสเฟตบัฟเฟอร์

กับรากที่สองของอัตราการสแกนของการตรวจวัด $[\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}]/[\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}]$ สามารถคำนวณพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าใช้งานได้ดังสมการของ Randle-Sevcik [17]

$$I_p = (2.687 \times 10^5) A D^{1/2} n^{3/2} v^{1/2} C \quad (1)$$

เมื่อ I_p คือ กระแสของพีค (A) ; A คือ พื้นที่ผิวเคมีไฟฟ้า (cm^2) ; D คือ สัมประสิทธิ์การแพร่ ($7.6 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{s}$ สำหรับ $\text{K}_3[\text{Fe}(\text{CN})_6]$) ; n คือ จำนวนของอิเล็กตรอนที่เกี่ยวข้องในปฏิกิริยา (มีค่าเท่ากับ 1 สำหรับ Fe^{3+} และ Fe^{2+}) ; v คือ อัตราการสแกน (V/s) ; C คือ ความเข้มข้นของอิเล็กโทรแอคทีฟสปีชีส์ทางเคมีไฟฟ้า (เฟอร์ริไซยาไนด์, mol/mL) ดังนั้นเราสามารถคำนวณ A ได้จากค่าของความชันจากกราฟ $\times (2.687 \times 10^5)^{-1} D^{-1/2} n^{-3/2} C^{-1}$ ซึ่งผลจากการคำนวณพื้นที่ผิวของ Au/PCE เท่ากับ 0.1636 cm^2 ซึ่งพื้นที่ของขั้วไฟฟ้าเปลือย PCE เท่ากับ $3.929 \times 10^{-4} \text{ cm}^2$ พื้นที่ของ Au/PCE มากกว่า PCE ถึง 417 เท่า นั่นเป็นผลจากการดัดแปรขั้วไฟฟ้าด้วยอนุภาคทอง

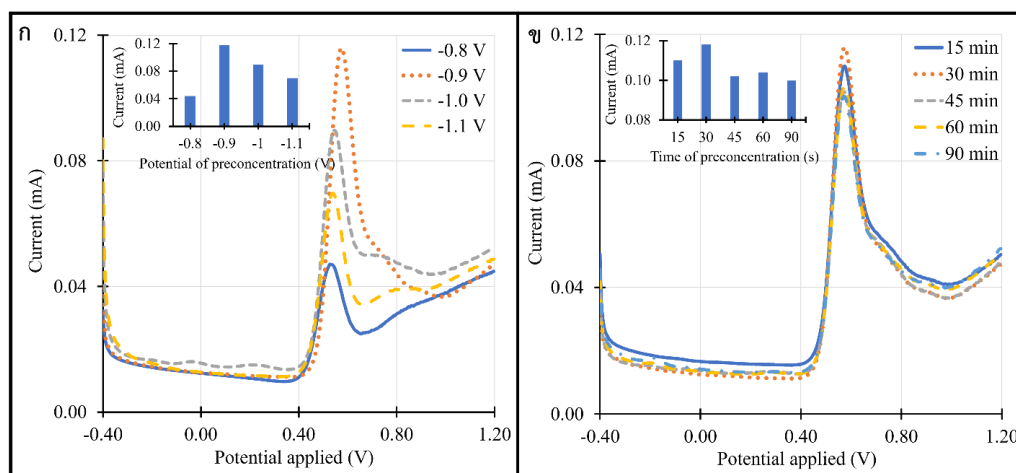


ภาพที่ 4 (ก) ไซคลิกโวลแทมโมแกรม การตรวจวัด $\text{Fe}(\text{CN})_6^{3-}/\text{Fe}(\text{CN})_6^{4-}$ 5 มิลลิโมลาร์ ที่ศักย์ไฟฟ้า 0 ถึง 1.3 โวลต์ ที่อัตราการสแกนต่างๆ คือ 0.01, 0.05, 0.10, 0.25 และ 0.50 โวลต์/วินาที และ (ข) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการวัดความสูงกระแสของปฏิกิริยาออกซิเดชันและปฏิกิริยารีดักชันกับรากที่สองของอัตราการสแกนต่างๆ



การวิเคราะห์เชิงปริมาณสำหรับการตรวจวัดรูตินด้วยเทคนิคสแควร์เวฟแอโนดิกสทริปปิงโวลแทมเมตรี

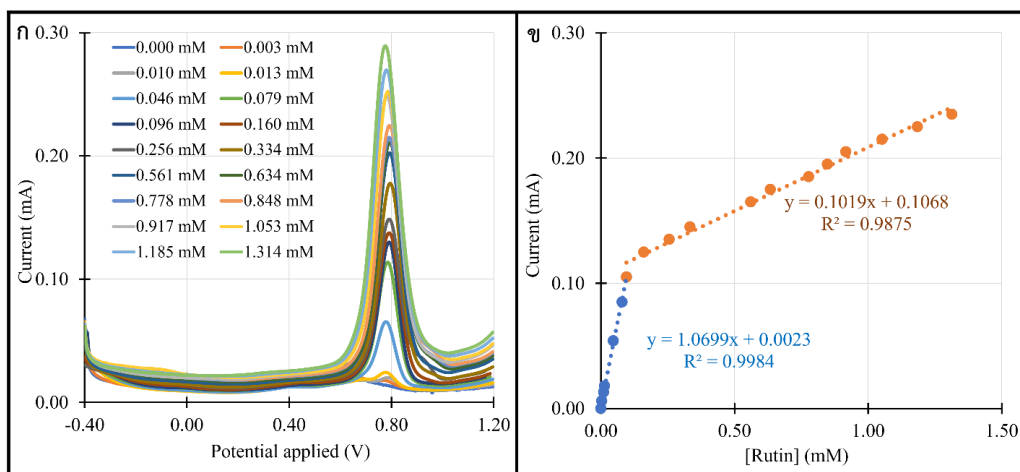
ในการวิเคราะห์รูตินใช้เทคนิคการเพิ่มความเข้มข้นของรูตินด้วยการให้ศักย์ไฟฟ้าและช่วงเวลาสำหรับให้รูตินมาใกล้บริเวณพื้นผิวขั้วไฟฟ้าใช้งานก่อนการตรวจวัดปฏิกิริยาออกซิเดชันของรูตินด้วยเทคนิคสแควร์เวฟโวลแทมเมตรี โดยศักย์ไฟฟ้าสำหรับเพิ่มความเข้มข้นของรูติน -0.8 ถึง -1.1 โวลต์ โดยให้เวลาคงที่ 30 วินาที ดังภาพที่ 5 (ก) พบว่าที่ศักย์ไฟฟ้า -0.9 โวลต์ ให้ความสูงของกระแสไฟฟ้าสูงที่สุด เมื่อเพิ่มค่าศักย์ไฟฟ้ามากกว่า -0.9 โวลต์ จะส่งผลให้ความสูงของกระแสไฟฟ้าเริ่มลดลงนั้น น่าจะเป็นผลเนื่องมาจากการเกิดปฏิกิริยารีดักชันของ H^+ เป็น H_2 ส่งผลให้ปริมาณรูตินที่ออบริเวณผิวของขั้วไฟฟ้าทำงานเริ่มลดลง ซึ่งสอดคล้องกับภาพที่ 2 (ข) สัญญาณกระแสรีดักชันของอิเล็กโทรไลต์ที่ศักย์ไฟฟ้า -1.0 โวลต์ ลดลงอย่างเห็นได้ชัดนั้นเป็นผลจากการเกิดกระแสรีดักชันของ H^+ [18] ดังนั้นศักย์ไฟฟ้าที่ -0.9 โวลต์ เหมาะสมสำหรับการเพิ่มความเข้มข้นในการตรวจวิเคราะห์รูติน และทำการเพิ่มความเข้มข้นรูตินด้วยการให้เวลาคงที่บนขั้วไฟฟ้าใช้งาน Au/PCE ที่เวลา 15, 30, 45, 60 และ 90 วินาที ให้ศักย์ไฟฟ้าการเพิ่มความเข้มข้นของรูตินคงที่ที่ -0.9 โวลต์ ดังภาพที่ 5 (ข) พบว่าที่เวลา 30 วินาที ให้ความสูงของกระแสไฟฟ้าสูงที่สุด และเพื่อเพิ่มเวลาในการเพิ่มความเข้มข้นของรูตินมากกว่า 30 วินาที พบว่าความสูงของกระแสไฟฟ้าเริ่มลดลงและคงที่ที่เวลา 45 วินาที นั้นอาจเนื่องมาจากถูกจำกัดด้วยพื้นที่ของขั้วไฟฟ้าใช้งาน ดังนั้นจึงเลือกใช้เวลาที่ 30 วินาที ในการตรวจวิเคราะห์รูติน



ภาพที่ 5 สแควร์เวฟโวลแทมโมแกรมของสารละลายรูตินความเข้มข้น 5 มิลลิโมลาร์ โดยการให้ศักย์ไฟฟ้าที่ -0.8, -0.9, -1.0 และ -1.1 โวลต์ (ก) และเวลา 15, 30, 45, 60 และ 90 วินาที (ข) สำหรับเพิ่มความเข้มข้นของรูตินบนขั้วไฟฟ้าใช้งาน Au/PCE กราฟแทรกแผนภูมิแท่งใน (ก) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับศักย์ไฟฟ้าสำหรับเพิ่มความเข้มข้นของรูตินบนขั้วไฟฟ้า Au/PCE และ กราฟแทรกแผนภูมิแท่งใน (ข) แสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับเวลาสำหรับเพิ่มความเข้มข้นของรูตินบนขั้วไฟฟ้า Au/PCE

ความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงของการตรวจวัดรูติน

ผลของการตรวจวัดรูตินด้วยสภาวะที่เหมาะสมของเทคนิคสแควร์เวฟแอโนดิกสทริปปิงโวลแทมเมตรีบนขั้วไฟฟ้า Au/PCE โดยตรวจวัดรูตินที่ความเข้มข้นตั้งแต่ 0.000 ถึง 1.314 มิลลิโมลาร์ ได้สแควร์เวฟโวลแทมโมแกรมดังภาพที่ 6 (ก) เมื่อวัดความสูงของกระแสแอโนดิกสทริปปิง และพลอตกราฟความสัมพันธ์ระหว่างความสูงของกระแสกับความเข้มข้นของรูตินได้ดังภาพที่ 6 (ข) จากผลการตรวจวัดพบว่าได้ช่วงความสัมพันธ์ที่เป็นเส้นตรงอยู่ 2 ช่วง คือ ช่วงความเข้มข้น 3 ถึง 96 ไมโครโมลาร์ เป็นช่วงที่รูตินมีความเข้มข้นต่ำมีความสามารถในการเกิดปฏิกิริยาที่บริเวณผิวหน้าของขั้วไฟฟ้าได้ดีเนื่องจากผิวหน้ามีพื้นที่ผิวที่เพียงพอประกอบกับอนุภาคทองช่วยในการส่งผ่านอิเล็กตรอนได้ดีทำให้ความไวในการตรวจวัดสูงถึง 1.07 มิลลิแอมแปร์/มิลลิโมลาร์ ด้วยสมการเส้นตรง $y = 1.0699x + 0.0023$ ($R^2 = 0.9984$) และช่วงความเข้มข้น 96 ถึง 1,314 ไมโครโมลาร์ เป็นช่วงของความเข้มข้นสูงขึ้น

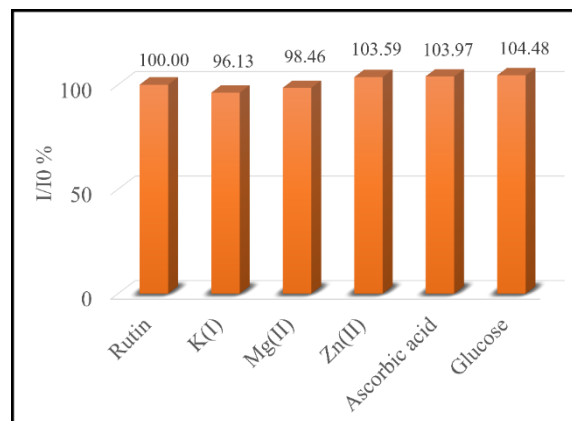


ภาพที่ 6 (ก) สแควร์เวฟแอนโนติกสทริปปิงโวลแทมโมแกรมของการตรวจวัดสารละลายรูตินที่ความเข้มข้นต่างๆ (ข) กราฟแสดงความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้าที่ได้จากการวัดความสูงกระแสที่ความเข้มข้นต่างๆ ของรูติน

การเกิดปฏิกิริยาของรูตินที่ผิวหน้าถูกจำกัดด้วยพื้นที่ผิวของขั้วไฟฟ้าทำให้ความไวในการเกิดปฏิกิริยาลดลงเป็น 0.1019 แอมแปร์/มิลลิโมลาร์ ของสมการเส้นตรง $y = 0.1019x + 0.1069$ ($R^2 = 0.9875$) สามารถคำนวณขีดจำกัดในการตรวจวัด (limit of detection, LOD) ได้จาก $LOD = 3\sigma/m$ [17] เมื่อ σ แทนค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (sd) ของแบล็กส์ (จากการวัดอิเล็กโทรไลต์ 10 ครั้ง และหาค่าเบี่ยงเบนมาตรฐานเท่ากับ 0.000923); m คือ ความไวในการตรวจวัดที่ได้จากความสัมพันธ์ของสมการเส้นตรงในช่วงความสัมพันธ์ของความเข้มข้นรูตินกับความสูงของกระแสที่เป็นเส้นตรง (จากสมการ $m = 1.0699$) ดังนั้น LOD เท่ากับ 0.003 มิลลิโมลาร์ และสามารถคำนวณขีดจำกัดในการตรวจวัดเชิงปริมาณ (Limit of quantitation, LOQ) ได้จาก $LOQ = 10\sigma/m$ มีค่าเท่ากับ 0.009 มิลลิโมลาร์ ผลของการศึกษาการเตรียมขั้วไฟฟ้าจำนวน 3 ขั้วไฟฟ้า พบว่ามีค่าร้อยละของความเบี่ยงเบนมาตรฐานสัมพัทธ์ (%RSD) เท่ากับ 7 และในการเตรียม 1 ขั้วไฟฟ้าสามารถวัดรูตินซ้ำได้ 10 ครั้ง จึงจะทำให้สัญญาณของการตรวจวัดรูติน ลดลงครึ่งหนึ่งของสัญญาณเริ่มต้น

ผลของการศึกษาตัวรบกวนการตรวจวัดรูติน

ทำการตรวจวัดรูตินด้วยเทคนิคสแควร์เวฟแอนโนติกสทริปปิงโวลแทมเมตรีความเข้มข้นของรูติน 100 ไมโครโมลาร์ และเติมความเข้มข้นของตัวรบกวนประกอบด้วยสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ ดังนี้ K^+ Mg^{2+} Zn^{2+} และกลูโคสมีความเข้มข้นมากกว่า 50 เท่าของความเข้มข้นรูติน และกรดแอสคอร์บิกมีความเข้มข้นมากกว่า 10 เท่าของความเข้มข้นรูติน ได้ดังภาพที่ 7 I_0 และ I คือ กระแสออกซิเดชันรูตินความเข้มข้น 100 ไมโครโมลาร์ ก่อนและหลังเติมตัวรบกวน ผลที่ได้พบว่าร้อยละของสัดส่วนของกระแสหลังและก่อนเติมตัวรบกวนไม่เกิน $\pm 5\%$ ซึ่งให้เห็นว่าตัวรบกวนไม่มีผลต่อการตรวจวัดรูตินด้วยขั้วไฟฟ้าคาร์บอนไส้ดินสอที่ตรึงด้วยอนุภาคทอง [19]



ภาพที่ 7 ความจำเพาะของการตรวจวัดรูตินบนขั้วไฟฟ้าคาร์บอนไส้ดินสอที่ตรึงด้วยอนุภาคทอง

การตรวจวัดรูตินในตัวอย่างน้ำผลไม้

เมื่อนำขั้วไฟฟ้าใช้งาน Au/PCE มาประยุกต์วิเคราะห์หาปริมาณรูตินในตัวอย่างน้ำผลไม้พร้อมดื่ม ได้แก่ น้ำส้มเขียวหวาน และน้ำองุ่น ผลจากการวิจัยสามารถตรวจวัดรูตินได้ โดยใช้สภาวะที่เหมาะสมจากงานวิจัย โดยคำนวณจากการเทียบกราฟมาตรฐานของการตรวจวัดรูติน ได้ผลดังตารางที่ 1 ปริมาณรูตินในน้ำผลไม้พร้อมดื่มส้มเขียวหวานพบปริมาณน้อยกว่าน้ำผลไม้พร้อมดื่มองุ่น เมื่อคำนวณร้อยละการกลับคืนพบว่าอยู่ในช่วง 95-118

ตารางที่ 1 การตรวจวัดรูตินในน้ำผลไม้พร้อมดื่มส้มเขียวหวานและน้ำองุ่น

ตัวอย่าง	ปริมาณรูตินที่เติม (mM)	ปริมาณรูตินที่ตรวจวัดได้ (mM)	ร้อยละการกลับคืน
น้ำส้มเขียวหวาน	0	ND*	-
	0.016	0.018	112
	0.033	0.037	112
	0.049	0.058	118
	0.065	0.062	95
น้ำองุ่น	0	0.0078	-
	0.016	0.026	114
	0.033	0.045	113
	0.049	0.052	90
	0.065	0.070	96

หมายเหตุ: ND* (not determine) คือ ไม่สามารถระบุได้เนื่องจากความเข้มข้นที่คำนวณได้ต่ำกว่าขีดจำกัดในการตรวจวัด

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

จากงานวิจัยนี้สามารถพัฒนาชีวไฟฟ้าใช้งาน Au/PCE ที่มีความสามารถตรวจวัดรูตินในตัวอย่างน้ำผลไม้พร้อมดื่มได้อย่างมีประสิทธิภาพ โดยชีวไฟฟ้าใช้งาน Au/PCE มีฐานที่มาจากไส้ดินสอสามารถหาซื้อได้ตามท้องตลาด เมื่อเปรียบเทียบประสิทธิภาพของชีวไฟฟ้าใช้งานกับงานวิจัยที่ผ่านมาตามตารางที่ 2 พบว่าช่วงความเข้มข้นในการตรวจวัดรูตินกว้างมาก ได้ทั้งการตรวจวัดในช่วงของความเข้มข้นต่ำ และช่วงของความเข้มข้นที่สูง ความไวในการวิเคราะห์รูตินในช่วงความเข้มข้นต่ำพบว่าสูงกว่างานวิจัยของ Senocak และคณะ ซึ่งตรวจวัดด้วยชีวไฟฟ้า $Ti_3Al_{0.5}Cu_{0.5}C_2/GCE$ [20] และงานวิจัยของ Liu และคณะ ที่ทำการตรวจวัดรูตินด้วยชีวไฟฟ้า $CuO@f-CNTs/GCE$ [21] และงานวิจัยนี้มีขีดจำกัดที่สามารถตรวจวัดรูตินยังมีค่าที่สูงซึ่งต้องมีการพัฒนาชีวไฟฟ้าต่อไปเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพของการตรวจวัดรูตินที่ดีขึ้น นอกจากนี้ในงานวิจัยนี้ได้นำชีวไฟฟ้ามาประยุกต์ตรวจวัดตัวอย่างจริงในน้ำผลไม้พร้อมดื่มน้ำส้มเขียวหวาน และน้ำองุ่น ที่มีขายในท้องตลาดซึ่งตรวจวัดอย่างมีประสิทธิภาพได้ ร้อยละการกลับคืนอยู่ในช่วง 95 – 118 จากประสิทธิภาพนี้สามารถนำไปประยุกต์และพัฒนาการตรวจวัดรูตินในน้ำผลไม้อื่นๆ มีอยู่ในธรรมชาติ และขายตามท้องตลาดได้

ตารางที่ 2 เปรียบเทียบประสิทธิภาพการตรวจวัดรูตินกับงานวิจัยที่ผ่านมา

Electrode material	Electrochemical method	Linear range (μM)	Sensitivity ($\mu A/\mu M$)	LOD (μM)	Ref.
PCE/Au	SWV	3 – 96 96 - 1314	1.0699 0.1019	3	[วิจัยนี้]
$Ti_3Al_{0.5}Cu_{0.5}C_2/GCE$	DPV	0.02-8 8-50	0.3079 0.0278	0.015	[20]
	CV	0.1-3 4-32	0.3079 0.0278	0.090	
NF/IL/CMC-MWCNTs/GCE	SWV	0.01 – 1 1-10	54.05 6.8107	0.0066	[22]
Co/ZIF-C/GCE	DPV	0.1–30	2.5384	0.022	[23]
[Cnmim][AA]/MWCNTs/CS/GCE	DPV	0.5–5 5–100	12.359 2.172	0.05	[17]
Ce-PEDOT/GCE	DPV	0.02 - 2.0 2.0 -9.0	11.98 4.88	0.0147	[24]
$CuO@f-CNTs/GCE$	DPV	10 - 200	0.06087	0.011	[21]
Mg-Al-Si@PC/GCE	DPV	1.0 - 10	4.212	0.01	[25]
ZIF-8-AB-CS/GCE	DPV	0.1 - 10	0.4569	0.004	[8]
N-MCS@graphene/GCE	CV	0.5 - 189	-	0.05	[9]



กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ขอขอบคุณทุนอุดหนุนการวิจัยและนวัตกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม ประเภทรูปทุนพัฒนางานวิจัย และนวัตกรรมเพื่อพัฒนาเศรษฐกิจชีวภาพ เศรษฐกิจหมุนเวียนและเศรษฐกิจสีเขียว (BCG) ประจำปีงบประมาณ 2565 (RDI-2-65-56) และทุนสำหรับนักศึกษาและบัณฑิตศึกษา ประจำปีงบประมาณ 2566 ขอขอบคุณสาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี และศูนย์วิทยาศาสตร์มหาวิทยาลัยราชภัฏพิบูลสงคราม ที่ให้การสนับสนุนเครื่องมืออุปกรณ์ และสถานที่ในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

1. Yang S, Qu L, Li G, Yang R, Liu C. Gold nanoparticles/ethylenediamine/carbon nanotube modified glassy carbon electrode as the voltammetric sensor for selective determination of rutin in the presence of ascorbic acid. *J Electroanal Chem* 2010;645(2):115-22.
2. Abou-Donia AH, Toaima SM, Hammada HM, Shawky E. Determination of rutin in *Amaryllis belladonna* L. flowers by HPTLC and spectrophotometry. *Chromatographia* 2006;64(1):109-12.
3. Mostafa NM. Comparative Analysis of rutin content in some Egyptian plants: a validated RP-HPLC-DAD approach. *European J Med Plants* 2017;19(2):1-8.
4. Gong A, Ping W, Wang J, Zhu X. Cyclodextrin polymer/ Fe_3O_4 nanocomposites as solid phase extraction material coupled with UV-vis spectrometry for the analysis of rutin. *Spectrochim Acta Part a-Mol Biomol Spectrosc* 2014;122:331-6.
5. Xu H, Li Y, Tang HW, Liu CM, Wu QS. Determination of Rutin with UV-Vis Spectrophotometric and Laser-Induced Fluorimetric detections using a non-scanning spectrometer. *Anal Lett* 2010;43(6):893-904.
6. Song Z, Hou S. Sensitive determination of sub-nanogram amounts of rutin by its inhibition on chemiluminescence with immobilized reagents. *Talanta* 2002;57(1):59-67.
7. Kokalj Ladan M, Straus J, Tavčar Benković E, Kreft S. FT-IR-based method for rutin, quercetin and quercitrin quantification in different buckwheat (*Fagopyrum*) species. *Sci Rep* 2017;7(1):7226.
8. Jin YF, Ge CY, Li XB, Zhang M, Xu GR, Li DH. A sensitive electrochemical sensor based on ZIF-8-acetylene black-chitosan nanocomposites for rutin detection. *RSC Adv* 2018;8(57):32740-6.
9. Zhen Q, Ma H, Jin Z, Zhu D, Liu X, Sun Y, et al. Electrochemical sensor for rutin detection based on N-doped mesoporous carbon nanospheres and graphene. *New J Chem* 2021;45(11):4986-93.
10. En-Nakra F, Uzun D, Hasdemir E. Voltammetric determination of rutin in fruit juice samples using a 2 mercaptobenzothiazole coated pencil graphite electrode. *J Food Compos Anal* 2021;104:104183.
11. Yang H, Li B, Cui R, Xing R, Liu S. Electrochemical sensor for rutin detection based on Au nanoparticle-loaded helical carbon nanotubes. *J Nanopart Res* 2017;19(10):354.
12. Sun W, Wang D, Zhang YY, Ju XM, Yang HX, Chen YX, et al. Electrodeposited graphene and gold nanoparticle modified carbon ionic liquid electrode for sensitive detection of rutin. *Chinese J Anal Chem* 2013;41(5): 709-13.



13. Karoonian FS, Etesami M, Hasnat MA, Mohamed N. Spontaneous Au electrodeposition on 3-D porous graphite for electrocatalytic applications. *Catal Commun* 2012;21:14-7.
14. Bozzini B, Romanello V, Mele C. A SERS investigation of the electrodeposition of Au in a phosphate solution. *Surf Coat Technol* 2007;201(14):6267-72.
15. Lomax DJ, Dryfe RAW. Electrodeposition of Au on basal plane graphite and graphene. *J Electroanal Chem* 2018;819:374-83.
16. Supiyeva Z, Avchukir K, Pavlenko V, Yeleuov M, Taurbekov A, Smagulova G, et al. The investigation of electroreduction of AuCl_4^- in the case of gold electrosorption using activated carbon. *Mater Today: Proc* 2020;25:33-8.
17. Tang J, Peng L, Ali A, Zhao S, Zeng Z, Yuan K, et al. Electrochemical detection of rutin in black tartary buckwheat tea and related health-care pills with new ionic liquid-based supramolecular hydrogels. *Food Control* 2024;155:110045.
18. Li Y, Sun J, Wang J, Bian C, Tong J, Li Y, et al. A microbial electrode based on the co-electrodeposition of carboxyl graphene and Au nanoparticles for BOD rapid detection. *Biochem Eng J* 2017;123:86-94.
19. Jiang M, Zhu L, Zhang Z, Ai Y, Zeng L, He S, et al. Electrochemical determination of rutin on ZIF-8-derived porous carbon and aminated graphene nanocomposite modified electrode. *Int J Electrochem Sci* 2022;17(10):221051.
20. Şenocak A, Sanko V, Tümay SO, Orooji Y, Demirbas E, Yoon Y, et al. Ultrasensitive electrochemical sensor for detection of rutin antioxidant by layered $\text{Ti}_3\text{Al}_{0.5}\text{Cu}_{0.5}\text{C}_2$ MAX phase. *Food Chem Toxicol* 2022;164:113016.
21. Liu Z, Liu Y, Tan Z, Liu Y, Meng L, Yang S. Electrochemical determination of rutin in herbal samples using CuO/CNT composite modified glassy carbon electrode. *Int J Electrochem Sci* 2022;17(7):220724.
22. Meng X, Xiao BL, Song XY, Ma XX, Li YY, Ma LL, et al. Highly selective and sensitive sensor based IL and CMC-MWCNTs nanocomposite for rutin determination. *Chemosensors* 2023;11(3):171.
23. Şenocak A, Khataee A, Demirbas E, Doustkhah E. Ultrasensitive detection of rutin antioxidant through a magnetic micro-mesoporous graphitized carbon wrapped Co nanoarchitecture. *Sens Actuators B: Chem* 2020;312:127939.
24. Wang Y, Chen J, Wang C, Zhang L, Yang Y, Chen C, et al. An electrochemical sensor based on Ce-MOF-derived Ce-doped poly(3,4-ethylenedioxythiophene) composite for efficient determination of rutin in food. *Talanta* 2023;263:124678.
25. Yalikun N, Mamat X, Li Y, Hu X, Wang P, Hu G. Taraxacum-like Mg-Al-Si@porous carbon nanoclusters for electrochemical rutin detection. *Microchim Acta* 2019;186(6):379.



ฤทธิ์ต้านอักเสบและความเป็นพิษของสารสกัดใบลำพูและลำแพน ต่อเซลล์มะเร็งเม็ดเลือดขาวเพาะเลี้ยง

Anti-inflammation Activities and Cytotoxicity of *Sonneratia caseolaris* (L) (Lamphu) and *Sonneratia ovata* (Lampan) leaves Extracts on Leukemic Cell

สุวรรณา เสมศรี^{1*} และ สุรีย์พร หอมวิเศษวงศา²

¹คณะเทคนิคการแพทย์ มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ สมุทรปราการ 10540

²คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ สมุทรปราการ 10540

Suwanna Semsri^{1*} and Sureeporn Homvisasevongsa²

¹Faculty of Medical Technology, Huachiew Chalermprakiet University, Samutprakarn, 10540

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

*Corresponding Author: ssemsri@gmail.com

Received: 18 February 2024 / Revised: 3 April 2024/ Accepted: 13 April 2024

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาฤทธิ์ต้านการอักเสบและความเป็นพิษของสารสกัดใบลำพูและใบลำแพนที่สกัดด้วยตัวทำละลายชนิดเอทานอลต่อเซลล์มะเร็งเม็ดเลือดขาวเพาะเลี้ยงชนิด K562, Molt4, HL60 และเซลล์ปกติเพาะเลี้ยงชนิด Vero ด้วยวิธี MTT และฤทธิ์ต้านการอักเสบโดยปฏิกิริยา Griess ในเซลล์แมคโครฟาจเพาะเลี้ยงชนิด RAW 264.7 ที่ถูกกระตุ้นด้วยสาร LPS พบว่าสารสกัดใบลำพูที่ระดับความเข้มข้น 89.5 ± 6.45 $\mu\text{g/mL}$ มีความเป็นพิษ (IC_{50}) ต่อเซลล์มะเร็งเม็ดเลือดขาวเพาะเลี้ยงชนิด HL60 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ส่วนสารสกัดลำแพนที่ความเข้มข้นเท่ากับ 36.6 ± 5.38 $\mu\text{g/mL}$ มีความเป็นพิษ (IC_{50}) ต่อเซลล์มะเร็งเม็ดเลือดขาวเพาะเลี้ยงชนิด K562 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ทั้งนี้สารสกัดใบลำพูและลำแพนไม่มีความเป็นพิษต่อเซลล์ปกติเลี้ยงชนิด Vero (309.8 ± 6.58 และ 210.4 ± 7.27 $\mu\text{g/mL}$ ตามลำดับ) นอกจากนี้สารสกัดใบลำพูที่ความเข้มข้น 26.5 ± 6.08 $\mu\text{g/mL}$ สามารถยับยั้งการหลั่งไนตริกออกไซด์ได้ร้อยละ 50 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับสารสกัดลำแพน (43.0 ± 6.06 $\mu\text{g/mL}$) ดังนั้นจากการทดสอบชี้ให้เห็นว่าสารสกัดใบลำพูและใบลำแพน มีฤทธิ์ต้านการอักเสบและฤทธิ์ความเป็นพิษต่อเซลล์มะเร็งเม็ดเลือดขาวเพาะเลี้ยงชนิด K562, Molt4, HL60

คำสำคัญ: ต้านการอักเสบ ความเป็นพิษต่อเซลล์ ลำพู ลำแพน

Abstract

The objectives in this study were to study of anti-inflammatory and cytotoxicity activity of *Sonneratia caseolaris* (L) (Lamphu) and *Sonneratia ovata* (Lampan) leaf ethanol extract on K562, Molt4, HL60 leukemic cell line, and Vero cell. The cytotoxicity was measured by using MTT method whereas anti-inflammatory activity was investigated by using the Griess reaction in RAW 264.7 macrophage cell stimulated

with LPS. The result showed that *Sonneratia caseolaris* (L) leaf extract at the concentration of 89.5 ± 6.45 $\mu\text{g/mL}$ was significantly toxic to HL60 when compared to K562 and Molt cells ($p < 0.05$). The *Sonneratia ovata* leaf extract at the concentration of 36.6 ± 5.38 $\mu\text{g/mL}$ showed significantly high cytotoxicity (IC_{50}) effect on K562 cell. However, *Sonneratia caseolaris* (L) and *Sonneratia ovata* leaves extracts were not toxic to Vero cell (309.8 ± 6.58 and 210.4 ± 7.27 $\mu\text{g/mL}$, respectively). Moreover, *Sonneratia caseolaris* (L) leaf extract at a concentration of 26.5 ± 6.08 $\mu\text{g/mL}$ also significantly inhibited nitric oxide secretion by 50 percent when compared to *Sonneratia ovata* leaf extract (43.0 ± 6.06 $\mu\text{g/mL}$) ($p < 0.05$). Therefore, the all of results indicated that *Sonneratia caseolaris* (L) and *Sonneratia ovata* leaves extracts exhibited both cytotoxicity and anti-inflammatory activities on the K562, Molt4, HL60 leukemic cell lines.

Keyword: Anti-inflammation, Cytotoxicity, *Sonneratia caseolaris* (L.), *Sonneratia alba*

บทนำ

มะเร็งเป็นโรคร้ายที่ไม่ติดต่อ ที่เกิดจากความผิดปกติในการควบคุมการแบ่งตัวและการเปลี่ยนแปลงของเซลล์ สาเหตุอาจเกิดจากสารหรือสิ่งแปลกปลอมที่กระตุ้นหรือเหนี่ยวนำทำให้เกิดความผิดปกติในระดับสารพันธุกรรมส่งผลให้เซลล์มีการเจริญเติบโต การแบ่งตัว และการแพร่กระจายที่ผิดปกติส่งผลทำให้ผู้ป่วยนั้น ๆ มีการทำงานที่เปลี่ยนแปลงไป และนำไปสู่การตายของเซลล์ในที่สุด [1] การรักษาโรคมะเร็งมีหลากหลายในปัจจุบันมีวิธีการรักษาที่หลากหลาย เช่น การใช้รังสีรักษา (radiotherapy) หรือเคมีบำบัด (chemotherapy) ซึ่งมีผลข้างเคียงกับคนไข้มาก นอกจากนี้ภาวะระบบภูมิคุ้มกันโรคที่ต่ำจะส่งผลทำให้มีการเติบโตและการกระจายของเซลล์มะเร็ง ซึ่งการรักษาด้วยการผ่าตัดและเคมีบำบัดในผู้ป่วยมะเร็งอาจมีผลทำลายระบบภูมิคุ้มกันของผู้ป่วยได้ และเกิดปัญหาที่ทำให้ภูมิคุ้มกันลดลงหรือบกพร่อง ซึ่งเป็นปัญหาหนึ่งที่ทำให้การรักษาผู้ป่วยมะเร็งไม่ประสบผลสำเร็จ โดยจะเห็นได้จากการกลับเป็นซ้ำของโรค นอกจากนี้ยังพบมีภาวะการอักเสบ (inflammation) ซึ่งเป็นกระบวนการของร่างกายที่เกิดขึ้นเพื่อตอบสนองต่อสิ่งเร้าที่ทำให้เนื้อเยื่อในร่างกายได้รับบาดเจ็บ ถือเป็นกลไกที่สำคัญในการป้องกันสิ่งแปลกปลอมหรือสิ่งที่ทำให้เซลล์ต่าง ๆ ของร่างกายได้รับบาดเจ็บ ภาวะการเกิดการอักเสบมากเกินไปอาจทำให้เกิดการตายของเนื้อเยื่อในร่างกาย มีผลทำให้เกิดพยาธิสภาพต่อเนื้อเยื่อ ความเจ็บป่วย หรืออาจทำให้เกิดโรคในกลุ่มโรคภูมิแพ้ตนเอง (autoimmune disease) เช่น โรคข้ออักเสบรูมาตอยด์ (rheumatoid arthritis) โรคข้อเสื่อมอักเสบ (osteoarthritis) โรคเอสแอลอี (systemic lupus erythematosus; SLE) นอกจากนี้กระบวนการอักเสบยังมีบทบาทต่อการเปลี่ยนแปลงที่พบในกลุ่มโรคต่างๆ เช่น มะเร็ง (cancer) ภาวะไขมันสะสมในผนังหลอดเลือด (atherosclerosis) โรคหลอดเลือดหัวใจ (ischemic heart disease) และกลุ่มโรคที่มีการเสื่อมของเนื้อเยื่อ (degenerative disease) เช่น โรคอัลไซเมอร์ (Alzheimer's disease) นอกจากนี้ยังมีการอักเสบที่เนื่องมาจากระบบภูมิคุ้มกันโดยเกิดขึ้นจากระบบภูมิคุ้มกันที่ติดตัวแต่กำเนิด (innate immunity) ร่วมกับสารที่หลั่งจากเซลล์และสารจากพลาสมา เช่น cytokine, prostaglandins, leukotriene, platelet activating factor (PAF), bradykinin, histamine, interferon (IFN) และ ระบบคอมพลีเมนต์ (complement system) ซึ่งกระบวนการอักเสบชนิดนี้เกิดจากการต่อต้านการติดเชื้อไวรัสหรือแบคทีเรียของร่างกายกล่าวคือเมื่อแมคโครฟาจ (macrophage) นิวโทรฟิล (neutrophil) และ เซลล์เดนไดรติก (dendritic cell) กลืนกินไวรัสหรือแบคทีเรียแล้วจะมีการปล่อยโปรตีนของไวรัสหรือผนังเซลล์ของแบคทีเรียบางส่วนออกมาซึ่งโปรตีนเหล่านี้สามารถเหนี่ยวนำและกระตุ้นเซลล์ในระบบภูมิคุ้มกันให้ตอบสนองทำให้เกิดการอักเสบด้วยการหลั่งสารสื่อกลางทางเคมี (chemical mediator) เช่น histamine, nitric oxide (NO), prostaglandin E_2 (PGE_2) และ leukotriene ออกมา [2]

ลำพูและลำแพนเป็นพืชที่ขึ้นตามป่าชายเลน มนุษย์ใช้ประโยชน์จากป่าชายเลนมาแต่โบราณพันธุ์ไม้ป่าชายเลนมีความสำคัญในการนำมาใช้เป็นสมุนไพรในการรักษาโรคต่าง ๆ [3-4] ลำพูและลำแพนเป็นพันธุ์ไม้ป่าชายเลนอยู่ในวงศ์ Sonneratiaceae สกุล Sonneratia ในประเทศไทยพบ 4 ชนิด ได้แก่ ลำพู (*Sonneratia caseolaris* (L.)) ลำพูทะเล



(*Sonneratia alba*) ลำแพน (*Sonneratia ovata*) และลำแพนหิน (*Sonneratia griffithii*) [5] ในตำรับยาพื้นบ้านจะใช้ส่วนต่าง ๆ ของลำพู เช่น รากใช้แก้ไข้เนื่องจากอาการอักเสบ ถอนพิษไข้ ขับปัสสาวะ ขับน้ำ ส่วนผลแก้ท้องร่วง ใบแก้ปวดท้อง แก้พิษปลาตูกแทง และเปลือกแก้โรคผิวหนัง แก้แผลเปื่อยพุพอง แก้โรคปว้าง [6] ส่วนลำพูทะเลและลำแพน ใช้ผลแก้ปวดบวม เคล็ดขัดยอก ขับพยาธิ ขับเสมหะ แก้อาการท้องผูก และห้ามเลือดที่แผล [7-8] นอกจากนี้ยังใช้ในการรักษาโรคติดเชื้อที่เกิดจากจุลินทรีย์ต่าง ๆ สารจากลำพูและลำแพนมีการออกฤทธิ์ทางชีวภาพในหลากหลายด้าน เช่น ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant) ฤทธิ์ความเป็นพิษต่อเซลล์ (cytotoxicity) ฤทธิ์ต้านจุลชีพ (antibacterial) [9-11] ฤทธิ์ยับยั้งการเกิดเปอร์ออกซิเดชันของไขมัน (anti lipid peroxidation) ฤทธิ์ต้านมะเร็ง (anticancer) [4] ฤทธิ์ปกป้องเซลล์ตับ (Hepatoprotective activity) [12] และฤทธิ์ยับยั้งเอนไซม์ acetylcholinesterase [9] เป็นต้น นอกจากนี้ยังมีรายงานสารประกอบที่พบในกลุ่มสารสกัดลำพูและลำแพน เป็นกลุ่มของสารฟลาโวนอยด์ (flavonoids) โดย Wu และคณะ [13] พบ oleanolic acid, β -sitosterol- β -D-glucopyranoside, (-)-R-nyasol, (-)-R-4'-O-methylnyasol, luteolin, luteolin 7-O- β -glucoside และ maslinic acid ส่วน Dev และคณะ [14] รายงานพบ ellagic acid, vanillic acid และ myricetin วิเคราะห์ด้วยหลักการแยกสารโดยใช้เครื่องมือวิเคราะห์ที่มีสมรรถนะสูง (High Performance Liquid Chromatography; HPLC) และยังมีรายงานพบ flavonoids, luteolin and luteolin 7-O- β -glucoside จากสารสกัดใบลำพู [15] ส่วน Wetwitayaklung และคณะ รายงานพบ maslinic acid, sterols และ triterpenoids [16]

ดังนั้นงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาฤทธิ์ต้านการอักเสบของสารสกัดใบลำพูและลำแพน และฤทธิ์ความเป็นพิษต่อเซลล์มะเร็งเม็ดเลือดขาวชนิด K562 มะเร็งเม็ดเลือดขาวเรื้อรังชนิด human chronic myeloid leukemia HL60 มะเร็งเม็ดเลือดขาวเฉียบพลันชนิด human acute promyelocytic leukemia Mlot 4 มะเร็งเม็ดเลือดขาวเฉียบพลันชนิด human acute lymphoblastic และเซลล์ปกติเพาะเลี้ยงชนิด Vero

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมสารสกัดใบลำพูและลำแพน

ส่วนของพืชที่ใช้ในการศึกษาฤทธิ์การต้านอักเสบและความเป็นพิษต่อเซลล์มะเร็งเม็ดเลือดขาวเพาะเลี้ยงในงานวิจัยนี้ใช้ส่วนที่เป็นใบของต้นลำพูและลำแพน ที่ขึ้นในป่าชายเลนบริเวณสถานตากอากาศบางปู จังหวัดสมุทรปราการ นำส่วนใบของพืชตัวอย่างมาล้างและตากแห้ง บดให้ละเอียดด้วยเอทานอลความเข้มข้น 95% เป็นเวลานาน 5 วัน นำสารละลายที่สกัดได้ไปกรองและระเหยตัวทำละลายออกด้วยเครื่องระเหยตัวทำละลาย (rotary evaporator) แล้วทำให้แห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (freeze dryer) เก็บสารสกัดหยาบ (crude extract) ที่ได้ไว้ที่ -20 องศาเซลเซียส เพื่อรอการนำไปทดสอบต่อไป คำนวณ ผลผลิตร้อยละ (%yield) ของสารสกัดแต่ละชนิด ตามสูตรดังนี้

$$\text{ผลผลิตร้อยละของสารสกัด (\%yield)} = \left(\frac{\text{น้ำหนักของสารที่ได้}}{\text{น้ำหนักของสารที่ใช้ในการสกัด}} \right) \times 100$$

2. การเพาะเลี้ยงเซลล์มะเร็งเม็ดเลือดขาวเพาะเลี้ยงชนิด K562, Molt4, HL60 เซลล์ปกติเพาะเลี้ยงชนิด Vero และเซลล์แมคโคฟาจเพาะเลี้ยงชนิด RAW 264.7 [17]

นำเซลล์มะเร็งเม็ดเลือดขาวเพาะเลี้ยงชนิด K562 (human chronic myeloid leukemia) เซลล์มะเร็งเม็ดเลือดขาวเพาะเลี้ยงชนิด Molt4 (human acute lymphoblastic leukemia) และเซลล์มะเร็งเม็ดเลือดขาวเพาะเลี้ยงชนิด HL60 (human acute promyelocytic leukemia) มาเพาะเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเซลล์ชนิดที่มี 10% FBS ใน RPMI 1640 (Gibco/Invitrogen, USA) และมี L-glutamine 100 μ g/mL, penicillin 100 U/mL และ streptomycin 100 μ g/mL (Gibco/Invitrogen, USA) ส่วนเซลล์ปกติเพาะเลี้ยงชนิด Vero (African green monkey kidney cell) สำหรับการทดสอบฤทธิ์ความเป็นพิษของสารสกัดใบลำพูและลำแพน และเซลล์แมคโคฟาจเพาะเลี้ยงชนิด RAW 264.7 นำมาเลี้ยงในอาหารเลี้ยงเซลล์ชนิดที่มีร้อยละ 10 FBS ใน DMEM (high glucose) (Gibco/Invitrogen, USA) และมี penicillin 100 U/mL และ

streptomycin 100 µg/mL (Gibco/Invitrogen, USA) สำหรับการทดสอบฤทธิ์ด้านการอักเสบ บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ที่สภาวะคาร์บอนไดออกไซด์ (CO₂) ร้อยละ 5 และความชื้นสัมพัทธ์ร้อยละ 85

3. ศึกษาความเป็นพิษของสารสกัดใบลำพูและใบลำแพนต่อเซลล์มะเร็งเม็ดเลือดขาวเพาะเลี้ยงชนิด K562, Molt4, HL60 และเซลล์ปกติเพาะเลี้ยงชนิด Vero โดยวิธี MTT [3-(4,5 dimethylthiazol-2-yl)-5 diphenyltetrazolium bromide] [18]

จำนวนเซลล์มะเร็งเม็ดเลือดขาวเพาะเลี้ยงเริ่มต้นที่ใช้ในการทดสอบ คือ เซลล์มะเร็งเม็ดเลือดขาวเพาะเลี้ยงชนิด K562 จำนวน 1×10^5 ชนิด Molt4 เท่ากับ 2×10^5 ชนิด HL 60 เท่ากับ 3×10^5 cells/mL ส่วนเซลล์ปกติเพาะเลี้ยงชนิด Vero เท่ากับ 5×10^4 cells/mL เพาะเลี้ยงในจานเลี้ยงเซลล์แบบ 96 หลุม ด้วยอาหารเลี้ยงเซลล์ชนิดที่มี 10% FBS ใน RPMI 1640 ปริมาตร 100 µL/หลุม บ่มที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส สภาวะคาร์บอนไดออกไซด์ 5% และความชื้นสัมพัทธ์ 85% นาน 24 ชั่วโมง จากนั้นเติมอาหารเลี้ยงเซลล์ที่มีส่วนผสมของสารสกัดใบลำพูและลำแพนที่ละลายในตัวทำละลายชนิด dimethylsulfoxide (DMSO) ความเข้มข้นต่างๆ (0-500 µg/mL) ส่วนชุดควบคุม (vehicle control; VC) เติมอาหารเลี้ยงเซลล์ที่มีเฉพาะ dimethyl sulfoxide (DMSO) (Sigma-Aldrich, Germany) โดยมีความเข้มข้นสุดท้ายของ DMSO ในระบบเป็น 1% (ซึ่งเป็น %DMSO ที่ไม่มีผลกระทบต่อการทำงานและรูปร่างเซลล์) [19-20] เพาะเลี้ยงเซลล์นาน 48 ชั่วโมง จากนั้นเติมสารละลายสี MTT ความเข้มข้น 5 mg/mL ปริมาตร 20 µL แล้วบ่มต่ออีกนาน 2 ชั่วโมง ครบเวลา คำนวณอาหารเลี้ยงเซลล์ และเติม DMSO เพื่อละลายผลิตภัณฑ์ฟอร์มazan (formazan) ที่เกิดขึ้น วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 และ 620 nm โดยในแต่ละความเข้มข้นทำ 3 หลุม และแต่ละการทดลองทำ 3 ซ้ำ ในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน คำนวณร้อยละของการมีชีวิต (% cell viability) เทียบกับค่าการดูดกลืนแสงในหลุมควบคุม

$$\text{ร้อยละของการมีชีวิต (\% cell viability)} = (\text{ค่าการดูดกลืนแสงของชุดทดสอบ} / \text{ค่าการดูดกลืนแสงของชุดควบคุม}) \times 100$$

4. ศึกษาฤทธิ์ด้านการอักเสบของสารสกัดใบลำพูและใบลำแพนโดยวัดการปริมาณไนตริกออกไซด์ (NO) ด้วย Griess reagent [21-22]

ความเข้มข้นของไนโตรเจนในอาหารเลี้ยงเซลล์ เป็นดัชนีที่บ่งบอกปริมาณการผลิตไนตริกออกไซด์ เนื่องจากไนโตรเจนเป็นผลผลิตของการออกซิเดชันไนตริกออกไซด์ที่มีความเสถียร การวิเคราะห์ความเข้มข้นของไนโตรเจนโดยปฏิกิริยา Griess นำเซลล์แมคโครฟาจเพาะเลี้ยงชนิด RAW 264.7 เพาะเลี้ยงในจานเพาะเลี้ยงเซลล์แบบ 96 หลุม โดยมีจำนวนเซลล์ เท่ากับ 1×10^5 cells/หลุม ในอาหารเลี้ยงเซลล์ชนิดที่มี 10% FBS ใน DMEM (high glucose) (Gibco/Invitrogen, USA) ที่มี L-glutamine 100 µg/mL, penicillin 100 U/mL และ streptomycin 100 µg/mL (Gibco/Invitrogen, USA) และ บ่มเซลล์ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศที่มีคาร์บอนไดออกไซด์ 5% นาน 4-6 ชั่วโมง หลังจากนั้นเติมอาหารเลี้ยงเซลล์ที่มีส่วนผสมของสารสกัด (100 µg/mL) ในสภาวะที่มีหรือไม่มี 100 ng/mL ของ lipopolysaccharide (LPS) (Escherichia coli serotype 055: B5) (Sigma-Aldrich, Germany) ที่ อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ในบรรยากาศที่มีคาร์บอนไดออกไซด์ 5% นาน 48 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาเก็บอาหารเลี้ยงเซลล์จำนวน 100 µL ผสมกับสารละลาย Griess [1% sulfanilamide และ 0.1% N-(1-naphthyl) ethylene-diaminedihydrochloride ใน 2.5% phosphoric] จำนวน 100 µL ผสมให้เข้ากันและบ่มที่อุณหภูมิห้องนาน 10 นาที หลังจากนั้นวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 540 nm หลังจากนั้นคำนวณค่าความเข้มข้นของไนโตรเจนในอาหารเลี้ยงเซลล์โดยเทียบจากกราฟมาตรฐานของโซเดียมไนไตรต์ (NaNO₂) ที่ความเข้มข้น 0-100 µM และคำนวณร้อยละการยับยั้ง (%inhibition) การผลิตไนตริกออกไซด์ ของสารสกัดแต่ละส่วนในพืชแต่ละชนิด โดยเปรียบเทียบกับปริมาณไนตริกออกไซด์ในเซลล์ที่สัมผัสกับ LPS เพียงอย่างเดียว ใช้สาร apigenin (Sigma-Aldrich, Germany) ความเข้มข้น 25 µM เป็นสารควบคุมแบบบวก และคำนวณร้อยละของการยับยั้งการหลั่งไนตริกออกไซด์ (%inhibition of NO production)



$$\text{ร้อยละของการยับยั้งการหลั่ง (\%inhibition)} = [(A-B) / (A-C)] \times 100$$

โดย A-C: NO₂ concentration (μM)
 A: LPS (+), sample (-)
 B: LPS (+), sample (+)
 C: LPS (-), sample (-)

การวิเคราะห์ข้อมูล

ผลการทดลองแสดงในรูปของ Mean $\pm$ SD และ one way ANOVA โดยเปรียบเทียบกับชุดควบคุมการทดสอบที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% โดยแต่ละการทดลองทำ 3 ซ้ำในช่วงเวลาที่แตกต่างกัน

ผลการวิจัย

การศึกษาความเป็นพิษของสารสกัดใบลำพูและใบลำแพนต่อเซลล์มะเร็งเม็ดเลือดขาวเพาะเลี้ยงชนิด K562, Molt4, HL60 และเซลล์ปกติเพาะเลี้ยงชนิด Vero cell โดยวิธี MTT [3-(4,5 dimethylthiazol-2-yl)-5 diphenyltetrazolium bromide]

การสกัดสารจากใบลำพูและใบลำแพนซึ่งเป็นพืชป่าชายเลน จังหวัดสมุทรปราการ โดยใช้เอทานอลเป็นตัวทำละลายในการสกัดสารต่าง ๆ ทั้งที่มีขี้และไม่ขี้จากใบลำพูและลำแพน ได้ร้อยละของผลผลิตของสารสกัด (%yield) คือ 11.24% และ 19.92% ตามลำดับ (ตารางที่ 1) และทำการทดสอบความเป็นพิษของสารสกัดใบลำพูและใบลำแพนต่อเซลล์มะเร็งเม็ดเลือดขาวเพาะเลี้ยงชนิด K562, Molt4 และ HL60 นอกจากนี้ยังได้ทำการทดสอบกับเซลล์ปกติเพาะเลี้ยงชนิด Vero ด้วยวิธี MTT พบว่าสารสกัดใบลำพูที่มีความเป็นพิษ (IC₅₀) หรือทำให้เซลล์มะเร็งเม็ดเลือดขาวเพาะเลี้ยงชนิด K562, Molt4 และ HL60 ตายไป 50% คือความเข้มข้นที่ 190.2 $\pm$ 4.40, 124.4 $\pm$ 7.38 และ 89.5 $\pm$ 6.45 μg/mL ตามลำดับ โดยความเข้มข้นของสารสกัดใบลำพูที่ 86.5 $\pm$ 6.45 μg/mL สามารถทำให้เซลล์มะเร็งเม็ดเลือดขาวเพาะเลี้ยงชนิด HL60 ตายไป 50% ซึ่งเป็นความเข้มข้นต่ำที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% (p<0.05) เมื่อเปรียบเทียบกับความเข้มข้นทำให้เซลล์มะเร็งเม็ดเลือดขาวเพาะเลี้ยงชนิด K562 และ Molt4 (190.2 $\pm$ 4.40, 124.4 $\pm$ 7.38 μg/mL) (ตารางที่ 2 และ ภาพที่ 1) ส่วนสารสกัดใบลำแพนแสดงความเป็นพิษต่อเซลล์มะเร็งเม็ดเลือดขาวเพาะเลี้ยงชนิด K562, Molt4 และ HL60 มีระดับความเข้มข้นที่ 36.6 $\pm$ 5.38, 150.3 $\pm$ 4.59 และ 143.3 $\pm$ 5.49 μg/mL ตามลำดับ นอกจากนี้ยังพบว่าสารสกัดใบลำแพนมีความเป็นพิษต่อเซลล์มะเร็งเม็ดเลือดขาวเพาะเลี้ยงชนิด K562 ซึ่งเป็นความเข้มข้นต่ำที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (p<0.05) ที่ทำให้เซลล์มะเร็งเม็ดเลือดขาวเพาะเลี้ยงชนิด K562 ตายไป 50% เมื่อเปรียบเทียบกับความเข้มข้นที่ทำให้เซลล์มะเร็งเม็ดเลือดขาวเพาะเลี้ยงชนิด Molt4 และ HL60 ตายไป 50% (150.3 $\pm$ 4.59 และ 143.3 $\pm$ 5.49 μg/mL ตามลำดับ) (ตารางที่ 2 และ ภาพที่ 1) นอกจากนี้ที่ระดับความเข้มข้นของสารสกัดใบลำพูและใบลำแพนที่มีความเป็นพิษต่อเซลล์มะเร็งเม็ดเลือดขาวเพาะเลี้ยงชนิด K562, Molt4 และ HL60 แต่ไม่มีความเป็นพิษต่อเซลล์ปกติเพาะเลี้ยงชนิด Vero (309.8 $\pm$ 6.58 และ 280.9 $\pm$ 7.27 μg/mL ตามลำดับ) (ตารางที่ 2 และ ภาพที่ 1)

ตารางที่ 1 ผลผลิตร้อยละของสารสกัด

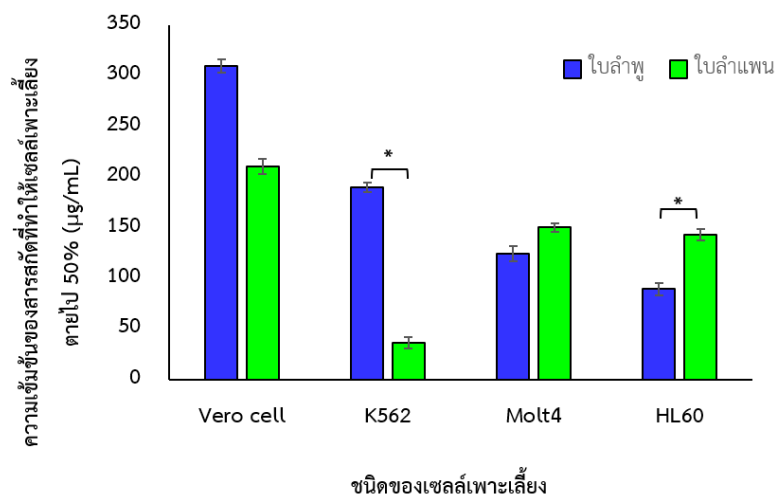
ชนิดของสารสกัดพืชป่าชายเลน	ชื่อวิทยาศาสตร์	ส่วนที่ใช้ในการสกัด	ผลผลิตร้อยละ
ใบลำพู	<i>Sonneratia caseolaris</i> (L)	ใบ	11.24
ใบลำแพน	<i>Sonneratia alba</i>	ใบ	19.92



ตารางที่ 2 ความเป็นพิษของสารสกัดใบลำพูและใบลำแพนต่อเซลล์มะเร็งเม็ดเลือดขาวเพาะเลี้ยงชนิด K562, Molt4, HL60 และเซลล์ปกติเพาะเลี้ยงชนิด Vero

ชนิดของเซลล์เพาะเลี้ยงที่ทำการทดสอบ	ความเข้มข้นของสารสกัดที่มีความเป็นพิษต่อเซลล์ (IC ₅₀) ไมโครกรัมต่อมิลลิตร (Mean ± SD) (µg/mL)	
	ใบลำพู	ใบลำแพน
Vero cell	309.8 ± 6.58	280.9 ± 7.27
K562 cell	190.2 ± 4.40	36.6 ± 5.38*
Molt4 cell	124.4 ± 7.38	150.3 ± 4.59
HL60 cell	89.5 ± 6.45*	143.3 ± 5.49

*แสดงถึงผลการทดสอบที่มีความแตกต่างจากกลุ่มตัวอย่างอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ($p < 0.05$)



*แสดงถึงผลการทดสอบที่มีความแตกต่างจากกลุ่มตัวอย่างอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ($p < 0.05$)

ภาพที่ 1 ความเป็นพิษของสารสกัดใบลำพู (■) และใบลำแพน (■) ต่อเซลล์มะเร็งเม็ดเลือดขาวเพาะเลี้ยงชนิด K562, Molt4, HL60 และเซลล์ปกติเพาะเลี้ยงชนิด Vero โดยวิธี MTT

การศึกษาฤทธิ์ด้านการอักเสบของสารสกัดใบลำพูและใบลำแพนโดยวัดการปริมาณไนตริกออกไซด์ด้วยปฏิกิริยา Griess

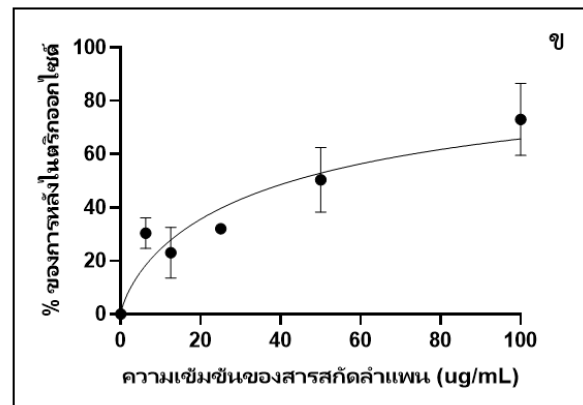
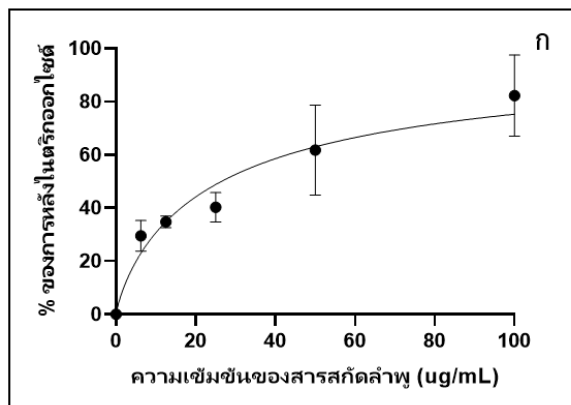
การทดสอบฤทธิ์ด้านการอักเสบของสารสกัดใบลำพูและใบลำแพนโดยการวัดปริมาณไนตริกออกไซด์ในเซลล์แมคโครฟาจเพาะเลี้ยงชนิด RAW 264.7 ที่ถูกกระตุ้นด้วย LPS ด้วยปฏิกิริยา Griess พบว่าความเข้มข้นของสารสกัดใบลำพูและใบลำแพนที่สามารถยับยั้งการหลั่งไนตริกออกไซด์ได้ 50% คือ 26.5 ± 6.08 และ 43.0 ± 6.06 µg/mL โดยมีอัตราการมีชีวิตรอดเซลล์แมคโครฟาจเพาะเลี้ยงชนิด RAW 264.7 มากกว่า 80% ทั้งนี้พบว่าสารสกัดใบลำพูมีฤทธิ์ในการด้านการอักเสบดีกว่าสารสกัดใบลำแพน เนื่องจากใช้ความเข้มข้นเพียง 26.5 ± 6.08 µg/mL ซึ่งน้อยกว่าสารสกัดใบลำแพน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) (ตารางที่ 3 และ ภาพที่ 2 ถึง ภาพที่ 3)



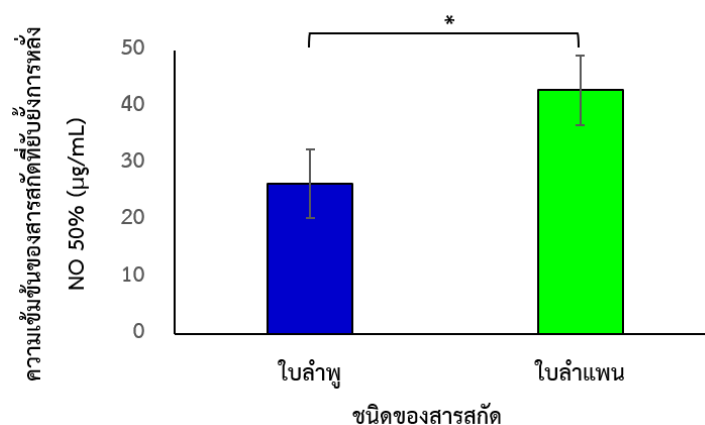
ตารางที่ 3ฤทธิ์ของสารสกัดใบลำพูและใบลำแพนต่อการยับยั้งการหลั่งไนตริกออกไซด์ 50% ในเซลล์แมคโครฟาจเพาะเลี้ยงชนิด RAW 264.7 ที่ถูกกระตุ้นด้วย LPS

สารสกัดที่ทำการทดสอบ	ความเข้มข้นของสารสกัด ที่สามารถยับยั้งการหลั่งไนตริกออกไซด์ 50% ($\mu\text{g/mL}$; Mean $\pm$ SD)	ร้อยละของการมีชีวิตรอด
ใบลำพู	26.5 $\pm$ 6.08*	> 80
ใบลำแพน	43.0 $\pm$ 6.06	> 80
25 μM Apigenin (ชุดควบคุมเชิงบวก)	ยับยั้งการหลั่งไนตริกออกไซด์ 89% $\pm$ 2.41	> 80

*แสดงถึงผลการทดสอบที่มีความแตกต่างจากกลุ่มตัวอย่างอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ($p < 0.05$)



ภาพที่ 2 ฤทธิ์ต้านการอักเสบของสารสกัดใบลำพูและใบลำแพน โดยวัดปริมาณการลดลงของไนตริกออกไซด์ในเซลล์แมคโครฟาจเพาะเลี้ยงชนิด RAW 264.7 ด้วยการกระตุ้นด้วย LPS ด้วยปฏิกิริยา Greiss ที่ระดับความเข้มข้นที่สามารถยับยั้งไนตริกออกไซด์ได้ 50% ของเซลล์แมคโครฟาจเพาะเลี้ยงชนิด RAW 264.7 ด้วยการกระตุ้นด้วย LPS และเลี้ยงร่วมกับสารสกัด (ก) ใบลำพู และ (ข) ใบลำแพน นาน 48 ชั่วโมง



*แสดงถึงผลการทดสอบที่มีความแตกต่างจากกลุ่มตัวอย่างอื่นอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่นที่ 95% ($p < 0.05$)

ภาพที่ 3 การวิเคราะห์ฤทธิ์ต้านการอักเสบของสารสกัดใบลำพู (■) และใบลำแพน (■) โดยวัดปริมาณการลดลงของไนตริกออกไซด์ในเซลล์แมคโครฟาจเพาะเลี้ยงชนิด RAW 264.7 ด้วยการกระตุ้นด้วย LPS ด้วยปฏิกิริยา Greiss ที่ระดับความเข้มข้นที่สามารถยับยั้งการไนตริกออกไซด์ได้ 50% ของเซลล์แมคโครฟาจเพาะเลี้ยงชนิด RAW 264.7 ด้วยการกระตุ้นด้วย LPS และเลี้ยงร่วมกับสารสกัดใบลำพูและใบลำแพน นาน 48 ชั่วโมง

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

ต้นลำพูและลำแพนเป็นพืชชนิดหนึ่งในกลุ่มพรรณไม้ในป่าชายเลนที่มีอยู่ในตำรายาแผนโบราณ เปลือกต้นลำพูเป็นยาในกลุ่มรสรุค ขับเมือกในลำไส้ แก้อาการท้องอืด แน่นท้อง ขับพยาธิ แก้ไข้เนื่องจาก การอักเสบ ถอนพิษไข้ ขับปัสสาวะ ขับนิ่ว [6] จากการศึกษาพบว่าสารสกัดใบลำพูที่สกัดด้วยตัวทำละลายชนิดเอทานอล 95% แสดงคุณสมบัติการมีสารต้านมะเร็งเม็ดเลือด โดยสารสกัดใบลำพูสามารถทำให้เซลล์มะเร็งเม็ดเลือดขาวเพาะเลี้ยงชนิด HL60 ซึ่งเป็นเซลล์มะเร็งเม็ดเลือดขาวเฉียบพลันชนิด human acute promyelocytic leukemia ตายไป 50% (IC_{50}) ที่ระดับความเข้มข้น $89.5 \pm 6.45 \mu\text{g/mL}$ เป็นความเข้มข้นที่น้อยที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เมื่อเปรียบเทียบกับ เซลล์มะเร็งเม็ดเลือดขาวเพาะเลี้ยงชนิด Molt 4 (เป็น human acute lymphoblastic) และ เซลล์มะเร็งเม็ดเลือดขาว เพาะเลี้ยงชนิด K562 ซึ่งเป็นมะเร็งเม็ดเลือดขาวเรื้อรัง ชนิด human chronic myeloid leukemia ซึ่งต้องใช้ความเข้มข้น 124.4 ± 7.38 และ $190.2 \pm 4.40 \mu\text{g/mL}$ ตามลำดับ ซึ่งสารสกัดใบลำพูมีคุณสมบัติในการต้านมะเร็งเม็ดเลือดขาวชนิด human acute promyelocytic leukemia ได้ดีกว่าเซลล์มะเร็งเม็ดเลือดขาวชนิด human acute lymphoblastic และ ชนิด human chronic myeloid leukemia คิดเป็น 1.39 และ 2.13 เท่า ตามลำดับ ส่วนสารสกัดใบลำแพนที่สกัดด้วยตัวทำละลายชนิดเอทานอล 95% แสดงฤทธิ์ต้านมะเร็งต่อเซลล์มะเร็งเม็ดเลือดขาวเพาะเลี้ยงชนิด K562 ได้ดีที่สุดโดยใช้ความเข้มข้น เพียง $36.6 \pm 5.38 \mu\text{g/mL}$ ในการทำให้เซลล์มะเร็งเม็ดเลือดขาวเพาะเลี้ยงชนิด K562 ตายไป 50% ซึ่งเป็นความเข้มข้นที่น้อยกว่าความเข้มข้นที่ใช้ในการเซลล์มะเร็งเม็ดเลือดขาวเพาะเลี้ยงชนิด Molt4 ($150.3 \pm 4.59 \mu\text{g/mL}$) และ HL60 ($143.3 \pm 5.49 \mu\text{g/mL}$) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ซึ่งคิดเป็น 4.11 และ 3.92 เท่า นอกจากนี้การวิจัยยังพบว่าสารสกัดใบลำพูและใบลำแพนไม่มีความเป็นพิษต่อเซลล์ปกติเพาะเลี้ยงชนิด Vero (309.8 ± 6.58 และ $280.9 \pm 7.27 \mu\text{g/mL}$ ตามลำดับ) สารสกัดใบลำพูแสดงความเป็นพิษต่อเซลล์ปกติเพาะเลี้ยงชนิด Vero คิดเป็น 3.46 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับ ความเป็นพิษต่อเซลล์มะเร็งเม็ดเลือดขาวเพาะเลี้ยงชนิด HL60 ($89.5 \pm 6.45 \mu\text{g/mL}$) ส่วนสารสกัดใบลำแพนแสดงความเป็นพิษต่อเซลล์ปกติเพาะเลี้ยงชนิด Vero เป็น 7.67 เท่า เมื่อเปรียบเทียบกับความเป็นพิษต่อเซลล์มะเร็งเม็ดเลือดขาวเพาะเลี้ยง K562 ($36.6 \pm 5.38 \mu\text{g/mL}$) มีรายงานว่าสารสำคัญของลำแพนคือ (7S,8R)-dehydroconiferyl alcohol, (7S,8R)-5-methoxydehydroconiferyl alcohol, sonnerphenolic C มีความเป็นพิษ (IC_{50}) ต่อเซลล์มะเร็งเพาะเลี้ยงชนิด MCF-7 (human breast cancer) ที่ความเข้มข้น 146.9 ± 9.0 , 114.5 ± 7.2 , และ $112.8 \pm 9.4 \mu\text{M}$ ตามลำดับ และไม่มี ความเป็นพิษต่อเซลล์ปกติเพาะเลี้ยงชนิด PHF (primary human fibroblast) [23] และสารสกัดบริสุทธิ์ (-)-(R)-nyasol, (-)-(R)-4'-O-methylnyasol และ maslinic acid ที่แยกมาจากสารสกัดผลของลำพูและลำแพน แสดงฤทธิ์ความเป็นพิษปาน กลางต่อเซลล์เพาะเลี้ยงชนิด rat glioma C-6 [24] นอกจากนี้ยังมีการรายงานว่ามีพืชพันธุ์ไม้ในวงศ์ (Rhizophora) มีฤทธิ์และ ประสิทธิภาพในการต้านมะเร็ง (anticancer) โดยมีสารประกอบที่สำคัญ คือ แอนทราควิโนน (anthraquinones) ฟลาโวนอยด์ (flavonoids) และอัลคาลอยด์ (alkaloids) [25] และมีผลการวิจัยของ Tian และคณะ [26] รายงานถึงกลไกใน การต้านมะเร็งของสารประกอบแอนทราควิโนน คือ เป้าหมายของสารประกอบแอนทราควิโนน คือ DNA ซึ่งสารประกอบ แอนทราควิโนนบางชนิดถูกนำมาใช้ในการรักษามะเร็งโดยมีเป้าหมายในการลดและด้านความเสียหายของ DNA ซึ่งเป็นสาเหตุ ที่จะทำให้เกิดจากเซลล์มะเร็ง นอกจากนี้ยังลดการเกิดอนุมูลอิสระ ROS และแอนทราควิโนนยังทำให้เกิดการตายของ เซลล์มะเร็งโดยการเหนี่ยวนำให้เกิดลดการทำงานของ MDM2, AKT และแอนทราควิโนนยังมีแสดง คุณสมบัติการเป็นที่ยับยั้งการแบ่งตัวของเซลล์ (antiproliferative) ในเซลล์มะเร็งเพาะเลี้ยงกลุ่ม multiple drug-resistant cancer cell lines ส่วนสารประกอบฟลาโวนอยด์ มีรายงานว่าเกี่ยวข้องกับกลไกการเหนี่ยวนำให้เกิด apoptosis ของ เซลล์มะเร็ง [27]

นอกจากนี้การศึกษายังพบว่าสารสกัดใบลำพูและใบลำแพนยังแสดงฤทธิ์ต้านการอักเสบของสารสกัดโดยการวัดการ ลดลงของปริมาณไนตริกออกไซด์ ด้วยปฏิกิริยา Griess โดยใช้ RAW 264.7 (macrophage cell line) เป็นเซลล์ต้นแบบ และ กระตุ้นด้วย LPS ให้หลั่งไนตริกออกไซด์ จากการทดสอบพบว่าสารสกัดใบลำพูที่มีความเข้มข้น $26.5 \pm 6.08 \mu\text{g/mL}$ และสาร



สกัดใบลำแพนใช้ความเข้มข้นที่ $43.0 \pm 6.06 \mu\text{g/mL}$ สามารถยับยั้งการการผลิตไนตริกออกไซด์ 50% ทั้งนี้ยังพบว่าความเข้มข้นของสารสกัดใบลำแพนที่สามารถยับยั้งการการผลิตไนตริกออกไซด์ 50% น้อยกว่าสารสกัดใบลำแพนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) หรือประมาณ 1.62 เท่า มีรายงานสารประกอบกลุ่มฟลาโวนอยด์หลายชนิดส่งผลโดยตรงต่อเอนไซม์ในกระบวนการอักเสบ และฟลาโวนอยด์บางชนิดสามารถยับยั้งการเหนี่ยวนำการยึดเกาะโมเลกุล (adhesion molecule) เช่น นิวโทรฟิลในเลือดซึ่งกลไกที่สำคัญต่อกระบวนการอักเสบ [28-29] มีรายงานว่าสาร 27-[(E)-p-coumaroyloxy]canophyllic acid, 27-[(Z)-p-coumaroyloxy]canophyllic acid, 27-[(Z)-p-coumaroyloxy]friedelin-28-carboxylic acid, 3-oxo-friedelin-28-oic acid ซึ่งเป็นสารในกลุ่มเทอร์ปีนอยด์ ที่แยกมาจากสารสกัดใบสารภีทะเลหรือกระทิง (*Calophyllum inophyllum*) สามารถยับยั้งการหลั่งไนตริกออกไซด์ได้ โดยผ่านการยับยั้ง pro-inflammatory เช่น NO, IL-1 β , and TNF- α และยังมีรายงานว่า E-coumaroyl triterpenoid สามารถยับยั้งการทำงานของ iNOS ด้วย [30] นอกจากนี้ยังมีรายงานว่าสารสกัดจากลูกลำพูที่สกัดด้วยตัวทำละลายเอทานอล 96% ที่ความเข้มข้น 250 และ 500 mg/Kg มีฤทธิ์การต้านการอักเสบโดยศึกษาในหนู (mice) ที่เหนี่ยวนำให้เกิดอู้งเท้าบวม (paw edema) แบบตามความเข้มข้นที่เพิ่มสูงขึ้น (dose-dependent manner) [31] และยังมีรายงานสารสกัดด้วยอะซีโตน 70% จากลำพู (*Sonneratia caseolaris*) ลำพูทะเล (*Sonneratia alba*) และลำแพน (*Sonneratia ovata*) มีฤทธิ์ในด้านแบคทีเรียแกรมบวก คือ *Bacillus subtilis* และ แกรมลบ คือ *Aeromonas hydrophila* ได้ดีที่สุด [32] นอกจากนี้ยังมีการรายงานว่ามีฤทธิ์ในการต้านอนุมูลอิสระ (antioxidant) โดยการวัดปริมาณฟีนอล (phenolics) ฟลาโวนอยด์ (flavonoids) และ แทนนิน (tannins) ด้วยวิธี DPPH เท่ากับ 122 mg GAE/gm, 613 mg QE/gm และ 30 mg GAE/gm [31] อย่างไรก็ตามมีรายงานว่าสารสกัดลำแพนก็แสดงฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระเช่นกันโดยมีค่า IC₅₀ 4.73 และ 2.00 $\mu\text{g/mL}$ ด้วยวิธี DPPH และ ABTS ตามลำดับ [33] จากผลการศึกษาจะนำไปสู่การศึกษาการเสริมฤทธิ์ของสารสกัดเนื่องจากยารักษาเมะเร็งที่ดีควรมีฤทธิ์ทำลายเซลล์เมะเร็งได้ดีและควรต้องมีฤทธิ์ในการต้านการอักเสบได้ดีด้วย และต้องไม่มีความเป็นพิษต่อเซลล์ปกติ

ดังนั้นจากข้อมูลวิจัยเบื้องต้นนี้ชี้ให้เห็นว่า สารสกัดเอทานอลลำพูมีฤทธิ์ความเป็นพิษต่อเซลล์เมะเร็งเม็ดเลือดขาวเพาะเลี้ยงชนิด HL60 ได้ดีที่สุด และมีฤทธิ์ต้านการอักเสบสูงด้วย ส่วนสารสกัดลำแพนมีความเป็นพิษต่อมีฤทธิ์ความเป็นพิษต่อเซลล์เมะเร็งเม็ดเลือดขาวเพาะเลี้ยงชนิด K562 ได้ดีที่สุด แต่มีฤทธิ์ในการต้านการอักเสบน้อยกว่าสารสกัดใบลำพู ข้อมูลที่ได้จากการศึกษานี้จะนำไปสู่การต่อยอดในการศึกษาการแยกสารบริสุทธิ์ การศึกษาโครงสร้างของสารที่ออกฤทธิ์ เพื่อใช้ประโยชน์ในด้านต่าง ๆ เช่น ทางยา แพทย์ อาหาร เครื่องสำอาง และอุตสาหกรรม นอกจากนี้ยังจะเป็นข้อมูลพื้นฐานทางห้องปฏิบัติการในการสนับสนุนการพัฒนาตำรับครีมสมุนไพรใบลำพูและลำแพนในบรรเทาอาการอักเสบ หรือเป็นข้อมูลเบื้องต้นในหาสารออกฤทธิ์ต้านเมะเร็งและต้านการอักเสบที่ได้จากพืชป่าชายเลน เพื่อพัฒนาเป็นยาในรักษาเมะเร็งร่วมกับการต้านการอักเสบต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณและอุทิศให้อาจารย์เบญจวรรณ สมบูรณ์สุข โรงเรียนแพทย์แผนโบราณวัดพระเชตุพนวิมลมังคลาราม และโรงเรียนแพทย์แผนไทย ในการพิสูจน์เอกลักษณ์ของพืช และขอขอบคุณคณะเทคนิคการแพทย์ และคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติที่สนับสนุนในการทำวิจัย

เอกสารอ้างอิง

1. Kantarjian H, Melo JV, Tura S, Giralt S, Talpaz M. Chronic myelogenous leukemia: disease biology and current and future therapeutic strategies. Hematology Am Soc Hematol Educ Program 2000;1:90-109.
2. Radi ZA, Kehrli ME, Jr., Ackermann MR. Cell adhesion molecules, leukocyte trafficking, and strategies to reduce leukocyte infiltration. J Vet Intern Med 2001;15(6):516-29.



3. กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง กองอนุรักษ์ทรัพยากรป่าชายเลน. คู่มือความรู้เรื่องป่าชายเลน. พิมพ์ครั้งที่ 7. กรุงเทพฯ: บริษัท พลอย มีเดีย จำกัด; 2564.
4. Bandaranayake WM. Bioactivities, bioactive compounds and chemical constituents of mangrove plants. *Wetl Ecol Manag* 2002;10:421–52.
5. กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง กระทรวงทรัพยากรธรรมชาติและสิ่งแวดล้อม. คลังความรู้ทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง [อินเทอร์เน็ต]. 2556 [เข้าถึงเมื่อ 14 ม.ค. 2567]. เข้าถึงได้จาก: https://km.dmcr.go.th/c_11/d_3072
6. วุฒิ วุฒิธรรมเวช. ในสารานุกรมสมุนไพร: รวมหลักเภสัชกรรมไทย. พิมพ์ครั้งที่ 1. กรุงเทพมหานคร: โอเดียนสโตร์; 2540.
7. สำนักอนุรักษ์ทรัพยากรป่าชายเลน กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง. ความหลากหลายทางชีวภาพในป่าชายเลนฝั่งอ่าวไทย และอันดามันตอนล่าง. โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย จำกัด. กรุงเทพฯ; 2553.
8. กรมทรัพยากรทางทะเลและชายฝั่ง. สมุนไพรในป่าชายเลน. ส่วนส่งเสริมและพัฒนาทรัพยากรป่าชายเลน [อินเทอร์เน็ต]. 2559 [เข้าถึงเมื่อ 6 ม.ค. 2567]. เข้าถึงได้จาก <https://dmcrth.dmcr.go.th/manpro/detail/11694/>
9. ธวัชชัย แพชมัด, เกษร จันทศิริ, จุรี เจริญธีรบุรณ์. การพัฒนาสารสกัดจากลำพูและการศึกษาฤทธิ์ทางชีวภาพเพื่อใช้ทางยาและเครื่องสำอาง. รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์ สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยศิลปากร, กรุงเทพฯ; 2555
10. Yompakdee C, Thunyaharn S, Phaechamud T. Bactericidal activity of methanol extracts of crabapple mangrove tree (*Sonneratia caseolaris* Linn.) against multi-drug resistant pathogens. *Indian J Pharm Sci* 2012;74(3):230–6.
11. Haq I, Hossain ABMS, Khandaker MM, Merican AF, Faruq G, Boyce AN, et al., Antioxidant and antibacterial activities of different extracts and fractions of a mangrove plant *Sonneratia alba*. *Int J Agric Biol* 2014;14(4):707-14.
12. Charoenteeraboon J, Wetwitayaklung P, Limmatvapirat C, Phaechamud T. Hepatoprotective activity from various parts of *Sonneratia caseolaris*. *Planta Med* 2007;73(9):561.
13. Wu S-B, Wen Y, Li X-W, Zhao Y, Zhao Z, Hu J-F. Chemical constituents from the fruits of *Sonneratia caseolaris* and *Sonneratia ovata* (Sonneratiaceae). *Biochem Syst Ecol* 2009;37(1):1–5.
14. Dev S, Acharyya RN, Akter S, Al Bari MA, Asma K, Hossain H, et al., Toxicological screening and evaluation of anti-allergic and anti-hyperglycemic potential of *Sonneratia caseolaris* (L.) Engl. Fruits. *Clin phytosci* 2021;7(1):1–13.
15. Sadhu SK, Ahmed F, Ohtsuki T, Ishibashi M. Flavonoids from *Sonneratia caseolaris*. *J Nat Med* 2006;60(3):264-5.
16. Wetwitayaklung P, Limmatvapirat C, Phaechamud T. Antioxidant and anticholinesterase activities in various parts of *Sonneratia caseolaris* (L.). *Indian J Pharm Sci* 2013;75(6):649–56.
17. ฉัตรทริกา อภิชาติวรกิจ, ไอลดา กลั่นสุข, สุวรรณ เสมศรี, สุรีย์พร หอมวิเศษวงศา. ความเป็นพิษของสารสกัดตะไคร้ต้นต่อเซลล์มะเร็งเม็ดเลือดขาวเพาะเลี้ยง. ว วิทย เทคโนโลยี หัวใจเฉลิมพระเกียรติ 2558;1(1):60-8.
18. สุวรรณ เสมศรี, นันทิกานต์ ยงพิศาลภพ, นวพร คงด้วง, สุรีย์พร หอมวิเศษวงศา, วิชาญ จันทรวินยานุชิต. ฤทธิ์ของสารสกัดผักปลัง ผักแพว และผักขวยต่อการต้านมะเร็งและการกลืนกิน สิ่งแปลกปลอมของเซลล์แมคโครฟาจ. ว วิทย เทคโนโลยี หัวใจเฉลิมพระเกียรติ 2561;4(2):40-9.
19. Yuan C, Gao Ju, Guo Ji, Bai L, Marshall C, Cai Z, et al. Dimethyl Sulfoxide Damages Mitochondrial Integrity and Membrane Potential in Cultured Astrocytes. *PLoS ONE* 2014;9(9):e107447.



20. de Abreu Costa L, Henrique Fernandes Ottoni M, Dos Santos MG, Meireles AB, Gomes de Almeida V, de Fátima Pereira W. et al. Dimethyl sulfoxide (DMSO) decreases cell proliferation and TNF- α , IFN- γ , and IL-2 cytokines production in cultures of peripheral blood lymphocytes. *Molecules* 2017;22(11):1789.
21. สุวรรณ เสมศรี, โน้ต ขาดิลา จาสีล, สุธี สิงห์สนธิ์, สุริย์พร หอมวิเศษวงศา, วิชาญ จันทน์วิทยานุกิต.ฤทธิ์ต้านการอักเสบและการกลืนกินสิ่งแปลกปลอมของสารสกัดใบกะเม็ง ใบสาบเสือ และใบบัวบก. ในเอกสารการประชุมวิชาการระดับชาติวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีระหว่างสถาบัน ครั้งที่ 7 วันที่ 7 มิถุนายน 2561 คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยรังสิต ปทุมธานี; 2561. หน้า 974-82.
22. Tuntipipat S, Muangnoi C, Chingsuwanrote P, Parengam M, Chantravisut P, Charoenkiatkul S, et al., Anti-inflammatory activities of red curry paste extract on lipopolysaccharide-activated murine macrophage cell line. *Nutrition* 2011;27(4):479-87.
23. Nguyen THT, Pham HVT, Pham NKT, Quach NDP, Pudhom K, Hansen PE, et al. Chemical constituents from *Sonneratia ovata* Backer and their *in vitro* cytotoxicity and acetylcholinesterase inhibitory activities. *Bioorg Med Chem Lett* 2015;25(11):2366-71.
24. Wu SB, Wen Y, Li XW, Zhao Y, Zhao Z, Hu JF. Chemical constituents from the fruits of *Sonneratia caseolaris* and *Sonneratia ovata* (Sonneratiaceae). *Biochem Syst Ecol* 2009;37(1):1-5.
25. Abou Assi R, Darwis Y, Abdulbaqi IM, Khan AA, Vuanghao L. Laghari MH. Morinda citrifolia (Noni): A comprehensive review on its industrial uses pharmacological activities, and clinical trials. *Arab J Chem* 2017;10(5):691-707.
26. Tian W, Wang C, Li D, Hou H. Novel anthraquinone compounds as anticancer agents and their potential mechanism. *Future Med Chem* 2020;12(7):627-44.
27. Chahar MK, Sharma N, Dobhal MP, Joshi YC. Flavonoids: A versatile source of anticancer drugs. *Pharmacogn Rev* 2011;5(9):1-12.
28. Middleton E Jr, Kandaswami C, Theoharides TC. The effects of plant flavonoids on mammalian cells: implications for inflammation, heart disease, and cancer. *Pharmacol Rev* 2000;52(4):673-751.
29. Genilar LA, Kurniawaty E, Mohd Mokhtar RA, Audah KA. Mangroves and Their Medicinal Benefit: A Mini Review. *Ann Rom Soc Cell Biol* 2021;25(4):695-709.
30. Van Thanh N, Jang HJ, Vinh LB, Linh KT, Huong PT, Cuong NX, et al. Chemical constituents from Vietnamese mangrove *Calophyllum inophyllum* and their anti-inflammatory effects. *Bioorg Chem* 2019;88:102921.
31. Kundu P, Debnath SL, Devnath HS, Saha L, Sadhu SK. Analgesic, Anti-inflammatory, Antipyretic, and In Silico Measurements of *Sonneratia caseolaris* (L.) Fruits from Sundarbans, Bangladesh. *Biomed Res Int* 2022;2022:1-16.
32. พันธุ์ทิพย์ วิเศษพงษ์พันธ์, ภัทธร พุทธิเมธากุล. ฤทธิ์ต้านแบคทีเรียของสารสกัดจากลำพู ลำพูทะเล และลำแพน. ในเอกสารการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 55 เล่ม 1 วันที่ 31 มกราคม – 3 กุมภาพันธ์ 2560. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ; 2560.
33. Laili K, Fatati N, Inneke PF, Setyo PA, Mardi S, Taslim E, Sri F. In vitro antioxidant activity of *Sonneratia ovata* Backer extract. *Res J Chem Environ* 2018;22(2):146-50.



การเตรียมโปรตีนไฮโดรไลเสตจากสาหร่ายสไปรูลีนาและคุณสมบัติเชิงหน้าที่

Preparation of Protein Hydrolysates from *Spirulina* and Their Functional Properties

สุพรรณิ เบเชก¹ และ วนิดา ปานอุทัย^{2*}

¹ภาควิชาจุลชีววิทยาและปรสิตวิทยา คณะวิทยาศาสตร์การแพทย์ มหาวิทยาลัยนเรศวร พิษณุโลก 65000

²ฝ่ายจุลชีววิทยาประยุกต์ สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพมหานคร 10900

Supanee Bachaku¹ and Wanida Pan-utai^{2*}

¹Department of Microbiology and Parasitology, Faculty of Medical Science, Naresuan University,
Phitsanulok 65000

²Department of Applied Microbiology, Institute of Food Research and Product Development,
Kasetsart University, Bangkok 10900

*Corresponding author: ifrwdp@ku.ac.th

Received: 21 February 2024 / Revised: 26 April 2024/ Accepted: 29 April 2024

บทคัดย่อ

โปรตีนจากสาหร่ายสไปรูลีนาถือเป็นโปรตีนทางเลือกอุดมไปด้วยเปปไทด์ที่ออกฤทธิ์ทางชีวภาพก่อให้เกิดผลดีต่อสุขภาพของมนุษย์ เช่น การต้านอนุมูลอิสระ ต้านมะเร็ง ต้านการอักเสบ ลดความดันโลหิตหรือต้านโรคอ้วน เป็นต้น ดังนั้นโปรตีนไฮโดรไลเสตจากสาหร่ายสไปรูลีนาจึงมีคุณสมบัติที่เหมาะสมสำหรับการประยุกต์ใช้ในผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพ ซึ่งนอกจากคุณค่าทางโภชนาการที่เป็นประโยชน์ต่อผู้บริโภคแล้วยังมีคุณสมบัติเชิงหน้าที่ในอาหารที่เหมาะสมสำหรับการแปรรูปในแง่ของผู้ผลิต การรายงานในบทความก่อนหน้านี้มีรายงานถึงโปรตีนจากสาหร่ายสไปรูลีนาและการประยุกต์ใช้ชีวมวลสไปรูลีนาในอาหารโดยไม่ผ่านการย่อย บทความนี้จึงได้รวบรวมข้อมูลที่สำคัญสำหรับการเตรียมโปรตีนไฮโดรไลเสตจากสาหร่ายสไปรูลีนาโดยครอบคลุมเนื้อหาความสำคัญของโปรตีนไฮโดรไลเสต กระบวนการเพาะเลี้ยง การเก็บเกี่ยว และกระบวนการเตรียมโปรตีนไฮโดรไลเสต ตลอดจนกรณีศึกษาการประยุกต์ใช้โปรตีนไฮโดรไลเสตจากสาหร่ายสไปรูลีนาในปัจจุบัน

คำสำคัญ: สไปรูลีนา โปรตีนไฮโดรไลเสต เปปไทด์ที่ออกฤทธิ์ทางชีวภาพ คุณสมบัติเชิงหน้าที่

Abstract

Protein from *Spirulina* is an alternative protein with abundant bioactive peptides that benefit human health, such as antioxidant, anticancer, anti-inflammatory, antihypertensive, anti-obesity, etc. Therefore, protein hydrolysate from *Spirulina* has functional properties that can be applied to healthy food products. In addition, protein hydrolysates have nutritional benefits for consumers and suitable techno-functional



properties for processing manufacturers. Previous articles have reported protein and application from *Spirulina*, which was non-hydrolysed. In this review, we compiled information related to protein hydrolysate that covered the importance of protein hydrolysate, culture process, harvesting, and hydrolysis protein, including illustrated examples of case studies in the current application of protein hydrolysates from *Spirulina* microalgae.

Keywords: *Spirulina*, protein hydrolysates, bioactive peptides, functional properties

บทนำ

โปรตีนไฮโดรไลเสตเป็นโปรตีนที่ผ่านการย่อยให้มีขนาดโมเลกุลลดลง ประกอบด้วยกรดอะมิโน เปปไทด์ โอลิโกเปปไทด์และพอลิเปปไทด์ ทำให้ง่ายต่อการดูดซึมและส่งผลกระทบต่อสุขภาพร่างกายได้มากกว่าโปรตีนที่ไม่ผ่านการย่อย เนื่องจากโปรตีนที่สามารถออกฤทธิ์ในร่างกายต้องมีความยาวของกรดอะมิโนอยู่ในช่วง 3-50 พันธะ แต่ร่างกายสามารถย่อยโปรตีนให้มีโมเลกุลขนาดเล็กได้ในปริมาณที่ต่ำ ดังนั้นการรับประทานโปรตีนไฮโดรไลเสตที่มีโมเลกุลขนาดเล็กส่งผลให้ร่างกายสามารถย่อยและดูดซึมได้ง่ายมากขึ้น [1-3] นอกจากนี้การใช้โปรตีนไฮโดรไลเสตเป็นส่วนผสมในอาหารยังเพิ่มคุณสมบัติที่ดีให้กับอาหาร เช่น ความสามารถในการละลาย การเกิดเจล การเกิดอิมัลชันและการเกิดโฟม คุณสมบัติเหล่านี้ทำให้ได้เนื้อสัมผัส กลิ่น รสชาติที่ดีของอาหาร [4] สาหร่ายสไปรูลินาอุดมไปด้วยโปรตีนมากถึงร้อยละ 60-70 ของน้ำหนักแห้ง และมีคุณค่าทางโภชนาการสูง จึงได้รับความสนใจสำหรับการผลิตโปรตีนไฮโดรไลเสตและยังมีคุณสมบัติในการออกฤทธิ์ทางชีวภาพของโปรตีนไฮโดรไลเสตจากสาหร่ายสไปรูลินา เช่น การต้านอนุมูลอิสระ การลดความดันโลหิต ด้านการอักเสบ ด้านมะเร็ง รวมถึงการต้านจุลชีพ เป็นต้น [5, 6]

โดยทั่วไปแล้วผู้บริโภคอาหารในกลุ่มรักสุขภาพจะพิจารณาการเลือกซื้ออาหารเพื่อสุขภาพจากคุณค่าทางโภชนาการ และมีฤทธิ์ทางชีวภาพ เพื่อลดความเสี่ยงต่อกลุ่มโรคไม่ติดต่อเรื้อรัง (non-communicable diseases, NCDs) ที่เกิดได้จากพฤติกรรมการรับประทานอาหาร ดังนั้นในภาคอุตสาหกรรมจึงมีการคิดค้นและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารที่มีคุณสมบัติดังกล่าวเพื่อตอบสนองความต้องการของผู้บริโภค [7] ในบทความนี้ได้รวบรวมข้อมูลโดยเน้นเนื้อหาที่เกี่ยวข้องกับการเตรียมโปรตีนไฮโดรไลเสตจากสาหร่ายสไปรูลินา ตั้งแต่การเพาะเลี้ยงสาหร่ายสไปรูลินาเพื่อผลิตโปรตีน การเตรียมโปรตีนไฮโดรไลเสตและคุณสมบัติเชิงหน้าที่ที่เป็นประโยชน์ต่อการพัฒนาด้านอาหารตลอดจนแนวทางการประยุกต์ใช้

1. สาหร่ายสไปรูลินา

สาหร่ายสไปรูลินา (*Spirulina* หรือ *Arthrospira*) เป็นสาหร่ายสีเขียวแกมน้ำเงินหรือไซยาโนแบคทีเรียในกลุ่มโปรคาริโอต สาหร่ายสไปรูลินามีการสังเคราะห์แสงและผลิตออกซิเจน [8] พบได้ทั่วไปในแหล่งน้ำเขตร้อนและเขตกึ่งร้อนโดยสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมมีค่า pH เป็นด่าง (pH อาจสูงถึง 11) มีคาร์บอนและไบคาร์บอนในปริมาณสูง [9] ลักษณะทางสัณฐานวิทยาของสไปรูลินาโดยทั่วไปมีลักษณะเป็นสายเกลียววนทางซ้ายมือซึ่งเกิดจากการเรียงตัวของไตรโคม (trichome) ทรงกระบอกสั้นหลายเซลล์แสดงในภาพที่ 1 มีรัศมีของทรงกระบอกตั้งแต่ 6 ถึง 12 ไมโครเมตร ระยะห่างระหว่างเกลียวมีความแตกต่างกันตามสายพันธุ์โดยอยู่ในช่วง 12-72 ไมโครเมตร และมีเส้นผ่านศูนย์กลางของเกลียวประมาณ 30-70 ไมโครเมตร [9] พื้นผิวของเซลล์สาหร่ายสไปรูลินามีลักษณะเรียบและไม่มีการปกคลุมส่งผลให้สามารถทำลายผนังเซลล์ได้ด้วยวิธีการที่ง่าย [10] สาหร่ายสไปรูลินาได้รับการยอมรับว่ามีความปลอดภัย (Generally Recognized as Safe, GRAS) โดยองค์การอาหารและยาแห่งสหรัฐอเมริกา (Food and Drug Administration, FDA) สไปรูลินาที่นิยมนำมาใช้เป็นอาหารและศึกษาในงานวิจัย ได้แก่ *Arthrospira (Spirulina) platensis*, *A. maxima* และ *A. fusiformis* ซึ่งชีวมวลสาหร่ายสไปรูลินาเป็นผลิตภัณฑ์โปรตีนที่ย่อยง่ายจึงมีการใช้เป็นอาหารเสริมสำหรับนักบินอวกาศโดยองค์การอวกาศสหรัฐฯ และจัดสาหร่ายสไปรูลินาเป็น “อาหารแห่งอนาคต” [11] สไปรูลินาอุดมไปด้วยโปรตีนสูงถึงร้อยละ 60-70 ของน้ำหนักแห้ง มีกรดอะมิโนจำเป็นสูง



ภาพที่ 1 ลักษณะรูปร่างของสาหร่ายสไปรูลิน่า

ที่มา : Matufi and Choopani [13]

มีคาร์โบไฮเดรตปริมาณร้อยละ 13.5 นอกจากนี้ยังมีกรดไขมันไม่อิ่มตัวเชิงซ้อน (polyunsaturated fatty acids, PUFAs) สูงถึงร้อยละ 1.5-2.0 โดยเฉพาะอย่างยิ่ง γ -linolenic acid (พบร้อยละ 35 ของ PUFAs ทั้งหมด) นอกจากนี้ยังพบวิตามินและแร่ธาตุในสาหร่ายสไปรูลิน่าด้วยเช่นกัน ปัจจุบันสาหร่ายสไปรูลิน่าที่มีการผลิตเชิงพาณิชย์ส่วนใหญ่ใช้เป็นอาหารสำหรับการบริโภคของมนุษย์ มักอยู่ในรูปแบบอาหารเพื่อสุขภาพหรืออาหารเสริม [10, 12]

โปรตีนจากสาหร่ายสไปรูลิน่าประกอบด้วยไฟโคบิลิโปรตีนสองชนิดหลัก ได้แก่ ซี-ไฟโคไซยานินและแอลโลไฟโคไซยานิน สามารถออกฤทธิ์ทางชีวภาพเพื่อป้องกันและรักษาโรคบางชนิดได้ [11, 14] คุณภาพของโปรตีนสัมพันธ์กับปริมาณกรดอะมิโนจำเป็นที่มีปริมาณสูง โดยโปรตีนจากสาหร่ายสไปรูลิน่ามีปริมาณกรดอะมิโนจำเป็นร้อยละ 38.81 - 47.00 ของปริมาณโปรตีนทั้งหมด [11] จากการเปรียบเทียบชนิดและปริมาณของกรดอะมิโนที่พบในแหล่งวัตถุดิบที่มีโปรตีนต่างชนิดกัน ดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่ากรดอะมิโนจำเป็นที่พบปริมาณสูงในสาหร่ายสไปรูลิน่าประกอบด้วยลิวซีนร้อยละ 40 ไอโซลิวซีนร้อยละ 40 วาลีนร้อยละ 28 และฮิสติดีนร้อยละ 27 ส่งผลให้โปรตีนจากสาหร่ายสไปรูลิน่ามีคุณภาพดีกว่าโปรตีนจากพืชบางชนิด เช่น อัลมอนต์และถั่วแดง เป็นต้น นอกจากนี้จะเห็นได้ว่าปริมาณกรดอะมิโนจากสาหร่ายสไปรูลิน่ายังสูงกว่ากรดอะมิโนจากสาหร่ายสายพันธุ์อื่น เช่น *Hormophysa cuneiformis* และ *Ulva fasciata* เป็นต้น มีความใกล้เคียงกับโปรตีนจากถั่วเหลือง นอกจากนี้โปรตีนจากสาหร่ายสไปรูลิน่ายังเป็นแหล่งของเปปไทด์ที่ออกฤทธิ์ทางชีวภาพ

ตารางที่ 1 ชนิดและปริมาณกรดอะมิโนที่พบในแหล่งวัตถุดิบแตกต่างกัน

ประเภท ของ กรด อะมิโน	กรดอะมิโน	องค์ประกอบกรดอะมิโนอิสระจากโปรตีนแหล่งต่างๆ (มก./ก.)										
		ไข่ เป็ด (DW)	เนื้อ วัว (WW)	เนื้อ หมู (WW)	ถั่ว เหลือง (DW)	ถั่ว แดง (DW)	อัล มอนต์ (DW)	มัยค โปรตีน (DW)	<i>H.</i> <i>cuneiformis</i> (DW)	<i>U.</i> <i>fasciata</i> (DW)	<i>S.</i> <i>platensis</i> (DW)	<i>C.</i> <i>vulgaris</i> (DW)
กรด อะมิโน จำเป็น	Phenylalanine	49	40	41	32	5	11	23	5	2	19	55
	Valine	40	57	50	22	5	9	28	2	4	28	66
	Tryptophan	-	11	13	-	1	2	8	-	-	-	23
	Threonine	36	40	51	23	3	6	25	4	9	40	52
	Isoleucine	32	51	49	19	4	8	24	5	7	25	44
	Methionine	40	23	25	3	1	2	10	15	6	8	12
	Histidine	22	29	32	15	2	5	16	3	2	27	20
	Leucine	65	84	75	50	7	15	39	6	13	40	94
	Lysine	67	84	78	34	6	6	38	6	8	23	67



ประเภท ของกรด อะมิโน	กรดอะมิโน	องค์ประกอบกรดอะมิโนอิสระจากโปรตีนแหล่งต่างๆ (มก./ก.)										
		ไข่ เปิด (DW)	เนื้อ วัว (WW)	เนื้อ หมู (WW)	ถั่ว เหลือง (DW)	ถั่ว แดง (DW)	อัล มอนต์ (DW)	มัยค โพรตีน (DW)	H. cuneiformis (DW)	U. fasciata (DW)	S. platensis (DW)	C. vulgaris (DW)
กรด อะมิโน ไม่ จำเป็น	Alanine	42	64	63	28	4	10	28	1	4	12	83
	Arginine	59	66	64	48	4	25	33	10	1	26	62
	Aspartic acid	89	88	89	-	10	26	46	13	16	31	98
	Cysteine	12	14	13	2	1	2	4	2	0.4	5	13
	Glutamic acid	131	144	145	124	13	62	56	16	19	50	127
	Glycine	39	71	61	27	3	14	20	1	2	21	61
	Proline	30	54	46	33	5	10	20	3	2	23	49
	Serine	38	38	40	34	5	9	23	3	3	20	43
	Tyrosine	31	32	30	22	2	5	18	4	1	20	31
เอกสารอ้างอิง		[16]	[17]	[18]			[19]		[20]		[21]	[22]

หมายเหตุ (DW): dry weight, (WW): wet weight

ในปัจจุบันมีการศึกษาเกี่ยวกับความสามารถในการออกฤทธิ์ทางชีวภาพของเปปไทด์ที่ได้จากสาหร่ายสไปรูลิน่ามากขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อหากระบวนการย่อยหรือการทำให้บริสุทธิ์ของโปรตีนไฮโดรไลเสต และได้มาซึ่งลำดับเปปไทด์ที่จำเพาะเจาะจงกับการออกฤทธิ์ทางชีวภาพ มีการนำเสนอกลไกที่เป็นไปได้สำหรับการใช้ประโยชน์ในด้านอาหารและยา [15] เปปไทด์ที่ได้จากโปรตีนไฮโดรไลเสตบางชนิดมีความจำเพาะกับการออกฤทธิ์ทางชีวภาพและได้รับการศึกษาถึงลำดับการเรียงตัวของกรดอะมิโน เช่น เปปไทด์จากสาหร่ายสไปรูลิน่าที่ออกฤทธิ์ยับยั้ง Angiotensin-Converting Enzyme (ACE) มีลำดับ IRDLDY หรือเปปไทด์ที่ออกฤทธิ์ต้านการอักเสบมีลำดับ LDAVNR และ MMLDF เป็นต้น ดังข้อมูลที่แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ลำดับเปปไทด์ที่สามารถออกฤทธิ์ทางชีวภาพจากแหล่งโปรตีนชนิดต่าง ๆ

กิจกรรมทางชีวภาพ	ลำดับเปปไทด์	แหล่งโปรตีน	เอกสารอ้างอิง
ยับยั้งเอนไซม์ ACE (ลดความดันโลหิต)	VLIVP, SPYP, WL, NWGPLV	ถั่วเหลือง	[23]
	RPKHPI, RPKHPIKHQ, ENLLRF, PFP	เนยแข็ง	[24]
	FPGPIPK, IPPK, IVPN, QPPQ	นมกระป๋อง	[25]
	WSK	ข้าว	[26]
	IRDLDY	สไปรูลิน่า	[27]
ต้านอนุมูลอิสระ	YPSG, HPFA, KFQ	นมกระป๋อง	[25]
	RPNYTD, TSQLSDQ, TRTGDPFF, NFHPQ	ข้าว	[28]
	LHT, GALAAH, GAWA	ปลาซาร์ดีน	[29]
ต้านมะเร็ง	ILGKLLSTAAGLLSNL, GFKDLLKGAALKVKTFLF	สารคัดหลั่งจากผิวหนังกบ	[30]
	HVLSRAPR	สาหร่ายสไปรูลิน่า	[31]
ต้านจุลชีพ	RPKHPIK, VLNENLLR, LKKISQ	เนยแข็ง	[24]
ต้านการอักเสบ	LDAVNR, MMLDF	สาหร่ายสไปรูลิน่า	[32]
ต้านโรคอ้วน	IAVPGEVA, IAVPTGVA, LPYP	ถั่วเหลือง	[23]

หมายเหตุ Phe (F), Val (V), Trp (W), Thr (T), Ile (I), Met (M), His (H), Leu (L), Lys (K), Ala (A), Arg (R), Asp (D), Cys (C), Glu (E), Gly (G), Pro (P), Ser(S), Tyr (Y), กลูตามีน (glutamine, Gln/Q), แอสพาราจีน (asparagine, Asn/N)

2. การเพาะเลี้ยงสไปรูลินาเพื่อผลิตโปรตีน

สาหร่ายสไปรูลินาสามารถเจริญได้ในทุกสภาพแวดล้อมที่มีความชื้น แต่จะสามารถเจริญได้อย่างรวดเร็วภายใต้สภาวะที่เหมาะสม สามารถพบสไปรูลินาได้ในดิน บึง น้ำจืด น้ำกร่อย น้ำทะเล บ่อน้ำพุร้อนที่มีสภาวะเป็นด่าง (pH 8.5 - 11) เนื่องจากสไปรูลินาเป็นโฟโตออโตโทรฟ (photoautotroph) จึงเจริญได้ดีบริเวณที่มีความเข้มแสงสูง การเพาะเลี้ยงสไปรูลินาต้องใช้ความเข้มแสงที่เหมาะสมสำหรับการเจริญเติบโตในช่วง 20-30 ลักซ์ และต้องมีคาร์บอนไดออกไซด์เพื่อเป็นแหล่งคาร์บอนสำหรับการสังเคราะห์แสง อุณหภูมิที่เหมาะสมสำหรับการเจริญอยู่ระหว่าง 35-39 องศาเซลเซียส อาหารสำหรับเพาะเลี้ยงสไปรูลินาต้องเป็นอาหารที่มีความเป็นด่างสูงและมีออกซิเจนของไบคาร์บอเนตในปริมาณที่เหมาะสม โดยสูตรอาหารเหลวที่ได้รับการยอมรับและนำมาปรับใช้ในการเพาะเลี้ยง คือ อาหารเหลวสูตร Zarrouk [10, 33] การเก็บเกี่ยวสไปรูลินาทำได้ในช่วงเช้าซึ่งเป็นช่วงเวลาที่เหมาะสมกับการเก็บ เนื่องจากสาหร่ายสไปรูลินาจะมีปริมาณโปรตีนสูงสุดในช่วงเช้ามืด และความเย็นของน้ำจะทำให้ง่ายต่อการเก็บเกี่ยว [8] วิธีที่นิยมใช้ในการเก็บเกี่ยวผลผลิตจากการเพาะเลี้ยงสไปรูลินา เช่น การปั่นเหวี่ยง หรือการกรอง โดยการปั่นเหวี่ยงเป็นวิธีแยกสาหร่ายออกจากน้ำหรืออาหารเลี้ยง ทำให้สาหร่ายตกตะกอนด้วยแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางของเครื่องปั่นเหวี่ยง วิธีนี้เป็นวิธีที่มีประสิทธิภาพแต่เซลล์สาหร่ายบางส่วนอาจได้รับความเสียหายจากการเกาะเป็นก้อน [8] ขณะที่ในกระบวนการผลิตเชิงพาณิชย์ใช้วิธีการกรองในการเก็บเกี่ยวโดยแบ่งออกเป็นกรองแบบเอียง (inclined screens) และการกรองแบบสั่น (vibrating screens) อย่างไรก็ตามการกรองแบบเอียงให้ประสิทธิภาพในการกรองมากกว่าการกรองแบบสั่น [8] ในการศึกษาของ Ismail, Kurnia [34] ได้รายงานถึงประสิทธิภาพและการประหยัดพลังงานในการเก็บเกี่ยวโดยวิธีการกรองสาหร่ายสไปรูลินาแบบเอียงโดยใช้กระดาษกรองที่มีขนาดรูพรุน 0.04 ไมโครเมตร และ 0.42 ไมโครเมตร ความสามารถในการกรองสูงสุดอยู่ที่การเอียง 45 องศา และการเพิ่มประสิทธิภาพการกรองโดยการเติมอากาศมีอัตราการเติมที่เหมาะสมที่สุดอยู่ในช่วง 0.5-1.0 ลิตร/นาที่

3. การเตรียมโปรตีนไฮโดรไลเสตจากสาหร่าย

หลังจากการเก็บเกี่ยวสไปรูลินาจำเป็นต้องมีการทำให้แห้งเพื่อป้องกันการเน่าเสียของชีวมวลเซลล์ โดยมีค่าความชื้นสุดท้ายน้อยกว่าร้อยละ 10 วิธีการทำแห้งที่ได้รับความนิยมคือ การพ่นฝอยเพื่อให้ได้ผงละเอียดหรืออบแห้งให้ได้แผ่นบาง [35] ในการศึกษาของ Stramarkou, Papadaki [36] ได้ทำการเปรียบเทียบการทำแห้งด้วยวิธีการต่าง ๆ ได้แก่ การอบแห้งที่ชั้นบรรยากาศปกติ (atmospheric drying) การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (freeze drying) การทำแห้งแบบสุญญากาศ (vacuum drying) และการอบแห้งแบบเร่งด้วยแสงอาทิตย์ (accelerated solar drying) จากการเปรียบเทียบวิธีการทำแห้งสไปรูลินาพบว่าการทำแห้งแบบสุญญากาศสามารถลดความชื้นได้อย่างรวดเร็ว ซึ่งตรงข้ามกับวิธีการทำแห้งที่ชั้นบรรยากาศปกติที่ใช้เวลาในการระเหยน้ำเป็นเวลานานจึงไม่สามารถนำมาใช้ในระดับอุตสาหกรรมได้ อย่างไรก็ตามวิธีการนี้สามารถรักษาปริมาณซี-ไฟโคไซยานินได้สูงสุดโดยมีค่าร้อยละ 9.56 วิธีการทำแห้งแบบเร่งด้วยแสงอาทิตย์ให้ค่าคุณสมบัติการต้านอนุมูลอิสระสูงสุดเท่ากับร้อยละ 31.28 ส่วนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเป็นวิธีที่เหมาะสมที่สุดต่อปริมาณเบต้าแคโรทีนที่เหลืออยู่ แต่วิธีการนี้ต้องใช้ต้นทุนค่อนข้างสูงในการผลิต [36] ซึ่งส่งผลต่อราคาโดยรวมของชีวมวลสไปรูลินาที่เตรียมได้ ดังนั้นการเลือกใช้วิธีการทำแห้งขึ้นอยู่กับปัจจัยหลายประการ ได้แก่ ต้นทุนการผลิต การขนส่ง และผลิตภัณฑ์สุดท้าย

โปรตีนไฮโดรไลเสตประกอบด้วยพอลิเปปไทด์ โอลิโกเปปไทด์ และกรดอะมิโนอิสระ ซึ่งได้จากการย่อยให้เกิดการแตกพันธะเพปไทด์ภายในโครงสร้างโปรตีนเพื่อให้ได้เปปไทด์ที่ออกฤทธิ์ทางชีวภาพ โดยพื้นฐานแล้วพันธะจะถูกทำลายจากความร้อนระหว่างการแปรรูปอาหารหรือระหว่างการย่อยในระบบทางเดินอาหาร [3, 6] การย่อยโปรตีนจากสาหร่ายสไปรูลินาสามารถทำได้ด้วยหลากหลายวิธี โดยมีวิธีการหลักดังนี้

การย่อยทางเคมี เป็นการใช้สารเคมีที่มีความเป็นกรดหรือด่างในการย่อยที่อุณหภูมิสูง [37] จากการศึกษาการย่อยโดยใช้กรดไฮโดรคลอริกความเข้มข้น 3 โมลาร์ ที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลานาน 60 นาที พบว่าให้ความเข้มข้นของรสชาติอูมามิมากกว่าสาหร่ายที่ไม่ผ่านการย่อย ทำการแยกส่วนที่ผ่านการย่อยโดยอาศัยเทคนิคการกรองอัลตราฟิลเตรชัน (ultrafiltration) ที่มีน้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 3 กิโลดาลตัน ร่วมด้วยเทคนิคโครมาโทกราฟี (chromatography) จะได้ส่วนที่



เป็นสารประกอบรสชาติอูมามิ ซึ่งพบว่าประกอบด้วยกรดซัคซินิก 522.64 ไมโครกรัมต่อมิลลิกรัม และกรดกลูตามิก 488.06 ไมโครกรัมต่อมิลลิกรัม [38]

การย่อยโดยวิธีทางเอนไซม์ มีงานวิจัยจำนวนมากที่ศึกษาการออกฤทธิ์ของเปปไทด์ที่ได้จากการเตรียมโปรตีนไฮโดรไลสโดยใช้วิธีทางเอนไซม์พบว่ามีความสามารถในการเป็นสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพเพิ่มขึ้น และการย่อยโปรตีนจากสไปรูลินาโดยวิธีทางเอนไซม์พบว่ามีฤทธิ์ในการต้านเซลล์มะเร็ง ด้านโรคอ้วนและโรคเบาหวานชนิดที่ 2 ได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น นอกจากนี้การย่อยด้วยเอนไซม์สามารถเพิ่มคุณสมบัติเชิงหน้าที่ในอาหาร สามารถใช้เป็นสารเติมแต่งที่ปลอดภัยและมีคุณค่าทางโภชนาการในอุตสาหกรรมอาหาร [39]

การย่อยด้วยกระบวนการหมักโดยใช้จุลินทรีย์ได้แก่ การหมักชีวมวลสาหร่ายสไปรูลินาโดยใช้เซลล์ยีสต์ 3 สายพันธุ์พบว่าน้ำหนักโมเลกุลของโปรตีนลดลงหลังการหมักเป็นเวลา 48 ชั่วโมง และพบแถบโปรตีนที่มีขนาดต่ำกว่า 10 กิโลดาลตันเมื่อเทียบกับชุดควบคุมซึ่งน้ำหนักโมเลกุลในช่วงนี้เป็นเปปไทด์ที่ออกฤทธิ์ทางชีวภาพ นอกจากนี้ยังพบกรดอะมิโนกลูตามิก เมไทโอนีน โลซีน ไอโซลิวซีนและวาเลีน เพิ่มขึ้นอย่างเด่นชัดเมื่อเทียบกับตัวอย่างที่ไม่ผ่านกระบวนการหมัก [40]

4. คุณสมบัติเชิงสุขภาพของโปรตีนไฮโดรไลสจากสาหร่ายสไปรูลินา

เปปไทด์บางชนิดที่พบในโปรตีนไฮโดรไลสสามารถออกฤทธิ์โดยทำหน้าที่เป็นสารสื่อประสาท ฮอริโมน ยาปฏิชีวนะบางชนิดสามารถเปลี่ยนสรีรวิทยาเพื่อจับกับตัวรับเฉพาะของเซลล์เป้าหมาย ด้วยคุณสมบัติเหล่านี้เองจึงเป็นประโยชน์ต่อสุขภาพและลดความเสี่ยงของโรคได้ [15] ปัจจุบันมีการรายงานถึงคุณสมบัติเชิงสุขภาพของโปรตีนไฮโดรไลสจากสาหร่ายสไปรูลินา โดยเฉพาะเปปไทด์ที่มีฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ เปปไทด์กลุ่มนี้มักจะมีน้ำหนักโมเลกุลต่ำ (0-3 กิโลดาลตัน) [41] เช่น เปปไทด์ที่มีลำดับ PNN ขนาด 343.15 ดาลตัน พบว่าสามารถต้านอนุมูลอิสระด้วยวิธี 1,1- diphenyl-2-picrylhydrazyl (DPPH) ได้ถึงร้อยละ 81.44 ± 0.43 ที่ความเข้มข้น 100 ไมโครกรัมต่อมิลลิกรัม ซึ่งเทียบเท่ากับกิจกรรมต้านอนุมูลอิสระของกลูตาไธโอน (ร้อยละ 82.63 ± 0.56) [42] อีกทั้งคุณสมบัติการออกฤทธิ์ที่โดดเด่นของโปรตีนจากสาหร่ายสไปรูลินาคือศักยภาพในการลดความดันโลหิต โดยเน้นที่การยับยั้งเอนไซม์ ACE รายงานของ Zhang, Li [43] ได้พบเปปไทด์ชนิดใหม่ที่ยับยั้ง ACE เพิ่มอีก 2 ชนิด โดยมีลำดับกรดอะมิโนคือ VTY และ LGVP ให้ค่า IC₅₀ เท่ากับ 23.39 ไมโครโมลาร์ และ 45.76 ไมโครโมลาร์ ตามลำดับ นอกจากนี้เปปไทด์จากสาหร่ายสไปรูลินายังมีฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรีย เช่น *Escherichia coli* และ *Staphylococcus aureus* โดยยับยั้งที่ความเข้มข้นขั้นต่ำ 8 และ 16 มิลลิกรัมต่อมิลลิกรัม ตามลำดับ [44] ที่น่าสนใจคือสาหร่ายสไปรูลินามีเปปไทด์ 5 ชนิด ที่สามารถต้านไวรัสโคโรนาสายพันธุ์ใหม่ 2019 โดยสามารถจับกับโปรตีนแอนติเจนส่วนหนามของไวรัสได้ [45]

การเลือกใช้เอนไซม์ในการย่อยเป็นปัจจัยที่มีผลต่อการออกฤทธิ์ของโปรตีนไฮโดรไลส จากการเปรียบเทียบการยับยั้งเซลล์มะเร็ง 5 ชนิด (HepG-2 MCF-7 SGC-7901 A549 และ HT-29) พบว่าโปรตีนที่ย่อยด้วยเอนไซม์ปาเปนแสดงฤทธิ์การยับยั้งเซลล์มะเร็ง A549 (เซลล์มะเร็งปอด) สูงสุด [46] นอกจากนี้คุณสมบัติการต้านการอักเสบของเปปไทด์ที่ได้จากการย่อยด้วยเอนไซม์ซีเอสทีเอส พบว่าเนื้อเยื่อที่อักเสบในลำไส้ของหนูมีการสร้างเนื้อเยื่อและเยื่อลำไส้อย่างสมบูรณ์ในระหว่างการทดสอบที่ความเข้มข้นเปปไทด์เท่ากับ 3.8 มิลลิกรัมต่อกิโลกรัม [47] การออกฤทธิ์ที่น่าสนใจสำหรับผู้บริโภคในกลุ่มที่ลดน้ำหนักและรักษารูปร่างคือฤทธิ์การต้านโรคอ้วน จากการศึกษาผลการต้านโรคอ้วนในหนูของ Bingli, Cui [48] พบว่าโปรตีนจากสาหร่ายสไปรูลินามีฤทธิ์ในการลดระดับน้ำตาลในเลือดและระดับคอเลสเตอรอลโดยรวมโดยการปรับการแสดงออกระดับยีนที่สำคัญ ได้แก่ *Acadm Retn Fabp4 Ppard* และ *Slc27a1* เป็นต้น ยีนเหล่านี้พบในสมองและตับโดยมีความเกี่ยวข้องกับเมแทบอลิซึมของไขมัน นอกจากการลดน้ำหนักโดยไม่เกิดผลเสียต่อร่างกายแล้วยังสามารถลดความเสี่ยงของโรคเรื้อรังที่เป็นผลข้างเคียงจากโรคอ้วน เช่น เบาหวาน ไขมันอุดตันเส้นเลือด เป็นต้น การออกฤทธิ์ที่เหมาะสมสำหรับผู้บริโภคสูงวัยหรือผู้มีปัญหาเกี่ยวกับกล้ามเนื้อคือการออกฤทธิ์ในการยับยั้งกล้ามเนื้อฝ่อ ตัวอย่างการฝ่อของกล้ามเนื้อที่สาเหตุมาจากเดกซามิโทโซน (DEX) โดยการศึกษาในเซลล์ C2C12 พบว่าโปรตีนไฮโดรไลสจากสาหร่ายสไปรูลินาสามารถยับยั้ง mRNA



และลดการสร้างโปรตีนของยีน Atrogin-1 และ MuRF1 ที่ถูกกระตุ้นจาก DEX ซึ่งเป็นกลไกที่เกี่ยวข้องกับการฝ่อของกล้ามเนื้อ [49]

5. คุณสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนไฮโดรไลสได้จากสาหร่าย

คุณสมบัติเชิงหน้าที่ในอาหารของโปรตีนคือ การทำงานของโปรตีนในอาหารระหว่างกระบวนการแปรรูป การเก็บรักษาและการบริโภค โดยคุณสมบัติของโปรตีน เช่น การเกิดอิมัลชัน การเกิดฟอง การเกิดเจล ความหนืด การจับกับน้ำและน้ำมันและคุณสมบัติการละลาย เป็นต้น การทำโปรตีนไฮโดรไลสได้รับการพิสูจน์แล้วว่าสามารถเพิ่มคุณสมบัติเชิงหน้าที่ของโปรตีนได้ [4] โดยมีรายละเอียดกรณีศึกษาดังตารางที่ 3

5.1 คุณสมบัติการละลาย

ความสามารถในการละลายหมายถึง การจัดเรียงหมู่ที่มีขั้วและไม่มีขั้วของโปรตีน ทำให้โปรตีนมีปฏิกิริยากับโมเลกุลของน้ำยังคงอยู่ในรูปสารละลาย [50] ความสามารถในการละลายถือว่ามีความสำคัญที่สุดเนื่องจากสามารถส่งผลต่อคุณสมบัติอื่นได้ เช่น การเกิดโฟม การเกิดอิมัลชัน เป็นต้น จึงเป็นตัวบ่งชี้ถึงคุณสมบัติโดยรวมที่ดีของโปรตีน [4] สาหร่ายสไปรูลินาที่ผ่านการย่อยด้วยเอนไซม์อัลคาเลสมีความสามารถในการละลายช่วง pH 4-11 โดยโปรตีนไฮโดรไลสมีความสามารถในการละลายได้ดีในช่วง pH เป็นต่าง เช่น ที่ pH 4 มีความสามารถในการละลายร้อยละ 5 และเพิ่มขึ้นเป็นร้อยละ 54 ที่ pH เป็นต่าง [2, 51-52]

5.2 คุณสมบัติการจับกับน้ำและไขมัน

ความสามารถในการอุ้มน้ำ (water-holding capacity, WHC) คือปริมาณน้ำที่ถูกดูดซึมโดยพอลิเมอร์ในอาหาร เช่น คาร์โบไฮเดรตและโปรตีนที่ไม่ละลาย ซึ่งส่งผลต่อปริมาณกรดอะมิโน pH อุณหภูมิ และความเข้มข้นของโปรตีน ส่วนความสามารถในการอุ้มน้ำมัน (oil-holding capacity, OHC) มีความเกี่ยวข้องกับความคงตัวและความสามารถในการจับไขมันได้ดีหรือไม่ขึ้นอยู่กับปริมาณกรดอะมิโนที่มีขั้วหรือชอบน้ำในสายโซ่ของโปรตีน [50] จากการย่อยสาหร่ายสไปรูลินาด้วยเอนไซม์ชนิดต่าง ๆ ได้แก่ อัลคาเลส ทริปซิน แพนครีเอตินและเปปซินพบว่าความสามารถในการอุ้มน้ำอยู่ในช่วง 1.2 - 5.4 กรัมของน้ำหนักน้ำต่อโปรตีนหนึ่งกรัม และความสามารถในการอุ้มน้ำมันอยู่ในช่วง 5.3 - 7 กรัมของน้ำหนักน้ำมันต่อโปรตีนหนึ่งกรัม [2]

5.3 คุณสมบัติการเกิดอิมัลชัน

ความสามารถในการเกิดอิมัลชัน คือความเป็นอิมัลซิไฟเออร์ของโปรตีนไฮโดรไลส ช่วยในการจับกับพื้นผิวของน้ำและน้ำมันทำให้เกิดการรวมกัน โดยปัจจัยที่สำคัญในการเกิดอิมัลชันคือ อัตราส่วนของกรดอะมิโนที่ชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ และโครงสร้างทุติยภูมิของโปรตีน [50] การย่อยโปรตีนจากสาหร่ายสไปรูลินาด้วยเปปซินมีคุณสมบัติการเกิดอิมัลชันสูงกว่าการย่อยด้วยเอนไซม์แพนครีเอติน พบว่ามีค่าดัชนีการเกิดอิมัลชันจากการย่อยด้วยเปปซินเท่ากับ 35 ตารางเมตรต่อกรัม และความคงตัวร้อยละ 75 ในขณะที่การย่อยด้วยแพนครีเอตินมีค่าดัชนีการเกิดอิมัลชันเท่ากับ 25 ตารางเมตรต่อกรัม และความคงตัวร้อยละ 35 ตามลำดับ [39]

5.4 คุณสมบัติการเกิดโฟม

กลไกการเกิดฟองหรือโฟมเกิดจากการลดแรงตึงผิวของของเหลวโดยแผ่โครงสร้างห่อหุ้มอากาศไว้ คุณสมบัตินี้มีความสำคัญโดยตรงกับเนื้อสัมผัสและรูปลักษณ์ของอาหาร ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดฟองคือ ความเป็นไฮโดรโฟบิกของโปรตีน โดยเฉพาะการมีหมู่ไทออลและกรดอะมิโนที่ไม่ชอบน้ำ [50] โปรตีนจากสาหร่ายสไปรูลินาที่ย่อยด้วยเอนไซม์ชนิดต่าง ๆ ได้แก่ อัลคาเลส ทริปซิน แพนครีเอตินและเปปซิน พบว่าเอนไซม์เปปซินส่งผลให้โปรตีนไฮโดรไลสมีคุณสมบัติการเกิดโฟมสูงสุดและมีค่าความคงตัวของโฟมสูงสุดที่ค่า pH 3 และมีค่าลดลงตามลำดับเมื่อมีค่า pH ที่เพิ่มขึ้น [2]

5.5 คุณสมบัติการเกิดเจล

คือความสามารถในการก่อตัวเป็นเจลของโปรตีน เกิดจากการสร้างพันธะใหม่จากการเสียสภาพของโปรตีนด้วยพันธะไดซัลไฟด์ ซึ่งไม่สามารถคืนสภาพได้ ปัจจัยที่ส่งผลต่อการเกิดเจลคือ ความเข้มข้นของโปรตีน ค่า pH การแปรรูป เป็นต้น [50]



ตารางที่ 3 กระบวนการเตรียมโปรตีนไฮโดรไลสได้จากสาหร่ายสไปรูลินา คุณสมบัติเชิงหน้าที่ และการประยุกต์ใช้

สาหร่าย	ผลิตภัณฑ์	ปัจจัย/กระบวนการ	โปรตีนไฮโดรไลส	คุณสมบัติเชิงหน้าที่	เอกสารอ้างอิง
<i>Spirulina platensis</i>	โปรตีนไฮโดรไลส	- ย่อยด้วยเอนไซม์เปปซิน อัตราส่วนน้ำหนักเอนไซม์ต่อซับสเตรตร้อยละ 6, pH 2, ที่ 37 องศาเซลเซียส - ย่อยด้วยเอนไซม์แพนครีเอติน อัตราส่วนน้ำหนักเอนไซม์ต่อซับสเตรตร้อยละ 2.5, pH 7.4, ที่ 37 องศาเซลเซียส เวลาการย่อย = 240 นาที	ระดับการย่อยสลาย (ร้อยละ) - เปปซิน ร้อยละ 16 - แพนครีเอตินร้อยละ 11 กรดอะมิโนรวม - เปปซินร้อยละ 67 - แพนครีเอตินร้อยละ 55 น้ำหนักโมเลกุลน้อยกว่า 10 กิโลดาลตัน ในโปรตีนไฮโดรไลสได้จากทั้งสองเอนไซม์	การทนความร้อน - เปปซิน ร้อยละ 99.7 - แพนครีเอติน ร้อยละ 98.2 คุณสมบัติการเกิดอิมัลชัน ดัชนีกิจกรรมอิมัลชัน: - เปปซิน 35 ตร.ม./ก - แพนครีเอติน 25 ตร.ม./ก ความคงตัวของอิมัลชัน: - เปปซินร้อยละ 75 - แพนครีเอตินร้อยละ 35 ความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องที่ค่า pH 5-9	[39]
<i>Spirulina sp. LEB 18</i>	โปรตีนไฮโดรไลส	ย่อยด้วยเอนไซม์ - อัลคาเลส pH 8 - ทริปซิน pH 8 - แพนครีเอติน pH 8 - เปปซิน pH 2 อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส ยกเว้น อัลคาเลส 50 องศาเซลเซียส อัตราส่วนน้ำหนักเอนไซม์ต่อซับสเตรตร้อยละ 2 เก็บตัวอย่าง ณ เวลา : 30, 60, 120 และ 180 นาที	ระดับการย่อยสลาย -อัลคาเลสร้อยละ 42.4 -แพนครีเอตินร้อยละ 47.1 -ทริปซินร้อยละ 44.3 -เปปซินร้อยละ 37.2 กรดอะมิโน (ยกตัวอย่างการย่อยด้วยอัลคาเลส) - กรดอะมิโนจำเป็นร้อยละ 30 - กรดอะมิโนไม่ชอบน้ำร้อยละ 44 - กรดกลุ่มอะมิโนด้านอนุโมลอิสระร้อยละ 17	การย่อยด้วยอัลคาเลส: มีความสามารถในการละลายอยู่ในช่วง pH 5-11 คุณสมบัติการเกิดอิมัลชัน ดัชนีกิจกรรมอิมัลชันที่ค่า pH 7 มีค่า เท่ากับ 75 ตร.ม./ก โดยประมาณ ความคงตัวของอิมัลชัน ที่ pH 7 มีค่าเท่ากับร้อยละ 75 โดยประมาณ ความสามารถในการอ้วนน้ำอยู่ในช่วง 1.2-5.4 กรัมของน้ำหนักน้ำต่อโปรตีนหนึ่งกรัม ความสามารถในการอ้วนน้ำมันอยู่ในช่วง 5.3-7 กรัมของน้ำหนักน้ำมันต่อโปรตีนหนึ่งกรัม	[2]
<i>Arthrospira platensis</i>	โปรตีนไฮโดรไลส	ปรับสภาพชีวมวลสาหร่ายด้วยคลื่นเสียงอัลตราโซนิกก่อนการย่อย 10 - 40 นาที และย่อยด้วยเอนไซม์อัลคาเลส (pH 8) อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส อัตราส่วนน้ำหนักเอนไซม์ต่อซับสเตรต ร้อยละ 2 เป็นเวลา 30 - 120 นาที	ระดับการย่อยสลาย ร้อยละ 41.9 ปริมาณกรดอะมิโน - กรดอะมิโนไม่ชอบน้ำร้อยละ 34.8 - กรดอะมิโนด้านอนุโมลอิสระ ร้อยละ 54.7	ความสามารถในการละลายเพิ่มขึ้นจากร้อยละ 5 ที่ pH 4 และเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องจนสูงสุดถึงร้อยละ 54 ที่ค่า pH เป็นต่าง ความสามารถในการอ้วนน้ำเท่ากับ 5.2 กรัมของน้ำหนักน้ำต่อโปรตีนหนึ่งกรัม ความสามารถในการอ้วนน้ำมันเท่ากับ 7 กรัมของน้ำหนักน้ำมันต่อโปรตีนหนึ่งกรัม	[51]



สาหร่าย	ผลิตภัณฑ์	ปัจจัย/กระบวนการ	โปรตีนไฮโดรไลเสต	คุณสมบัติเชิงหน้าที่	เอกสารอ้างอิง
<i>Spirulina</i> <i>sp. LEB 18</i>	ขนมอบกรอบ	ย่อยด้วยเอนไซม์โปรตีเอส pH 9.5 ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 ชั่วโมง จากนั้นกรองแยกขนาดด้วย อัลตราเมมเบรน 4 กิโลดาลตัน	ความเข้มข้นโปรตีน - โปรตีนไฮโดรไลเสต 14 กรัม ต่อลิตร - เพปไทด์ขนาด >4 กิโลดาลตัน 16.3 กรัมต่อลิตร - เพปไทด์ขนาด <4 กิโลดาลตัน 9.4 กรัมต่อลิตร	การทนความร้อน - โปรตีนไฮโดรไลเสต = 102 องศาเซลเซียส - เพปไทด์ขนาด >4 กิโลดาลตัน = 102 องศาเซลเซียส - เพปไทด์ขนาด <4 กิโลดาลตัน = 141 องศาเซลเซียส	[7]
		ตัวอย่างขนมอบกรอบ - เติมโปรตีนที่ไม่ผ่านการย่อย - เติมเพปไทด์ขนาดใหญ่กว่า 4 กิโลดาลตัน - เติมเพปไทด์ขนาดเล็กกว่า 4 กิโลดาลตัน		กิจกรรมการยับยั้งอนุมูลอิสระของขนมอบกรอบ การเติมเพปไทด์ขนาด <4 กิโลดาลตัน มีกิจกรรมยับยั้ง ABTS radical สูงสุด (7.45 ไมโครโมล. TEAC/กรัม)	
<i>Spirulina</i> <i>platensis</i>	ขนมปัง	ย่อยด้วยเอนไซม์อัลคาเลส pH 8 ที่อุณหภูมิ 37 องศาเซลเซียส อัตราส่วนน้ำหนักร่อนโซลต่อซับสเตรต ร้อยละ 2 เก็บตัวอย่าง ณ เวลา : 30, 60, 90, 120 และ 180 นาที	ระดับการย่อยสลาย ร้อยละ 47.87 กรดอะมิโน - กรดอะมิโนไม่ชอบน้ำร้อยละ 43.6 - กรดอะมิโนด้านอนุมูลอิสระ ร้อยละ 15.6 - กรดอะมิโนรสขมร้อยละ 34.3	ความชื้น: ขนมปังที่เติมเพปไทด์บริสุทธิ์ 1 กรัม ร้อยละ 51.3 ซึ่งมีค่าความชื้นสูงกว่าตัวควบคุม ร้อยละ 9 อย่างไรก็ตาม ค่าความชื้นลดลงเหลือร้อยละ 32.9 ในขนมปังที่เติมโปรตีนไฮโดรไลเสตที่ห่อหุ้มร้อยละ 4	[12]
		ตัวอย่างขนมปังที่เติม -เพปไทด์บริสุทธิ์ ร้อยละ 1 -เพปไทด์ที่ห่อหุ้ม ร้อยละ 1 -เพปไทด์ที่ห่อหุ้ม ร้อยละ 2 -เพปไทด์ที่ห่อหุ้ม ร้อยละ 4 (ห่อหุ้มด้วยมอลโตเด็คตริน-WPC)		กิจกรรมด้านอนุมูลอิสระของขนมปัง: การเติมโปรตีนไฮโดรไลเสตที่ห่อหุ้มร้อยละ 4 ให้ค่าการยับยั้ง DPPH และ ABTS สูงกว่าตัวอย่างควบคุม 4 เท่า และร้อยละ 35 ตามลำดับ	
<i>Spirulina</i> <i>platensis</i>	เพปไทด์ที่ให้รสชาติอูมามิ	-ย่อยทางเคมีโดยใช้กรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 3 โมลาร์ อัตราส่วนปริมาตรต่อชีวมวล 1:5 ที่ อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส หลังการย่อยทำให้เป็นกลางโดยใช้โซเดียมไฮดรอกไซด์เข้มข้น 3 โมลาร์ และคัดแยกขนาดการกรองโดยใช้ อัลตราเมมเบรนขนาด <3000 ดาลตัน	เพปไทด์ที่ละลายน้ำรวม - ขนาด <3,000 ดาลตัน 2.06 มก./มล. - ขนาด >3,000 ดาลตัน 2.42 มก./มล. ระดับการเจือจางที่บ่งบอกรสชาติอูมามิ - ขนาด <3,000 ดาลตัน = 1024 - ขนาด >3,000 ดาลตัน = 256	เพปไทด์รสชาติอูมามิ ประกอบด้วยกรดอะมิโนและกรดแอล-กลูตามิกอิสระที่ความเข้มข้นสูง รสชาติ อูมามิ สามารถนำไปประยุกต์ใช้กับผลิตภัณฑ์จากเนื้อสัตว์ พาสต้า ปิสกิต และผลิตภัณฑ์ขนมอัดขึ้นรูปได้	[38]
<i>Spirulina</i> <i>platensis</i>	โปรตีนไฮโดรไลเสต	ย่อยด้วยเอนไซม์อัลคาเลส pH 8 ที่อุณหภูมิ 45 องศา	ระดับการย่อยสลาย - ชั่วโมงที่ 2 ร้อยละ 4	ความสามารถในการละลาย	[53]



สาหร่าย	ผลิตภัณฑ์	ปัจจัย/กระบวนการ	โปรตีนไฮโดรไลเสต	คุณสมบัติเชิงหน้าที่	เอกสารอ้างอิง
		เซลเซียส อัตราส่วนน้ำหนัก เอนไซม์ต่อซับสเตรตร้อยละ 2 เก็บตัวอย่าง ณ เวลา : 2, 4, 6, 8, 10 และ 12 ชั่วโมง	- ชั่วโมงที่ 10 ร้อยละ 14 น้ำหนักโมเลกุล : น้ำหนักโปรตีนส่วนใหญ่อยู่ ในช่วง 15-20 กิโลดาลตัน และในช่วง 37-50 กิโลดาลตัน	ทั้งระดับการย่อยร้อยละ 4 และ 14 พบว่าสามารถละลาย ได้ดีที่สุดที่ pH 4 และละลาย ได้สูงสุดที่ pH 8 ความสามารถ ในการละลาย ของระดับการย่อยร้อยละ 14 ดีกว่าร้อยละ 4 คุณสมบัติการเกิดอิมัลชัน ดัชนีกิจกรรมอิมัลชันที่ค่า pH 9 - ร้อยละ 4 = 45.73 ตม./ก - ร้อยละ 14 = 46.9 ตม./ก ความคงตัวของอิมัลชัน ที่ pH 7 - ร้อยละ 4 = 23.13 นาที - ร้อยละ 14 = 22.4 นาที	
<i>Spirulina platensis</i>	โปรตีนไฮโดรไลเสตที่ ห่อหุ้มด้วยนาโนไลโปโซม	ย่อยด้วยเอนไซม์อัลคาเลส pH 8 ที่อุณหภูมิ 45 องศา เซลเซียส น้ำหนักเอนไซม์ต่อ ซับสเตรตร้อยละ 2 เวลาที่ใช้ในการย่อย 10 ชั่วโมง การห่อหุ้มลงในแคปซูล : - ไคโตซานหุ้มนาโนไลโปโซม ร้อยละ 0.5 - ไคโตซานหุ้มนาโนไลโปโซม ร้อยละ 1	ระดับการย่อยสลาย ร้อยละ 14% ประสิทธิภาพการห่อหุ้ม : - ไคโตซาน (0.5) = ร้อยละ 84.70 - ไคโตซาน (1) = ร้อยละ 73.10 ขนาดนาโนไลโปโซม : - ไคโตซาน (0.5) = 552 นาโน เมตร - ไคโตซาน (1) = 644 นาโน เมตร	ความคงตัวของเหลวทางเดิน อาหารจำลอง : ศักย์ไฟฟ้าซีตา (มิลลิโวลต์) - ไคโตซาน (0.5) = 13.26 มิลลิโวลต์ - ไคโตซาน (1) = 14.00 ดัชนีการกระจายของน้ำหนัก โมเลกุล (PDI) - ไคโตซาน (0.5) = 0.30 - ไคโตซาน (1) = 0.27	[54]
<i>Spirulina sp. LEB 18</i>	โปรตีนไฮโดรไลเสต	ย่อยโดยใช้ Proteomax 580 L pH 9.5 ที่อุณหภูมิ 60 องศาเซลเซียส	ระดับการย่อยสลาย - ต่ำสุด = ร้อยละ 38.0 - สูงสุด = ร้อยละ 62.8 เพปไทด์มีขนาดโมเลกุลขนาด เล็กกว่า 20 กิโลดาลตัน	ความสามารถในการละลาย ละลายได้ดีที่สุดที่ pH 3 และ 5 และเพิ่มขึ้นที่ pH เป็นต่าง โดยความสามารถในการ ละลายสูงสุดเท่ากับร้อยละ 81 ความสามารถในการอุ้มน้ำ = 3-3.5 กรัมของน้ำหนักน้ำต่อ โปรตีนหนึ่งกรัม	[52]
<i>Arthrospira platensis</i>	โปรตีนไฮโดรไลเสตที่ ห่อหุ้มด้วยไมโครแคปซูล	ย่อยโดยใช้เอนไซม์ promod 184 MDP pH 7 ที่อุณหภูมิ 55 องศาเซลเซียส อัตราส่วน น้ำหนักเอนไซม์ต่อซับสเตรต	ปริมาณโปรตีน : ผงสปิริูลินาและโปรตีน ไฮโดรไลเสตที่ไม่มีการห่อหุ้ม แคปซูล = ร้อยละ 67.33 และ 64.71 ตามลำดับ	ความสามารถในการละลาย ตัวอย่าง ESP-MD1:4 มี ความสามารถในการละลาย สูงสุด (ร้อยละ 83) ตามด้วย SP-MD1:2 (ร้อยละ 79.28)	[55]



สาหร่าย	ผลิตภัณฑ์	ปัจจัย/กระบวนการ	โปรตีนไฮโดรไลเสต	คุณสมบัติเชิงหน้าที่	เอกสารอ้างอิง
	ร้อยละ 2 ใช้เวลา 60 นาทีใน			การย่อยได้ของโปรตีน	
	การย่อย			ค่าการย่อยได้สูงสุดคือร้อยละ	
	ปัจจัยการห่อหุ้ม:			90.12 และ 84.23 จาก	
	E = Enzymatic treat			ตัวอย่าง ESP-MD1:2 และ	
	SP = <i>Spirulina</i>			ESP-MDGA1:2 ตามลำดับ	
	MD = Maltodextrin				
	GA = Gum Arabic				
	MDGA = Moltodextrin +				
	Gum Arabic (1:1)				
	อัตราส่วนการห่อหุ้ม				
	(SP:MD/GA/MDGA)				
	1:2 และ 1:4				

6. การประยุกต์ใช้โปรตีนไฮโดรไลเสตจากสาหร่ายสไปรูลินา

การเตรียมโปรตีนไฮโดรไลเสตเป็นวิธีการเสริมศักยภาพในด้านคุณสมบัติเชิงสุขภาพและคุณสมบัติเชิงหน้าที่ในอาหารของโปรตีน จากการที่สาหร่ายสไปรูลินาอุดมไปด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ จึงเริ่มเป็นที่สนใจจากนักวิจัยและผู้ผลิตอาหารในการใช้โปรตีนจากสาหร่ายสไปรูลินาเพื่อผลิตโปรตีนไฮโดรไลเสตและใช้เป็นส่วนผสมในผลิตภัณฑ์อาหารและเครื่องดื่มเพื่อสุขภาพ [2] ในปัจจุบันมีผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิดที่มีส่วนผสมของผงสาหร่ายสไปรูลินาและประสบความสำเร็จในเชิงพาณิชย์ ผลิตภัณฑ์ที่มีส่วนผสมของสาหร่ายสไปรูลินาในระดับอุตสาหกรรมอาหาร เช่น โยเกิร์ต ไอศกรีม ขนมปัง พาสตา เป็นต้น [56] ซึ่งส่วนใหญ่มักใช้ผงสาหร่ายหรือผงโปรตีนเป็นส่วนประกอบ ส่วนการใช้โปรตีนไฮโดรไลเสต จากสาหร่ายสไปรูลินาในผลิตภัณฑ์อาหารยังมีให้เห็นไม่มากนัก บางส่วนอาจยังอยู่ในกระบวนการคิดค้นและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร อย่างไรก็ตามคาดว่าจะมีความนิยมในการประยุกต์ใช้เพิ่มมากขึ้นในอนาคต

นวัตกรรมการห่อหุ้มเพปไทด์ที่ออกฤทธิ์ทางชีวภาพด้วยไมโครหรือนาโนแคปซูลถือเป็นอีกวิธีการที่สามารถป้องกันเพปไทด์จากการถูกทำลายระหว่างที่อยู่ในระบบทางเดินอาหาร ซึ่งเป็นประโยชน์สำหรับการนำไปประยุกต์ใช้ในด้านอาหารหลายประเภทได้ [57] จากรายงานการใช้งานโนโลโพลิโพรพิลีนขนาด 348.33 นาโนเมตร หุ้มด้วยไคโตซานร้อยละ 0.5 และร้อยละ 1 ทำให้นาโนโพลิโพรพิลีนขนาด 552 นาโนเมตร และ 644 นาโนเมตร ตามลำดับ เมื่อทดสอบความคงตัวของนาโนแคปซูลในระบบทางเดินอาหาร พบว่านาโนโพลิโพรพิลีนที่หุ้มด้วยไคโตซานร้อยละ 1 มีความคงตัวสูงสุด แต่อัตราการปลดปล่อยโปรตีนจากนาโนโพลิโพรพิลีนต่ำสุด ทั้งนี้อัตราการปลดปล่อยโปรตีนจะเพิ่มขึ้นตามเวลาที่สัมผัสกับของเหลวในระบบทางเดินอาหาร [54]

นอกจากนี้แนวโน้มการวิจัยในปัจจุบันคือ คุณสมบัติเชิงสุขภาพของเพปไทด์ที่ได้จากโปรตีนไฮโดรไลเสตเพื่อประยุกต์ใช้ในทางการแพทย์ เคมี เครื่องสำอาง เกษษกรรมและอุตสาหกรรมอาหารเสริมได้ ทั้งในรูปแบบอาหารเสริม (ผง เม็ด แคปซูล) หรือในรูปแบบของการดัดแปลงให้เข้ากับผลิตภัณฑ์โดยใช้ไมโครแคปซูล เป็นต้น [1, 56] อย่างไรก็ตามโดยทั่วไปแล้วในผลิตภัณฑ์อาหารมักนิยมใช้สาหร่ายสไปรูลินาเป็นส่วนผสมเพื่อให้เกิดสีที่ต้องการ หรือใช้ประโยชน์ของสาหร่ายสไปรูลินาเป็นจุดขายของผลิตภัณฑ์ แต่ความเข้มข้นที่ผสมลงไปค่อนข้างต่ำ ทั้งนี้มีสาเหตุมาจากปัจจัยต่างๆ เช่น 1) ต้นทุนการผลิตที่ค่อนข้างสูง 2) ปริมาณการสั่งซื้อต่ำกว่าส่วนผสมอื่นๆ 3) กลิ่นและรสชาติ และ 4) ข้อจำกัดของความรู้ผู้บริโภคในเรื่องประโยชน์ของสาหร่ายสไปรูลินา [56]



บทสรุป

โปรตีนจากสาหร่ายสไปรูลินามีคุณประโยชน์ต่อสุขภาพหลายประการ และคุณค่าทางโภชนาการที่ได้จากสาหร่ายสไปรูลินามีความคุ้มค่าสำหรับการศึกษาเพื่อให้การรับประทานสาหร่ายสไปรูลินาเกิดประโยชน์สูงสุด การเตรียมโปรตีนไฮโดรไลเสตถือเป็นอีกวิธีที่สามารถเพิ่มมูลค่าให้กับสาหร่ายสไปรูลินาได้ นอกจากสามารถปรับปรุงคุณสมบัติที่ส่งผลดีต่อสุขภาพแล้วการแปรรูปอาหารในระดับอุตสาหกรรมโดยโปรตีนไฮโดรไลเสตจากสาหร่ายเป็นวัตถุดิบสามารถสร้างจุดเด่นให้กับผลิตภัณฑ์อาหารนั้นได้ ถึงแม้ว่าต้นทุนการผลิตที่สูงและการขาดความเข้าใจในเรื่องประโยชน์จากสาหร่ายสไปรูลินาของผู้บริโภคยังคงเป็นข้อจำกัดที่ต้องได้รับการแก้ไข แต่ด้วยคุณประโยชน์ที่โดดเด่นและการศึกษาที่เปิดกว้างมากขึ้นในปัจจุบันทำให้สาหร่ายสไปรูลินามีแนวโน้มที่จะเป็นที่รู้จักมากขึ้นในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

1. Bortolini DG, Maciel GM, Fernandes IAA, Pedro AC, Rubio FTV, Branco IG, et al. Functional properties of bioactive compounds from *Spirulina* spp.: Current status and future trends. *Food Chem: Mol Sci* 2022;5:100134.
2. Akbarbaglu Z, Ayaseh A, Ghanbarzadeh B, Sarabandi K. Techno-functional, biological and structural properties of *Spirulina platensis* peptides from different proteases. *Algal Res* 2022;66:102755.
3. Nasri M. Chapter Four - Protein hydrolysates and biopeptides: production, biological activities, and applications in foods and health benefits. A review. *Adv Food Nutr Res*. 2017;81:109-59.
4. Liceaga A, Hall F. Nutritional, Functional and Bioactive Protein Hydrolysates. *Encyclo Food Chem*. 2019:456-64.
5. Aiello G, Li Y, Boschin G, Bollati C, Arnoldi A, Lammi C. Chemical and biological characterization of spirulina protein hydrolysates: Focus on ACE and DPP-IV activities modulation. *J Funct Foods* 2019;63:103592.
6. McCarthy AL, Callaghan YC, Brien NM. Protein Hydrolysates from agricultural crops—bioactivity and potential for functional food development. *Agriculture* 2013;3(1):112-30.
7. Silva PCd, Toledo T, Brião V, Bertolin TE, Costa JAV. Development of extruded snacks enriched by bioactive peptides from microalga *Spirulina* sp. *LEB 18. Food Biosci* 2021;42:101031.
8. Soni RA, Sudhakar K, Rana RS. *Spirulina* – From growth to nutritional product: A review. *Trends Food Sci* 2017;69:157-71.
9. Venkataraman LV. *Spirulina platensis* (*Arthrospira*): physiology, cell biology and biotechnology, edited by Avigad Vonshak. *J Appl Phycol* 1997;9(3):295-6.
10. Vo TS, Ngo DH, Kim SK. Chapter 19 - Nutritional and pharmaceutical properties of microalgal *Spirulina*. *Handbook of Marine Microalgae*. 2015:299-308.
11. AlFadhly NKZ, Alhelfi N, Altemimi AB, Verma DK, Cacciola F, Narayanankutty A. Trends and technological advancements in the possible food applications of *Spirulina* and their health benefits: A Review. *Molecules* 2022;27(17):5584.
12. Akbarbaglu Z, Ayaseh A, Ghanbarzadeh B, Sarabandi K. Biological stabilization of *Arthrospira* bioactive-peptides within biopolymers: Functional food formulation; bitterness-masking and nutritional aspects. *LWT* 2024;191:115653.



13. Matufi F, Choopani A. *Spirulina*, food of past, present and future. *Health Biotechnol Biopharm* 2020;3(4):1-20.
14. Li Y, Aiello G, Bollati C, Bartolomei M, Arnoldi A, Lammi C. Phycobiliproteins from *Arthrospira platensis* (*Spirulina*): A new source of peptides with dipeptidyl peptidase-IV inhibitory activity. *Nutrients* 2020;12(3):794.
15. Ovando CA, Carvalho JC, Pereira GVM, Jacques P, Soccol VT, Soccol CR. Functional properties and health benefits of bioactive peptides derived from *Spirulina*: A review. *Food Rev Int* 2018;34(1):34-51.
16. Adeyeye E, Ayeni S. Comparability of the amino acid composition of whole egg and two fancy meats (heart and liver) of domestic duck (*Anas platyrhynchos*) consumed in Nigeria. *OJACR* 2014;2(1):16-28.
17. Anaeto M, Adeyeye JA, Chioma G, Olanrinmoye A, Tayo O. Goat Products: Meeting the challenges of human health and nutrition. *Agric Biol J N Am* 2010;1(6):1231-6.
18. Gorissen SHM, Crombag JJR, Senden JMG, Waterval WAH, Bierau J, Verdijk LB, et al. Protein content and amino acid composition of commercially available plant-based protein isolates. *Amino Acids* 2018;50(12):1685-95.
19. Derbyshire E. Food-Based dietary guidelines and protein quality definitions-Time to move forward and encompass mycoprotein? *Foods* 2022;11(5):647.
20. Ward FM, Deyab MA. Comparative study of nutritional importance of some marine macroalgae as a novel natural source of amino acids. *Russ J Mar Biol* 2021;47:39-46.
21. Raczky M, Polanowska K, Kruszewski B, Grygier A, Michałowska D. Effect of *Spirulina* (*Arthrospira platensis*) supplementation on physical and chemical properties of semolina (*Triticum durum*) based fresh pasta. *Molecules* 2022;27(2):355.
22. Tiong I, Yeong ys, Jusoh M, Wahid E, Nagappan T. *Chlorella vulgaris* : a perspective on its potential for combining high biomass with high value bioproducts. *Appl Phycol* 2020;1(1):2-11.
23. Chatterjee C, Gleddie S, Xiao CW. Soybean bioactive peptides and their functional properties. *Nutrients* 2018;10(9):1211.
24. Helal A, Tagliazucchi D. Peptidomics profile, bioactive peptides identification and biological activities of six different cheese varieties. *Biology* 2023;12(1):78.
25. Abdel-Hamid M, Otte J, De Gobba C, Osman A, Hamad E. Angiotensin I-converting enzyme inhibitory activity and antioxidant capacity of bioactive peptides derived from enzymatic hydrolysis of buffalo milk proteins. *Int Dairy J* 2017;66:91-8.
26. Wang X, Chen H, Fu X, Li S, Wei J. A novel antioxidant and ACE inhibitory peptide from rice bran protein: Biochemical characterization and molecular docking study. *LWT* 2017;75:93-9.
27. Anekthanakul K, Senachak J, Hongsthong A, Charoonratana T, Ruengjitchatchawalya M. Natural ACE inhibitory peptides discovery from *Spirulina* (*Arthrospira platensis*) strain C1. *Peptides* 2019;118:170107.
28. Yan QJ, Huang LH, Sun Q, Jiang ZQ, Wu X. Isolation, identification and synthesis of four novel antioxidant peptides from rice residue protein hydrolyzed by multiple proteases. *Food Chem* 2015;179:290-5.



29. Bougatef A, Nedjar-Arroume N, Manni L, Ravallec R, Barkia A, Guillochon D, et al. Purification and identification of novel antioxidant peptides from enzymatic hydrolysates of sardinelle (*Sardinella aurita*) by-products proteins. Food Chem 2010;118(3):559-65.
30. Wang L, Dong C, Li X, Han W, Su X. Anticancer potential of bioactive peptides from animal sources (Review). Oncol Rep 2017;38(2):637-51.
31. Wang Z, Zhang X. Isolation and identification of anti-proliferative peptides from *Spirulina platensis* using three-step hydrolysis. J Sci Food Agric 2017;97(3):918-22.
32. Vo TS, Ngo DH, Kang KH, Park SJ, Kim SK. The role of peptides derived from *Spirulina maxima* in downregulation of Fc ϵ RI-mediated allergic responses. Mol Nutr Food Res 2014;58(11):2226-34.
33. Usharani G, Saranraj P, Kanchana D. Spirulina Cultivation: A Review. IJPBA. 2012;3(6):1327-41.
34. Ismail I, Kurnia KA, Samsuri S, Bilad MR, Marbelia L, Ismail NM, et al. Energy efficient harvesting of *Spirulina* sp. from the growth medium using a tilted panel membrane filtration. Bioresour Technol Rep 2021;15:100697.
35. Stunda-Zujeva A, Veġere K. Growing and drying *Spirulina/Arthrospira* for producing food and nutraceuticals: A Review. KEM 2018;762:134-40.
36. Stramarkou M, Papadaki S, Kyriakopoulou K, Tzovenis I, Chronis M, Krokida M. Comparative analysis of different drying techniques based on the qualitative characteristics of *Spirulina platensis* biomass. J Aquat Food Prod 2021;30(5):498-516.
37. Ashaolu TJ. Applications of soy protein hydrolysates in the emerging functional foods: A Review. Int J Food Sci Technol 2019;55(2):421-8.
38. Pratama AI, Lioe HN, Yuliana ND, Ogawa M. Umami compounds present in umami fraction of acid-hydrolyzed *Spirulina* (*Spirulina platensis*). Algal Res 2022;66:102764.
39. Mohammadi M, Soltanzadeh M, Ebrahimi AR, Hamishehkar H. *Spirulina platensis* protein hydrolysates: Techno-functional, nutritional and antioxidant properties. Algal Res 2022;65:102739.
40. Sahin B, Hosoglu MI, Guneser O, Karagul-Yuceer Y. Fermented *Spirulina* products with *Saccharomyces* and non- *Saccharomyces* yeasts: Special reference to their microbial, physico-chemical and sensory characterizations. Food Biosci 2022;47:101691.
41. Ma J, Zeng X, Zhou M, Cheng L, Ren D. Inhibitory effect of low-molecular-weight peptides (0–3 kDa) from *Spirulina platensis* on H₂O₂-induced oxidative damage in L02 human liver cells. Bioresour Bioprocess 2021;8(1):36.
42. Jie Y, Yuanliang H, Mingxiong X, Yaohao D, Shenao L, Nan P, et al. Purification and identification of antioxidant peptides from enzymatic hydrolysate of *Spirulina platensis*. J Microbiol Biotechnol 2016;26(7):1216-23.
43. Zhang N, Li F, Zhang T, Li C-Y, Zhu L, Yan S. Isolation, identification, and molecular docking analysis of novel ACE inhibitory peptides from *Spirulina platensis*. Eur Food Res Technol 2022;248(4):1107-15.
44. Sun Y, Chang R, Li Q, Li B. Isolation and characterization of an antibacterial peptide from protein hydrolysates of *Spirulina platensis*. Eur Food Res Technol 2016;242(5):685-92.



45. MubarakAli D, MohamedSaalis J, Sathya R, Irfan N, Kim JW. An evidence of microalgal peptides to target spike protein of COVID-19: In silico approach. *Microb Pathog* 2021;160:105189.
46. Wang Z, Zhang X. Inhibitory effects of small molecular peptides from *Spirulina (Arthrospira) platensis* on cancer cell growth. *Food Funct* 2016;7(2):781-8.
47. Moghadamzadegan S, Emtyazjoo M, Sadeghi M, Rabbani M. Evaluation of anti-inflammatory effects of bioactive peptides of *Spirulina platensis* extracted by animal cysteine protease enzyme in mice Balb/C. *J Anim Biol* 2021;13(4):119-32.
48. Bingli Z, Cui Y, Xiaodan F, Qi P, Liu C, Zhou X, et al. Anti-obesity effects of *Spirulina platensis* protein hydrolysate by modulating brain-liver axis in high-fat diet fed mice. *PLoS One* 2019;14(6):e0218543.
49. Lee C-W, Chang YB, Park CW, Han SH, Suh HJ, Ahn Y. Protein hydrolysate from *Spirulina platensis* prevents dexamethasone-induced muscle atrophy via Akt/Foxo3 signaling in C2C12 myotubes. *Mar Drugs* 2022;20(6):365.
50. Villaseñor VM, Enriquez-Vara JN, Urias-Silva JE, Mojica L. Edible Insects: Techno-functional properties food and feed applications and biological potential. *Food Rev Int* 2022;38(sup1):866-92.
51. Akbarbaglu Z, Ayaseh A, Ghanbarzadeh B, Sarabandi K, Kharazmi MS, Jafari SM. Chemical structure and bio-functional properties of *Arthrospira platensis* peptides produced by ultrasonication-enzymolysis: their emulsification capabilities. *Process Biochem* 2023;132:191-9.
52. Cristiane R, Pereira A, Costa JA. Biopeptides with antioxidant activity extracted from the biomass of *Spirulina* sp. LEB 18. *Afr J Microbiol Res* 2016;10(3):79-86.
53. Forutan M, Hasani M, Hasani S, Salehi N. Antioxidative activity and functional properties of enzymatic protein hydrolysate of *Spirulina platensis*. *J Food Biosci Technol* 2023;13(1):75-89.
54. Forutan M, Hasani M, Hasani S, Salehi N, Sabbagh F. Liposome system for encapsulation of *Spirulina platensis* protein hydrolysates: controlled-release in simulated gastrointestinal conditions, structural and functional Properties. *Materials* 2022;15(23):8581.
55. Maag P, Dirr S, Özmutlu Karslioglu Ö. Investigation of bioavailability and food-processing properties of *Arthrospira platensis* by enzymatic treatment and micro-encapsulation by spray drying. *Foods* 2022; 11(13):1922.
56. Villaró-Cos S, Guzmán Sánchez JL, Acién G, Lafarga T. Research trends and current requirements and challenges in the industrial production of *Spirulina* as a food source. *Trends Food Sci Technol* 2024;143:104280.
57. Mohammadi M, Hamishehkar H, McClements DJ, Shahvalizadeh R, Barri A. Encapsulation of *Spirulina* protein hydrolysates in liposomes: Impact on antioxidant activity and gastrointestinal behavior. *Food Chem* 2023;400:133973.



ผลของการสวมหน้ากากอนามัยที่มีต่อตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ SEIR สำหรับการแพร่ระบาดของโรคไข้หวัดใหญ่ตามฤดูกาลในกรุงเทพมหานคร

The Effect of Mask-Wearing on the SEIR Mathematical Model of Influenza with Seasons in Bangkok

จุฑารัตน์ โพธิ์หลวง และ ณัฐกาญจน์ นัมพัญ์วิวัฒน์*

สาขาวิชาคณิตศาสตร์ประยุกต์ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์
ในพระบรมราชูปถัมภ์ จังหวัดปทุมธานี ปทุมธานี 13180

Jutarat Pholuang and Nattakarn Numpanviwat*

Applied Mathematics Program, Faculty of Science and Technology, Valaya Alongkorn Rajabhat University
under the Royal Patronage Pathum Thani Province, Pathum Thani 13180

*Corresponding author: nattakarn.num@vru.ac.th

Received: 8 March 2024 / Revised: 13 May 2024/ Accepted: 16 May 2024

บทคัดย่อ

โรคไข้หวัดใหญ่เป็นการติดเชื้อไวรัสในระบบทางเดินหายใจอย่างเฉียบพลัน เชื้อไข้หวัดใหญ่สามารถแพร่กระจายได้อย่างรวดเร็วในพื้นที่ที่มีคนอยู่อย่างหนาแน่น โดยเชื้อไวรัสจะปนเปื้อนอยู่ในอากาศเมื่อผู้ป่วยไอหรือจาม งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและวิเคราะห์เสถียรภาพของตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์สำหรับการแพร่ระบาดของโรคไข้หวัดใหญ่ในกรุงเทพมหานคร และเปรียบเทียบผลของการสวมหน้ากากอนามัยที่มีต่อการแพร่ระบาดตามฤดูกาล ตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้คือตัวแบบ SEIR จากผลการศึกษาพบว่า เมื่ออัตราการสวมหน้ากากอนามัยป้องกันโรคไข้หวัดใหญ่ (ϕ) เพิ่มขึ้น ค่าระดับการติดเชื้อ (R_0) จะลดลง โดยเฉพาะเมื่ออัตราการสัมผัสเชื้อสูงหรือฤดูกาลที่มีการแพร่ระบาดของโรคสูง ได้แก่ ฤดูฝนและฤดูหนาว จะได้ค่า $R_0 > 1$ แสดงว่า มีการระบาดของโรคเกิดขึ้น การสวมหน้ากากอนามัยเพิ่มขึ้นจะทำให้จำนวนประชากรของกลุ่มติดเชื้อและสามารถแพร่เชื้อได้ (I) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญจนเข้าสู่จุดสมดุลที่มีการแพร่ระบาดของโรค และเมื่ออัตราการสัมผัสเชื้อต่ำหรือฤดูกาลที่มีการแพร่ระบาดของโรคต่ำ ได้แก่ ฤดูร้อน จะได้ค่า $R_0 < 1$ แสดงว่า ไม่มีการระบาดของโรคเกิดขึ้น การสวมหน้ากากอนามัยจึงไม่ส่งผลต่อการป้องกันของโรคไข้หวัดใหญ่

คำสำคัญ: โรคไข้หวัดใหญ่ ตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ การสวมหน้ากากอนามัย ฤดูกาลเกิดโรค ค่าระดับการติดเชื้อ

Abstract

Influenza is an acute respiratory infection caused by influenza viruses. Influenza can spread easily, with rapid transmission in crowded areas. When an infected person coughs or sneezes, droplets containing viruses are dispersed into the air. The objective of this research was to develop and analyze the stability of the mathematical model of influenza in Bangkok and compare the effect of mask-wearing for the transmission of disease with seasons. The mathematical model used in this research was the SEIR model. The results showed that when the mask-wearing rate (ϕ) increased, the basic reproduction number (R_0) decreased. Especially, when the transmission rate was high or in the rainy and winter seasons, then $R_0 > 1$ where the outbreak of the disease occurred. The increasing of mask-wearing rate would reduce the number of the infected individual (I) significantly. In addition, when the transmission rate was low or in the summer season, then $R_0 < 1$ where there was no outbreak of the disease occurred. The mask-wearing rate would not affect the spreading of the disease.

Keywords: Influenza, Mathematical model, Mask-wearing, Seasonal epidemics, Basic reproduction number

บทนำ

โรคไข้หวัดใหญ่ (Influenza: flu) เป็นการติดเชื้อไวรัสในระบบทางเดินหายใจอย่างเฉียบพลัน ลักษณะอาการที่สำคัญคือ มีไข้สูง ปวดศีรษะ ปวดเมื่อยกล้ามเนื้อ และอ่อนเพลีย เชื้อไวรัสไข้หวัดใหญ่ติดต่อทางการหายใจ โดยจะได้รับเชื้อที่ออกมาปนเปื้อนอยู่ในอากาศเมื่อผู้ป่วยไอ จาม หรือพูดในพื้นที่ที่มีคนอยู่รวมกันหนาแน่น นอกจากนี้การแพร่เชื้ออาจเกิดได้โดยการสัมผัสฝอยละอองน้ำมูก น้ำลายของผู้ป่วย จากมือที่สัมผัสกับพื้นผิวที่มีเชื้อไวรัสไข้หวัดใหญ่แล้วใช้มือมาสัมผัสที่จมูกและปาก โดยเชื้อไข้หวัดใหญ่มีระยะฟักตัวประมาณ 1 - 3 วัน โดยผู้ป่วยสามารถแพร่เชื้อได้ตั้งแต่ 1 วันก่อนมีอาการและจะแพร่เชื้อต่อไปอีก 3 - 5 วัน หลังจากมีอาการ สำหรับเด็กอาจแพร่เชื้อได้นานกว่า 7 วัน ส่วนใหญ่จะมีการระบาดในช่วงฤดูหนาวของทุกปีและพบผู้ป่วยโรคนี้ได้ตลอดทั้งปี [1] ซึ่งคนทั่วไปอาจคิดว่า โรคไข้หวัดใหญ่เป็นโรคที่ไม่อันตราย แต่ในความเป็นจริงแล้ว โรคไข้หวัดใหญ่อาจทำให้เกิดอาการแทรกซ้อนภายหลังการติดเชื้อจนถึงขั้นเสียชีวิตได้

องค์การอนามัยโลก (World Health Organization: WHO) พบว่า ในแต่ละปีจะมีผู้ป่วยโรคไข้หวัดใหญ่ทั่วโลกประมาณ 1,000 ล้านคน ในจำนวนนี้มีผู้ป่วยขั้นรุนแรงประมาณ 3 - 5 ล้านคน และเสียชีวิตประมาณ 290,000 - 650,000 คน และร้อยละ 99 ของผู้เสียชีวิตเป็นเด็กอายุต่ำกว่า 5 ปี [2] ซึ่งสถานการณ์ของโรคไข้หวัดใหญ่ในประเทศไทย พ.ศ. 2566 พบว่า มีรายงานผู้ป่วย 472,222 คน อัตราป่วย 713.63 ต่อประชากรแสนคน และมีผู้เสียชีวิต 29 ราย โดยกลุ่มเสี่ยงต่อการเกิดโรคไข้หวัดใหญ่พบในเด็กอายุต่ำกว่า 5 ปี ด้วยอัตรา 2,461.74 ต่อประชากรแสนคน ส่วนใหญ่มีสาเหตุมาจากเชื้อไวรัสไข้หวัดใหญ่ชนิด A สำหรับกรุงเทพมหานคร มีอัตราป่วย 1,344.60 ต่อประชากรแสนคน สูงสุดเป็นอันดับที่ 4 ของประเทศ [3]

จากข้อมูลดังกล่าวข้างต้นจึงมีนักวิจัยเป็นจำนวนมากที่ทำการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับการแพร่ระบาดของโรคไข้หวัดใหญ่ โดยอาศัยตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ (Mathematical model) มาเป็นตัวแทนสถานการณ์ที่ต้องการหาคำตอบ ซึ่งเขียนในรูปแบบสมการทางคณิตศาสตร์ เพื่อให้เกิดความเข้าใจสถานการณ์และสามารถทำนายพฤติกรรมของสถานการณ์นั้น ๆ ได้ [4] เช่น ในปี พ.ศ. 2559 มาลี ศรีพรหม และคณะ [5] ได้สร้างตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาการระบาดของโรคไข้หวัดใหญ่ในจังหวัดสกลนคร โดยพิจารณาผลกระทบจากปริมาณน้ำฝน ซึ่งพบว่า ปริมาณน้ำฝนมีความสัมพันธ์กับจำนวนผู้ป่วย ในปีต่อมา Pongsumpun [6] ได้



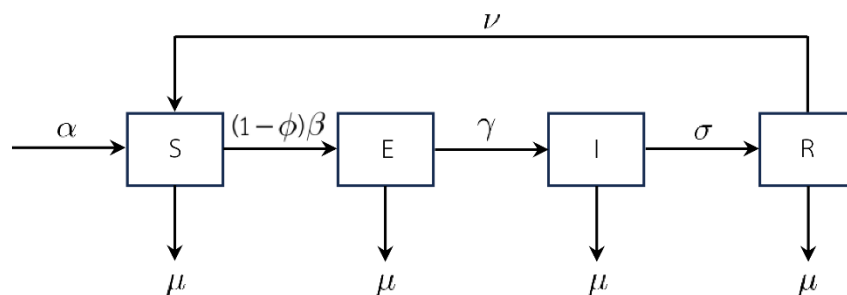
พัฒนาตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาลักษณะการระบาดของโรคไข้หวัดใหญ่ในแต่ละฤดูในประเทศไทย ซึ่งพบว่า มีการระบาดของโรคไข้หวัดใหญ่เพิ่มขึ้นในฤดูหนาว เนื่องจากเป็นฤดูที่มีอุณหภูมิที่เย็นกว่าและมีความชื้นต่ำ ส่งผลให้เชื้อไวรัสไข้หวัดใหญ่สามารถแพร่กระจายได้อย่างรวดเร็ว นอกจากนี้ ในปี พ.ศ. 2564 วัชรพงษ์ แก้วรัตน์ และอนุวัตร จิรวัดนพานิข [7] ได้ศึกษาและพัฒนาตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์สำหรับการควบคุมการแพร่ระบาดของโรคไข้หวัดใหญ่โดยการฉีดวัคซีนในจังหวัดภูเก็ต ซึ่งพบว่า อัตราการฉีดวัคซีนป้องกันการแพร่ระบาดของโรคไข้หวัดใหญ่มีค่ามากขึ้น จะส่งผลให้ค่าระดับการติดเชื้อลดลง และถ้าประชากรที่เสี่ยงต่อการติดเชื้อได้รับวัคซีนป้องกันโรคไข้หวัดใหญ่มากขึ้น จะส่งผลให้การแพร่ระบาดของโรคลดลง และในปีต่อมา พิชชานันท์ กินรี และคณะ [8] ได้พัฒนาและวิเคราะห์เสถียรภาพผลของอัตราการสวมหน้ากากอนามัยที่มีต่อตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ของโรคไข้หวัดใหญ่ในจังหวัดภูเก็ต ซึ่งพบว่า ผลของอัตราการสวมหน้ากากอนามัยเป็นปัจจัยที่มีผลต่อตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ โดยถ้าประชากรที่เสี่ยงต่อการติดเชื้อมีการสวมหน้ากากอนามัยป้องกันมาก จะส่งผลให้การแพร่ระบาดของโรคลดลง

ดังนั้น คณะผู้วิจัยจึงได้นำแนวคิดจากงานวิจัยของ Pongsumpun [6] และ พิชชานันท์ กินรี และคณะ [8] มาพัฒนาตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์เพื่อศึกษาผลของการสวมหน้ากากอนามัยที่มีต่อการแพร่ระบาดของโรคไข้หวัดใหญ่ตามฤดูกาลในกรุงเทพมหานคร ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มาประชากรอาศัยอยู่อย่างหนาแน่น และใช้เป็นข้อมูลสำหรับการวางแผนควบคุมการแพร่ระบาดของโรคในอนาคต งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาและวิเคราะห์เสถียรภาพของตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์สำหรับการแพร่ระบาดของโรคไข้หวัดใหญ่ในกรุงเทพมหานคร และเปรียบเทียบผลของการสวมหน้ากากอนามัยที่มีต่อการแพร่ระบาดของโรคตามฤดูกาล สำหรับใช้เป็นแนวทางในการวางแผนควบคุมการแพร่ระบาดของโรคในอนาคต

วิธีการดำเนินการวิจัย

1. การพัฒนาตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์

สำหรับการพัฒนาตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ของการสวมหน้ากากอนามัยที่มีต่อการแพร่ระบาดของโรคไข้หวัดใหญ่ในกรุงเทพมหานคร จะแบ่งประชากรออกเป็น 4 กลุ่ม ได้แก่ กลุ่มประชากรที่เสี่ยงต่อการติดเชื้อ (Susceptible) กลุ่มประชากรที่ติดเชื้อแล้วอยู่ในระยะฟักตัวแต่ไม่แสดงอาการ (Exposed) กลุ่มประชากรที่ติดเชื้อและสามารถแพร่เชื้อได้ (Infected) และกลุ่มประชากรที่หายจากการติดเชื้อและมีภูมิคุ้มกัน (Recovered) ซึ่งแสดงแผนภาพความสัมพันธ์ขององค์ประกอบในตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ได้ ดังภาพที่ 1



ภาพที่ 1 แผนภาพความสัมพันธ์ขององค์ประกอบในตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์

เมื่อ S แทนจำนวนประชากรที่เสี่ยงต่อการติดเชื้อ ณ เวลา t ใด ๆ E แทนจำนวนประชากรที่ติดเชื้อแล้วอยู่ในระยะฟักตัวแต่ไม่แสดงอาการ ณ เวลา t ใด ๆ I แทนจำนวนประชากรที่ติดเชื้อและสามารถแพร่เชื้อได้ ณ เวลา t ใด ๆ R แทนจำนวนประชากรที่หายจากการติดเชื้อและมีภูมิคุ้มกัน ณ เวลา t ใด ๆ α แทนอัตราการเกิดของประชากร μ แทนอัตราการตายของ

ประชากร ϕ แทนอัตราการสวมหน้ากากอนามัย β แทนอัตราการสัมผัสเชื้อ γ แทนอัตราการฟักตัวของเชื้อ σ แทนอัตราการหายจากโรค และ ν แทนอัตราการสูญเสียภูมิคุ้มกัน

จากภาพที่ 1 สามารถอธิบายได้ด้วยระบบสมการเชิงอนุพันธ์แบบไม่เชิงเส้นที่ (1) ดังนี้

$$\begin{aligned}\frac{dS}{dt} &= \alpha N - \frac{(1-\phi)\beta SI}{N} + \nu R - \mu S \\ \frac{dE}{dt} &= \frac{(1-\phi)\beta SI}{N} - \gamma E - \mu E \\ \frac{dI}{dt} &= \gamma E - \sigma I - \mu I \\ \frac{dR}{dt} &= \sigma I - \nu R - \mu R\end{aligned}\quad (1)$$

โดยที่ N แทนผลรวมของประชากร ณ เวลา t ใด ๆ ซึ่ง $N = S + E + I + R$ เมื่อกำหนดให้ $\bar{S} = \frac{S}{N}$, $\bar{E} = \frac{E}{N}$,

$\bar{I} = \frac{I}{N}$ และ $\bar{R} = \frac{R}{N}$ จะสามารถจัดรูประบบสมการที่ (1) ได้ใหม่ ดังนี้

$$\begin{aligned}\frac{d\bar{S}}{dt} &= \alpha - (1-\phi)\beta \bar{S} \bar{I} + \nu \bar{R} - \alpha \bar{S} \\ \frac{d\bar{E}}{dt} &= (1-\phi)\beta \bar{S} \bar{I} - \gamma \bar{E} - \alpha \bar{E} \\ \frac{d\bar{I}}{dt} &= \gamma \bar{E} - \sigma \bar{I} - \alpha \bar{I} \\ \frac{d\bar{R}}{dt} &= \sigma \bar{I} - \nu \bar{R} - \alpha \bar{R}\end{aligned}\quad (2)$$

2. การวิเคราะห์ตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์

การวิเคราะห์ตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์เป็นการวิเคราะห์ด้วยวิธีมาตรฐาน โดยการหาจุดสมดุล (Equilibrium point) การหาค่าระดับการติดเชื้อ (Basic reproduction number) และการวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงเส้นกำกับ (Local asymptotically stable) ซึ่งมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. การหาจุดสมดุลสามารถหาได้จากการกำหนดสมการเชิงอนุพันธ์แบบไม่เชิงเส้นในระบบสมการที่ (2) ให้เท่ากับ 0 นั่นคือ $\frac{d\bar{S}}{dt} = 0$, $\frac{d\bar{E}}{dt} = 0$, $\frac{d\bar{I}}{dt} = 0$ และ $\frac{d\bar{R}}{dt} = 0$ ทำให้ได้ค่า ณ จุดสมดุลที่ไม่มีการแพร่ระบาดของโรค (Disease-free equilibrium point: DFE) คือ $E_0 = (\bar{S}^0, \bar{E}^0, \bar{I}^0, \bar{R}^0)$ และค่า ณ จุดสมดุลที่มีการระบาดของโรค (Endemic equilibrium: EE) คือ $E_1 = (\bar{S}^*, \bar{E}^*, \bar{I}^*, \bar{R}^*)$

2. การหาค่าระดับการติดเชื้อ ซึ่งเป็นค่าเฉลี่ยของผู้ป่วยในรุ่นที่ 2 ที่ติดเชื้อจากผู้ป่วยที่ติดเชื้อในรุ่นแรก 1 คน เขียนแทนด้วย R_0 จะใช้วิธีรุ่นถัดไป (Next generation method) [9] โดยการจัดรูประบบสมการที่ (2) ให้อยู่ในรูป $\frac{dx_i}{dt} = F_i(x) - V_i(x)$ โดยที่ $F_i(x) = \left[\frac{\partial F_i(E_0)}{\partial x_i} \right]$ และ $V_i(x) = \left[\frac{\partial V_i(E_0)}{\partial x_i} \right]$ สำหรับ $i = 1, 2, 3, 4$ ซึ่งจะได้ค่าระดับการติดเชื้อ $R_0 = \rho(FV^{-1})$ เมื่อ ρ คือ ค่ารัศมีสเปกตรัม สำหรับกรณี $R_0 > 1$ แสดงว่า โรคมีการระบาดเพิ่มขึ้น (Epidemic) กรณี $R_0 = 1$ แสดงว่า โรคเริ่มเสถียร (Endemic) และกรณี $R_0 < 1$ แสดงว่า โรคไม่มีการระบาด

3. การวิเคราะห์เสถียรภาพเชิงเส้นกำกับ เป็นการหาค่าลักษณะเฉพาะ (Eigenvalue: λ) เพื่ออธิบายคำตอบของสมการเกี่ยวกับค่าความสมดุล ซึ่งมี 2 กรณี ดังนี้



3.1 เสถียรภาพเชิงเส้นกำกับ ณ จุดสมดุลที่ไม่มีการแพร่ระบาดของโรค เป็นการตรวจสอบค่าลักษณะเฉพาะจากสมการลักษณะเฉพาะ (Characteristic equation) $\det(J_0 - \lambda I) = 0$ เมื่อ J_0 คือ จาโคเบียนเมทริกซ์ ณ จุดสมดุลที่ไม่มีการแพร่ระบาดของโรค โดยกำหนดว่า λ ทุกค่าจะต้องมีส่วนจริงเป็นลบ ซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขของเรย์-เฮอริทซ์ (Routh-Hurwitz) [10] ส่งผลให้ค่า $R_0 < 1$

3.2 เสถียรภาพเชิงเส้นกำกับ ณ จุดสมดุลที่มีการแพร่ระบาดของโรค เป็นการตรวจสอบค่าลักษณะเฉพาะจากสมการลักษณะเฉพาะ $\det(J_1 - \lambda I) = 0$ ซึ่ง J_1 คือ จาโคเบียนเมทริกซ์ ณ จุดสมดุลที่มีการแพร่ระบาดของโรค โดยกำหนดว่า λ ทุกค่าจะต้องมีส่วนจริงเป็นลบ ซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขของเรย์-เฮอริทซ์ ส่งผลให้ค่า $R_0 > 1$

3. การวิเคราะห์เชิงตัวเลข

การวิเคราะห์เชิงตัวเลขเป็นการพิจารณาค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมจากการสำรวจข้อมูลในงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง ณ จุดสมดุลที่ไม่มีการแพร่ระบาดของโรคและจุดสมดุลที่มีการแพร่ระบาดของโรค ที่ทำให้ระบบสมการเชิงอนุพันธ์แบบไม่เชิงเส้นมีเสถียรภาพเชิงเส้นกำกับ และนำค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องไปคำนวณหาคำตอบเชิงตัวเลขจากตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ที่สร้างขึ้นด้วยโปรแกรมทางคณิตศาสตร์

ผลการวิจัย

1. ผลการวิเคราะห์ตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์

จากการกำหนดสมการเชิงอนุพันธ์แบบไม่เชิงเส้นในระบบสมการที่ (2) ให้เท่ากับ 0 ทำให้ได้ค่า ณ จุดสมดุลที่ไม่มีการแพร่ระบาดของโรค คือ $E_0 = (1, 0, 0, 0)$ และค่า ณ จุดสมดุลที่มีการแพร่ระบาดของโรค คือ $E_1 = (\bar{S}^*, \bar{E}^*, \bar{I}^*, \bar{R}^*)$ โดยที่ $\bar{S}^* = \frac{1}{R_0}$, $\bar{E}^* = \frac{(\alpha + \sigma)\bar{I}^*}{\gamma}$, $\bar{I}^* = \frac{(R_0 - 1)(\alpha + \gamma)(\alpha + \sigma)(\alpha + \nu)}{(1 - \phi)\beta[(\alpha + \gamma)(\alpha + \sigma + \nu) + \nu\sigma]}$ และ $\bar{R}^* = \frac{\sigma\bar{I}^*}{\alpha + \nu}$ เมื่อ $R_0 = \frac{(1 - \phi)\beta\gamma}{(\alpha + \gamma)(\alpha + \sigma)}$

1. ณ จุดสมดุลที่ไม่มีการแพร่ระบาดของโรค เมื่อพิจารณาสมการลักษณะเฉพาะ $\det(J_0 - \lambda I) = 0$ โดยที่

$$J_0 = \begin{bmatrix} -\alpha & 0 & 0 & \nu \\ 0 & -\alpha - \gamma & 0 & 0 \\ 0 & \gamma & -\alpha - \sigma & 0 \\ 0 & 0 & \sigma & -\alpha - \nu \end{bmatrix}$$

จะได้ค่าลักษณะเฉพาะ ณ จุดสมดุลที่ไม่มีการแพร่ระบาดของโรค คือ $\lambda_1 = -\alpha$, $\lambda_2 = -\alpha - \gamma$, $\lambda_3 = -\alpha - \nu$ และ $\lambda_4 = -\alpha - \sigma$ จะเห็นได้ว่า ค่าลักษณะเฉพาะทุกค่ามีส่วนจริงเป็นลบ สอดคล้องกับเงื่อนไขของเรย์-เฮอริทซ์

ดังนั้น ณ จุดสมดุลที่ไม่มีการแพร่ระบาดของโรคจะมีเสถียรภาพเชิงเส้นกำกับ เมื่อ $R_0 < 1$

2. ณ จุดสมดุลที่มีการแพร่ระบาดของโรค จะเห็นว่า จุดสมดุลที่มีการแพร่ระบาดของโรคมีความสัมพันธ์กับค่าระดับการติดเชื้อ และ $\bar{E}^* > 0$, $\bar{I}^* > 0$ และ $\bar{R}^* > 0$ เมื่อ $R_0 > 1$ นั่นคือ จุดสมดุลที่มีการแพร่ระบาดของโรคมีค่าเป็นบวก เมื่อ $R_0 > 1$

เมื่อทำการหาผลรวมของประชากรในระบบสมการที่ (1) จะได้ $\frac{dN}{dt} = (\alpha - \mu)N$ นั่นคือ $N(t) = N(0)e^{(\alpha - \mu)t}$ เนื่องจาก $N = S + E + I + R$ จะได้ว่า $\bar{S} + \bar{E} + \bar{I} + \bar{R} = 1$ หรือ $\bar{R} = 1 - \bar{S} - \bar{E} - \bar{I}$ ดังนั้น จึงสามารถลดรูประบบสมการที่ (2) ให้อยู่ในรูปแบบดังต่อไปนี้



$$\begin{aligned}
\frac{d\bar{S}}{dt} &= \alpha - (1-\phi)\beta\bar{S}\bar{T} - \alpha\bar{S} + \nu(1-\bar{S}-\bar{E}-\bar{T}) \\
\frac{d\bar{E}}{dt} &= (1-\phi)\beta\bar{S}\bar{T} - \gamma\bar{E} - \alpha\bar{E} \\
\frac{d\bar{T}}{dt} &= \gamma\bar{E} - \sigma\bar{T} - \alpha\bar{T}
\end{aligned} \tag{3}$$

เมื่อพิจารณาสมการลักษณะเฉพาะ $\det(J_1 - \lambda I) = 0$ โดยที่

$$J_1 = \begin{bmatrix} -(1-\phi)\beta\bar{T}^* - (\alpha + \nu) & -\nu & -(1-\phi)\beta\bar{S}^* - \nu \\ (1-\phi)\beta\bar{T}^* & -(\alpha + \gamma) & (1-\phi)\beta\bar{S}^* \\ 0 & \gamma & -(\alpha + \sigma) \end{bmatrix}$$

เนื่องจาก $\bar{S}^* = \frac{(\alpha+\gamma)(\alpha+\sigma)}{(1-\phi)\beta\gamma}$ และ $\bar{T}^* = \frac{(R_0-1)(\alpha+\gamma)(\alpha+\sigma)(\alpha+\nu)}{(1-\phi)\beta[(\alpha+\gamma)(\alpha+\sigma+\nu) + \nu\sigma]}$ จะได้

$$J_1 = \begin{bmatrix} \frac{(1-R_0)a_1a_2a_3}{a_1(a_2+\nu)+\nu\sigma} - a_3 & -\nu & \frac{-a_1a_2}{\gamma} - \nu \\ \frac{(R_0-1)a_1a_2a_3}{a_1(a_2+\nu)+\nu\sigma} & -a_1 & \frac{a_1a_2}{\gamma} \\ 0 & \gamma & -a_2 \end{bmatrix}$$

เมื่อ $a_1 = \alpha + \gamma$, $a_2 = \alpha + \sigma$ และ $a_3 = \alpha + \nu$ จะได้สมการลักษณะเฉพาะ ณ จุดสมดุลที่ไม่มีการแพร่ระบาดของโรค คือ $\lambda^3 + A\lambda^2 + B\lambda + C = 0$

$$\text{โดยที่ } A = (a_1 + a_2 + a_3) + \frac{a_1a_2a_3(R_0-1)}{a_1(a_2+\nu)+\nu\sigma}$$

$$B = (a_1 + a_2)a_3 + \frac{a_1a_2a_3(a_1 + a_2 + \nu)(R_0-1)}{a_1(a_2+\nu)+\nu\sigma}$$

$$\text{และ } C = \frac{a_1a_2a_3[(a_1+\nu)a_2 + \gamma\nu](R_0-1)}{a_1(a_2+\nu)+\nu\sigma}$$

จะเห็นว่า $A > 0$, $B > 0$ และ $C > 0$ เมื่อ $R_0 > 1$ นอกจากนี้ จะได้ว่า $AB > C$ เมื่อ $R_0 > 1$ ซึ่งสอดคล้องกับเงื่อนไขของเร้า-ฮอร์วิทซ์ ดังนั้น ณ จุดสมดุลที่มีการแพร่ระบาดของโรคจะมีเสถียรภาพเชิงเส้นกำกับ เมื่อ $R_0 > 1$

2. ผลการวิเคราะห์เชิงตัวเลข

คณะผู้วิจัยได้ทำการวิเคราะห์เชิงตัวเลขจากตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ของการสวมหน้ากากอนามัยที่มีต่อการแพร่ระบาดของโรคใช้หัดใหญ่ในกรุงเทพมหานคร โดยค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับโรคใช้หัดใหญ่ แสดงได้ดังตารางที่ 1



ตารางที่ 1 ค่าของพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับโรคไข้หวัดใหญ่

พารามิเตอร์	สัญลักษณ์	ค่าพารามิเตอร์	หน่วย	อ้างอิง
อัตราการเกิดของประชากร	α	$\frac{1.037 \times 10^{-2}}{365}$	ต่อวัน	[11]
อัตราการตายของประชากร	μ	$\frac{8.990 \times 10^{-3}}{365}$	ต่อวัน	[11]
อัตราการสมหน้าากอนามัย	ϕ	0 – 1		
อัตราการสัมผัสเชื้อ	β	0.1, 0.3, 0.6	ต่อวัน	[6]
อัตราการฟักตัวของเชื้อ	γ	0.994	ต่อวัน	[12]
อัตราการหายจากโรค	σ	0.067	ต่อวัน	[6]
อัตราการสูญเสียภูมิคุ้มกัน	ν	0.033	ต่อวัน	[6]

คณะผู้วิจัยได้นำค่าพารามิเตอร์ต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้องกับโรคไข้หวัดใหญ่ตามตารางที่ 1 มาวิเคราะห์ค่าระดับการติดเชื้อ (R_0) เมื่ออัตราการสมหน้าากอนามัย (ϕ) ซึ่งหมายถึง ร้อยละของประชากรในกลุ่ม S และ I ที่สมหน้าากอนามัย มีค่าเป็น 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.8 ตามลำดับ โดยมีอัตราการสัมผัสเชื้อ (β) ต่างกันตามฤดูกาล สอดคล้องกับงานวิจัยของ Pongsumpun [6] ซึ่งแสดงได้ดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 ค่าระดับการติดเชื้อ (R_0) เมื่ออัตราการสมหน้าากอนามัย (ϕ) มีค่าเป็น 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.8 ตามลำดับ และอัตราการสัมผัสเชื้อ (β) ต่างกันตามฤดูกาล

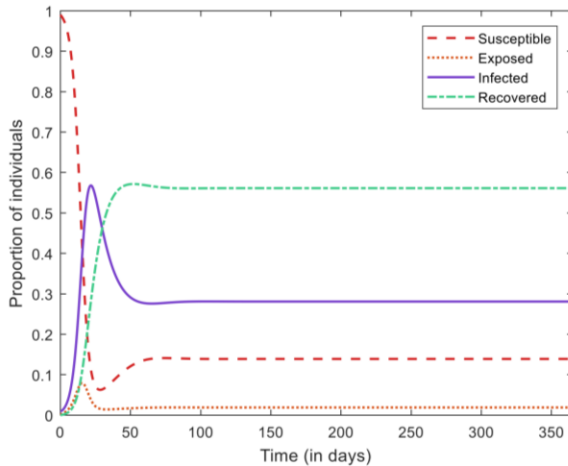
ค่าระดับการติดเชื้อ (R_0)	อัตราการสมหน้าากอนามัย			
	$\phi = 0.2$	$\phi = 0.4$	$\phi = 0.6$	$\phi = 0.8$
ฤดูร้อน ($\beta = 0.1$)	1.200	0.900	0.600	0.300
ฤดูฝน ($\beta = 0.3$)	3.598	2.699	1.799	0.900
ฤดูหนาว ($\beta = 0.6$)	7.197	5.398	3.598	1.799

จากตารางที่ 2 พบว่า ค่าระดับการติดเชื้อ (R_0) จะลดลงเมื่ออัตราการสมหน้าากอนามัย (ϕ) เพิ่มขึ้นในทุกฤดูกาล นอกจากนี้เมื่ออัตราการสัมผัสเชื้อมีค่าเป็น 0.3 ($\beta = 0.3$) และอัตราการสมหน้าากอนามัยมีค่าเป็น 0.8 ($\phi = 0.8$) ค่าระดับการติดเชื้อจะมีค่าน้อยกว่า 1 ($R_0 < 1$) แสดงว่า ไม่มีการแพร่ระบาดของโรคไข้หวัดใหญ่ ทำนองเดียวกับกรณีอัตราการสัมผัสเชื้อมีค่าเป็น 0.1 ($\beta = 0.1$) และอัตราการสมหน้าากอนามัยมีค่าเป็น 0.4, 0.6 และ 0.8 ($\phi = 0.4, 0.6, 0.8$) ตามลำดับ

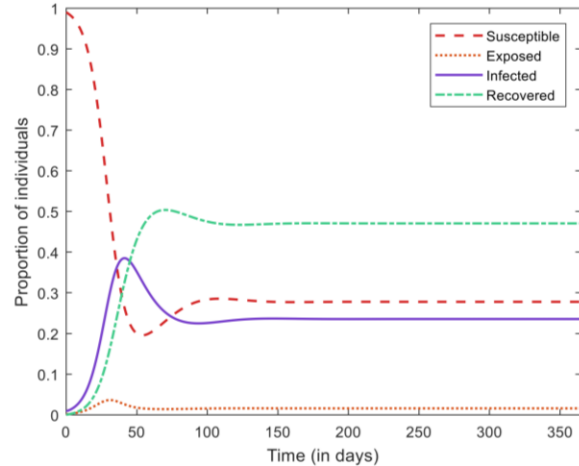
เมื่อพิจารณาเสถียรภาพเชิงเส้นกำกับ ณ จุดสมดุลที่มีการแพร่ระบาดของโรคที่อัตราการสมหน้าากอนามัยมีค่าเป็น 0.2 ($\phi = 0.2$) โดยกำหนดให้ค่าเริ่มต้นของประชากรแต่ละกลุ่ม คือ $(\bar{S}_0, \bar{E}_0, \bar{I}_0, \bar{R}_0) = (0.99, 0, 0.01, 0)$ จะพบว่า เมื่ออัตราการสัมผัสเชื้อมีค่าเป็น 0.3 และ 0.6 ($\beta = 0.3, 0.6$) ประชากรที่เสี่ยงต่อการติดเชื้อ ($\bar{S}$) มีแนวโน้มลดลงจนเข้าสู่จุดสมดุล ในขณะที่ประชากรที่ติดเชื้อแล้วอยู่ในระยะฟักตัวแต่ไม่แสดงอาการ ($\bar{E}$) และประชากรที่ติดเชื้อและสามารถแพร่เชื้อได้ ($\bar{I}$) จะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดหนึ่งและลดลงจนเข้าสู่จุดสมดุล สำหรับประชากรหายจากการติดเชื้อและมีภูมิคุ้มกัน ($\bar{R}$) จะเพิ่มขึ้นจนเข้าสู่จุดสมดุล โดยจุดสมดุลที่มีการแพร่ระบาดของโรค คือ (0.139, 0.019, 0.281, 0.561) เมื่ออัตราการสัมผัสเชื้อมีค่าเป็น 0.6 ($\beta = 0.6$) และจุดสมดุลที่มีการแพร่ระบาดของโรค คือ (0.278, 0.016, 0.236, 0.471) เมื่ออัตราการสัมผัสเชื้อมีค่าเป็น 0.3



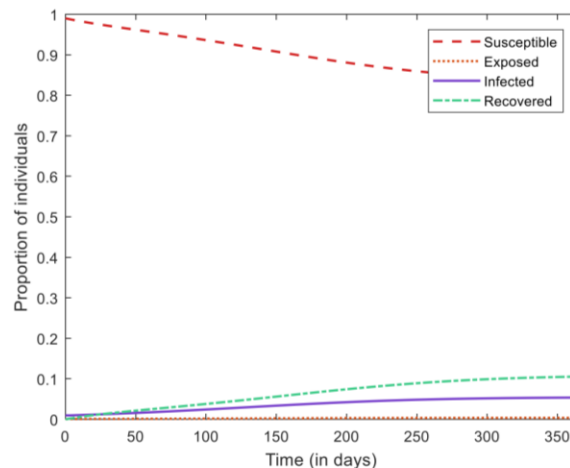
($\beta = 0.3$) ดังแสดงในภาพที่ 2(ก) และภาพที่ 2(ข) ตามลำดับ สำหรับจุดสมดุลที่มีการแพร่ระบาดของโรคเมื่ออัตราการสัมผัสเชื้อมีค่าเป็น 0.1 ($\beta = 0.1$) นั้น จะพบว่า ประชากรที่เสี่ยงต่อการติดเชื้อ (S) จะลดลงจนถึงจุดหนึ่งแล้วเข้าสู่จุดสมดุล ในขณะที่ประชากรของกลุ่มอื่น ๆ (E, I, R) จะเพิ่มขึ้นจนถึงจุดหนึ่งแล้วเข้าสู่จุดสมดุล ดังแสดงในภาพที่ 2(ค) โดยจุดสมดุลที่มีการแพร่ระบาดของโรค คือ (0.838, 0.004, 0.054, 0.105)



(ก) อัตราการสัมผัสเชื้อมีค่าเป็น 0.6 ($\beta = 0.6$)



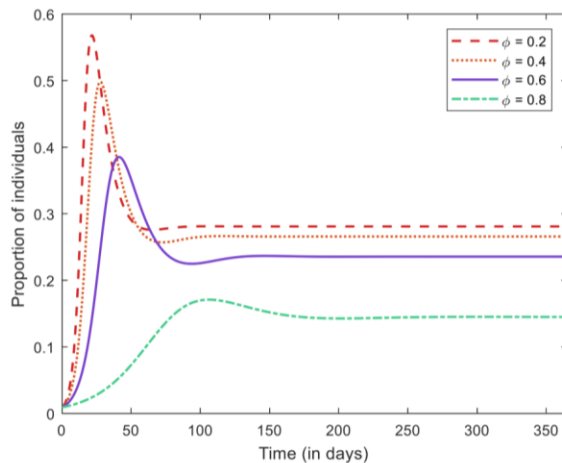
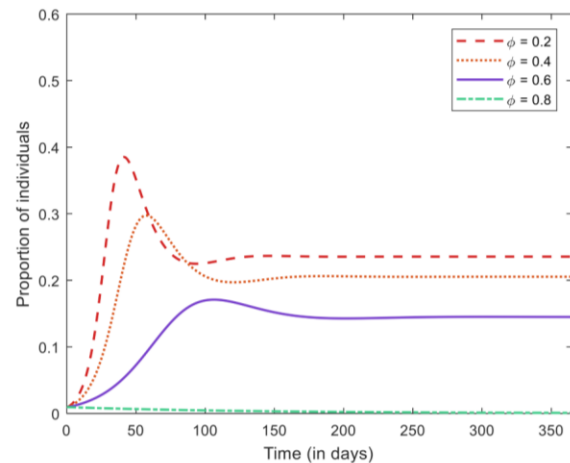
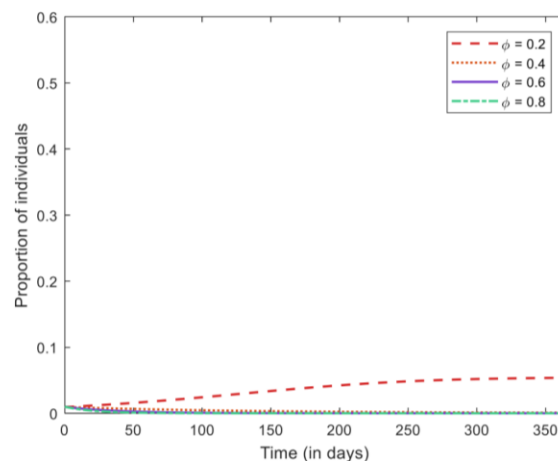
(ข) อัตราการสัมผัสเชื้อมีค่าเป็น 0.3 ($\beta = 0.3$)



(ค) อัตราการสัมผัสเชื้อมีค่าเป็น 0.1 ($\beta = 0.1$)

ภาพที่ 2 การเปลี่ยนแปลงของประชากรแต่ละกลุ่ม เมื่ออัตราการสมานหน้าากอนามัยมีค่าเป็น 0.2 ($\phi = 0.2$)

นอกจากนี้คณะผู้วิจัยได้ทำการเปรียบเทียบการเปลี่ยนแปลงของประชากรของกลุ่มติดเชื้อและสามารถแพร่เชื้อได้ (I) เมื่ออัตราการสมานหน้าากอนามัย (ϕ) มีค่าเป็น 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.8 ตามลำดับ โดยมีอัตราการสัมผัสเชื้อ (β) ต่างกันตามฤดูกาล ดังแสดงในภาพที่ 3

(ก) อัตราการสัมผัสเชื้อมีค่าเป็น 0.6 ($\beta = 0.6$)(ข) อัตราการสัมผัสเชื้อมีค่าเป็น 0.3 ($\beta = 0.3$)(ค) อัตราการสัมผัสเชื้อมีค่าเป็น 0.1 ($\beta = 0.1$)

ภาพที่ 3 การเปลี่ยนแปลงของประชากรของกลุ่มติดเชื้อและสามารถแพร่เชื้อได้ ($\bar{I}$) เมื่ออัตราการสวมหน้ากากอนามัย (ϕ) มีค่าเป็น 0.2, 0.4, 0.6 และ 0.8 ตามลำดับ

จากภาพที่ 3 จะเห็นว่า ประชากรของกลุ่มติดเชื้อและสามารถแพร่เชื้อได้ ($\bar{I}$) จะลดลงอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อมีการสวมหน้ากากอนามัยป้องกันโรคไข้หวัดใหญ่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 3(ก) และภาพที่ 3(ข) แต่เมื่อมีอัตราการสัมผัสเชื้อต่ำ ดังแสดงในภาพที่ 3(ค) จะพบว่า การสวมหน้ากากอนามัยจะไม่ส่งผลต่อการแพร่ระบาดของโรคไข้หวัดใหญ่

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้พัฒนาและวิเคราะห์ตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์สำหรับการแพร่ระบาดของโรคไข้หวัดใหญ่ในกรุงเทพมหานคร และเปรียบเทียบผลของการสวมหน้ากากอนามัยที่มีต่อการแพร่ระบาดตามฤดูกาล ตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ที่ใช้ในงานวิจัยนี้ คือ ตัวแบบ SEIR ซึ่งประกอบไปด้วยกลุ่มของประชากร 4 กลุ่ม ได้แก่ ประชากรที่เสี่ยงต่อการติดเชื้อ (S) ประชากรที่ติดเชื้อแล้วอยู่ใน

ระยะพักตัวแต่ไม่แสดงอาการ (E) ประชากรที่ติดเชื้อและสามารถแพร่เชื้อได้ (I) และประชากรหายจากการติดเชื้อและมีภูมิคุ้มกัน (R) โดยผู้วิจัยได้พัฒนาตัวแบบมาจากงานวิจัยของวัชรพงษ์ แก้วรัตน์ และอนุวัตร จิรวัดนพานิข [7] และพิชานันท์ กินรี และคณะ [8]

จากผลการศึกษาพบว่า เมื่ออัตราการสมานหน้าากอนามัยป้องกันโรคไข้หวัดใหญ่ (ϕ) เพิ่มขึ้น ค่าระดับการติดเชื้อ (R_0) จะลดลง โดยเฉพาะเมื่ออัตราการสัมผัสเชื้อสูงในช่วงฤดูฝนและฤดูหนาว จะได้ค่า $R_0 > 1$ แสดงว่า มีการระบาดของโรคเกิดขึ้น นอกจากนี้เมื่ออัตราการสมานหน้าากอนามัยเพิ่มขึ้น จะทำให้ประชากรของกลุ่มติดเชื้อและสามารถแพร่เชื้อได้ (I) ลดลงอย่างมีนัยสำคัญจนเข้าสู่จุดสมดุลที่มีการแพร่ระบาดของโรค ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของพิชานันท์ กินรี และคณะ [8] และเมื่ออัตราการสัมผัสเชื้อต่ำในช่วงฤดูร้อน จะได้ค่า $R_0 < 1$ แสดงว่า ไม่มีการระบาดของโรคเกิดขึ้น ทำให้การสมานหน้าากอนามัยจึงไม่ส่งผลต่อการป้องกันของโรคไข้หวัดใหญ่ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของณัฐเสน คงเสน และคณะ [13] ที่พบว่า ฤดูกาลเกิดโรคมีผลต่อการแพร่ระบาดของเชื้อไวรัส RSV ซึ่งเป็นโรคติดเชื้อในระบบทางเดินหายใจเช่นเดียวกับโรคไข้หวัดใหญ่

ดังนั้น ฤดูกาลที่มีอัตราการสัมผัสเชื้อสูง ได้แก่ ฤดูฝนและฤดูหนาว หน่วยงานภาครัฐที่เกี่ยวข้องจึงควรมีระบบเฝ้าระวังการแพร่ระบาดของโรคไข้หวัดใหญ่ที่มีประสิทธิภาพ เช่น การฉีดวัคซีนป้องกันโรคไข้หวัดใหญ่ การรณรงค์ให้ความรู้เกี่ยวกับการรักษาสุขภาพ รวมถึงกระตุ้นให้มีการสมานหน้าากอนามัยเมื่ออยู่ในพื้นที่แออัด เนื่องจากโรคไข้หวัดใหญ่เป็นโรคที่สำคัญที่สุดโรคหนึ่งในกลุ่มโรคติดเชื้ออุบัติใหม่และโรคติดเชื้ออุบัติซ้ำ มีการระบาดทั่วโลกหลายครั้ง แต่แต่ละครั้งเกิดขึ้นอย่างกว้างขวาง ทำให้มีผู้ป่วยและผู้เสียชีวิตเป็นจำนวนมาก

เอกสารอ้างอิง

1. กรมควบคุมโรค กระทรวงสาธารณสุข. แผนปฏิบัติการเตรียมความพร้อมรับการระบาดของโรคไข้หวัดใหญ่ สายพันธุ์ใหม่ พ.ศ. 2564 - 2566. พิมพ์ครั้งที่ 1. นนทบุรี: กรมควบคุมโรค กระทรวงสาธารณสุข; 2564.
2. WHO. Influenza (Seasonal). [Internet]. 2023 [cited 2023 Nov 30]. Available from: [https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/influenza-\(seasonal\)](https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/influenza-(seasonal))
3. กองระบาดวิทยา กรมควบคุมโรค. รายงานสถานการณ์โรคไข้หวัดใหญ่ ประเทศไทย พ.ศ. 2566. [อินเทอร์เน็ต]. 2566 [เข้าถึงเมื่อ 20 ม.ค. 2567]. เข้าถึงได้จาก: https://ddc.moph.go.th/uploads/ckeditor2/files/DOE_flu_52.2566.pdf
4. รัชฎา วิริยะพงศ์. ตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ด้วยสมการเชิงอนุพันธ์เบื้องต้น. พิมพ์ครั้งที่ 1. พิษณุโลก: สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยนเรศวร; 2564.
5. มาลี ศรีพรหม, ณัฐกร จันทรัชย์, เกษภา กลยนิย, ฤทธิเดช อินอุเทน, ตระกูลไทย ฉายแมน. ตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ของโรคไข้หวัดใหญ่ โดยพิจารณาผลกระทบจากปริมาณน้ำฝน. SNRUJST 2016;8:233-9.
6. Pongsumpun P. Mathematical model of influenza with seasons in Thailand. In: proceedings of the 6th Burapha University International Conference 2017, August 3-4, 2017; Chonburi, Thailand; 2017. p. 494-502.
7. วัชรพงษ์ แก้วรัตน์, อนุวัตร จิรวัดนพานิข. ตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์การควบคุมการแพร่ระบาดของโรคไข้หวัดใหญ่ โดยการฉีดวัคซีน ในจังหวัดภูเก็ต. ใน: เอกสารประกอบการประชุมวิชาการเสนอผลงานวิจัยระดับชาติและนานาชาติ พ.ศ. 2564 ครั้งที่ 2 วันที่ 20 มีนาคม 2564. มหาวิทยาลัยราชภัฏบ้านสมเด็จเจ้าพระยา. กรุงเทพฯ; 2564. หน้า B430-45.
8. พิชานันท์ กินรี, อนุรักษ์ วีระประเสริฐสกุล, เกษภา สุจริตธรรการ, อนุวัตร จิรวัดนพานิข. ผลของอัตราการสมานหน้าากอนามัยต่อตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์ของโรคไข้หวัดใหญ่ กรณีศึกษาจังหวัดภูเก็ต. ใน: เอกสารประกอบการประชุมขนาดใหญ่



วิชาการระดับชาติและนานาชาติ ครั้งที่ 13 วันที่ 12 พฤษภาคม 2565. มหาวิทยาลัยหาดใหญ่. สงขลา; 2565. หน้า 623-36.

9. Den Driessche PV, Watmough J. Reproduction numbers and sub-threshold endemic equilibria for compartmental models of disease transmission. Math Biosci 2002;180:29-48.
10. Willems JL. Stability theory of dynamical systems. New York: Wiley Interscience Division; 1970.
11. สำนักบริหารการทะเบียน. สถิติประชากรทางการทะเบียนราษฎร (รายเดือน). [อินเทอร์เน็ต]. 2566 [เข้าถึงเมื่อ 20 ม.ค. 2567]. เข้าถึงได้จาก: <https://stat.bora.dopa.go.th/stat/statnew/statMONTH/statmonth/#/mainpage>
12. Goswami NK, Shanmukha. A mathematical model of influenza: stability and treatment. in: proceedings of the international conference on mathematical modeling and simulation, August 31, 2016; Varanasi, India; 2016. p. 4898-935
13. ณัฐเสน คงเสน, วรณภา หมวดมณี, อัญชลี ณ ตะกั่วทุ่ง, เกตุกนก หนูดี, กันยกร อ่อนรักษ์. ผลของฤดูกาลเกิดโรคที่มีต่อตัวแบบเชิงคณิตศาสตร์การแพร่ระบาดของโรคติดเชื้อไวรัส RSV. Life Sci Environ J 2023;24:226-38.



การศึกษาประสิทธิผลของการรักษาภาวะเสื่อมสมรรถภาพทางเพศด้วยการฝังเข็ม

The Efficacy of Acupuncture in Erectile Dysfunction

ธนกร ชานนวงค์^{1*} จิตติกร พิมลเศรษฐพันธ์² และ เสาวลักษณ์ มีศิลป์¹

¹คณะการแพทย์แผนจีน มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ สมุทรปราการ 10540

²คลินิกการประกอบโรคศิลปะสาขากการแพทย์แผนจีนหัวเฉียว กรุงเทพมหานคร 10100

Thanakorn Channuvong^{1*} Jittikorn Pimolsettapun² and Saowaluck Meesin¹

¹Faculty of Chinese Medicine Huachiew Chalermprakiet University, Samut Prakan 10540

²Huachiew Traditional Chinese Medicine Clinic, Bangkok 10100

*Corresponding author: Thanakorn.cmd@gmail.com

Received: 12 March 2024/ Revised: 16 May 2024 / Accepted: 17 May 2024

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิผลและผลข้างเคียงของการฝังเข็มรักษาภาวะเสื่อมสมรรถภาพทางเพศชาย โดยศึกษาวิจัยเชิงทดลองทางคลินิก (Experimental clinic trial) ผู้เข้าร่วมวิจัยในครั้งนี้เป็นเพศชายที่มีภาวะเสื่อมสมรรถภาพทางเพศ อายุ 30-60 ปี จำนวน 30 ราย ได้รับการฝังเข็มที่จุด Baliao (BL31-34), Qugu (CV2), Zhongji (CV3), Qichong (ST30), Qihai (CV6), Guanyuan (CV4), Huiyin (CV1) และ Sanyinjiao (SP6) ประเมินผลโดยใช้แบบประเมิน International Index of Erectile Dysfunction-5 (IIEF-5) และ Erection Hardness Score (EHS) หลังการรักษาฝังเข็มครั้งที่ 5 และครั้งที่ 10 จากนั้นนำข้อมูลมาวิเคราะห์โดยใช้ค่าเฉลี่ย ร้อยละ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน และสถิติแบบ Independent sample t-test เพื่ออธิบายถึงประสิทธิผลของงานวิจัยนี้ โดยผลการรักษาภาวะเสื่อมสมรรถภาพทางเพศด้วยการฝังเข็ม พบว่าหลังการรักษา 10 ครั้ง ผู้เข้าร่วมวิจัยมีค่าเฉลี่ย IIEF-5 score ดีขึ้นกว่าก่อนรักษาอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) ในส่วนของระดับ EHS เฉลี่ยหลังการรักษา 5 และ 10 ครั้ง สามารถเพิ่มขึ้นได้ 1 ระดับ ซึ่งให้ประสิทธิผลที่ดีเช่นกัน ในด้านผลข้างเคียงจากการรักษาพบว่า 83.3% ไม่พบอาการข้างเคียงหลังการรักษา อีก 16.7% มีอาการปวดระบมและรอยช้ำเล็กน้อยบริเวณจุดฝังเข็ม แต่อาการเหล่านี้สามารถหายเองได้ใน 1 สัปดาห์ สรุปได้ว่าการฝังเข็มให้ประสิทธิผลที่ดีในการรักษาภาวะเสื่อมสมรรถภาพทางเพศชาย ซึ่งจะเห็นผลชัดเจนหลังการรักษา 10 ครั้ง

คำสำคัญ: ภาวะเสื่อมสมรรถภาพทางเพศ ฝังเข็ม แพทย์แผนจีน



Abstract

The purpose of this research was to study the effectiveness and side effects of using acupuncture in the treatment of erectile dysfunction. The research was conducted in an experimental clinical trial of 30 male participants aged 30-60 years who had erectile dysfunction received acupuncture at Baliao (BL 31-34), Qugu (CV2), Zhongji (CV3), Qichong (ST30), Qihai (CV6), Guanyuan (CV4), Huiyin (CV1) and Sanyinjiao (SP6). Evaluated effectiveness of The International Index of Erectile Dysfunction-5 (IIEF-5) and Erection Hardness Score (EHS) with follow up after treatment 5 and 10 times. The data was analyzed by percentage, mean, standard deviation and independent sample t-test. According to results of acupuncture in erectile dysfunction found that with after treatment 10 times, the IIEF-5 score in patients has significantly statistically compared with before receiving treatment ($P < 0.05$), In terms of EHS levels after treatment 5 and 10 times, likewise, increased more 1 level which shows positive efficiency of treatment program. Besides on side effects from after treatment, indicated that 83.3% of patient has no-side effects meanwhile 16.7% were slightly affected by treatment including, pain and swelling however symptoms could be self-resilient healed within a week. Findings from this study showed that acupuncture could improve erectile dysfunction and the results will be clearly showing effectiveness after 10 treatments.

Keywords: Erectile Dysfunction, Acupuncture, Chinese Medicine

บทนำ

ภาวะเสื่อมสมรรถภาพทางเพศ (Erectile Dysfunction; ED) คือภาวะที่อวัยวะเพศชายไม่สามารถแข็งตัวได้ หรือสามารถแข็งตัวได้แต่ไม่สามารถคงการแข็งตัวนานพอที่จะมีเพศสัมพันธ์อย่างพึงพอใจได้ [1] ซึ่งเป็นปัญหาสุขภาพในเพศชายที่สำคัญเนื่องจากจะส่งผลต่อคุณภาพชีวิตและความสัมพันธ์ของชีวิตคู่ อีกทั้งความมั่นใจของผู้ป่วยจะค่อยๆ เสื่อมไป จนเกิดเป็นปัญหาทางสภาพจิตใจตามมา จากการศึกษาอุบัติการณ์ของภาวะเสื่อมสมรรถภาพทางเพศพบว่า ในปี ค.ศ. 1995 มีจำนวน 152 ล้านคน และคาดว่าในปี ค.ศ. 2025 จะมีผู้ป่วยภาวะนี้เพิ่มเป็น 322 ล้านคน [2] National Health and Nutrition Examination Survey (NHANES) พบว่ามีความชุกการเกิดภาวะนี้ 18% โดยจะมีแนวโน้มความชุกมากขึ้นเรื่อยๆ เมื่ออายุมากขึ้น [3] จากผลการสำรวจประชากรเพศชายในประเทศนิวซีแลนด์ ที่มีอายุระหว่าง 40 ถึง 70 ปี พบว่ามีภาวะเสื่อมสมรรถภาพทางเพศถึง 42% โดยแบ่งออกเป็นผู้ที่มีอาการหนัก 4% อาการปานกลาง 6% อาการเล็กน้อยถึงปานกลาง 10% และอาการเล็กน้อย 22% [4] การศึกษาในยุโรปโดย European Male Aging Study (EMAS) พบว่าในผู้ชายวัย 40 ปี มีอัตราการเกิดภาวะนี้ 5% และในวัย 60 ปี จะเพิ่มขึ้นเป็น 10% [5] ในประเทศไทยจากการเก็บข้อมูลอย่างเป็นระบบในปี พ.ศ. 2550 พบว่า 42.18% มีภาวะเสื่อมสมรรถภาพทางเพศ โดยแบ่งออกเป็นผู้ที่มีอาการหนัก 11.55% อาการปานกลาง 13.13% และอาการเล็กน้อย 17.5% อีกทั้งยังมีแนวโน้มการเกิดภาวะนี้เพิ่มขึ้นเรื่อยๆ ตามอายุ [6]

การรักษาในปัจจุบันจะให้รับประทานยากลุ่มยับยั้งการทำงานของเอ็นไซม์ phosphodiesterase-5 (PDE-5 inhibitor) เช่น sildenafil กับ tadalafil แต่การรักษาด้วยการรับประทานนี้เป็นการรักษาตามอาการ ผู้ป่วยจำเป็นต้องใช้ยาเป็นประจำไปตลอด อีกทั้งการใช้ยาเหล่านี้มีข้อจำกัดหลายประการและอาจส่งผลข้างเคียงต่อร่างกายได้ นอกจากนี้ยังมีการรักษาอื่นๆ เช่น Shockwave, Platelet-rich plasma (PRP), Intracavernous injection (ICI), Testosterone therapy (TTh) เป็นต้น



ซึ่งการรักษาเหล่านี้มีต้นทุนราคาในการใช้อุปกรณ์ค่อนข้างสูง ทำให้มีผู้ป่วยที่เข้าถึงการรักษาได้จำกัด และการรักษาอาจมีผลข้างเคียงไม่พึงประสงค์เกิดขึ้นได้

ในปัจจุบันการแพทย์ทางเลือกได้เข้ามาเป็นตัวเลือกในการรักษาให้กับผู้ป่วยมากขึ้น หนึ่งในนั้นคือ การแพทย์แผนจีน ที่ใช้พื้นฐานทฤษฎีศาสตร์การแพทย์แผนจีนในการตรวจวินิจฉัย รักษา และป้องกันโรคต่างๆ ซึ่งวิธีการรักษาที่กำลังได้รับความนิยมเป็นอย่างมากจากทั่วโลก คือการฝังเข็ม (Acupuncture) เป็นการใช้เข็มฝังลงตาม “จุดฝังเข็ม” ที่เรียงอยู่บนแนวเส้นลมปราณ (Meridian System) เพื่อปรับสมดุลกระตุ้นการไหลเวียนของเลือด และเส้นลมปราณของร่างกาย เป็นหนึ่งในวิธีการรักษาด้วยศาสตร์การแพทย์แผนจีนที่องค์การอนามัยโลก (WHO) ให้การรับรองว่า “การฝังเข็มสามารถรักษาโรคได้จริง” และภาวะเสื่อมสมรรถภาพก็เป็นหนึ่งในโรคที่ WHO ให้การยอมรับว่าการฝังเข็มให้ประสิทธิผลในการรักษาที่ดี [7]

ในตอนนี้ประเทศไทยได้เข้าสู่สังคมสูงอายุอย่างสมบูรณ์ จึงหลีกเลี่ยงไม่ได้ที่จะพบปัญหาภาวะเสื่อมสมรรถภาพทางเพศมากขึ้น การหาแนวทางเพื่อบรรเทาหรือรักษาภาวะนี้ จะสามารถช่วยให้ผู้ป่วยมีคุณภาพชีวิตและสภาพจิตใจที่ดีขึ้น อีกทั้งประเทศไทยยังคงขาดแคลนงานวิจัยที่เกี่ยวกับการฝังเข็มรักษาภาวะเสื่อมสมรรถภาพทางเพศชาย ทางคณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการศึกษาประสิทธิผลของการรักษาภาวะเสื่อมสมรรถภาพทางเพศด้วยการฝังเข็ม ซึ่งเป็นวิธีที่ปลอดภัยและต้นทุนการใช้อุปกรณ์ในการรักษาไม่สูง เพื่อให้ผู้ที่มีภาวะเสื่อมสมรรถภาพทางเพศชายได้มีทางเลือกในการรักษา ลดความเสี่ยงต่อผลข้างเคียงจากการใช้ยา และเป็นประโยชน์ต่อการแพทย์ทางเลือกในประเทศไทยต่อไป โดยมีวัตถุประสงค์ของงานวิจัย ดังนี้

1. เพื่อศึกษาประสิทธิผลของการใช้การฝังเข็มในการรักษาภาวะเสื่อมสมรรถภาพทางเพศชาย
2. เพื่อศึกษาผลข้างเคียงในการฝังเข็มรักษาภาวะเสื่อมสมรรถภาพทางเพศชาย

วิธีดำเนินการวิจัย

1. ประชากรและกลุ่มตัวอย่าง

ประชากรที่ใช้ในงานวิจัยครั้งนี้คือ อาสาสมัครเพศชาย ช่วงอายุ 30-60 ปี จำนวน 30 คน ที่มีปัญหาภาวะเสื่อมสมรรถภาพทางเพศ ได้จากการสมัครทางสื่อประชาสัมพันธ์ออนไลน์ ใบปลิว และผู้ป่วยที่เข้ามาใช้บริการที่หัวเฉียวสหคลินิก มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ

การคำนวณขนาดตัวอย่าง ตามรูปแบบวิจัยที่ใช้ศึกษา คือ simple formula [8]

$$n = \frac{Z^2 P(1-P)}{d^2}$$

โดยที่ n = sample size

Z = ระดับความเชื่อมั่น = 1.96

P = ความชุกของภาวะเสื่อมสมรรถภาพทางเพศ (การศึกษาของ Permpongkosol [6] พบว่าความชุกของภาวะเสื่อมสมรรถภาพทางเพศของเพศชาย ร้อยละ 37.5)

d = ค่าความผิดพลาดของความชุกที่ยอมรับได้เท่ากับ 0.2

เมื่อแทนค่าในสมการแล้ว จะได้จำนวนกลุ่มตัวอย่างที่ต้องการอย่างน้อย 24 ราย

โดยอาสาสมัครจะต้องไม่เป็นผู้ป่วยมะเร็ง ไม่มีภาวะเสื่อมสมรรถภาพทางเพศ อันเนื่องมาจากสภาพจิตใจ หรือโรคทางสมอง เช่น Parkinson's disease, Alzheimer's disease เป็นต้น ไม่เคยฉีดยา ฆ่าเชื้อ หรือเสริมสิ่งแปลกปลอมใดๆ ในองคชาติ สภาพร่างกายแข็งแรงพอที่จะมีเพศสัมพันธ์ได้ ไม่มีการใช้ยากกลุ่ม PDE-5 inhibitor ขณะทำการทดลอง ไม่มีโรคผิวหนัง หรือติดเชื้อบริเวณองคชาติระหว่างช่วงที่ทำการทดลอง และมีค่า IIEF Score น้อยกว่า 21 คะแนน



2. อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในงานวิจัย

ผู้วิจัยเลือกใช้เข็มฝังเข็ม ยี่ห้อ EACU ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.25 มิลลิเมตร ยาว 40 มิลลิเมตร และเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.25 มิลลิเมตร ยาว 25 มิลลิเมตร ผลิตจากสาธารณรัฐประชาชนจีน โดยใช้เครื่องกระตุ้นไฟฟ้า ยี่ห้อ Hua tuo รุ่น SDZ-type II และสร้างเครื่องมือที่ใช้ในการเก็บรวบรวมข้อมูล ได้แก่ แบบสอบถามบันทึกข้อมูลทั่วไป แบบสอบถามบันทึกข้อมูลอาการแสดงออกทางการแพทย์แผนจีน แบบสอบถามบันทึกข้อมูล IIEF-5 Score แบบสอบถามบันทึกข้อมูล EHS และแบบสอบถามบันทึกข้อมูลอาการไม่พึงประสงค์ เช่น อาการปวด บวม อักเสบ

3. ขั้นตอนงานวิจัย

เริ่มจากระยะคัดกรอง ผู้วิจัยจะอธิบายวัตถุประสงค์ ขั้นตอน วิธีการวิจัย และประโยชน์ที่คาดว่าจะสามารถที่ผ่านเกณฑ์คัดเข้าจะได้รับโดยละเอียด และให้อาสาสมัครกรอกประวัติส่วนตัว ตรวจร่างกาย ตรวจเลือดเพื่อดูค่า complete blood count (CBC) และ Testosterone จากนั้นให้อาสาสมัครตอบแบบสอบถามอาการแสดงออกทางการแพทย์แผนจีน IIEF-5 Score และ EHS ก่อนทำการรักษา

ระยะทำการรักษา ผู้วิจัยจะทำการฝังเข็มบริเวณจุด Baliao (BL 31-34), Qugu (CV2), Zhongji (CV3), Qichong (ST30), Qihai (CV6), Guanyuan (CV4), Huiyin (CV1), Sanyinjiao (SP6) กระตุ้นเข็มด้วยมือให้อาสาสมัครรู้สึก ตื้อ ตึง หน่วง บริเวณจุดฝังเข็ม จากนั้นใช้เครื่องกระตุ้นไฟฟ้ากระตุ้นที่เข็มคู่ที่ 1 จุด Baliao (BL 31-34) คู่ที่ 2 จุด Qugu (CV2) กับ Zhongji (CV3) และ คู่ที่ 3 จุด Qihai (CV6) กับ Guanyuan (CV4) โดยใช้ continuous wave ด้วยความถี่ ชัด 6 ถึง 6 ครั้ง (180-220 ครั้ง/นาที) เป็นเวลา 30 นาที แล้วถอนเข็มออก หากมีเลือดออก ให้ใช้สำลีแห้งกดจนกว่าเลือดจะหยุด ป้องกันอาการบวมแดงด้วยการประคบเย็น จากนั้นให้อาสาสมัครรอดูอาการ 15-20 นาที บันทึกความเปลี่ยนแปลง ผลข้างเคียง และถ่ายรูปผลข้างเคียง ได้แก่ อาการเจ็บปวด อักเสบ หรือบวมแดง ทำการรักษาสัปดาห์ละ 1 ครั้ง ติดต่อกันเป็นเวลา 10 สัปดาห์

ช่วงติดตามและประเมินผล ผู้วิจัยให้อาสาสมัครตอบแบบสอบถามประเมินผล IIEF-5 Score และ EHS หลังการรักษาครั้งที่ 5 และ 10 จากนั้นนำผลของการรักษามาวិเคราะห์ข้อมูลและแปลผลทางสถิติต่อไป

4. การวิเคราะห์ข้อมูล

ใช้การวิเคราะห์ข้อมูลแบบพรรณนา แสดงผลการทดลองในรูป สถิติอัตราส่วนร้อยละ (Percentage) ค่าเฉลี่ย (Mean) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (SD) ในส่วนการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงค่า IIEF-EF scores และ EHS ในกรณีแจกแจงปกติใช้ t-test และกรณีไม่ปกติใช้ Wilcoxon signed-ranks test กำหนดระดับนัยสำคัญทางสถิติที่ 0.05

ผลการวิจัย

1. ข้อมูลทั่วไป

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิผลของการใช้การฝังเข็มในการรักษาภาวะเสื่อมสมรรถภาพทางเพศชาย โดยมีอาสาสมัครเพศชาย ช่วงอายุ 30-60 ปี ที่มีปัญหาภาวะเสื่อมสมรรถภาพทางเพศที่ยินยอมเข้าร่วมการศึกษาและมีคุณสมบัติตรงตามเกณฑ์การคัดเข้าและคัดออก จำนวน 30 ราย แบ่งเป็นช่วงอายุ 30-39 ปี จำนวน 8 ราย ช่วงอายุ 40-49 ปี จำนวน 13 ราย ช่วงอายุ 50-59 ปี จำนวน 9 ราย โดยลักษณะข้อมูลทั่วไปของอาสาสมัคร แสดงในตารางที่ 1



ตารางที่ 1 แสดงข้อมูลค่าเฉลี่ยอายุ ค่าเฉลี่ยดัชนีมวลกาย ค่าเฉลี่ยระดับ Testosterone ในกระแสเลือด ค่าเฉลี่ยระยะเวลาที่มีภาวะเสื่อมสมรรถภาพ และค่าเฉลี่ยระดับความรุนแรงของภาวะเสื่อมสมรรถภาพทางเพศ

ข้อมูล	จำนวน (ราย)	Mean	SD
อายุ	30	45.2	7.68
BMI	30	24.29	2.68
Testosterone	30	513.43	184.20
ระยะเวลา	30	33.9	34.58
IIEF-5 Score	30	12.77	4.32

2. ข้อมูลด้านภาวะเสื่อมสมรรถภาพทางเพศของผู้เข้าร่วมวิจัย

พบว่าผู้เข้าร่วมวิจัยมีระดับความรุนแรงของภาวะเสื่อมสมรรถภาพทางเพศ (IIEF-5 Score) อยู่ในระดับรุนแรง (1-7 คะแนน) จำนวน 4 ราย คิดเป็น 13.3% ระดับปานกลาง (8-11 คะแนน) จำนวน 10 ราย คิดเป็น 33.3% ระดับเล็กน้อยถึงปานกลาง (12-16 คะแนน) จำนวน 8 ราย คิดเป็น 26.7% และระดับเล็กน้อย (17-21 คะแนน) จำนวน 8 ราย คิดเป็น 26.7% ผู้เข้าร่วมวิจัยมีระดับความแข็งตัวของอวัยวะเพศเทียบเท่าเต่าหัว จำนวน 1 ราย คิดเป็น 3.3% เทียบเท่ากล้วยปอกเปลือก จำนวน 9 ราย คิดเป็น 30% และเทียบเท่ากล้วยไม่ปอกเปลือก จำนวน 20 ราย คิดเป็น 66.7% แสดงในตารางที่ 2

ตารางที่ 2 แสดงข้อมูลด้านภาวะเสื่อมสมรรถภาพทางเพศ ได้แก่ ระดับความรุนแรงของภาวะเสื่อมสมรรถภาพทางเพศ (IIEF-5 Score) และระดับความแข็งตัวของอวัยวะเพศ (EHS)

ข้อมูล	เพศชาย จำนวน (%)
1. ระดับความรุนแรงของภาวะเสื่อมสมรรถภาพทางเพศ (IIEF-5 Score)	
รุนแรง (1-7 คะแนน)	4 (13.3)
ปานกลาง (8-11 คะแนน)	10 (33.3)
น้อยถึงปานกลาง (12-16 คะแนน)	8 (26.7)
เล็กน้อย (17-21 คะแนน)	8 (26.7)
2. ระดับความแข็งตัวของอวัยวะเพศ (EHS)	
เต่าหัว (ระดับ 1)	1 (3.3)
กล้วยปอกเปลือก (ระดับ 2)	9 (30.0)
กล้วยไม่ปอกเปลือก (ระดับ 3)	20 (66.7)

หมายเหตุ *** เต่าหัว หมายถึง อวัยวะเพศสามารถขยายตัวได้ แต่ไม่มีความแข็งตัวแม้แต่นิดเดียว

*** กล้วยปอกเปลือก หมายถึง อวัยวะเพศแข็งตัวในระดับหนึ่ง แต่ไม่เพียงพอสำหรับการสอดใส่

*** กล้วยไม่ปอกเปลือก หมายถึง อวัยวะเพศแข็งตัวได้ เพียงพอสำหรับการสอดใส่ แต่อาจอ่อนตัวลงคัน

3. ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย IIEF-5 score แต่ละตัวชี้วัดเปรียบเทียบก่อนและหลังการรักษา 5 ครั้ง และ 10 ครั้ง

พบว่าการรักษามีค่าเฉลี่ย IIEF-5 score 12.77 ± 4.32 คะแนน และหลังการรักษา 5 ครั้ง ผู้เข้าร่วมวิจัยมีค่าเฉลี่ย IIEF-5 score 14.40 ± 4.04 คะแนน ซึ่งผลการรักษามีแนวโน้มที่ดีขึ้น แต่ยังไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) และหลังการรักษา 10 ครั้ง ผู้เข้าร่วมวิจัยมีค่าเฉลี่ย IIEF-5 score 15.77 ± 4.66 คะแนน ซึ่งมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) แสดงให้เห็นว่าการฝังเข็มให้ประสิทธิผลที่ดีในการรักษาภาวะเสื่อมสมรรถภาพทางเพศ โดยจะเห็นผลชัดเจนหลังการรักษา 10 ครั้ง



เมื่อพิจารณา IIEF-5 score ในแต่ละตัวชี้วัดของผู้เข้าร่วมวิจัยหลังการรักษาด้วยการฝังเข็ม จำนวน 5 ครั้ง และ 10 ครั้ง พบว่าหลังการรักษา 5 ครั้ง ผลการรักษาทุกตัวชี้วัดมีแนวโน้มที่ดีขึ้น แต่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) หลังการรักษา 10 ครั้ง ผลคะแนนตัวชี้วัด “ความถี่ที่อวัยวะเพศจะสามารถแข็งตัวได้และแข็งได้นานพอ” “ความถี่ที่อวัยวะเพศแข็งตัวมากพอจนสอดใส่ได้” และ “ความถี่ในความรู้สึกพึงพอใจจากการมีเพศสัมพันธ์” มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P < 0.05$) แต่มี 2 ตัวชี้วัด คือ “ความถี่ที่อวัยวะเพศสามารถคงการแข็งตัวอยู่ได้หลังจากมีการสอดใส่แล้ว” และ “ความถี่ในการแข็งตัวของอวัยวะเพศจนมีเพศสัมพันธ์สำเร็จ” มีแนวโน้มผลการรักษาที่ดีขึ้นแต่ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($P > 0.05$) แสดงให้เห็นว่าการฝังเข็มสามารถเพิ่มสมรรถนะในการมีเพศสัมพันธ์ ได้แก่ ทำให้อวัยวะเพศสามารถแข็งตัวได้นานพอ ทำให้อวัยวะเพศแข็งตัวเพียงพอจะสอดใส่ได้ ทำให้อวัยวะเพศแข็งตัวได้นานพอหลังการสอดใส่ ทำให้อวัยวะเพศแข็งตัวได้จนมีเพศสัมพันธ์สำเร็จ และเพิ่มความรู้สึกพึงพอใจจากการมีเพศสัมพันธ์ได้ โดยจะเห็นผลชัดเจนหลังการรักษา 10 ครั้ง แสดงในตารางที่ 3 และตารางที่ 4

ตารางที่ 3 แสดงผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย IIEF-5 score ในแต่ละตัวชี้วัดเปรียบเทียบก่อนและหลังการรักษา 5 ครั้ง

ตัวชี้วัด IIEF-5	ค่าเฉลี่ย IIEF-5 Score (Mean±SD)		t-value	P-value
	ก่อนรักษา	หลังรักษา 5 ครั้ง		
1. ท่านมีความมั่นใจเพียงพอว่าอวัยวะเพศจะสามารถแข็งตัวได้และแข็งได้นานพอ	2.87±1.22	3.13±1.19	-0.853	0.397
2. บ่อยครั้งแค่ไหนที่อวัยวะเพศแข็งตัวมากพอจนสอดใส่ได้	2.70±1.23	3.13±1.04	-1.468	0.147
3. บ่อยครั้งแค่ไหนที่ท่านสามารถคงการแข็งตัวอยู่ได้ หลังจากมีการสอดใส่แล้ว	2.43±1.00	2.87±0.97	-1.695	0.95
4. ระหว่างมีเพศสัมพันธ์ ยกแค่ไหนที่ท่านจะคงการแข็งตัวของอวัยวะเพศจนมีเพศสัมพันธ์สำเร็จ	2.47±0.73	2.63±0.71	-0.891	0.377
5. บ่อยครั้งแค่ไหนที่คุณมีความรู้สึกพึงพอใจจากการมีเพศสัมพันธ์นั้น	2.30±0.79	2.60±0.72	-1.529	0.132
6. คะแนนรวม	12.77±4.32	14.40±4.04	-1.511	0.136

4. เปรียบเทียบสัดส่วน Erection Hardness Score ก่อนและหลังรักษา 5 ครั้ง และ 10 ครั้ง

พบว่าหลังการรักษา 5 ครั้ง ผู้เข้าร่วมวิจัยมีระดับความแข็งตัวของอวัยวะเพศ (EHS) เทียบเท่าเต่าหัว จำนวน 1 ราย คิดเป็น 3.3% เทียบเท่ากล้วยปอกเปลือก จำนวน 10 ราย คิดเป็น 33.3% เทียบเท่ากล้วยไม่ปอกเปลือก จำนวน 17 ราย คิดเป็น 56.7% เทียบเท่าเต่างาว จำนวน 2 ราย คิดเป็น 6.7% หลังการรักษา 10 ครั้ง ผู้เข้าร่วมวิจัยมีระดับความแข็งตัวของอวัยวะเพศ (EHS) เทียบเท่ากล้วยปอกเปลือก จำนวน 6 ราย คิดเป็น 20.0% เทียบเท่ากล้วยไม่ปอกเปลือก จำนวน 16 ราย คิดเป็น 53.3% เทียบเท่าเต่างาว จำนวน 8 ราย คิดเป็น 26.7% แสดงในตารางที่ 5

เมื่อพิจารณาข้อมูล EHS ของผู้เข้าร่วมวิจัย พบว่าก่อนการรักษามีค่าเฉลี่ยระดับความแข็งตัวของอวัยวะเพศที่ระดับ 2.57 ซึ่งอยู่ในระดับเทียบเท่ากล้วยปอกเปลือก หลังการรักษา 5 ครั้ง ผู้เข้าร่วมวิจัยมีค่าเฉลี่ยระดับความแข็งตัวของอวัยวะเพศที่ระดับ 3.00 อยู่ในระดับเทียบเท่ากล้วยไม่ปอกเปลือก และหลังการรักษา 10 ครั้ง พบว่าผู้เข้าร่วมวิจัยมีค่าเฉลี่ยระดับความแข็งตัวของอวัยวะเพศที่ระดับ 3.06 ยังคงอยู่ในระดับเทียบเท่ากล้วยไม่ปอกเปลือก แสดงให้เห็นว่าการฝังเข็มสามารถทำให้ระดับความแข็งตัวของอวัยวะเพศดีขึ้น



ตารางที่ 4 ผลการวิเคราะห์ค่าเฉลี่ย IIEF-5 score ในแต่ละตัวชี้วัดเปรียบเทียบก่อนและหลังการรักษา 10 ครั้ง

ตัวชี้วัด IIEF-5	ค่าเฉลี่ย IIEF-5 Score (Mean±SD)		t-value	P-value
	ก่อนรักษา	หลังรักษา 10 ครั้ง		
1. ท่านมีความมั่นใจเพียงใดว่าอวัยวะเพศจะสามารถแข็งตัวได้และแข็งได้นานพอ	2.87±1.22	3.63±1.15	-2.491	0.016
2. บ่อยครั้งแค่ไหนที่อวัยวะเพศแข็งตัวมากพอจนสอดใส่ได้	2.70±1.23	3.63±1.09	-3.092	0.003
3. บ่อยครั้งแค่ไหนที่ท่านสามารถคงการแข็งตัวอยู่ได้ หลังจากมีการสอดใส่แล้ว	2.43±1.00	2.83±0.98	-1.555	0.125
4. ระหว่างมีเพศสัมพันธ์ ยากแค่ไหนที่ท่านจะคงการแข็งตัวของอวัยวะเพศจนมีเพศสัมพันธ์สำเร็จ	2.47±0.73	2.73±0.94	-1.223	0.226
5. บ่อยครั้งแค่ไหนที่คุณมีความรู้สึกพึงพอใจจากการมีเพศสัมพันธ์นั้น	2.30±0.79	2.93±0.94	-2.811	0.007
6. คะแนนรวม	12.77±4.32	15.77±4.66	-2.584	0.012

ตารางที่ 5 แสดงสัดส่วน Erection Hardness Score ก่อนและหลังการรักษา 5 ครั้ง และ 10 ครั้ง

ช่วงระดับ IIEF-5 score	สัดส่วน IIEF-5 Score จำนวน (%)		
	ก่อนรักษา	หลังรักษา 5 ครั้ง	หลังรักษา 10 ครั้ง
เตี้ยหู้ (ระดับ 1)	2 (6.7)	1 (3.3)	-
กล้วยปอกเปลือก (ระดับ 2)	9 (25.0)	10 (33.3)	6 (20.0)
กล้วยไม่ปอกเปลือก (ระดับ 3)	19 (63.3)	17 (56.7)	16 (53.3)
แตงกวา (ระดับ 4)	-	2 (6.7)	8 (26.7)

หมายเหตุ *** เตี้ยหู้ หมายถึง อวัยวะเพศสามารถขยายตัวได้ แต่ไม่มีความแข็งตัวแม้แต่นิดเดียว

*** กล้วยปอกเปลือก หมายถึง อวัยวะเพศแข็งตัวในระดับหนึ่ง แต่ไม่เพียงพอสำหรับการสอดใส่

*** กล้วยไม่ปอกเปลือก หมายถึง อวัยวะเพศแข็งตัวได้ เพียงพอสำหรับการสอดใส่ แต่อาจอ่อนตัวลงคัน

*** แตงกวา หมายถึง ภาวะปกติ

5. ผลข้างเคียงที่อาจเกิดขึ้นหลังการฝังเข็มในการรักษาภาวะเสื่อมสมรรถภาพทางเพศ

พบว่าผู้เข้าร่วมวิจัย จำนวน 25 ราย คิดเป็น 83.3% ไม่พบอาการข้างเคียงหลังการรักษาด้วยการฝังเข็ม แต่มีผู้เข้าร่วมวิจัย จำนวน 5 ราย คิดเป็น 16.7% มีอาการปวดระบมเล็กน้อยบริเวณจุดฝังเข็ม และผิวหนังฟกช้ำ เขียว แนะนำให้พักผ่อน งดออกกำลังกาย งดช่วยตัวเอง และงดมีเพศสัมพันธ์ ในวันที่รับการรักษา หลังจากนั้นผู้เข้าร่วมวิจัยทุกรายอาการปวดระบมดีขึ้น และหายเองภายในเวลา 1-2 วัน รอยฟกช้ำหายไปใน 1 สัปดาห์ แสดงในตารางที่ 6



ตารางที่ 6 ตารางแสดงผลข้างเคียงที่อาจเกิดขึ้นหลังการฝังเข็มในการรักษาภาวะเสื่อมสมรรถภาพทางเพศ

	จำนวน (%)	อาการ
ไม่พบอาการข้างเคียง	25 (83.3)	-
พบอาการข้างเคียง	5 (16.7)	- อาการปวดระบมเล็กน้อย (mild pain) - ผิวน้ำพุกซ้ำ เชื้อย

อภิปรายและสรุปผลการวิจัย

จากผลการวิจัยเชิงทดลองทางคลินิก (Experimental clinical trial) เพื่อศึกษาประสิทธิผลของการฝังเข็มรักษาภาวะเสื่อมสมรรถภาพทางเพศ และผลข้างเคียงหลังการรักษา ในกลุ่มอาสาสมัครเพศชาย อายุ 30-60 ปี จำนวน 30 ราย โดยแบบประเมิน IIEF-5 และ EHS ได้แก่ คะแนนความถี่ที่อวัยวะเพศจะสามารถแข็งตัวได้และแข็งได้นานพอ คะแนนความถี่ที่อวัยวะเพศแข็งตัวมากพอจนสอดใส่ได้ คะแนนความถี่ที่อวัยวะเพศสามารถคงการแข็งตัวอยู่ได้หลังจากมีการสอดใส่แล้ว คะแนนความถี่ในการแข็งตัวของอวัยวะเพศจนมีเพศสัมพันธ์สำเร็จ คะแนนความถี่ในความรู้สึกพึงพอใจจากการมีเพศสัมพันธ์ และคะแนน IIEF-5 score ในภาพรวม โดยพิจารณาการเปลี่ยนแปลงและวิเคราะห์ผลทางสถิติ พบว่าผู้เข้าร่วมวิจัย 30 ราย มีอายุเฉลี่ย 45.2 ปี มีค่าเฉลี่ยดัชนีมวลกาย 24.29 kg/m^2 ซึ่งอยู่ในเกณฑ์น้ำหนักเกิน และมีค่าเฉลี่ยระยะเวลาที่มีภาวะเสื่อมสมรรถภาพ 33.9 เดือน โดยมีระดับความรุนแรงของภาวะเสื่อมสมรรถภาพทางเพศ (IIEF-5 score) อยู่ในระดับปานกลาง 33.3% และส่วนใหญ่มีระดับความแข็งตัวของอวัยวะเพศ (EHS) เทียบเท่ากับไม่ปอกเปลือก 66.7%

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาทางเลือกในการรักษาภาวะเสื่อมสมรรถภาพทางเพศชาย ซึ่งมีแนวโน้มจะเพิ่มมากขึ้นเรื่อยๆ ประกอบกับการรักษาในปัจจุบันมีค่าใช้จ่ายที่สูงและอาจเกิดผลข้างเคียงจากการใช้ยาได้ การฝังเข็มจึงเป็นทางเลือกหนึ่งที่น่าสนใจ ต้นทุนในการใช้อุปกรณ์ไม่สูง และได้รับการยอมรับจากองค์การอนามัยโลก (WHO) ว่าสามารถรักษาภาวะเสื่อมสมรรถภาพให้ประสิทธิผลที่ดี แต่ในปัจจุบันประเทศไทยยังขาดแคลนงานวิจัยเกี่ยวกับการฝังเข็มรักษาภาวะเสื่อมสมรรถภาพทางเพศชาย ทางคณะผู้วิจัยจึงมีแนวคิดในการศึกษาประสิทธิผลของการรักษาภาวะเสื่อมสมรรถภาพทางเพศด้วยการฝังเข็มโดยการศึกษาครั้งนี้เป็นการศึกษาจากผู้ร่วมวิจัยเพศชายที่มีภาวะเสื่อมสมรรถภาพทางเพศอายุเฉลี่ยอยู่ในวัยกลางคน ที่มีอาการมาเป็นระยะเวลาประมาณ 3 ปี มีค่าดัชนีมวลกาย (BMI) อยู่ในเกณฑ์น้ำหนักเกิน มีค่า IIEF-5 score อยู่ในระดับปานกลาง และมีระดับ EHS เทียบเท่ากับไม่ปอกเปลือก แต่หลังการรักษาด้วยการฝังเข็มพบว่าค่าเฉลี่ย IIEF-5 score และแต่ละตัวชี้วัด หลังการรักษา 5 และ 10 ครั้ง ให้ประสิทธิผลที่ดีขึ้นในทุกด้าน ค่า IIEF-5 score สามารถเพิ่มขึ้นได้ 1 ระดับ เป็นระดับเล็กน้อยถึงปานกลาง ผลคะแนนแต่ละตัวชี้วัดโดยเฉพาะ “ความถี่ที่อวัยวะเพศจะสามารถแข็งตัวได้และแข็งได้นานพอ” “ความถี่ที่อวัยวะเพศแข็งตัวมากพอจนสอดใส่ได้” และ “ความถี่ในความรู้สึกพึงพอใจจากการมีเพศสัมพันธ์” สามารถให้ประสิทธิผลที่ดีอย่างชัดเจน ในส่วนของระดับ EHS หลังการรักษา 5 และ 10 ครั้ง สามารถเพิ่มขึ้นได้ 1 ระดับ เป็นเทียบเท่ากับไม่ปอกเปลือก ซึ่งให้ประสิทธิผลที่ดีเช่นกัน

ประสิทธิผลที่เกิดขึ้นน่าจะเป็นผลมาจากการฝังเข็มบริเวณจุด Baliao (BL31-34) ที่ช่วยกระตุ้นระบบประสาทพาราซิมพาเทติก (parasympathetic nerve) ซึ่งอยู่บริเวณไขสันหลังระดับ S2-S4 มีหน้าที่ควบคุมการขยายตัวของหลอดเลือดบริเวณองคชาต (vasodilatation) และทำให้องคชาตเกิดการแข็งตัวขึ้น [9] อีกทั้งการฝังเข็มบริเวณจุด Huiyin (CV1), Qugu (CV2), Qichong (ST30), Zhongji (CV3) Qihai (CV6), Guanyuan (CV4) จะช่วยเพิ่มกำลังในการหดและคลายตัวของกล้ามเนื้ออุ้งเชิงกราน (pelvic floor muscles) ทำให้เนื้อเยื่อ corpus cavernosum กักเก็บเลือดได้มากขึ้น ส่งผลให้อวัยวะเพศแข็งตัวได้นานขึ้นด้วย [10, 11] นอกจากนี้การฝังเข็มบริเวณจุด Sanyinjiao (SP6) จะช่วยกระตุ้น Tibial nerve ซึ่งทำหน้าที่ควบคุมการทำงานของระบบทางเดินปัสสาวะ จึงเป็นการรักษาภาวะเสื่อมสมรรถภาพทางเพศโดยทางอ้อมได้เช่นกัน [12] เมื่อใช้จุดเหล่านี้ร่วมกัน ผลลัพธ์ที่ได้จึง



เป็นการกระตุ้นระบบประสาทที่ควบคุมการแข็งตัว และระบบการไหลเวียนเลือดภายในองคชาต ทำให้ประสิทธิภาพในการแข็งตัวขององคชาตดีขึ้น ดังนั้นการรักษาภาวะเสื่อมสมรรถภาพด้วยการฝังเข็มจึงน่าจะเป็นทางเลือกในการรักษาอีกวิธีที่เหมาะสมสำหรับผู้มีภาวะเสื่อมสมรรถภาพทางเพศจากสาเหตุทางกายภาพ

ผลการศึกษาอาการข้างเคียง สำหรับผู้เข้าร่วมวิจัยที่ไม่เคยรักษาด้วยการฝังเข็มมาก่อน อาจทำให้รู้สึกกลัวและกังวลเกี่ยวกับวิธีการรักษาและความปลอดภัย อีกทั้งในขั้นตอนการรักษาสำหรับผู้เข้าร่วมวิจัยที่มีความอ่อนไหวต่อการรับรู้ความรู้สึกเจ็บ อาจทำให้เกิดผลข้างเคียงเชิงลบได้หลังทำการรักษา เช่น อาการเจ็บ ระบม ผื่นขึ้น ไข้ หนาวสั่น เป็นต้น แต่จากการศึกษาครั้งนี้พบว่าผู้เข้าร่วมวิจัยส่วนใหญ่ไม่พบอาการข้างเคียง เนื่องจากทางผู้ทำวิจัยได้อธิบายถึงหลักการ วิธีการ และความปลอดภัยก่อนการรักษา ทำให้ผู้เข้าร่วมวิจัยลดความวิตกกังวลได้ แต่อย่างไรก็ตามควรมีการสอบถามและบันทึกข้อมูลเก็บไว้ เพื่อดูแลอย่างเหมาะสมต่อไป

เอกสารอ้างอิง

1. NIH releases consensus statement on impotence. *Am Fam Physician* 1993;48(1):147-50.
2. Ayta IA, McKinlay JB, Krane RJ. The likely worldwide increase in erectile dysfunction between 1995 and 2025 and some possible policy consequences. *BJU Int* 1999;84(1):50-6.
3. Derogatis LR, Burnett AL. The epidemiology of sexual dysfunctions. *J Sex Med* 2008;5(2):289-300.
4. Quilter M, Hodges L, von Hurst P, Borman B, Coad J. Male Sexual Function in New Zealand: A Population-Based Cross-Sectional Survey of the Prevalence of Erectile Dysfunction in Men Aged 40-70 Years. *J Sex Med* 2017;14(7):928-36.
5. Laumann EO, Waite LJ. Sexual dysfunction among older adults: prevalence and risk factors from a nationally representative U.S. probability sample of men and women 57-85 years of age. *J Sex Med* 2008;5(10):2300-11.
6. Permpongkosol S, Kongkand A, Ratana-Olarn K. Increased prevalence of erectile dysfunction (ED): results of the second epidemiological study on sexual activity and prevalence of ED in Thai males. *Aging Male* 2008;11(3):128-33.
7. World Health Organization. *Acupuncture: Review and Analysis of Reports on Controlled clinical trials*. 1st ed. Geneva: Ebrary, Inc.;2002.
8. Wayne WD, Chad LC. *Biostatistics A Foundations for Analysis in the Health Sciences*. 10th ed. United States of America: John Wiley & Sons, Inc.;2013.
9. Lai JS, Chen YD, Ruan CL. Electroacupuncture at Baliao points for erectile dysfunction after stroke: a randomized controlled trial. *Zhongguo Zhen Jiu* 2023;43(2):158-62.
10. Shafik A, Shafik I, El-Sibai O. Effect of external anal sphincter contraction on the ischiocavernosus muscle and its suggested role in the sexual act. *J Androl* 2006;27(1):40-4.
11. Lai BY, Cao HJ, Yang GY, et al. Acupuncture for Treatment of Erectile Dysfunction: A Systematic Review and Meta-Analysis. *World J Mens Health* 2019;37(3):322-38.
12. Guo Y, Bao YJ, Gu ZJ. Effect of massage at Sanyinjiao (SP6) Combined with Low-Frequency pulse feedback Electrical Stimulation on Pelvic Floor Function and Frequency of Urinary Incontinence in Patients with Postpartum Stress Urinary Incontinence. *World J Tradit Chin Med* 2023;16(9):1826-30.



คำแนะนำในการเตรียมต้นฉบับบทความเพื่อตีพิมพ์ใน วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี หัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ

(Huachiew Chalermprakiet 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) ทั้งรูปแบบภาษาไทยและภาษาอังกฤษ 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 ปิยะโชคณกุล. 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. วรางคนา 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.ได้ถอนบน 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

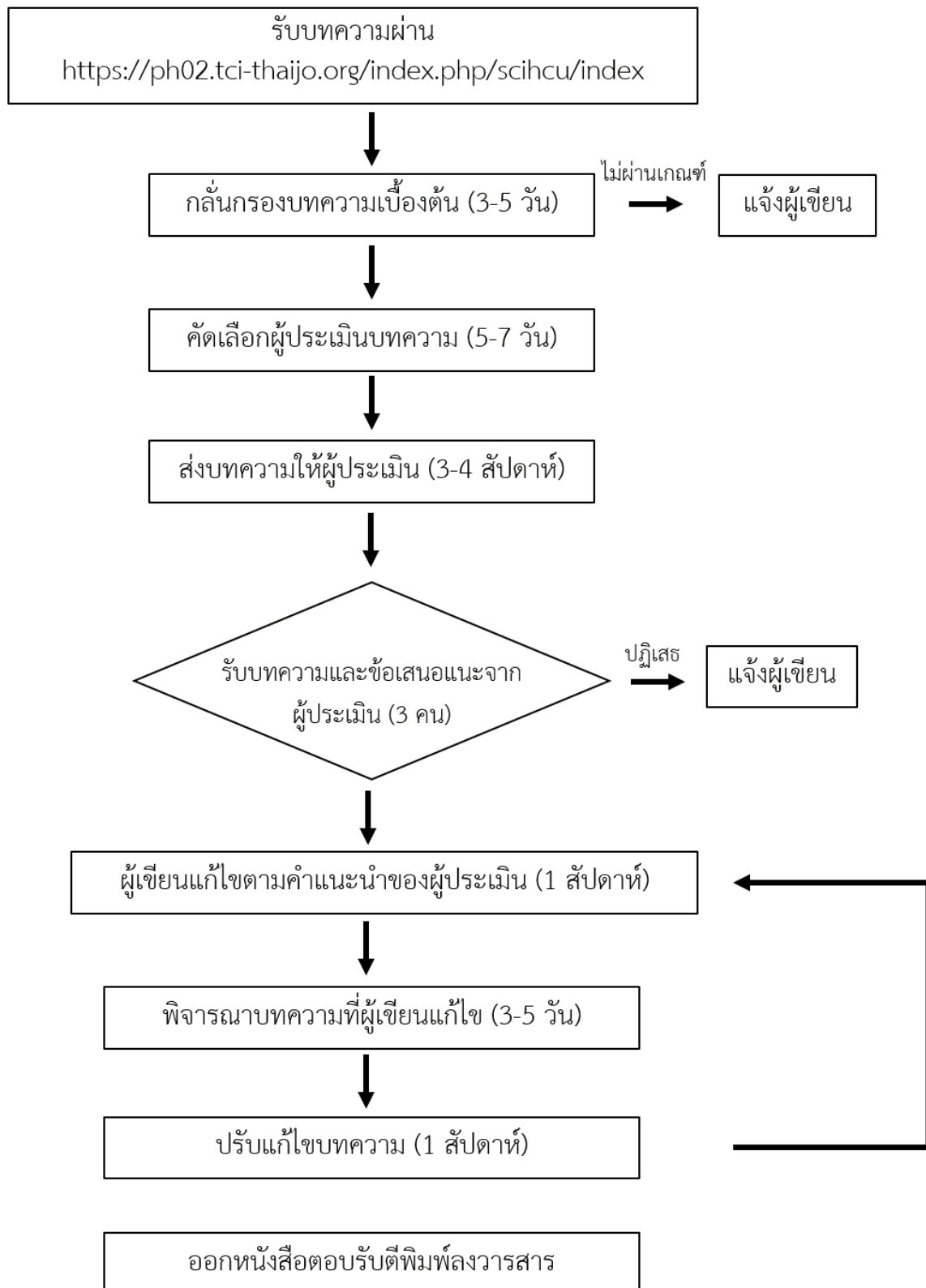
สามารถติดต่อสอบถามข้อมูลได้ที่ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ เลขที่ 18/18 ถนนเทพรัตน กม.18 ตำบลบางโฉลง อำเภอบางพลี สมุทรปราการ 10540 โทรศัพท์ 02-312-6300 ต่อ 1180, 1213 โทรศัพท์มือถือ 084-9091766 อีเมล hcujournal.sci@gmail.com



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

สาขาวิชาวิทยาการคอมพิวเตอร์

มุ่งเน้นผลิตบัณฑิตให้มีความรู้และทักษะปฏิบัติในการพัฒนาซอฟต์แวร์และการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีดิจิทัลที่เกี่ยวข้องกับวิทยาการคอมพิวเตอร์

โอกาสในการประกอบอาชีพ

1. โปรแกรมเมอร์ (Programmer)
2. นักพัฒนาซอฟต์แวร์ (Software Developer)
3. วิศวกรซอฟต์แวร์ (Software Engineer)
4. นักวิเคราะห์ระบบ (System Analyst)
5. ผู้ทดสอบซอฟต์แวร์ (Software Tester)
6. นักพัฒนาเว็บเต็มรูปแบบ (Full stack Web Developer)
7. ผู้ดูแลเว็บไซต์ (Webmaster)
8. ผู้ดูแลฐานข้อมูล (Database Administrator)
9. นักพัฒนาโปรแกรมประยุกต์บนโทรศัพท์เคลื่อนที่ (Mobile Application Developer)
10. วิศวกรเครือข่าย (Network Engineer)
11. ผู้ดูแลและจัดการเครือข่าย (Network Administrator)
12. ผู้วิเคราะห์ข้อมูลดิจิทัล (Digital data Analyst)
13. ผู้เชี่ยวชาญด้านไอที (IT Specialist)
14. นักเทคโนโลยีดิจิทัล (Digital Technologist)
15. นักวิจัยทางด้านคอมพิวเตอร์ (Computer Researcher)



COMPUTING AND DIGITAL
TECHNOLOGY, HCU





คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ หลักสูตรที่เปิดสอน

สาขาวิชาปัญญาประดิษฐ์

มุ่งเน้นผลิตบัณฑิตให้มีความรู้และทักษะปฏิบัติ

ในการเขียนโปรแกรมและประยุกต์ใช้เครื่องมือที่เกี่ยวข้องกับปัญญาประดิษฐ์ สามารถบูรณาการความรู้ในศาสตร์ปัญญาประดิษฐ์ร่วมกับความรู้ในศาสตร์อื่น



โอกาสในการประกอบอาชีพ

- 1.วิศวกรปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence Engineer)
- 2.นักวิทยาศาสตร์ข้อมูล (Data Scientist)
- 3.วิศวกรข้อมูล (Data Engineer)
- 4.วิศวกรระบบ (System Engineer)
- 5.นักวิจัยด้านปัญญาประดิษฐ์ (Artificial Intelligence Researcher)
- 6.ผู้ชำนาญการด้านดิจิทัล (Digital Specialist)
- 7.นักนวัตกรรม (Innovative Designer)
- 8.นักวิทยาศาสตร์เชิงบูรณาการ (Integrated Scientist)



COMPUTING AND DIGITAL
TECHNOLOGY, HCU





คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ หลักสูตรที่เปิดสอน

สาขาวิชาวิทยาศาสตร์การแพทย์

มุ่งเน้นการผสมผสานความรู้ด้านวิทยาศาสตร์การแพทย์กับศาสตร์ด้านเทคโนโลยี
ที่ทันสมัย

โอกาสในการประกอบอาชีพ

1. นักวิทยาศาสตร์ นักวิทยาศาสตร์การแพทย์ นักวิจัย
นักวิทยาศาสตร์การแพทย์ปฏิบัติการ นักวิชาการ และ
ผู้ช่วยวิจัย ในหน่วยงานต่าง ๆ เช่น กรมวิทยาศาสตร์
การแพทย์ กรมควบคุมโรค สถาบันมะเร็งแห่งชาติ
ศูนย์เทคโนโลยีด้านการแพทย์และสาธารณสุข สถาบัน
พยาธิวิทยา สถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์สาธารณสุข ศูนย์
วิทยาศาสตร์การแพทย์ และโรงพยาบาล เป็นต้น
2. ผู้ประกอบการด้านธุรกิจผลิตภัณฑ์เพื่อสุขภาพ การนำ
เข้าและจำหน่ายผลิตภัณฑ์ทางการแพทย์ เช่น ยา
สารเคมี ชุดตรวจ เครื่องมือ อุปกรณ์ทางการแพทย์
รวมทั้งผู้ประกอบการด้านการให้บริการทางสุขภาพ
3. ผู้บริหาร/พนักงานหน่วยงานภาคเอกชนด้านธุรกิจ
การแพทย์ที่เกี่ยวข้องกับการบริการตรวจวิเคราะห์
สารเคมี ยา เครื่องมือ และอุปกรณ์ต่าง ๆ ด้านการ
แพทย์



MEDICAL SCIENCE HCU





คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยหัวเฉียวเฉลิมพระเกียรติ หลักสูตรที่เปิดสอน

สาขาวิชาวิทยาการหุ่นยนต์สุขภาพ (นานาชาติ)

มุ่งเน้นผลิตบัณฑิตให้มีความรู้และทักษะปฏิบัติงานจริงในการพัฒนานวัตกรรม
ออกแบบและควบคุมหุ่นยนต์ อุปกรณ์และเครื่องมือที่ใช้ในทางด้านดูแลสุขภาพ
ผู้ป่วยหรือช่วยเหลือผู้สูงอายุในการใช้ชีวิต บุคลากรความรู้กับศาสตร์ที่เกี่ยวข้อง
ทางวิศวกรรมปัญญาประดิษฐ์และวิทยาการคอมพิวเตอร์

โอกาสในการประกอบอาชีพ

1. นักวิทยาการหุ่นยนต์ที่มีศักยภาพในการออกแบบและควบคุมระบบกลไกการทำงาน ของหุ่นยนต์ที่ใช้ในด้านสุขภาพ
2. ผู้ประกอบการด้านเทคโนโลยีทางด้านสุขภาพที่มี ความรู้ในกลไกหุ่นยนต์ดูแลสุขภาพ
3. นักเทคนิคด้านเครื่องมือและหุ่นยนต์ที่เกี่ยวข้องกับการดูแลสุขภาพ
4. ผู้จัดการเทคโนโลยีด้านหุ่นยนต์และปัญญาประดิษฐ์



DINSAW ROBOT FOR
ELDERLY ENTERTAINMENT
AND FACE-TO-FACE
CALLS [1]



ROBEAR-A ROBOTIC BEAR NURSE
TO LIFT PATIENTS IN JAPAN [2].

1. HURST, D. JAPAN LAYS GROUNDWORK FOR BOOM IN ROBOT CARERS. THE GUARDIAN.
2. QUANTIGENCE REPORT, ROBOTICS AND AI ASSIST IN CARING FOR THE ELDERLY. NANALYZE INT. J. ENVIRON. RES. PUBLIC HEALTH 2020, 17(11),381.



HEALTH ROBOTICS-SCI.HCU



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