

ปีที่ 3 ฉบับที่ 2 พฤษภาคม – สิงหาคม 2565
Vol.3 No.2 May – August 2022

- การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติทางกลของการพิมพ์ขึ้นงานสามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์ 6 แกน กฤต จันทรสมัย, วิโรช ทัศนะ, ธนกร หอมจำปา และภาสกร ชาลีสารนฤดากการ
- การผลิตแคลเซียมแลคเตทจากเปลือกหอยตลับเหลือทิ้งเพื่อลดปัญหาสิ่งแวดล้อม หยก วงษ์ชมพู, บรรจง บุญชม, นที โอภาส, จินดา ไชยช่วย และสรกิจ มงคล
- การวิเคราะห์ปริมาณสารซาโปนินและประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อราของเก๋ายายม่อม สุภัทรา ขบวนฉลาด และปวีณา สาสิทธิ์
- การพัฒนาการผลิตไวน์จากข้าวโพดโดยใช้ *Saccharomyces cerevisiae* อมรรัตน์ สุวรรณโพธิ์ศรี, ธาณิกา อินแมน, ปฐมาภรณ์ ทิลาภรณ์, คมสันต์ สุป้อง พริยาภรณ์ อันอัทมภิมา, ยุกา บุญมี และดุสิต ศรีวิล
- การศึกษาการเจริญเติบโต การดูดซับ และการสะสมโลหะหนักของทานตะวัน (*Helianthus annuus* L.) ที่ปลูกด้วยสารละลายที่มีแคดเมียมและสังกะสีร่วมกับ ปิยาภรณ์ วราบุสันตกุล, เวชฎา เพนาค และโชติวุฒิ เก้ายอดสิงห์
- ความหลากหลายของตัวอ่อนแมลงปอในลำธารและแม่น้ำบางพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย ชฎารัตน์ พัฒนรักษ์ และบุญเสฐียร บุญสูง
- ผลของน้ำหมักชีวภาพสูตรต่าง ๆ ที่มีต่อผลผลิตของมะเขือเปราะพันธุ์นางพญา กมลมนัส วัฒนา, รุ่งอรุณ พันธุ์เครือ และอารียา ศรีไพล
- ผลของความเค็มต่ออัตราการจับคู่ผสมพันธุ์ การฟักไข่ และอัตราการรอดตายของตัวอ่อนระยะชูเอียงของปูแป้น (*Varuna yui* Hwang & Takeda, 1984) ดุสิต ศรีวิล, ปฐมาภรณ์ ทิลาภรณ์, พริยาภรณ์ อันอัทมภิมา, อมรรัตน์ สุวรรณโพธิ์ศรี, พัสรา นิธิโรจน์ภักดี และกรรณิการ์ เจริญสุข
- ผลของอัตราการไหลของน้ำต่อการเจริญเติบโตของปลาดุกลูกผสม คณินาใบหยิกและคุณภาพน้ำในระบบบะควาโปนิสที่ใช้ น้ำหมุนเวียน พีระ มีทรัพย์, พวงเพชร พิมพ์จันทร์, กฤติมา กษมาวุฒิ และสำเนาวิ เสาวกุล
- ผลของวิธีการทำแห้งต่อคุณภาพทางกายภาพและทางเคมีของผงชาแก่่นตะวันในระหว่างการเก็บรักษาภาสุรี ฤทธิเลิศ

ISSN 2730 - 163X

คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์



คำนำ

วารสารวิจัยเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี เป็นวารสารที่จัดทำขึ้นเพื่อตีพิมพ์บทความที่เป็นประโยชน์ต่อวงการวิชาการและบุคคลทั่วไป โดยมีสาขาย่อย 3 สาขา ได้แก่ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี เกษตรศาสตร์ และวิศวกรรมศาสตร์ โดยวารสารฉบับนี้ได้เผยแพร่ผลงานที่มีเนื้อหาทางด้านวิชาการ การสร้างองค์ความรู้ การบูรณาการ และข้อมูลอันเป็นประโยชน์จากคณาจารย์ นักศึกษา และผู้เชี่ยวชาญในสาขาวิชาต่าง ๆ เพื่อจะนำไปสู่การยกระดับคุณภาพชีวิต รวมทั้งก่อให้เกิดประโยชน์ทางด้านวิชาการแก่ผู้สนใจทั่วไป โดยมีบทความ 10 เรื่อง ที่มีเนื้อหาหลากหลาย ได้แก่ 1) การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อสมบัติทางกลของการพิมพ์ขึ้นงานสามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์ 6 แกน 2) การผลิตแคลเซียมแลคเตทจากเปลือกหอยตลับเหลือทิ้งเพื่อลดปัญหาสิ่งแวดล้อม 3) การวิเคราะห์ปริมาณสารซาโปนินและประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อราของเห็ดยาหม่อม 4) การพัฒนาการผลิตไวน์จากข้าวโพดโดยใช้ *Saccharomyces cerevisiae* 5) การศึกษาการเจริญเติบโต การดูดซับ และการสะสมโลหะหนักของทานตะวัน (*Helianthus annuus* L.) ที่ปลูกด้วยสารละลายที่มีแคดเมียมและสังกะสีร่วมกัน 6) ความหลากหลายของตัวอ่อนแมลงปอในลำธารและแม่น้ำบางพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย 7) ผลของน้ำหมักชีวภาพสูตรต่าง ๆ ที่มีต่อผลผลิตของมะเขือเปราะพันธุ์นางพญา 8) ผลของความเค็มต่ออัตราการจับคู่ผสมพันธุ์ การฟักไข่ และอัตราการรอดตายของตัวอ่อนระยะซูเอียของปูแป้น (*Varuna yui* Hwang & Takeda, 1984) 9) ผลของอัตราการไหลของน้ำต่อการเจริญเติบโตของปลาตุ๊กลูกผสม คะน้าใบหยิก และคุณภาพน้ำในระบบบ่อควาโปนิกส์ที่ใช้น้ำหมุนเวียน 10) ผลของวิธีการทำแห้งต่อคุณภาพทางกายภาพและทางเคมีของผงชาแก่นตะวันในระหว่างการเก็บรักษา

โดยบทความได้ผ่านการพิจารณา และการกลั่นกรอง จากผู้ทรงคุณวุฒิทั้งภายในและภายนอกมหาวิทยาลัย กองบรรณาธิการขอขอบคุณนักวิจัยทุกท่านที่ได้ส่งบทความเข้ามาขอรับการตีพิมพ์ในวารสาร และหวังเป็นอย่างยิ่งว่าบทความในวารสารฉบับนี้จะก่อให้เกิดประโยชน์ทางวิชาการของประเทศไทยต่อไป

กองบรรณาธิการ

วารสารเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี



วารสารเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี Agriculture and Technology Journal

วัตถุประสงค์ เพื่อเผยแพร่ความรู้และผลงานวิชาการทางด้านการเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี รวมทั้งเป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนความคิดเห็นทางวิชาการเชิงสร้างสรรค์ เพื่อส่งเสริมอาจารย์ นักวิชาการ นักวิจัย นักศึกษา และผู้ที่เกี่ยวข้องให้มีส่วนร่วมในการถ่ายทอดองค์ความรู้ เทคโนโลยีหรือนวัตกรรมแก่สังคม

เจ้าของ/สำนักงานวารสาร คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี 145 หมู่ 15 ต.นอกเมือง อ.เมืองสุรินทร์ จ.สุรินทร์ 32000
โทร. 044-153093 โทรสาร. 044-153093

E-mail: atj.rmuti@gmail.com

Website: <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/atj/index>

ที่ปรึกษาบรรณาธิการ	รศ.ดร.สำเนา	เสาวกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วข.สุรินทร์
บรรณาธิการ	ผศ.ดร.วุฒิชัย	สิทธิวงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วข.สุรินทร์
รองบรรณาธิการ	ดร.พงศ์ภัทร	เกียรติประเสริฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วข.สุรินทร์
ผู้ช่วยบรรณาธิการ	ดร.ปวีณา	สาส์ทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วข.สุรินทร์
	อาจารย์อภัยวิทย์	ไชยวิชระกัมพล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วข.สุรินทร์

กองบรรณาธิการผู้ทรงคุณวุฒิ

ศ.ดร.สนั่น	จอกลอย	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศ.ดร.สุขสันต์	ห่อพิบูลสุข	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
ศ.ดร.อนันต์	พลธานี	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศ.ดร.ธเนศ	เสถียรนาม	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศ.ดร.ทวนทอง	จุฑาเกต	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ศ.ดร.ปิยะดา	ธีระกุลพิศุทธิ์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศ.ดร.อุทัยรัตน์	ณ นคร	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ศ.ดร.อลงกลด	แทนอมทอง	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศ.ดร.สุวัจน์	ธัญรส	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ศ.ดร.เมธา	วรรณพัฒน์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ศ.ดร.สิงหนาท	พวงจันทร์แดง	มหาวิทยาลัยขอนแก่น

กองบรรณาธิการ

ศ.ดร.กุลเชษฐ์ เพียรทอง	เพียรทอง	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
พล.อ.ต.ศ.ดร.สรกฤช ศรีเกษม	ศรีเกษม	โรงเรียนนายเรืออากาศนวมินทกษัตริยาธิราช
รศ.ดร.พนธ์วัศ	สัมพันธ์พานิช	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รศ.ดร.ปรเมศ	บรรเทิง	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร.ธนิษฐา	ทรรพนันท์	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.อรพินท์	จินตสถาพร	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.รัชพล	สันติวรกร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร.กริช	สมกันธา	มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี
รศ.ดร.บุญเสถียร	บุญสูง	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.สุรพล	แสนสุข	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
รศ.ดร.วิศิษฐ์พร	สุขสมบัติ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี
รศ.ดร.บรรจง	บุญชม	สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร.วีระเวทย์	อุทไธ	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผศ.ดร.อังคณา	บุญยิต	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผศ.ดร.เอื้อมพร	จันทร์สองดวง	มหาวิทยาลัยราชภัฏร้อยเอ็ด
ผศ.ดร.พัชรินทร์	อาตมียะนันท์	มหาวิทยาลัยวงษ์ชวลิตกุล
ผศ.ดร.ภาณุพล	หงษ์ภักดี	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผศ.ดร.อรอนงค์	ภูสีฤทธิ์	มหาวิทยาลัยราชภัฏร้อยเอ็ด
ผศ.ดร.สิริภัทร	เชี่ยวชาญวัฒนา	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผศ.ดร.บัณฑิต	ยวงสร้อย	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผศ.ดร.รัตติกาล	เสนน้อย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วช.บางพระ
ผศ.ดร.พัชริน	ส่งศรี	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผศ.ดร.น.สพ.สุทธิดิล	ปิยะเดชสุนทร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วช.สุรินทร์
ผศ.ดร.รัตนจิรา	รัตนประเสริฐ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วช.สุรินทร์
ผศ.ดร.ศุภลักษณ์	เกตุดากแดด	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วช.สุรินทร์
ดร.สุทธิขันธ์	นิลฤทธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วช.สุรินทร์
ดร.สุริยา	อุดด้วง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วช.สุรินทร์
ดร.ทิวากร	อำพาพล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วช.สุรินทร์
ดร.วิภาสทธิ์	หิรัญรัตน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วช.สุรินทร์
ดร.เรวัฒน์	เต็มกล้า	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วช.สุรินทร์
ดร.นิตยา	ภูงาม	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วช.สุรินทร์
อาจารย์ปรัชญา	บำรุงกุล	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วช.สุรินทร์

กำหนดออกวารสาร

- พิมพ์เผยแพร่ราย 4 เดือน
- ฉบับที่ 1 ประจำเดือน มกราคม – เมษายน
 - ฉบับที่ 2 ประจำเดือน พฤษภาคม – สิงหาคม
 - ฉบับที่ 3 ประจำเดือน กันยายน – ธันวาคม

ต้นฉบับที่ได้รับการตีพิมพ์ถือเป็นลิขสิทธิ์ของวารสารเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยีและบทความในวารสารเป็นแนวคิดของผู้แต่งมิใช่เป็นแนวคิดของคณะกรรมการจัดทำวารสาร และมีใช่เป็นความรับผิดชอบของคณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี

รายนามผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความ

ปีที่ 3 ฉบับที่ 2

รองศาสตราจารย์ ดร.ปราณีต	งามเสน่ห์	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
รองศาสตราจารย์ ดร.วีระเวทย์	อุทโท	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
รองศาสตราจารย์ ดร.วรรณวิภา แก้วประดิษฐ์ พลพินิจ		มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรลัดดา	เจือจันทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วุฒิชัย	สิทธิวงษ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิไลพร	อินสุวรรณ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัตติกาล	เสนน้อย	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุจินต์	จิระชีวะนันท์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชาดา	เลาหศิลปสมจิตร	มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ขวัญเดือน	รัตนา	มหาวิทยาลัยราชภัฏอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สนธยา	กุลกัลยา	มหาวิทยาลัยราชภัฏรำไพพรรณี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เพ็ญ	ผาใต้	มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.จตุพร	หงส์ทองคำ	มหาวิทยาลัยราชภัฏร้อยเอ็ด
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรสา	ประสิทธิ์นอก	มหาวิทยาลัยมหาสารคาม
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิระพันธ์	สีหานาม	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์	อ่อนสอาด	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิศารัตน์	ตั้งไพโรจน์วงศ์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรศิกุลญา	ธราธิมา	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประจวบ	ฉายบุ	มหาวิทยาลัยแม่โจ้
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อมรศักดิ์	สวัสดิ	มหาวิทยาลัยวลัยลักษณ์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ มาโนช	ชำเจริญ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
อาจารย์ ดร.วรรณวิภา	พินระ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร
อาจารย์ ดร.เทียมมะณีย์	รัตนวิระพันธ์	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
อาจารย์ ดร.สุทธนา	ปลอดสมบูรณ์	มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี
อาจารย์ ดร.แก้วภวิกา	รัตนจันทร์	กรมอุทยานแห่งชาติ สัตว์ป่าและพันธุ์พืช

บทบรรณาธิการ



คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน

วิทยาเขตสุรินทร์

วารสารเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี (Agriculture and Technology Journal) เป็นวารสารทางวิชาการด้านวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่มีผู้ทรงคุณวุฒิ (Peer review) โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อเผยแพร่ความรู้และผลงานวิชาการทางด้านการเกษตรและเทคโนโลยี รวมทั้งเป็นสื่อกลางในการแลกเปลี่ยนความคิดเห็นทางวิชาการเชิงสร้างสรรค์ เพื่อส่งเสริมอาจารย์ นักวิชาการ นักวิจัย นักศึกษา และผู้ที่เกี่ยวข้องให้มีส่วนร่วมในการถ่ายทอดองค์ความรู้ เทคโนโลยี หรือนวัตกรรมแก่สังคม ทำการเผยแพร่ในรูปแบบวารสารอิเล็กทรอนิกส์ฐานข้อมูลระบบออนไลน์ และรูปเล่ม จำนวน 3 ฉบับต่อปี ในทุก ๆ 4 เดือน โดยฉบับที่ 1 ระหว่างเดือนมกราคม-เมษายน ฉบับที่ 2 ระหว่างเดือนพฤษภาคม-สิงหาคม และฉบับที่ 3 ระหว่างเดือน กันยายน-ธันวาคม เปิดรับบทความที่เกี่ยวข้อง ได้แก่ เกษตรศาสตร์ วิศวกรรมศาสตร์ วิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี ให้เป็นไปตามรูปแบบของวารสาร

คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี ได้เห็นความสำคัญของการพัฒนาและส่งเสริมผลงานวิจัยเพื่อเผยแพร่เชิงบูรณาการให้มีคุณภาพ เกิดประโยชน์อย่างแท้จริง สำหรับฉบับนี้ มีบทความวิจัยด้วยกัน 10 เรื่อง ประกอบด้วยสาขาเกษตรศาสตร์ 3 เรื่อง สาขาวิศวกรรมศาสตร์ 1 เรื่อง สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี 6 เรื่อง โดยวารสารเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี (Agriculture and Technology Journal) เป็นวารสารที่มีคุณภาพและมีชื่อในศูนย์ดัชนีการอ้างอิงวารสารไทย (Thai-Journal Citation Index Centre; TC12)

กองบรรณาธิการขอขอบคุณผู้ทรงคุณวุฒิทุกท่านที่ให้ข้อเสนอแนะสำหรับในแต่ละบทความวิจัย ขอขอบคุณผู้เขียนทุกท่านที่ได้ส่งบทความอันเป็นประโยชน์ เผยแพร่สู่สาธารณะเพื่อพัฒนางานวิจัยของชาติต่อไป

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วุฒิชัย ลิทธิวงษ์

บรรณาธิการ

การศึกษาปัจจัยมีผลต่อสมบัติทางกลของการพิมพ์ชิ้นงานสามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์ 6 แกน	1
The study of factors affecting mechanical properties of 3D printing with 6-axis robotic arm	
กฤต จันทรัมย์ วิโรช ทศนะ ธนกร หอมจำปา และภาสกร ชาลิสานกฤดาการ	
การผลิตแคลเซียมแลคเตทจากเปลือกหอยตลับเหลือทิ้งเพื่อลดปัญหาสิ่งแวดล้อม	12
Calcium lactate production from clam shell waste to reduce environmental issues	
หยก วงษ์ขมภู บรรจง บุญชม นที โอภาสี จินดา ไชยช่วย และสรกิจจ์ มงคล	
การวิเคราะห์ปริมาณสารซาโปนินและประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อราของท้ายายม่อม	21
Analysis of saponin content and antifungal activity of East Indian Arrowroot	
สุภัทรา ขบวนฉลาด และปวีณา สาลีทอง	
การพัฒนาการผลิตไวน์จากข้าวโพดโดยใช้ <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	35
Development of corn wine production using <i>Saccharomyces cerevisiae</i>	
อมรรัตน์ สุวรรณโพธิ์ศรี ธัญธิกา อินแมน ปฐมาภรณ์ ทิลารักษ์ คมสันต์ สุป้อง	
พริยาภรณ์ อันอาตม์งาม ยุพา บุญมี และคุสิต ศรีวิไล	
การศึกษาการเจริญเติบโต การดูดซับ และการสะสมโลหะหนักของทานตะวัน (<i>Helianthus annuus</i> L.) ที่ปลูกด้วยสารละลายที่มีแคดเมียมและสังกะสีร่วมกัน	48
The studied of growth, absorption and accumulation of heavy metals by sunflower (<i>Helianthus annuus</i> L.) grown on Cd-Zn co-contaminated solution	
ปิยาภรณ์ วรานุสันติกุล เจษฎา แพนาค และโชติวุฒิ แก้วยอดสิงห์	

ความหลากหลายของตัวอ่อนแมลงปอในลำธารและแม่น้ำบางพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย 63

Diversity of dragonfly larvae in some parts of northern Thailand

ชฎยาธร พัฒนรักษ์ และบุญเสฐียร บุญสูง

ผลของน้ำหมักชีวภาพสูตรต่าง ๆ ที่มีต่อผลผลิตของมะเขือเปราะพันธุ์นางพญา 76

The effects of various fermented bio-extract on yield of Thai striped eggplant

(*Solanum melongena* L.) variety Nang Pha Ya

กมลมนัส วัฒนา รุ่งอรุณ พันธุ์เครือ และอารียา ศรีไพล

ผลของความเค็มต่ออัตราการจับคู่ผสมพันธุ์ การฟักไข่ และอัตราการรอดตายของ 86

ตัวอ่อนระยะซุเอียของปูแป้น (*Varuna yui* Hwang & Takeda, 1984)

Effect of Salinity on Mating, Hatching and Survival Rate of the Zoea Larvae of

Sundaic Paddler Crab (*Varuna yui* Hwang & Takeda, 1984)

ดุสิต ศรีวิไล ปฐมาภรณ์ ทิลารักษ์ พิริยาภรณ์ อันอาตม์งาม อมรรัตน์ สุวรรณโพธิ์ศรี

พัชรา นิธิโรจน์ภักดี และกรรณิการ์ เจริญสุข

ผลของอัตราการไหลของน้ำต่อการเจริญเติบโตของปลาดุกลูกผสม ค่น้ำใบหยิก 97

และคุณภาพน้ำในระบบบ่อควาโปนิสที่ใช้น้ำหมุนเวียน

Effect of water flow rates on growth of hybrid catfish (*Clarias macrocephalus* x *C. gariepinus*),

Curl leaf kale (*Brassica oleracea* var. *acephala*) and water quality parameters in aquaponic

recirculating system

พีระ มีทรัพย์ พวงเพชร พิมพ์จันทร์ กฤติมา กษมาวุฒิ และสำเนา เสาวกุล



ผลของวิธีการทำแห้งต่อคุณภาพทางกายภาพและทางเคมีของผงชาแก่นตะวัน
ในระหว่างการเก็บรักษา

110

Effect of drying methods on physical and chemical quality of
Jerusalem artichoke tea powders during storage

ภาสุรี ฤทธิเลิศ

Received: June 30, 2022; Revised: July 18, 2022; Accepted: July 20, 2022

การศึกษาปัจจัยมีผลต่อสมบัติทางกลของการพิมพ์ชิ้นงานสามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์ 6 แกน The study of factors affecting mechanical properties of 3D printing with 6-axis robotic arm

กฤต จันทรสมัย¹ วิโรจ ทัศนะ^{1*} ธนกร หอมจำปา¹ และภาสกร ชาลิสานกฤตการ²
Krit Chantarasamai¹, Wiroj Thasana^{1*}, Tanagorn Homchampa¹
and Phassakorn Chalisathanakritdakarn²

¹คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี วิทยาเขตสุรินทร์ จังหวัดสุรินทร์

²Air Conditioner Assembly Engineering Group, Daikin Industries (Thailand) LTD. จังหวัดชลบุรี

*Corresponding Author E-mail Address : wiroj.th@rmuti.ac.th

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการสร้างระบบการพิมพ์ชิ้นงานสามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์ 6 แกน ด้วยระบบป้อนเส้นใยพลาสติกชนิด ABS ที่ควบคุมผ่านโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ โดยศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติทางกลของเปอร์เซ็นต์การยึดตัวของพลาสติกที่พิมพ์ขึ้นด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ (Taguchi) สำหรับบอร์ทอกอนัลแอร์เรย์แอล 9 (3³) โดยมีปัจจัยควบคุม 3 ตัวแปร 3 ระดับ คือ สัญญาณพัลส์ 180, 190, 200 และระยะห่างระหว่างเส้นใยพลาสติก 0.9, 1.0, 1.1 มิลลิเมตร และอุณหภูมิหลอมละลายเส้นใยพลาสติก 190, 200, 210 องศาเซลเซียส จากผลการทดลองพบว่า ผลลัพธ์ของปัจจัยที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากระดับอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (Signal to-Noise Ratio; S/N) ที่ค่าเฉลี่ยสูงสุด คือ สัญญาณพัลส์ 200 และระยะห่างระหว่างเส้นใยพลาสติก 0.9 มิลลิเมตร และความร้อนสำหรับการละลายเส้นใยพลาสติก 210 องศาเซลเซียส และมีค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวมากที่สุดอยู่ที่ 3.422%

คำสำคัญ: การผลิตแบบเพิ่มเนื้อวัสดุ การพิมพ์สามมิติ หุ่นยนต์แขนกล การออกแบบการทดลองแบบทากูชิ

Abstract

The objective of this research is to study the fabrication of 3D printing system with a six-axis robot arm with an ABS plastic fiber feeding system controlled with a programmable logic controller. The study has been studied the variables affecting the mechanical properties of the percentage adhesion of printed plastics by using the Taguchi experimental design method with the L9 (3³) orthogonal array and three control factors with 3 levels: 180, 190, 200 pulse signal, and 0.9, 1.0, 1.1 mm plastic fiber spacing and fiber

melting temperature 190, 200, 210 degrees Celsius. The proposed approach of the study confirmed that the optimal factor results based on the highest mean of signal to-noise ratio (S/N) ratio level are 200 pulses and 0.9 mm plastic fiber spacing, and heat for plastic fiber melting 210 °C, and the most elongated percentage at 3.422%.

Keywords: Additive Manufacturing (AM), 3D printing, Robotic arm, Taguchi experimental design method

บทนำ

ปัจจุบันเทคโนโลยีและนวัตกรรมต่าง ๆ ได้มีการพัฒนาเพื่อตอบสนองความต้องการและอำนวยความสะดวกในการดำรงชีวิตของมนุษย์ เทคโนโลยีได้มีความก้าวหน้าและพัฒนาอย่างรวดเร็วจนสามารถประยุกต์ใช้ในภาคอุตสาหกรรมการผลิตแบบดิจิทัล และได้มีการนำหุ่นยนต์และการผลิตแบบเพิ่มเนื้อวัสดุ (Additive Manufacturing: AM) ไปประยุกต์ใช้อย่างแพร่หลายสำหรับในภาคอุตสาหกรรมการผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ ชิ้นส่วนไฟฟ้าและอิเล็กทรอนิกส์ ชิ้นส่วนแม่พิมพ์ ชิ้นส่วนอากาศยาน ซึ่งจำเป็นต้องนำเอาเทคโนโลยีสมัยใหม่แบบต่าง ๆ เข้ามาประยุกต์ใช้อย่างเหมาะสมเพื่อประโยชน์ในการเพิ่มประสิทธิภาพทางการผลิตและเพิ่มมูลค่าเพิ่มให้กับผลิตภัณฑ์ ซึ่งต้องมีความผิดพลาดน้อยและมีความละเอียดสูง

ในช่วงทศวรรษที่ผ่านมาการผลิตแบบ AM หรือที่เรียกว่าการพิมพ์สามมิติ เป็นการกำหนดกระบวนการของการเพิ่มเนื้อวัสดุ เพื่อสร้างวัตถุจากโมเดลสามมิติด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบในเลเยอร์ที่ต่อเนื่องกัน ซึ่งกระบวนการ AM แบบใหม่ได้รับการพัฒนาในช่วงเวลามากกว่า 20 ปีของการพัฒนา AM พร้อมกับการใช้งานในอวกาศ ยานยนต์ ชีวการแพทย์ ดิจิทัลอาร์ต การออกแบบสถาปัตยกรรม ฯลฯ ซึ่งเมื่อเร็ว ๆ นี้การเพิ่มขึ้นของเทคโนโลยี AM ยังคงเติบโตอย่างต่อเนื่อง เนื่องจากสามารถผลิตชิ้นงานได้ที่ต้นทุนต่ำในการสร้างต้นแบบอย่างรวดเร็วและการใช้งานด้านการผลิต โดยปัจจุบันส่วนที่โดดเด่นของอุตสาหกรรมการพิมพ์สามมิติมีหลายประเภท เช่น การพิมพ์แบบสเตอริโอไลต์เทอร์กราฟี (Stereolithography: SL), การพิมพ์แบบลามิเนต (Laminated Object Manufacturing: LOM), การพิมพ์แบบการดันวัสดุหลอม (Fused Deposition Modeling: FDM), การพิมพ์แบบซินเตอร์ด้วยเลเซอร์ที่คัดสรร (Selective Laser Sintering: SLS), และ การอัดรีด (Extrusion) เป็นต้น ซึ่งหนึ่งในกระบวนการพิมพ์แบบสามมิติที่ร้อนแรงที่สุดในการศึกษาวิจัยและพัฒนาในขณะนี้คือ การพิมพ์แบบ FDM ซึ่งจำเป็นต้องศึกษาค้นคว้าในการปรับปรุงสมบัติทางกลอย่างมีนัยสำคัญให้เพิ่มขึ้น การหาค่าที่เหมาะสมที่สุดของความหนาผิว และความถูกต้องแม่นยำทางมิติของชิ้นส่วนที่พิมพ์ขึ้นงาน 3 มิติ โดยใช้แนวทางวิธาทูซิ (Moza et al., 2015; Parandoush and Lin., 2017; Ahmad et al., 2019; Munproma and Limtasiri, 2019)

Tim et al. (2018) ได้เสนอการศึกษาแบบจำลองการพิมพ์แบบ FDM ซึ่งนำเสนอเชิงวิเคราะห์ภายในหัวฉีดของกระบวนการผลิตเส้นใยแบบหลอมรวมที่อัตราการหลอมเหลวสูงสุดที่ถูกควบคุมโดยแรงที่ส่งผลต่อสมบัติทางกล ซึ่งการเปรียบเทียบระหว่างการทดลองกับแบบจำลองแสดงให้เห็นว่าสมมติฐานที่ใช้ในการพัฒนาแบบจำลองนั้นเป็นไปได้ และแบบจำลองนั้นสามารถนำมาใช้เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพ และต่อมา Tan and Low. (2018) ได้เสนอการศึกษารางไฟฟ้าฝังตัวในวัตถุที่พิมพ์ 3 มิติโดยการผลิตเส้นใยผสมของวัสดุผสมที่เป็นสื่อกระแสไฟฟ้าแรงสูงเพื่อส่งผลต่อสมบัติทางกล และ Luan et al. (2018) ได้เสนอการศึกษาเทอร์โมพลาสติกเสริมแรงด้วยคาร์บอนไฟเบอร์แบบต่อเนื่องที่ตรวจสอบตัวเองโดยใช้กระบวนการรวมการพิมพ์สามมิติแบบสองวัสดุที่ส่งผลต่อสมบัติทางกล และต่อมา Carabina et al. (2021) ได้เสนอการศึกษาแนวทางการประหยัดพลังงานสำหรับการพิมพ์สามมิติด้วยหุ่นยนต์เดลด้าเชิงเส้นที่ติดตั้งสปริงที่เหมาะสมที่สุด และ Li et al. (2021) ได้เสนอการศึกษาเทคโนโลยีการพิมพ์ชีวภาพสามมิติด้วยหุ่นยนต์ในแหล่งกำเนิดเพื่อซ่อมแซมข้อบกพร่องของท่อนกระดูกขนาดใหญ่ แต่อย่างไรก็ตามงานวิจัยค้นคว้างกล่าวข้างต้นเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้เครื่องพิมพ์สามมิติแบบ FDM ด้วย

แขนหุ่นยนต์เพื่อปรับปรุงสมบัติทางกลเพื่อศึกษาการจับยึดตัวของพลาสติกก็ยังไม่มีการศึกษาค้นคว้าในการใช้งานอย่างแพร่หลาย

ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้คือ การสร้างระบบการพิมพ์ชิ้นงานสามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์ 6 แกน ด้วยระบบป้อนเส้นใยพลาสติกชนิด Acrylonitrile Butadiene Styrene (ABS) ที่ควบคุมผ่านโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ (Programmable Logic Control : PLC) เพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติทางกลของการจับยึดตัวของพลาสติกด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบทาคุชิ (Taguchi Method) โดยการศึกษารูปแบบของชุดพิมพ์ชิ้นงานสามมิติ หลักการทำงาน รวมไปถึงหลักการสร้างชุดพิมพ์ชิ้นงานสามมิติ โดยใช้ PLC ในการเชื่อมต่อระหว่างแขนหุ่นยนต์กับชุดพิมพ์ชิ้นงานสามมิติ เนื่องจากได้เล็งเห็นว่าการใช้เครื่องพิมพ์สามมิติหากต้องการชิ้นงานที่มีความซับซ้อนหรือมีขนาดใหญ่ เครื่องพิมพ์สามมิติจะต้องมีขนาดใหญ่ตาม ซึ่งแขนหุ่นยนต์มีความเหมาะสมและอิสระให้การเคลื่อนที่มากกว่า ทำให้สามารถพิมพ์ชิ้นงานที่ซับซ้อนหรือมีขนาดใหญ่ได้

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

การดำเนินการวิจัยเริ่มต้นโดยการศึกษาอุปกรณ์ของเครื่องพิมพ์ชิ้นงานสามมิติเพื่อนำมาวิเคราะห์และออกแบบชุดพิมพ์ชิ้นงานสามมิติที่จะนำมาติดตั้งกับแขนหุ่นยนต์ หลังจากเริ่มศึกษาอุปกรณ์ต่าง ๆ จนได้ชิ้นงานและรูปแบบของชุดพิมพ์ชิ้นงานสามมิติที่จะนำมาติดตั้งกับแขนหุ่นยนต์เสร็จแล้ว ดำเนินการออกแบบอุปกรณ์การพิมพ์สามมิติทั้งระบบทางกลและไฟฟ้า หลังจากนั้นก็หาข้อสรุปกันว่ารูปแบบของชุดพิมพ์ชิ้นงานสามมิติที่ได้ออกแบบนั้นสามารถทำงานได้หรือไม่ โดยวิเคราะห์ระบบการจำลองการเคลื่อนไหวก่อนขึ้นชิ้นส่วนต่าง ๆ ด้วยคอมพิวเตอร์ช่วยออกแบบ ถ้าผลการจำลองการเคลื่อนไหวก่อนถูกต้อง ก็ดำเนินการในขั้นตอนถัดไปคือ การสร้างระบบอุปกรณ์การพิมพ์สามมิติ หลังจากสร้างระบบเสร็จแล้วก็ดำเนินการทดสอบเบื้องต้นว่าสามารถใช้งานได้หรือไม่ และหลังจากที่ได้ทำการทดลองจนสามารถใช้งานได้แล้วจึงนำชุดอุปกรณ์การพิมพ์ชิ้นงานสามมิติไปติดตั้งกับแขนหุ่นยนต์พร้อมการต่อวงจรของระบบการพิมพ์ชิ้นงานสามมิติเข้ากับแขนหุ่นยนต์ เมื่อสามารถใช้งานได้จึงเริ่มนำไปพิมพ์ชิ้นงานทดสอบตามค่าตัวแปรต่าง ๆ ที่กำหนด เพื่อมาทดสอบความยืดหยุ่นของชิ้นงาน แล้วนำมาวิเคราะห์ผลโดยวิธีแบบทาคุชิและสรุปผลการทดลอง

1. วัสดุ และอุปกรณ์

การสร้างอุปกรณ์การพิมพ์สามมิติต่อเข้ากับแขนหุ่นยนต์ 6 แกน ในงานวิจัยนี้ใช้ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น Melfa RV-3S และการควบคุมแขนหุ่นยนต์ใช้โปรแกรม RT Toolbox3 เพื่อสั่งการเคลื่อนไหวดังแสดงในรูปที่ 1 และระบบป้อนการพิมพ์ชิ้นงานสามมิติใช้เส้นใยพลาสติกชนิด ABS ที่ขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 1.75 มม. ที่ควบคุมผ่าน PLC ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น FX3U-32MT/ES

2. การต่อวงจรไฟฟ้าของระบบการพิมพ์ชิ้นงานสามมิติ

การต่อวงจรของระบบการพิมพ์ชิ้นงานสามมิติสำหรับแขนหุ่นยนต์แบ่งออกเป็น 5 ส่วนหลัก ๆ ได้แก่ 1. การต่อวงจร Stepper Motor 42BYGH34 1.3A และ Microstep Driver TB6600 ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่มีหน้าที่ในการขับเคลื่อนมอเตอร์ให้สามารถเคลื่อนที่และปรับความเร็วของเส้นใยพลาสติกที่ขนาดหัวฉีด 1.75 มม. และ 2. การต่อวงจรของ Heated Bed MK2b PCB 214x214 เป็นตัวช่วยยึดให้เส้นใยที่ไหลออกมาจากหัวฉีดมีแรงตึงผิว ทำให้เส้นใยที่พิมพ์ออกมาไม่ไหลไปมาเกาะตัวอยู่กับที่ และ 3. การต่อวงจร Heat Tube ช่วยทำให้เส้นใยพลาสติกละลายและไหลออกจากหัวฉีดพลาสติก และ 4. การต่อวงจรอุปกรณ์ควบคุมอุณหภูมิ ซึ่งใช้อุปกรณ์รุ่น Temperature Controller TC4S-24R และรุ่น REX-C100FK02-M_AN



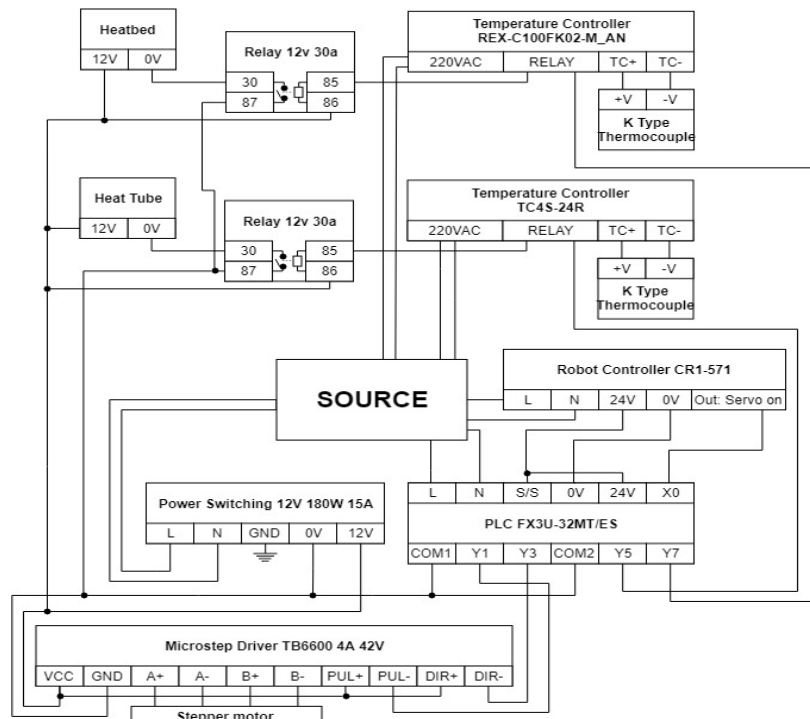
(ก) แขนหุ่นยนต์พิมพ์ชิ้นงาน 3 มิติ



(ข) ชุดหัวอัดรีดเส้นใยพลาสติก

รูปที่ 1 ระบบการพิมพ์สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์ 6 แกน ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น Melfa RV-3S

โดยทำหน้าที่เป็นอุปกรณ์สำหรับการควบคุมอุณหภูมิตัว Heat Tube ให้ได้อุณหภูมิที่ตามต้องการ และ 5. การต่อวงจรของการควบคุมหุ่นยนต์ (Robot Controller) ซึ่งเป็นอุปกรณ์ที่ใช้ในการควบคุมการเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์และเชื่อมไปยังอุปกรณ์ PLC เพื่อส่งสัญญาณไปยังระบบการพิมพ์ชิ้นงานสามมิติให้ทำงานได้ ดังแสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 การต่อวงจรทั้งหมดของระบบการพิมพ์ชิ้นงานสามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์

ระบบการพิมพ์ชิ้นงานสามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์ทั้ง 5 ส่วนนี้จะมีจุดร่วมกันคือต้องต่อเข้ากับ PLC FX3U โดยการเขียนในรูปแบบแลดเดอร์ไดอะแกรม (Ladder Diagram) ของโปรแกรม PLC ซึ่งจะกำหนดให้รับสัญญาณฝั่งป้อนเข้า (Input) 1 ตัว นั่นคือสัญญาณของการควบคุมหุ่นยนต์ เพื่อนำไปส่งสัญญาณของฝั่งป้อนออก (Output) ให้ทำงาน โดยอุปกรณ์ฝั่งป้อนออกจะมี 3 ตัว ได้แก่ Stepper Motor, Heatbed และ Heat Tube

3. การออกแบบการทดลองแบบทากูชิ

วิธีการของทากูชิเป็นวิธีการที่ใช้คัดกรองปัจจัย โดยคำนึงถึงปัจจัยที่ไม่สามารถควบคุมได้หรือปัจจัยรบกวนของกระบวนการ โดยจะดำเนินการทดลองตามออร์โธโกนอลอาร์เรย์ (Orthogonal Arrays) เพื่อลดจำนวนการทดลองให้เหมาะสมกับเงื่อนไขที่กำหนด ส่งผลทำให้ไม่ต้องทำการทดลองซ้ำ การวิเคราะห์ข้อมูลของทากูชิเพื่อกำหนดระดับของปัจจัยที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากระดับอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (Signal to Noise Ratio, S/N) ซึ่งแบ่งได้เป็น 3 กรณี คือ กรณียิ่งมียิ่งดี (Larger-the Better) กรณีค่ายิ่งน้อยยิ่งดี (Smaller-the Better) และกรณีค่าตรงเป้าหมายดีที่สุด (Target-the Better) (Moza et al., 2015; Ahmad et al., 2019; Munproma and Limtasiri, 2019) โดยในงานวิจัยนี้ทำการหาค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวของชิ้นงานพิมพ์สามมิติที่มากที่สุดเป็นกรณียิ่งมียิ่งดี (Larger-the Better) สามารถแสดงการคำนวณได้ดังนี้

กรณียิ่งมียิ่งดี (Larger-the Better) เป็นการสมมติอัตราส่วน S/N เป้าหมายคือค่าสูงสุดของผลตอบสนองและเป็นค่าที่เหมาะสมเมื่อแสดงรายการเพียงพิດความเพื่อกำหนดด้านล่างหาได้จากสมการดังนี้

$$S/N_L = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum \frac{1}{y^2} \right] \quad (1)$$

ซึ่งเป้าหมายของการทดลองสำหรับสถานการณ์กรณียิ่งมียิ่งดี คือค่ามากที่สุดของผลตอบของกระบวนการ แต่ค่า y มากที่สุดคือน้อยที่สุดของ $1/y$ และค่า $1/y$ นั้นเป้าหมายสูงสุดหาได้จากสมการที่ 2 ดังนี้

$$1/y = -10 \log \left[\frac{1}{n} \sum \frac{1}{y^2} \right] \quad (2)$$

จากข้อมูลข้างต้น ผู้วิจัยเลือกใช้ Orthogonal array แบบ L9 (3^3) ดังนั้นจะได้การทดลองทั้งหมด 9 การทดลอง ในการทดลองนี้ได้ศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวของชิ้นงานพลาสติกที่ได้จากการพิมพ์สามมิติ ที่มีทั้งหมด 3 ปัจจัย และแต่ละปัจจัยแบ่งเป็น 3 ระดับ ได้แก่ สัญญาณพัลส์ 3 สัญญาณได้แก่ 180, 190, 200 ระยะห่างระหว่างเส้นใยพลาสติก 3 ระยะได้แก่ 0.9, 1.0, 1.1 มิลลิเมตร และอุณหภูมิหลอมละลายเส้นใยพลาสติก 3 ระดับได้แก่ 190, 200, 210 องศาเซลเซียส แสดงดังตารางที่ 1 และเมื่อออกแบบการทดลองตาม Orthogonal Array แบบ L9 (3^3) ด้วยปัจจัยและระดับทั้งหมดของงานวิจัยจะได้ตารางสำหรับการทดลองการทดสอบเพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวของชิ้นงานพลาสติกที่ได้จากการพิมพ์สามมิติ แสดงดังแสดงตารางที่ 2

ตารางที่ 1 ปัจจัยและพารามิเตอร์ที่ใช้ในการทดลอง

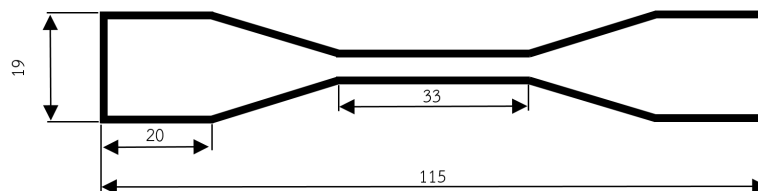
ปัจจัยควบคุม	ระดับการทดลอง		
	1	2	3
สัญญาณพัลส์	180	190	200
ระยะห่างระหว่างเส้นใย (mm)	0.90	1.0	1.10
อุณหภูมิหลอมละลายเส้นใย (°C)	190	200	210

ตารางที่ 2 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชิ้นงานพิมพ์สามมิติที่พิมพ์ตามมาตรฐานของ ASTM D638 Type IV

ชิ้นงานที่	สัญญาณพัลส์ มอเตอร์	ระยะห่างระหว่างเส้นใยพลาสติก (มิลลิเมตร)	ความร้อนสำหรับการละลายเส้นใยพลาสติก (องศาเซลเซียส)
1	180	0.9	200
2	180	1.0	210
3	180	1.1	190
4	190	0.9	210
5	190	1.0	190
6	190	1.1	200
7	200	0.9	190
8	200	1.0	200
9	200	1.1	210

4. การพิมพ์ชิ้นงาน 3 มิติด้วยหุ่นยนต์แขนกล

การพิมพ์ชิ้นงานสามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์ที่สร้างขึ้น จะทำการทดสอบโดยการพิมพ์ชิ้นงานตามมาตรฐานของวัสดุ ASTM D638 Type IV ของการทดสอบคุณสมบัติแรงดึงของพลาสติก โดยมีความกว้าง 19 ± 2 มิลลิเมตร ความยาว 115 ± 2 มิลลิเมตร และความหนา 2.1 ± 0.2 มิลลิเมตร ดังแสดงในรูปที่ 3



รูปที่ 3 ชิ้นงานพิมพ์สามมิติตามรูปแบบมาตรฐานของ ASTM D638 Type IV

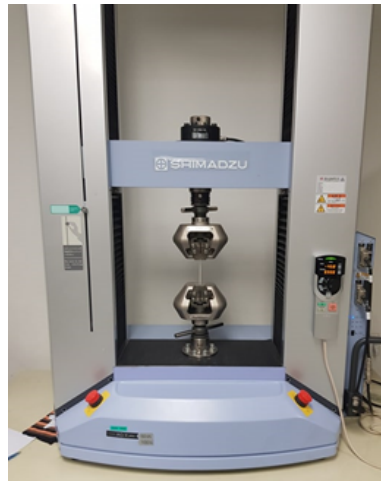
หลังจากที่กำหนดขนาดชิ้นงานการทดสอบดังรูปที่ 3 เรียบร้อย ผู้วิจัยได้นำไปเขียนแบบด้วยคอมพิวเตอร์ 3D แล้วนำไปพิมพ์เป็นชิ้นงานสามมิติด้วยโปรแกรมควบคุมแขนหุ่นยนต์ RT Toolbox3 ผ่าน PLC ยี่ห้อ Mitsubishi รุ่น FX3U 32MT/ES โดยพิมพ์ชิ้นงานสามมิติด้วยระบบป้อนเส้นใยพลาสติกชนิด ABS เป็นจำนวน 9 ชิ้นดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ชิ้นงานพิมพ์สามมิติที่ได้จากระบบการพิมพ์สามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์

เมื่อได้ชิ้นงานทดสอบดังรูปที่ 4 จำนวน 9 ชิ้น ด้วยปัจจัยและพารามิเตอร์ตามตารางที่ 1 แล้วนั้น ผู้วิจัยได้นำชิ้นงานไปทำการทดสอบเพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชิ้นงานพลาสติกที่ได้จากการพิมพ์สามมิติ ด้วยเครื่องทดสอบแรงดึง ยี่ห้อ

Shimadzu ดังรูปที่ 5 และชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบแรงดึงออกมาแล้วแสดงดังรูปที่ 6 จากนั้นนำผลของค่าเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชิ้นงานทั้ง 9 ชิ้นมาทำการการเปรียบเทียบสามารถแสดงได้ดังตารางที่ 3



รูปที่ 5 เครื่องทดสอบแรงดึงยี่ห้อ Shimadzu



รูปที่ 6 ชิ้นงานที่ผ่านการทดสอบแรงดึง

ตารางที่ 3 การเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การยืดตัวของชิ้นงานพิมพ์สามมิติที่พิมพ์ตามมาตรฐานของ ASTM D638 Type IV

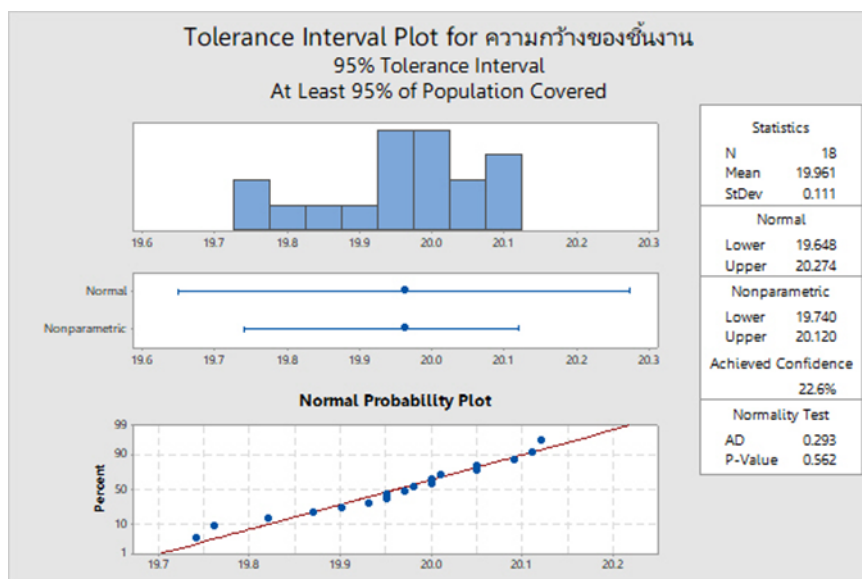
ชิ้นงานที่	สัญญาณพัลส์ มอเตอร์	ระยะห่างระหว่างเส้นใย พลาสติก (มิลลิเมตร)	ความร้อนสำหรับการละลายเส้นใย พลาสติก (องศาเซลเซียส)	เปอร์เซ็นต์การ ยืดตัว
1	180	0.9	200	3.422
2	180	1.0	210	2.551
3	180	1.1	190	0.959
4	190	0.9	210	2.949
5	190	1.0	190	1.451
6	190	1.1	200	0.441
7	200	0.9	190	2.656
8	200	1.0	200	2.389
9	200	1.1	210	2.107

จากตารางที่ 3 แสดงการทดสอบเพื่อหาค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวของชิ้นงานพิมพ์สามมิติ ผลปรากฏว่าชิ้นงานที่ 1 ที่มีการจ่ายสัญญาณพัลส์ 180 และระยะห่างระหว่างเส้นใยพลาสติก 0.9 มิลลิเมตร และความร้อนสำหรับการละลายเส้นใยพลาสติก 200 องศาเซลเซียส มีค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวมากที่สุด คือ 3.422% ส่วนชิ้นงานที่ 6 มีค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัวน้อยที่สุด คือ 0.441% ด้วยสัญญาณพัลส์ 190 และระยะห่างระหว่างเส้นใยพลาสติก 1.1 มิลลิเมตร และความร้อนสำหรับการละลายเส้นใยพลาสติก 200 องศาเซลเซียส

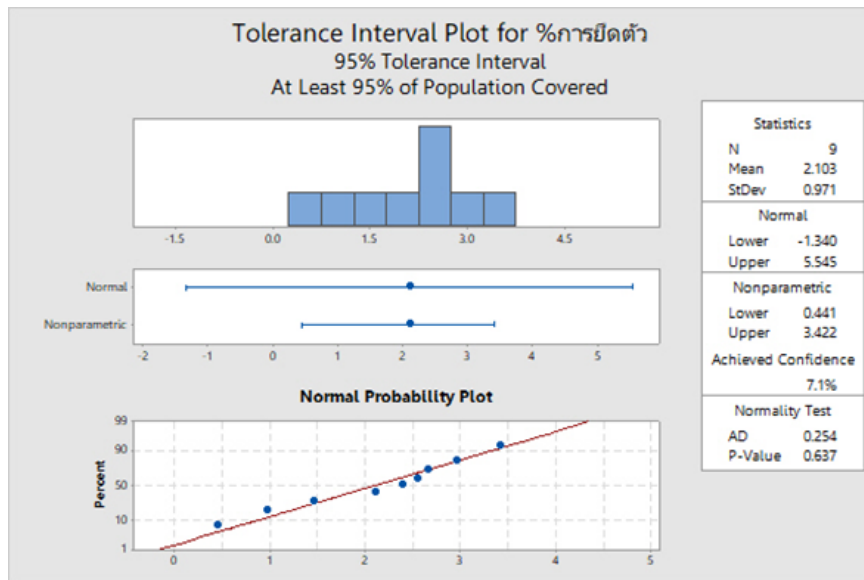
จากผลการเปรียบเทียบเปอร์เซ็นต์การยึดตัวของชิ้นงาน ดังตารางที่ 3 เมื่อทำการวิเคราะห์ระหว่างชิ้นงานที่ 1 และชิ้นงานที่ 6 จะเห็นได้ว่าที่ความร้อนสำหรับการละลายเส้นใยพลาสติก 200 องศาเซลเซียสเท่ากัน แต่สัญญาณพัลส์และระยะห่างระหว่างเส้นใยพลาสติกต่างกันส่งผลต่อเปอร์เซ็นต์การยึดตัวของชิ้นต่างกัน เนื่องจากการควบคุมสัญญาณพัลส์และการตั้งค่าระยะห่างระหว่างเส้นใยพลาสติกที่ไม่สัมพันธ์กัน

ผลการวิจัย

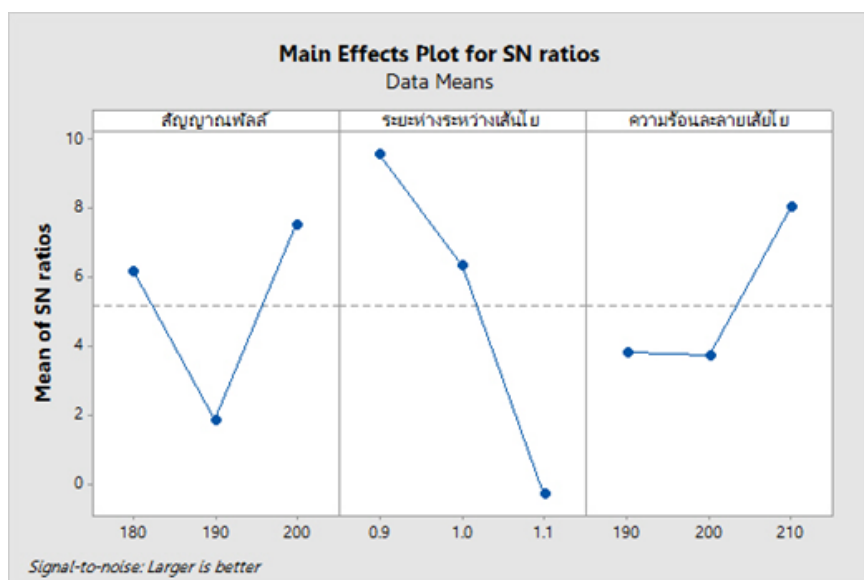
จากผลการทดลองโดยนำ 3 ปัจจัย 3 ระดับที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การยึดตัวของเส้นใยพลาสติกชนิด ABS ซึ่งประกอบไปด้วยสัญญาณพัลส์ ระยะห่างระหว่างเส้นใยพลาสติก และความร้อนสำหรับการละลายเส้นใยพลาสติก มาทดลองพิมพ์ชิ้นงานสามมิติ (3D) โดยเปลี่ยนปัจจัยของ สัญญาณพัลส์ ระยะห่างระหว่างเส้นใยพลาสติก และอุณหภูมิหลอมละลายเส้นใยพลาสติกทุกครั้ง โดยทำการทดสอบตามหลักการการออกแบบการทดลองแบบทาคุชิ (Taguchi) พบว่าเมื่อทำการวัดขนาดครบทั้งหมด 18 ครั้งแล้วจึงนำมาหาความคลาดเคลื่อนของความกว้างของชิ้นงานทดสอบ โดยจากการทดลองจะเห็นได้ว่าค่าเฉลี่ยของความกว้างชิ้นงานทดสอบจะอยู่ที่ 19.961 มิลลิเมตร และมีค่า P-Value เท่ากับ 0.562 ดังแสดงในรูปที่ 7 ซึ่งมากกว่าขนาดของการพิมพ์ชิ้นงานทดสอบอยู่ที่ 19 มิลลิเมตร และมากกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 สาเหตุที่ทำให้ความกว้างของชิ้นงานไม่เป็นไปตามขนาดที่ตั้งไว้มีสาเหตุหลักมาจากสัญญาณพัลส์ ระยะห่างระหว่างเส้นใยพลาสติก และความร้อนสำหรับการละลายเส้นใยพลาสติก ที่มีการเปลี่ยนค่าสำหรับการละลายเส้นใยพลาสติกในระหว่างการพิมพ์ชิ้นงาน ซึ่งมีผลทำให้ขนาดของแต่ละชิ้นงานมีค่าไม่เท่ากัน



รูปที่ 7 แสดงความคลาดเคลื่อนของความกว้างชิ้นงานจากการพิมพ์ชิ้นงานสามมิติ



รูปที่ 8 แสดงความคลาดเคลื่อนของเปอร์เซ็นต์การยึดตัวของชิ้นงานจากการพิมพ์ชิ้นงานสามมิติ



รูปที่ 9 กราฟแสดงค่าปัจจัยโดยเทียบกับสัญญาณรบกวน

จากรูปที่ 8 แสดงความคลาดเคลื่อนของเปอร์เซ็นต์การยึดตัวของชิ้นงานจากการพิมพ์ชิ้นงานสามมิติ จากชิ้นงาน 9 ชิ้นงาน พบว่า มีค่าเฉลี่ยของเปอร์เซ็นต์การยึดตัวของชิ้นงานอยู่ที่ 2.103 เปอร์เซนต์ และมีค่า p-value เท่ากับ 0.637 ซึ่งมากกว่าระดับนัยสำคัญที่ 0.05 เมื่อวิเคราะห์หาสาเหตุที่ทำให้เกิดค่า p-value มากถึง 0.637 นั้นเกิดจากจำนวนชั้นของชิ้นงานแต่ละชั้นมีค่าไม่เท่ากัน เนื่องจากการเปลี่ยนค่า สัญญาณพัลส์ ระยะห่างระหว่างเส้นใยพลาสติก และความร้อนสำหรับการละลายเส้นใยพลาสติกในระหว่างการพิมพ์ชิ้นงาน ซึ่งมีผลทำให้ความหนาของแต่ละชิ้นงานมีค่าไม่เท่ากัน

การหาค่าปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับเปอร์เซ็นต์การยึดตัวของเส้นใยพลาสติก ABS จะใช้การวิเคราะห์ผลลัพธ์ของหลักการทำงานของแบบทากูชิ เพื่อกำหนดระดับของปัจจัยที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากระดับของสัญญาณรบกวนที่มีค่าสูงสุด ดังแสดงในตารางที่ 3 สรุปปัจจัยที่ตอบสนองต่ออัตราส่วนสัญญาณรบกวนของตัวแปรในการพิมพ์ชิ้นงานสามมิติตามผลความ

แตกต่างของค่าเฉลี่ยของแต่ละปัจจัย ได้แก่ ระยะห่างระหว่างเส้นใยพลาสติก สัญญาณพัลส์ และความร้อนสำหรับการละลายเส้นใยพลาสติก ตามลำดับจากมากไปน้อย และการวิเคราะห์ผลลัพธ์ของทากูชิเพื่อกำหนดระดับของปัจจัยที่เหมาะสม โดยพิจารณาจากระดับอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (Signal to-Noise Ratio, S/N) ที่ค่าสูงสุดดังแสดงในรูปที่ 9 ปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัว คือ ผลลัพธ์ของการพิมพ์ชิ้นงานสามมิติที่ค่าเฉลี่ยของสัญญาณสูงสุดคือ สัญญาณพัลส์ 200 ที่ขั้นที่ 3 และระยะห่างระหว่างเส้นใยพลาสติก 0.9 มิลลิเมตร ที่ขั้นที่ 1 และความร้อนสำหรับการละลายเส้นใยพลาสติก 210 องศาเซลเซียส ที่ขั้นที่ 3

ตารางที่ 4 การตอบสนองต่อสัญญาณรบกวน

ขั้นที่	สัญญาณพัลส์	ระยะห่างระหว่าง เส้นใยพลาสติก	ความร้อนสำหรับการละลาย เส้นใยพลาสติก
1	6.153	9.521	3.786
2	1.838	6.311	3.712
3	7.506	-0.334	8.001
Delta	5.668	9.856	4.289
ลำดับที่	2	1	3

บทสรุป

การสร้างระบบการพิมพ์ชิ้นงานสามมิติด้วยแขนหุ่นยนต์ 6 แกน ด้วยระบบป้อนเส้นใยพลาสติกชนิด ABS ที่ควบคุมผ่านโปรแกรมเมเบิลลอจิกคอนโทรลเลอร์ เพื่อศึกษาตัวแปรที่มีผลต่อสมบัติทางกลของการจับยึดตัวโดยพิจารณาเรื่องเปอร์เซ็นต์การยึดตัวของพลาสติกด้วยวิธีการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ (Taguchi) จากผลการทดลองโดยนำ 3 ปัจจัย 3 ระดับที่มีผลต่อเปอร์เซ็นต์การยึดตัวของเส้นใยพลาสติกชนิด ABS ซึ่งประกอบไปด้วย สัญญาณพัลส์ ระยะห่างระหว่างเส้นใยพลาสติก และความร้อนสำหรับการละลายเส้นใยพลาสติก มาทดลองพิมพ์ชิ้นงานสามมิติโดยเปลี่ยนปัจจัยทุกครั้งตามหลักการออกแบบการทดลองแบบทากูชิ พบว่าการใช้สัญญาณพัลส์ที่ 180 ระยะห่างระหว่างเส้นใยพลาสติก 0.9 มิลลิเมตร และความร้อนสำหรับการละลายเส้นใยพลาสติกที่ 200 องศาเซลเซียส มีเปอร์เซ็นต์การยึดตัวที่มากที่สุดซึ่งมีค่าอยู่ที่ 3.422% และมีระดับความเชื่อมั่นอยู่ที่ 7.1% อันเกิดจากสาเหตุหลายปัจจัยได้แก่ 1) ตัวจับยึดระหว่างชิ้นงานกับชุดพิมพ์ชิ้นงานสามมิติไม่มีความแข็งแรงคงทนและมีความสั่นคลอนอยู่เล็กน้อย 2) การเคลื่อนที่ของแขนหุ่นยนต์มีความคลาดเคลื่อน และมีความเร็วไม่สม่ำเสมอในการเคลื่อนที่ เช่น เวลาเคลื่อนที่โค้งจะเร็วกว่าเคลื่อนที่เป็นแนวเส้นตรง 3) ลูกกลิ้งในการรีดเส้นใยพลาสติกกับมอเตอร์ ถ้าการตั้งลูกกลิ้งไม่ดีจะทำให้การป้อนเส้นใยด้วยสัญญาณพัลส์ที่ต่างกันมีความคลาดเคลื่อนได้ แต่ภาพรวมการทดลองนี้เป็นไปตามจุดประสงค์ของงานวิจัย และปัจจัยที่เหมาะสมสำหรับเปอร์เซ็นต์การยึดตัวของเส้นใยพลาสติก ABS โดยพิจารณาจากระดับของสัญญาณรบกวนที่มีค่าสูงสุดที่ตอบสนองต่ออัตราส่วนสัญญาณรบกวนของตัวแปรในการพิมพ์ชิ้นงานสามมิติตามผลความแตกต่างของค่าเฉลี่ยของแต่ละปัจจัย ได้แก่ ระยะห่างระหว่างเส้นใยพลาสติก สัญญาณพัลส์ และความร้อนสำหรับการละลายเส้นใยพลาสติก ตามลำดับจากมากไปน้อย และการวิเคราะห์ผลลัพธ์ของทากูชิเพื่อกำหนดระดับของปัจจัยที่เหมาะสมโดยพิจารณาจากระดับอัตราส่วนสัญญาณต่อสิ่งรบกวน (S/N) ที่ค่าสูงสุดที่ส่งผลต่อค่าเปอร์เซ็นต์การยึดตัว คือ ผลลัพธ์ของการพิมพ์ชิ้นงานสามมิติที่ค่าเฉลี่ยของสัญญาณสูงสุดคือ สัญญาณพัลส์ 200 ที่ขั้นที่ 3 และระยะห่างระหว่างเส้นใยพลาสติก 0.9 มิลลิเมตร ที่ขั้นที่ 1 และความร้อนสำหรับการละลายเส้นใยพลาสติก 210 องศาเซลเซียส ที่ขั้นที่ 3

กิตติกรรมประกาศ

การวิจัยครั้งนี้สำเร็จลงด้วยดี โดยได้รับความอนุเคราะห์ เครื่องมือ อุปกรณ์ต่าง ๆ จากคณะวิศวกรรมศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีไทย-ญี่ปุ่น และขอขอบคุณ บริษัท Daikin Industries (Thailand) LTD. จังหวัดชลบุรี ในการดำเนินการให้โครงการวิจัยนี้สำเร็จลงไปด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- Ahmad M.N., Rahman M.H.B.A. and Maidin N.A. (2019). Optimization on surface roughness of fused deposition modelling (FDM) 3D printed parts using Taguchi approach. Lecture Notes in Mechanical Engineering. Chapter: Intelligent Manufacturing and Mechatronics. Publishing: Springer Nature. 230-243.
- Carabina G., Scalera L., Wongratanaphisanb T. and Vidonia R. (2021). An energy-efficient approach for 3D printing with a Linear Delta Robot equipped with optimal springs. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing. 67:102045.
- Lan L., Jianping S., Kaiwei M., Jing J., Peng W., Huixin L., Yi C., Xingsong W. and Qing J. (2021). Robotic in situ 3D bio-printing technology for repairing large segmental bone defects. Journal of Advanced Research. 30: 75-84.
- Luan X.Y., Chengzhe L., Liujian L. and Jianzhong F. (2018). Self-monitoring continuous carbon fiber reinforced thermoplastic based on dual material three-dimensional printing integration process. Carbon. 140: 100-111.
- Moza Z., Kitsakis K., Kechagia J. and Mastorakis N. (2015). Optimizing dimensional accuracy of fused filament fabrication using Taguchi design. Recent Researches in Electrical and Computer Engineering. June 2015: 110-114.
- Munproma R. and Limtasiri L. (2019). Optimization of stereolithographic 3D printing parameters using Taguchi method for improvement in mechanical properties. Materials Today: Proceedings. 17: 1768-1773.
- Parandoush P. and Lin. D. (2017). A review on additive manufacturing of polymer-fiber composites. Composite Structures. 182: 36-53.
- Tan J. C. and Low H. Y. (2018). Embedded electrical tracks in 3D printed objects by fused filament fabrication of highly conductive composites. Additive Manufacturing. 23: 294-302.
- Thasana W., Kaewdook D., Khantiyanuwat P., Boonsiri N. and Yoshida Y. (2015). Study of 3D Printer for Educational Use, paper presented in the 6th TSME International Conference on Mechanical Engineering (ICoME 2015), 16-18 December 2015, Phetchaburi, Thailand.
- Tim A., Osswald J. P. and Kattinger J. (2018). Fused filament fabrication melting model. Additive Manufacturing. 22: 51-59.

Received: June 8, 2022; Revised: July 20, 2022; Accepted: July 24, 2022

การผลิตแคลเซียมแลคเตทจากเปลือกหอยตลับเหลือทิ้งเพื่อลดปัญหาสิ่งแวดล้อม
Calcium lactate production from clam shell waste
to reduce environmental issues

หยก วงษ์ชมภู¹ บรรจง บุญชม^{1*} นที โอภาสี¹ สรกีจจ์ มงคล¹ ธนา ก้วพานิช²
บุปผา จงพัฒน์² และจินดา ไชยช่วย¹

Yok Wongchompoo¹, Banjong Boonchom¹, Natee Ohpasee¹, Sorakit Mongkol¹,
Thana Kuaphanich², Buppha Jongput² and Jinda Chaichuay¹

¹คณะวิทยาศาสตร์ สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จังหวัดกรุงเทพมหานคร

²คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง จังหวัดกรุงเทพมหานคร

*Corresponding Author E-mail Address: 62605105@kmitl.ac.th, banjong.bo@kmitl.ac.th

บทคัดย่อ

เปลือกหอยตลับเหลือทิ้งถูกใช้เป็นสารตั้งต้น ในการสังเคราะห์สารประกอบแคลเซียมแลคเตท ($\text{Ca}(\text{C}_2\text{H}_4\text{OHCOO})_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) โดยของเสียจากเปลือกหอยตลับจะถูกบดละเอียดซึ่งประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต (CaCO_3) เป็นองค์ประกอบหลักแล้วนำมาทำปฏิกิริยากับกรดแลคติก ความเข้มข้นต่าง ๆ (6, 8, และ 10 โมลาร์) โดยตัวแปรที่ดีที่สุดในการสังเคราะห์ที่ใช้พิจารณา คือ ระยะเวลาที่สั้นในการเตรียมและร้อยละผลผลิตสูง ผลการทดลองพบว่า ความเข้มข้นของกรดแลคติกที่เหมาะสม คือ 10 โมลาร์ ซึ่งใช้ระยะเวลาในการเตรียม 1 ชั่วโมง และให้ร้อยละผลผลิต 93.86 สารตัวอย่างที่เตรียมได้ทั้งหมดจะถูกนำไปวิเคราะห์ด้วยเทคนิคต่าง ๆ ได้แก่ TGA XRD SEM XRF และ FTIR เพื่ออธิบายสมบัติเชิงความร้อน โครงสร้างของผลึก สันฐานวิทยา การวิเคราะห์องค์ประกอบของธาตุ และการวิเคราะห์รูปแบบการสั่น เพื่อยืนยันการเกิดสารประกอบแคลเซียมแลคเตท งานวิจัยนี้รายงานเทคนิคการเตรียมการผลิตแคลเซียมแลคเตทที่ง่าย ไม่ซับซ้อน และราคาไม่แพง เพื่อลดของเสียจากเปลือกซึ่งเป็นทางเลือกที่ดีในการจัดการสิ่งแวดล้อม

คำสำคัญ: เปลือกหอยตลับเหลือทิ้ง แคลเซียมคาร์บอเนต แคลเซียมแลคเตท กรดแลคติก

Abstract

The waste clam shells were used as a raw material to prepare calcium lactate, $[\text{Ca}(\text{C}_2\text{H}_4\text{OHCOO})_2]$. The waste clam shells were ground and used as a source of calcium carbonate (CaCO_3) and then was reacted with lactic acid by vary concentrations (6, 8, and 10 M). The optimum conditions were considered by short time consumption and higher percentage yield. The results showed that the optimum concentration of lactic acid was 10 M, which used 1 hour of time consumption and gave 93.86 of percentage yield. All prepared samples were characterized by various techniques as TGA, XRD, SEM, XRF, and FTIR to explain thermal properties, crystal structure, morphology, elemental analysis, vibrational mode analysis, to confirm the formation of calcium lactate samples. This research reports the easy, uncomplicated, and inexpensive preparation technique to produce calcium lactate for reducing shell wastes that is a good choice for environmental management.

Keyword: The clam shells waste, Calcium carbonate, Calcium lactate, Lactic acid

บทนำ

ประเทศไทยมีการบริโภคหอยตลับประมาณ 30,000 ตันต่อปี ตามสถิติของกรมวิชาการเกษตรและทรัพยากรน้ำแห่ง ประเทศไทย โดยส่วนที่กินได้ของหอยตลับมีน้ำหนักเพียง 30% ของน้ำหนักทั้งหมดและทิ้งเปลือกหอยมากกว่า 24,000 ตันต่อปี เปลือกหอยตลับที่เหลือทิ้งส่วนใหญ่มาจาก อุตสาหกรรมแปรรูป และร้านอาหารทะเล จะถูกทิ้งลงสู่ชายฝั่งทะเล ทำให้เกิดขยะมูลฝอยเป็นจำนวนมาก ก่อให้เกิดปัญหาสิ่งแวดล้อมอย่างร้ายแรงต่อ ดิน น้ำ มลภาวะทางอากาศตลอดจนปัญหาสุขภาพและสุขภาพของชุมชนใกล้เคียง ข้อมูลทางสถิติแสดงให้เห็นว่ามีการกำจัดเปลือกหอยตลับหลายตันต่อปี เมื่อเวลาผ่านไปจะเกิดการสลายตัวของจุลินทรีย์และจะค่อยสร้างก๊าซพิษ เช่น NH_3 และ H_2S โดยเปลือกหอยตลับประกอบด้วยแคลเซียมคาร์บอเนต 98-99% (Blanton, 2017) เป็นองค์ประกอบทางเคมีหลัก อีกทั้งยังมีสารปนเปื้อนโลหะออกไซด์เล็กน้อยอยู่ 1-2% (Na_2O , K_2O) เป็นต้น โดยทั่วไปแคลเซียมคาร์บอเนตมีราคาถูก พบได้ในธรรมชาติ เช่น หินปูน อีกทั้งยังมีการนำเปลือกหอยตลับมาใช้ในอุตสาหกรรมต่าง ๆ เช่น อุตสาหกรรมก่อสร้าง เพื่อใช้ทดแทนหินปูน และใช้เป็นสารบำบัดน้ำ (การควบคุมยูโทรฟิเคชันและการกำจัดฟอสฟอรัส (Nolan, 2013) นอกจากนี้เปลือกหอยตลับยังสามารถใช้เป็นวัสดุเริ่มต้นในการเตรียมสารประกอบต่าง ๆ (Eziefula, 2018) โดยการนำไปอบด้วยความร้อนที่อุณหภูมิที่ 700-900 องศาเซลเซียส (สุภกร และคณะ, 2558) แคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากเปลือกหอยตลับจะถูกแปลงสภาพเป็นแคลเซียมออกไซด์ซึ่งสามารถนำไปใช้งานได้หลายอย่าง เช่น การเตรียมสารประกอบ แคลเซียมอินทรีย์ อะซิเตด แลคเตท เป็นต้น

แคลเซียมแลคเตทมีลักษณะเป็นเกลือผลึกสีขาวที่มีสูตร $\text{C}_6\text{H}_{10}\text{CaO}_6$ หรือ $[\text{Ca}(\text{C}_2\text{H}_4\text{OHCOO})_2]$ ซึ่งประกอบด้วยแอนไอออนแลคเตท $[\text{H}_3\text{C}(\text{CHOH})\text{CO}^-]$ จำนวน 2 หมู่ และแคลเซียมไอออน (Ca^{2+}) ในโครงสร้างของแคลเซียมแลคเตทมีจำนวนโมเลกุลของน้ำ (ไฮเดรต) อยู่ในหลายรูปแบบ และแคลเซียมแลคเตทเพนตาไฮเดรต ($\text{C}_6\text{H}_{10}\text{CaO}_6 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) คือที่พบมากที่สุด แคลเซียมแลคเตทถูกนำมาใช้อย่างกว้างขวางในหลายอุตสาหกรรม สำหรับอุตสาหกรรมยาได้ถูกนำมาใช้ในยาสำหรับมนุษย์และสัตว์แพทย์ เช่น ใช้ในภาวะแคลเซียมในเลือดต่ำ (การขาดแคลเซียม) การให้แคลเซียมเพื่อป้องกันการบาดเจ็บในคนและสัตว์ (Jingbo, 2013) สารป้องกันหินปูนในน้ำยาบ้วนปาก ยาสีฟัน และยาลดกรด สำหรับอุตสาหกรรมอาหารได้มีการประยุกต์ใช้เป็นวัตถุเจือปนอาหารที่มีอีกทั้งยังเป็นสารเพิ่มความคงตัวและสารเพิ่มความข้น, อาหารเสริม, หัวเชื้อ, สารปรุงแต่งรสหรือสาร

แตงกิลินธ (Lu and Carter, 1980) สำหรับอุตสาหกรรมพืชและสัตว์ มักถูกนำไปใช้เป็นแหล่งแคลเซียมสำหรับสัตว์และพืช ใช้เพื่อให้อายุของดอกไม้ ผลไม้ และผัก (Tsuruma, 2020) สำหรับอุตสาหกรรมสิ่งแวดล้อม ใช้เป็นสารตกตะกอนสำหรับการกำจัดสารแขวนลอยจากน้ำ เพราะเป็น ปลอดภัย และสามารถย่อยสลายได้ทางชีวภาพ สำหรับอุตสาหกรรมเคมี ใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิต สารประกอบขึ้นสูงเช่นกรดแลคติก ($C_2H_4OHCOOH$) เพื่อใช้ในด้านการแพทย์และแคลเซียมออกไซด์ (CaO) เพื่อใช้เป็นตัวเร่งปฏิกิริยา สำหรับอุตสาหกรรมก่อสร้างจะผสมลงในคอนกรีตเพื่อเพิ่มกำลังอัดและลดการซึมผ่านของน้ำส่งผลให้การก่อตัวของคอนกรีตมีประสิทธิภาพจากการใช้แคลเซียมแลคเตทเป็นจำนวนมากที่อธิบายไว้ข้างต้น ดังนั้น สารประกอบแคลเซียมแลคเตทจึงมีการนำมาใช้เป็นจำนวนมาก (Nguyen, 2013)

วัตถุประสงค์ของงานนี้คือการสังเคราะห์แคลเซียมแลคเตทด้วยกระบวนการที่รวดเร็ว และมีต้นทุนต่ำ โดยใช้เปลือกหอยตลับเป็นสารตั้งต้น ขั้นแรกเปลือกหอยตลับถูกเปลี่ยนเป็นสารประกอบแคลเซียมคาร์บอเนต จากนั้นจึงใช้ปฏิกิริยาคายความร้อนระหว่างผงแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากเปลือกหอยตลับผสมกับกรดแลคติกที่มีความเข้มข้นแตกต่างกัน พิจารณาความเหมาะสมของสภาวะจากความเข้มข้นของกรดแลคติกที่ให้เวลาการสังเคราะห์ต่ำที่สุดและให้ร้อยละผลผลิตสูงที่สุด จากนั้นใช้พารามิเตอร์ที่ตรวจสอบทั้งหมดชี้ให้เห็นค่าพารามิเตอร์ที่เหมาะสมที่สามารถสังเคราะห์ผลิตภัณฑ์แคลเซียมแลคเตทโดยใช้ต้นทุนต่ำจะวิเคราะห์โดยวิธีการทางวิทยาศาสตร์หลายวิธีทั้งการเอ็กซ์เรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF) การเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ (XRD) การวิเคราะห์รูปแบบการสั่น (IR) การวัดการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักด้วยความร้อนต่อการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักของสารอนุพันธ์ (TG/DTG) และกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) เพื่อพิสูจน์ว่าสารประกอบที่ต้องการคือแคลเซียมคาร์บอเนต และแคลเซียมแลคเตทที่ไม่มีสารเจือปนที่เป็นพิษจากโลหะซึ่งสามารถนำมาใช้งานได้

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

การเตรียมตัวอย่าง

เก็บตัวอย่างเปลือกหอยตลับ จากอำเภอศรีราชา จังหวัดชลบุรี นำเปลือกหอยตลับมาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำกลั่นเพื่อกำจัดสิ่งสกปรกและสิ่งปนเปื้อน จากนั้นนำมาอบให้แห้งในตู้อบที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 1 ชั่วโมง และทำให้เย็นแล้วจึงนำมาบดโดยกรองผ่านตะกรงขนาด 100 เมช (Mesh) (ประมาณ 140 ไมโครเมตร)

เติมกรดแลคติก (88% โดยน้ำหนัก $C_2H_4OHCOOH$) เกรดอุตสาหกรรม โดยเติมน้ำเพื่อเจือจางกรดแลคติกจะได้ความเข้มข้นของกรดแลคติกที่แตกต่างกัน (6 โมลาร์, 8 โมลาร์, และ 10 โมลาร์) ในขั้นตอนการเจือจางจะเกิดกระบวนการคายความร้อนสูง ดังนั้นก่อนใช้งานจะต้องปล่อยให้สารละลายเย็นตัวลงก่อน

การเตรียมแคลเซียมแลคเตท $Ca(C_2H_4OHCOO)_2 \cdot 5H_2O$

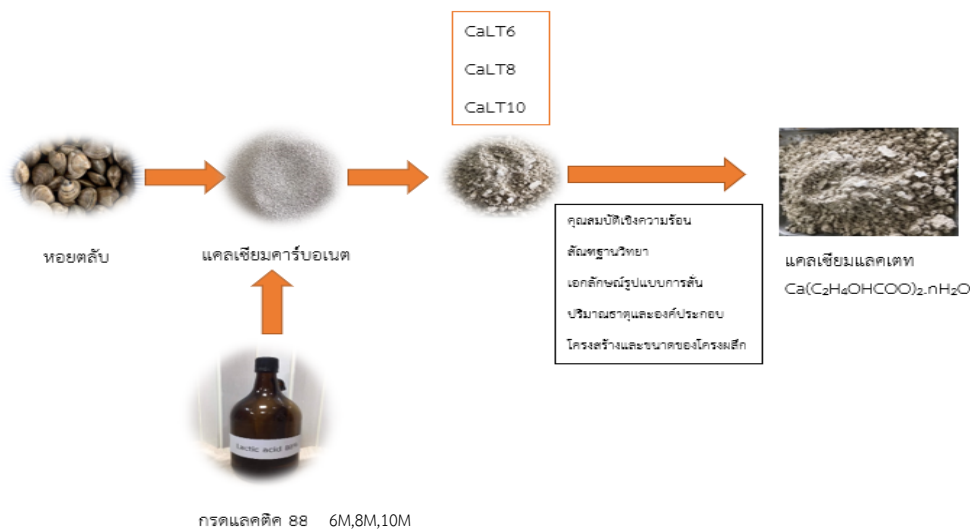
ในการเตรียมตัวอย่างจะใช้กรดแลคติกที่มีความเข้มข้น 6 โมลาร์ จำนวน 29 มิลลิลิตร และเติมผงเปลือกหอยตลับ ($CaCO_3$) 10 กรัม ในอัตราส่วนโมลระหว่างกรดแลคติก : เปลือกหอย = 2 : 1 จากนั้นคนผสมกันอย่างต่อเนื่องจะเกิดปฏิกิริยามีฟองก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์เกิดขึ้น เมื่อปฏิกิริยาเกิดสมบูรณ์ ให้นำมาวางทิ้งไว้ในอุณหภูมิห้องจะได้แคลเซียมแลคเตทที่มีความเข้มข้น 6 โมลาร์ ผลิตภัณฑ์เป็นผงผลึกสีขาวครีม สำหรับตัวอย่างอื่น ๆ ทำกระบวนการซ้ำ ๆ แตกต่างกันที่ความเข้มข้นของกรดแลคติก คือ 8 โมลาร์ จำนวน 22 มิลลิลิตร และ 10 โมลาร์ จำนวน 18 มิลลิลิตร แล้วระบุสารที่เตรียมขึ้นได้คือ แคลเซียมแลคเตท 6 (CaLT6) แคลเซียมแลคเตท 8 (CaLT8) และ แคลเซียมแลคเตท 10 (CaLT10) ตามลำดับ ดังแสดงในรูปที่ 1

ลักษณะของแคลเซียมแลคเตท

ผลที่ได้จากการเกิดปฏิกิริยาการสังเคราะห์แคลเซียมแลคเตท ในการวิเคราะห์ทางกายภาพ ระยะเวลาในการทำปฏิกิริยา อุณหภูมิในการเกิดปฏิกิริยา และการคำนวณร้อยละผลผลิต โดยคำนวณร้อยละผลผลิตของสารประกอบโดยใช้สมการที่ (1)

$$\text{ร้อยละผลผลิต} = \frac{\text{น้ำหนักผลผลิตจริง}}{\text{น้ำหนักผลผลิตทางทฤษฎี}} \times 100 \quad (1)$$

ในการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันขององค์ประกอบภายในโมเลกุล (Fourier Transform Infrared (FT-IR) spectroscopy) จะนำตัวอย่างมาผสมกับโพแทสเซียมโบรไมด์ (KBr) ในอัตราส่วน 1:10 ใส่แม่พิมพ์แล้วนำไปอัดเป็นแผ่นด้วยเครื่องไฮดรอลิก ที่ไว้ประมาณ 5-7 นาที จะได้ตัวอย่างลักษณะเป็นแผ่นวงกลมสีขุ่น จากนั้นนำแผ่นตัวอย่างที่ได้มาวิเคราะห์ด้วยเครื่อง FT-IR โดยกำหนดการวัดค่าการดูดกลืนรังสีอินฟราเรดในช่วง $4000 - 370 \text{ cm}^{-1}$ การวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อน (Thermogravimetric Analysis) โดยใช้ในสภาวะแก๊สไนโตรเจน ที่อุณหภูมิ 30 - 900 องศาเซลเซียส เพื่อวิเคราะห์ปริมาณ น้ำในโครงผลึกและกลไกการสลายตัวที่เกิดขึ้นจากน้ำหนักที่หายไปในแต่ละช่วงอุณหภูมิ การวิเคราะห์เอกลักษณ์ทางโครงสร้าง (X-Ray Diffractometry) วิเคราะห์โครงสร้างผลึกของสารประกอบที่มีอยู่ในสารตัวอย่างด้วยเครื่อง X-Ray Diffractometer โดย Scan method ที่ใช้ คือ 2 θ เท่ากับ 10 องศา และ 2 θ เท่ากับ 60 องศา การวิเคราะห์กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด(SEM) วิเคราะห์พื้นฐานและตรวจสอบลักษณะผิวภายนอกของตัวอย่าง การวิเคราะห์ประเภทธาตุ และปริมาณของธาตุจะใช้หลักการเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนส์สเปกโทรเมทรี X-ray fluorescence spectrometers (XRF)



รูปที่ 1 แผนผังการเตรียมแคลเซียมแลคเตท

ผลการวิจัย และการอภิปรายผล

ผลการสังเคราะห์แคลเซียมแลคเตทและร้อยละผลผลิต

จากการทดลองสังเคราะห์แคลเซียมแลคเตทโดยใช้แคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยตลับและกรดแลคติกที่มีความเข้มข้นต่าง ๆ ได้ผลดังแสดงในตารางที่ 1

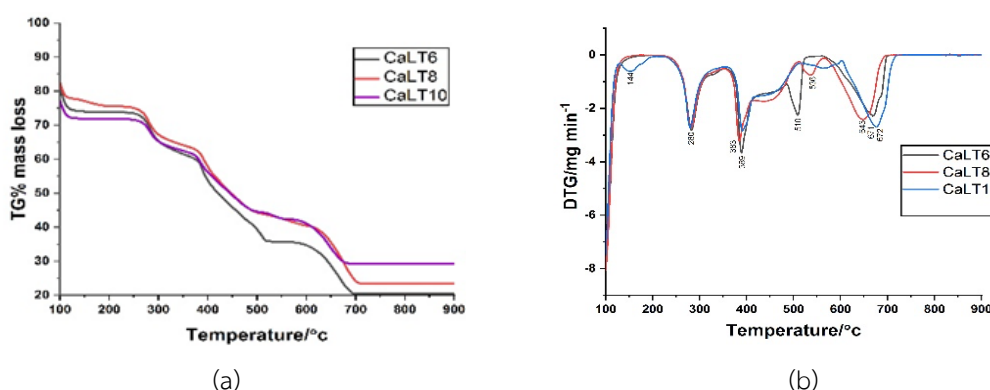
ตารางที่ 1 ร้อยละผลผลิตของแคลเซียมแลคเตทเพพทาไฮเดรต ที่ผลิตจากปฏิกิริยาระหว่างผง แคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากเปลือกหอยตลับและความเข้มข้นของกรดแลคติกที่ความเข้มข้นต่างกัน

ตัวอย่าง	ความเข้มข้นของ กรดแลคติก (โมลาร์)	เวลาในการแห้ง เอง (ชั่วโมง)	อุณหภูมิที่เกิดขึ้นเอง ขณะเกิดปฏิกิริยา (°C)	ร้อยละผลผลิต (%)
CaLT6	6	3	36	89.68
CaLT8	8	2	37	90.49
CaLT10	10	1	37	93.86

แสดงให้เห็นว่า เมื่อความเข้มข้นของกรดแลคติกเพิ่มขึ้นจะส่งผลให้อุณหภูมิเพิ่มสูงขึ้น และทำให้เกิดปฏิกิริยาการคายความร้อน โดยการเตรียมแคลเซียมแลคเตทโดยใช้กรดแลคติกที่มีความเข้มข้นสูงจะทำให้ผงแห้งที่เสร็จสมบูรณ์ภายในเวลาอันสั้น ตัวอย่างเช่น CaLT6 จะได้ผงที่แห้งสนิทในเวลา 3 ชั่วโมง แต่สำหรับ CaLT10 ใช้เวลาเพียง 1 ชั่วโมง เปอร์เซ็นต์ผลผลิตของผลิตภัณฑ์แคลเซียมแลคเตทที่ได้จากปฏิกิริยาทั้ง 3 พบในช่วง 89 – 93% อย่างไรก็ตาม ผลผลิตสูงสุดที่สังเกตพบเมื่อใช้กรดแลคติก 10 โมลาร์ เหมาะสมที่จะถูกใช้เพื่อเตรียมแคลเซียมแลคเตท

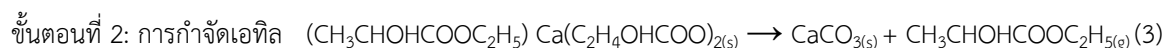
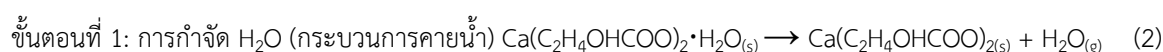
การวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อน

จากการวิเคราะห์สมบัติเชิงความร้อน เทอร์โมแกรม TG/DTG ของตัวอย่างที่เตรียมไว้แสดงในรูปที่ 2



รูปที่ 2 กราฟเทอร์โมแกรม TG (a) และ ดิฟเฟอเรนเชียลเทอร์โมแกรม DTG (b) ของแคลเซียมแลคเตทที่มีความเข้มข้น CaLT6 , CaLT8 และ CaLT10

กราฟ TG (a) แสดงเปอร์เซ็นต์การสูญเสียมวลในช่วง 30 - 900 องศาเซลเซียส ซึ่งสัมพันธ์กับกราฟ DTG (b) แสดงให้เห็นกลไกการสลายตัวของปฏิกิริยา กราฟ TG/DTG ของ CaLT6 , CaLT8 และ CaLT10 สังเกตว่ามีความคล้ายคลึงกัน ในกราฟ TG จะเกิดการสูญเสียมวล 3 ขั้นตอน ปรากฏในช่วง และ 100 - 200, 200 - 600 และ 600 - 900 องศาเซลเซียส พิก DTG สอดคล้องที่ช่วง 144, 280 - 536 และ 643 - 672 องศาเซลเซียส ซึ่งเกี่ยวข้องกับกระบวนการคายน้ำ (การกำจัด H₂O) การกำจัดเอทิลเอสซิเตต (C₆H₁₀O₃ หรือ CH₃CHOHCOOC₂H₅) ตามลำดับ และการกำจัดคาร์บอนไดออกไซด์ CO₂ (กระบวนการดีคาร์บอเนชัน; Decarbonation) ตามลำดับ ซึ่งสามารถอธิบายได้เป็นสมการต่อไปนี้



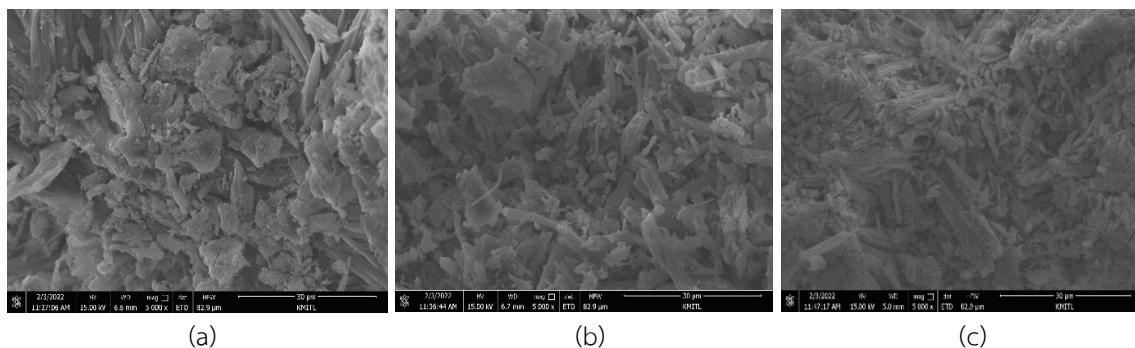
กราฟ TG และ DTG ของ CaLT6 แสดงอุณหภูมิ ช่วง และการสูญเสียมวลด้วยกระบวนการ 3 ขั้นตอน การสลายตัวทางความร้อน ขั้นตอนแรกอยู่ในช่วง ที่ 100 – 300 องศาเซลเซียส ค่าของ DTG มีค่าสูงสุดที่ 280 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าเป็นการสูญเสียของ $\text{Ca}(\text{C}_2\text{H}_4\text{OHCOO})_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ที่สังเคราะห์ขึ้น ในช่วงของ 350 – 550 องศาเซลเซียส ค่าของ DTG มีค่าสูงสุดที่ 389 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าเป็นกระบวนการคายน้ำ ส่งผลให้เกิดการก่อตัวของแคลเซียมแลคเตทแอนไฮดรัส ($\text{Ca}(\text{C}_2\text{H}_4\text{OHCOO})_2$) ขั้นตอนที่สอง ค่าของ DTG มีค่าสูงสุดอยู่ที่ 510 องศาเซลเซียส เป็นกระบวนการสลายตัวของ $\text{Ca}(\text{C}_2\text{H}_4\text{OHCOO})_2$ เปลี่ยนเป็น CaCO_3 ขั้นตอนสุดท้ายอยู่ในช่วง 600 – 700 องศาเซลเซียส ค่าของ DTG มีค่าสูงสุดที่ 671 องศาเซลเซียส คือกระบวนการดีคาร์บอนชั่น และเกิด CaO การสูญเสียมวลรวมเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์จากการสลายตัวทางความร้อนโดยได้ CaO เท่ากับ 20.05%

กราฟ TG และ DTG ของ CaLT8 แสดงผลคล้ายกับ CaLT6 สังเกตว่าจะมีขั้นตอนการสลายตัวทางความร้อน 3 ขั้นตอน ขั้นตอนแรกอยู่ในช่วง ที่ 100 – 400 องศาเซลเซียส ค่าของ DTG มีค่าสูงสุดที่ 383 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าเป็นการสูญเสีย และมีกระบวนการคายน้ำส่งผลให้เกิดการก่อตัวของแคลเซียมแลคเตทแอนไฮดรัส ($\text{Ca}(\text{C}_2\text{H}_4\text{OHCOO})_2$) ที่สังเคราะห์ขึ้นในช่วงของ 400 – 550 องศาเซลเซียส ขั้นตอนที่สองอยู่ ค่าของ DTG มีค่าสูงสุดที่ 536 องศาเซลเซียส คือ การสลายตัวของ $\text{Ca}(\text{C}_2\text{H}_4\text{OHCOO})_2$ เปลี่ยนเป็น CaCO_3 ขั้นตอนสุดท้ายอยู่ในช่วง 600 – 700 องศาเซลเซียส ค่าของ DTG มีค่าสูงสุดที่ 643 องศาเซลเซียส คือกระบวนการดีคาร์บอนชั่น และเกิด CaO การสูญเสียมวลรวมเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์จากการสลายตัวทางความร้อนได้ CaO เท่ากับ 23.32%

กราฟ TG และ DTG CaLT10 แสดงอุณหภูมิ ช่วง และการสูญเสียมวลด้วย 3 ขั้นตอน การสลายตัวทางความร้อน ขั้นตอนแรกอยู่ในช่วง ที่ 100 – 300 องศาเซลเซียส ค่าของ DTG มีค่าสูงสุดที่ 144, 280 องศาเซลเซียส แสดงให้เห็นว่าเป็นการสูญเสียน้ำของ $\text{Ca}(\text{C}_2\text{H}_4\text{OHCOO})_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$ ที่สังเคราะห์ขึ้น และเป็นกระบวนการคายน้ำ ส่งผลให้เกิดการก่อตัวของแคลเซียมแลคเตทแอนไฮดรัส ($\text{Ca}(\text{C}_2\text{H}_4\text{OHCOO})_2$) ในช่วงของ 350–550 องศาเซลเซียส ขั้นตอนที่สองอยู่ ค่าของ DTG มีค่าสูงสุดที่ 389 องศาเซลเซียส คือ การสลายตัวของ $\text{Ca}(\text{C}_2\text{H}_4\text{OHCOO})_2$ เป็น CaCO_3 ขั้นตอนสุดท้ายอยู่ในช่วง 600 – 700 องศาเซลเซียส ค่าของ DTG มีค่าสูงสุดที่ 672 องศาเซลเซียส คือกระบวนการดีคาร์บอนชั่น และเกิด CaO การสูญเสียมวลรวมเพื่อให้ได้ผลิตภัณฑ์จากการสลายตัวทางความร้อนได้ CaO เท่ากับ 29.95%

การวิเคราะห์พื้นฐานวิทยา

เมื่อนำแคลเซียมแลคเตทที่เตรียมได้จากเปลือกหอยตลับผสมกับกรดแลคติก มาวิเคราะห์พื้นฐานวิทยาด้วยกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) แสดงผลดังรูปที่ 3

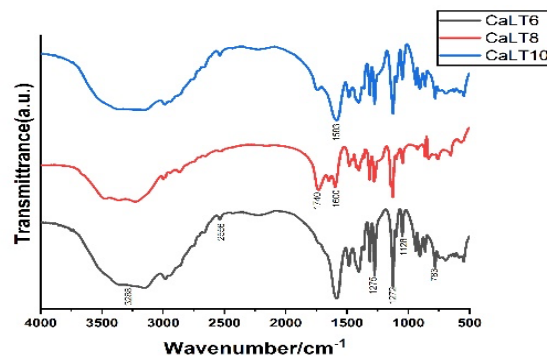


รูปที่ 3 ภาพกล้องอิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) ของ $\text{Ca}(\text{C}_2\text{H}_4\text{OHCOO})_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$ ที่ผลิตจากเปลือกหอยตลับ และกรดแลคติกที่มีความเข้มข้น (a) CaLT6, (b) CaLT8 และ (c) CaLT10

ภาพ SEM ของ CaLT6 (รูปที่ 3a) แสดงลักษณะพื้นผิวเป็นชิ้นใหญ่และเล็กหลายชิ้นในแนวนอน ภาพ SEM ของ CaLT8 (รูปที่ 3b) แสดงลักษณะคล้ายแผ่นบางที่มีขนาดและรูปร่างต่างกันไปในทิศทางที่แตกต่างกัน ภาพ SEM ของ CaLT10 (รูปที่ 3c) แสดงลักษณะพื้นผิวแผ่นบางที่มีอนุภาคต่างกันหลายขนาด สันฐานวิทยาของตัวอย่าง CaLT6 CaLT8 และ CaLT10 มีโครงสร้างจุลภาคที่เป็นเนื้อเดียวกัน โดยที่ขนาดอนุภาคมีแนวโน้มลดลงตามความเข้มข้นของกรดแลคติกที่เพิ่มขึ้น สามารถอนุมานได้ว่าสันฐานของผลิตภัณฑ์ได้รับอิทธิพลจากความเข้มข้นของกรดแลคติก

การวิเคราะห์เอกลักษณ์รูปแบบการสั่น

เมื่อนำแคลเซียมแลคเตทที่เตรียมได้จากเปลือกหอยตลับผสมกับกรดแลคติก มาวิเคราะห์หาชนิดของหมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรด (Fourier Transform Infrared Spectrophotometer, FT-IR) พบว่าการดูดกลืนแสงรังสีอินฟราเรด ปรากฏพีคของหมู่ฟังก์ชันที่เกิดจากการสั่นของโมเลกุลในแคลเซียมแลคเตท โดยพบหมู่ฟังก์ชันของ C-H stretching ในช่วงเลขที่คลื่น 1272 และ 1128 cm^{-1} และจะพบหมู่ฟังก์ชันของ C=O stretching ในช่วงเลขที่คลื่น 1600 และ 1740 cm^{-1} และพบหมู่ฟังก์ชันของ O-H stretching ในช่วงเลขที่คลื่น 3288 cm^{-1} จะเห็นได้ว่าเปลือกหอยตลับผสมกับกรดแลคติก เป็นแคลเซียมแลคเตทจริง ดังแสดงในรูปที่ 4



รูปที่ 4 ฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกตรัม (FT-IR) ของแคลเซียมแลคเตทที่เตรียมความเข้มข้นของกรดแลคติกที่ต่างกัน CaLT6, CaLT8 และ CaLT10

การวิเคราะห์ปริมาณธาตุองค์ประกอบ

จากตารางที่ 2 แสดงปริมาณองค์ประกอบของสารประกอบแคลเซียมแลคเตทจากเปลือกหอยตลับ ด้วยเทคนิคเอกซเรย์ฟลูออเรสเซนซ์ (XRF)

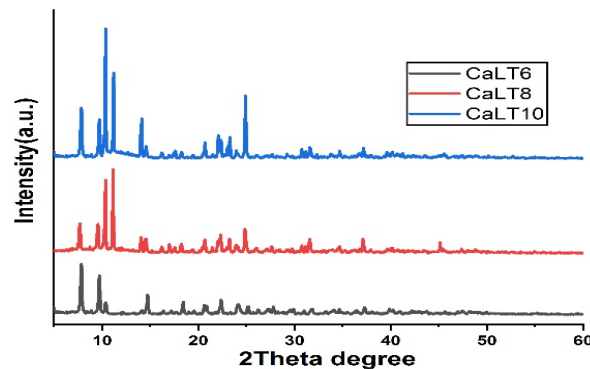
ตารางที่ 2 แสดงปริมาณองค์ประกอบของสารประกอบแคลเซียมแลคเตทที่ความเข้มข้นแตกต่างกันด้วยเทคนิค XRF

ชนิดของสารประกอบ	องค์ประกอบทางเคมี (%)					
	CaO	Na	Mg	S	P	K
แคลเซียม						
CaLT6	96.6	1.02	0.0852	0.205	0.0130	0.0157
CaLT8	96.4	0.773	0.109	0.239	0.0238	0.0129
CaLT10	96.1	0.765	0.0891	0.243	0.0246	0.0171

พบว่า CaLT6 มีแคลเซียมเป็นองค์ประกอบ 96.60% CaLT8 มีแคลเซียมเป็นองค์ประกอบ 96.40% CaLT10 มีแคลเซียมเป็นองค์ประกอบ 96.10% การสะสมของสารพิษในหอยตลับอาจเกิดขึ้นได้ขึ้นอยู่กับแหล่งที่มา ดังนั้นควรตรวจสอบองค์ประกอบของธาตุ จากผลการศึกษาพบว่า แคลเซียมแลคเตทที่ได้จากของเสียจากเปลือกหอยตลับไม่มีองค์ประกอบที่เป็นพิษ

การวิเคราะห์โครงสร้างและขนาดของผลึก

จากการวิเคราะห์โครงสร้างและขนาดผลึกของแคลเซียมแลคเตทดังแสดงในรูปที่ 5



รูปที่ 5 รูปแบบการเลี้ยวเบนของรังสีเอกซ์ของแคลเซียมแลคเตทจากเปลือกหอยตลับ

ผลการวิเคราะห์ด้วยเทคนิคการเลี้ยวเบนรังสีเอกซ์ (X-Ray Diffractometer, XRD) พบว่า แคลเซียมแลคเตทที่มีรูปแบบเหมือนกัน ทุกความเข้มข้นของกรดแลคติกที่ใช้ โดยพบตำแหน่งการหมุนเลี้ยวเบนซึ่งเป็นเอกลักษณ์ของแคลเซียมแลคเตทซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลอ้างอิง ICDD card number: 00-029-1596

บทสรุป

การสังเคราะห์แคลเซียมแลคเตทเพนทาไฮเดรตจากปฏิกิริยาระหว่างแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยตลับและกรดแลคติก (6 โมลาร์ 8 โมลาร์ และ 10 โมลาร์) ในการเตรียมแคลเซียมแลคเตทที่ได้จากเปลือกนี้ หอยตลับมีประโยชน์อย่างมากในการทดแทนการใช้แร่ปูนขาวหรือแรโดโลไมต์ที่ได้จากสิ่งไม่มีชีวิตซึ่งมีทรัพยากรอย่างจำกัด และอาจมีการปนเปื้อนโลหะอันตราย โดยศึกษาประสิทธิภาพของการเตรียมแคลเซียมแลคเตทโดยพิจารณาจากร้อยละผลผลิต พบว่า กรดแลคติก 10 โมลาร์ เป็นความเข้มข้นที่เหมาะสมในการเตรียมแคลเซียมแลคเตทเนื่องจากใช้เวลาการเตรียมสั้นที่สุด และให้ปริมาณแคลเซียมแลคเตทสูงที่สุดในการวิเคราะห์เชิงความร้อน สังเกตได้จากการสลายตัวด้วยความร้อนของแคลเซียมคาร์บอเนตที่ได้จากหอยตลับ และผลิตภัณฑ์แคลเซียมแลคเตทตามลำดับ และแคลไซต์ เป็นผลิตภัณฑ์จากการสลายตัวด้วยความร้อนขั้นสุดท้าย การใช้เทคนิคการกำหนดคุณลักษณะทั้งหมดยืนยันว่าผลิตภัณฑ์ปฏิกิริยาของแคลเซียมจากผงเปลือกหอยตลับ และกรดแลคติก จากการทดลองครั้งนี้เป็นแคลเซียมแลคเตทเพนทาไฮเดรต ($\text{Ca}(\text{C}_2\text{H}_4\text{OHCOO})_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) ผลการวิเคราะห์เอกลักษณ์รูปแบบการสั่นและการวิเคราะห์โครงสร้างและของผลึกของแคลเซียมแลคเตทที่สังเคราะห์ได้นั้นสอดคล้องกับรายงานผลการทดลองเป็นอย่างดี สันฐานวิทยาของแคลเซียมแลคเตทที่สังเกตได้จากกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดแสดงความแตกต่างทั้งรูปร่างและขนาด ซึ่งขึ้นอยู่กับความเข้มข้นของกรดแลคติก

เอกสารอ้างอิง

- สุภกร บุญยสิน. (2558). การสลายตัวของแคลเซียมคาร์บอเนตในเปลือกหอย. วิทยาศาสตร์บัณฑิต สาขาวิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์.
- ปัตตะ ฮาแว, พนิดา สุมานะตระกูล, ชัยรัตน์ ศิริพันธ์ และนิติธร ชูศรี. (2558). การสังเคราะห์อนุภาคนาโนแคลเซียมคาร์บอเนตจากเปลือกหอยแครงด้วยเทคนิค การขยายตัวอย่างรวดเร็วของแก๊สคาร์บอนไดออกไซด์เหนือสภาวะวิกฤต. วารสารมหาวิทยาลัยทักษิณ. 18(2): 31-45.
- วิจิตรา แดงปรก และปิยวรรณ ศุภวิทิตพัฒนา. (2550). โยเกิร์ตน้ำนมข้าวโพดเสริมแคลเซียมจากเปลือกไข่. มหาวิทยาลัยแม่โจ้.
- Jingbo Y. and Songyi L. (2013). Optimized Preparation of Eggshells Calcium Citrate (ESCC) by PEF Technology and its Accumulation in Mice Bone. 2013 4th International Conference on Food Engineering and Biotechnology. 2013(50): 136-141.
- Kabekkodu T., Blanton S. and Blanton T. (2017). Chemical analysis by diffraction: the Powder Diffraction File™. Powder Diffraction. 32(2): 63-71.
- Omran K.H., Mostafa M., AbdEL-sadek M.S., Hemeda O.M. and Ubic R. (2020). Effects of Ca doping on structural and optical properties of PZT nano powders. Results in Physics. 19(103580).
- Tsuruma A., Nomoto Y., Nishio M., Ishikawa M. and Sawai J. (2020). Efficacy of sorbitol-coated heated scallop-shell powder for the antimicrobial treatment of fresh vegetables. Food Control. 110(106972)
- Nguyen D.H., Boutouil M., Sebaibi N., Leleyter L. and Baraud F. (2013). Valorization of seashell by-products in pervious concrete pavers, Construction and Building Materials. 49: 151–160.
- Eziefula J.C., Ezech U.G. and Eziefula B. I. (2018). Properties of seashell aggregate concrete: a review. Construction and Building Materials. 192: 287–300.
- Lu J.Y., Carter E. and Chung R.A. (1980). Use of calcium salts for soybean curd preparation. Journal of Food Science. 45(1):32-34.
- Nolan C.R. and Qunibi W.Y. (2013). Calcium salts in the treatment of hyperphosphatemia in hemodialysis patients. Current Opinion in Nephrology and Hypertension. 12(4): 373–379.

Received: June 5, 2022; Revised: July 31, 2022; Accepted: August 1, 2022

การวิเคราะห์ปริมาณสารซาโปนินและประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อราของท้ายายม่อม Analysis of saponin content and antifungal activity of East Indian Arrowroot

สุภัทรา ขบวนฉลาด^{1*} และปวีณา สาเลทอง¹Supattra Khabuanchalad^{1*} and Paweena Saleethong¹¹คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์ จังหวัดสุรินทร์

*Corresponding Author E-mail Address : khabuanchalads@gmail.com

บทคัดย่อ

ท้ายายม่อมเป็นไม้ล้มลุกอายุหลายปี มีหัวใต้ดินสำหรับสะสมอาหาร ประเทศไทยนิยมใช้หัวของท้ายายม่อมในการทำแป้งสำหรับประกอบอาหารโดยเฉพาะอาหารหวาน ในขณะที่ส่วนใบ ลำต้น และส่วนอื่น ๆ ไม่มีการนำไปใช้ประโยชน์ ซึ่งจากการสกัดตัวอย่างใบ ลำต้น และผลของท้ายายม่อมด้วยตัวทำละลายเอทานอล พบว่าส่วนของผลให้ปริมาณสารสกัดหยาบมากที่สุด รองลงมาคือ ใบ และลำต้น ซึ่งเมื่อนำสารสกัดหยาบมาแยกและทดสอบชนิดของสารซาโปนินด้วยวิธี Liebermann-Burchard Test และวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันของสารสกัดด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปี พบว่าสารสกัดประกอบด้วยสารซาโปนินประเภทไตรเทอร์พีนอยด์ โดยใบจะมีปริมาณสารซาโปนินมากที่สุด (23.44 ไมโครกรัมต่อกรัมตัวอย่างแห้ง) รองลงมาคือ ผล (19.73 ไมโครกรัมต่อกรัมตัวอย่างแห้ง) และลำต้นของท้ายายม่อม (7.79 ไมโครกรัมต่อกรัมตัวอย่างแห้ง) และเมื่อนำสารสกัดดังกล่าวไปทดสอบประสิทธิภาพการต้านการเจริญเติบโตของเชื้อรา *Colletotrichum gloeosporioides* ซึ่งเป็นเชื้อราที่ก่อให้เกิดโรคในผัก ผลไม้ พบว่าสารสกัดซาโปนินสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อราได้ โดยประสิทธิภาพของการยับยั้งจะเพิ่มขึ้นตามความเข้มข้นของสารสกัด

คำสำคัญ: ต้านเชื้อรา ท้ายายม่อม ซาโปนิน

Abstract

Arrowroot (*Tacca leontopetaloides* Ktze) is an herbaceous plant which produces starchy tuber widely used to produce flour for various kinds of recipes, especially Thai desserts. However, medical and health benefits of other parts of the plant such as stalk, leaf and flower are understudied. The objective of this article is to present an analysis of saponin content in arrowroot and its inhibitory effects on the growth of *Colletotrichum gloeosporioides*. Ethanol extraction of arrowroot leaf, stem and fruit indicated that the fruit yielded the highest content of crude extract, followed by leaf and trunk, respectively. Classification of saponin in the crude extract was performed using Liebermann-Burchard Test and IR spectroscopy. The results indicated that the extract contained triterpenoid

saponin. The extraction was further analyzed using UV-Vis spectroscopy, and it was found that arrowroot leaf contained the highest amount of saponin (23.44 $\mu\text{g/gDW}$), followed by its fruit (19.73 $\mu\text{g/gDW}$) and stem (7.79 $\mu\text{g/gDW}$). The saponin extract was further tested for the efficiency against the growth of *Colletotrichum gloeosporioides* a fungus that causes diseases in fruits and vegetables. The results showed that saponin extract could inhibit the growth of the fungus and the inhibition efficiency increased with the increasing concentration of the extract.

Keywords: Antifungal, East Indian Arrowroot, Saponin

บทนำ

ซาโปนินเป็นสารประกอบไกลโคไซด์ (Glycoside compound) ซึ่งมีคุณสมบัติเกิดฟองได้ง่าย สารซาโปนินแบ่งได้เป็น 2 กลุ่ม ได้แก่ ไตรเทอร์พีนอยด์ไกลโคไซด์ (Triterpenoid glycoside) และ สเตอรอยด์ไกลโคไซด์ (Steroid glycoside) ซึ่งโครงสร้างทั้งสองนั้นแตกต่างกันในส่วนที่เป็นน้ำตาลในโครงสร้างของไกลโคไซด์ สารซาโปนินพบในพืชชนิดหนึ่งมีชื่อว่า Soapwort (*Saponaria officinalis* L.) ซึ่งเป็นพืชที่ใช้ทำสบู่ในสมัยโบราณ เนื่องจากในโครงสร้างมีทั้งส่วนที่ละลายในไขมัน และส่วนที่ละลายในน้ำ นอกจากนี้ยังมีรายงานว่าในสมัยก่อนชาวประมงใช้สารซาโปนินจากเมล็ดต้นจิกทะเลเป็นยาเบื่อปลา หรือใช้สารสกัดจากลูกปะคำตีควาย (*Sapindus mukorossi* Gareth) เป็นยากำจัดหอยทากซึ่งเป็นศัตรูพืชสำคัญในนาข้าว นอกจากการใช้พืชที่มีสารซาโปนินในชีวิตประจำวันแล้ว ปัจจุบันยังมีการนำสารสกัดซาโปนินมาประยุกต์ใช้ทางการแพทย์ โดยมีรายงานว่าสารซาโปนินมีฤทธิ์ในการแก้อาการอักเสบ การต้านเชื้อรา ยีสต์ แบคทีเรีย พยาธิ หรือเนื้องอก นอกจากนี้ สารซาโปนินยังถูกใช้เพื่อเป็นสารตั้งต้นในการผลิตยาในกลุ่มสเตอรอยด์ สารไตรเทอร์พีนซาโปนิน (Triterpene saponin) ซึ่งเป็นอนุพันธ์ของซาโปนินมีแนวโน้มในการป้องกันและรักษาโรคเกี่ยวกับการเผาผลาญอาหาร หรือโรคเกี่ยวกับหลอดเลือดหรือเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (Cheok et al., 2014) การค้นพบว่าสารซาโปนินนั้นมีฤทธิ์ทางยาโดยเฉพาะเป็นสารต้านมะเร็ง ทำให้การสกัดสารซาโปนินจากพืชเป็นที่นิยมมากขึ้น สารซาโปนินส่วนมากพบในพืชโดยพืชที่มีการสกัดสารซาโปนินมากที่สุดคือ โสม นอกจากนี้ยังมีการสกัดซาโปนินจากนมถั่วเหลือง รากของบิฑูการ์ หน่อไม้ฝรั่ง ผลแบล็คเบอร์รี่ สตอร์เบอร์รี่ และลูกท้อ นอกจากนี้สารซาโปนินยังสามารถพบได้ในเปลือกของหัวท้ายม่อมอีกด้วย

ตัวทำละลายที่นิยมใช้ในการสกัดสารซาโปนินส่วนมากเป็นแอลกอฮอล์ หรือน้ำผสมแอลกอฮอล์ วิธีที่ใช้น้ำเป็นตัวทำละลายจัดเป็นกระบวนการสกัดที่ง่าย ราคาถูกแต่ยากต่อการกำจัดตัวทำละลายเนื่องจากต้องใช้ความร้อนสูงซึ่งอาจทำให้ซาโปนินสลายตัวได้ การใช้แอลกอฮอล์ เช่น เมทานอล หรือเอทานอล ในการสกัดเป็นวิธีที่นิยมมากเนื่องจากง่ายต่อการกำจัดตัวทำละลาย ดังนั้นการเลือกตัวทำละลายจึงมีผลต่อปริมาณและความบริสุทธิ์ของสารซาโปนินที่ได้ เช่น การสกัดตัวอย่างโสมด้วยบิวทานอล (*n*-butanol) ที่อุณหภูมิห้องจะให้ความเข้มข้นของจินเซโนไซด์ (Ginsenoside) มากกว่าการใช้เมทานอล และการสกัดเมล็ด *Glinus lotoides* ด้วยสารละลายเมทานอลผสมน้ำจะได้สารสกัดหยาบน้อยกว่าการใช้น้ำเป็นสารสกัดอย่างเดียว นอกจากนี้ตัวทำละลายที่ใช้สกัดยังมีผลต่อองค์ประกอบของซาโปนินและคุณสมบัติของสารสกัดที่ได้ (Guclu-Ustundag, 2007; Ashour, 2019)

สารสกัดซาโปนินจากพืชถูกนำมาใช้ประโยชน์อย่างแพร่หลาย มีรายงานว่าสารซาโปนินซึ่งสกัดจาก Huangshanyao ซึ่งเป็นพืชสมุนไพรพื้นเมืองของประเทศจีนมีฤทธิ์ในการต้านภาวะ oxidative stress ของเซลล์ ด้านการเกิดมะเร็ง และโรคไขข้ออักเสบ (Dong et al., 2001; Wang et al., 2015) นอกจากนี้สารสกัดซาโปนินจากพืชดังกล่าวยังถูกนำมาใช้เป็นยาใช้ภายนอก

ในการรักษาโรคซึ่งเกิดจากเชื้อได้แก่ *Lymphatic tuberculosis* และ *Bacillus anthracis* (Dong et al., 2001; Zhao et al., 2014) ลักษณะ และคณะ (2562) ได้ทำการสกัดสารซาโปนินจากพืชป่าชายเลนวงศ์ Rhizophoraceae และทดสอบการต้านเชื้อแบคทีเรียที่ก่อโรคในสัตว์น้ำ ได้แก่ *Streptococcus agalactiae* SAAQ001, *Aeromonas hydrophila* AHAQ001, *Vibrio harveyi* VHAQ001 และ *V. parahaemolyticus* พบว่า สารสกัดส่วนใหญ่ออกฤทธิ์ต้านเชื้อแบคทีเรียก่อโรคทั้งแกรมบวกและแกรมลบ

สารซาโปนินหลายชนิดมีคุณสมบัติในการต้านเชื้อรา เนื่องจากลักษณะโครงสร้างของตัวยารักษาโรคผิวหนังที่เกิดจากเชื้อราเป็นสารพวกไกลโคไซด์โดยมีโครงสร้างคล้ายซาโปนิน มีรายงานว่าในประเทศจีนชาวบ้านนิยมนำกากเมล็ดชาที่ต้มแล้วมาแช่มือแช่เท้า เพื่อรักษาโรคซึ่งเกิดจากเชื้อราตามเล็บมือ เล็บเท้า (พิตรินา, 2557) นอกจากนี้ยังมีการค้นพบว่า สารซาโปนินที่สกัดจากรากของสมุนไพรพื้นเมืองของจีนชื่อว่า *Dioscorea panthaica* Prain et Burk หรือ Huang Shanyao ในภาษาจีนนั้น มีฤทธิ์ในการต้านเชื้อรา *Candida albicans* โดยผลการศึกษพบว่า สารสกัดซาโปนินจากพืชดังกล่าวสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตและการเกิดไบโอฟิล์มของเชื้อ *C. albicans* โดยสารสกัดที่ความเข้มข้น 16 - 64 µg/ml สามารถยับยั้งขั้นตอนการเกาะติดแผ่นโพลีสไตรีน (Polystyrene) ยับยั้งขั้นตอนของการเปลี่ยนจากยีสต์ไปเป็นการเจริญเติบโตเป็นเส้น ๆ ยับยั้งการสร้างฟอสโฟไลเปส (Phospholipase) และทำให้เกิด Endogenous Reactive Oxygen Species (ROS) ซึ่งก่อให้เกิดการแตกของผนังเซลล์ในที่สุด (Yang et al., 2018)

โดยทั่วไปสารซาโปนินนั้นมีอยู่ในพืชและทำหน้าที่เหมือนสารเคมีที่เป็นแนวป้องกันการโจมตีของเชื้อรา บางครั้งสารชนิดนี้จะไม่พบในพืชที่แข็งแรงสมบูรณ์แต่จะสร้างขึ้นเมื่อพืชถูกทำลายจากแมลง โรคพืชหรือการกลายพันธุ์ เพื่อเป็นการต้านเชื้อรา (Papadopoulou, 1999) อภิรติ และคณะ (2560) ได้ทำการสกัดสารซาโปนินจากเปลือกเงาะเพื่อใช้ในการยับยั้งเชื้อรา *Phytophthora palmivora* จากทุเรียนและเชื้อ *Colletotrichum* spp. จากมะละกอ และเชื้อ *Marasmius palmivorus* Sharples จากผลสละ พบว่าสารสกัดจากเปลือกเงาะสามารถยับยั้งเชื้อดังกล่าวได้อย่างมีประสิทธิภาพที่ความเข้มข้น 2,000 มิลลิกรัมต่อลิตร

ต้นเต้ายายม่อมเป็นพืชที่มีปริมาณสารซาโปนินค่อนข้างสูง แต่ไม่มีรายงานเกี่ยวกับปริมาณสารซาโปนินในส่วนต่าง ๆ ของต้นเต้ายายม่อม งานวิจัยนี้จึงทำการสกัดและเปรียบเทียบปริมาณสารซาโปนินในส่วนต่าง ๆ ของเต้ายายม่อม เพื่อเป็นข้อมูลประกอบการนำสารสกัดดังกล่าวมาใช้ประโยชน์รวมถึงศึกษาประสิทธิภาพของสารสกัดซาโปนินในการต้านการเจริญเติบโตของเชื้อราซึ่งมักก่อให้เกิดโรคในพืช

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

วิธีการสกัดและการทำให้ซาโปนินบริสุทธิ์ดัดแปลงจากวิธีของอภิรติ (2560) ดังนี้

1. การสกัดแยกสารซาโปนินจากเต้ายายม่อม

1.1 การเตรียมตัวอย่าง

นำตัวอย่าง ลำต้น ใบ และผลของเต้ายายม่อมสีเขียวจำนวน 1 กิโลกรัม ล้างให้สะอาด หั่นเป็นชิ้นขนาด 0.5 เซนติเมตร อบที่ 50 - 60 องศาเซลเซียส ด้วยตู้อบลมร้อนจนน้ำหนักแห้งคงที่ จากนั้นบดให้ละเอียดเพื่อสกัดสารตามกรรมวิธี

1.2 การสกัดแบบแช่

ซึ่งตัวอย่าง ลำต้น ใบ ผล และเมล็ด ทำลายมอม ที่อบแห้งแล้ว ตัวอย่างละ 100 กรัม แช่ด้วยสารละลายเอทานอลเข้มข้น 70% ปริมาตร 500 มิลลิลิตร โดยทำการแช่ 4 วัน และเขย่าวันละ 2 ครั้งนานครั้งละ 10 นาที เมื่อครบ 4 วัน กรองสารด้วยกระดาษกรองเบอร์ 1 จากนั้นระเหยตัวทำละลายออกจากเครื่องระเหยสุญญากาศ (Rotary vacuum evaporator) ที่อุณหภูมิ 40 องศาเซลเซียส แล้วนำไประเหยตัวทำละลายออกจากตู้อบลมร้อนที่ 50 - 60 องศาเซลเซียส จนแห้งแล้วชั่งน้ำหนักสารสกัดหยาบที่ได้

2. การทำให้สารซาโปนินบริสุทธิ์

เพื่อศึกษาชนิดของซาโปนินในสารสกัดจากทำลายมอม สารสกัดหยาบจากทำลายมอมถูกนำมาสกัดต่อด้วยไดเอทิลอีเทอร์เก็บชั้นอีเทอร์ไว้ จากนั้นนำชั้นน้ำสกัดต่อกับบิวทานอลที่อิ่มตัวด้วยน้ำ เก็บชั้นบิวทานอลและชั้นน้ำไว้แล้วระเหยตัวทำละลายทั้ง 3 ชนิดออกจากเครื่องระเหยสุญญากาศแล้วนำมาทดสอบชนิดของซาโปนินต่อไป

3. การทดสอบชนิดของซาโปนินโดยวิธี Liebermann-Burchard test (อภิรดี, 2560)

นำสารซาโปนินที่สกัดได้มาเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานซาโปนิน (Saponin) และ ดิจิโตนิน (Digitonin) โดยซึ่งสารสกัด 100 มิลลิกรัม ชั่งซาโปนินและดิจิโตนินชนิดละ 100 มิลลิกรัม จากนั้นเติมเอทานอลเข้มข้น 70% ปริมาตร 5 มิลลิลิตร เติมนครดิลฟิวริกเข้มข้น 0.2 โมลาร์ 10 มิลลิลิตร แล้วต้มให้เดือด 15 นาที แล้วนำไปใส่กรวยแยก จากนั้นเติมคลอโรฟอร์ม 15 มิลลิลิตร เก็บชั้นคลอโรฟอร์มไว้แล้วเติมโซเดียมซัลเฟตจนสารละลายใสและเติมนครดแอซิดิก 1 มิลลิลิตร และกรดิลฟิวริกเข้มข้น 2 มิลลิลิตร สังเกตสีเปรียบเทียบกับสีของดิจิโตนินซึ่งเป็นไตรเทอร์พีนอยด์ซาโปนิน (Triterpenoid saponin) จะให้สีม่วงแดง และสเตียรอยด์ซาโปนิน (Steroid saponin) จะให้สีเขียว

4. การวิเคราะห์สารสกัดซาโปนินจากทำลายมอม

4.1 การวิเคราะห์สารซาโปนินด้วยเทคนิคฟูเรียร์ทรานส์ฟอร์มอินฟราเรดสเปกโทรสโคปี (FTIR)

วิเคราะห์สารสกัดซาโปนินด้วยเครื่อง FTIR (Thermo Scientific™ Nicolet™ iS50 FTIR) โดยทำการสแกนที่ช่วงเลขคลื่นตั้งแต่ 4,000 - 5,000 cm^{-1} ความละเอียด 4 cm^{-1} โดยเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานซาโปนินและดิจิโตนิน

4.2 วิเคราะห์หาปริมาณสารซาโปนิน

นำตัวอย่างทำลายมอมมาทำการสกัดอีกครั้งซึ่งน้ำหนักสารสกัดหยาบที่ได้ จากนั้นวิเคราะห์หาปริมาณซาโปนินรวมเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานซาโปนินและดิจิโตนิน โดยขั้นตอนดังนี้ (Madland, 2013)

การเตรียมสารมาตรฐาน และการสร้างกราฟมาตรฐาน โดยปีเตสสารมาตรฐานซาโปนินและดิจิโตนิน เข้มข้น 30,000 ไมโครกรัม/มิลลิลิตร ปริมาตร 0, 15, 20, 25, 30, 35 และ 50 ไมโครลิตร ใส่หลอดทดลองเติมน้ำกลั่นให้ได้ปริมาตร 50 ไมโครลิตร ในทุกความเข้มข้น นำไปวิเคราะห์หาปริมาณซาโปนินโดยเติมสารละลายวานิลลิน (Vanilline) เข้มข้น 5% ปริมาตร 0.2 มิลลิลิตร เติมนครดเปอร์คลอริกปริมาตร 0.8 มิลลิลิตรเขย่าให้เข้ากัน จากนั้นต้มในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ 70 องศาเซลเซียส นาน 15 นาที แล้วแช่ในอ่างน้ำแข็ง 30 วินาที เติมนครดแอซิดิก 5 มิลลิลิตร เขย่าให้เข้ากัน ดังนั้นทุกความเข้มข้นมีปริมาตรสุดท้าย 6.05 มิลลิลิตร จากนั้นนำไปวัดค่าดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร ด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ (Thermo Scientific, Genesis 10S UV-Vis Spectrometer) แล้วนำค่าดูดกลืนแสงที่วัดได้สร้างกราฟมาตรฐานให้ได้สมการเส้นตรงเพื่อหาค่าความชันและใช้คำนวณปริมาณสารซาโปนินรวมต่อไป

การเตรียมสารสกัดหยาบซาโปนินและการวิเคราะห์หาปริมาณซาโปนินรวม โดยนำสารสกัดหยาบทั้งหมดละลายด้วยน้ำกลั่นแล้วปรับปริมาตรเป็น 100 มิลลิลิตร จากนั้นเจือจาง 100, 500 และ 1,000 เท่า ด้วยน้ำกลั่น แล้วสกัดต่อกับบิวทานอลที่อิ่มตัวด้วยน้ำ แยกชั้นบิวทานอลมาระเหยตัวทำละลายออกจากตู้อบลมร้อนแล้วซึ่งสารสกัด 0.1 กรัม นำไปละลายน้ำและปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นเป็น 10 มิลลิลิตร ดูตัวอย่างมา 50 ไมโครลิตร เพื่อวิเคราะห์หาปริมาณซาโปนิน เช่นเดียวกับการสร้างกราฟมาตรฐาน

4.3 การทดสอบประสิทธิภาพของสารสกัดชาโพนินต่อการยับยั้งเชื้อรา *Collectotrichum gloeosporioides*

การเตรียมเชื้อรา *Collectotrichum gloeosporioides* ทำโดยการเพาะเลี้ยงเชื้อรา *Collectotrichum gloeosporioides* ด้วยเทคนิค transplanting โดยสกัดเชื้อราจากตัวอย่างพริกที่เป็นโรค ซึ่งเก็บตัวอย่างจากแปลงเกษตรกร ผู้ปลูกพริก ต.หมอ อ.ปราสาท จ.สุรินทร์ มาทำการฟอกเนื้อเยื่อให้สะอาดปราศจากเชื้อที่บริเวณพื้นผิว โดยทำการฟอกฆ่าเชื้อพริกทั้งผลด้วยแอลกอฮอล์ 70% เป็นเวลา 3 - 5 วินาที จากนั้นล้างด้วยน้ำกลั่นนิ่งฆ่าเชื้อ 5 ครั้ง ครั้งละ 1 นาที แล้วซับน้ำออกจากเนื้อเยื่อ ตัดเนื้อเยื่อตัวอย่างโรคซึ่งเป็นรอยต่อระหว่างเนื้อเยื่อปกติและเนื้อเยื่อที่เป็นโรควางบนอาหารเลี้ยงเชื้อ Potato Dextrose Agar (PDA) แล้วนำจานเพาะเชื้อไปบ่มที่ 28 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 3 วัน แล้วจึงทำการแยกเชื้อให้บริสุทธิ์ด้วยวิธี Single spore isolation

การทดสอบประสิทธิภาพของสารสกัดชาโพนินต่อการยับยั้งเชื้อรา โดยเตรียมอาหารเลี้ยงเชื้อ PDA เทลงในจานเพาะเชื้อรองจานอาหารเลี้ยงเชื้อแห้ง จากนั้นใช้ไม้พินสาลิซุบเชื้อราและทำการป้ายให้ทั่วผิวอาหารเลี้ยงเชื้อ แล้วนำที่เจาะรูวงอาหารเลี้ยงเชื้อ (Cork border) จุ่มสารสกัดชาโพนินเข้มข้นเท่ากับ 0, 125, 250, 375 และ 500 ไมโครกรัมต่อลิตร ซึ่งมีไคเมทิลซิลฟอกไซด์เป็นตัวทำละลายวางบนอาหารเลี้ยงเชื้อที่ทำการป้ายเชื้อราเรียบร้อยแล้ว จากนั้นทำการบ่มที่อุณหภูมิห้อง และเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของเชื้อรา โดยใช้สารยับยั้งเชื้อรา Probenet[®] (70%, Bayer) เป็นชุดควบคุมที่เป็นผลบวก (Positive control)

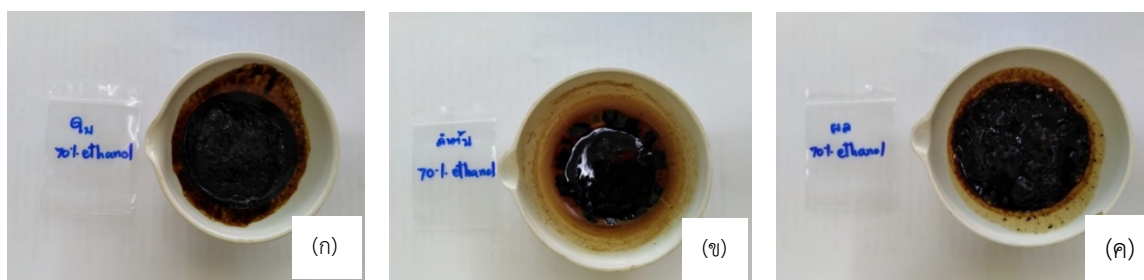
ผลการวิจัย และการอภิปรายผล

1. การสกัดสารชาโพนินจากเห้ยายม่อม

การสกัดสารชาโพนินจากตัวอย่างผล ใบ และต้น เห้ยายม่อม ปริมาณ 100 กรัม ด้วยตัวทำละลายเอทานอลเข้มข้น 70% พบว่าปริมาณสารสกัดหยาบที่ได้มีลักษณะดังรูปที่ 1 และมีปริมาณไม่เท่ากันสำหรับตัวอย่าง ผล ใบ และลำต้น (ตารางที่ 1) โดยตัวอย่างผลมีปริมาณสารสกัดหยาบมากที่สุดคือ 39.921% รองลงมาคือใบและลำต้นซึ่งมีปริมาณสารสกัดเท่ากับ 11.331% และ 9.245% ตามลำดับ

ตารางที่ 1 ปริมาณสารสกัดหยาบจากตัวอย่างเห้ยายม่อม

ตัวอย่าง	ร้อยละของสารสกัดหยาบที่ได้
ผล	39.921
ใบ	11.331
ลำต้น	9.245



รูปที่ 1 ลักษณะของสารสกัดหยาบของตัวอย่างเห้ยายม่อม: ตัวอย่างใบ (ก) ตัวอย่างลำต้น (ข) และตัวอย่างผล (ค)

2. การทำให้สารซาโปนินบริสุทธิ์

สารสกัดหยาบที่ได้จากการสกัดตัวอย่างเห่ายายม่อมด้วยตัวทำละลายเอทานอลถูกนำมาทำให้บริสุทธิ์มากขึ้น โดยการสกัดซ้ำด้วยตัวทำละลาย 3 ชนิด ได้แก่ ไดเอทิลอีเทอร์ บิวทานอล (*n*-butanol) และ น้ำ ซึ่งสารซาโปนินเป็นสารที่มีขี้้วสามารถละลายได้ในตัวทำละลายที่มีขี้้ว (Ashour et al., 2019) นอกจากนี้มีรายงานว่าซาโปนินนั้นละลายได้ดีในตัวทำละลายแอลกอฮอล์ เช่น บิวทานอล เนื่องจากความมีขี้้วของตัวทำละลายนั้นเหมาะสม อุณหภูมิในการหมักแบบแช่ และการแพร่ของสารซาโปนินในเฟสของเหลวนั้นเหมาะสม (Padmavathi et al., 2015; Yun et al., 2016) และจากคุณสมบัติของบิวทานอลที่ไม่เข้ากับน้ำเมื่อใช้ตัวทำละลายบิวทานอลในการสกัดสารซาโปนินจะสามารถแยกชั้นบิวทานอลออกจากชั้นน้ำได้ ส่วนไดเอทิลอีเทอร์ซึ่งเป็นตัวทำละลายซึ่งไม่มีขี้้วนั้นไม่เข้ากับน้ำและบิวทานอลเช่นกัน ดังนั้นการใช้ตัวทำละลายทั้ง 3 ชนิดในการสกัดทำให้สามารถแยกตัวทำละลายออกจากกันได้โดยใช้กรวยแยก

จากการวิเคราะห์ปริมาณสารสกัดในแต่ละชั้นของตัวทำละลายพบว่า สารสกัดในชั้นไดเอทิลอีเทอร์ในทุกตัวอย่างมีลักษณะหนืดมีสีน้ำตาลดำ มีปริมาณน้อยกว่า 0.1 กรัม ไม่สามารถทำการทดลองต่อได้ สอดคล้องกับงานวิจัยของ อภิรติ และคณะ (2560) ซึ่งทำการสกัดสารสกัดหยาบจากเปลือกเงาะและทำให้บริสุทธิ์ด้วยตัวทำละลายไดเอทิลอีเทอร์ บิวทานอล และ น้ำ พบว่าสารสกัดที่ได้ในชั้นของไดเอทิลอีเทอร์นั้นมีลักษณะผงสีเหลืองและมีปริมาณน้อยมาก แสดงให้เห็นว่าสารสำคัญในสารสกัดหยาบนั้นละลายได้น้อยในไดเอทิลอีเทอร์ ทั้งนี้เนื่องจากสารซาโปนินนั้นเป็นสารที่มีขี้้วจึงละลายได้น้อยในตัวทำละลายไดเอทิลอีเทอร์ซึ่งมีขี้้วต่ำ (Padmavathi et al., 2015)

สำหรับสารสกัดในชั้นบิวทานอล และชั้นน้ำนั้น มีลักษณะหนืด สีน้ำตาลเข้ม โดยในชั้นน้ำจะมีปริมาณสารสกัดมากกว่าชั้นบิวทานอลสำหรับทั้งตัวอย่างใบ ลำต้น และผล โดยปริมาณสารสกัดในชั้นน้ำจากตัวอย่างผลมีมากที่สุด รองลงมา คือ ใบ และ ลำต้น ตามลำดับ โดยสารสกัดในชั้นบิวทานอลจะพบว่าในตัวอย่างใบมีสารสกัดมากที่สุด รองลงมา คือ ผล และ ลำต้น ตามลำดับ (ตารางที่ 2)

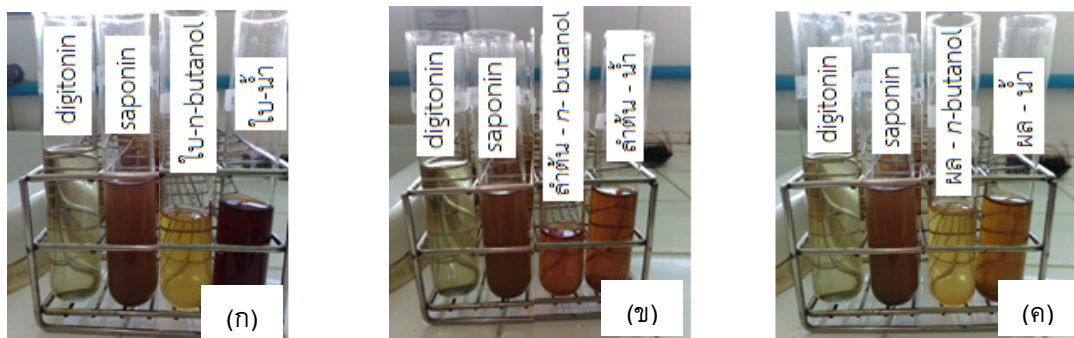
สารซาโปนินในพืชเป็นสารซึ่งละลายได้ดีในตัวทำละลายแอลกอฮอล์ เช่น บิวทานอล (Padmavathi et al., 2015; Yun et al., 2016) และเมื่อพิจารณาปริมาณสารสกัดจากชั้นบิวทานอลในตัวอย่าง ใบ ลำต้น และผล พบว่า ปริมาณสารสกัดในตัวอย่างใบนั้นมีมากที่สุด รองลงมา คือ ผล และ ลำต้น ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับผลการวิเคราะห์ปริมาณสารซาโปนินด้วยวิธีทางสเปกโทรสโกปี (ตารางที่ 3) ซึ่งพบว่า ปริมาณสารซาโปนินนั้นมีในใบมากที่สุดรองลงมา คือ ผล และ ลำต้น แสดงให้เห็นว่าสารซาโปนินในตัวอย่างนั้นละลายได้ดีในตัวทำละลายบิวทานอล อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาปริมาณสารสกัด (ตารางที่ 2) พบว่าปริมาณสารสกัดในชั้นน้ำนั้นมีมากกว่าในชั้นบิวทานอล ซึ่งอาจเนื่องจากมีสารอื่น ๆ ในพืชเจือปนในสารสกัดในชั้นน้ำด้วย

ตารางที่ 2 ปริมาณสารสกัดในแต่ละชั้นตัวทำละลายของตัวอย่างสารสกัดหยาบเห่ายายม่อม

ตัวทำละลาย	น้ำหนักสารสกัด (กรัม)		
	ใบ	ลำต้น	ผล
ไดเอทิลอีเทอร์	< 0.1	< 0.1	< 0.1
บิวทานอล	2.096	0.145	0.762
น้ำ	6.007	5.782	34.920

3. การทดสอบสารกลุ่มประเภทของซาโปนิน

การทดสอบชนิดของซาโปนินในสารสกัดด้วยวิธี Liebermann-Burchard test เป็นวิธีที่ใช้ทดสอบสารกลุ่มไตรเทอร์ปีนอยด์ โดยสารกลุ่มดังกล่าวจะให้สารละลายสีน้ำตาลแดงในการทดสอบ ซึ่งเมื่อเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานซาโปนิน ซึ่งจัดเป็นสารกลุ่มไตรเทอร์ปีนอยด์ และสารมาตรฐานดิจิโทนิน ซึ่งเป็นสารกลุ่มสเตอรอยด์ พบว่า ผลการทดสอบชนิดของซาโปนินที่สกัดจากชันบิวทานอล และน้ำ ดังแสดงในรูปที่ 2



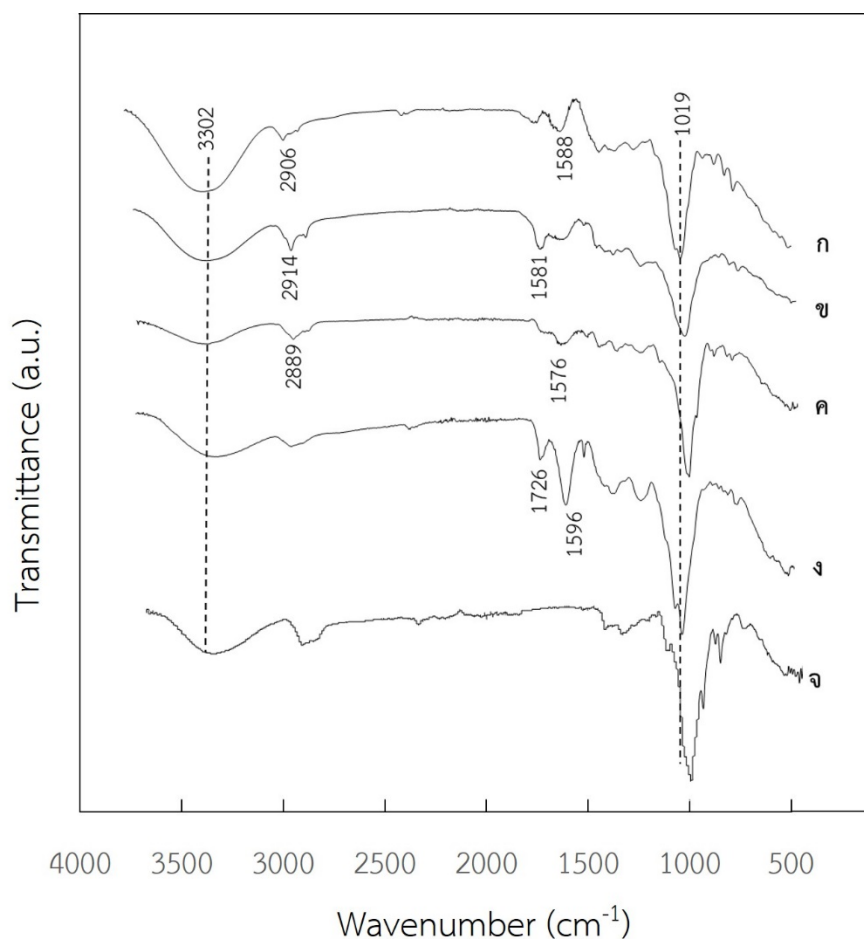
รูปที่ 2 การทดสอบชนิดซาโปนินของตัวอย่างเท้ายายม่อมเปรียบเทียบกับสารมาตรฐานซาโปนินและดิจิโทนิน จากตัวอย่างใบ (ก) ลำต้น (ข) และผล (ค)

จากรูปที่ 2 ผลการทดสอบด้วยวิธี Liebermann-Burchard test แสดงให้เห็นว่าสีของสารมาตรฐานดิจิโทนิน ซึ่งเป็นสเตอรอยด์ซาโปนินนั้นมีสีเขียวน้ำตาล ในขณะที่สีของสารมาตรฐานซาโปนินซึ่งเป็นไตรเทอร์ปีนอยด์ซาโปนินนั้นมีสีน้ำตาลแดง โดยสีของสารสกัดจาก ใบ ผล และลำต้นของเท้ายายม่อมทั้งที่ใช้ตัวทำละลายเป็นน้ำและบิวทานอลนั้นให้สีน้ำตาลแดง แสดงว่า ในสารสกัดประกอบด้วยซาโปนินที่เป็นไตรเทอร์ปีนอยด์ซาโปนินมากกว่าสเตอรอยด์ซาโปนิน โดยสารละลายในชั้นน้ำจะมีสีเข้มกว่าสารละลายในชั้นบิวทานอล

4. การวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันในสารสกัดเท้ายายม่อมด้วยเทคนิค IR Spectroscopy

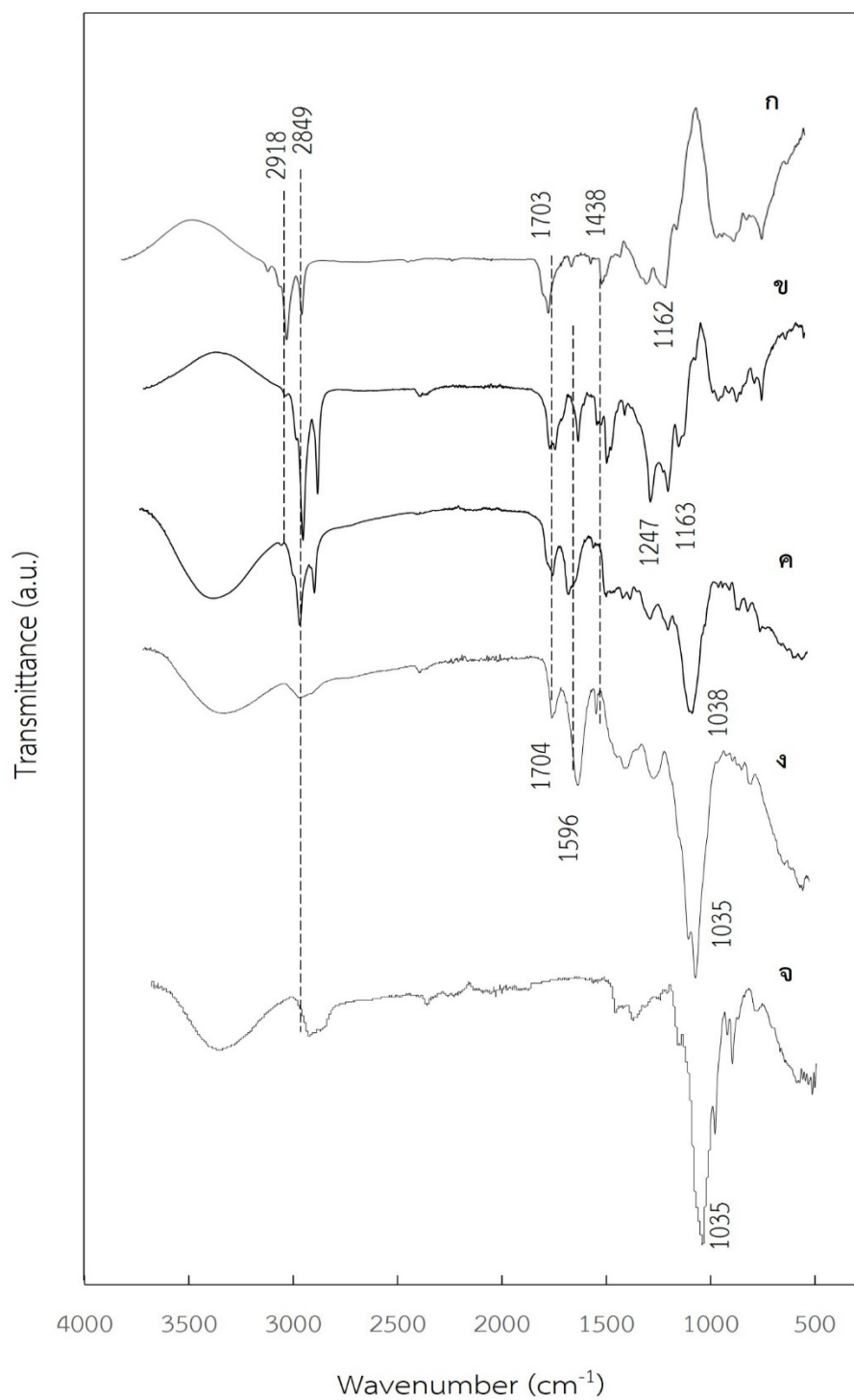
สเปกตรัมของสารสกัดจากตัวอย่างในชั้นสารสกัดบิวทานอลใน ใบ ลำต้น และผล แสดงในรูปที่ 3 ซึ่งเห็นว่าสเปกตรัมของตัวอย่างทั้งสามนั้นมีลักษณะคล้ายกัน โดยสเปกตรัมทั้งสามแสดงพีคที่ค่าความยาวคลื่นประมาณ $3292 - 3333 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเกิดจากการยืดหดของหมู่ -OH ในโครงสร้างของซาโปนิน และหมู่ -OH จากตัวทำละลายบิวทานอล พีคที่ค่าความยาวคลื่นประมาณ $2889 - 2914 \text{ cm}^{-1}$ เกิดจากการยืดหดของหมู่ C-H ของหมู่แอลเคนในโครงสร้างของซาโปนิน พีคที่ค่าความยาวคลื่นประมาณ $1576 - 1588 \text{ cm}^{-1}$ เกิดจากหมู่อะโรมาติกของ C-C ของวงแหวนในโครงสร้างของซาโปนิน และพีคที่ 1019 cm^{-1} เป็นพีคที่เกิดจากหมู่ CH_3 ในโครงสร้างของซาโปนิน (Ashokkumar, 2014; Gouvinhas, 2021)

รูปที่ 4 แสดงสเปกตรัมของสารสกัดจากตัวอย่างในชั้นไดเอทิลอีเทอร์ในตัวอย่าง ใบ ลำต้น และผล ซึ่งสเปกตรัมของตัวอย่างทั้งสามแสดงพีคที่ตำแหน่งคล้ายกัน โดยมีพีคที่เลขคลื่นประมาณ $2915 - 2918 \text{ cm}^{-1}$ และ $2847 - 2849 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเกิดจากการยืดหดของหมู่ C-H ในโครงสร้างของซาโปนินและโครงสร้างของไดเอทิลอีเทอร์ พีคที่เลขคลื่นประมาณ $1703 - 1706 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเกิดจากการยืดหดของหมู่ C=O ในโครงสร้างของซาโปนิน พีคที่ค่าความยาวคลื่นประมาณ $1598 - 1604 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเกิดจากหมู่ C=C ในวงแหวนอะโรมาติกในโครงสร้างของซาโปนิน พีคที่ค่าความยาวคลื่นประมาณ $1438 - 1441 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเกิดจากการยืดหดของหมู่ C-H ของหมู่แอลเคน และพีคที่เลขคลื่น 1038 cm^{-1} ซึ่งเกิดจากหมู่ C-O ในโครงสร้าง (Yu et al., 2021)

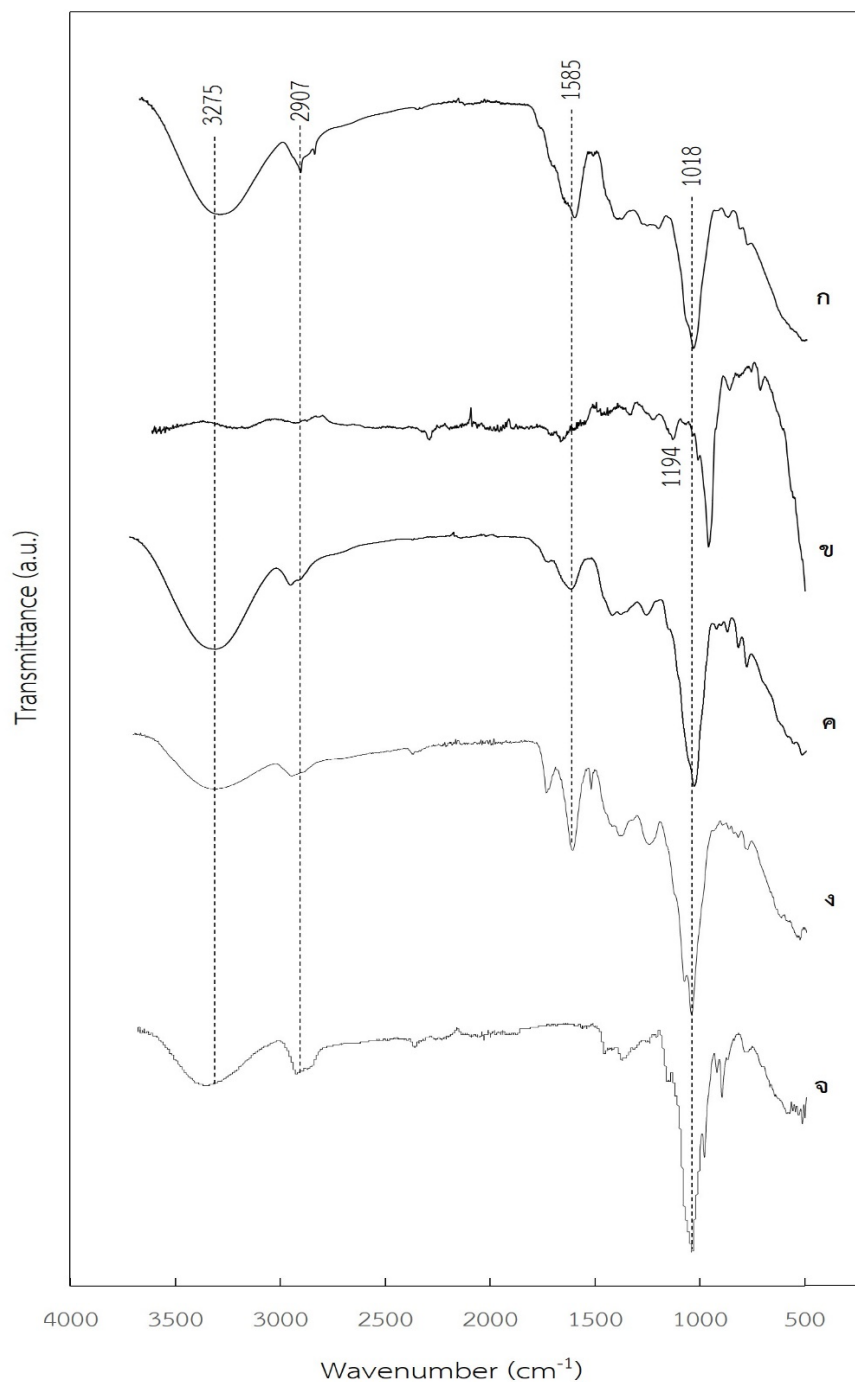


รูปที่ 3 สเปกตราของสารสกัดในชั้นบิวทานอลจากตัวอย่าง ใบ (ก) ลำต้น (ข) ผล (ค) สารมาตรฐานซาโปนิน (ง) และสารมาตรฐานคิโนนิน (จ)

รูปที่ 5 แสดงสเปกตราของสารสกัดในชั้นน้ำจากตัวอย่าง ใบ ลำต้น และผล โดยสเปกตราทั้งสามแสดงพีคที่ค่าความยาวคลื่นประมาณ 3297 และ 3275 cm^{-1} ซึ่งเกิดจากหมู่ -OH ในตัวทำละลายน้ำ นอกจากนี้ยังพบพีคที่ความยาวคลื่นประมาณ 2907 cm^{-1} ซึ่งเกิดจากการยืดหดของหมู่ C-H ในอัลเคน และพีคที่ความยาวคลื่นประมาณ 1149 - 1241 cm^{-1} ซึ่งเกิดจากการยืดหดของหมู่ C-O พีคที่ความยาวคลื่น 1585 - 1581 cm^{-1} ซึ่งเกิดจากหมู่ C=C ของวงแหวนอะโรมาติกในโครงสร้างของซาโปนิน และพีคที่ความยาวคลื่นประมาณ 1010 - 1018 cm^{-1} ซึ่งเกิดจากหมู่ C-O ของโครงสร้างซาโปนิน



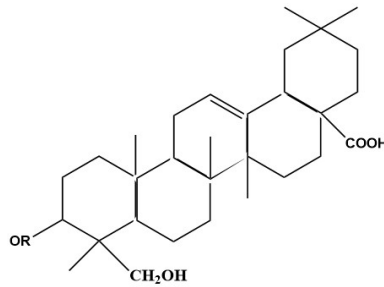
รูปที่ 4 สเปกตรัมของสารสกัดในชั้นไดเอทิลอีเทอร์จากตัวอย่าง ใบ (ก) ลำต้น (ข) ผล (ค) สารมาตรฐานชาโปนิน (ง) และสารมาตรฐานดีจิโทนิน (จ)



รูปที่ 5 สเปกตราของสารสกัดในชั้นน้ำจากตัวอย่าง ใบ (ก) ลำต้น (ข) ผล (ค) สารมาตรฐานซาโปนิน (ง) และสารมาตรฐาน ดิจิโทนิน (จ)

เมื่อเปรียบเทียบสเปกตราของสารตัวอย่างกับสารมาตรฐานซาโปนินและดิจิโทนิน พบว่า สเปกตรัมของซาโปนิน ซึ่งเป็น ไตรเทอร์ปีนอยด์ซาโปนิน นั้นมีพีคที่เลขคลื่น 1596 cm^{-1} และ 1726 cm^{-1} ซึ่งเป็นพีคที่เกิดจากหมู่ $\text{C}=\text{C}$ ของวงแหวน อะโรมาติกในโครงสร้างของไตรเทอร์ปีนอยด์ซาโปนิน ดังรูปที่ 6 ซึ่งพีคที่ตำแหน่งเลขคลื่นดังกล่าวปรากฏในสเปกตรัมของ ตัวอย่างสารสกัดจากใบ ลำต้น และผลของเห้ายายม่อม ทั้งในชั้นบิวทานอล ชั้นไดเอทิลอีเทอร์ และชั้นน้ำด้วย แสดงให้เห็นว่า

ซาโปนินที่สกัดได้นั้นเป็นซาโปนินประเภทไตรเทอร์ปีนอยด์ซาโปนิน ซึ่งสอดคล้องกับผลการทดสอบ Liebermann-Burchard test



รูปที่ 6 โครงสร้างของไตรเทอร์ปีนอยด์ซาโปนิน (Ashour et al., 2019)

5. การวิเคราะห์ปริมาณซาโปนิน

ปริมาณสารซาโปนินในตัวอย่าง ลำต้น ใบ และผลของท้ายยม่อม ได้ถูกวิเคราะห์โดยเทคนิคอัลตราไวโอเลต และวิสิเบิลสเปกโทรสโคปีตามวิธีของ Madland (2013) โดยทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงของสารที่เกิดขึ้นเมื่อเกิดปฏิกิริยาระหว่างซาโปนินและวานิลลิน (Vanilline) ที่ความยาวคลื่น 550 นาโนเมตร และใช้สารมาตรฐานซาโปนินในการสร้างกราฟมาตรฐานเพื่อคำนวณหาปริมาณซาโปนินในสารตัวอย่างจากการดูดกลืนแสงดังแสดงในตารางที่ 3 ซึ่งเมื่อคำนวณแล้วพบว่าปริมาณสารซาโปนินมีอยู่ในใบมากที่สุดนั้นคือ 23.44 ไมโครกรัมต่อใบแห้งหนึ่งกรัม รองลงมาคือที่ ผล 19.73 ไมโครกรัมต่อตัวอย่างแห้งหนึ่งกรัม และลำต้น 7.79 ไมโครกรัมต่อตัวอย่างแห้งหนึ่งกรัม ตามลำดับ

ตารางที่ 3 ปริมาณซาโปนินของตัวอย่างท้ายยม่อม

ตัวอย่าง ท้ายยม่อม	ค่าการดูดกลืน แสง	ความเข้มข้นของ ซาโปนินในสารสกัด (ไมโครกรัมต่อลิตร)	ปริมาณสาร ซาโปนินในตัวอย่าง (ไมโครกรัมต่อกรัมตัวอย่างแห้ง)
ใบ	0.696	193.73	23.44
ผล	0.650	163.06	19.73
ลำต้น	0.502	64.40	7.79

6. ประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อราจากตัวอย่างพริก

เชื้อรา *Colletotrichum gloeosporioides* ที่ใช้ในการทดสอบสกัดได้จากตัวอย่างพริกแล้วนำมาเลี้ยง และทำให้บริสุทธิ์ด้วยเทคนิค tissue transplanting บนอาหารเลี้ยงเชื้อ PDA ดังรูปที่ 7 ซึ่งจากการทดสอบประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อราของสารสกัดซาโปนินจากใบท้ายยม่อม ที่ระดับความเข้มข้นของสารสกัด 125, 250, 375 และ 500 ไมโครกรัมต่อลิตร เปรียบเทียบกับสารต้านเชื้อรา Probenex® ซึ่งถือว่าเป็นชุดควบคุมที่เป็นผลบวก พบว่า สารสกัดซาโปนินสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อรา *Colletotrichum gloeosporioides* ได้ โดยสังเกตได้จากบริเวณใส (Clear zone) รอบ ๆ จุดที่หยดสารสกัดซาโปนินซึ่งแสดงให้เห็นว่าเชื้อราเจริญเติบโตได้น้อย (รูปที่ 8) โดยความกว้างของบริเวณใสจะแปรผันตามความเข้มข้นสารสกัด (ตารางที่ 3) ส่วนบริเวณที่ปรากฏเป็นสีขาวในงานเพาะเชื้อแสดงให้เห็นถึงสปอร์ของเชื้อราที่มีการเจริญเติบโต ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Yang et al. (2018) ซึ่งรายงานว่า ซาโปนินสามารถยับยั้งการสร้างฟอสโฟไลเปส (Phospholipase) และทำให้เกิด ROS ขึ้นในเซลล์ของเชื้อราซึ่งก่อให้เกิดการแตกของผนังเซลล์ในที่สุด นอกจากนี้ยังมีรายงาน

ว่า สารสกัดจากพืชประเภทเทอร์ปีนอยด์สามารถทำปฏิกิริยากับโปรตีน และเอนไซม์ที่อยู่บริเวณเยื่อหุ้มเซลล์ของเชื้อราส่งผลให้เยื่อหุ้มเซลล์ถูกทำลาย (Grill and Hoally, 2006)

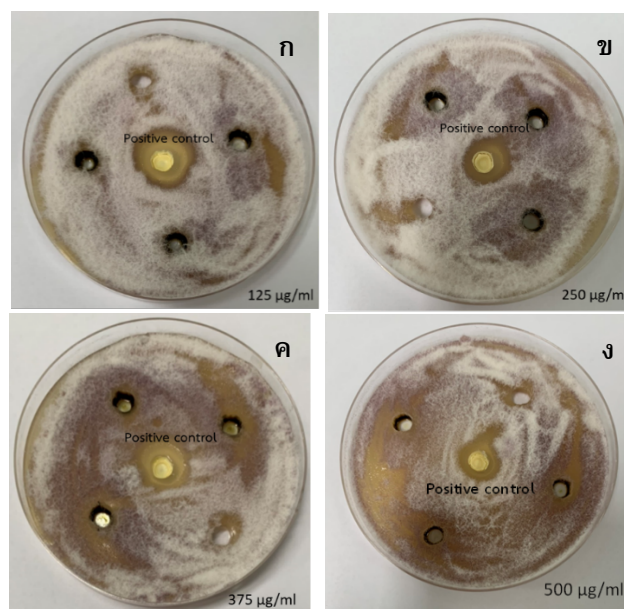
โดยสารสกัดดังกล่าวที่ความเข้มข้น 16 - 64 ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร สามารถยับยั้งขั้นตอนการเกาะติดแผ่นโพลีสไตรีน (Polystyrene) ยับยั้งขั้นตอนของการเปลี่ยนจากยีสต์ไปเป็นการเจริญเติบโตเป็นเส้น ๆ ยับยั้งการสร้างฟอสโฟไลเปส (Phospholipase) และทำให้เกิด ROS ซึ่งก่อให้เกิดการแตกของผนังเซลล์ในที่สุด (Yang et al., 2018)



รูปที่ 7 เชื้อรา *Colletotrichum gloeosporioides* ที่สกัดจากตัวอย่างพริกแล้วนำมาเพาะเลี้ยงและทำให้บริสุทธิ์

ตารางที่ 4 เส้นผ่านศูนย์กลางของบริเวณการยับยั้ง (เซนติเมตร) ที่ระดับความเข้มข้นของสารสกัดที่แตกต่างกัน

ความเข้มข้นของสารสกัด (ไมโครกรัมต่อมิลลิลิตร)	เส้นผ่านศูนย์กลางของบริเวณการยับยั้ง (เซนติเมตร)					เฉลี่ย
	ชุดควบคุมที่ เป็นผลบวก	จุดที่ 1	จุดที่ 2	จุดที่ 3	จุดที่ 4	
125	2.00	1.00	2.00	0.00	0.00	0.750
250	1.50	2.50	2.50	3.00	0.00	2.000
375	1.60	3.00	2.30	1.00	3.00	2.325
500	1.50	1.00	2.60	2.80	3.30	2.425



รูปที่ 8 ประสิทธิภาพการยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อรา *Colletotrichum gloeosporioides* ของสารสกัดจากใบเต้ายายม่อมเข้มข้น 125 (ก) 250 (ข) 375 (ค) และ 500 ไมโครกรัมต่อกรัมตัวอย่างแห้ง (ง)

บทสรุป

งานวิจัยนี้เป็นการสกัดสารซาโปนินจากตัวอย่าง ใบ ลำต้น และผลของตำแยยม่อมด้วยตัวทำละลายเอทานอลเข้มข้น 70 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งผลการทดลองพบว่าตัวอย่างผลให้ปริมาณสารสกัดหยาบมากที่สุด รองลงมาคือ ตัวอย่างใบ และลำต้น ตามลำดับ เมื่อทำการสกัดสารสกัดหยาบซ้ำอีกครั้งด้วยตัวทำละลายน้ำ ไดเมทิลอีเทอร์ และบิวทานอล พบว่า สารสกัดส่วนใหญ่ละลายในตัวทำละลายน้ำและบิวทานอล โดยเมื่อทดสอบชนิดของสารซาโปนินในชั้นตัวทำละลายชนิดต่าง ๆ พบว่าเป็นซาโปนินชนิดที่มีโครงสร้างเป็นไตรเทอร์ปีนอยด์ นอกจากนี้ผลจากการวิเคราะห์โครงสร้างของสารสกัดด้วยเทคนิคอินฟราเรดสเปกโทรสโกปีพบว่า โครงสร้างของสารสกัดประกอบด้วยหมู่ $C=C$ ในวงอะโรเมติกซึ่งเป็นโครงสร้างของไตรเทอร์ปีนอยด์ และการทดสอบประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อรา *Colletotrichum gloeosporioides* ซึ่งสกัดจากตัวอย่างพริก พบว่า สารสกัดซาโปนินสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อรา *Colletotrichum gloeosporioides* ได้โดยประสิทธิภาพการยับยั้งจะแปรผันตามความเข้มข้นของสารสกัด

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ ได้รับเงินทุนสนับสนุนการวิจัยจากโครงการอนุรักษ์พันธุกรรมพืชอันเนื่องมาจากพระราชดำริ ประจำปีงบประมาณ 2563

เอกสารอ้างอิง

- พิตรินา ดาราแม. (2557). ปริมาณของสารซาโปนินในกากเมล็ดชา *Camellia oleifera* Abel. และการออกฤทธิ์ต่อแมลงวันหัวเขียว *Chrysomya megacephala* (Fabricius). วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาชีววิทยา มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์.
- ลักขมี วิทยา, อุทร เจริญเดช และสิทธิโชค จันทระยอง. (2561). สารสกัดพืชป่าชายเลนวงศ์ Rhizophoraceae เป็นแหล่งสารทุติยภูมิของซาโปนิน สำหรับต้านเชื้อแบคทีเรียก่อโรคสัตว์น้ำ. รายงานการวิจัย. คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตตรัง ตรัง.
- อภิรดี กอรัปไพบูลย์, อรวินท์นั ชูศรี และศิริพร เต็งรัง. (2560). การพัฒนาวิธีการสกัดสารซาโปนินจากเปลือกเงาะและการทดสอบประสิทธิภาพของซาโปนิน. วารสารวิชาการเกษตร. 35(1): 60-73.
- Ashokkumar R. and Ramaswamy M. (2014). Photochemical Screening by FTIR spectroscopic analysis of leaf extracts of selected Indian Medicinal plants. International Journal of Current Microbiology and Applied Science. 3(1): 395-406.
- Ashour A.S., Aziz M.M.A. and Melad A.S.G. (2019). A review on saponins from medicinal plants: chemistry, isolation, and determination. Journal of nanomedicine research. 7(4): 282-288.
- Cheok C.Y., Salman H.A.K. and Sulaiman R. (2014). Extraction and quantification of saponins: A review. Food Research International. 59: 16-40.
- Dong M., Feng X.Z., Wang B.X., Wu L.J. and Ikejima T. (2001). Two novel furostanol saponins from the rhizomes of *Dioscorea panthaica* prain et burkill and their cytotoxic activity. Tetrahedron. 57(3): 501-506.

- El Aziz M.M.A, Ashour A.S and Melad A.S.G. (2019). A review on saponins from medicinal plants: chemistry, isolation, and determination. *Journal of Nanomedicine Research*. 8(1): 282-288.
- Gill A.O. and Holley R.A. (2006). Disruption of *Escherichia coli*, *Listeria monocytogenes* and *Lactobacillus sakeicellular* membranes by plant oil aromatics. *International Journal of Food Microbiology*. 106: 1-9.
- Guclu-Ustundag O. and Mazza G. (2007). Saponins: properties, applications and processing. *Critical Reviews in Foods Science and Nutrition*. 47: 231-258.
- Madland E. (2013). Extraction Isolation and structure Elucidation of Saponins from *Herniaria Incana*. Department of Chemistry. Norwegian University of Science and Technology. Trondheim.
- Padmavathi R., Bakkiyaraj D., Tajuddin N. and Pandian S.K. (2015). Effect of 2, 4-di-tert-butylphenol on growth and biofilm formation by an opportunistic fungus. *Candida albicans*. *Biofouling*. 31(7): 565-574.
- Papadopoulou K., Melton R.E., Leggett M., Daniels M.J. and Osbourn A.E. (1999). Compromised Disease Resistance in Saponin-Deficient Plants. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*. 96: 12923-12928.
- Wang W., Zhao Y., Jing W., Zhang J., Xiao H. Zha Q. and Liu A. (2015). Ultrahigh-performance liquid chromatography-ion trap mass spectrometry characterization of the steroidal saponins of *Dioscorea panthaica* Prain et Burkill and its application for accelerating the isolation and structural elucidation of steroidal saponins. *Steroids*. 95: 51-65.
- Yang L., Liu X., Zhuang X., Feng X., Zhong L. and Ma T. (2018). Antifungal effects of saponin extract from rhizomes of *Dioscorea panthaica* Prain et Burk against *Candida albicans*. *Evidence-Based Complementary and Alternative Medicine*. 1-12.
- Yu M., Gouvinhas I., Rocha J. and Barros A.I.R.N.A. (2021). Phytochemical and antioxidant analysis of medicinal and food plants towards bioactive food and pharmaceutical resources. *Scientific Report*. 11(1): 10041-10054.
- Yun D.G. and Lee D.G. (2016). Silibinin triggers yeast apoptosis related to mitochondrial Ca^{2+} influx in *Candida albicans*. *The International Journal of Biochemistry & Cell Biology*. 80: 1-9.
- Zhao Y., Wang W., Jing W. and Liu A. (2014). Advances on chemical constituents, pharmacological effects and clinical applications of *Dioscorea panthaicae* rhizome. *Chinese Journal of Experimental Traditional Medical Formulae*. 20: 235 - 242.

การพัฒนาการผลิตไวน์จากข้าวโพดโดยใช้ *Saccharomyces cerevisiae* Development of corn wine production using *Saccharomyces cerevisiae*

อมรรัตน์ สุวรรณโพธิ์ศรี^{1*}, ธาณิก อินแมน¹, ปฐมาภรณ์ ทิลารักษ์¹, คมสันต์ สุปอง¹

ปิริยาภรณ์ อันนาคมนงาม¹, ยุพา บุญมี¹ และดุสิต ศรีวิไล¹

Amornrat Suwanposri^{1*}, Thayiga Inman¹, Patamaporn Tilarux¹, Khomsan Supong¹,

Piriyaporn Anartngam¹, Yupha Boonmee¹ and Dusit Srivilai¹

¹คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี

*Corresponding Author E-mail Address : amornrat_su@rmutto.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการผลิตไวน์จากข้าวโพด 2 ชนิด ได้แก่ ข้าวโพดหวาน (*Zea mays saccharata*) และข้าวโพดข้าวเหนียว (*Zea mays ceratina*) ตกเกรดที่มีราคาตกต่ำมาใช้ในการผลิตไวน์โดยการหมักด้วยยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* จากนั้นศึกษาหาสายพันธุ์ของยีสต์และสภาวะที่เหมาะสม ได้แก่ ปริมาณกล้าเชื้อ อัตราส่วนน้ำข้าวโพดต่อน้ำ ปริมาณของแข็งละลายเริ่มต้น และระยะเวลาที่ใช้ในการหมัก วิเคราะห์ผลโดยใช้การทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคในด้านความใส สี กลิ่น รสชาติ และความชอบโดยรวมด้วยวิธี Hedonic 5-point scale พบว่า สายพันธุ์ที่เหมาะสมในการผลิตไวน์ข้าวโพดหวานและไวน์ข้าวโพดข้าวเหนียวคือ *S. cerevisiae* var. *burgundy* และ *montachae* ตามลำดับ โดยทั้งสองสายพันธุ์นั้นให้ปริมาณแอลกอฮอล์ที่ใกล้เคียงกัน และสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไวน์ทั้งสองชนิด คือ ปริมาณกล้าเชื้อร้อยละ 10 อัตราส่วนน้ำข้าวโพดต่อน้ำ 1:4 ปริมาณของแข็งละลายเริ่มต้นเท่ากับ 22 องศาบริกซ์ และระยะเวลาในการหมัก 5 วัน ภาพรวมของไวน์ทั้งสองชนิดได้รับคะแนนความชอบอยู่ในระดับชอบปานกลางถึงชอบมาก โดยไวน์ข้าวโพดข้าวเหนียวได้รับการยอมรับจากผู้บริโภคมากกว่าไวน์ข้าวโพดหวาน จากผลการศึกษาที่ได้แสดงให้เห็นว่าทั้งข้าวโพดหวานและข้าวโพดข้าวเหนียวสามารถนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไวน์ได้และเป็นอีกหนึ่งทางเลือกในการเพิ่มมูลค่าให้กับข้าวโพด

คำสำคัญ: ข้าวโพด ไวน์ การทดสอบทางประสาทสัมผัส ยีสต์

Abstract

The aims of this study were to produce wine using two types of corn including sweet corn (*Zea mays saccharata*) and waxy corn (*Zea mays ceratina*) with low quality and price for wine production by the yeast *Saccharomyces cerevisiae*. Then, yeast strain and optimal conditions such as concentration of seed culture, ratio of corn juice and water, total soluble solid and fermentation time were optimized. The results were

determined by sensory evaluation on transparency, color, odor, flavor and overall acceptable using hedonic 5-point scale. It was found that the optimal yeast strain for sweet corn wine and waxy corn wine were *S. cerevisiae* var. *burgundy* and *montachae*, respectively. Both yeast strains gave the similar amount of alcohol and the optimal conditions for both wines were 10% of seed culture, mixed volume of corn juice and water at ratio of 1:4, initial total soluble solid of 22 °Brix and five days of fermentation time. The overview of both wines was obtained liking score in a range of like moderately to like very much. The obtained liking scores of waxy corn wine were better than sweet corn wine. As the results indicated that, both sweet corn and waxy corn could be used as raw material for winemaking and as an alternative way to add value to corn.

Keywords: Corn, Wine, Sensory evaluation, Yeast

บทนำ

ไวน์ (Wine) เป็นเครื่องดื่มแอลกอฮอล์ที่ไม่ผ่านการกลั่นเกิดจากการนำยีสต์ *Saccharomyces cerevisiae* มาหมักกับองุ่นสุกและสดหรือน้ำองุ่นสด ซึ่งยีสต์จะใช้น้ำตาลที่อยู่ในผลไม้ในการเจริญเติบโตแล้วเปลี่ยนเป็นแอลกอฮอล์ และก๊าซคาร์บอนไดออกไซด์ ในปัจจุบันมีการนำผลไม้ชนิดอื่นมาผลิตไวน์ ได้แก่ มะม่วง สับปะรด ลิ้นจี่ และส้มเขียวหวาน (รัฐพล และ เสาวรส, 2558) เรียกว่า ไวน์ผลไม้ (Fruit wine) นอกจากนี้ผักและดอกไม้บางชนิดก็สามารถนำมาใช้ในการผลิตไวน์ได้ เช่น มะเขือเทศ แครอท บัว ดาวเรือง และรักเร่ เป็นต้น (Suresh et al., 2019) ไวน์เป็นเครื่องดื่มที่มีรสชาติเหมือนผลไม้สด ประกอบด้วยสารอาหารที่มาจากผลไม้หรือวัตถุดิบเริ่มต้นที่นำมาใช้ในการผลิตไวน์ ในระหว่างกระบวนการหมัก คุณค่าทางโภชนาการของไวน์จะเพิ่มขึ้นเนื่องจากยีสต์จะมีการปลดปล่อยกรดอะมิโนและสารอาหารอื่น ๆ ออกมา ซึ่งไวน์ผลไม้จะมีปริมาณแอลกอฮอล์ ร้อยละ 8 - 10 โดยปริมาตร และน้ำตาล ร้อยละ 2 - 3 ให้พลังงานตั้งแต่ 70 - 90 กิโลแคลอรีต่อไวน์ปริมาตร 100 มิลลิลิตร (Swami et al., 2014) ในไวน์มีส่วนประกอบที่สำคัญ ได้แก่ เอทิลแอลกอฮอล์ (Ethyl alcohol) น้ำตาล คาร์โบไฮเดรต คีโตน (Ketone) แอลดีไฮด์ (Aldehyde) สารให้สี (Pigment) เอนไซม์ (Enzyme) กรดอินทรีย์ (Organic acid) มากกว่า 22 ชนิด วิตามินและแร่ธาตุต่าง ๆ ประมาณ 15 - 20 ชนิด รวมถึงสารต้านอนุมูลอิสระ ได้แก่ สารประกอบฟีนอลิก (Phenolic compound) ฟลาโวนอยด์ (Flavonoid) แคโรทีนอยด์ (Carotenoid) ซึ่งสารต่าง ๆ เหล่านี้จะช่วยป้องกันการเกิดโรคหลอดเลือดหัวใจ ชะลอความแก่ และช่วยลดการเกิดโรคลำไส้แปรปรวน (Carlo et al., 1999) หากบริโภคไวน์ในปริมาณที่เหมาะสมจะก่อให้เกิดประโยชน์ต่อร่างกาย จากข้อดีของไวน์ที่กล่าวมาทำให้มีปริมาณการบริโภคไวน์ในไทยสูงขึ้น มีปริมาณการบริโภค 103.3 ล้านลิตร ซึ่งเป็นปริมาณที่สูงสุดในกลุ่มประเทศอาเซียน ปัจจัยที่มีผลต่อกลิ่น รส และคุณภาพของไวน์ ได้แก่ สายพันธุ์ของยีสต์ ชนิดของวัตถุดิบ และระยะเวลาในการหมัก เป็นต้น

ข้าวโพด (Corn หรือ Maize) เป็นธัญพืชเศรษฐกิจของประเทศไทย มี 7 ชนิด โดยข้าวโพดที่สำคัญ ได้แก่ ข้าวโพดหวาน (Sweet corn) ซึ่งเป็นพืชที่สามารถเพาะปลูกได้ทั่วทุกภาคของประเทศไทยและปลูกได้ตลอดทั้งปี มีเนื้อที่เพาะปลูก 234,402 ไร่ ปริมาณผลผลิต 498,699 ตัน (สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร, 2563) เป็นข้าวโพดที่นิยมปลูกและรับประทานมากที่สุด เนื่องจากมีรสหวานอร่อย ไขมันต่ำ สามารถนำมาปรุงอาหารได้หลากหลายรูปแบบทั้งอาหารคาวและหวาน ข้าวโพดหวานต้มสามารถช่วยลดการเกิดโรคหัวใจและมะเร็งได้ มีสารต้านอนุมูลอิสระชื่อ กรดเฟอร์ูลิก (Ferulic acid) ซึ่งช่วยในการส่งเสริมระบบภูมิคุ้มกันของร่างกาย และข้าวโพดข้าวเหนียวหรือข้าวโพดเทียน (Waxy corn) เมล็ดมีสีขุ่นทึบแสง แป้งส่วนใหญ่จะเป็นอะไมโลเพกทิน (Amylopectin) มากกว่า ร้อยละ 98 (สุขพงษ์ และ ชีรศักดิ์, 2543) เมื่อนำไปทำให้สุกเมล็ดจะมีลักษณะเหนียว

คล้ายซี่ผึ้ง นุ่ม นารับประทาน มีรสหวานเล็กน้อย และมีวิตามินอีสูง ซึ่งเป็นพืชที่ได้รับความสนใจจากเกษตรกรเป็นอย่างมาก เนื่องจากดูแลรักษาง่าย อายุเก็บเกี่ยวสั้นและให้ผลตอบแทนค่อนข้างสูง ข้าวโพดข้าวเหนียวมีพื้นที่ปลูก 27,000 ไร่ ใช้เมล็ดพันธุ์ ประมาณ 50 ตัน โดยผลผลิตรวม 55,000 ตัน ซึ่งมีมูลค่า 385 ล้านบาท (สำราญ และคณะ, 2557) ในปัจจุบันมีการศึกษาการนำ ข้าวโพดหวานและข้าวโพดข้าวเหนียวมาใช้ในการผลิตไบโอเอทานอล (Bioethanol) เพื่อใช้เป็นพลังงานทดแทน โดย Yangcheng et al. (2013) ศึกษาการผลิตไบโอเอทานอลจากข้าวโพดทั้งสองสายพันธุ์โดยใช้กระบวนการ Cold fermentation พบว่า การใช้ ข้าวโพดข้าวเหนียวนั้นจะมีประสิทธิภาพในการเปลี่ยนแป้งให้เป็นเอทานอลร้อยละ 93.0 ซึ่งสูงกว่าการใช้ข้าวโพดหวานซึ่งมี ประสิทธิภาพร้อยละ 88.2 นอกจากนี้ในงานวิจัยของ จิราภรณ์ และคณะ (2563) ได้นำข้าวโพดหวานมาใช้ในการผลิตไวน์เพื่อใช้ เป็นวัตถุดิบสำหรับการผลิตน้ำส้มสายชู ในช่วงที่เกิดการระบาดของโรคไวรัสโควิด-19 ทำให้ข้าวโพดหวานมีปริมาณล้นตลาด ราคา ตกต่ำเหลือกิโลกรัมละ 3 - 5 บาท รวมถึงในการส่งข้าวโพดฝักสดไปที่โรงงานแปรรูปจะต้องมีการคัดเลือกข้าวโพดให้ได้มาตรฐาน ตามเกณฑ์ของโรงงาน ซึ่งจะมีข้าวโพดบางส่วนที่ตกเกรดทำให้เกษตรกรต้องนำไปขายในราคาต่ำหรือนำไปทิ้ง ดังนั้นการศึกษาใน ครั้งนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเพิ่มมูลค่าให้กับข้าวโพดตกเกรดโดยนำมาใช้เป็นวัตถุดิบในการผลิตไวน์ และทำการศึกษาปัจจัยต่าง ๆ ที่มี ผลต่อคุณภาพของไวน์ เช่น สายพันธุ์ของยีสต์ อัตราส่วนน้ำข้าวโพดต่อน้ำ ปริมาณกลูต้าเชื้อ ปริมาณของแข็งละลายเริ่มต้น รวมถึง ระยะเวลาที่ใช้ในการหมัก เพื่อให้ได้ไวน์ที่มีคุณภาพและรสชาติเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภค

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

จุลินทรีย์และวัตถุดิบ

จุลินทรีย์ที่ใช้ในการศึกษาในครั้งนี้ ได้แก่ *Saccharomyces cerevisiae* var *burgundy* และ *S. cerevisiae* var *montachae* ซึ่งได้มาจากสาขาวิชาวิทยาศาสตร์ประยุกต์และเทคโนโลยีชีวภาพ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี โดยการเพาะเลี้ยงบนอาหารยีสต์ Yeast malt (YM) และเก็บรักษาไว้ที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ส่วน ข้าวโพดหวาน (*Zea mays saccharata*) และข้าวโพดข้าวเหนียว (*Zea mays ceratina*) ซื้อมาจากตลาดกระเทียม จังหวัด จันทบุรี และเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 4 องศาเซลเซียส ก่อนนำไปใช้ในการศึกษาครั้งต่อไป

การเตรียมกลูต้าเชื้อ

นำเชื้อยีสต์ทั้งสองสายพันธุ์มาเลี้ยงบนอาหารแข็ง YM บ่มที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นใส่เชื้อ ที่เจริญแล้วลงในฟลาสก์ขนาด 250 มิลลิลิตร ภายในบรรจุน้ำสับปะรดปริมาตร 100 มิลลิลิตร ที่ผ่านการฆ่าเชื้อแล้ว ซึ่งมี ปริมาณของแข็งละลายได้เท่ากับ 20 องศาบริกซ์ ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 4.0 นำไปเขย่าบนเครื่องเขย่าด้วยความเร็ว 50 รอบต่อนาที ที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 48 ชั่วโมง

การเตรียมน้ำหมัก

นำข้าวโพดหวานและข้าวโพดข้าวเหนียวมาทำการปอกเปลือกออก จากนั้นตั้งเกสรตัวเมียที่ติดอยู่กับฝักข้าวโพดที่มีเมล็ด ออกให้หมด ล้างข้าวโพดให้สะอาด หั่นเอาแต่ส่วนเมล็ด นำไปปั่นผสมกับน้ำโดยปรับให้มีปริมาณของแข็งละลายเท่ากับ 20 องศาบริกซ์ ด้วยการเติมน้ำตาลทราย แล้วนำไปฆ่าเชื้อด้วยการต้มให้เดือดนาน 15 นาที

การศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไวน์ข้าวโพดหวานและไวน์ข้าวโพดข้าวเหนียว

ทำการศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตไวน์ข้าวโพดหวานและข้าวโพดข้าวเหนียวแบบทีละปัจจัย (One factor at a time) ดัดแปลงจากการศึกษาของ Pongkan et al. (2018) โดยการแปรผันสายพันธุ์ของเชื้อยีสต์ (*S. cerevisiae* var

burgundy และ *montachae*) ปริมาณกล้าเชื้อ (ร้อยละ 1, 5, 10 และ 15) อัตราส่วนของน้ำข้าวโพดต่อน้ำ (ร้อยละ 5, 10, 15 และ 20) ปริมาณของแข็งละลายเริ่มต้น (18, 20 และ 22 องศาบริกซ์) และระยะเวลาในการหมัก (3, 5 และ 7 วัน) วิเคราะห์ปริมาณแอลกอฮอล์ ปริมาณของแข็งละลาย ค่าความเป็นกรด - ด่าง และการยอมรับของผู้บริโภค

การทดสอบการยอมรับของผู้บริโภค

โดยใช้ผู้ทดสอบที่ไม่ผ่านการฝึกฝน จำนวน 20 คน แบ่งเป็นเพศชาย 10 คน เพศหญิง 10 คน ช่วงอายุ 20 - 50 ปี ประเมินคุณภาพทางประสาทสัมผัส ในด้านความใส สี กลิ่น รสชาติ และความชอบโดยรวม ด้วยวิธี Hedonic 5-point scale โดย 1 คะแนน หมายถึง ชอบน้อยที่สุด 2 คะแนน หมายถึง ชอบน้อย 3 คะแนน หมายถึง ชอบปานกลาง 4 คะแนน หมายถึง ชอบมาก และ 5 คะแนน หมายถึง ชอบมากที่สุด

การวิเคราะห์ค่าทางสถิติ

เปรียบเทียบความแตกต่างของสายพันธุ์ยีสต์ที่ใช้ในการผลิตไวน์ข้าวโพดหวานและไวน์ข้าวโพดข้าวเหนียว โดยวิธี Independent student t-test ส่วนปัจจัยอื่น ๆ วางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) และวิเคราะห์ความแปรปรวน (ANOVA) ของผลการทดลอง และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's New Multiple Rang Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยใช้โปรแกรม SPSS (Trial Version) ในการวิเคราะห์ข้อมูล

ผลการวิจัย

ผลการศึกษาการผลิตไวน์ข้าวโพดหวานและไวน์ข้าวโพดข้าวเหนียวโดยใช้เชื้อยีสต์ต่างสายพันธุ์

การผลิตไวน์ข้าวโพดหวานและไวน์ข้าวโพดข้าวเหนียวโดยใช้เชื้อยีสต์ *S. cerevisiae* สองสายพันธุ์ ได้แก่ *burgundy* และ *montachae* พบว่าไวน์ข้าวโพดหวานที่หมักด้วยเชื้อยีสต์ทั้งสองสายพันธุ์นั้นมีปริมาณแอลกอฮอล์ร้อยละ 7.7 โดยปริมาตร ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 3.67 และปริมาณของแข็งละลายลดลงเหลือ 5 องศาบริกซ์ เมื่อทดสอบการยอมรับของผู้บริโภค พบว่าไวน์ข้าวโพดหวานที่หมักด้วยยีสต์สายพันธุ์ *burgundy* ได้รับคะแนนการยอมรับของผู้บริโภคในเกือบทุกด้านสูงกว่าการหมักด้วยยีสต์สายพันธุ์ *montachae* โดยมีคะแนนด้านความใสและสีสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ในขณะที่ไวน์ข้าวโพดข้าวเหนียวที่หมักด้วยเชื้อยีสต์ทั้งสองสายพันธุ์มีปริมาณแอลกอฮอล์ร้อยละ 6.5 โดยปริมาตร ค่าความเป็นกรด-ด่าง เท่ากับ 3.57 และปริมาณของแข็งละลายลดลงเหลือ 5 องศาบริกซ์ เมื่อทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคพบว่าการหมักด้วยยีสต์สายพันธุ์ *montachae* ได้รับคะแนนการยอมรับของผู้บริโภคในทุกด้านสูงกว่าการหมักด้วยยีสต์สายพันธุ์ *burgundy* โดยมีคะแนนด้านรสชาติสูงกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) (ตารางที่ 1) ดังนั้นจึงเลือกใช้ยีสต์สายพันธุ์ *burgundy* และ *montachae* สำหรับการผลิตไวน์ข้าวโพดหวานและไวน์ข้าวโพดข้าวเหนียวในการศึกษาขั้นต่อไป

ตารางที่ 1 ผลการทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคของไวน์ข้าวโพดหวานและไวน์ข้าวโพดข้าวเหนียวโดยใช้เชื้อยีสต์ *S. cerevisiae* สองสายพันธุ์

ตัวอย่าง	สายพันธุ์ยีสต์	คะแนนการยอมรับของผู้บริโภค (ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)					ความชอบโดยรวม
		ความใส	สี	กลิ่น	รสชาติ		
ไวน์ข้าวโพดหวาน	<i>montachae</i>	3.45±0.69	3.50±0.83	3.50±0.83 ^{ns}	2.90±0.79 ^{ns}		3.35±0.75 ^{ns}
	<i>burgundy</i>	4.10±0.64*	4.10±0.85*	3.45±1.05 ^{ns}	3.35±1.04 ^{ns}		3.75±0.91 ^{ns}
ไวน์ข้าวโพดข้าวเหนียว	<i>montachae</i>	4.85±0.37 ^{ns}	4.20±0.77 ^{ns}	3.10±1.17 ^{ns}	4.15±0.49*		4.05±0.51 ^{ns}
	<i>burgundy</i>	4.70±0.47 ^{ns}	4.10±0.85 ^{ns}	2.60±1.27 ^{ns}	3.35±0.99		3.95±0.76 ^{ns}

หมายเหตุ : วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้ Independent student's t-test

สัญลักษณ์ * ในแนวดิ่งแสดงถึงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

^{ns} หมายถึง ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($p > 0.05$)

ผลการศึกษาปริมาณกล้ำเชื้อที่เหมาะสมต่อการผลิตไวน์ข้าวโพดทั้งสองชนิด

ผลการศึกษาปริมาณกล้ำเชื้อที่เหมาะสมในการผลิตไวน์ข้าวโพดทั้งสองชนิด พบว่าไวน์ข้าวโพดหวานที่ใช้กล้ำเชื้อร้อยละ 5 มีปริมาณแอลกอฮอล์ร้อยละ 9.0 โดยปริมาตร ส่วนในชุดการทดลองที่ใช้ปริมาณกล้ำเชื้อร้อยละ 10, 15 และ 20 มีปริมาณแอลกอฮอล์ร้อยละ 10 โดยปริมาตร ทุกชุดการทดลองมีค่าความเป็นกรด - ด่าง ลดลงเหลือ 3.63 และมีปริมาณของแข็งละลายลดลงเหลือ 5 องศาบริกซ์ เมื่อทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคพบว่าการหมักไวน์ข้าวโพดหวานโดยใช้ปริมาณกล้ำเชื้อร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($p > 0.05$) ในด้านของความใส สี และกลิ่น ในขณะที่การทดสอบด้านรสชาตินั้นพบว่า ปริมาณกล้ำเชื้อร้อยละ 20 ได้รับคะแนนสูงสุด แต่ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($p > 0.05$) กับปริมาณกล้ำเชื้อร้อยละ 10 และ 15 ส่วนในด้านความชอบโดยรวมพบว่าปริมาณกล้ำเชื้อร้อยละ 15 ให้คะแนนสูงสุดแต่ไม่แตกต่างทางสถิติกับปริมาณกล้ำเชื้อร้อยละ 10 และ 20 สำหรับผลการศึกษาปริมาณกล้ำเชื้อที่เหมาะสมต่อการผลิตไวน์ข้าวโพดข้าวเหนียวพบว่าการใช้ปริมาณกล้ำเชื้อร้อยละ 5, 10 และ 15 มีปริมาณแอลกอฮอล์ร้อยละ 6.9 โดยปริมาตร ส่วนที่ใช้ปริมาณกล้ำเชื้อร้อยละ 20 มีปริมาณแอลกอฮอล์ร้อยละ 7.7 โดยปริมาตร ทุกชุดการทดลองมีค่าความเป็นกรด - ด่าง ลดลงเหลือ 3.46 และมีปริมาณของแข็งละลายลดลงเหลือ 5 องศาบริกซ์ เมื่อทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคพบว่าการหมักไวน์ข้าวโพดข้าวเหนียวโดยใช้ปริมาณกล้ำเชื้อร้อยละ 5, 10, 15 และ 20 ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($p > 0.05$) ในด้านความใส สี กลิ่นและความชอบโดยรวม ในขณะที่การทดสอบด้านรสชาตินั้นพบว่าปริมาณกล้ำเชื้อร้อยละ 10 ได้รับคะแนนสูงสุดแต่ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($p > 0.05$) กับปริมาณกล้ำเชื้อร้อยละ 15 และ 20 (ตารางที่ 2) ดังนั้นเมื่อพิจารณาในด้านของต้นทุนการผลิตจึงเลือกใช้ปริมาณกล้ำเชื้อร้อยละ 10 สำหรับการผลิตไวน์ข้าวโพดหวานและไวน์ข้าวโพดข้าวเหนียว

ตารางที่ 2 ผลการทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคในการศึกษาปริมาณกล้าเชื้อที่เหมาะสมต่อการผลิตไวน์ข้าวโพดหวานและไวน์ข้าวโพดข้าวเหนียว

ตัวอย่าง	คะแนนการยอมรับของผู้บริโภค (ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)					
	ปริมาณกล้าเชื้อ (ร้อยละ)	ความใส	สี	กลิ่น	รสชาติ	ความชอบโดยรวม
ไวน์ข้าวโพดหวาน	5	3.95±0.95 ^{ns}	3.35±0.99 ^{ns}	2.65±0.99 ^{ns}	2.40±1.10 ^b	2.65±0.99 ^b
	10	3.90±1.02 ^{ns}	3.40±0.99 ^{ns}	3.15±1.10 ^{ns}	3.25±1.07 ^a	3.25±1.07 ^{ab}
	15	4.05±0.95 ^{ns}	3.50±0.95 ^{ns}	2.90±1.17 ^{ns}	3.40±1.05 ^a	3.45±0.99 ^a
	20	3.85±1.04 ^{ns}	3.40±1.11 ^{ns}	3.30±1.08 ^{ns}	3.45±1.05 ^a	3.40±1.06 ^a
ไวน์ข้าวโพดข้าวเหนียว	5	3.65±1.04 ^{ns}	3.25±1.13 ^{ns}	3.60±1.27 ^{ns}	2.85±1.14 ^b	3.25±1.02 ^{ns}
	10	3.75±0.91 ^{ns}	3.30±1.22 ^{ns}	3.45±1.15 ^{ns}	3.75±0.91 ^a	3.70±0.92 ^{ns}
	15	3.80±0.95 ^{ns}	3.60±1.10 ^{ns}	3.50±1.24 ^{ns}	3.60±0.10 ^a	3.70±0.92 ^{ns}
	20	3.80±0.95 ^{ns}	3.60±1.10 ^{ns}	3.40±1.23 ^{ns}	3.60±0.10 ^a	3.70±0.92 ^{ns}

หมายเหตุ : ^a และ ^b หมายถึง ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq 0.05$)

^{ns} หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$)

ผลการศึกษาอัตราส่วนของน้ำข้าวโพดต่อน้ำที่เหมาะสมต่อการผลิตไวน์ข้าวโพดทั้งสองชนิด

จากการศึกษาอัตราส่วนของน้ำข้าวโพดต่อน้ำที่เหมาะสมในการผลิตไวน์ข้าวโพดหวานและไวน์ข้าวโพดข้าวเหนียว โดยการแปรผันอัตราส่วนน้ำข้าวโพดหวานหรือข้าวโพดข้าวเหนียวต่อน้ำเท่ากับ 1:1, 1:2, 1:3 และ 1:4 พบว่า ไวน์ข้าวโพดหวานที่หมักได้มีปริมาณแอลกอฮอล์ร้อยละ 7.7, 6.0, 9.0 และ 9.0 โดยปริมาตร ตามลำดับ ในทุกชุดการทดลองมีปริมาณของแข็งละลายลดลงเหลือ 5 องศาบริกซ์ มีค่าความเป็นกรด - ด่าง อยู่ในช่วง 3.46 - 4.00 ผลการทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคพบว่าการผลิตไวน์ข้าวโพดหวานโดยใช้อัตราส่วนของน้ำข้าวโพดต่อน้ำเท่ากับ 1:4 ได้รับคะแนนสูงสุดในด้านความใส สี รสชาติ และความชอบโดยรวม แต่ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($p > 0.05$) กับอัตราส่วน 1:3 ในขณะที่ไวน์ข้าวโพดข้าวเหนียวที่หมักได้นั้นมีปริมาณแอลกอฮอล์ร้อยละ 7.6, 9.0, 9.0 และ 9.0 โดยปริมาตร ตามลำดับ ทุกชุดการทดลองมีปริมาณของแข็งละลายลดลงเหลือ 5 องศาบริกซ์ มีค่าความเป็นกรด - ด่าง อยู่ในช่วง 3.45 - 3.70 ผลการทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคพบว่าการผลิตไวน์ข้าวโพดข้าวเหนียวโดยใช้อัตราส่วนของน้ำข้าวโพดต่อน้ำเท่ากับ 1:1, 1:2, 1:3 และ 1:4 ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($p > 0.05$) ในด้านความใส สี กลิ่น และความชอบโดยรวม แต่อัตราส่วน 1:4 นั้นให้คะแนนด้านรสชาติสูงสุดแต่ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($p > 0.05$) กับอัตราส่วน 1:3 (ตารางที่ 3) ดังนั้นเมื่อพิจารณาในด้านต้นทุนการผลิตจึงเลือกใช้อัตราส่วนของน้ำข้าวโพดเท่ากับ 1:4 ในการผลิตไวน์ข้าวโพดหวานและไวน์ข้าวโพดข้าวเหนียว

ตารางที่ 3 ผลการทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคในการศึกษาอัตราส่วนน้ำข้าวโพดต่อน้ำที่เหมาะสมต่อการผลิตไวน์ข้าวโพดหวานและไวน์ข้าวโพดข้าวเหนียว

ตัวอย่าง	คะแนนการยอมรับของผู้บริโภค (ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)					
	อัตราส่วนน้ำข้าวโพดต่อน้ำ	ความใส	สี	กลิ่น	รสชาติ	ความชอบโดยรวม
ไวน์ข้าวโพดหวาน	1:1	3.20±1.06 ^c	3.55±0.61 ^b	4.05±0.67 ^a	3.30±0.92 ^b	3.75±0.72 ^{ns}
	1:2	3.75±0.85 ^b	3.80±0.52 ^b	4.15±0.67 ^a	3.75±0.79 ^{ab}	4.05±0.61 ^{ns}
	1:3	4.60±0.50 ^a	4.40±0.50 ^a	3.75±0.72 ^{ab}	3.75±1.07 ^{ab}	4.20±0.62 ^{ns}
	1:4	4.60±0.50 ^a	4.45±0.69 ^a	3.45±0.76 ^b	4.00±1.12 ^a	4.20±0.70 ^{ns}
ไวน์ข้าวโพดข้าวเหนียว	1:1	3.75±1.02 ^{ns}	3.50±1.19 ^{ns}	3.20±1.20 ^{ns}	2.10±1.29 ^c	2.84±1.07 ^{ns}
	1:2	3.75±1.25 ^{ns}	3.40±1.23 ^{ns}	3.45±1.10 ^{ns}	2.45±1.28 ^{bc}	2.95±1.18 ^{ns}
	1:3	4.00±1.03 ^{ns}	3.60±1.14 ^{ns}	3.05±1.15 ^{ns}	2.95±1.05 ^{ab}	3.20±1.01 ^{ns}
	1:4	4.00±1.03 ^{ns}	3.60±1.10 ^{ns}	3.30±1.38 ^{ns}	3.65±1.14 ^a	3.50±1.10 ^{ns}

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

^{ns} หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$)

ผลการศึกษาปริมาณของแข็งละลายเริ่มต้นที่เหมาะสมต่อการผลิตไวน์ข้าวโพดทั้งสองชนิด

จากการศึกษาปริมาณของแข็งละลายเริ่มต้นที่เหมาะสมต่อการผลิตไวน์ข้าวโพดหวานและไวน์ข้าวโพดข้าวเหนียว โดยแปรผันเป็น 18, 20 และ 22 องศาบริกซ์ พบว่า ไวน์ข้าวโพดหวานที่หมักได้มีปริมาณแอลกอฮอล์ร้อยละ 7.4, 6.0 และ 9.0 โดยปริมาตร ตามลำดับ และปริมาณของแข็งละลายลดลงเหลือ 4.5, 5.0 และ 6.5 องศาบริกซ์ ตามลำดับ มีค่าความเป็นกรด-ด่าง อยู่ในช่วง 3.45 - 4.00 ผลการทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคพบว่าการใช้ปริมาณของแข็งละลายเริ่มต้นเท่ากับ 18, 20 และ 22 องศาบริกซ์ ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($p > 0.05$) ในด้านของความใส สี กลิ่น และความชอบโดยรวม แต่เมื่อพิจารณาในด้านของรสชาติพบว่าการใช้ปริมาณของแข็งละลายเริ่มต้นเท่ากับ 22 องศาบริกซ์ ได้รับคะแนนสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ส่วนไวน์ข้าวโพดข้าวเหนียวที่หมักได้นั้นมีปริมาณแอลกอฮอล์ร้อยละ 7.7, 6.6 และ 4.5 โดยปริมาตร ตามลำดับ และในทุกชุดการทดลองมีปริมาณของแข็งละลายลดลงเหลือ 4.6, 5.0 และ 6.0 องศาบริกซ์ ตามลำดับ มีค่าความเป็นกรด-ด่าง อยู่ในช่วง 3.35 - 4.00 ผลการทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคพบว่าการใช้ปริมาณของแข็งละลายเริ่มต้นเท่ากับ 18, 20 และ 22 องศาบริกซ์ ไม่มีความแตกต่างทางสถิติ ($p > 0.05$) ในด้านของความใส สี กลิ่น และความชอบโดยรวม แต่เมื่อพิจารณาในด้านของรสชาติพบว่าการใช้ปริมาณของแข็งละลาย 22 องศาบริกซ์ ได้รับคะแนนสูงที่สุด (ตารางที่ 4) ดังนั้นจึงเลือกใช้ปริมาณของแข็งละลายเริ่มต้น 22 องศาบริกซ์ ในการผลิตไวน์ข้าวโพดหวานและไวน์ข้าวโพดข้าวเหนียว

ตารางที่ 4 ผลการทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคในการศึกษาปริมาณของแข็งละลายเริ่มต้นที่เหมาะสมต่อการผลิตไวน์ข้าวโพดหวานและไวน์ข้าวโพดข้าวเหนียว

ตัวอย่าง	คะแนนการยอมรับของผู้บริโภค (ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)					
	ปริมาณของแข็ง ละลายเริ่มต้น (องศาบริกซ์)	ความใส	สี	กลิ่น	รสชาติ	ความชอบ โดยรวม
ไวน์ข้าวโพดหวาน	18	4.60±0.60 ^{ns}	4.60±0.68 ^{ns}	4.35±1.04 ^{ns}	2.75±1.55 ^c	4.20±0.89 ^{ns}
	20	4.45±0.76 ^{ns}	4.45±0.69 ^{ns}	4.25±0.72 ^{ns}	3.75±1.07 ^b	4.35±0.75 ^{ns}
	22	4.50±0.89 ^{ns}	4.55±0.69 ^{ns}	4.45±0.89 ^{ns}	4.80±0.52 ^a	4.45±0.89 ^{ns}
ไวน์ข้าวโพดข้าวเหนียว	18	4.05±0.95 ^{ns}	3.50±1.05 ^{ns}	3.20±1.32 ^{ns}	2.95±1.28 ^b	3.40±1.14 ^{ns}
	20	4.15±0.88 ^{ns}	3.45±1.05 ^{ns}	3.20±1.20 ^{ns}	3.30±1.22 ^{ab}	4.60±4.45 ^{ns}
	22	4.15±0.88 ^{ns}	3.50±1.10 ^{ns}	3.15±1.46 ^{ns}	3.85±1.09 ^a	3.75±1.07 ^{ns}

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

^{ns} หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$)

ผลการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมในการหมักไวน์ข้าวโพดทั้งสองชนิด

จากการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมต่อการผลิตไวน์ข้าวโพดหวานและไวน์ข้าวโพดข้าวเหนียว โดยแปรผันระยะเวลาในการหมักที่ต่างกัน คือ 3, 5 และ 7 วัน พบว่าไวน์ข้าวโพดหวานที่หมักได้มีปริมาณแอลกอฮอล์ร้อยละ 3.6, 4.0 และ 4.6 โดยปริมาตร ตามลำดับ และมีปริมาณของแข็งละลายลดลงเหลือ 8.5, 7.0 และ 6.5 ตามลำดับ มีค่าความเป็นกรด-ด่าง อยู่ในช่วง 3.65 - 4.55 ผลการทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคพบว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) ในด้านสี กลิ่น และความชอบโดยรวม แต่การหมักโดยใช้ระยะเวลา 5 วัน ได้รับคะแนนด้านรสชาติสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) สำหรับไวน์ข้าวโพดข้าวเหนียวที่หมักได้มีปริมาณแอลกอฮอล์ร้อยละ 3.0, 3.56 และ 4.0 โดยปริมาตร ตามลำดับ และมีปริมาณของแข็งละลายลดลงเหลือ 9.0, 8.5 และ 7.0 ตามลำดับ มีค่าความเป็นกรด - ด่าง อยู่ในช่วง 3.82 - 4.55 ผลการทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคพบว่าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) ในด้านความใส สี กลิ่น และความชอบโดยรวม ซึ่งการหมักโดยใช้ระยะเวลา 5 วัน ได้รับคะแนนด้านรสชาติสูงสุดแต่ไม่แตกต่างทางสถิติ ($p > 0.05$) กับการหมักโดยใช้ระยะเวลา 3 วัน แต่อย่างไรก็ตามการหมักโดยใช้ระยะเวลา 5 วัน ได้รับคะแนนการยอมรับจากผู้บริโภคในด้านกลิ่นและความชอบโดยรวมสูงกว่าการหมักโดยใช้ระยะเวลา 3 วัน (ตารางที่ 5) ดังนั้นระยะเวลา 5 วัน จึงเป็นช่วงเวลาที่เหมาะสมที่สุดในการหมักไวน์ข้าวโพดหวานและไวน์ข้าวโพดข้าวเหนียว

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างไวน์ข้าวโพดหวานและไวน์ข้าวโพดข้าวเหนียว ที่ใช้เวลาในการหมัก 5 วัน พบว่าไวน์ข้าวโพดข้าวเหนียวได้รับคะแนนการยอมรับของผู้บริโภคสูงกว่าไวน์ข้าวโพดหวานในทุก ๆ ด้าน แสดงให้เห็นว่าไวน์ข้าวโพดข้าวเหนียวเป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคมากกว่าไวน์ข้าวโพดหวาน

ตารางที่ 5 ผลการทดสอบการยอมรับของผู้บริโภคในการศึกษาระยะเวลาที่เหมาะสมต่อการผลิตไวน์ข้าวโพดหวานและไวน์ข้าวโพดข้าวเหนียว

ตัวอย่าง	คะแนนการยอมรับของผู้บริโภค (ค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน)					
	เวลาในการหมัก (วัน)	ความใส	สี	กลิ่น	รสชาติ	ความชอบ โดยรวม
ไวน์ข้าวโพดหวาน	3	3.75±1.02 ^a	3.20±1.20 ^{ns}	3.35±1.09 ^{ns}	3.05±1.32 ^b	3.35±1.04 ^{ns}
	5	3.65±0.99 ^{ab}	3.15±1.04 ^{ns}	3.50±1.00 ^{ns}	3.90±1.05 ^a	3.55±0.89 ^{ns}
	7	3.05±1.10 ^b	3.30±1.08 ^{ns}	2.80±1.15 ^{ns}	2.80±1.20 ^b	2.95±1.05 ^{ns}
ไวน์ข้าวโพดข้าวเหนียว	3	3.80±1.11 ^{ns}	3.30±1.03 ^{ns}	3.25±1.16 ^{ns}	3.40±1.27 ^{ab}	3.30±1.23 ^{ns}
	5	3.70±1.03 ^{ns}	3.25±1.12 ^{ns}	3.80±0.90 ^{ns}	4.05±1.15 ^a	3.75±1.12 ^{ns}
	7	3.20±1.24 ^{ns}	3.25±1.16 ^{ns}	3.05±1.19 ^{ns}	3.35±1.35 ^b	3.30±1.34 ^{ns}

หมายเหตุ : ^a และ ^b หมายถึง ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

^{ns} หมายถึง ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$)

การอภิปรายผล

จากผลการศึกษาที่ได้พบว่าในไวน์ข้าวโพดหวานและไวน์ข้าวโพดข้าวเหนียวนั้นเมื่อยีสต์เกิดการเจริญปริมาณของแข็งละลายและค่าความเป็นกรด - ด่างจะลดลง ส่วนปริมาณแอลกอฮอล์จะเพิ่มขึ้น เนื่องจากยีสต์จะนำของแข็งละลายซึ่งส่วนใหญ่คือน้ำตาลใช้เป็นแหล่งอาหาร โดยทั่วไปประมาณร้อยละ 95 ของน้ำตาลทั้งหมดจะเปลี่ยนไปเป็นแอลกอฮอล์และคาร์บอนไดออกไซด์ สำหรับน้ำตาลที่เหลืออีกร้อยละ 5 จะถูกนำไปใช้ในการเจริญของเซลล์ยีสต์และเปลี่ยนเป็นผลพลอยได้ (By-product) เช่น กลีเซอรอล (Glycerol) แอซีทัลดีไฮด์ (Acetaldehyde) กรดซัคซินิก (Succinic acid) กรดแลคติก (Lactic acid) และกรดอะซิติก (Acetic acid) เป็นต้น (Romano et al., 1998) โดยกรดอินทรีย์ที่เกิดขึ้นจะมีผลต่อค่าความเป็นกรด - ด่างของไวน์ ถ้าหากมีปริมาณสูงก็จะส่งผลให้ค่าความเป็นกรด - ด่างของไวน์ลดต่ำลงมาก อาจมีผลต่อคุณสมบัติทางประสาทสัมผัสทำให้ไวน์มีรสชาติที่ไม่ดีและยับยั้งการเจริญเติบโตของยีสต์ (; สาวิตรี, 2549; ไกรยศ และคณะ, 2561; Arroyo-López et al., 2009) สอดคล้องกับการศึกษาของนุจรี และคณะ (2563) รายงานว่าในการหมักไวน์ลำดวนนั้นหลังจากทำการหมักครบ 7 วัน ในทุกชุดการทดลองปริมาณของแข็งละลายจะลดลงจาก 20 องศาบริกซ์ เหลือประมาณ 8 - 13 องศาบริกซ์ เนื่องจากยีสต์นำไปใช้ในการเจริญและในขณะเดียวกันจะมีปริมาณของแอลกอฮอล์เพิ่มสูงขึ้น ซึ่งปริมาณของแข็งละลายจะแปรผกผันกับปริมาณของแอลกอฮอล์ รวมถึงมีค่าความเป็นกรด - ด่าง (เริ่มต้น เท่ากับ 3.58 - 3.71) ลดลงเหลือ 3.30 - 3.50 การศึกษาในครั้งนี้ใช้อยีสต์ทั้ง 2 สายพันธุ์ ผลิตแอลกอฮอล์ในปริมาณที่ใกล้เคียงกัน แต่ให้ลักษณะปรากฏ เช่น ความใส สี กลิ่น และรสชาติที่ต่างกัน ดังจะเห็นได้จากในไวน์ข้าวโพดหวานนั้นการใช้ยีสต์สายพันธุ์ *burgundy* จะให้ไวน์ที่มีความใส สี และรสชาติที่แตกต่างจากไวน์ข้าวโพดข้าวเหนียวการใช้ยีสต์สายพันธุ์ *montachae* จะให้ไวน์ที่มีความใส สี และรสชาติที่ดีกว่าสายพันธุ์ *montachae* ในขณะที่ถ้าเป็นไวน์ข้าวโพดข้าวเหนียวการใช้ยีสต์สายพันธุ์ *montachae* จะได้ผลการยอมรับของผู้บริโภคที่ดีกว่า โดยรสชาติ สี กลิ่น และความใสเป็นคุณสมบัติเฉพาะตัวขึ้นอยู่กับชนิดของวัตถุดิบและสายพันธุ์ของยีสต์ที่นำมาใช้ในการผลิตไวน์ เช่นเดียวกับการศึกษาของ Pongkan et al. (2018) พบว่าการผลิตไวน์มะขามโดยใช้เชื้อยีสต์ต่างสายพันธุ์ (*burgundy* และ *montachae*) นั้นทำให้ได้ไวน์ที่มีคุณภาพแตกต่างกัน แม้ปริมาณแอลกอฮอล์ (0.97 และ 0.93 โดยปริมาตร ตามลำดับ) และของแข็งละลาย (14.07 และ 14.13 องศาบริกซ์ ตามลำดับ) ที่ได้มีค่าใกล้เคียงกัน แต่การใช้สายพันธุ์ *montachae* จะให้สี กลิ่น และรสชาติ ที่ดีกว่าสายพันธุ์ *burgundy*

ปริมาณกล้ำเชื้อที่เหมาะสมของการผลิตไวน์ข้าวโพดทั้งสองชนิดจะอยู่ในช่วงร้อยละ 10 - 20 ซึ่งปริมาณกล้ำเชื้อที่เหมาะสมที่สุดคือร้อยละ 10 ให้แอลกอฮอล์ในปริมาณสูงสุดเท่ากับร้อยละ 9.0 โดยปริมาตร รวมถึงได้รับคะแนนการยอมรับ

ของผู้บริโภคในเรื่องของรสชาติสูงสุด สอดคล้องกับการศึกษาของ อำพรณ และบุศรา (2547) ที่ผลิตไวน์มะเขือเทศโดยใช้เชื้อยีสต์ *S. cerevisiae* สายพันธุ์ *burgundy* รายงานว่าเมื่อใช้กล้าเชื้อร้อยละ 10 จะทำให้ได้ไวน์ที่มีแอลกอฮอล์ปริมาณสูงสุด (ร้อยละ 12 โดยปริมาตร) รวมถึงได้รับคะแนนการยอมรับจากผู้บริโภคสูงสุดในทุกด้าน (สี กลิ่น ความใส รสชาติ และความชอบโดยรวม) และ Mundaragi and Thangadurai (2018) รายงานว่าปริมาณกล้าเชื้อที่เหมาะสมในการผลิตไวน์หนามพรม (*Carissa spinarum* L.) คือร้อยละ 10 ซึ่งให้ปริมาณแอลกอฮอล์สูงเท่ากับร้อยละ 8.3 โดยปริมาตร ในขณะที่ Sevda and Rodrigues (2011) พบว่าการใช้ปริมาณกล้าเชื้อร้อยละ 8 ในการผลิตไวน์ฝรั่งจะให้ปริมาณแอลกอฮอล์สูงที่สุดเท่ากับร้อยละ 7.05 โดยปริมาตร หากใช้ปริมาณกล้าเชื้อเท่ากับร้อยละ 2 จะมีการใช้น้ำตาลในปริมาณที่ต่ำมากและผลิตแอลกอฮอล์ได้ต่ำ แต่ถ้าใช้ปริมาณกล้าเชื้อร้อยละ 20 จะมีการใช้น้ำตาลในปริมาณสูงและได้แอลกอฮอล์ในปริมาณสูงเท่ากับร้อยละ 7.04 โดยปริมาตร แต่ไม่แตกต่างกับการใช้ปริมาณกล้าเชื้อร้อยละ 8 โดยทั่วไปปริมาณกล้าเชื้อเริ่มต้นที่นิยมใช้ในการผลิตไวน์จะอยู่ในช่วงร้อยละ 5 - 10 ซึ่งจะมีจำนวนของเซลล์ยีสต์เริ่มต้นในปริมาณที่เหมาะสม ส่งผลให้เกิดการหมักได้อย่างรวดเร็วและสามารถผลิตแอลกอฮอล์ได้สูงในระยะเวลาอันสั้น หากใช้ปริมาณกล้าเชื้อเริ่มต้นต่ำกว่าร้อยละ 5 อาจทำให้ต้องใช้ระยะเวลาในการหมักนานขึ้นและผลิตแอลกอฮอล์ได้ต่ำ เนื่องจากมีปริมาณของเชื้อยีสต์น้อย ในขณะที่เดียวกันหากใช้ปริมาณกล้าเชื้อเริ่มต้นสูงกว่าร้อยละ 10 ขึ้นไป ปริมาณของแอลกอฮอล์ที่ผลิตได้ก็จะไม่มากไปกว่าเดิมอีก เนื่องจากปริมาณสารอาหารที่ทำให้ยีสต์เกิดการเจริญมีอยู่ในปริมาณที่จำกัด ส่งผลให้ยีสต์ไม่สามารถเปลี่ยนสารอาหาร (น้ำตาล) ไปเป็นแอลกอฮอล์ได้มากกว่านี้ รวมถึงอาจส่งผลให้เกิดการผลิตแอลกอฮอล์และอุณหภูมิเพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็ว ซึ่งจะเป็นอันตรายต่อยีสต์ที่ไม่สามารถปรับตัวได้ทันและทำให้ยีสต์ตายได้ (มนชิตา และวิลาสินี, 2542) อย่างไรก็ตามหากใช้ปริมาณกล้าเชื้อเริ่มต้นสูงก็จะส่งผลทำให้มีต้นทุนในการผลิตไวน์เพิ่มขึ้นอีกด้วย

จากผลการศึกษาอัตราส่วนของน้ำข้าวโพดต่อน้ำแสดงให้เห็นว่าการใช้อัตราส่วน 1:1 (เจือจางน้อยลง) จะได้ปริมาณแอลกอฮอล์ต่ำที่สุดในไวน์ทั้งสองชนิด แต่เมื่อใช้อัตราส่วน 1:4 (เจือจางมาก) จะได้ปริมาณแอลกอฮอล์สูงสุด อาจเป็นผลเนื่องมาจากการใช้อัตราส่วนที่น้อยนั้นจะมีปริมาณของสารตั้งต้น (น้ำตาล) สูง ซึ่งอาจมีปริมาณที่มากเกินไปเกินความต้องการของเชื้อยีสต์ ส่งผลให้เกิดการยับยั้งการเจริญและการผลิตแอลกอฮอล์ (Substrate inhibition) (ลักขณา และคณะ, 2550) แตกต่างจากการศึกษาของวาสนา และสุรศักดิ์ (2564) รายงานว่าการใช้อัตราส่วนเนื้อสละเยาะ (เนื้อสละ 500 กรัมต่อน้ำ 1 ลิตร) ในการผลิตไวน์จะทำให้ยีสต์มีการสร้างแอลกอฮอล์ในปริมาณสูงกว่าการใช้อัตราส่วนเนื้อสละน้อย เช่นเดียวกับการศึกษาของอำพรณ และปิยมาศ (2549) ที่ศึกษาการวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ไวน์มะม่วง พบว่าการใช้อัตราส่วนของน้ำมะม่วงต่อน้ำเท่ากับ 1:1 มีปริมาณแอลกอฮอล์สูงสุดคือร้อยละ 13.1 โดยปริมาตร ซึ่งการใช้เนื้อสละปริมาณมากหรือการเจือจางน้อยสุดทำให้มีปริมาณสารอาหารสูงกว่าอัตราส่วนอื่น ๆ ซึ่งเมื่อมีปริมาณสารอาหารมากก็จะส่งผลให้ยีสต์ที่ใช้ในการหมักเจริญได้ดีและผลิตแอลกอฮอล์ได้สูง

การเติมน้ำตาลหรือการปรับปริมาณของแข็งละลายเริ่มต้นในกระบวนการหมักเป็นสิ่งที่จำเป็นต่อการปรับสภาพให้เหมาะสมต่อการเจริญของยีสต์และการหมักน้ำตาลให้เปลี่ยนเป็นแอลกอฮอล์ (Tatdao et al., 2014) จากผลการศึกษหาปริมาณของแข็งละลายเริ่มต้นที่เหมาะสมแสดงให้เห็นว่าเมื่อสิ้นสุดกระบวนการหมักปริมาณของแข็งละลายจะลดลง เนื่องจากยีสต์ใช้ของแข็งละลายเป็นอาหารเพื่อการเจริญเติบโตและเปลี่ยนเป็นแอลกอฮอล์ ซึ่งจากการทดลองพบว่าเมื่อเพิ่มปริมาณของแข็งละลายจะทำให้ยีสต์ผลิตแอลกอฮอล์ได้น้อยลง เป็นผลมาจากการมีปริมาณของแข็งละลายมากเกินไปซึ่งอาจไปยับยั้งการสร้างแอลกอฮอล์ของยีสต์ นอกจากนี้หากใช้ปริมาณของแข็งละลายในปริมาณที่ไม่มากพอจะทำให้ไวน์ที่ผลิตได้มีรสจืดและยีสต์จะหยุดการเจริญเติบโตทำให้ได้แอลกอฮอล์ในปริมาณต่ำ (โชคชัย และคณะ, 2545)

ในการหมักไวน์ข้าวโพดทั้งสองแสดงให้เห็นว่าปริมาณแอลกอฮอล์จะแปรผันตามระยะเวลาที่ใช้ในการหมัก หากใช้เวลาในการหมักนานก็จะทำให้ได้ปริมาณแอลกอฮอล์มากขึ้นตามไปด้วย เช่นเดียวกับการผลิตไวน์กระเจี๊ยบและไวน์กระเจี๊ยบผสมลูกหม่อนของ ประภาพันท์ และคณะ (2563) โดยในช่วงวันที่ 0 - 2 ของการหมักจะยังไม่มีการผลิตแอลกอฮอล์เกิดขึ้น เนื่องจากยีสต์กำลังปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อม จากนั้นช่วงวันที่ 3 ของการหมักเริ่มมีการผลิตแอลกอฮอล์และมีการผลิตแอลกอฮอล์เพิ่มขึ้นอย่างรวดเร็วในช่วงวันที่ 7 และเพิ่มขึ้นเรื่อย ๆ ตามระยะเวลาในการหมักที่เพิ่มขึ้น

บทสรุป

ข้าวโพดหวานและข้าวโพดข้าวเหนียวสามารถนำมาหมักโดยใช้เชื้อยีสต์ *S. cerevisiae* และผลิตเป็นไวน์ปริมาณแอลกอฮอล์ไม่สูงมากสำหรับใช้ดื่ม โดยการแปรผันสายพันธุ์ยีสต์ ปริมาณกล้าเชื้อ อัตราส่วนน้ำข้าวโพดต่อน้ำ ปริมาณของแข็งละลายเริ่มต้น และระยะเวลาในการหมัก จะทำให้ไวน์ที่ได้มีลักษณะที่แตกต่างกัน พบว่ายีสต์สายพันธุ์ *burgundy* เหมาะกับการผลิตไวน์ข้าวโพดหวาน ส่วนยีสต์สายพันธุ์ *montachae* เหมาะกับการผลิตไวน์ข้าวโพดข้าวเหนียว ซึ่งไวน์ข้าวโพดข้าวเหนียวได้รับความนิยมจากผู้บริโภคมากกว่าไวน์ข้าวโพดหวาน ข้อมูลที่ได้สามารถใช้เป็นแนวทางในการพัฒนาการผลิตไวน์จากข้าวโพดสายพันธุ์อื่น ๆ เพื่อเพิ่มมูลค่าเมื่อมีราคาคตกต่ำ รวมถึงเป็นทางเลือกในการเพิ่มผลิตภัณฑ์จากข้าวโพด

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์ประยุกต์และเทคโนโลยีชีวภาพ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี ในการอนุเคราะห์ห้องปฏิบัติการและอุปกรณ์ต่าง ๆ ในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- ไกรยศ แซ่ลิ้ม, สิริขวัญ จันทรหมื่น และกัญญารัตน์ เหลืองประเสริฐ. (2561). การเปลี่ยนแปลงทางเคมีระหว่างการผลิตไวน์ลูกหม่อน และความพึงพอใจของผู้บริโภค. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร. 49(1) (พิเศษ): 612-616.
- จิราภรณ์ สอดจิตร์, ชลธิชา ยืนหยัดชัย และสุพัชรีดา แก้วสระแสน (2563). การผลิตน้ำส้มสายชูจากข้าวโพดหวาน. วารสารวิทยาศาสตร์เกษตร. 51(1): 534-538.
- โชคชัย วณู, นันทกร บุญเกิด และลำไพโร ดิษฐวิบูลย์. (2545). คนทำไวน์: winemaker I. พิมพ์ครั้งที่ 1. สมบูรณ์พรินติ้ง: นครราชสีมา.
- นุจรี สอนสะอาด, สุภาพร รักษ์ซี และวิลาวลัย เกสร. (2563). สภาวะที่เหมาะสมในการหมักไวน์ลำควนโดยใช้กล้าเชื้อแบบตรึงเซลล์. วารสารเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี. 1(1): 49-61.
- ประภาพันท์ ศิริจันทร์แสง, ณัฐมล แสนโคตร และละอองทิพย์ ชุ่มเสนา. (2563). การศึกษาคุณสมบัติทางเคมีและทางประสาทสัมผัสของไวน์กระเจี๊ยบและไวน์กระเจี๊ยบผสมลูกหม่อน. วารสารวิจัย. 13(1): 111-119.
- มนชิดา มั่นคง และวิลาสินี ศรีไพบูลย์. (2542). การผลิตไวน์ว่านหางจระเข้. ปัญหาพิเศษ. ภาควิชาจุลชีววิทยา. คณะวิทยาศาสตร์. มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี.
- ลักขณา เหล่าไพบูลย์, พัฒนา เหล่าไพบูลย์, ประสิทธิ์ ใจศิลป์ และพรเทพ ถนอมแก้ว. (2550). การพัฒนากระบวนการผลิตเอทานอลจากน้ำคั้นลำต้นข้าวฟ่างหวาน. รายงานการวิจัย. คณะเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยขอนแก่น ขอนแก่น.

- รัฐพล ศรประเสริฐ และเสาวรส พงษ์น้อย. (2558). ผลผลิตพันธุ์เลียนแบบไวน์จากน้ำส้มโอ (*Citrus maxima* (Burm.f) Merr.) พันธุ์ขาวแดงกวด้วยเส้นใยเห็ดแครง (*Schizophyllum commune* Fr.) ในการหมัก. วารสารวิชาการพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. 25(3): 449-457.
- วาสนา สุโยธา และสุรศักดิ์ บุญรุ่ง. (2564). การศึกษาอัตราส่วนเนื้อสละและชนิดของยีสต์ที่เหมาะสมต่อการผลิตไวน์. วารสารเกษตรพระจอมเกล้า. 39(2): 156-164.
- สาวิตรี ลิ้มทอง. (2549). ยีสต์: ความหลากหลายและเทคโนโลยีชีวภาพ. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์: กรุงเทพฯ.
- สำนักงานเศรษฐกิจการเกษตร. (2563). ข้าวโพดหวาน : เนื้อที่เพาะปลูก เก็บเกี่ยว ผลผลิต และผลผลิตต่อไร่ ระดับประเทศ ภาค และจังหวัด ปี 2563. ค้นเมื่อ 16 เมษายน 2565.
<https://www.oae.go.th/assets/portals/1/fileups/prcaidata/files/sweet%20corn63.pdf>.
- สำราญ ศรีชมพร, อารังศิลป์ โพธิ์สูง, สมชาย ปิยพันธุ์วานนท์, ณรงค์ชัย บุญศรี, ถวิล นิลพยัคฆ์, กิตติศักดิ์ ศรีชมพร, จันทร์สว่าง ศรีหาดา และนิวรรณ์ ยาวศรีสุวรรณ. (2557). การเพิ่มศักยภาพการผลิตข้าวโพดข้าวเหนียวและถ่ายทอดงานวิจัยสู่เกษตรกร. ใน การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 52: สาขาพืช 4-7 กุมภาพันธ์ 2557. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ. 305-312.
- สุพงษ์ วายุภาพ และธีรศักดิ์ มานูพีระพันธุ์. (2543). การปลูกข้าวโพดเทียนและข้าวโพดข้าวเหนียว. วารสารกสิกร. 73(4): 345-347.
- อำพรณ ชัยกุลเสวีวัฒน์ และบุศรา มหจจินนท์. (2547). การศึกษาการหมักไวน์จากมะเขือเทศ. ใน การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 42 สาขาประมง สาขาอุตสาหกรรมเกษตร. 3-6 กุมภาพันธ์ 2547. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ. 513-520.
- อำพรณ ชัยกุลเสวีวัฒน์ และปิยมาศ วงษ์ประยูร. (2549). การวิจัยและพัฒนาผลิตภัณฑ์ไวน์มะม่วง. วารสารเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยสยาม. 2(1): 28-35.
- Arroyo-López F.N., Orlic S., Querol A. and Barrio E. (2009). Effects of temperature, pH and sugar concentration on the growth parameters of *Saccharomyces cerevisiae*, *S. kudriavzevii* and their interspecific hybrid. International. Journal of Food Microbiology. 131(2-3): 120-127.
- Carlo G.D., Mascolo N., Izzo A.A. and Capasso F. (1999). Flavonoids: old and new aspects of a class of natural therapeutic drugs. Life Science. 65: 337-353.
- Mundaragi A. and Thangadurai D. (2018). Process optimization, physicochemical characterization and antioxidant potential of novel wine from an underutilized fruit *Carissa spinarum* L. (Apocynaceae). Food Science and Technology. 38(3): 428-433.
- Pongkan S., Tilarux P., Charoensuk K., Ochaikul D. and Suwanposri A. (2018). Production and quality improvement of the tropical fruit tamarind (*Tamarindus indica* Linn.) wine. International Journal of Agricultural Technology. 14(3): 341-350.
- Romano P., Paraggio M. and Turbanti L. (1998). Stability in by product fermentation as a strain selection tool of *Saccharomyces cerevisiae* wine yeasts. Journal of Applied Microbiology. 84: 336-341.
- Sevda S.B. and Rodrigues L. (2011). Fermentative behavior of *Saccharomyces* strains during Guava (*Psidium guajava* L.) must fermentation and optimization of guava wine production. Journal of Food Processing and Technology. 2(4): 118-126.

- Suresh A., Ashokkumar K. and Rathi C.R. (2019). Biochemical analysis and production of wine from chrysanthemum, ixora, lotus, hibiscus and nerium flowers. International Journal of Microbiology Research. 11(12): 1753-1755.
- Swami S.B., Thakor N.J. and Divate A.D. (2014). Fruit wine production: A review. Journal of Food Research and Technology. 2(3): 93-100.
- Tatdao P., Norrasat S. and Tiwawan S. (2014). Physico-chemical and sensory properties of musts and wines from *Melodorum fruticosum* Lour. International Food Research Journal. 21(1): 39-43.
- Yangcheng H., Jiang H., Blanco M., and Jane J. (2013). Characterization of normal and waxy corn starch for bioethanol production. Journal of Agricultural and Food Chemistry. 61: 379-386.

Received: April 19, 2022; Revised: July 20, 2022; Accepted: August 6, 2022

การศึกษาการเจริญเติบโต การดูดซับ และการสะสมโลหะหนักของทานตะวัน
(*Helianthus annuus* L.) ที่ปลูกด้วยสารละลายที่มีแคดเมียมและสังกะสีร่วมกัน
The studied of growth, absorption and accumulation of heavy metals by
sunflower (*Helianthus annuus* L.) grown on Cd-Zn co-contaminated solution

ปิยาภรณ์ วรานุสันติกุล^{1*} เจษฎา แพนาค² และโชติวุฒิ เก้ายอดสิงห์²
Piyaporn Waranusantikul^{1*}, Chetsada Phaenark² and Chotivut Kaoyodsing²

¹คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยสวนดุสิต จังหวัดกรุงเทพมหานคร

²สำนักวิชาสหวิทยาการ มหาวิทยาลัยมหิดล วิทยาเขตกาญจนบุรี จังหวัดกาญจนบุรี

*Corresponding Author E-mail Address : piyapornwara@gmail.com

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเจริญเติบโต และการสะสมโลหะหนักของทานตะวันที่ปลูกด้วยสารละลายที่มีแคดเมียมและสังกะสีร่วมกัน โดยปลูกทานตะวันด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียมหรือสังกะสีที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ เพื่อศึกษาผลกระทบของโลหะหนักต่อการเจริญเติบโตและเลือกระดับความเข้มข้นโลหะหนักที่ไม่ส่งผลกระทบต่อการเติบโตไปทดลองต่อไป ทานตะวันเติบโตได้ดีเมื่อปลูกด้วยสารละลายที่มีแคดเมียมระดับความเข้มข้นไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร และสังกะสีระดับความเข้มข้นไม่เกิน 1.25 มิลลิกรัมต่อลิตร จากนั้นทำการทดลองการปลูกทานตะวันในสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้น 0, 0.1, 0.3 และ 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร แต่ระดับความเข้มข้นของแคดเมียมจะเติมสังกะสีร่วมด้วยที่ระดับความเข้มข้น 0, 0.2, 0.6 และ 1 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 15 วัน จากนั้นนำพืชไปวิเคราะห์การเจริญเติบโตและปริมาณโลหะหนัก ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่าสังกะสีซึ่งเป็นธาตุอาหารรองจะยับยั้งการเติบโตของพืชและก่อให้เกิดความเป็นพิษเมื่อพืชได้รับในปริมาณที่สูงเกินไป สังกะสีในปริมาณที่เหมาะสมสามารถส่งเสริมการเติบโตของพืชในสถานะที่มีแคดเมียมร่วมด้วยได้ การสะสมแคดเมียมในส่วนลำต้นที่เพิ่มสูงขึ้นจะส่งผลให้ปริมาณสังกะสีในลำต้นลดลง แคดเมียมอาจส่งผลกระทบต่อดูดซึมสังกะสีและรบกวนกระบวนการทางสรีรวิทยาของพืชที่สังกะสีมีส่วนเกี่ยวข้อง ในการศึกษาครั้งนี้พบว่าทานตะวันมีความสามารถในการลำเลียงและสะสมโลหะหนักแคดเมียมในส่วนลำต้นได้มากกว่า 100 มิลลิกรัม/กิโลกรัม มวลแห้ง จัดเป็นพืชที่สามารถดูดซับแคดเมียมได้ในปริมาณสูง

คำสำคัญ: การเจริญเติบโต การดูดซับ แคดเมียม สังกะสี ทานตะวัน

Abstract

This research aimed to investigate the growth and accumulation of heavy metals by sunflower grown on Cd-Zn co-contaminated solution. Sunflowers were grown with mineral solution containing Cd and Zn at different concentrations to study the effects of heavy metals on growth and selected proper concentrations that did not affect growth for further experiments. Sunflowers grew well when planted in a solution with a concentration of Cd not more than 0.5 mg/L and Zn concentration of not more than 1.25 mg/L. After that, sunflower cultivation was carried out in mineral solution containing Cd at concentrations of 0, 0.1, 0.3 and 0.5 mg/L. Each Cd concentration was added with Zn at concentrations of 0, 0.2, 0.6 and 1 mg/L for 15 days. The plants were then analyzed for growth and heavy metal accumulation. This investigation revealed that Zn, a micronutrient, inhibits plant growth and causes toxicity when received in a too high dose. The right amount of Zn can promote plant growth in Cd co-containing conditions. Increased Cd concentration in the stem would result in a decrease in the Zn concentration in the stem. Cd may affect Zn absorption and interfere with the physiological processes of plants which Zn is involved. In this study, sunflower had the ability to transport and accumulate Cd in the stem of more than 100 mg/kg dry weight. It is classified as a Cd hyperaccumulator plant.

Keywords: Growth, Absorption, Cd, Zn, Sunflower

บทนำ

ปัญหามลพิษทางน้ำและทางดิน เป็นปัญหาทางสิ่งแวดล้อมที่กำลังทวีความรุนแรงในประเทศไทย สารมลพิษที่ปนเปื้อนในน้ำและดินนั้น มักเกิดจากการปล่อยน้ำเสียจากแหล่งชุมชน และแหล่งอุตสาหกรรม รวมทั้งยังเกิดจากน้ำฝนที่ชะล้างแร่ธาตุต่าง ๆ จากการใช้ปุ๋ยเคมีทางการเกษตร และการทำอุตสาหกรรมเหมืองแร่ เป็นต้น ปัญหาสิ่งแวดล้อมดังกล่าวอาจส่งผลกระทบต่อมนุษย์และสิ่งมีชีวิตอื่น ๆ ทั้งพืชและสัตว์ ซึ่งอาจรุนแรงจนนำไปสู่การสูญพันธุ์ของสิ่งมีชีวิตได้ (Simmons et al., 2005; La-up et al., 2021)

ปัญหาการปนเปื้อนโลหะหนักในแหล่งน้ำและดิน ซึ่งเกิดจากการทำอุตสาหกรรมเหมืองแร่ ก่อให้เกิดผลกระทบต่อสุขภาพอนามัยของมนุษย์ที่อาศัยอยู่ในพื้นที่ปนเปื้อน ซึ่งบริโภคผลผลิตทางการเกษตรที่มีโลหะหนักปนเปื้อนอยู่ ดังนั้นการจัดการที่ดีเพื่อป้องกันการปนเปื้อนโลหะหนักในสิ่งแวดล้อมและบำบัดสิ่งแวดล้อมที่มีการปนเปื้อนโลหะหนักด้วยวิธีการที่เหมาะสมจึงมีความสำคัญอย่างยิ่ง (กรมควบคุมมลพิษ, 2556)

โดยทั่วไปแล้วโลหะหนักในธรรมชาติจะอยู่ในรูปสารประกอบที่มีความเสถียรสูง แต่การทำเหมืองแร่เพื่อนำโลหะหนักไปใช้ประโยชน์นั้น ส่งผลให้โลหะหนักที่เหลืออยู่ในหินแร่เกิดการรั่วไหล ปนเปื้อนในสิ่งแวดล้อมทั้งในแหล่งน้ำและดิน ตัวอย่างเช่น การทำเหมืองแร่สังกะสี ซึ่งโดยทั่วไปแล้วแร่สังกะสีจะมีโลหะแคดเมียมเป็นองค์ประกอบ ดังนั้นการทำเหมืองแร่สังกะสีเพื่อนำไปใช้ประโยชน์จึงทำให้เกิดการรั่วไหลของโลหะแคดเมียม ปนเปื้อนลงสู่แหล่งน้ำและดินเป็นบริเวณกว้างโดยรอบพื้นที่ที่มีการทำเหมือง การปนเปื้อนแคดเมียมในดินส่งผลต่อชุมชนในพื้นที่ปนเปื้อนเป็นอย่างมาก ตัวอย่างเช่น การปนเปื้อนแคดเมียมในพื้นที่ปลูกข้าว ในบริเวณโดยรอบของพื้นที่เหมือง ที่อำเภอแม่สอด จังหวัดตาก ซึ่งทำให้มีการปนเปื้อนแคดเมียม

ในข้าวปริมาณสูง และก่อให้เกิดปัญหาสุขภาพของคนที่บริโภคข้าวที่มีการปนเปื้อนแคดเมียม (Simmons et al., 2005; Phaenark et al., 2009; La-up et al., 2021)

การบำบัดพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนักในดินอาจทำได้ทั้งวิธีทางกายภาพและเคมี เช่น วิธีกรองแบบรีเวิร์ส ออสโมซิส (Reverse osmosis) การแยกด้วยไฟฟ้า (Electrodialysis) การกรอง (Filtration) และการแลกเปลี่ยนประจุ (Ion-exchange) เป็นต้น (Ahalya et al., 2003) แต่การบำบัดพื้นที่ปนเปื้อนด้วยวิธีทางกายภาพและเคมีนั้น ส่วนใหญ่ต้องเสียค่าใช้จ่ายสูง บำบัดได้ในพื้นที่ขนาดเล็ก ส่งผลเสียต่อคุณภาพดิน และยังทำให้ทัศนียภาพไม่งดงาม การบำบัดการปนเปื้อนโลหะหนักโดยใช้พืช (Phytoremediation) เป็นวิธีหนึ่งที่ได้รับความสะดวกเป็นอย่างมากในปัจจุบัน เนื่องจากเป็นเทคโนโลยีที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อม มีค่าใช้จ่ายต่ำ สามารถประยุกต์ใช้ได้ในพื้นที่ขนาดใหญ่ ไม่ก่อให้เกิดผลเสียต่อคุณภาพของดิน และช่วยลดการชะล้างหรือพังทลายของดิน (Ali et al., 2013) นอกจากนี้ยังทำให้มีทัศนียภาพที่สวยงามด้วย

พืชที่จะนำมาใช้บำบัดพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนักจะต้องมีความสามารถในการทนต่อโลหะหนักได้ดี สามารถดูดซับและลำเลียงโลหะหนักไปสะสมในส่วนลำต้นได้ในปริมาณที่สูง มีรายงานการศึกษาจำนวนมากเกี่ยวกับพืชที่สามารถนำมาใช้ในการบำบัดพื้นที่ปนเปื้อน (Visootviseth et al., 2002; Chantachon et al., 2004; Rotkittikhun et al., 2006; Rotkittikhun et al., 2007; Chintakovid et al., 2008; Waranusantigul et al., 2008; Phaenark et al., 2009) ซึ่งรวมถึงการศึกษา ก่อนหน้านี้ที่พบว่าทานตะวันเป็นพืชที่สามารถทนทานและสะสมโลหะหนักได้หลายชนิด (Adesodun et al., 2010; Kotschau et al., 2014; Shaheen and Rinklebe, 2015) และมีคุณสมบัติเหมาะสมที่อาจนำไปประยุกต์ใช้ในการบำบัดพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนัก

ในการศึกษาครั้งนี้ผู้วิจัยมีความสนใจศึกษาการดูดซับโลหะหนักของต้นทานตะวัน เนื่องจากทานตะวันเป็นพืชที่ได้รับรายงานว่าทนต่อโลหะหนักแคดเมียมและสังกะสีได้ดี สามารถเจริญเติบโตได้ดีในพื้นที่แห้งแล้ง และทนต่อโลหะหนักได้หลายชนิด แต่มีรายงานวิจัยจำนวนน้อยเกี่ยวกับการเจริญเติบโต และประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักของทานตะวันในสภาวะที่มีธาตุร่วมกันสองชนิด

ขอบเขตการวิจัยในครั้งนี้ จะทำการศึกษาความสามารถของทานตะวันในการเจริญเติบโต การดูดซับ และการลำเลียงโลหะหนักแคดเมียมและสังกะสีไปสะสมในส่วนลำต้น โดยการเพาะเลี้ยงพืชด้วยระบบการปลูกพืชไร้ดิน (Hydroponic) ด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมโลหะแคดเมียมและสังกะสีร่วมกัน ภายใต้สภาวะควบคุมภายในห้องปฏิบัติการ โดยผลการศึกษาสามารถใช้เป็นข้อมูลพื้นฐานที่สำคัญในการศึกษาความเป็นไปได้ที่จะนำทานตะวันไปประยุกต์ใช้บำบัดพื้นที่ปนเปื้อนโลหะหนักต่อไป

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

1. พืชที่ใช้ในการทดลอง

ทานตะวัน (*Helianthus annuus* L.) พันธุ์ Texas lemon โดยใช้เมล็ดพันธุ์ (ตราครุฑแดง) ของบริษัท อีสท์ เวสต์ ซีด จำกัด มีเปอร์เซ็นต์การงอกเท่ากับ 84 หมายเลขสินค้า 198936

2. การเพาะเลี้ยงทานตะวัน เพิ่มจำนวนเพื่อใช้ในการทดลอง

ทานตะวันถูกเพาะเลี้ยงบนวัสดุปลูก เป็นเวลา 30 วัน ในโรงเรือนปรับอากาศ ภายใต้อุณหภูมิ 25 ± 2 °C และทำการคัดเลือกพืชที่มีลักษณะคล้ายกันมาทำการทดลอง

3.การปลูกทานตะวันด้วยสารละลายแร่ธาตุ ด้วยระบบปลูกพืชไร้ดิน (Hydroponic)

3.1 การปลูกทานตะวันในสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียมหรือสังกะสี

ต้นทานตะวันที่มีลักษณะคล้ายกันจะถูกนำมาใช้ในการทดลอง พืชจะถูกชั่งน้ำหนัก วัดความยาวลำต้น ความยาวราก และนับจำนวนใบ ก่อนทำการทดลอง จากนั้นพืชจะถูกปลูกในภาชนะแก้วที่เติมสารละลายแร่ธาตุ (10% Hoagland's

solution) นำพืชไปตั้งบนชั้นเหล็กที่ให้แสงสว่างเป็นเวลา 12 ชั่วโมง/วัน และให้ออกซิเจน อุณหภูมิ $25 \pm 2^\circ\text{C}$ เพื่อปรับสภาพเป็นเวลา 3 วัน หลังจากนั้นต้นทานตะวันจะถูกย้ายไปปลูกในภาชนะแก้วที่เติมสารละลายแร่ธาตุ (10% Hoagland's solution) ซึ่งเติมแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ (0, 0.25, 0.5, 1 และ 2 มิลลิกรัม/ลิตร) หรือสังกะสีที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ (0, 1.25, 2.5, 5 และ 10 มิลลิกรัม/ลิตร) รวมทั้งหมด 9 ชุดการทดลอง ชุดการทดลองละ 5 ซ้ำ (Completely randomized design) นำพืชไปตั้งบนชั้นเหล็กที่ให้แสงสว่างเป็นเวลา 12 ชั่วโมง/วัน และให้ออกซิเจน อุณหภูมิ $25 \pm 2^\circ\text{C}$ เป็นเวลาทั้งสิ้น 15 วัน โดยเปลี่ยนสารละลายทุก 3 วัน เมื่อสิ้นสุดการทดลอง พืชจะถูกล้างด้วยน้ำประปาและน้ำกลั่นให้สะอาดตามลำดับ จากนั้น ชั่งน้ำหนัก วัดความยาวราก ความยาวลำต้น และนับจำนวนใบ หลังการทดลอง เพื่อวิเคราะห์การเจริญเติบโตของพืช

3.2 การปลูกทานตะวันในสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียมและสังกะสีร่วมกัน

ต้นทานตะวันที่มีลักษณะคล้ายกันจะถูกนำมาใช้ในการทดลอง พืชจะถูกชั่งน้ำหนัก วัดความยาวลำต้น ความยาวราก และนับจำนวนใบ ก่อนทำการทดลอง จากนั้นพืชจะถูกปลูกในภาชนะแก้วที่เติมสารละลายแร่ธาตุ (10% Hoagland's solution) นำพืชไปตั้งบนชั้นเหล็กที่ให้แสงสว่าง เป็นเวลา 12 ชั่วโมง/วัน และให้ออกซิเจน อุณหภูมิ $25 \pm 2^\circ\text{C}$ เพื่อปรับสภาพเป็นเวลา 3 วัน หลังจากนั้นต้นทานตะวันจะถูกย้ายไปปลูกในภาชนะแก้วที่เติมสารละลายแร่ธาตุ (10% Hoagland's solution) ซึ่งเติมแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ (0, 0.1, 0.3 และ 0.5 มิลลิกรัม/ลิตร) ในแต่ละระดับความเข้มข้นแคดเมียมจะเติมสังกะสีร่วมด้วยที่ระดับความเข้มข้น (0, 0.2, 0.6 และ 1 มิลลิกรัม/ลิตร) รวมทั้งหมด 16 ชุดการทดลอง ชุดการทดลองละ 5 ซ้ำ (Full factorial design) นำพืชไปตั้งบนชั้นเหล็กที่ให้แสงสว่าง เป็นเวลา 12 ชั่วโมง/วัน และให้ออกซิเจน อุณหภูมิ $25 \pm 2^\circ\text{C}$ เป็นเวลาทั้งสิ้น 15 วัน โดยเปลี่ยนสารละลายทุก 3 วัน เมื่อสิ้นสุดการทดลองพืชจะถูกล้างด้วยน้ำประปาและน้ำกลั่นให้สะอาดตามลำดับ จากนั้น ชั่งน้ำหนัก วัดความยาวราก ความยาวลำต้น และนับจำนวนใบหลังการทดลอง เพื่อวิเคราะห์การเจริญเติบโตของพืช พืชจะถูกแบ่งออกเป็นสามลำต้นและราก และนำไปอบที่อุณหภูมิ 70°C เป็นเวลา 3 วัน เพื่อเตรียมวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในพืช

4. การวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักในพืช

ตัวอย่างพืช (ลำต้นและราก) ที่ผ่านการอบแห้งจะถูกบดให้เป็นผงละเอียดด้วยโอบดยา ซึ่งตัวอย่างแห้ง 0.5 กรัม ใส่ลงในขวดรูปชมพู่ และเติมกรดผสมไนตริก (HNO_3) เปอร์คลอริก (HClO_4) อัตราส่วน 2:1 ปริมาตร 10 มิลลิลิตร จากนั้นเขย่าให้เข้ากันและนำขวดรูปชมพู่ตั้งบนเครื่องให้ความร้อน (Hot plate) ที่อุณหภูมิ 50°C เป็นเวลา 30 นาที เพิ่มอุณหภูมิเป็น 100°C เป็นเวลา 45 นาที เพิ่มอุณหภูมิเป็น 150°C เป็นเวลา 45 นาที และเพิ่มอุณหภูมิเป็น 200°C จนกว่าการย่อยจะสมบูรณ์ จากนั้นนำขวดรูปชมพู่ออกจากเครื่องดูดควัน ทิ้งไว้ให้เย็น เติมน้ำกลั่น และนำตัวอย่างไปกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman No.42 ปรับปริมาตรสารละลายเป็น 25 มิลลิลิตร เก็บตัวอย่างสารละลายในขวดพลาสติก และนำตัวอย่างสารละลายไปวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักด้วยเครื่องวิเคราะห์ปริมาณโลหะหนักชนิดเปลวไฟ (FAAS)

5. การวิเคราะห์ผลการศึกษาและสถิติที่ใช้ในการวิเคราะห์ผลการศึกษา

5.1 อัตราการเติบโตของพืช (Relative Growth Rate; RGR)

อัตราการเจริญเติบโตของพืช คำนวณได้จากสูตร (Hunt, 2003)

$$\text{RGR} = \frac{[\ln(w_2) - \ln(w_1)]}{(t_2 - t_1)}$$

w_1 คือ น้ำหนักสดพืชก่อนการทดลอง

w_2 คือ น้ำหนักสดพืชหลังการทดลอง

t_1 คือ วันที่เริ่มทำการทดลอง

t_2 คือ วันที่สิ้นสุดการทดลอง

5.2 เปอร์เซ็นต์การดูดซับโลหะหนัก (% Uptake)

เปอร์เซ็นต์การดูดซับโลหะหนัก คำนวณได้จากสูตร (Abdel-Halim et al., 2003)

$$\% \text{ uptake} = \frac{(C_0 - C_1)}{C_0} \times 100$$

C_0 คือ ความเข้มข้นโลหะหนักในสารละลายก่อนการทดลอง

C_1 คือ ความเข้มข้นโลหะหนักในสารละลายหลังการทดลอง

5.3 อัตราส่วนความเข้มข้นของโลหะหนักในลำต้นต่อราก (Translocation Factor; TF)

อัตราส่วนความเข้มข้นของโลหะหนักในส่วนลำต้นต่อส่วนราก เป็นค่าที่ใช้วัดความสามารถของพืชในการลำเลียงโลหะหนักจากรากไปส่วนลำต้นของพืช โดยคำนวณได้จากสูตร (Mattina et al., 2003)

$$TF = \frac{\text{ความเข้มข้นโลหะหนักในส่วนลำต้น (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)}}{\text{ความเข้มข้นโลหะหนักในส่วนราก (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)}}$$

5.4 การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การเจริญเติบโต และการสะสมโลหะหนักของทานตะวัน (*Helianthus annuus* L.) ถูกเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยระหว่างชุดการทดลอง โดยการวิเคราะห์ความแปรปรวนแบบทางเดียว (One-way ANOVA) ถ้ามีความแตกต่างกัน ($p < 0.05$) จะทดสอบความแตกต่างเชิงซ้อนโดยวิธี LSD ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 โดยโปรแกรม SPSS

ผลการวิจัย

1. การเจริญเติบโตของทานตะวันที่ปลูกด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมโลหะหนัก

1.1 สารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียม

น้ำหนักและอัตราการเติบโตของทานตะวันที่ถูกปลูกด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้น 0.25 ถึง 1 มิลลิกรัม/ลิตร ไม่แตกต่างจากทานตะวันที่ไม่ได้รับแคดเมียม ($p > 0.05$) ขณะที่พืชที่ได้รับแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้น 2 มิลลิกรัม/ลิตร มีน้ำหนักและอัตราการเติบโตลดลง ($p < 0.05$) (ตารางที่ 1) จากการทดลองนี้ ทำให้ได้ข้อมูลความเข้มข้นของแคดเมียมไปทำการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมของทานตะวันต่อ โดยจะศึกษาที่ความเข้มข้นสูงสุด 0.5 มิลลิกรัม/ลิตร

1.2 สารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมสังกะสี

น้ำหนักและอัตราการเติบโตของทานตะวันที่ถูกปลูกด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมสังกะสีที่ระดับความเข้มข้น 1.25 มิลลิกรัม/ลิตร ไม่แตกต่างจากทานตะวันที่ไม่ได้รับสังกะสี ($p > 0.05$) ขณะที่พืชที่ได้รับสังกะสีที่ระดับความเข้มข้น 2.5 ถึง 10 มิลลิกรัม/ลิตร มีน้ำหนักและอัตราการเติบโตลดลงจนตายในที่สุดเมื่อความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลายมากกว่า 5 มิลลิกรัม/ลิตร ($p < 0.05$) (ตารางที่ 2) จากการทดลองนี้ ทำให้ได้ข้อมูลความเข้มข้นของสังกะสีไปทำการศึกษาประสิทธิภาพการดูดซับสังกะสีของทานตะวันต่อ โดยจะศึกษาที่ความเข้มข้นสูงสุด 1 มิลลิกรัม/ลิตร

2. ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักของทานตะวันที่ปลูกด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมโลหะหนัก

2.1 สารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียม

ทานตะวันสามารถดูดซับแคดเมียมได้ดีที่สุดที่ระดับความเข้มข้น 0.25 และ 0.5 มิลลิกรัม/ลิตร และมีแนวโน้มการดูดซับลดลงเป็นลำดับเมื่อความเข้มข้นของแคดเมียมเพิ่มสูงขึ้น (ตารางที่ 3)

2.2 สารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมสังกะสี

ทานตะวันสามารถดูดซับสังกะสีได้ดีที่สุดที่ระดับความเข้มข้น 1.25 มิลลิกรัม/ลิตร และมีแนวโน้มการดูดซับลดลงเป็นลำดับเมื่อความเข้มข้นของสังกะสีเพิ่มสูงขึ้น (ตารางที่ 4)

3. การเจริญเติบโตของทานตะวันที่ปลูกด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียมและสังกะสีร่วมกัน

ทานตะวันที่ปลูกด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียม 0.1 มิลลิกรัม/ลิตร เมื่อเพิ่มความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลาย (0.2 มิลลิกรัม/ลิตร) ส่งผลให้พืชน้ำหนักและอัตราการเติบโตเพิ่มสูงขึ้น ($p < 0.05$) อย่างไรก็ตามการเพิ่มปริมาณสังกะสีที่สูงขึ้น (0.6 และ 1 มิลลิกรัม/ลิตร) ทำให้การเจริญเติบโตของพืชมีแนวโน้มลดลง ($p > 0.05$) ขณะที่พืชที่ปลูกด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้นมากกว่าหรือเท่ากับ 0.3 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่าการเพิ่มความเข้มข้นสังกะสีในสารละลาย มีแนวโน้มทำให้การเจริญเติบโตของพืชลดลง โดยเฉพาะอย่างยิ่งที่ระดับความเข้มข้นสังกะสี 1 มิลลิกรัม/ลิตร ยับยั้งการเจริญเติบโตของพืช การเพิ่มปริมาณความเข้มข้นแคดเมียมในสารละลายแร่ธาตุที่มีสังกะสี (0.2, 0.6 และ 1 มิลลิกรัม/ลิตร) จะทำให้การเจริญเติบโตของพืชลดลง ($p < 0.05$) (ตารางที่ 5)

4. ประสิทธิภาพการดูดซับโลหะหนักของทานตะวันที่ปลูกด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียมและสังกะสีร่วมกัน

ทานตะวันที่ปลูกในสารละลายที่ทำการเติมแคดเมียมที่ความเข้มข้น 0.1 มิลลิกรัม/ลิตร มีการดูดซับแคดเมียมเพิ่มขึ้นเมื่อเติมสังกะสีที่ระดับความเข้มข้น 0.2 มิลลิกรัม/ลิตร และมีแนวโน้มการดูดซับแคดเมียมลดลงตามลำดับเมื่อความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลายเพิ่มขึ้น ส่วนทานตะวันที่ปลูกด้วยสารละลายซึ่งเติมแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้นมากกว่าหรือเท่ากับ 0.3 มิลลิกรัม/ลิตร มีแนวโน้มการดูดซับแคดเมียมลดลงเมื่อความเข้มข้นของสังกะสีในสารละลายเพิ่มขึ้น (ตารางที่ 6 ก))

การดูดซับสังกะสีของทานตะวันในสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียมและสังกะสีร่วมกันพบว่า เมื่อความเข้มข้นของสังกะสีเพิ่มขึ้น พืชมีแนวโน้มในการดูดซับสังกะสีลดลง ซึ่งเป็นไปในแนวทางเดียวกันในทุกความเข้มข้นของแคดเมียมในสารละลาย ยกเว้นพืชที่ปลูกในสารละลายที่ไม่ได้ทำการเติมแคดเมียม พืชจะดูดซับสังกะสีเพิ่มขึ้นที่ระดับความเข้มข้นสังกะสีในสารละลาย 0.2 มิลลิกรัม/ลิตร (ตารางที่ 6 ข))

ตารางที่ 1 แสดงการเจริญเติบโตของทานตะวันที่ปลูกด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ

(0, 0.25, 0.5, 1 และ 2 มิลลิกรัม/ลิตร) เป็นเวลา 15 วัน

ความเข้มข้นแคดเมียมในสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)	น้ำหนักพืช (กรัม)	อัตราการเติบโต (มิลลิกรัม/วัน)
0	9.797 ± 2.670^{ab}	18.856 ± 4.171^{ab}
0.25	10.590 ± 3.818^{ab}	22.954 ± 8.036^{ab}
0.5	10.760 ± 3.663^a	24.214 ± 6.313^a
1.0	7.340 ± 1.724^{bc}	15.006 ± 2.459^{bc}
2.0	3.708 ± 1.072^c	8.164 ± 2.080^c

หมายเหตุ : อักษรภาษาอังกฤษที่แตกต่างกันในแต่ละสัณภูมิ แสดงค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนและการทดสอบเชิงซ้อนโดยวิธี LSD

ตารางที่ 2 แสดงการเจริญเติบโตของทานตะวันที่ปลูกด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมสังกะสีที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ

(0, 1.25, 2.5, 5 และ 10 มิลลิกรัม/ลิตร) เป็นเวลา 15 วัน

ความเข้มข้นสังกะสีในสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)	น้ำหนักพืช (กรัม)	อัตราการเติบโต (มิลลิกรัม/วัน)
0	9.797 ± 2.670^a	18.856 ± 4.171^a
1.25	8.464 ± 1.272^a	18.840 ± 4.760^a
2.5	4.010 ± 2.744^b	10.199 ± 5.945^a
5.0	d.p.	d.p.
10.0	d.p.	d.p.

หมายเหตุ : 1. d.p. (dead plant) = ต้นไม้ตาย

2. อักษรภาษาอังกฤษที่ต่างกันในแต่ละสดมภ์ แสดงค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนและการทดสอบเชิงซ้อนโดยวิธี LSD

ตารางที่ 3 แสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับแคดเมียมของทานตะวัน ที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ (0, 0.25, 0.5, 1 และ 2 มิลลิกรัม/ลิตร) เป็นเวลา 15 วัน

ความเข้มข้นแคดเมียมในสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)	การดูดซับแคดเมียมของพืช (เปอร์เซ็นต์)
0	0
0.25	81.85
0.5	85.27
1	63.60
2	34.45

ตารางที่ 4 แสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับสังกะสีของทานตะวัน ที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ (0, 1.25, 2.5, 5 และ 10 มิลลิกรัม/ลิตร) เป็นเวลา 15 วัน

ความเข้มข้นสังกะสีในสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)	การดูดซับสังกะสีของพืช (เปอร์เซ็นต์)
0	0
1.25	82.55
2.5	53.93
5	57.08
10	21.44

ตารางที่ 5 แสดงน้ำหนัก (ก) และ อัตราการเจริญเติบโต (ข) ของทานตะวันที่ปลูกด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียมและสังกะสีร่วมกันที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ เป็นเวลา 15 วัน

(ก) น้ำหนักพืช (กรัม)

ความเข้มข้นแคดเมียมใน สารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นสังกะสีในสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)			
	0	0.2	0.6	1
0	6.202 ± 1.542 ^{a,A}	9.238 ± 1.202 ^{a,B}	8.348 ± 1.699 ^{a,AB}	6.330 ± 1.937 ^{a,A}
0.1	6.025 ± 0.963 ^{a,A}	7.795 ± 1.405 ^{ab,B}	7.132 ± 0.935 ^{ab,AB}	3.443 ± 0.557 ^{b,C}
0.3	5.513 ± 1.020 ^{a,A}	5.095 ± 1.636 ^{b,A}	5.050 ± 1.859 ^{b,A}	3.518 ± 1.199 ^{b,A}
0.5	6.203 ± 0.885 ^{a,A}	5.520 ± 3.207 ^{b,A}	5.646 ± 2.430 ^{b,A}	3.193 ± 0.850 ^{b,A}

(ข) อัตราการเติบโต (มิลลิกรัม/วัน)

ความเข้มข้นแคดเมียมใน สารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นสังกะสีในสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)			
	0	0.2	0.6	1
0	37.656 ± 6.914 ^{a,A}	49.425 ± 4.381 ^{a,B}	44.904 ± 7.133 ^{a,AB}	35.137 ± 8.578 ^{a,A}
0.1	32.670 ± 3.727 ^{a,AB}	38.709 ± 5.370 ^{a,B}	34.542 ± 3.290 ^{a,AB}	29.478 ± 3.683 ^{ab,A}

0.3	41.365 ± 5.482 ^{a,A}	37.679 ± 9.544 ^{a,A}	36.462 ± 9.108 ^{a,A}	26.852 ± 7.797 ^{ab,A}
0.5	41.333 ± 4.563 ^{a,A}	35.168 ± 9.113 ^{a,A}	35.522 ± 9.562 ^{a,A}	22.649 ± 5.229 ^{b,A}

หมายเหตุ : 1. อักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแต่ละสมรค์ แสดงค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนและการทดสอบเชิงซ้อนโดยวิธี LSD

2. อักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันในแต่ละแถว แสดงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนและการทดสอบเชิงซ้อนโดยวิธี LSD

ตารางที่ 6 แสดงเปอร์เซ็นต์การดูดซับแคดเมียม (ก) และ สังกะสี (ข) ของทานตะวันที่ปลูกด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียมและสังกะสีร่วมกันที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ เป็นเวลา 15 วัน

(ก) การดูดซับแคดเมียม (%)

ความเข้มข้นแคดเมียมใน สารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นสังกะสีในสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)			
	0	0.2	0.6	1
0	-	-	-	-
0.1	93.71	96.50	90.84	60.56
0.3	51.62	42.96	39.01	37.61
0.5	43.47	38.41	33.10	45.41

(ข) การดูดซับสังกะสี (%)

ความเข้มข้นแคดเมียมใน สารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นสังกะสีในสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)			
	0	0.2	0.6	1
0	91.41	93.37	85.62	51.59
0.1	95.59	86.22	75.18	30.59
0.3	85.16	33.84	19.96	18.29
0.5	84.21	33.81	18.20	30.73

5. การสะสมโลหะหนักในลำต้นและรากของทานตะวันที่ปลูกด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียมและสังกะสีร่วมกัน

ทานตะวันที่ปลูกด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้น 0.1 มิลลิกรัม/ลิตร การเพิ่มความเข้มข้นสังกะสีจะส่งผลให้ ปริมาณแคดเมียมที่สะสมในลำต้นจะเพิ่มสูงขึ้น ($p < 0.05$) ขณะที่พืชที่ปลูกด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้นมากกว่าหรือเท่ากับ 0.3 มิลลิกรัม/ลิตร การเติมสังกะสีที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ ไม่ได้ช่วยเพิ่มการสะสมแคดเมียมในส่วนลำต้นของพืช ($p > 0.05$) (ตารางที่ 7 (ก)) การเพิ่มความเข้มข้นแคดเมียมในสารละลายที่มีสังกะสีความเข้มข้น 0, 0.2, 0.6 และ 1 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่าพืชมีการสะสมแคดเมียมในส่วนลำต้นและรากเพิ่มสูงขึ้น ตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่เพิ่มสูงขึ้น (ตารางที่ 7) และเมื่อดูภาพรวมการสะสมจะพบว่าการสะสมของแคดเมียมในทานตะวันนั้นมีการสะสมที่รากมากกว่าที่ลำต้น

ในส่วนปริมาณสังกะสีในลำต้นและรากของทานตะวันที่ปลูกด้วยสารละลายที่มีแคดเมียมและสังกะสีอยู่ร่วมกัน แสดงดังตารางที่ 8 พบว่าปริมาณสังกะสีในลำต้นของพืชลดลงตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่เพิ่มสูงขึ้น ($p < 0.05$) ขณะที่ปริมาณสังกะสีในส่วนรากไม่มีการเปลี่ยนแปลงตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่เพิ่มสูงขึ้น ($p > 0.05$) การเพิ่มความเข้มข้นสังกะสีในสารละลายแร่ธาตุที่มีแคดเมียมความเข้มข้น (0, 0.1, 0.3 และ 0.5 มิลลิกรัม/ลิตร) พบว่าพืชมีการสะสมสังกะสีในส่วนลำต้นและรากเพิ่มสูงขึ้น ตามระดับความเข้มข้นของสังกะสีที่เพิ่มสูงขึ้น

ตารางที่ 7 แสดงปริมาณแคดเมียมในลำต้น (ก) และราก (ข) ของทานตะวันที่ปลูกด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียมและสังกะสีร่วมกันที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ เป็นเวลา 15 วัน

(ก) ปริมาณแคดเมียมในลำต้น (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)

ความเข้มข้นแคดเมียมใน สารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นสังกะสีในสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)			
	0	0.2	0.6	1
0	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000
0.1	21.286 ± 5.356 ^{a,A}	29.976 ± 10.918 ^{a,AB}	30.044 ± 7.027 ^{a,AB}	33.289 ± 7.850 ^{a,B}
0.3	106.929 ± 8.679 ^{b,A}	102.114 ± 16.682 ^{b,A}	117.021 ± 15.865 ^{b,A}	105.458 ± 9.144 ^{b,A}
0.5	179.702 ± 33.179 ^{c,A}	154.120 ± 23.292 ^{c,A}	152.269 ± 11.437 ^{c,A}	160.619 ± 17.828 ^{c,A}

(ข) ปริมาณแคดเมียมในราก (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)

ความเข้มข้น แคดเมียมใน สารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นสังกะสีในสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)			
	0	0.2	0.6	1
0	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000	0.000 ± 0.000
0.1	234.433 ± 103.335 ^{a,A}	216.886 ± 86.746 ^{a,A}	173.519 ± 70.739 ^{a,A}	135.706 ± 88.988 ^{a,A}
0.3	450.250 ± 56.824 ^{b,A}	278.474 ± 80.443 ^{a,BC}	266.955 ± 111.372 ^{a,B}	418.160 ± 126.043 ^{b,AC}
0.5	600.420 ± 158.630 ^{b,A}	492.776 ± 74.864 ^{b,A}	485.191 ± 111.204 ^{b,A}	597.356 ± 76.344 ^{c,A}

หมายเหตุ : 1. อักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่แตกต่างกันในแต่ละสมรค์ แสดงค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ด้วยการใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนและการทดสอบเชิงซ้อนโดยวิธี LSD

2. อักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์ใหญ่ที่แตกต่างกันในแต่ละแถว แสดงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ด้วยการใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนและการทดสอบเชิงซ้อนโดยวิธี LSD

ตารางที่ 8 แสดงปริมาณสังกะสีในลำต้น (ก) และราก (ข) ของทานตะวันที่ปลูกด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียมและสังกะสีร่วมกันที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ เป็นเวลา 15 วัน

(ก) ปริมาณสังกะสีในลำต้น (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)

ความเข้มข้น แคดเมียมใน สารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นสังกะสีในสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)			
	0	0.2	0.6	1
0	77.768 ± 6.971 ^{a,A}	204.628 ± 29.114 ^{a,B}	429.880 ± 48.300 ^{a,C}	407.867 ± 66.420 ^{a,C}
0.1	61.972 ± 5.291 ^{b,A}	205.018 ± 37.606 ^{a,B}	326.053 ± 89.245 ^{b,C}	360.858 ± 56.005 ^{ab,C}
0.3	67.796 ± 11.701 ^{ab,A}	122.870 ± 16.236 ^{b,B}	254.145 ± 31.233 ^{bc,C}	325.476 ± 30.346 ^{b,D}
0.5	60.684 ± 12.094 ^{b,A}	121.359 ± 14.584 ^{b,B}	226.064 ± 4.788 ^{c,C}	339.128 ± 43.119 ^{ab,D}

(ข) ปริมาณสังกะสีในราก (มิลลิกรัม/กิโลกรัม)

ความเข้มข้น แคดเมียมใน สารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นสังกะสีในสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)			
	0	0.2	0.6	1
0	52.231 ± 28.843 ^{a,A}	207.673 ± 38.537 ^{a,B}	450.085 ± 149.657 ^{a,C}	621.003 ± 123.065 ^{a,D}
0.1	56.285 ± 18.196 ^{a,A}	193.091 ± 51.697 ^{a,B}	516.659 ± 47.494 ^{a,C}	607.624 ± 48.440 ^{a,D}
0.3	64.511 ± 26.309 ^{a,A}	155.093 ± 38.014 ^{a,B}	338.444 ± 36.907 ^{b,C}	600.636 ± 115.218 ^{a,D}
0.5	72.712 ± 17.168 ^{a,A}	202.803 ± 31.539 ^{a,B}	391.493 ± 37.617 ^{a,C}	674.550 ± 74.340 ^{a,D}

- หมายเหตุ : 1. อักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์เล็กที่ต่างกันในแต่ละสมการ แสดงค่าเฉลี่ยที่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนและการทดสอบเชิงซ้อนโดยวิธี LSD
2. อักษรภาษาอังกฤษตัวพิมพ์ใหญ่ที่ต่างกันในแต่ละแถว แสดงมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวนและการทดสอบเชิงซ้อนโดยวิธี LSD

6. อัตราส่วนความเข้มข้นโลหะหนักส่วนลำต้นและรากของทานตะวันที่ปลูกด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียมและสังกะสีร่วมกัน

ทานตะวันที่ปลูกด้วยสารละลายที่เติมแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้น 0.1 มิลลิกรัม/ลิตร เมื่อระดับความเข้มข้นสังกะสีในสารละลายเพิ่มขึ้น (0.2, 0.6 และ 1 มิลลิกรัม/ลิตร) อัตราส่วนความเข้มข้นของแคดเมียมส่วนลำต้นและรากเพิ่มสูงขึ้น ขณะที่พืชที่ปลูกด้วยสารละลายที่เติมแคดเมียมที่ระดับความเข้มข้น 0.3 และ 0.5 มิลลิกรัม/ลิตร เมื่อเติมสังกะสีที่ระดับความเข้มข้น 0.2 และ 0.6 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่ามีอัตราส่วนความเข้มข้นของแคดเมียมส่วนลำต้นและรากเพิ่มสูงขึ้น แต่เมื่อเพิ่มระดับความเข้มข้นของสังกะสีเป็น 1 มิลลิกรัม/ลิตร กลับพบว่าอัตราส่วนความเข้มข้นของแคดเมียมส่วนลำต้นและรากลดลง (ตารางที่ 9 ก))

อัตราส่วนความเข้มข้นของสังกะสีส่วนลำต้นและรากของทานตะวันที่ปลูกด้วยสารละลายที่มีแคดเมียมและสังกะสีอยู่ร่วมกัน แสดงดังตารางที่ 9 ข) พืชที่ปลูกด้วยสารละลายที่ไม่ได้เติมแคดเมียมแต่เติมสังกะสีที่ระดับความเข้มข้น 0.2, 0.6 และ 1 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่ามีอัตราส่วนความเข้มข้นของสังกะสีส่วนลำต้นและรากลดลงตามความเข้มข้นของสังกะสีที่เพิ่มสูงขึ้น และเมื่อทำการเพิ่มระดับความเข้มข้นของแคดเมียมเป็น 0.1, 0.3 และ 0.5 มิลลิกรัม/ลิตร พบว่า อัตราส่วนความเข้มข้นของสังกะสีส่วนลำต้นและรากของพืชลดลงตามระดับความเข้มข้นของแคดเมียมที่เพิ่มสูงขึ้น

ตารางที่ 9 อัตราส่วนความเข้มข้นโลหะหนักส่วนลำต้นและราก (Translocation Factor; TF) สำหรับแคดเมียม (ก) และ สังกะสี (ข) ของทานตะวันที่ปลูกด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียมและสังกะสีร่วมกันที่ระดับความเข้มข้นต่าง ๆ เป็นเวลา 15 วัน

(ก) อัตราส่วนความเข้มข้นแคดเมียม

ความเข้มข้นแคดเมียมใน สารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นสังกะสีในสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)			
	0	0.2	0.6	1
0	-	-	-	-
0.1	0.091	0.138	0.173	0.245
0.3	0.237	0.367	0.438	0.252
0.5	0.299	0.313	0.314	0.269

(ข) อัตราส่วนความเข้มข้นสังกะสี

ความเข้มข้นแคดเมียมใน สารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)	ความเข้มข้นสังกะสีในสารละลาย (มิลลิกรัม/ลิตร)			
	0	0.2	0.6	1
0	1.489	0.985	0.955	0.657
0.1	1.101	1.062	0.631	0.594
0.3	1.050	0.792	0.751	0.542
0.5	0.835	0.598	0.577	0.503

การอภิปรายผล

1. การเจริญเติบโตและการดูดซับแคดเมียมของทานตะวันที่ถูกด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียม

ทานตะวันที่ถูกปลูกด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียม ที่ระดับความเข้มข้นไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัม/ลิตร มีการเจริญเติบโตไม่แตกต่างจากพืชที่ไม่ได้รับแคดเมียม นอกจากนั้นยังสามารถดูดซับแคดเมียมได้ดีโดยไม่แสดงอาการเป็นพิษ การที่พืชสามารถเจริญเติบโตได้ดีในสภาวะที่มีแคดเมียมต่ำ อาจเนื่องมาจากเซลล์พืชมีกลไกลดความเป็นพิษของแคดเมียม จึงทำให้กระบวนการทางสรีรวิทยาที่สำคัญของพืชสามารถทำงานได้อย่างปกติ แม้ว่าธาตุแคดเมียมจะเป็นธาตุที่ไม่มีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืช (Non-essential element) แต่ถ้ามีอยู่ในปริมาณต่ำ พืชจะสามารถดูดซับและมีกลไกเก็บสะสมเพื่อลดความเป็นพิษของโลหะหนักต่อเซลล์ จึงทำให้พืชเจริญเติบโตได้อย่างปกติ อย่างไรก็ตามปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมที่สูงเกินไปจะส่งผลให้เกิดความเป็นพิษต่อพืช ทำให้การเจริญเติบโตของพืชลดลงและอาจทำให้พืชตายได้ (Jadia and Fulekar, 2009) ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่า เมื่อระดับความเข้มข้นของแคดเมียมในสารละลายเพิ่มสูงขึ้นเกินกว่า 0.5 มิลลิกรัม/ลิตร การเจริญเติบโตและความสามารถในการดูดซับแคดเมียมลดลง อาจเกิดเนื่องมาจากการเพิ่มความเข้มข้นแคดเมียมในสารละลาย ทำให้พืชดูดซับแคดเมียมเพิ่มมากขึ้น การดูดซับแคดเมียมเพิ่มมากขึ้น ทำให้พืชต้องใช้พลังงานไปกับกระบวนการเก็บสะสมแคดเมียม เพื่อลดความเป็นพิษต่อเซลล์ (Baker, 1981) จึงทำให้การเจริญเติบโตของพืชลดลง นอกจากนั้นการดูดซับแคดเมียมที่มากขึ้นจนเกินความสามารถของกระบวนการลดความเป็นพิษของเซลล์พืช แคดเมียมอาจรบกวนการทำงานของเอนไซม์ต่าง ๆ ภายในเซลล์ จนทำให้กระบวนการทำงานต่าง ๆ ของเซลล์ผิดปกติไป และอาจก่อให้เกิดการเปลี่ยนแปลงสัณฐานวิทยาของรากพืช จึงทำให้กระบวนการดูดซับน้ำและแร่ธาตุต่าง ๆ ของพืชได้รับผลกระทบ การศึกษาของ Pandey and Sharma (2002) แสดงให้เห็นว่า แคดเมียมที่ระดับความเข้มข้นสูง (500 μM) เป็นพิษต่อกะหล่ำปลี โดยแคดเมียมรบกวนการดูดซับธาตุเหล็ก ส่งผลให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ (Chlorophyll) ในใบพืชลดลง ก่อให้เกิดอาการเหลืองซีด (Chlorosis) และทำให้ขอบใบเกิดสีม่วง นอกจากนี้การลำเลียงน้ำและอัตราการคายน้ำของพืชลดลง ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าทานตะวันสามารถเจริญเติบโตได้อย่างปกติ และสามารถดูดซับแคดเมียมได้ หากถูกปลูกบนสารละลายที่มีแคดเมียมระดับความเข้มข้นไม่เกิน 0.5 มิลลิกรัม/ลิตร

2. การเจริญเติบโตและการดูดซับสังกะสีของทานตะวันที่ถูกด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมสังกะสี

ทานตะวันที่ถูกปลูกด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมสังกะสี ที่ระดับความเข้มข้นไม่เกิน 1.25 มิลลิกรัม/ลิตร มีการเจริญเติบโตไม่แตกต่างจากพืชที่ถูกเลี้ยงในสารละลายแร่ธาตุซึ่งไม่เติมสังกะสี สังกะสีเป็นธาตุอาหารรองสำหรับพืช พืชต้องการสังกะสีในปริมาณที่เหมาะสม การได้รับสังกะสีในปริมาณน้อยเกินไปจะทำให้การเจริญเติบโตของพืชผิดปกติ ในทางกลับกันการได้รับสังกะสีมากเกินไปจะก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อพืชได้ Coleman (1992) พบว่าสังกะสีมีบทบาทเกี่ยวข้องกับกระบวนการเมแทบอลิซึมของสารพันธุกรรม (DNA และ RNA) การสังเคราะห์โปรตีน การแบ่งเซลล์ การเพิ่มปริมาณดีเอ็นเอ (DNA replication) การถอดรหัสพันธุกรรม (Transcription) และบทบาทในการกระตุ้นการทำงานของยีน เนื่องจากเป็น Transcription factor และอาจสามารถกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ได้หลายชนิด โดยทำหน้าที่เป็น Cofactor ดังนั้นสังกะสีในปริมาณที่เหมาะสมจะส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช ในการศึกษาครั้งนี้พบว่าหากเพิ่มความเข้มข้นสังกะสีในสารละลายมากกว่า 1.25 มิลลิกรัม/ลิตร พืชจะมีการเจริญเติบโตและการดูดซับสังกะสีลดลง แสดงให้เห็นว่าปริมาณความเข้มข้นสังกะสีในสารละลายเกินความต้องการที่พืชจะนำไปใช้ประโยชน์ และก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อพืช สังกะสีที่เกินความต้องการของพืช พืชจะต้องมีกลไกในการเก็บสะสมเพื่อลดความเป็นพิษของสังกะสี ซึ่งพืชต้องใช้พลังงานส่วนหนึ่งไปกับกระบวนการลดความเป็นพิษ (Baker, 1981) การศึกษาของ ยงยุทธ (2546) แสดงให้เห็นว่าพืชที่ได้รับสังกะสีในปริมาณมากเกินไปจะนำไปใช้ประโยชน์ได้ สังกะสีจะก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อพืช เช่น ทำให้รากพืชหยุดการเจริญเติบโต อัตราการดูดซับน้ำลดน้อยลง จึงส่งผลให้การดูดซับแร่ธาตุที่มีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโตของพืชลดลงด้วย ผลการศึกษานี้แสดงให้เห็น

เห็นว่าทานตะวันสามารถเจริญเติบโตได้อย่างปกติ และสามารถดูดซับสังกะสีได้ หากถูกปลูกบนสารละลายที่มีสังกะสีระดับความเข้มข้นไม่เกิน 1.25 มิลลิกรัม/ลิตร

3. การเจริญเติบโต และการสะสมแคดเมียมและสังกะสีของทานตะวันที่ถูกด้วยสารละลายแร่ธาตุซึ่งเติมแคดเมียมและสังกะสีร่วมกัน

ทานตะวันที่ถูกปลูกบนสารละลายแร่ธาตุที่ไม่เติมแคดเมียม การเพิ่มความเข้มข้นของสังกะสี (0.2 และ 0.6 มิลลิกรัม/ลิตร) ส่งผลให้การเจริญเติบโตของพืชเพิ่มมากขึ้น อาจเนื่องมาจากสังกะสีในระดับความเข้มข้นดังกล่าว เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช พืชสามารถนำไปใช้ประโยชน์ได้ เนื่องมาจากสังกะสีเป็นธาตุที่มีความจำเป็นต่อการสร้างคลอโรฟิลล์ในใบของพืช และยังช่วยให้กระบวนการสังเคราะห์แสงของพืชทำงานได้อย่างปกติ ส่งเสริมการดูดซึมน้ำและแร่ธาตุอาหารของพืช (Zekri and Obreza, 2003) นอกจากนี้ในระดับเซลล์ สังกะสีมีบทบาทเกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์สารพันธุกรรม โปรตีน และกระตุ้นการทำงานของเอนไซม์ต่าง ๆ ภายในเซลล์ (Coleman, 1992) อย่างไรก็ตามการเพิ่มสังกะสีในสารละลายสูงถึง 1 มิลลิกรัม/ลิตร ไม่ส่งผลให้การเจริญเติบโตของพืชเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าธาตุที่มีความจำเป็นต่อสิ่งมีชีวิต (Essential element) ถ้าได้รับในปริมาณที่เหมาะสมจะช่วยกระตุ้นการเจริญเติบโตของพืช แต่ถ้าได้รับในปริมาณที่มากเกินไปความจำเป็นในการนำไปใช้ประโยชน์ก็จะส่งผลความเป็นพิษต่อพืชได้ (Jadia and Fulekar, 2009)

จากการทดลองครั้งนี้พบว่าปริมาณสังกะสีที่ระดับความเข้มข้น 0.2 และ 0.6 มิลลิกรัม/ลิตร นอกจากจะช่วยการเจริญเติบโตของทานตะวันให้เพิ่มสูงขึ้นแล้ว ยังช่วยเพิ่มประสิทธิภาพการดูดซับแคดเมียมของทานตะวันที่ถูกปลูกบนสารละลายที่เติมแคดเมียมระดับความเข้มข้น 0.1 มิลลิกรัม/ลิตร และทำให้พืชสะสมแคดเมียมในส่วนลำต้นเพิ่มสูงขึ้นด้วย แสดงให้เห็นว่าการเจริญเติบโตที่เพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการได้รับสังกะสีในปริมาณที่เหมาะสม ทำให้พืชมีความแข็งแรงและสามารถดูดซับแคดเมียมได้สูงขึ้นด้วย มีรายงานการวิจัยที่แสดงให้เห็นว่าสังกะสีในปริมาณที่เหมาะสมช่วยเพิ่มการดูดซับแคดเมียมของข้าวสาลี (Reinhold, 1976) ต้นถั่ว และข้าวฟ่างญี่ปุ่น (Francis and Rush, 1973) อย่างไรก็ตามการศึกษาในต้นมะเขือเทศ พบว่าการเพิ่มสังกะสีในสารละลายที่มีแคดเมียมอยู่ด้วย ไม่ได้ช่วยการดูดซับแคดเมียมไปสะสมในส่วนลำต้นเพิ่มขึ้น แสดงให้เห็นว่าความสามารถในการดูดซับโลหะหนักไปสะสมยังส่วนลำต้นของพืชนั้น ขึ้นอยู่กับชนิดพันธุ์พืชที่นำมาใช้ในการศึกษา อาจเนื่องมาจากพันธุกรรมของพืชแต่ละชนิดมีความแตกต่างกัน จึงทำให้กระบวนการดูดซับ หรือการลดความเป็นพิษของโลหะหนักมีความแตกต่างกัน (Newman et al., 1997)

การศึกษานี้พบว่า การเพิ่มระดับความเข้มข้นแคดเมียมในสารละลายที่มีสังกะสีระดับความเข้มข้น 0, 0.2, 0.6 และ 1 มิลลิกรัม/ลิตร ส่งผลให้ทานตะวันดูดซับและลำเลียงสังกะสีไปสะสมในส่วนลำต้นได้น้อยลง แสดงให้เห็นว่าการดูดซับแคดเมียมรบกวนการดูดซับและการสะสมสังกะสีในพืช มีรายงานการวิจัยที่แสดงให้เห็นว่าแคดเมียมรบกวนการดูดซับสังกะสีของพืช เช่น Root et al. (1975) ที่พบว่าปริมาณสังกะสีในข้าวโพดลดน้อยลงเมื่อปริมาณแคดเมียมในสารละลายเพิ่มขึ้น Hawf and Schmid (1967) พบว่าแคดเมียมสามารถยับยั้งการดูดซับสังกะสีในพืชวงศ์ถั่ว อย่างไรก็ตาม Kim and Mooto (1978) แสดงให้เห็นว่าการเพิ่มแคดเมียมกลับช่วยเพิ่มการดูดซับสังกะสีในมะเขือเทศ ดังนั้นการดูดซับและการลำเลียงแคดเมียมและสังกะสีในพืชอาจมีทั้งส่งเสริมและแข่งขัน (Kim and Motto, 1978; Smith and Brennan, 1983) โดยขึ้นอยู่กับชนิดพันธุ์ของพืช เพราะพืชแต่ละชนิดมีความสามารถในการเลือกดูดซับและลำเลียงแร่ธาตุที่แตกต่างกัน (Newman et al., 1997)

แคดเมียมมีการสะสมในส่วนรากพืชในปริมาณสูง เนื่องมาจากโลหะหนักที่ลำเลียงผ่านเส้นทางอะพอพลาส (Apoplastic pathway) ซึ่งเป็นเส้นทางการลำเลียงผ่านผนังเซลล์และช่องว่างระหว่างเซลล์ โลหะหนักซึ่งมีประจุบวกจะจับกับประจุลบที่อยู่ในช่องว่างระหว่างเซลล์ และลดการเคลื่อนที่ของโลหะหนักไปสู่ท่อลำเลียงน้ำ (Xylem) นอกจากนี้ในชั้นเอนโดเดอร์มิส (Endodermis) ซึ่งมีแคสพาเรียน สตรีป (Casparian strip) ซึ่งเป็นชั้นที่สารละลายไม่สามารถผ่านได้ ยังขัดขวางการเคลื่อนที่ของโลหะหนักไปยังท่อลำเลียงน้ำอีกด้วย ดังนั้นการลำเลียงโลหะหนักในรากพืชผ่านเส้นทางอะพอพลาสไปยังท่อลำเลียงน้ำ

เพื่อลำเลียงต่อไปยังลำต้น จะเกิดขึ้นได้ดีในรากอ่อนที่ชั้นเอ็นโดเดอร์มิสยังมีการพัฒนาไม่สมบูรณ์ Jadia and Fulekar (2008) พบว่าการลำเลียงแคดเมียมในต้นทานตะวันจะถูกลำเลียงผ่านทางช่องว่างระหว่างเซลล์หรือเส้นทางอะพลาสต (Apoplastic pathway) มากกว่าการลำเลียงผ่านเข้าภายในเซลล์ (Symplastic pathway) จึงทำให้แคดเมียมซึ่งมีประจุบวกส่วนใหญ่ถูกจับกับโครงสร้างผนังเซลล์ที่มีประจุลบ เช่น เซลลูโลส (Cellulose), เฮมิเซลลูโลส (Hemicellulose) หรือไกลโคโปรตีน (Glycoprotein) จึงทำให้มีความเป็นไปได้ว่า พืชจะมีการสะสมแคดเมียมในส่วนรากมากกว่าในส่วนลำต้น และการลำเลียงโลหะหนักส่วนมาก โดยเฉพาะโลหะที่ไม่มีความจำเป็นต่อการเจริญเติบโต จะใช้เส้นทางการลำเลียงแบบอะพลาสต (Harborne, 1989; Robinson et al., 1994)

ทานตะวันที่นำมาใช้ในการศึกษาครั้งนี้ มีความสามารถในการลำเลียงและสะสมโลหะหนักแคดเมียมในส่วนลำต้นได้มากกว่า 100 มิลลิกรัม/กิโลกรัม มวลแห้ง ซึ่งเป็นเกณฑ์ที่ใช้ในการจัดกลุ่มพืชว่าเป็นพืชดูดซับแคดเมียมปริมาณสูง (Baker, 1981) โดยที่พืชไม่แสดงอาการเป็นพิษใด ๆ จึงจัดได้ว่าทานตะวันเป็นพืชที่สามารถดูดซับแคดเมียมในปริมาณสูง

บทสรุป

การเจริญเติบโตของทานตะวันในสารละลายแคดเมียมความเข้มข้น 0.1 มิลลิกรัม/ลิตร จะเพิ่มขึ้น เมื่อปริมาณสังกะสีในสารละลายมีความเข้มข้น 0.2 และ 0.6 มิลลิกรัม/ลิตร ขณะที่ถ้าเพิ่มปริมาณสังกะสีในสารละลายที่ระดับความเข้มข้น 1 มิลลิกรัม/ลิตร พืชจะมีการเติบโตลดลง แสดงให้เห็นว่าเป็นสังกะสีปริมาณที่สูงเกินไปอาจก่อให้เกิดความเป็นพิษต่อพืชได้ แต่การเพิ่มปริมาณสังกะสีที่ระดับความเข้มข้น 0.2 และ 0.6 มิลลิกรัม/ลิตร สังกะสีจะช่วยให้พืชเจริญเติบโตได้ดีขึ้น การที่พืชเจริญเติบโตได้ดีขึ้น พืชจะสามารถดูดซับและสะสมแคดเมียมในส่วนลำต้นได้มากขึ้น ในขณะที่ในสารละลายที่มีสังกะสีทุกความเข้มข้น (0.2, 0.6 และ 1 มิลลิกรัม/ลิตร) เมื่อปริมาณความเข้มข้นของแคดเมียมในสารละลายเพิ่มสูงขึ้น การดูดซับสังกะสีลดน้อยลงตามลำดับ ไม่เพียงการดูดซับลดลงเท่านั้นการเจริญเติบโตของพืชยังลดลงด้วย จากการศึกษาวิจัยในครั้งนี้พบว่า ทานตะวันมีการสะสมแคดเมียมในส่วนลำต้นได้มากกว่า 100 มิลลิกรัม/ลิตร จึงจัดว่าทานตะวันเป็นพืชดูดซับแคดเมียมปริมาณสูง

เอกสารอ้างอิง

- กรมควบคุมมลพิษ. (2556). จดหมายข่าว ฟันฟูลิตี ปีที่ 1 ฉบับที่ 1. ค้นเมื่อ 29 พฤษภาคม 2565.
<https://www.pcd.go.th/publication/6426/>.
- ยงยุทธ โอสดสภา. (2546). ธาตุอาหารพืช. (พิมพ์ครั้งที่ 2). สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์: กรุงเทพมหานคร.
- Abdel-Halim S.H., Shehata A.M.A. and El-Shahat M.F. (2003). Removal of lead ions from industrial waste by different type of natural materials. *Water Research*. 37: 1678–1683.
- Adesodun J., Atayese M., Agbaje T., Osadiaye B., Mafe O. and Soretire A. (2010). Phytoremediation potentials of sunflowers (*Tithonia diversifolia* and *Helianthus annuus*) for metals in soils contaminated with zinc and lead nitrates. *Water Air & Soil Pollution*. 207: 195–201.
- Ahalya N., Ramachandra T.V. and Kanamadi R.D. (2003). Biosorption of heavy metals. *Research Journal of Chemistry and Environment*. 7(4): 71–79.
- Ali H., Khan E. and Sajad M.A. (2013). Phytoremediation of heavy metals – Concepts and applications. *Chemosphere*. 91: 869 – 881.

- Baker A.J.M. (1981). Accumulators and excluders-strategies in the response of plants to heavy metals. *Journal of Plant Nutrition*. 3: 1–4.
- Chantachon S., Krutrachue M. and Pokethitiyooketa P. (2004). Phytoextraction and accumulation of lead from contaminated soil by Vetiver grass: laboratory and simulated field study. *Water Air & Soil Pollution*. 154: 37–55.
- Chintakovid W., Visootviseth P., Khokiattiwong S. and Lauengsuchonkul S. (2008). Potential of the hybrid marigolds for arsenic phytoremediation and income generation of remediators in Ron Phibun District, Thailand. *Chemosphere*. 70: 1532-1537.
- Coleman J.E. (1992). Zinc proteins: enzymes, storage proteins, transcription factors and replication proteins. *Annual Review of Biochemistry*. 61: 897–946.
- Francis C.W. and Rush S.G. (1973). Factors affecting uptake and distribution of cadmium in plants. In Hemphill D.D., Editor. *Trace substances in environmental health*. University of Missouri Press: Columbia. 75–81.
- Harborne J.B. (1989). *Introduction to ecological biochemistry*. Academic Press: New York.
- Hawf L.R. and Schmid W.E. (1967). Uptake and translocation of zinc by intact plants. *Plant and Soil*. 2: 249–260.
- Hunt R. (2003). Growth analysis, individual plants. In Thomas B., Murphy D.J. and Murray D., Editors. *Encyclopaedia of applied plant science*. Academic Press: London. 579–588.
- Jadia C.D. and Fulekar M.H. (2008). Phytoremediation: the application of vermicompost to remove zinc, cadmium, copper, nickel and lead by sunflower plant. *Environmental Engineering and Management Journal*. 7(5): 547–558.
- Jadia C.D. and Fulekar M.H. (2009). Phytoremediation of heavy metals: recent techniques. *African Journal of Biotechnology*. 8(6): 921–928.
- Kim M.J. and Motto H.L. (1978). Effects of zinc, phosphorus and iron on the cadmium uptake and accumulation by hydroponically grown tomato. *Journal of the Korean Agricultural Chemical Society*. 21(1): 40–50.
- Kötschau A., Büchel G., Einax J.W., Tümping W.V. and Merten D. (2014). Sunflower (*Helianthus annuus*): phytoextraction capacity for heavy metals on a mining-influenced area in Thuringia, Germany. *Environmental Earth Science*. 72: 2023-2031.
- La-up A., Mahasakpan P. and Saengow U. (2021). The current status of osteoporosis after 15 years of reduced cadmium exposure among residents living in cadmium-contaminated areas in northwestern Thailand. *Environmental Science and Pollution Research*. 28: 20121–20127.
- Mattina M.J.I., Lannucci-Berger W., Musante C. and White J.C. (2003). Concurrent plant uptake of heavy metals and persistent organic pollutants from soil. *Environmental Pollution*. 124: 375–378.
- Newman L.A., Strand S.E., Choe N., Duffy J., Ekuon G., Ruszaj M., Shurtleff B.B., Wilmoth J., Heliman P. and Gordon M.P. (1997). Uptake and biotransformation of trichloroethylene by hybrid poplars. *Environmental Science & Tehnology*. 31(4): 1062–1067.

- Pandey N. and Sharma C.P. (2002). Effect of heavy metals Co, Ni and Cd on growth and metabolism of cabbage. *Plant Science*. 163: 753–758.
- Phaenark C., Pokethitiyook P., Kruatrachue M. and Ngernsansaruay C. (2009). Cd and Zn accumulation in plants from the Padaeng Zn mine area. *International Journal of Phytoremediation*. 11: 479–495.
- Reinhold J.G., Faradji B., Abadi P. and Ismail-Beigi F. (1976). Decreased absorption of calcium, magnesium, zinc and phosphorus by humans due to increased fiber and phosphorus consumption as wheat bread. *The Journal of Nutrition*. 106(4): 493–503.
- Robinson N.J., Urwin P.E., Robinson P.J. and Jackson P.J. (1994). Gene expression in relation to metal toxicity and tolerance. Harwood Academic Publisher: New York.
- Root R.A., Miller R.J. and Koeppel D.E. (1975). Uptake of cadmium-its toxicity, and effect on the iron ratio in hydroponically grown corn. *Journal of Environmental Quality*. 4(4): 473–476.
- Rotkittikhun P., Chaiyarat R., Kruatrachue M., Pokethitiyook P. and Baker A.J.M. (2007). Growth and lead accumulation by the grasses *Vetiveria zizanioides* and *Thysanolaena maxima* in lead-contaminated soil amended with pig manure and fertilizer: A glasshouse study. *Chemosphere*. 66: 45–53.
- Rotkittikhun P., Kruatrachue M., Chaiyarat R., Ngernsansaruay C., Pokethitiyook P., Pajitprapaporn A. and Baker A.J.M. (2006). Uptake and accumulation of lead by plants from the Bo Ngam lead mine area in Thailand. *Environmental Pollution*. 144: 681–688.
- Shaheen S.M. and Rinklebe J. (2015). Phytoextraction of potentially toxic elements by Indian mustard, rapeseed, and sunflower from a contaminated riparian soil. *Environmental Geochemistry and Health*. 37: 953–967.
- Simmons R.W., Pongsakul P., Saiyasitpanich D. and Klinphoklap S. (2005). Elevated levels of cadmium and zinc in paddy soils and elevated levels of cadmium in rice grain downstream of a zinc mineralized area in Thailand: Implications for public health. *Environmental Geochemistry and Health*. 27: 501–511.
- Smith G.C. and Brennan E. (1983). Cadmium–zinc interrelationships in tomato plants. *Phytopathology*. 73: 879–882.
- Visoottiviseth P., Francesconi K. and Sridokchan W. (2002). The potential of Thai indigenous plant species for the phytoremediation of arsenic contaminated land. *Environmental Pollution*. 118(3): 453–461.
- Waranusantigul P., Kruatrachue M., Pokethitiyook P. and Auesukaree C. (2008). Evaluation of Pb phytoremediation potential in *Buddleja asiatica* and *B. paniculata*. *Water Air & Soil Pollution*. 193: 79–90.
- Zekri M. and Obreza T.A. (2003). Micronutrient deficiencies in citrus: iron, zinc, and manganese. University of florida: Florida.

Received: July 9, 2022; Revised: August 2, 2022; Accepted: August 9, 2022

ความหลากหลายของตัวอ่อนแมลงปอในลำธารและแม่น้ำบางพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทย Diversity of dragonfly larvae in some parts of northern Thailand

ชฎยาธร พัฒนรักษ์¹ และบุญเสฐียร บุญสูง^{1*}Chatayathon Phattanak¹ and Boonsatien Boonsoong^{1*}¹คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตบางเขน จังหวัดกรุงเทพมหานคร

*Corresponding Author E-mail Address : fscibt@ku.ac.th

บทคัดย่อ

ศึกษาความหลากหลายของตัวอ่อนแมลงปอ (อันดับ Odonata อันดับย่อย Anisoptera) ในลำธารและแม่น้ำพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ น่าน และเชียงราย ทั้งหมด 18 สถานี ระหว่างเดือนตุลาคม 2563 ถึง มีนาคม 2564 เก็บตัวอย่างตัวอ่อนด้วยสวิงนำมาเลี้ยงเชื่อมโยงในห้องปฏิบัติการ ตัวอ่อนแมลงปอที่ไม่สามารถจำแนกชนิดได้ถูกระบุชนิดด้วยวิธีการดีเอ็นเอบาร์โค้ดด้วยยีน COI พบตัวอ่อนแมลงปอทั้งสิ้น 291 ตัว จำแนกได้ 5 วงศ์ 17 สกุล 23 ชนิด ได้แก่ วงศ์ Aeshnidae วงศ์ Gomphidae วงศ์ Libellulidae วงศ์ Macromiidae และวงศ์ Synthemistidae ตัวอ่อนแมลงปอวงศ์ Gomphidae (13 ชนิด) มีความหลากหลายมากที่สุด รองลงมาคือ วงศ์ Libellulidae และวงศ์ Aeshnidae ตามลำดับ สามารถเลี้ยงเชื่อมโยงตัวอ่อนและตัวเต็มวัยได้ 3 ชนิด คือ *Idionyx selysi* *Paragomphus capricornis* และ *Tetracanthagyna plagiata* เมื่อเปรียบเทียบความคล้ายคลึงของยีน COI กับฐานข้อมูล GenBank และ BOLD ยืนยันได้ 3 ชนิด คือ *Heliogomphus selysi* *Pantala flvescens* และ *Trithemis festiva* ผลการวิเคราะห์การจัดอันดับด้วย PCA พบว่า การกระจายตัวของตัวอ่อนแมลงปอมีความสัมพันธ์กับพื้นที่แต่ละจังหวัดโดยตัวอ่อนแมลงปอ *Megalogomphus* sp. *Stylogomphus* sp. และ *Idionyx* sp. มีความสัมพันธ์กับพื้นที่จังหวัดเชียงราย สถานีพื้นที่ไม่ถูกรบกวนและสถานีลำธารต้นน้ำพบการกระจายตัวของตัวอ่อนแมลงปอมากกว่าสถานีพื้นที่ถูกรบกวนและสถานีแม่น้ำต้น

คำสำคัญ: ความหลากหลายชนิด แมลงปอ การกระจายตัว

Abstract

Diversity of dragonfly larvae (Order Odonata, Suborder Anisoptera) were investigated at stream and wadeable river of Chiang Mai, Nan and Chiang Rai provinces. Eighteen sampling sites were sampled during October 2020 to March 2021. Dragonfly larvae were collected using D-frame net and fully-grown larvae

were reared in laboratory. Unidentified larvae were associated using DNA barcoding (*COI*). A total of 291 specimens of dragonfly larvae were identified into 23 species, 17 genera and 5 families (Aeshnidae, Gomphidae, Libellulidae, Macromiidae and Synthemistidae). The family Gomphidae (13 species) is the most diverse species richness followed by Libellulidae and Aeshnidae, respectively. The association of larvae and adult succeed in 3 species (*Idionyx selysi*, *Paragomphus capricornis* and *Tetracanthagyna plagiata*). The similarity analysis (Blastn) found that 3 species which *Heliogomphus selysi*, *Pantala flvescens* and *Trithemis festiva* presented in GenBank and BOLD database. Principal Component Analysis (PCA) analysis revealed that dragonfly larvae were correlated with each provincial region, which *Megalogomphus* sp., *Stylogomphus* sp. and *Idionyx* sp. associated with Chiang Rai Province. Undisturbed and headwater stream sites scatter more than disturbed and wadeable river sites.

Keywords: Species diversity, Dragonflies, Distribution

บทนำ

แมลงน้ำอันดับ Odonata แบ่งออกเป็น 2 อันดับย่อย ได้แก่ อันดับย่อย Anisoptera คือ แมลงปอ (Dragonflies) และอันดับย่อย Zygoptera คือ แมลงปอเข็ม (Damselflies) ตัวอ่อนแมลงปอ และแมลงปอเข็มเป็นกลุ่มสำคัญของสัตว์ไม่มีกระดูกสันหลังน้ำจืดขนาดใหญ่ มีบทบาทเป็นผู้ล่าที่สำคัญในระบบนิเวศแหล่งน้ำจืด พบได้ทั้งระบบนิเวศน้ำนิ่ง และน้ำไหล ตัวอ่อนแต่ละกลุ่มมีความไวหรือทนทานต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพน้ำที่แตกต่างกัน บางกลุ่มพบอาศัยอยู่ในแหล่งน้ำที่มีคุณภาพดีถึงดีมาก นอกจากนี้ยังนิยมใช้เป็นตัวชี้ประเมินคุณภาพแหล่งอาศัย พิธีกรรมผึ้งหรือบริเวณริมฝั่ง (May, 2019) การศึกษาอนุกรมวิธานของแมลงปอในประเทศไทยส่วนใหญ่รายงานเป็นข้อมูลตัวเต็มวัย พบกลุ่มแมลงปอเข็มทั้งหมด 14 วงศ์ ประมาณ 151 ชนิด และกลุ่มแมลงปอทั้งหมด 8 วงศ์ ประมาณ 233 ชนิด ข้อมูลอนุกรมวิธานของตัวอ่อนแมลงปอยังมีค่อนข้างน้อยและมีรายงานบรรยายตัวอ่อนแมลงปออย่างต่อเนื่อง (Boonsoong and Chainthong, 2014a; 2014b; Chainthong and Boonsoong, 2016; Novelo-Gutiérrez and Sites, 2019a; 2019b; Chainthong et al., 2020; Fleck, 2021) การศึกษาข้อมูลตัวอ่อนจำเป็นต้องเชื่อมโยงตัวอ่อนระยะสุดท้ายกับตัวเต็มวัยเพื่อการระบุชนิดตัวอ่อน ปัจจุบันมีการใช้ข้อมูลดีเอ็นเอบาร์โค้ดเพื่อเชื่อมโยงตัวอ่อนและตัวเต็มวัย การศึกษาอนุกรมวิธานของตัวอ่อนแมลงปอ รวมทั้งสภาพแหล่งที่อยู่ของตัวอ่อนแมลงปอชนิดต่าง ๆ ในประเทศไทย จึงมีความสำคัญในการนำไปใช้เป็นตัวชี้ชีวภาพในการประเมินคุณภาพของแหล่งน้ำร่วมกับแมลงน้ำกลุ่มอื่น พื้นที่ทางภาคเหนือของประเทศไทย เป็นพื้นที่ป่าต้นน้ำที่มีความสำคัญ และมีระบบนิเวศหลากหลาย ประกอบด้วยภูเขาสูง หุบเขา แม่น้ำ ลำธาร ลำห้วย และน้ำตก ทำให้เหมาะสมต่อการอยู่อาศัยและแพร่กระจายตัวของตัวอ่อนแมลงปอ อย่างไรก็ตาม การศึกษาเกี่ยวกับตัวอ่อนแมลงปอในพื้นที่แหล่งต้นน้ำภาคเหนือยังมีน้อย ดังนั้นในการศึกษารังนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความหลากหลายของตัวอ่อนแมลงปอในลำธารต้นน้ำและแม่น้ำจังหวัดเชียงใหม่ น่าน และเชียงราย ซึ่งเป็นพื้นที่ที่มีความหลากหลายของแหล่งอาศัยสูง ทั้งนี้เพื่อเป็นข้อมูลอนุกรมวิธาน การกระจายตัว นิเวศวิทยาของตัวอ่อนแมลงปอในประเทศไทย

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

การเก็บตัวอย่างตัวอ่อนแมลงปอ

ทำการสุ่มเก็บตัวอย่างในลำธารต้นน้ำและแม่น้ำต้นพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ (CM) (ตุลาคม 2563) น่าน (NA) (พฤศจิกายน 2563) และเชียงราย (CR) (มีนาคม 2564) จำนวน 18 สถานี ได้แก่ น้ำตกศิริภูมิ (CM01) น้ำตกสายหมอก (CM02) แม่น้ำแม่แจ่ม (CM03) ริมห้วยคาเฟ (CM04) ปางช้างกาญจนา (CM05) น้ำตกตาดหมอก (CM06) แม่น้ำมว (NA01) น้ำตกสะปัน (NA02) แม่น้ำว้า (NA03) แม่น้ำมาง (NA04) น้ำตกปูแง (CR01) น้ำตกขุนกรณ์ (CR02) แม่น้ำกก (CR03) น้ำตกนางแลใน (CR04) น้ำตกห้วยก้างปลา (CR05) หนองบัวแดง (CR06) ไร้ชา 101 (CR07) และน้ำตกโป่งพระบาท (CR08) (รูปที่ 1) ประเมินสภาพแวดล้อมและแหล่งอาศัยด้วยสายตา (visual-based habitat assessment) (Barbour et al., 1999) โดยแบ่งกลุ่มสถานีเก็บตัวอย่างจากการถูกรบกวนจากกิจกรรมของมนุษย์ ดังนี้ 1) สถานีไม่ถูกรบกวนหรือถูกรบกวนน้อย ได้แก่ CM01 CM02 CM06 NA01 NA02 CR01 CR02 CR04 CR05 CR06 และ CR08 2) สถานีถูกรบกวน ได้แก่ CM03 CM04 CM05 NA03 NA04 CR03 และ CR07 เก็บตัวอย่างด้วยสวิง (D-frame Net) หน้ากว้าง 0.33 เมตร ขนาดตาข่าย 500 ไมโครเมตร และเก็บด้วยมือ (Hand picking) เก็บตัวอย่างตัวอ่อนแมลงปอให้ครอบคลุมแหล่งอาศัยย่อยในแต่ละสถานี รักษาสภาพตัวอย่างทันทีด้วยเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 95

การเลี้ยงตัวอ่อนในห้องปฏิบัติการเพื่อเชื่อมโยงตัวอ่อนและตัวเต็มวัย

นำตัวอ่อนแมลงปอที่มีตุ่มปีกขนาดใหญ่มาเลี้ยงในภาชนะดินเผาในห้องปฏิบัติการ เติมน้ำดื่มและก้อนหินเพื่อให้ตัวอ่อนเกาะและคลานขึ้นได้ เติมนอกซิเจนในน้ำตลอดเวลาด้วยเครื่องปั๊มออกซิเจน พร้อมครอบถุงตาข่ายอย่างมิดชิด ให้อาหารตัวอ่อนแมลงปอทุกวันด้วยลูกน้ำยุง หรือหนอนแดง หรือลูกปลาขนาดเล็ก เมื่อตัวอ่อนแมลงปอลอกคราบเป็นตัวเต็มวัยแล้วประมาณ 1-2 วัน รักษาสภาพตัวอย่างคราบตัวอ่อน และตัวเต็มวัยทันทีด้วยเอทานอลความเข้มข้นร้อยละ 95

การจัดจำแนกตัวอ่อนและตัวเต็มวัยแมลงปอ

ศึกษาลักษณะสัณฐานวิทยาตัวอย่างภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอในห้องปฏิบัติการ เพื่อจำแนกชนิดตัวอ่อนที่พบและตัวเต็มวัยแมลงปอที่เชื่อมโยงได้ โดยใช้เอกสารงานวิจัยที่เกี่ยวข้อง และเอกสารอ้างอิงในการจำแนกชนิดดังนี้ Asahina (1993) Hämäläinen and Pinratana (1999) และ Orr et al. (2004)

การวิเคราะห์ดีเอ็นเอบาร์โค้ด

นำตัวอย่างเนื้อเยื่อบริเวณโคนรยางค์ขาของตัวอ่อนแมลงปอที่ไม่สามารถระบุชนิดได้ ไปศึกษาดีเอ็นเอบาร์โค้ดด้วยยีน *COI* ใช้ส่วนโคนรยางค์ขาไปสกัดดีเอ็นเอด้วยชุดสกัดดีเอ็นเอ (DNA extraction kits) เพิ่มปริมาณสารพันธุกรรมด้วยเทคนิค Polymerase Chain Reaction (PCR) โดยใช้ไพรเมอร์ (Primer) ของยีน *COI* คือ LCO1490 และ HCO2198 (Folmer et al., 1994) ดำเนินกระบวนการปฏิกิริยาตามขั้นตอนของ Gattolliat et al. (2015) จากนั้นตรวจสอบผลผลิตจากปฏิกิริยาด้วยเทคนิค Gel Electrophoresis ทำให้บริสุทธิ์ด้วยชุด purification kit ส่งวิเคราะห์หาลำดับนิวคลีโอไทด์ที่บริษัทเอทีจีซี (ATGC) จำกัด เปรียบเทียบความคล้ายคลึงของลำดับนิวคลีโอไทด์ของยีน *COI* กับฐานข้อมูล GenBank และ International Barcode of Life Data Systems (BOLD)

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วิเคราะห์ความสัมพันธ์ระหว่างสถานีเก็บตัวอย่างกับการกระจายตัวของชนิดตัวอ่อนแมลงปอ (ข้อมูลพบ/ไม่พบ) ด้วยการจัดอันดับ Principal Components Analysis (PCA) ด้วยสถิติหลายตัวแปร (Multivariate Analysis) โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป PC-ORD 7.01 (McCune and Mefford, 2011)



รูปที่ 1 จุดเก็บตัวอย่างและสภาพแวดล้อมของสถานีเก็บตัวอย่างทั้งหมด 18 สถานี ในจังหวัดเชียงใหม่ น่าน และเชียงราย

ผลการวิจัย

จากการเลี้ยงตัวอ่อนแมลงปอในห้องปฏิบัติการ สามารถเลี้ยงเชื่อมโยงตัวเต็มวัยได้ทั้งหมด 3 ชนิด คือ *Idionyx selysi*, *Paragomphus capricornis* และ *Tetracanthagyna plagiata* และการวิเคราะห์ดีเอ็นเอบาร์โค้ดตัวอย่างตัวอ่อนแมลงปอที่ไม่สามารถระบุชนิดได้จำนวน 12 ตัวอย่าง เมื่อเปรียบเทียบกับความคล้ายคลึงของลำดับนิวคลีโอไทด์ของยีน COI กับฐานข้อมูล GenBank และ BOLD สามารถระบุชนิดได้ 3 ชนิด ได้แก่ *Heliogomphus selysi*, *Pantala flavescens* และ *Trithemis festiva* (ตารางที่ 1)

จากการเก็บตัวอย่างตัวอ่อนแมลงปอในลำธารและแม่น้ำ จังหวัดเชียงใหม่ น่าน และเชียงราย ทั้งหมด 18 สถานี จำแนกตัวอย่างได้ทั้งหมด 5 วงศ์ 18 สกุล 24 ชนิด (ตารางที่ 2) พบตัวอ่อนแมลงปอวงศ์ Gomphidae มีความหลากหลายชนิดมากที่สุด (9 สกุล 13 ชนิด) ได้แก่ *Asiagomphus* sp., *Burmagomphus* sp., *B. divericatus*, *Heliogomphus retroflexus*, *H. selysi* (รูปที่ 2) *Macrogomphus* sp., *Megalogomphus* sp., *Microgomphus* sp., *M. farrelli* (รูปที่ 3) *Paragomphus capricornis*, *Paragomphus* sp., *Phaenandrogomphus* sp. และ *Stylogomphus* sp. (รูปที่ 4) รองลงมาคือ วงศ์ Libellulidae (4 สกุล 5 ชนิด) ได้แก่ *Onychothemis* sp. (รูปที่ 5) *Pantala flavescens*, *Trithemis festiva* (รูปที่ 6) *Zygonyx asahinai* (รูปที่ 7) และ *Zygonyx* sp. วงศ์ Aeshnidae (3 สกุล 4 ชนิด) ได้แก่ *Anaciaeschna jaspidae*, *Anax guttatus*, *Tetracanthagyna plagiata* และ *T. waterhousei* วงศ์ Synthemistidae (1 สกุล 1 ชนิด) ได้แก่ *Idionyx selysi* และ วงศ์ Macromiidae (1 สกุล 1 ชนิด) ได้แก่ *Macromia* sp. (รูปที่ 8) ตัวอ่อนแมลงปอ *Onychothemis* sp. พบ

การกระจายตัวมากที่สุด พบ 9 สถานีเก็บตัวอย่าง และวงศ์ Synthemistidae มีการกระจายตัวน้อยที่สุด โดยพบเพียงสถานีเก็บตัวอย่างแม่น้ำแม่แจ่ม จังหวัดเชียงใหม่ (CM03) สถานีเก็บตัวอย่างที่มีความหลากหลายชนิดของตัวอ่อนแมลงปอมากที่สุดคือ สถานีเก็บตัวอย่างน้ำตกนางแลใน จังหวัดเชียงราย (CR04)

ผลการวิเคราะห์สถิติหลายตัวแปรโดยการจัดอันดับความสัมพันธ์ระหว่างสถานีเก็บตัวอย่าง และชนิดของตัวอ่อนแมลงปอ ด้วย Principal Components Analysis (PCA) พบว่า ตัวอ่อนแมลงปอมีความสัมพันธ์กับพื้นที่แต่ละจังหวัดอย่างชัดเจน (แกนที่ 1 มีค่า Eigenvalue = 5.59, % of Variance = 24.34 และแกนที่ 2 มีค่า Eigenvalue = 2.97, % of Variance = 12.94) ตัวอ่อนแมลงปอ *Megalogomphus* sp., *Stylogomphus* sp. และ *Idionyx* sp. มีความสัมพันธ์กับสถานีเก็บตัวอย่างพื้นที่ จังหวัดเชียงราย ตัวอ่อนแมลงปอ *Asiagomphus* sp., *Anaciaeschna jaspidae* และ *Zygonyx asahinai* มีความสัมพันธ์กับสถานีเก็บตัวอย่างพื้นที่จังหวัดน่าน ตัวอ่อนแมลงปอ *Anax guttatus*, *Burmagomphus divericatus* และ *Heliogomphus retroflexus* มีความสัมพันธ์กับสถานีเก็บตัวอย่างพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ (รูปที่ 9) นอกจากนี้เมื่อจัดกลุ่มสถานีเก็บตัวอย่างในแต่ละระบบนิเวศแหล่งน้ำ และการได้รับผลกระทบจากกิจกรรมของมนุษย์ พบว่า ลำธารต้นน้ำพบการกระจายตัวของตัวอ่อนแมลงปอหลากหลายกว่าสถานีเก็บตัวอย่างในแม่น้ำต้น และสถานีเก็บตัวอย่างบริเวณพื้นที่ไม่ถูกรบกวนพบการกระจายตัวของตัวอ่อนแมลงปอมากกว่าพื้นที่ที่ถูกรบกวน (รูปที่ 10)

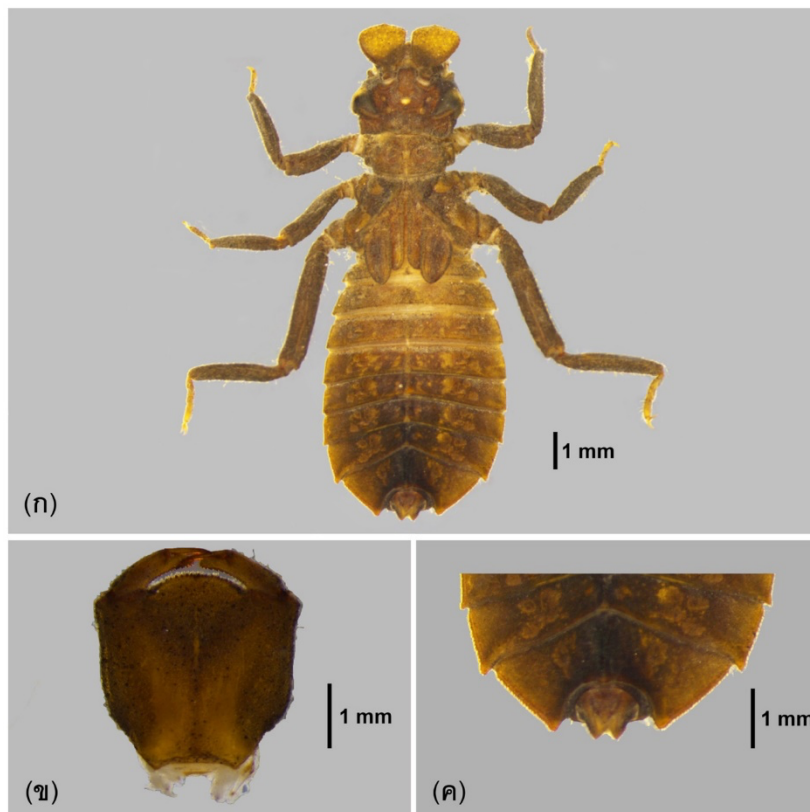
ตารางที่ 1 เปรียบเทียบความคล้ายคลึงของลำดับนิวคลีโอไทด์ยีน COI ของตัวอ่อนแมลงปอ 3 ตัวอย่างกับฐานข้อมูล GenBank และ BOLD

ตัวอย่าง (ตัวอ่อนแมลงปอ)	Percent Identity	Query coverage	ชนิดของตัวอ่อนแมลงปอ
<i>Heliogomphus</i> sp. (CR08)	91.95%	100%	<i>Heliogomphus selysi</i>
<i>Onychothemis</i> sp. (CR04)	99.85%	100%	<i>Pantala flavescens</i>
<i>Trithemis</i> sp. (CR04)	99.51%	92%	<i>Trithemis festiva</i>

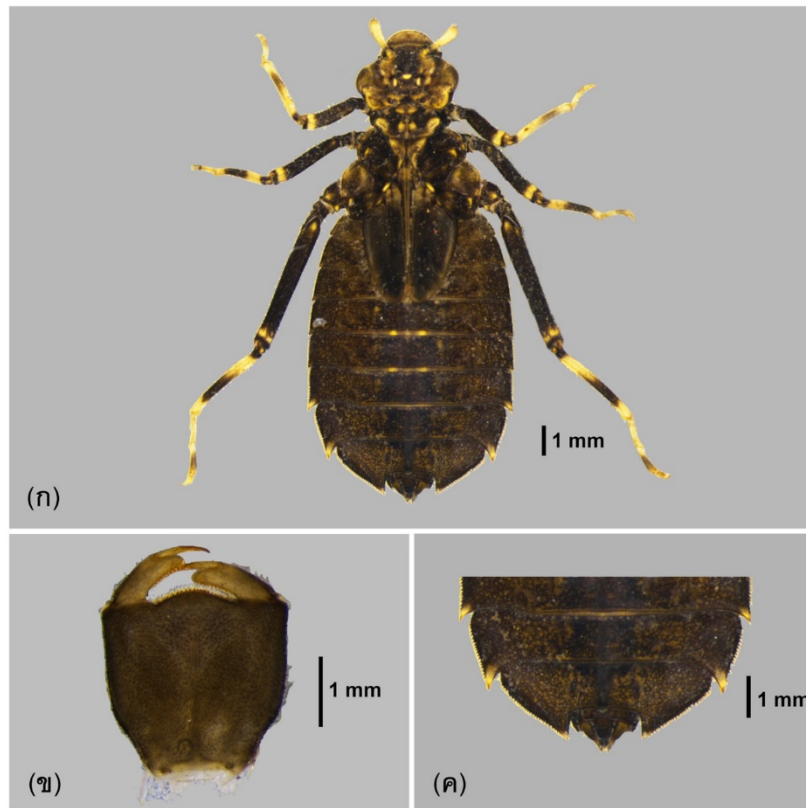
ตารางที่ 2 ตัวอ่อนแมลงปอที่พบในลำธารต้นน้ำและแม่น้ำทั้ง 18 สถานีเก็บตัวอย่างในจังหวัดเชียงใหม่ (CM) น่าน (NA) และ เชียงราย (CR) (/ = พบ, - = ไม่พบ) (identified = การใช้คู่มือ reared = การเลี้ยงเชื่อมโยง COI = การใช้ ดีเอ็นเอบาร์โค้ด)

Families	Genera/Species	Chiang Mai	Nan	Chiang Rai	Identification
Aeshnidae	<i>Anaciaeschna jaspidae</i>	-	/	-	identified
	<i>Anax guttatus</i>	/	-	-	Identified
	<i>Tetracanthagyna plagiata</i>	-	-	/	reared
	<i>Tetracanthagyna waterhousei</i>	-	/	-	Identified
Gomphidae	<i>Asiagomphus</i> sp.	-	/	-	Identified
	<i>Burmagomphus divericatus</i>	/	-	-	identified
	<i>Burmagomphus</i> sp.	/	-	/	identified
	<i>Heliogomphus retroflexus</i>	/	-	-	Identified
	<i>Heliogomphus selysi</i>	/	-	/	COI
	<i>Macrogomphus</i> sp.	-	-	/	Identified
	<i>Megalogomphus</i> sp.	-	-	/	Identified

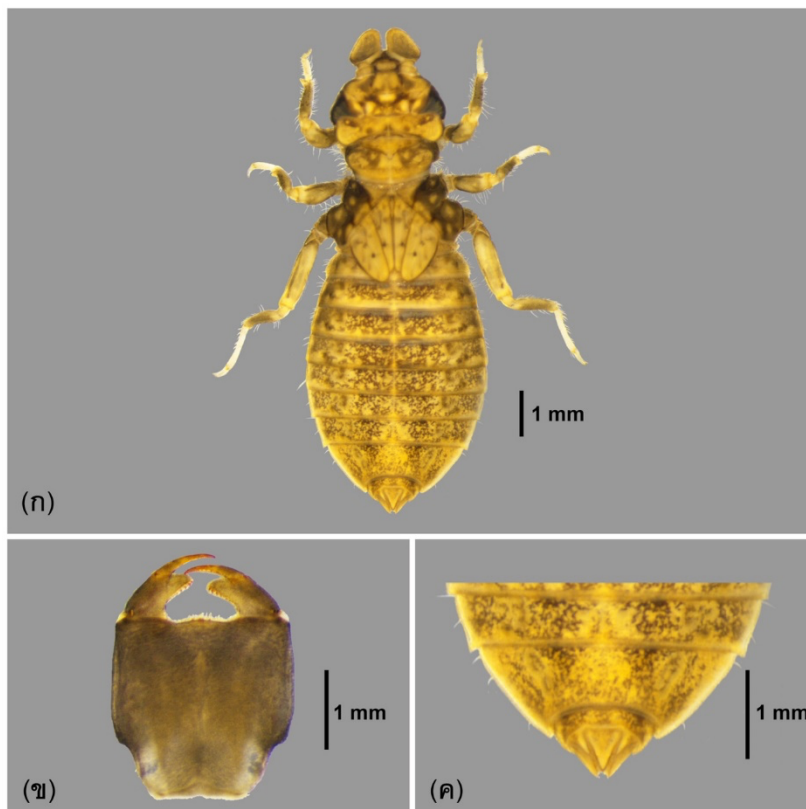
Families	Genera/Species	Chiang Mai	Nan	Chiang Rai	Identification
Libellulidae	<i>Microgomphus farrelli</i>	-	-	/	Identified
	<i>Microgomphus</i> sp.	-	/	/	Identified
	<i>Paragomphus capricornis</i>	-	-	/	reared
	<i>Paragomphus</i> sp.	-	-	/	Identified
	<i>Phaenandrogomphus</i> sp.	-	/	/	Identified
	<i>Stylogomphus</i> sp.	-	-	/	Identified
	<i>Onychothemis</i> sp.	/	/	/	Identified
	<i>Pantala flavescens</i>	-	-	/	COI
	<i>Trithemis festiva</i>	-	-	/	COI
	<i>Zygonyx asahinai</i>	-	/	-	Identified
Synthemistidae	<i>Zygonyx</i> sp.	/	-	/	Identified
	<i>Idionyx selysi</i>	/	-	-	reared
Macromiidae	<i>Macromia</i> sp.	/	/	/	identified



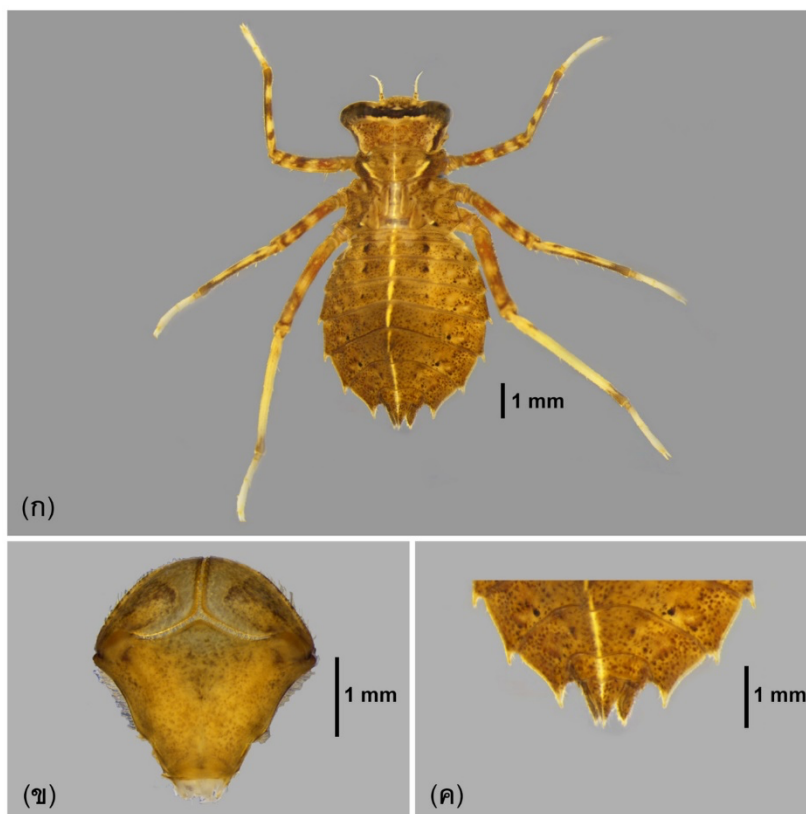
รูปที่ 2 ตัวอ่อนแมลงปอ *Heliogomphus selysi* (น) Prementum (ข) และ Anal pyramid (ค)



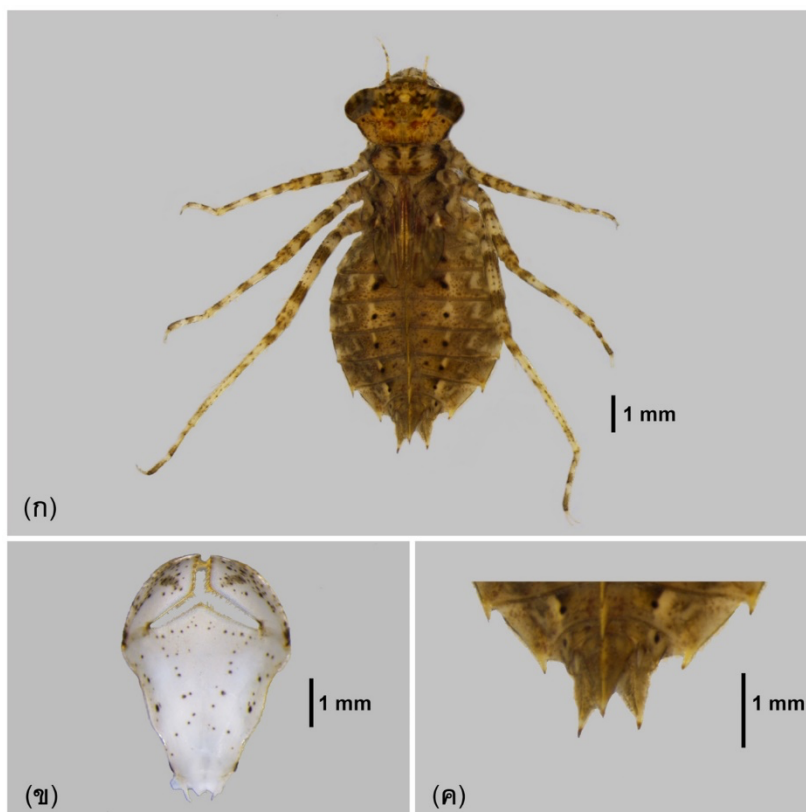
รูปที่ 3 ตัวอ่อนแมลงปอ *Microgomphus farrelli* (a) Prementum (b) และ Anal pyramid (c)



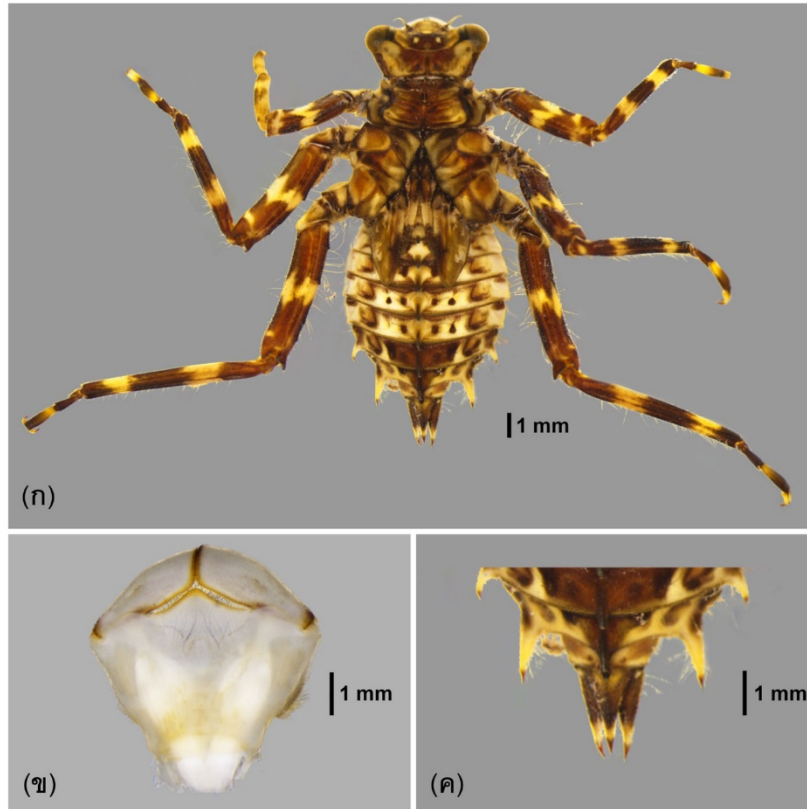
รูปที่ 4 ตัวอ่อนแมลงปอ *Stylogomphus* sp. (a) Prementum (b) และ Anal pyramid (c)



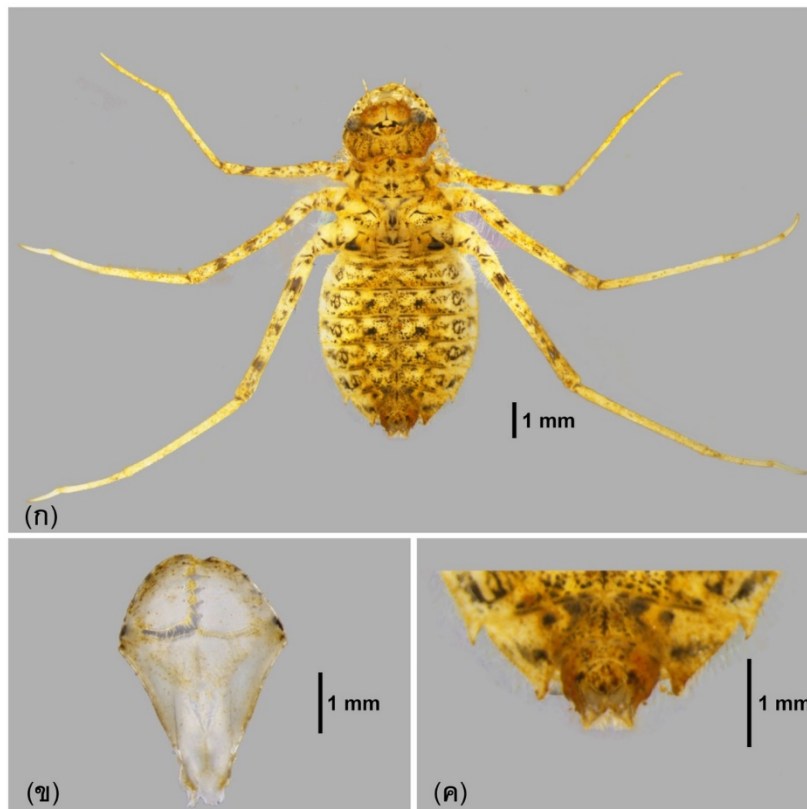
รูปที่ 5 ตัวอ่อนแมลงปอ *Onychothemi* sp. (ก) Prementum (ข) และ Anal pyramid (ค)



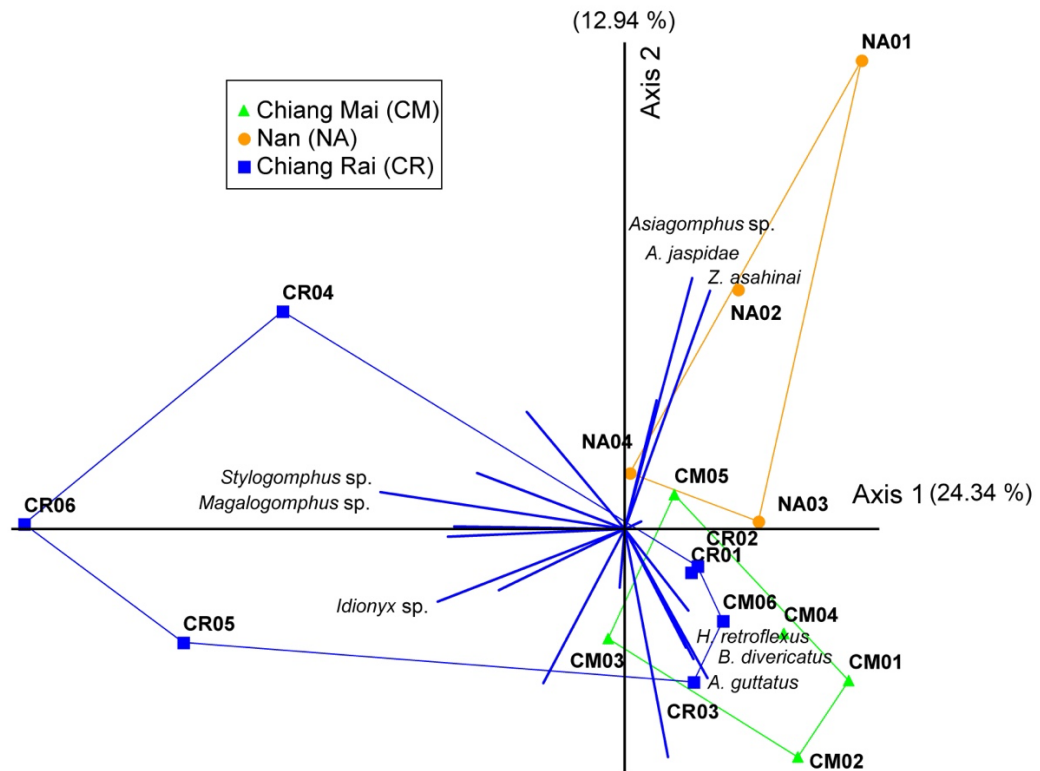
รูปที่ 6 ตัวอ่อนแมลงปอ *Trithemis festiva* (ก) Prementum (ข) และ Anal pyramid (ค)



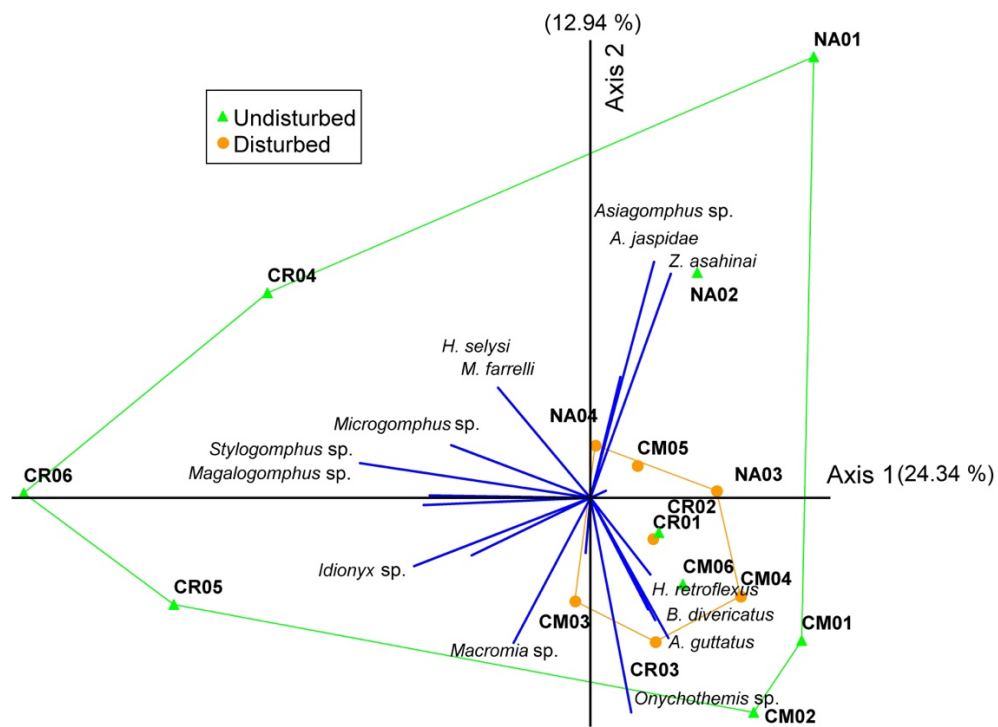
รูปที่ 7 ตัวอ่อนแมลงปอ *Zygonyx asahinai* (ก) Prementum (ข) และ Anal pyramid (ค)



รูปที่ 8 ตัวอ่อนแมลงปอ *Macromia* sp. (ก) Prementum (ข) และ Anal pyramid (ค)



รูปที่ 9 ผลการจัดอันดับความสัมพันธ์ระหว่างสถานีเก็บตัวอย่างในลำธารและแม่น้ำจังหวัด เชียงใหม่ น่าน และเชียงรายกับชนิดของตัวอ่อนแมลงปอดด้วย PCA



รูปที่ 10 ผลการจัดอันดับความสัมพันธ์ระหว่างสถานีเก็บตัวอย่างในลำธารและแม่น้ำที่ไม่ถูกรบกวนและถูกรบกวนกับชนิดของตัวอ่อนแมลงปอดด้วย PCA

การอภิปรายผล

ตัวอ่อนแมลงปอที่พบในพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ น่าน และเชียงราย คิดเป็นร้อยละ 22.78 ของจำนวนสกุล และร้อยละ 13.41 ของจำนวนชนิดตัวเต็มวัยแมลงปอที่มีรายงานพบในประเทศไทย ตัวอ่อนแมลงปอวงศ์ Gomphidae มีความหลากหลายสูงสุด โดยตัวอ่อนปรับตัวเพื่ออาศัยในแหล่งอาศัยย่อยที่แตกต่างกัน เช่น กลุ่มชอบชุดในทรายหรือโคลนในลำธาร (สกุล *Anisogomphus*, *Burmagomphus* และ *Onychogomphus*) สกุล *Heliogomphus* และ *Microgomphus* อาศัยบริเวณแอ่งที่มีใบไม้สะสม ตัวอ่อนจึงมีรูปร่างแตกต่างกันในแต่ละแหล่งอาศัย (Chainthong and Boonsoong, 2022) ตัวอ่อนแมลงปอวงศ์ Gomphidae เป็นกลุ่มที่พบบ่อยในลำธารและมีความหลากหลายค่อนข้างสูงในลำธารเขตร้อน (Dudgeon, 1999) ตัวอ่อนแมลงปอ *Onychothemis* sp. (วงศ์ Libellulidae) พบการกระจายตัวในสถานีเก็บตัวอย่างมากที่สุดจำนวน 9 สถานี เนื่องจากตัวอ่อนแมลงปอกลุ่มนี้ชอบยึดเกาะอยู่กับพืชน้ำหรือโชดหินโดยมีปล้องขายาวทำให้เกาะได้ดี (Suhling et al., 2015) และสถานีเก็บตัวอย่างในการศึกษานี้ส่วนใหญ่มีแนวพืชน้ำและโชดหินโดยรอบจำนวนมาก ตัวอ่อนแมลงปอมีความหลากหลายสูงในสถานีเก็บตัวอย่างน้ำตกนางแลใน จังหวัดเชียงราย เนื่องจากพื้นที่สถานีเก็บตัวอย่างมีแหล่งอาศัยย่อยหลากหลายแบบ เช่น พืชน้ำ แอ่งหิน โชดหิน พื้นทราย และซากใบไม้ทับถม ทำให้พบตัวอ่อนแมลงปอหลากหลายชนิด โดยทั่วไปตัวอ่อนแมลงปอมีการกระจายตัวมากในบริเวณลำธารต้นน้ำที่ไม่ถูกรบกวนจากกิจกรรมของมนุษย์ เนื่องจากการแพร่กระจายของแมลงปอนั้นมีความสัมพันธ์กับแหล่งที่อยู่อาศัย และปริมาณอาหาร (Sharma et al., 2007) การลดลงของป่าและต้นไม้อบรอบลำธารมีผลต่อความหลากหลายชนิดและสัดส่วนของแมลงปอ (Rith-Najarian, 1998) บางชนิดอาจจะหายไป (*Dicterias atosanguinea* และ *Chalcopteryx scintillans*) (da Silva Monteiro, 2013) สอดคล้องกับการศึกษานี้พบว่า บริเวณที่ไม่ถูกรบกวนมีความหลากหลายชนิดของตัวอ่อนแมลงปอสูงกว่าบริเวณที่ถูกรบกวน

บทสรุป

การศึกษานี้ได้สำรวจเบื้องต้น และรายงานความหลากหลายของตัวอ่อนแมลงปอในลำธารและแม่น้ำพื้นที่จังหวัดเชียงใหม่ น่าน และเชียงราย พบว่ามีความหลากหลายชนิดค่อนข้างสูง พบตัวอ่อนแมลงปอทั้งหมด 5 วงศ์ 17 สกุล 23 ชนิด จากการสำรวจเพียง 18 สถานี เก็บตัวอย่างและฤดูกาลเดียวเท่านั้น เนื่องด้วยข้อจำกัดในการออกภาคสนาม การศึกษานี้สะท้อนให้เห็นว่าพื้นที่ภาคเหนือของประเทศไทยมีระบบนิเวศจำเพาะต่อการดำรงชีวิตของตัวอ่อนแมลงปอที่มีโอกาสพบได้น้อย พบตัวอ่อนแมลงปอวงศ์ Gomphidae มีความหลากหลายสูงสุด เนื่องจากเป็นกลุ่มเด่นของตัวอ่อนที่พบอาศัยในลำธารต้นน้ำ และแหล่งอาศัยถูกรบกวนส่งผลทำให้ความหลากหลายชนิดของตัวอ่อนแมลงปอลดลง ข้อมูลการกระจายตัวและความจำเพาะระบบนิเวศของตัวอ่อนแมลงปอสามารถใช้เป็นข้อมูลชีวภาพในการใช้ประเมินผลกระทบต่องสิ่งแวดล้อมในแหล่งน้ำของประเทศไทยต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ผลงานวิจัยฉบับนี้ได้รับการสนับสนุนเงินทุนจากศูนย์ความเป็นเลิศด้านความหลากหลายทางชีวภาพ สำนักงานคณะกรรมการการอุดมศึกษา (BDC-PG2-161004) และภาควิชาสัตววิทยา คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

เอกสารอ้างอิง

- Asahina S. (1993). A List of the Odonata from Thailand (Parts I – XXI). Bosco offset, Bangkok.
- Barbour M.T., Gerritsen J., Snyder B.D. and Stribling J.B. (1999). Rapid bioassessment protocols for use in streams and wadeable rivers: periphyton, benthic macroinvertebrates, and fish, 2nd edition. U.S. Environmental Protection Agency, Washington, D.C.
- Boonsoong B. and Chainthong D. (2014a). Description of the final-instar larva of *Heliogomphus selysi* Fraser (Odonata: Gomphidae). Zootaxa 3764 (4): 482–488.
- Boonsoong B. and Chainthong D. (2014b). Description of the last stadium larva and female of *Microgomphus thailandica* Asahina, 1981 (Odonata: Gomphidae). Zootaxa 3811(2): 271–279.
- Chainthong D. and Boonsoong B. (2016). Description of two final stadium *Onychogomphus* larvae from Thailand (Odonata: Gomphidae). Zootaxa 4066 (5): 561–570.
- Chainthong D., Sartori M. and Boonsoong B. (2020). *Stylogomphus thongphaphumensis* (Odonata: Anisoptera: Gomphidae), a new gomphid dragonfly and the first record of *S. malayanus* Sasamoto, 2001 from Thailand. Zootaxa 4763(2): 231–245.
- Dudgeon D.D. (1999). Tropical Asian Streams Zoobenthos, Ecology and Conservation. Hong Kong University Press: Hong Kong, China.
- Fleck G. (2021). *Onychogomphus (Siriusonychogomphus) louissiriusi*, a new species and new subgenus from Thailand (Odonata: Anisoptera: Gomphidae). Faunitaxys 8: 1–9.
- Hämäläinen M. and Pinratana A. (1999). Atlas of the Dragonflies of Thailand: distribution maps by provinces. Brothers of St. Gabriel in Thailand, Bangkok.
- May M.L. (2019). Odonata: Who They Are and What They Have Done for Us Lately: Classification and Ecosystem Services of Dragonflies. Insects 10(3): 62.
- McCune B. and Mefford M.J. (2011). PC-ORD. Multivariate analysis of ecological data. Version 6.0. MjM Software, Gleneden Beach, USA.
- Novelo-Gutiérrez R. and Sites R.W. (2019a). The larvae of *Phaenandrogomphus* Lieftinck, 1964 in Thailand, including the description of *P. tonkinicus* (Fraser, 1926) with a larval diagnosis and new province records of *P. asthenes* Lieftinck, 1964 (Odonata: Gomphidae). Zootaxa 4700(3): 377–384.
- Novelo-Gutiérrez R. and Sites R.W. (2019b). The larva of *Amphigomphus somnuki* Hämäläinen, 1996 and the first records of the genus *Stylogomphus* Fraser, 1922 for Thailand (Odonata: Gomphidae). Zootaxa 4555(1): 121–126.
- Orr A.G., Butler S.G., Hämäläinen M. and Kemp R.G. (2004). Insecta: Odonata, pp. 409–442. In Yule C.M. and Sen Y.H., eds. Freshwater Invertebrates of the Malaysian Region. Academy of Sciences Malaysia.

- Rith-Najarian J. (1998). The influence of forest vegetation variables on the distribution and diversity of dragonflies in a northern Minnesota forest landscape: A preliminary study (Anisoptera). *Odonatologica* 27: 335–351.
- Sharma G., Sundararaj R. and Karibasvaraja L.R. (2007). Species diversity of Odonate in the selected provenances of Sandal in Southern India. *Zoo' Print Journal* 22(7): 2765–2767.
- da Silva Monteiro Jr. C., Couceiro S.R.M., Hamada N. and Juen L. (2013). Effect of vegetation removal for road building on richness and composition of Odonata communities in Amazonia, Brazil. *International Journal of Odonatology* 16: 135–144.
- Suhling F., Sahlén G., Gorb S., Kalkman. V.J., Dijkstra K.D.B. and van Tol J. (2015). Order Odonata. In *Ecology and General Biology: Thorp and Covich' Freshwater Invertebrates*, 4th ed., Thorp J.H. and Rogers, D.C., Eds., Academic Press: New York, NY, USA. pp. 894–932.

Received: July 30, 2022; Revised: August 16, 2022; Accepted: August 17, 2022

ผลของน้ำหมักชีวภาพสูตรต่าง ๆ ที่มีต่อผลผลิตของมะเขือเปราะพันธุ์นางพญา
The effects of various fermented bio-extract on yield
of Thai striped eggplant (*Solanum melongena* L.) variety Nang Pha Ya

กมลมนัส วัฒนา^{1*} รุ่งอรุณ พันธุ์เครือ¹ และอารียา ศรีไพโล¹Kamolmanus Wattana^{1*}, Rungarun Pankrun¹ and Areeya Sriplai¹¹คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี

*Corresponding Author E-mail Address : Kamolmanus_wa@rmutto.ac.th

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของชนิดของปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพที่ส่งผลต่อผลผลิตของมะเขือเปราะพันธุ์นางพญา วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ จำนวน 5 สิ่งทดลอง ๆ ละ 10 ซ้ำ ได้แก่ 1) ชุดควบคุม (ไม่ใส่ปุ๋ยน้ำหมัก) 2) ปุ๋ยน้ำหมักจากกรสกร 3) ปุ๋ยน้ำหมักจากน้ำนม 4) ปุ๋ยน้ำหมักจากมะละกอ และ 5) ปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพสำเร็จรูปทางการค้า จากผลการทดลองพบว่า ผลผลิตของมะเขือเปราะพันธุ์นางพญาที่ได้จากการไม่ใช้ปุ๋ยและใช้ปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพแต่ละชนิดไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แต่การใส่ปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพช่วยส่งเสริมปริมาณผลผลิตของมะเขือเปราะพันธุ์นางพญาได้ดีกว่าการไม่ใส่ปุ๋ยน้ำหมัก และการใส่ปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพสำเร็จรูปทางการค้ามีแนวโน้มส่งผลให้จำนวนผลและผลผลิตของมะเขือเปราะพันธุ์นางพญามีค่าที่ดีกว่าการใส่ปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพชนิดอื่น ๆ แต่อย่างไรก็ตาม พบว่าการใส่ปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพจากน้ำนม สามารถส่งผลให้มะเขือเปราะพันธุ์นางพญามีน้ำหนักผลดี และน้ำหนักรวมทั้งหมดต่อต้น มีค่าที่ไม่แตกต่างกับการใส่ปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพสำเร็จรูปทางการค้า และยังสามารถลดปริมาณน้ำหนักรวมต่อต้น และจำนวนผลต่อต้นได้อีกด้วย จากผลการวิเคราะห์รายได้และต้นทุนในการผลิตมะเขือเปราะพันธุ์นางพญาในพื้นที่ 1 ไร่ กรรมวิธีที่มีต้นทุนต่ำสุด และได้ผลตอบแทนเหนือต้นทุนผันแปรดีที่สุด ได้แก่ การใช้ปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพจากน้ำนม ซึ่งสามารถเป็นทางเลือกให้กับเกษตรกรสามารถนำมาใช้ทดแทนปุ๋ยน้ำหมักสำเร็จรูปทางการค้า เพื่อลดต้นทุนค่าใช้จ่ายการใช้ปุ๋ยเคมี และผู้บริโภคได้รับคุณค่าทางโภชนาการอย่างปลอดภัยไร้สารเคมีเจือปนได้

คำสำคัญ: น้ำหมักชีวภาพ มะเขือเปราะ ผลผลิต

Abstract

The purpose of this research was to study the effects of various fermented bio-extract on yield of Thai striped eggplant variety, Nang Pha Ya. Experimental design was completely randomized design (CRD) with 5 treatments and 10 replications. The treatments were: 1) control (no fermented bio-extract), 2) fermented bio-extract from pig placenta, 3) fermented bio-extract from milk, 4) fermented bio-extract from papaya, and 5) commercial formula bio-extract. The results demonstrated that the use of various fermented bio-extracts did not statistically show significant differences in the yields of Thai striped eggplant on control treatment, but on commercial formula bio-extract treatment which resulted in high yield and yield quality. However, it was found that the application of fermented bio-extract from milk resulted in high fruit weight and total weight per plant, similar to the commercial formula bio-extract, and can also reduce the amount of rotten yield. In terms of income and cost analysis of Nang Pha ya eggplant production in 1 rai, the process with the lowest cost and the best return above variable cost was on the use of fermented bio-extract from milk. The milk bio-extract can therefore be an alternative to bio-fertilizers from commercial formulas and could reduce the cost of chemical fertilizers being used regularly by the farmers which can then lead to consumers receiving more nutritional value without chemical additives from Thai eggplants.

Keywords: Fermented bio-extracts, *Solanum melongena* L., Yield

บทนำ

มะเขือเปราะ (*Solanum melongena* L.) อยู่ในตระกูล Solanaceae เป็นพืชผักสมุนไพรที่บริโภคกันแพร่หลายทั่วโลก มีถิ่นกำเนิดในประเทศอินเดียและในทวีปเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (จานุกฤษณ์, 2541) สามารถเจริญได้ในดินแทบทุกชนิด ชอบดินร่วนปนทราย และมีอายุอยู่ได้หลายฤดูกาล ในประเทศไทยมีการปลูกมะเขือเปราะหลายสายพันธุ์ เช่น พันธุ์พิจิตร พันธุ์คางกบ และพันธุ์นางพญา นอกจากผลที่ใช้บริโภคเป็นอาหารยังมีประโยชน์และสรรพคุณทางยาหลายอย่าง เช่น ลดระดับคอเลสเตอรอลในเลือด ขับปัสสาวะ และฆ่าเชื้อแบคทีเรียได้ (พรพิมล, 2544) ผลอ่อนใช้รับประทานสด ๆ เป็นผักเคียง ซึ่งมีสารอาหารที่สำคัญ ได้แก่ วิตามินบี 1 วิตามินบี 2 วิตามินบี 3 วิตามินซี ธาตุเหล็ก แคลเซียม และฟอสฟอรัส เป็นต้น (รุจิรา, 2550) ในปัจจุบันเกษตรกรนิยมใช้ปุ๋ยเคมีในการทำการเกษตรเพื่อเพิ่มการเจริญเติบโตและผลผลิต ซึ่งการใช้ปุ๋ยเคมีในระยะยาวทำให้ดินเกิดความเสื่อมโทรมและส่งผลกระทบต่อผลผลิต นอกจากนี้ยังอาจก่อให้เกิดการสะสมสารเคมีในผลผลิตและส่งต่อไปยังผู้บริโภค ดังนั้นการส่งเสริมให้เกษตรกรใช้ปุ๋ยอินทรีย์ จะสามารถรักษาสภาพดินให้มีความอุดมสมบูรณ์และผลผลิตมีคุณภาพที่ดีปลอดภัยไร้สารเคมีเจือปนได้ ซึ่งน้ำหมักชีวภาพ (Fermented bio-extract) เป็นของเหลวที่เกิดจากกระบวนการหมักซากพืชซากสัตว์กับน้ำตาลหรือกากน้ำตาล โดยมีจุลินทรีย์เป็นตัวช่วยการย่อยสลาย ส่งผลให้น้ำหมักชีวภาพโดยทั่วไปจะมีจุลินทรีย์ธรรมชาติที่เกิดขึ้นหลายชนิด รวมทั้งธาตุอาหารพืช ฮอโมนพืช สารประกอบที่สกัดได้จากเซลล์พืชและเซลล์สัตว์หลายชนิด คาร์โบไฮเดรต โปรตีน กรดอะมิโน และเอนไซม์ (Ghaly et al., 2013; Shi et al., 2018) และน้ำหมักชีวภาพยังมีการเติมจุลินทรีย์ในกลุ่ม *Lactobacillus* spp. ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มแบคทีเรียผลิตกรดแลกติก (Lactic acid bacteria) ที่สามารถหมักน้ำตาลกลูโคส (Glucose) และแล็กโทส (Lactose) ให้เกิดกรดแลกติกซึ่งเป็นกรดอินทรีย์ที่สำคัญในการเจริญเติบโตของ

พืชและสิ่งมีชีวิต น้ำหมักชีวภาพที่ใช้กันทั่วไปในปัจจุบันนั้นมีหลากหลายชนิดขึ้นอยู่กับชนิดวัตถุดิบและวิธีการผลิต ดังนั้นการประยุกต์ใช้น้ำหมักชีวภาพที่เกิดจากการนำของเหลือใช้ เช่น เศษพืชผัก เศษเนื้อสัตว์ หรือวัสดุเหลือใช้ต่างๆ ที่สามารถหาได้ง่ายในท้องถิ่นนั้นไปหมักรวมกับกากน้ำตาล (Molasses) และนำไปใช้ประโยชน์ในด้านการเกษตร สามารถลดปริมาณการใช้ปุ๋ยเคมี ฮอร์โมน และสารเคมีกำจัดศัตรูพืชลง โดย ญัฎฐ์วรินทร์ และวัชร (2562) ศึกษาประสิทธิภาพของน้ำหมักชีวภาพที่ได้จากเมล็ดลำไยและเปลือกลำไย เปลือกกล้วยน้ำว้า และเปลือกแตงโมต่อการเจริญเติบโตของผักสลัดกรีนโอ๊ค ที่ระดับความเข้มข้น 1:500 (น้ำหมักชีวภาพ : น้ำเปล่า) พบว่าน้ำหมักชีวภาพจากเศษเหลือจากลำไยให้ค่าเฉลี่ยจำนวนใบ ความยาวของใบ และน้ำหนักสดมากที่สุด ภารดี และคณะ (2563) ศึกษาผลของน้ำหมักชีวภาพต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของถั่วเหลืองฝักสด โดยเปรียบเทียบการใช้ น้ำหมักชีวภาพ คือ การไม่ใช้น้ำหมักชีวภาพ น้ำหมักปลา น้ำหมักหอยเชอรี่ และน้ำหมักผลไม้ พบว่า การใช้ น้ำหมักหอยเชอรี่และน้ำหมักผลไม้ ให้ค่าการเจริญเติบโตด้านจำนวนกิ่งก้านต่อต้น และผลผลิตสูงที่สุด ฌานิกา และคณะ (2565) ศึกษาประสิทธิภาพของน้ำหมักชีวภาพจากเศษปลาเหลือทิ้งด้วยเชื้อ *Lactobacillus casei* ต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของผักกวางตุ้งฮ่องเต้ที่ระดับความเข้มข้น 1:500 นำไปใช้ความถี่ 3 ครั้งต่อสัปดาห์ พบว่าน้ำหมักชีวภาพจากเศษปลาเหลือทิ้ง 3 กิโลกรัม+กากน้ำตาล 250 มิลลิลิตร+น้ำเปล่า 10 ลิตร+เชื้อ *Lactobacillus casei* 25 มิลลิลิตร ให้ค่าเฉลี่ยจำนวนใบ ความสูงของต้น และน้ำหนักสดมากที่สุด และผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมี พบว่ามีค่าความเป็นกรด-ด่าง และธาตุอาหารหลัก ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน เหมาะสำหรับการนำไปใช้กับผักกวางตุ้งฮ่องเต้เพื่อเป็นการลดการใช้สารเคมีและลดต้นทุนในการผลิต จะเห็นได้ว่าน้ำหมักชีวภาพชนิดต่าง ๆ มีธาตุอาหารหลักและธาตุอาหารรองที่เพียงพอต่อความต้องการของพืช และส่งเสริมให้ได้จำนวนผลผลิตที่ดีได้ น้ำหมักชีวภาพจึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถช่วยให้เกษตรกรลดต้นทุนการผลิตลงได้ ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาเปรียบเทียบการใช้ปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพต่าง ๆ ซึ่งได้มาจากเศษพืชผัก เศษเนื้อสัตว์ หรือวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร ได้แก่ ปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพจากกรรสุกร ปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพจากนํ้านม ปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพจากมะละกอ และปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพสำเร็จรูปทางการค้า ต่อผลผลิตของมะเขือเปราะพันธุ์นางพญา พร้อมทั้งบันทึกรายได้และต้นทุนการผลิตที่เกิดขึ้น เพื่อเป็นทางเลือกให้กับเกษตรกรสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในการปลูกมะเขือเปราะและลดต้นทุนการใช้ปุ๋ยเคมี เพื่อความเหมาะสมต่อการให้ผลผลิตที่มีคุณภาพและให้ผู้บริโภคได้รับคุณค่าทางโภชนาการอย่างปลอดภัยไร้สารเคมีเจือปน ตลอดจนเป็นแนวทางมุ่งสู่เกษตรอินทรีย์ต่อไป

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

การเตรียมวัสดุปลูก โดยนำหน้าดินร่วน (จากแปลงปลูกพืชสถานีพัฒนาที่ดินจันทบุรี) ปุ๋ยหมักใบพืช มูลโค แกลบเผา และแกลบมะพร้าวเผา ในอัตราส่วน 2:1:1:1 ผสมคลุกเคล้าให้เข้ากัน นำใส่กระสอบพลาสติกที่เตรียมไว้เป็นภาชนะปลูก (ขนาด 16X25 นิ้ว) ในปริมาณกระสอบละ 15 กิโลกรัม จำนวน 50 ใบ เมื่อผสมคลุกเคล้าให้เข้ากันแล้วตักใส่ภาชนะปลูกวางไว้ในที่ร่ม เพื่อป้องกันการระเหยของน้ำ

การเตรียมน้ำหมักชีวภาพ

- น้ำหมักจากกรรสุกร น้ำกรรสุกร 30 กิโลกรัม หั่นเป็นชิ้นเล็ก ๆ คลุกเคล้าให้เข้ากัน ผสมกากน้ำตาล 10 กิโลกรัม นำสารเร่งซูเปอร์ พด.2 จำนวน 1 ช้อน ผสมในน้ำ 10 ลิตร คนให้เข้ากันปิดฝาให้แน่น หมักไว้ 21 วัน กรองเอาเฉพาะของเหลวไปใช้
- น้ำหมักจากนํ้านม นำส่วนผสมนมสด 30 กิโลกรัม กากน้ำตาล 10 กิโลกรัม นำสารเร่งซูเปอร์ พด.2 จำนวน 1 ช้อน ผสมในน้ำ 10 ลิตร ใส่ลงในภาชนะ กวนให้เข้ากัน หมักทิ้งไว้ 1 เดือน จากนั้นนำมากรองเอาเฉพาะของเหลวไปใช้
- น้ำหมักจากมะละกอ นำมะละกอสุก 30 กิโลกรัม หั่นเป็นชิ้นเล็กๆ คลุกเคล้าให้เข้ากัน ผสมกากน้ำตาล 10 กิโลกรัม นำสารเร่งซูเปอร์ พด.2 จำนวน 1 ช้อน ผสมในน้ำ 10 ลิตร คนให้เข้ากันปิดฝาให้แน่น หมักไว้ 7-8 วัน กรองเอาเฉพาะของเหลวไปใช้

หลังจากการเพาะเมล็ดเป็นเวลา 14 วัน เลือกต้นกล้าที่สมบูรณ์ย้ายลงกระสอบปลูกจำนวน 50 ใบ รดน้ำเช้า-เย็น (เวลา 8.00 น. และ 17.00 น.) โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) จำนวน 5 สิ่งทดลอง ๆ ละ 10 ซ้ำ ได้แก่ 1) ชุดควบคุม (ไม่ใส่ปุ๋ยน้ำหมัก) 2) ปุ๋ยน้ำหมักจากรกสุกร 3) ปุ๋ยน้ำหมักจากน้านม 4) ปุ๋ยน้ำหมักจากมะละกอ และ 5) ปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพสำเร็จรูปทางการค้า โดยฉีดพ่นน้ำหมักชีวภาพในอัตราส่วนน้ำหมักชีวภาพ 40 มิลลิลิตร : น้ำ 20 ลิตร ลักษณะฉีดรอบทรงพุ่มต้นละ 500 มิลลิลิตร สัปดาห์ละ 1 ครั้ง เป็นระยะเวลา 90 วัน

วิเคราะห์ลักษณะทางเคมีของน้ำหมักชีวภาพ

เก็บน้ำหมักชีวภาพสูตรต่าง ๆ ที่เตรียมไว้มาวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีเพื่อหาระดับปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (ร้อยละ N) ปริมาณฟอสเฟตทั้งหมด (ร้อยละ P_2O_5) ปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมด (ร้อยละ K_2O) และวัดค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ด้วยเครื่อง pH meter (สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน, 2553)

การบันทึกข้อมูล บันทึกน้ำหนักของผลผลิตต่อครั้งที่ทำการเก็บเกี่ยว ทั้งหมด 18 ครั้ง เป็นระยะเวลา 90 วัน ได้แก่ น้ำหนักผลดี น้ำหนักผลเสีย น้ำหนักรวม (มีหน่วยเป็นกิโลกรัม) การวัดขนาดผลผลิต ได้แก่ ความยาวของผล (วัดจากขั้วของผล ถึงก้นผล) และความกว้างของผล (วัดจากเส้นผ่าศูนย์กลางของผล) บันทึกทรายได้และต้นทุนการผลิต เปรียบเทียบระหว่างสิ่งทดลองและผลผลิตที่เกิดขึ้น แล้วนำมาคำนวณหารายได้จากผลผลิต และกำไรที่ได้จากการผลิต โดยทำการบันทึกต้นทุนการผลิตดังนี้ ค่าแรงตลอดช่วงการผลิต ประกอบด้วยค่าแรงงานในการปลูกมะเขือ ค่าแรงในการดูแลฉีดพ่นน้ำหมักชีวภาพ และค่าเก็บเกี่ยวผลผลิต ค่าวัสดุการเกษตร ได้แก่ ค่าเมล็ดพันธุ์ และค่าปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพ

การวิเคราะห์ข้อมูล วิเคราะห์ค่าความแปรปรวน (Analysis of variance; ANOVA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's multiple range test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์ ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป Statistical Package for the Social Sciences (SPSS)

ผลการวิจัย และการอภิปรายผล

การวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีของน้ำหมักชีวภาพ

จากการวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีของน้ำหมักชีวภาพ พบว่า ปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพสำเร็จรูปทางการค้า มีปริมาณไนโตรเจนสูงสุดที่ร้อยละ 7.00 รองลงมาคือ น้ำหมักชีวภาพสูตรน้านม น้ำหมักชีวภาพสูตรมะละกอ และน้ำหมักชีวภาพสูตรรกสุกร โดยมีปริมาณไนโตรเจนร้อยละ 0.74, 0.61 และ 0.42 ตามลำดับ และน้ำหมักชีวภาพสูตรน้านมพบว่ามีปริมาณฟอสเฟตและโพแทสเซียมสูงสุดที่ร้อยละ 0.04 และ 0.30 ตามลำดับ รองลงมาคือ น้ำหมักชีวภาพสูตรรกสุกร มะละกอ และปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพสำเร็จรูปทางการค้า มีปริมาณฟอสเฟตที่ร้อยละ 0.02, 0.01 และ 0.01 ตามลำดับ ส่วนปริมาณร้อยละของโพแทสเซียมพบว่ามีน้ำหมักชีวภาพสูตรมะละกอ รกสุกร และปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพสำเร็จรูปทางการค้า มีปริมาณโพแทสเซียมที่ร้อยละ 0.27, 0.21 และ 0.06 ตามลำดับ (ตารางที่ 1) ซึ่งสอดคล้องกับข้อมูลของกรมพัฒนาที่ดิน (2565) ที่พบว่าปุ๋ยอินทรีย์น้านม มีปริมาณไนโตรเจนร้อยละ 0.49 รองลงมาคือปุ๋ยอินทรีย์น้ำผลไม้รวม มีปริมาณไนโตรเจนร้อยละ 0.27 และปุ๋ยอินทรีย์น้านมยังมีปริมาณร้อยละของฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมที่สูงกว่าเช่นกัน นอกจากนี้ พบว่าค่าความเป็นกรด - เบส (pH) ของน้ำหมักชีวภาพที่เตรียมไว้ใช้ในการทดลองอยู่ในช่วง 4.06 - 4.65 (ตารางที่ 1) ซึ่งเกิดสภาพกรดขึ้นเนื่องจากการย่อยสลายของสารอินทรีย์ระหว่างกระบวนการหมัก ดังนั้นก่อนนำไปฉีดพ่นลงกับต้นพืชควรต้องทำการเจือจางน้ำหมักชีวภาพก่อน โดยในการศึกษาครั้งนี้จะเจือจางน้ำหมักชีวภาพในอัตรา 40 มิลลิลิตร ต่อ น้ำ 20 ลิตร

ตารางที่ 1 ผลการวิเคราะห์คุณภาพทางเคมีของน้ำหมักชีวภาพ

รายการวิเคราะห์	น้ำหมักชีวภาพ			
	รอกสุก	น้ำนม	มะละกอ	สูตรสำเร็จรูปทางการค้า
ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (ร้อยละ N)	0.42	0.74	0.61	7.00
ปริมาณฟอสเฟตทั้งหมด (ร้อยละ P_2O_5)	0.02	0.04	0.01	0.01
ปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมด (ร้อยละ K_2O)	0.21	0.30	0.27	0.06
ความเป็นกรด-ด่าง (pH)	4.35	4.54	4.06	4.65

ผลการวิเคราะห์การเจริญเติบโตของขนาดผลผลิตและปริมาณผลผลิตของมะเขือเปราะพันธุ์นางพญา

จากการศึกษาอิทธิพลของปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพทั้ง 5 สิ่งทดลอง ได้แก่ 1) ชุดควบคุม (ไม่ใส่ปุ๋ยน้ำหมัก) 2) ปุ๋ยน้ำหมักจากรกสุก 3) ปุ๋ยน้ำหมักจากน้ำนม 4) ปุ๋ยน้ำหมักจากมะละกอ และ 5) ปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพสำเร็จรูปทางการค้า ที่มีต่อผลผลิตและขนาดของผลมะเขือเปราะพันธุ์นางพญา เป็นระยะเวลา 90 วัน พบว่า เส้นผ่านศูนย์กลางผลเฉลี่ย ความยาวผลเฉลี่ย น้ำหนักผลติดต้น น้ำหนักผลเสียติดต้น น้ำหนักรวมทั้งหมดติดต้น จำนวนผลดี จำนวนผลเสีย ในช่วงการเก็บผลผลิตตั้งแต่ครั้งที่ 1 ถึงครั้งที่ 18 ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ อย่างไรก็ตามการใส่ปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพช่วยส่งเสริมปริมาณผลผลิตของมะเขือเปราะพันธุ์นางพญาได้ดีกว่าการไม่ใส่ปุ๋ยน้ำหมัก โดยจากผลการวิเคราะห์พบว่า

เส้นผ่านศูนย์กลางผลเฉลี่ย จากการบันทึกเส้นผ่านศูนย์กลางผลเฉลี่ยต่อผลต่อครั้ง พบว่า สิ่งทดลองที่มีเส้นผ่านศูนย์กลางผลเฉลี่ยมากที่สุด ได้แก่ สิ่งทดลองที่ 1, 4, 2, 5 และ 3 ตามลำดับ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 3.94, 3.91, 3.90, 3.87 และ 3.84 เซนติเมตร ตามลำดับ (ตารางที่ 2)

ความยาวผลเฉลี่ย จากการบันทึกความยาวผลเฉลี่ยต่อผลต่อครั้ง พบว่า สิ่งทดลองที่มีความยาวผลเฉลี่ยมากที่สุด ได้แก่ สิ่งทดลองที่ 5, 1, 4, 2 และ 3 ตามลำดับ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.71, 4.50, 4.46, 4.14 และ 4.00 เซนติเมตร ตามลำดับ (ตารางที่ 2)

น้ำหนักผลติดต้น จากการบันทึกน้ำหนักผลติดต้นต่อครั้ง พบว่า สิ่งทดลองที่มีน้ำหนักผลติดต้นเฉลี่ยมากที่สุด ได้แก่ สิ่งทดลองที่ 5, 3, 2, 1 และ 4 ตามลำดับ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 175.61, 170.79, 158.42, 148.64, และ 136.42 กรัม ตามลำดับ (ตารางที่ 2)

น้ำหนักผลเสียติดต้น จากการบันทึกน้ำหนักผลเสียติดต้นต่อครั้ง พบว่า สิ่งทดลองที่มีน้ำหนักผลเสียติดต้นเฉลี่ยมากที่สุด ได้แก่ สิ่งทดลองที่ 2, 5, 3, 1 และ 4 ตามลำดับ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 33.71, 26.61, 25.63, 25.19 และ 20.32 กรัม ตามลำดับ (ตารางที่ 2)

น้ำหนักรวมทั้งหมดติดต้น จากการบันทึกน้ำหนักรวมทั้งหมดติดต้นต่อครั้ง พบว่า สิ่งทดลองที่มีน้ำหนักรวมทั้งหมดติดต้นเฉลี่ยมากที่สุด ได้แก่ สิ่งทดลองที่ 5, 3, 2, 1 และ 4 ตามลำดับ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 202.22, 196.42, 192.13, 173.83 และ 156.74 กรัม ตามลำดับ (ตารางที่ 2)

จำนวนผลดีติดต้น จากการบันทึกจำนวนผลดีเฉลี่ยต่อต้นต่อครั้ง พบว่า สิ่งทดลองที่มีจำนวนผลดีติดต้นเฉลี่ยมากที่สุด ได้แก่ สิ่งทดลองที่ 5, 2, 3, 1 และ 4 ตามลำดับ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 4.19, 4.08, 4.03, 3.55 และ 3.25 ผล ตามลำดับ (ตารางที่ 2)

จำนวนผลเสียติดต้น จากการบันทึกจำนวนผลเสียเฉลี่ยต่อต้นต่อครั้ง พบว่า สิ่งทดลองที่มีจำนวนผลเสียติดต้นเฉลี่ยมากที่สุด ได้แก่ สิ่งทดลองที่ 2, 5, 1, 4 และ 3 ตามลำดับ มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 0.82, 0.68, 0.63, 0.58 และ 0.49 ผล ตามลำดับ (ตารางที่ 2)

จากผลการวิเคราะห์ ต้นมะเขือเปราะที่ใส่ปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพสำเร็จรูปทางการค้า มีแนวโน้มส่งผลให้จำนวนผลและผลผลิตของมะเขือเปราะพันธุ์นางพญามีค่าที่ดีกว่าการใส่ปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพชนิดอื่น ๆ แต่อย่างไรก็ตาม พบว่าการใส่ปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพจากน้ำนม สามารถส่งผลให้มะเขือเปราะพันธุ์นางพญามีน้ำหนักผลดี น้ำหนักรวมทั้งหมดต่อต้น และจำนวนผลดี มีค่าที่ไม่แตกต่างกับการใส่ปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพสำเร็จรูปทางการค้า นอกจากนี้การใส่ปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพจากน้ำนมพบว่าจะสามารถลดปริมาณน้ำหนักผลเสียต่อต้น และจำนวนผลเสียต่อต้นได้ดีเช่นกัน เนื่องมาจากปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพจากน้ำนมมีปริมาณธาตุอาหารหลัก ได้แก่ ไนโตรเจนร้อยละ 0.74 ฟอสฟอรัสร้อยละ 0.04 และโพแทสเซียมร้อยละ 0.30 ซึ่งมีค่าที่สูงกว่าน้ำหมักชีวภาพจากผลไม้ชนิดอื่น ๆ (ตารางที่ 1) ซึ่งธาตุอาหารหลักไนโตรเจน (% Total N) เป็นองค์ประกอบของโปรตีน คลอโรฟิลล์ เอนไซม์ และวิตามิน หลายชนิด ช่วยในการเจริญเติบโตของพืช ฟอสฟอรัส (% Total P₂O₅) เป็นองค์ประกอบกรดนิวคลีอิก ฟอสโฟลิปิด หรือ ATP และโคเอนไซม์หลายชนิด ช่วยเร่งการออกดอกและการสร้างเมล็ดได้ และโพแทสเซียมที่ละลายน้ำได้ (% Water Soluble K₂O) กระตุ้นการทำงานของเอนไซม์หลายชนิดที่ทำหน้าที่ในการสร้างแป้ง น้ำตาล และโปรตีน ควบคุมการปิดเปิดของปากใบ ส่งเสริมการเคลื่อนย้ายน้ำตาลจากใบสู่ผลอีกด้วย (ยงยุทธ, 2552) นอกจากนี้ในน้ำหมักชีวภาพยังมีปริมาณฮอร์โมนออกซิน และจิบเบอเรลลินในน้ำหมักจากพืชและสัตว์ อาจส่งผลช่วยต่อการติดดอกออกผลในพืชได้ (อาณัฐ, 2549) ซึ่งทำให้มะเขือเปราะพันธุ์นางพญามีน้ำหนักผล และจำนวนผลที่มีค่าที่ใกล้เคียงกับการใช้ปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพสำเร็จรูปทางการค้าได้ ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ สุจิตรา และคณะ (2565) พบว่าน้ำหมักชีวภาพสูตรนมสด ส่งเสริมการเจริญเติบโต เร่งการแตกกอของต้นข้าว ความยาวรวง และเมล็ดต่อรวงของข้าวพันธุ์ กข41 ได้มากที่สุด เมื่อเทียบกับน้ำหมักชีวภาพจากสูตรอื่นๆ และจากการวิเคราะห์ทางด้านเคมีพบว่าน้ำหมักชีวภาพสูตรนมสด มีระดับปริมาณของไนโตรเจนและฟอสเฟตสูงสุด (ร้อยละ 0.23 และ 0.010 ตามลำดับ) ซึ่งเป็นธาตุหลักที่ช่วยในการเจริญเติบโตและคุณภาพของผลผลิต เนื่องจากไนโตรเจนมีสมบัติที่ช่วยด้านการเจริญเติบโตของพืช โดยพืชจะดูดซึมสารไนโตรเจนไปใช้ในรูปแบบไนเตรทให้ออน ทำให้ใบมีความแข็งแรงเจริญเติบโตได้ดี และให้ผลที่สมบูรณ์ (Aslam et al., 2001) ส่วนสารประกอบฟอสเฟตยังเป็นธาตุสำคัญในการสร้างผลและเมล็ดของพืช นอกจากนี้ปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพจากน้ำนมมีกรดแลคติก มีประสิทธิภาพในการย่อยสลายหินปูนและสลายการยึดเกาะของดินเหนียวที่แน่นที่เรียกว่า ดินดาน ทำให้ดินร่วนซุย และปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพจากน้ำนมยังมีราคาที่ถูก สามารถทำปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพจากน้ำนมใช้เองได้อีกด้วย (อิศพัฒน์, 2558)

ตารางที่ 2 แสดงข้อมูลจำนวนผลผลิตและขนาดของผลผลิตเฉลี่ยของผลมะเขือเปราะพันธุ์นางพญาภายหลังฉีดพ่นน้ำหมักชีวภาพสูตรต่างๆ เป็นระยะเวลา 90 วัน

กรรมวิธี	จำนวนผลและขนาดของผลผลิตเฉลี่ยต่อการเก็บเกี่ยวต่อต้นต่อครั้ง						
	เส้นผ่านศูนย์กลาง ผลเฉลี่ย (ซ.ม.)	ความยาวผล เฉลี่ย (ซ.ม.)	น้ำหนักผลดี/ ต้น (กรัม)	น้ำหนัก ผลเสีย/ต้น (กรัม)	น้ำหนักรวม ทั้งหมด/ต้น (กรัม)	จำนวนผลดี (ผล)	จำนวน ผลเสีย (ผล)
ชุดควบคุม	3.94±0.14	4.50±0.13	148.64±19.20	25.19±3.56	173.83±18.32	3.55±0.45	0.63±0.09
รอกสูกร	3.90±0.13	4.14±0.17	158.42±24.23	33.71±6.48	192.13±26.34	4.08±0.62	0.82±0.16
น้ำนม	3.84±0.13	4.00±0.18	170.79±30.67	25.63±2.53	196.42±32.73	4.03±0.78	0.49±0.07
มะละกอ	3.91±0.18	4.46±0.13	136.42±23.93	20.32±5.09	156.74±24.91	3.25±0.58	0.58±0.15

กรรมวิธี	จำนวนผลและขนาดของผลผลิตเฉลี่ยต่อการเก็บเกี่ยวต่อต้นต่อครั้ง						
	เส้นผ่าน	ความยาวผล	น้ำหนักผลดี/	น้ำหนัก	น้ำหนักรวม	จำนวนผลดี	จำนวน
	ศูนย์กลาง ผลเฉลี่ย (ซ.ม.)	เฉลี่ย (ซ.ม.)	ต้น (กรัม)	ผลเสีย/ต้น (กรัม)	ทั้งหมด/ต้น (กรัม)	(ผล)	ผลเสีย (ผล)
สูตร สำเร็จรูป ทางการค้า	3.87±0.13	4.71±0.93	175.61±22.93	26.61±5.72	202.22±24.64	4.19±0.60	0.68±0.13
F-test	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

หมายเหตุ : ns ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซนต์

ผลการวิเคราะห์รายได้และต้นทุนการผลิต

จากข้อมูลการวิเคราะห์รายได้ ต้นทุนการผลิต และผลตอบแทนทางด้านเศรษฐกิจของผลผลิตมะเขือเปราะพันธุ์นางพญา ที่ได้ พบว่ากรรมวิธีที่มีต้นทุนต่ำสุด ได้แก่ ปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพจากชุดควบคุม ปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพจากมะละกอ ปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพจากน้ำนม ปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพจากกรรสุกร และปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพสำเร็จรูปทางการค้า โดยมีต้นทุนผันแปรเท่ากับ 6,300, 6,965, 8,827, 9,492 และ 31,836 บาทต่อไร่ ตามลำดับ กรรมวิธีที่ได้ผลผลิตสูงสุดได้แก่ ปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพสำเร็จรูปทางการค้า ปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพจากน้ำนม ปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพจากกรรสุกร ปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพจากชุดควบคุม และปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพจากมะละกอ ตามลำดับ ได้ผลผลิตเฉลี่ยเท่ากับ 3,858.36, 3,747.69, 3,665.84, 3,316.68 และ 2,990.60 กิโลกรัมต่อไร่ ตามลำดับ เมื่อขยายผลผลิตมะเขือเปราะกิโลกรัมละ 30 บาท กรรมวิธีที่มีรายได้สูงสุด ได้แก่ ปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพสำเร็จรูปทางการค้า ปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพจากน้ำนม ปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพจากกรรสุกร ปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพจากชุดควบคุม และปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพจากมะละกอ ตามลำดับ คิดเป็นเงินเท่ากับ 115,750.8, 112,430.7, 109,975.2, 99,500.4 และ 89,718.0 บาทต่อไร่ ตามลำดับ แต่อย่างไรก็ตามกรรมวิธีที่ได้กำไรสูงสุด ได้แก่ ปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพจากน้ำนม ปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพจากกรรสุกร ปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพจากชุดควบคุม ปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพสำเร็จรูปทางการค้า และปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพจากมะละกอ ตามลำดับ คิดเป็นกำไรผลตอบแทนเหนือต้นทุนผันแปรเท่ากับ 103,603.7, 100,483.2, 93,200.4, 83,914.8 และ 82,753 บาทต่อไร่ ตามลำดับ (ตารางที่ 3) ดังนั้นการผลิตมะเขือเปราะพันธุ์นางพญาในพื้นที่ 1 ไร่ กรรมวิธีที่มีต้นทุนต่ำสุด และได้ผลตอบแทนเหนือต้นทุนผันแปรดีที่สุด ได้แก่ การใช้ปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพจากน้ำนม ซึ่งสามารถหาวัตถุดิบการทำได้ง่ายจากในท้องถิ่น เกษตรกรสามารถผลิตปุ๋ยน้ำหมักใช้ตัวเอง และยังมีปริมาณของธาตุหลักที่เพียงพอสำหรับการเจริญเติบโตและคุณภาพของผลผลิต ซึ่งสามารถเป็นทางเลือกให้กับเกษตรกรสามารถนำมาใช้ทดแทนปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพจากสูตรการค้า เพื่อลดต้นทุนค่าใช้จ่ายการใช้ปุ๋ยเคมี และผู้บริโภคได้รับคุณค่าทางโภชนาการอย่างปลอดภัยไร้สารเคมีเจือปนได้

ตารางที่ 3 แสดงผลตอบแทนทางด้านการเศรษฐกิจที่ได้ของผลผลิตมะเขือเปราะพันธุ์นางพญา

รายการ	น้ำหมักชีวภาพ				สูตรสำเร็จรูปทางการค้า
	ชุดควบคุม	รอกสูกร	น้ำนม	มะละกอ	
1 ค่าแรงงาน					
1.1 ค่าปลูกระยะ	300	300	300	300	300
1.2 ค่าฉีดพ่นศัตรูพืช พด.7 (4 ครั้ง)	600	600	600	600	600
1.3 ค่าฉีดพ่นน้ำหมักชีวภาพ (24 ครั้ง)	2,400	2,400	2,400	2,400	2,400
1.4 ค่าเก็บผลผลิต 18 ครั้ง	2,000	2,000	2,000	2,000	2,000
2 ค่าวัสดุการเกษตร					
2.1 ค่าเมล็ดพันธุ์	700	700	700	700	700
2.2 ค่าตัดแต่งต้นสาว (1 ครั้ง)	300	300	300	300	300
2.3 ค่าปุ๋ย					
- ชุดควบคุม (ไม่ฉีดพ่นหมักชีวภาพ)	0	0	0	0	0
- น้ำหมักชีวภาพจากรอกสูกร	0	3,192	0	0	0
- น้ำหมักชีวภาพจากน้ำนม	0	0	2,527	0	0
- น้ำหมักชีวภาพจากมะละกอ	0	0	0	665	0
- น้ำหมักชีวภาพสำเร็จรูปทางการค้า	0	0	0	0	25,536
ต้นทุนผันแปร (บาท/ไร่)	6,300	9,492	8,827	6,965	31,836
ผลผลิต (กิโลกรัม/ไร่)	3,316.68	3,665.84	3,747.69	2,990.60	3,858.36
ราคาผลผลิต (บาท/กิโลกรัม)	30	30	30	30	30
มูลค่าผลผลิต (บาท/ไร่)	99,500.4	109,975.2	112,430.7	89,718.0	115,750.8
ผลตอบแทนเหนือต้นทุนผันแปร (บาท/ไร่)	93,200.4	100,483.2	103,603.7	82,753	83,914.8

บทสรุป

ปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพจากน้ำนมสามารถส่งผลให้มะเขือเปราะพันธุ์นางพญามีน้ำหนักผลดี และน้ำหนักรวมทั้งหมดต่อต้นมีค่าที่ไม่แตกต่างกับชุดควบคุม (ไม่ใส่ปุ๋ย) และการใส่ปุ๋ยน้ำหมักสูตรการค้า แต่ปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพจากน้ำนมสามารถลดปริมาณน้ำหนักผลเสียต่อต้น และจำนวนผลเสียต่อต้นของมะเขือเปราะได้อีกด้วย ส่วนผลการวิเคราะห์รายได้และต้นทุนในการผลิตมะเขือเปราะพันธุ์นางพญาในพื้นที่ 1 ไร่ กรรมวิธีที่มีต้นทุนต่ำสุด และได้ผลตอบแทนเหนือต้นทุนผันแปรดีที่สุด ได้แก่ การใช้ปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพจากน้ำนม ซึ่งสามารถหาวัตถุดิบการทำได้ง่ายจากในท้องถิ่นและมีราคาถูก และน้ำหมักชีวภาพสูตรนมสดยังมีระดับปริมาณของไนโตรเจนและฟอสเฟตสูงสุด ซึ่งเป็นธาตุหลักที่ช่วยในการเจริญเติบโตและคุณภาพของผลผลิต ดังนั้นจึงสามารถเป็นทางเลือกให้กับเกษตรกรสามารถนำมาใช้ทดแทนปุ๋ยน้ำหมักสูตรการค้า เพื่อลดต้นทุนค่าใช้จ่ายการใช้ปุ๋ยเคมี และผู้บริโภคได้รับคุณค่าทางโภชนาการอย่างปลอดภัยไร้สารเคมีเจือปน ตลอดจนเป็นแนวทางมุ่งสู่เกษตรอินทรีย์ต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถานที่พัฒนาที่ดินจังหวัดจันทบุรี และสาขาวิชาเทคโนโลยีการเกษตร คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี ที่เอื้อเฟื้อสถานที่ทดลองในการดำเนินการวิจัยให้ลุล่วงเป็นไปอย่างเรียบร้อยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- กรมพัฒนาที่ดิน. (2565). เอกสารเพื่อการถ่ายทอดเทคโนโลยี ชุดความรู้และเทคโนโลยีการพัฒนาดิน: มีอะไรในปุ๋ยอินทรีย์น้ำ. ค้นเมื่อ 27 มิถุนายน 2565. <https://shorturl.asia/345Cv>
- จานลักษณ์ ขนบดี. (2541). การผลิตเมล็ดพันธุ์ผัก. สำนักพิมพ์โอเดียนสโตร์: กรุงเทพฯ.
- ณานิกา แซ่แง ชุกกลิ่น, อนงก สวาทอินทร์ และสุคนธ์ เคลือหลี่. (2565). ผลของน้ำหมักชีวภาพจากเศษปลาเหลือทิ้งด้วยเชื้อ *Lactobacillus casei* ต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของผักกวางตุ้งฮ่องเต้. วารสารวิจัย มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย. 14(1): 253-265.
- ณัฐวรรินท์ ฐะคำ และวัชรีย์ พันเพื่อนหา. (2562). ศึกษาประสิทธิภาพของน้ำหมักชีวภาพที่ได้จากเมล็ดลำไยและเปลือกลำไยเปลือกกล้วยน้ำว้า และเปลือกแถมต่อการเจริญเติบโตของผักสลัดกรีนโอ๊ค. วารสารวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น. 44(2): 266-272.
- พรพิมล เรืองศิริ. (2544). สวนสวยกินได้. สำนักพิมพ์ซีเอ็ดดูเคชั่น: กรุงเทพฯ.
- ภารดี แซ่อึ้ง, อรุณี อุทัยพิบูลย์ และสิริวรรณ สมิตธิอาภรณ์. (2563). ผลของน้ำหมักชีวภาพต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของถั่วเหลืองฝักสด (*Glycine max* (L.) Merrill). วารสารวิจัยและพัฒนา วไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์. 15(2): 59-66.
- ยงยุทธ โอสถสภ. (2552). ธาตุอาหารพืช. สำนักพิมพ์มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์: กรุงเทพฯ.
- รุจิรา สัมมะสุต. (2550). มะเขือ. วารสารเคหการเกษตร. 7: 195-196.
- สุจิตรา เรืองเดชาวัฒน์, พรวิภา สมนะวงศ์ และอรพรรณ เกื้อนรอด. (2565). ผลของน้ำหมักชีวภาพต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของข้าวพันธุ์ กข 41. วารสารวิชาการวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏนครสวรรค์. 14(19): 1-11.
- สำนักวิทยาศาสตร์เพื่อการพัฒนาที่ดิน. (2553). คู่มือการปฏิบัติงานกระบวนการวิเคราะห์ตรวจสอบดินทางเคมี. กรมพัฒนาที่ดิน: กรุงเทพฯ.
- อติศพัฒน์ วรรณสุทธิ. (2558). ปราชญ์เกษตรผลิต NGV ด้วยเศษอาหารและจุลินทรีย์หน่อกล้วย. ค้นเมื่อ 27 มิถุนายน 2565. <https://www.rakbankerd.com/agriculture/rbk-view.php?id=176>
- อาณัฐ ต้นโซ. (2549). เกษตรธรรมชาติประยุกต์: หลักการ แนวคิด เทคนิคปฏิบัติในประเทศไทย. พิมพ์ครั้งที่ 1. สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ: กรุงเทพฯ.
- Aslam M., Travis R.L. and Rains D.W. (2001). Enhancement of nitrate reductase activity and metabolic nitrate concentration by methionine sulfoximine in barley roots. *Plant Sciences*. 161(1): 133-142.
- Ghaly A.E., Ramakrishnan V.V., Brooks M.S., Budge S.M. and Dave D. (2013). Fish processing wastes as a potential source of proteins, amino acids, and oils: a critical review. *Journal of Microbial & Biochemical Technology*. 5(4): 107-129.

Shi S., Li J., Guan W. and Blersch, D. (2018). Nutrient value of fish manure waste on lactic acid fermentation by *Lactobacillus pentosus*. The Royal Society of Chemistry. 8: 31267-31274.

Received: July 28, 2022; Revised: August 18, 2022; Accepted: August 18, 2022

ผลของความเค็มต่ออัตราการจับคู่ผสมพันธุ์ การฟักไข่ และอัตราการรอดตายของ
ตัวอ่อนระยะซูเอียของปูแป้น (*Varuna yui* Hwang & Takeda, 1984)
Effect of Salinity on Mating, Hatching and Survival Rate of the Zoea Larvae of
Sundaic Paddler Crab (*Varuna yui* Hwang & Takeda, 1984)

ดุษิต ศรีวิไล^{1*}, ปฐมาภรณ์ ทิลารักษ์¹, ปิริยาภรณ์ อันนอมงาม¹, อมรรัตน์ สุวรรณโพธิ์ศรี¹พัชรา นิธิโรจน์ภักดี¹ และกรรณิการ์ เจริญสุข¹Dusit Srivilai^{1*}, Patamaporn Tilarux¹, Piriyaorn Anartngam¹, Amornrat Suwanposri¹,Patchara Nithirojpakdee¹ and Kannikar Charoensuk¹¹คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรมและการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก วิทยาเขตจันทบุรี จังหวัดจันทบุรี

*Corresponding Author E-mail : dusit_sr@rmutto.ac.th

บทคัดย่อ

ปูแป้น (*Varuna yui*) เป็นปูแสมชนิดหนึ่งที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของประเทศไทย ในช่วงเวลาที่ผ่านมา ประชากรปูแป้นลดจำนวนลงอย่างมากเนื่องจากถูกจับขึ้นมารับประทานเป็นจำนวนมากโดยเฉพาะในช่วงฤดูผสมพันธุ์ การศึกษาครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการเพิ่มจำนวนประชากรปูแป้นในธรรมชาติ โดยทำการทดลองผลของระดับความเค็มของน้ำ 7 ระดับ (0, 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 ส่วนในพัน) ต่ออัตราการจับคู่ผสมพันธุ์ การฟักไข่ และการรอดตายของลูกปูระยะซูเอีย 1 ของปูแป้น ผลการศึกษาพบว่าความเค็มมีผลต่อการจับคู่ผสมพันธุ์ การฟักไข่ และการรอดตายของลูกปูระยะซูเอีย 1 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ปูแป้นไม่จับคู่ผสมพันธุ์และไม่ฟักไข่ที่ระดับความเค็ม 0 ถึง 15 ส่วนในพัน และการจับคู่ผสมพันธุ์ร้อยละ 100 เกิดขึ้นที่ระดับความเค็ม 20 และ 25 ส่วนในพัน จำนวนลูกปูระยะซูเอีย 1 ที่ฟักใน ระดับความเค็ม 20 และ 25 ส่วนในพัน ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) เมื่อนำลูกปูระยะซูเอีย 1 ไปอยู่ในความเค็ม ต่างกัน 7 ระดับ พบว่าลูกปูระยะซูเอีย 1 ไม่สามารถอยู่รอดได้ที่ระดับความเค็ม 0 และ 5 ส่วนในพัน และลูกปูระยะซูเอีย 1 ที่ อยู่ในความเค็ม 20 มีอัตราการรอดตายสูงที่สุดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) ผลการศึกษานี้ชี้ว่าระดับความเค็มที่ เหมาะสมสำหรับการเพาะพันธุ์ปูแป้นและปล่อยลูกปูระยะซูเอีย 1 สู่น้ำธรรมชาติเพื่อการใช้ประโยชน์อย่างยั่งยืน คือ ระดับความเค็ม 20 ถึง 25 ส่วนในพัน

คำสำคัญ: ปูแป้น, ความเค็ม, การจับคู่ผสมพันธุ์, การฟักไข่, อัตราการรอดตาย

Abstract

Sundaic paddler crab (*Varuna yui*) is one of economic grapsid crabs in Thailand. Over the past ten years, the crab population has decreased dramatically, because they are caught for consuming during their breeding season. Increasing the Sundaic paddler crab numbers from the hatchery is necessary. The aim of this study was to determine the optimal water conditions for increasing the population of Sundaic paddler crab from hatcheries. An investigation was conducted to determine salinity effects on the mating and hatching rate and survival of zoea 1 stage. The results showed that seven salinity levels (0, 5, 10, 15, 20, 25 and 30 ppt) had a significant ($p < 0.05$) effect on mating success, hatching and zoea survival of Sundaic paddler crab. Mating and hatching were not found in salinity 0 to 15 ppt. The mating success was 100 percentages for salinity of 20 and 25 ppt. Number of zoea 1, hatched at salinity of 20 and 25 ppt were not significant different ($p > 0.05$). When hatched zoea 1 stage were stocked in seven salinity levels, it was found that they could not survive in salinity of 0 to 5 ppt and the survival of zoea 1 in salinity 20 were significant highest ($p < 0.05$). This study suggests the optimal salinity level for breeding *V. yui*, to release into the nature is 20 to 25 ppt.

Keywords: *Varuna yui*, Salinity, Mating, Hatching, Survival

บทนำ

ปูแป้น (*Varuna yui*) จัดเป็นปูแสมชนิดหนึ่งที่มีการแพร่กระจายอย่างกว้างขวางในภูมิภาคอินโดแปซิฟิกตะวันออก (Indo West Pacific) ประเทศไทยพบปูแป้นในทุกจังหวัดชายฝั่งทะเล (Naiyanaetr, 1998) ปูแป้นจัดเป็นหนึ่งในสัตว์น้ำที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจในท้องถิ่นของภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ การบริโภคปูแป้นของคนในภูมิภาคนี้เป็นไปในลักษณะเดียวกัน คือ บริโภคปูแป้นในระยะที่มีการพัฒนาระบบสืบพันธุ์เต็มที่ โดยแช่ปูทั้งตัวในซอสปรุงรสแล้วบริโภคสดหรือนำไปเป็นส่วนประกอบในอาหารอื่น ๆ (Carpenter and Niem, 1998) ในประเทศไทยนิยมรับประทานปูแป้นสดโดยตรงในน้ำปลาหรือนำมาประกอบอาหารประเภทยำ โดยในแต่ละปีประเทศไทยมีการบริโภคปูแสมซึ่งรวมถึงปูแป้นด้วยมากถึง 18,000 ตัน โดยเป็นปูที่ถูกจับภายในประเทศ 12,000 ตัน ส่วนที่เหลือถูกนำเข้าจากประเทศพม่าและกัมพูชา (บรรจง, 2552) อย่างไรก็ตามด้วยเหตุที่ประเทศไทยยังไม่เคยมีการเพาะเลี้ยงปูแป้นมาก่อน ปูแป้นเหล่านี้จึงเป็นปูที่ถูกจับจากธรรมชาติทั้งหมด

ด้วยเหตุที่ความนิยมบริโภคปูแป้นเกิดจากระบบสืบพันธุ์ที่พัฒนาเต็มที่พร้อมสำหรับการผสมพันธุ์ การบริโภคปูแป้นจึงเป็นการขัดขวางกระบวนการสืบพันธุ์ตามธรรมชาติ เมื่อประกอบกับความต้องการบริโภคที่สูงมากในแต่ละปีทำให้ปัจจุบันปูแป้นเข้าสู่สภาวะการถูกนำใช้ประโยชน์เกินศักยภาพ (Over exploitation) และทำให้เกิดการลดลงของประชากรปูแป้นในธรรมชาติอย่างรวดเร็ว (บรรจง, 2552; ดุสิต และคณะ, 2553) อย่างไรก็ตามปัญหาที่เกิดขึ้นนี้ได้กระตุ้นให้หน่วยงานที่เกี่ยวข้องรวมถึงชาวประมงพื้นบ้านได้เริ่มตระหนักถึงปัญหา ให้ความสำคัญ และริเริ่มกิจกรรมต่าง ๆ เพื่อการอนุรักษ์และใช้ประโยชน์จากปูแป้นอย่างยั่งยืน “ธนาคารปูแป้น” เป็นกิจกรรมหนึ่งที่ชาวประมงพื้นบ้านในอำเภอขลุง จังหวัดจันทบุรี จัดทำขึ้นโดยการทดลองเพาะพันธุ์ปูแป้นและปล่อยลูกปูวัยอ่อนคืนสู่ธรรมชาติ โดยมุ่งหวังให้ลูกปูที่เพาะพันธุ์ขึ้นได้เจริญเติบโตเป็นปูตัวเต็มวัยทดแทนประชากรปูในแหล่งอาศัยที่ถูกใช้ประโยชน์ในแต่ละปี ซึ่งจะเป็นทั้งการอนุรักษ์และฟื้นฟูประชากรปูแป้นในพื้นที่ในอนาคต อย่างไรก็ตามปัญหาสำคัญสำหรับชุมชนในการดำเนินการเพาะพันธุ์และปล่อยลูกปูแป้นคืนสู่ธรรมชาติให้ประสบผลสำเร็จนั้นมีความ

จำเป็นต้องอาศัยความรู้พื้นฐานหลายประการ โดยเฉพาะอย่างยิ่งอิทธิพลของความเค็มของน้ำที่มีต่อการดำรงชีวิตของปูแป้น เนื่องจากปูแป้นเป็นปูสองน้ำที่ตัวเต็มวัยอาศัยในแหล่งน้ำจืดและต้องอพยพไปผสมพันธุ์ในทะเลเพื่อให้ตัวอ่อนเจริญเติบโตแล้วเดินทางกลับมาอาศัยในพื้นที่น้ำจืด (catadromous) (Hwang and Takeda, 1986) ทำให้ความเค็มของน้ำเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญที่จะส่งผลกระทบต่อดำรงชีวิตของปูแป้นในแต่ละช่วงวัยเป็นอย่างมาก นอกจากนี้ที่ตั้งของกิจกรรมเพาะพันธุ์ปูแป้นของชุมชนส่วนใหญ่มักอยู่ติดกับคลองที่ระดับความเค็มของน้ำมีการเปลี่ยนแปลงตลอดเวลาทั้งในรอบวันและตามฤดูกาล ดังนั้นระดับความเค็มของน้ำขณะปล่อยลูกปูแป้นจึงเป็นหนึ่งในปัจจัยสำคัญอย่างยิ่งที่จะมีผลต่ออัตราการรอดตายของลูกปู โดยความเค็มเป็นหนึ่งในปัจจัยที่มีความสำคัญต่อการดำรงชีวิตของสัตว์น้ำกลุ่มครัสเตเชียน เช่น กุ้งและปู ในหลายด้าน เช่น การลอกคราบ การเจริญเติบโต และการรอดตาย เป็นต้น (Anger, 2003) นอกจากนี้ความเค็มยังมีอิทธิพลต่อชีวเคมีและพัฒนาการของตัวอ่อนอีกด้วย (Torres et al., 2011)

ด้วยเหตุนี้การศึกษาครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาระดับความเค็มที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเพาะพันธุ์ปูแป้นและปล่อยลูกปูแป้นระยะชูกะบือลงในแหล่งน้ำธรรมชาติ ซึ่งนอกจากจะเป็นข้อมูลพื้นฐานในการดำเนินกิจกรรม “ธนาคารปูแป้น” ให้ประสบความสำเร็จแล้ว องค์ความรู้ที่ได้ยังสามารถนำไปใช้ประโยชน์ในด้านการเพาะเลี้ยงเพื่อการใช้ประโยชน์จากทรัพยากรปูแป้นอย่างยั่งยืนต่อไป

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

สัตว์ทดลอง

ปูแป้น (*Varuna yui*) ที่ใช้ในการศึกษาเป็นปูระยะสมบูรณ์เพศ มีการพัฒนาระบบสืบพันธุ์เต็มที่ และพร้อมสืบพันธุ์โดยถูกรวบรวมขณะเกิดการอพยพในพื้นที่ตำบลเกรียนหัก อำเภอลำลูกเกด จังหวัดจันทบุรี มีความกว้างกระดองระหว่าง 2.97 ถึง 4.23 เซนติเมตร และมีความกว้างกระดองเฉลี่ย 3.62 ± 0.57 เซนติเมตร โดยนำมาเลี้ยงแบบแยกเพศและปรับสภาพในน้ำที่มีระดับความเค็ม 20 ส่วนในพัน และอุณหภูมิอยู่ในช่วง 25 - 27 องศาเซลเซียส ซึ่งเป็นระดับความเค็มและอุณหภูมิของน้ำในลำคลองในพื้นที่ตำบลเกรียนหักขณะเกิดการอพยพเพื่อการผสมพันธุ์ของปูแป้น เป็นเวลา 3 วันก่อนการทดลอง ให้อาหารเม็ดปลาตุ๋กวันละ 1 ครั้ง ตลอดการเลี้ยงมีการให้อากาศ เปลี่ยนถ่ายน้ำ และควบคุมคุณภาพให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม

การเตรียมน้ำสำหรับการทดลอง

เตรียมน้ำที่มีความเค็มแตกต่างกัน 7 ระดับ ได้แก่ 0, 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 ส่วนในพัน โดยดัดแปลงจากวิธีการของ Simith et al. (2012) โดยใช้น้ำจากคลองธรรมชาติในพื้นที่ตำบลเกรียนหัก ซึ่งมีความเค็ม 20 ส่วนในพัน กรองละเอียดด้วยถุงกรองผ้าป่านใยแก้ว 4 ชั้น ฆ่าเชื้อด้วยคลอรีน แล้วปรับระดับความเค็มของน้ำด้วยการเจือจางด้วยน้ำจืดหรือผสมน้ำความเค็มสูงจากนาเกลือที่มีความเค็ม 180 ส่วนในพัน ซึ่งผ่านการกรองและฆ่าเชื้อ ทำการตรวจวัดและควบคุมคุณภาพน้ำให้มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) เท่ากับ 7.9 - 8.3 ค่าความเป็นด่าง (Alkalinity) เท่ากับ 100 - 150 มิลลิกรัมต่อลิตร ตลอดการทดลอง

การวางแผนการทดลอง

ในแต่ละการทดลองวางแผนการทดลองแบบสุ่มตลอด (Completely Randomized Design; CRD) โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 7 ชุดการทดลอง (Treatment) ชุดการทดลองละ 3 ซ้ำ (Replicate) ดังต่อไปนี้ ชุดการทดลองที่ 1 (ชุดควบคุม) คือ น้ำที่ระดับความเค็ม 0 ส่วนในพัน ส่วนชุดการทดลอง 2 - 7 คือ น้ำระดับความเค็ม 5, 10, 15, 20, 25 และ 30 ส่วนในพันตามลำดับ

ทำการวิเคราะห์คุณภาพน้ำด้วยเครื่องมือและวิธีการดังนี้ ความเค็มของน้ำวัดด้วย Salinity refractometer ยี่ห้อ Primatech ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ (DO) และอุณหภูมิของน้ำวัดด้วย DO meter ยี่ห้อ YSI รุ่น 550A ความเป็นกรดต่าง (pH) วัดด้วย pH meter ยี่ห้อ Consort c3010 วิเคราะห์หาปริมาณแอมโมเนียรวมด้วยวิธี Indophenol blue method ปริมาณไนโตรเจนด้วยวิธี Colorimetric method และค่าความเป็นด่างด้วยวิธี Titration method (APHA et al., 2009) โดยวัดการดูดกลืนแสงด้วยเครื่องสเปกโตรโฟโตมิเตอร์ยี่ห้อ PerkinElmer รุ่น UV-VIS Lambda 365

การศึกษาผลของความเค็มต่ออัตราการจับคู่ผสมพันธุ์ของปูแป้น

นำปูแป้นจากบ่อเลี้ยงมาทำการทดลองจับคู่ในถังพลาสติกที่บรรจุน้ำ 40 ลิตร และมีความเค็มแตกต่างกัน 7 ระดับ อัตราส่วน เพศผู้:เพศเมีย เท่ากับ 1:1 จำนวนถึงละ 3 คู่ ทำการทดลอง 3 ซ้ำ ในแต่ละระดับความเค็ม รวมปูแป้นที่ศึกษาทั้งสิ้น 63 คู่ เท่ากับ 126 ตัว สังเกตและบันทึกพฤติกรรมการจับคู่ผสมพันธุ์ของพ่อแม่ปูเป็นเวลา 12 ชั่วโมง แล้วทำการแยกเพศผู้ ออก เลี้ยงแม่ปูต่อไปเป็นระยะเวลา 14 วัน โดยทำการตรวจสอบไข่ในจับปิ้งแม่ปูทุก 2 วัน บันทึกผล จากนั้นนำมาหาค่าเฉลี่ย อัตราการจับคู่รายงานผลเป็นร้อยละ

การศึกษาผลของความเค็มต่ออัตราการฟักไข่ของแม่ปูแป้นไข่นอกกระดอง

ทำการผสมพันธุ์ปูแป้นในบ่อไฟเบอร์ที่ระดับความเค็ม 20 ส่วนในพัน แล้วคัดแม่ปูแป้นไข่นอกกระดองที่มีขนาดความกว้างกระดองระหว่าง 3.02 - 3.70 เซนติเมตร มาแยกเลี้ยงเดี่ยวในถังพลาสติกบรรจุน้ำ 20 ลิตร ซึ่งมีความเค็มแตกต่างกัน 7 ระดับ จำนวน 3 ตัวต่อ 1 ระดับความเค็ม ให้อาหารเม็ดปลาสดวันละ 1 ครั้ง และเปลี่ยนถ่ายน้ำร้อยละ 50 ทุกวัน สังเกตและบันทึกพฤติกรรมการฟักไข่ของแม่ปูทุกวัน เมื่อแม่ปูฟักไข่จึงทำการสุ่มตัวอ่อนระยะซูเอีย 1 มานับจำนวนภายใต้กล้องจุลทรรศน์แบบสเตอริโอ

การศึกษาผลของความเค็มต่ออัตราการรอดตายของตัวอ่อนระยะซูเอีย 1

ทำการเพาะฟักลูกปูแป้นในถังพลาสติกที่มีน้ำความเค็ม 25 ส่วนในพัน ปริมาตร 20 ลิตร จนกระทั่งฟักออกเป็นลูกปูระยะซูเอีย 1 แล้วจึงทำการสุ่มนับลูกปูระยะซูเอีย 1 จำนวน 1,000 ตัว ใส่ลงในบีกเกอร์ซึ่งบรรจุน้ำเค็มปริมาตร 1,000 มิลลิลิตร และมีระดับความเค็มแตกต่างกัน 7 ระดับ ระดับความเค็มละ 3 ซ้ำ ทำการจดบันทึกอัตราการตายสะสมของลูกปูแป้นทุก 30 นาที เป็นเวลา 180 นาที หลังจากนั้นนำมาคำนวณหาค่าอัตราการรอดตายสุดท้าย โดยดัดแปลงวิธีการของ Felix and Sudharsan (2004)

อัตราการรอดตาย (ร้อยละ) = (จำนวนลูกระยะซูเอียที่เหลือเมื่อสิ้นสุดการทดลอง X 100) / จำนวนลูกปูระยะซูเอียเริ่มต้น (1)

การวิเคราะห์ข้อมูล

คำนวณหาอัตราการจับคู่ผสมพันธุ์และอัตราการรอดตายลูกปูแป้นในระยะซูเอียของแต่ละชุดการทดลอง วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance, ANOVA) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยเพื่อหาความแตกต่างของข้อมูลในแต่ละชุดการทดลองโดยวิธี Duncan's new Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยใช้โปรแกรม SPSS (Trial Version)

ผลการวิจัย

ผลของความเค็มที่มีต่ออัตราการจับคู่ผสมพันธุ์ของปูแป้น

การศึกษาผลของความเค็มของน้ำที่มีต่ออัตราการจับคู่ผสมพันธุ์ของปูแป้นจำนวน 63 คู่ ที่ระดับความเค็มต่าง ๆ พบว่าปูแป้นไม่แสดงพฤติกรรมการจับคู่ผสมพันธุ์ในระดับความเค็ม 0 ถึง 15 ส่วนในพัน ส่วนที่ระดับความเค็ม 20 และ 25 ส่วนในพัน ปูแป้นมีอัตราการจับคู่ผสมพันธุ์สูงที่สุดถึงร้อยละ 100 ± 0.00 ซึ่งสูงกว่าระดับความเค็ม 30 ส่วนในพัน ที่มีอัตราการจับคู่ร้อยละ 88.88 ± 1.98 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ปูแป้นใช้เวลาในการจับคู่ผสมพันธุ์ในระดับความเค็ม 20 และ 30 ส่วนในพัน เท่ากับ 5.23 ± 0.13 และ 5.19 ± 0.17 นาที ซึ่งเร็วกว่าการจับคู่ผสมพันธุ์ในระดับความเค็ม 25 ส่วนในพัน ซึ่งเท่ากับ 6.41 ± 0.21 นาที อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) (ตารางที่ 1)

ผลการตรวจสอบคุณภาพน้ำในแต่ละชุดการทดลองพบว่าคุณภาพน้ำมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) โดยอุณหภูมิ น้ำเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 25.40 ± 0.62 ถึง 26.16 ± 0.50 องศาเซลเซียส ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4.25 ± 0.40 ถึง 5.10 ± 0.62 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นกรดต่างเฉลี่ยอยู่ในช่วง 8.11 ± 0.02 ถึง 8.40 ± 0.01 ส่วนค่าความเป็นด่างเฉลี่ยมีค่าระหว่าง 110.38 ± 4.18 ถึง 124.00 ± 1.50 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณแอมโมเนียรวมเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.007 ± 0.060 ถึง 0.030 ± 0.050 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณไนโตรเจนเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.008 ± 0.002 ถึง 0.014 ± 0.002 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 1 ผลของระดับความเค็มต่ออัตราการจับคู่ผสมพันธุ์ของปูแป้น

ระดับความเค็ม (ส่วนในพัน)	อัตราการจับคู่ผสมพันธุ์ (ร้อยละ)	เวลาที่ใช้ในการจับคู่ (นาที)
0	0 ± 0.00^c	0 ± 0.00^a
5	0 ± 0.00^c	0 ± 0.00^a
10	0 ± 0.00^c	0 ± 0.00^a
15	0 ± 0.00^c	0 ± 0.00^a
20	100.00 ± 0.00^a	5.23 ± 0.13^b
25	100.00 ± 0.00^a	6.41 ± 0.21^c
30	88.83 ± 1.98^b	5.19 ± 0.17^b

หมายเหตุ: ทำการทดลอง 3 ซ้ำ และรายงานค่าในรูปค่าเฉลี่ย $\pm$ ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean $\pm$ SD)

a, b และ c หมายถึง ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$)

ผลของความเค็มที่มีต่ออัตราการฟักไข่และจำนวนลูกปูระยะซูเอีย 1

การศึกษาผลของความเค็มต่อการฟักไข่และจำนวนลูกปูระยะซูเอีย 1 จากแม่ปูแป้นไข่นอกกระดอง จำนวน 21 ตัว ที่ระดับความเค็มต่าง ๆ พบว่าปูแป้นไม่ฟักไข่ในระดับความเค็ม 0, 5, 10 และ 15 ส่วนในพัน ส่วนที่ระดับความเค็ม 20, 25 และ 30 ส่วนในพัน แม่ปูแป้นไข่นอกกระดองมีการฟักไข่ทุกตัว (ร้อยละ 100 ± 00) โดยที่ระดับความเค็ม 25 และ 20 ส่วนในพัน มีจำนวนลูกปูระยะซูเอีย 1 ใกล้เคียงกัน โดยไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) และสูงกว่าระดับความเค็ม 30 ส่วนในพัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ซึ่งจำนวนลูกปูแป้นในแต่ละระดับความเค็มเท่ากับ $33,431.67 \pm 1,385.08$, $32,902.67 \pm 3,291.70$ และ $27,296.00$ ตัว ตามลำดับ (ตารางที่ 3)

ตารางที่ 2 คุณภาพน้ำตลอดการทดลองเป็นเวลา 14 วัน

คุณภาพน้ำ	ระดับความเค็ม (ส่วนในพัน)						
	0	5	10	15	20	25	30
อุณหภูมิ (°C)	25.92±0.30	25.40±0.62	26.16±0.50	26.00±0.60	25.54±0.26	25.80±0.17	25.50±0.06
ออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (mg/l)	4.55±0.70	4.82±0.15	4.39±0.24	4.27±0.06	4.25±0.40	5.10±0.62	4.70±0.36
พีเอช	8.15±0.02	8.11±0.02	8.20±0.00	8.13±0.02	8.40±0.01	8.20±0.02	8.3±0.03
ความเป็นด่าง (mg/l)	124.00±1.50	110.38±4.18	115.77±1.26	117±4.50	121±2.12	112±5.21	122±4.65
แอมโมเนียรวม (mg-N/l)	0.010±0.006	0.030±0.050	0.008±0.050	0.007±0.060	0.010±0.003	0.009±0.006	0.010±0.006
ไนโตรเจน	0.008±0.002	0.010±0.002	0.008±0.002	0.009±0.002	0.014±0.002	0.012±0.004	0.010±0.004

หมายเหตุ: ทำการทดลอง 3 ซ้ำ และรายงานค่าในรูปค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean±SD)

ผลการตรวจสอบคุณภาพน้ำในแต่ละชุดการทดลองพบว่าคุณภาพน้ำมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) โดยอุณหภูมิ น้ำเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 25.20 ± 0.80 ถึง 26.50 ± 0.16 องศาเซลเซียส ปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 4.24 ± 0.60 ถึง 5.22 ± 0.43 มิลลิกรัมต่อลิตร ความเป็นกรดค่าเฉลี่ยอยู่ในช่วง 8.10 ± 0.00 ถึง 8.30 ± 0.03 ส่วนค่าความเป็นด่างเฉลี่ยมีค่าระหว่าง 112 ± 4.24 ถึง 123 ± 2.02 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณแอมโมเนียรวมเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.006 ± 0.002 ถึง 0.020 ± 0.004 มิลลิกรัมต่อลิตร ปริมาณไนโตรเจนเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 0.000 ± 0.000 ถึง 0.010 ± 0.004 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามลำดับ (ตารางที่ 4)

ตารางที่ 3 ผลของระดับความเค็มต่ออัตราการฟักไข่ของแม่ปูแป้นไข่นอกกระดองและจำนวนลูกปูระยะซูเอีย 1

ระดับความเค็ม (ส่วนในพัน)	อัตราการฟักไข่ (ร้อยละ)	จำนวนลูกปูระยะซูเอีย 1 (ตัว)
0	0 ± 0.00^b	0 ± 0.00^c
5	0 ± 0.00^b	0 ± 0.00^c
10	0 ± 0.00^b	0 ± 0.00^c
15	0 ± 0.00^b	0 ± 0.00^c
20	100.00 ± 0.00^a	$32,902.67\pm3,291.70^a$
25	100.00 ± 0.00^a	$33,431.67\pm1,385.08^a$
30	100.00 ± 0.00^a	$27,296.00\pm1,801.30^b$

หมายเหตุ: ทำการทดลอง 3 ซ้ำ และรายงานค่าในรูป ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean±SD)

a, b และ c หมายถึง ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)

ตารางที่ 4 คุณภาพน้ำตลอดการทดลองเป็นเวลา 8 วัน

คุณภาพน้ำ	ระดับความเค็ม (ส่วนในพัน)						
	0	5	10	15	20	25	30
อุณหภูมิ (°C)	25.20±0.80	25.62±0.82	26.08±0.40	26.00±0.30	26.50±0.16	25.40±0.26	25.55±0.14
ออกซิเจนที่ละลายในน้ำ (mg/l)	5.00±0.27	4.88±0.05	4.33±0.42	4.24±0.60	5.22±0.43	5.19±0.16	4.78±0.35
พีเอช	8.11±0.04	8.23±0.02	8.20±0.03	8.32±0.03	8.10±0.00	8.21±0.02	8.30±0.03
ความเป็นด่าง (mg/l)	122.00±2.50	117.48±2.18	119.54±1.11	121±4.41	123±2.02	112±4.24	121±4.66
แอมโมเนียรวม (mg-N/l)	0.010±0.003	0.020±0.004	0.006±0.010	0.008±0.005	0.010±0.002	0.009±0.008	0.006±0.002
ไนโตรเจน	0.006±0.002	0.000±0.000	0.004±0.002	0.010±0.004	0.008±0.002	0.006±0.002	0.010±0.002

หมายเหตุ: ทำการทดลอง 3 ซ้ำ และรายงานค่าในรูปค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean±SD)

ผลของความเค็มที่มีต่ออัตราการรอดตายของปูระยะชูเอีย 1

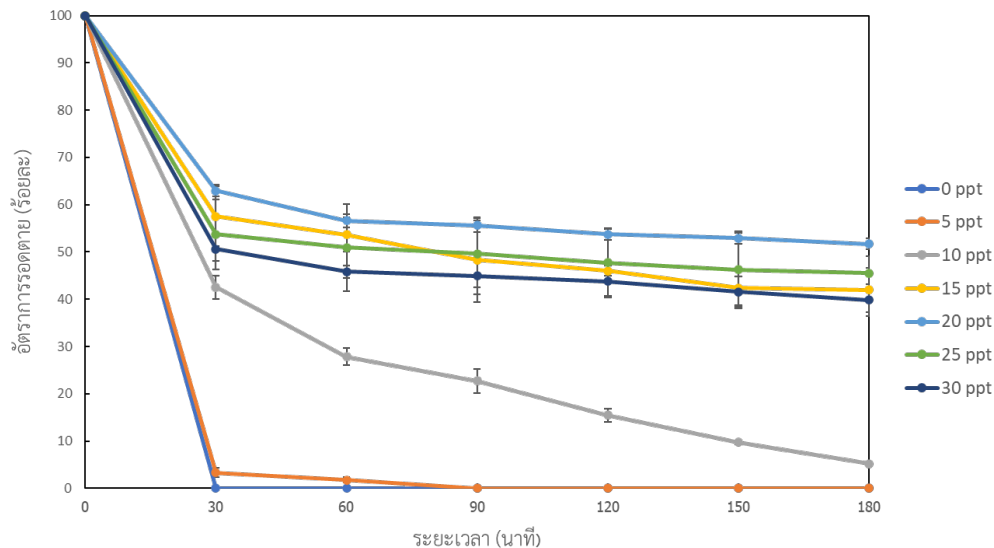
การศึกษ้อัตราการรอดตายของลูกปูระยะชูเอีย 1 ที่ระดับความเค็มต่าง ๆ พบว่าในชุดการทดลองที่มีระดับความเค็มน้ำ 0 ถึง 5 ส่วนในพัน ลูกปูระยะชูเอีย 1 จะจมตัวลงสู่พื้นทั้งหมดภายใน 30 นาที และตายหมด ในขณะที่ระดับความเค็มตั้งแต่ 10 ส่วนในพัน ขึ้นไป ลูกปูระยะชูเอีย 1 จึงสามารถรอดตายไปจนถึงสิ้นสุดการทดลอง อย่างไรก็ตามลูกปูระยะชูเอีย 1 ที่อยู่ในระดับความเค็ม 10 ส่วนในพัน จะมีอัตราการรอดตายสะสมลดลงอย่างต่อเนื่องจนเหลือเพียงร้อยละ 5.23±0.49 ส่วนลูกปูระยะชูเอีย 1 ที่อยู่ในระดับความเค็มตั้งแต่ 15 ถึง 30 ส่วนในพัน แม้ว่าจะมีอัตราการรอดตายสะสมลดลงเช่นกัน แต่เป็นการลดลงอย่างช้า ๆ (รูปที่ 1) ที่ระดับความเค็ม 20 ส่วนในพัน ให้อัตราการรอดตายของลูกปูระยะชูเอีย 1 สูงที่สุด อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) รองลงมาได้แก่ ระดับความเค็มที่ 25, 15, 30 และ 10 ส่วนในพัน โดยมีค่าเท่ากับร้อยละ 45.54±3.58, 41.98±4.69, 39.79±3.38 และ 5.23±0.49 ตามลำดับ (ตารางที่ 5)

ตารางที่ 5 ผลของระดับความเค็มต่ออัตราการรอดตายของลูกปูระยะชูเอีย 1 เมื่อเวลาผ่านไป 180 นาที

ระดับความเค็ม (ส่วนในพัน)	อัตราการรอดตาย (ร้อยละ)
0	0±0.00 ^e
5	0±0.00 ^e
10	5.23±0.49 ^d
15	41.98±4.69 ^{bc}
20	51.69±1.14 ^a
25	45.54±3.57 ^b
30	39.79±3.38 ^c

หมายเหตุ : ทำการทดลอง 3 ซ้ำ และรายงานค่าในรูป ค่าเฉลี่ย±ค่าเบี่ยงเบนมาตรฐาน (mean±SD)

^{a-c} หมายถึง ตัวอักษรที่แตกต่างกันในคอลัมน์เดียวกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p<0.05$)



รูปที่ 1 ผลของระดับความเค็มต่ออัตราการรอดตายของลูกปูระยะซูเอีย 1 เมื่อเวลาผ่านไป 180 นาที

การอภิปรายผล

จากการศึกษาผลของความเค็มของน้ำที่มีต่ออัตราการจับคู่ผสมพันธุ์ของปูแสบและการฟักไข่ของแม่ปูแสบไข่นอกกระดอง (Ovigerous female) ในน้ำมีความเค็มแตกต่างกัน 7 ระดับ พบว่าระดับความเค็มของน้ำส่งผลอย่างยิ่งต่อการผสมพันธุ์ของปูแสบ โดยการผสมพันธุ์ของปูแสบจะต้องเกิดขึ้นที่ระดับความเค็มสูงเท่านั้น (20, 25 และ 30 ส่วนในพัน) โดยผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าปูแสบจะไม่แสดงพฤติกรรมการจับคู่ผสมพันธุ์ในชุดการทดลองที่มีระดับความเค็ม 0, 5, 10 และ 15 ส่วนในพัน และแม่ปูแสบไข่นอกกระดองก็ไม่สามารถฟักออกเป็นลูกปูระยะซูเอีย 1 ในชุดการทดลองเหล่านี้ได้เช่นกัน นอกจากนี้ยังพบว่าระดับความเค็มที่ปูแสบมีการผสมพันธุ์และวางไข่ได้ คือระดับความเค็มตั้งแต่ 20 ถึง 30 ส่วนในพัน โดยระดับความเค็มที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการผสมพันธุ์ของปูแสบ ได้แก่ ระดับความเค็ม 20 และ 25 ส่วนในพัน เนื่องจากที่ระดับความเค็มนี้ ปูแสบมีอัตราการจับคู่ การฟักไข่ สูงที่สุดโดยไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) อย่างไรก็ตามที่ระดับความเค็ม 25 ส่วนในพัน แม้ว่าแม่ปูแสบไข่นอกกระดองจะมีอัตราการจับคู่ผสมพันธุ์ อัตราการฟัก และจำนวนลูกปูระยะซูเอีย 1 ที่ฟักไม่แตกต่างจากระดับความเค็ม 20 ส่วนในพัน แต่อัตราการรอดตายของลูกปูระยะซูเอีย 1 กลับน้อยกว่าระดับความเค็ม 20 ส่วนในพันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ส่วนที่ระดับความเค็ม 30 ส่วนในพัน ทั้งอัตราการจับคู่ผสมพันธุ์ จำนวนลูกปูระยะซูเอียจากการฟัก และอัตราการรอดตายของลูกปูระยะซูเอีย 1 ต่างก็น้อยกว่าระดับความเค็ม 20 และ 25 ส่วนในพันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ทั้งสิ้น สำหรับผลการตรวจและวิเคราะห์คุณภาพน้ำพบว่าคุณภาพน้ำในแต่ละชุดการทดลองมีค่าไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) และมีค่าอยู่ในระดับที่ไม่ส่งผลกระทบต่ออัตราการตายและพัฒนาการลูกปูเมื่ออ้างอิงจากคุณภาพน้ำที่ใช้สำหรับการอนุบาลลูกปูระยะซูเอีย (พรัตน์ และคณะ, 2551; วาสนา และวุฒิชัย, 2555)

ผลการศึกษาครั้งนี้บ่งชี้ว่าการที่ปูแสบจะมีการผสมพันธุ์และฟักไข่ได้ก็ต่อเมื่ออยู่ในน้ำที่มีความเค็มสูงนั้นมีความสอดคล้องกับพฤติกรรมการผสมพันธุ์ตามธรรมชาติปูชนิดนี้ที่ต้องมีการอพยพออกจากแหล่งอาศัยในน้ำจืดไปสู่อบริเวณปากแม่น้ำซึ่งมีระดับความเค็มสูงขึ้นในฤดูกาลสืบพันธุ์ (Hwang and Takeda, 1986) และเป็นกลยุทธ์ที่ไม่แตกต่างจากปูที่อาศัยในบริเวณปากแม่น้ำส่วนใหญ่ซึ่งจะมีการอพยพของพ่อ-แม่ปูออกไปสืบพันธุ์ยังบริเวณปากแม่น้ำหรือชายฝั่งที่มีระดับความเค็มสูงและมีความแปรผันของระดับความเค็มน้อยกว่า (Torres et al, 2011) โดยในการศึกษาของ ดุสิต และคณะ (2553) ซึ่งศึกษาชีววิทยาบางประการและการอพยพของปูในบริเวณลุ่มแม่น้ำเวหุ พบว่าปูแสบที่อาศัยในพื้นที่น้ำจืดในบริเวณตำบลเกวียนหัก

อำเภอขลุง จังหวัดจันทบุรี จะมีการอพยพออกไปยังปากแม่น้ำเวฬุและชายฝั่งทะเลในช่วงเดือนสิงหาคมถึงธันวาคมของทุกปี เพื่อการผสมพันธุ์และวางไข่ และจะพบลูกปูระยะชูเอียได้ช่วงเวลาดังกล่าวตั้งแต่บริเวณอำเภอขลุงไปจนถึงปากแม่น้ำเวฬุซึ่งมีระดับความเค็มอยู่ในช่วง 23 - 27 ส่วนในพัน

นอกจากนี้ลักษณะการอพยพของปูแป้นยังมีความคล้ายคลึงอย่างยิ่งกับปูก้ามขน (*Eriocheir sinensis*) ซึ่งไม่เพียงมีการอพยพจากแหล่งอาศัยในพื้นที่น้ำจืดไปสืบพันธุ์ในทะเลเหมือนกันเท่านั้น แต่ระดับความเค็มของน้ำยังมีผลต่อการรอดตายของลูกปูในระยะชูเอีย 1 หรือระยะชูเอียแรกฟักคล้ายคลึงกันอีกด้วย เช่น ในการศึกษาของ Anger (1991) ซึ่งทำการศึกษาลูกปูของอุณหภูมิต่ำและความเค็มของน้ำต่อการพัฒนาการของลูกปูก้ามขนระยะชูเอียพบว่าลูกปูระยะชูเอียมีพัฒนาการได้ในช่วงอุณหภูมิ 12 - 18 องศาเซลเซียส และระดับความเค็ม 15 - 32 ส่วนในพัน โดยชูเอีย 1 หรือตัวอ่อนแรกฟัก ไม่สามารถอยู่รอดได้ที่ระดับความเค็มต่ำกว่า 10 ส่วนในพัน และระดับความเค็มที่เหมาะสมสำหรับตัวอ่อนระยะนี้ คือระดับความเค็ม 25 ส่วนในพัน ระดับความเค็มที่สูงหรือต่ำกว่าจะทำให้อัตราการตายของชูเอียเพิ่มขึ้น นอกจากนี้ปูก้ามขนไขนอกกระดองยังพบในบริเวณปากแม่น้ำซึ่งมีความเค็มสูงกว่า 20 ส่วนในพัน การอพยพไปผสมพันธุ์ในบริเวณที่น้ำมีระดับความเค็มสูงก็มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ตัวอ่อนถูกฟักออกมาภายใต้สภาพแวดล้อมและระดับความเค็มที่เหมาะสมนั่นเอง

โดยทั่วไปแล้วแม้ว่าตัวเต็มวัย (Adult) และลูกปูวัยรุ่น (Juvenile) ของปูหลายชนิดที่อาศัยในบริเวณปากแม่น้ำจะมีความสามารถในการควบคุมปริมาณความเข้มข้นของของเหลวในร่างกายสูงและสามารถทนการเปลี่ยนแปลงของความเค็มได้ในช่วงกว้าง แต่ไข่ (Egg) และตัวอ่อน (Larvae) ของปูเหล่านั้นมักจะมีความอ่อนไหวต่อการเปลี่ยนแปลงระดับความเค็มน้อยกว่า โดยการเปลี่ยนแปลงของระดับความเค็มนั้นต้องอยู่ในขอบเขตการเปลี่ยนแปลงที่เป็นปกติของการเปลี่ยนแปลงความเค็มในบริเวณปากแม่น้ำนั้น ๆ (Charmantier, 1998; Gimenez and Anger, 2001) ผลการศึกษานี้ก็บ่งชี้ว่าปูแป้นก็มีลักษณะเช่นเดียวกับปูที่อาศัยในปากแม่น้ำชนิดอื่น ๆ เช่นเดียวกัน โดยอัตราการรอดตายของตัวอ่อนปูแป้นระยะชูเอียมีค่าสูงในช่วงระดับความเค็ม 20 และ 25 ส่วนในพัน ซึ่งมีความใกล้เคียงกับทั้งปูที่อาศัยในปากแม่น้ำและปูกลุ่มสองน้ำ เช่น ปูก้ามขน *E. sinensis* (Anger, 1991) ปูก้ามดาบ *Uca vocator* (Simith et al., 2012) และปูแสม *Sesarma angustipes* (Anger et al., 1990) และสอดคล้องกับผลการศึกษาของ ดุสิต และคณะ (2553) ที่จะพบตัวอ่อนปูแป้นระยะชูเอียชุกชุมในบริเวณจุดเก็บตัวอย่างวันยาวไปจนถึงปากแม่น้ำเวฬุซึ่งมีระดับความเค็มอยู่ในช่วง 24 - 27 ส่วนในพัน นั่นเอง

นอกจากความเค็มจะมีผลต่อตัวเต็มวัยและตัวอ่อนของปูแล้วยังมีผลต่อการพัฒนาการและการฟักไข่ของปูด้วย โดยมีความเกี่ยวข้องโดยตรงต่อกระบวนการควบคุมสมดุลของน้ำและออสโม (Osmoregulation) ภายในไข่ซึ่งจะส่งผลถึงความสามารถในการปรับตัวและความอยู่รอดของไข่ปูในสภาพความเค็มต่าง ๆ (Gilles, 1983; Taylor and Seneviratna, 2005) เช่น ในการศึกษาของ นงนุช และศุภางค์ (2542) พบว่าระบบการควบคุมสมดุลของน้ำและออสโมของไข่ปูม้า (*Portunus pelagicus*) จะมีการพัฒนาเพิ่มขึ้นเมื่อไข่ปูมีการพัฒนาเพิ่มขึ้น โดยไข่ปูม้าที่ระยะแก่จะแสดงความเป็นออสโมเรกูเลเตอร์ (Osmoregulator) คือสามารถควบคุมสมดุลของน้ำและออสโมภายในไข่ไม่ให้เปลี่ยนแปลงตามความเข้มข้นและออสโมของน้ำโดยรอบ ในขณะที่ไข่ที่ระยะอ่อนจะแสดงความเป็นออสโมคอนฟอร์เมอร์ (Osmoconformer) คือไม่สามารถควบคุมความสมดุลของน้ำและออสโมภายในไข่ไม่ให้เปลี่ยนแปลงตามความเข้มข้นและออสโมของน้ำโดยรอบได้ ซึ่งมีผลทำให้ไข่ปูม้าในระยะสุดท้ายจะมีความสามารถในการปรับตัวต่อการเปลี่ยนแปลงความเค็มได้ดีกว่าไข่ระยะแรก โดยไข่ปูม้าที่ระยะหัวใจเต้นสามารถทนความเค็มได้ในช่วง 20 - 40 ส่วนในพัน ส่วนระยะคลีเวจ (Cleavage stage) และบลาสตูลา (Blastula stage) ทนความเค็มได้ในช่วง 25 - 35 ส่วนในพันเท่านั้น

อย่างไรก็ตาม แม้ว่าปูม้าและปูแป้นอาจจะแหล่งอาศัยและนิเวศวิทยาที่แตกต่างกัน แต่ผลการศึกษาการควบคุมสมดุลของน้ำและออสโมของไข่ปูม้าอาจนำมาใช้อธิบายเปรียบเทียบได้ว่า เนื่องจากไข่ของปูแป้นมีความสามารถทนทานต่อความเค็มได้น้อยกว่าตัวอ่อน อัตราการจับคู่ผสมพันธุ์และการฟักไข่ของปูแป้นจึงเกิดขึ้นที่ระดับความเค็ม 20 ถึง 30 ส่วนในพัน ซึ่งเป็นช่วงแคบกว่าความทนทานของความเค็มของลูกปูแป้นระยะชูเอีย 1 ที่สามารถรอดตายได้ในระดับความเค็มตั้งแต่ 10 จนถึง 30 ส่วนในพัน นอกจากนี้ในส่วนผลการศึกษาผลของความเค็มต่ออัตราการรอดตายของตัวอ่อนระยะชูเอีย 1 ที่พบว่า

ในช่วง 30 นาที แรกของการทดลอง ลูกปูระยะซูเอีย 1 มีอัตราการรอดตายลดลงอย่างรวดเร็วในลักษณะเดียวกันในทุกระดับความเค็ม (รูปที่ 1) สันนิษฐานว่าอาจจะเกิดจากการเปลี่ยนแปลงสภาพแวดล้อมโดยเฉพาอย่างยิ่งระดับอุณหภูมิของน้ำอย่างฉับพลันระหว่างการย้ายลูกปูลงสู่บีกเกอร์เพื่อเริ่มการทดลอง ซึ่งทำให้ลูกปูระยะซูเอียบางส่วนปรับตัวไม่ทันและตายอย่างรวดเร็ว ดังนั้นในก่อนการปล่อยลูกปูแป้นจากการเพาะฟักลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาตินั้นมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องทำการปรับสภาพ (Acclimation) อุณหภูมิของน้ำในภาชนะที่บรรจุลูกปูแป้นให้ใกล้เคียงกับอุณหภูมิของแหล่งน้ำให้ได้มากที่สุด

จากผลการศึกษาข้างต้นชี้ให้เห็นว่าระดับความเค็มของน้ำเป็นปัจจัยที่มีผลอย่างมากต่อกระบวนการสืบพันธุ์ของปูแป้น โดยมีผลต่อทั้งความสำเร็จของทั้งการจับคู่ผสมพันธุ์ การฟักไข่ และอัตราการรอดตายของตัวอ่อนระยะซูเอีย ดังนั้นในการเพาะพันธุ์ปูแป้นและการปล่อยลูกปูแป้นลงสู่แหล่งน้ำธรรมชาติ จะต้องคำนึงถึงทั้งระดับความเค็มของน้ำที่ใช้ในการเพาะพันธุ์ และระดับความเค็มของน้ำในแหล่งน้ำในช่วงเวลาที่ต้องการปล่อยลูกปูแป้น โดยระดับความเค็มของน้ำที่เหมาะสมที่สุดคือระดับความเค็ม 20 ถึง 25 ส่วนในพัน เนื่องจากมีความสอดคล้องกับธรรมชาติการสืบพันธุ์และการดำรงชีวิตของปูแป้นมากที่สุด นอกจากนี้ยังต้องมีการศึกษาสภาวะและปัจจัยสิ่งแวดล้อมอื่น ๆ เพิ่มเติมด้วย เช่น ช่วงเวลาและอุณหภูมิที่เหมาะสม หรือระยะตัวอ่อนของปูแป้นที่เหมาะสมสำหรับการปล่อยคืนสู่ธรรมชาติ เพื่อให้การอนุรักษ์และฟื้นฟูประชากรปูแป้นประสบผลสำเร็จสูงสุด

บทสรุป

ระดับความเค็มของน้ำมีผลต่อความสำเร็จของทั้งอัตราการจับคู่ผสมพันธุ์ การฟักไข่ และอัตราการรอดตายของลูกปูแป้นระยะซูเอีย 1 อย่างมาก โดยปูแป้นจะจับคู่ผสมพันธุ์และมีการฟักไข่ได้ตั้งแตระดับความเค็มของน้ำเท่ากับ 20 ส่วนในพัน เป็นต้นไป โดยระดับความเค็มที่เหมาะสมที่สุดสำหรับการเพาะพันธุ์ปูแป้นเพื่อการเพิ่มจำนวนประชากรในแหล่งน้ำธรรมชาติและการเพาะเลี้ยงคือระดับความเค็ม 20 และ 25 ส่วนในพัน เนื่องจากให้อัตราการจับคู่ผสมพันธุ์ การฟักไข่ และอัตราการรอดตายของลูกปูระยะซูเอีย 1 สูงกว่าระดับความเค็มอื่นอย่างมีนัยสำคัญ

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบพระคุณ สำนักงานพัฒนาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีแห่งชาติ ที่ได้สนับสนุนงบประมาณการวิจัยประจำปี พ.ศ. 2563 และเทศบาลตำบลเกวียนหัก อำเภอขลุง จังหวัดจันทบุรี ที่ให้การสนับสนุนและอำนวยความสะดวกของโครงการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- ดุสิต ศรีวิไล, มนัส คงศักดิ์, ญาณนนท์ สุนทรกิจ, วัชร น้อยคงคา, พินัย พยม และสัมพันธ์ จันทรรักษ์. (2553). ชีวิตวิทยาบางประการและการอพยพของปูแป้น (*Varuna yui*) ในบริเวณแม่น้ำเวฬุ: รายงานวิจัยฉบับสมบูรณ์. สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม.
- นงนุช ตั้งเกริกโอฬาร และศุภางค์ ชำปฏี. (2542). ผลของความเค็มต่อการเปลี่ยนแปลงปริมาตรของไขในปูม้า (*Portunus pelagicus*) เพศเมียที่มีไขนอกกระดอง. วารสารวิทยาศาสตร์บูรพา. 16(2): 16-22.
- บรรจง เทียนสงฆ์. (2552). ปูแสม...กำลังวิกฤติ ร่วมคิดร่วมเลี้ยงปูดูแลป่า แก้ปัญหาพัฒนาป่าชุมชน. สำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.), กรุงเทพฯ.

- พรรัตน์ สุขประเสริฐ, ปิยาลัย เหมทานนท์ และสรเสริญ ช่อเจีย. (2551). ความเป็นต่างของน้ำที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตและอัตราการรอดของลูกปูม้า (*Portunus pelagicus* Linnaeus, 1758) ที่อนุบาลในบ่อคอนกรีต. เอกสารวิชาการฉบับที่ 59/2551. ศูนย์วิจัยและพัฒนาประมงชายฝั่งนครศรีธรรมราช, สำนักวิจัยและพัฒนาประมงชายฝั่ง, กรมประมง.
- วาสนา อากรรรัตน์ และวุฒิชัย อ่อนเอี่ยม. (2555). ผลของไดอะตอม *Thalassiosira* spp. ต่ออัตราการรอดตายและพัฒนาการของลูกปูม้า (*Portunus pelagicus*) วัยอ่อนระยะชูเอี้ยง 1 ถึง 4. วารสารแก่นเกษตร. 40:61-68.
- Anger K., Harms J., Montu M. and Bakker C. (1990). Effects of salinity on the larval development of a semiterrestrial tropical crab, *Sesarma angustipes* (Decapoda: Grapsidae). Marine Ecology Progress Series. 62: 89–94.
- Anger K. (1991). Effects of temperature and salinity on the larval development of the Chinese mitten crab *Eriocheir sinensis* (Decapoda: Grapsidae). Marine Ecology Progress Series. 72: 103–110.
- Anger K. (2003). Salinity as a key parameter in the larval biology of decapod crustaceans. Invertebrate Reproduction & Development. 43(1): 29-45.
- APHA, AWWA and WPCF. (2009). Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association Washington.
- Carpenter K.E. and Niem V.H., editors. (1998). FAO species identification guide for fishery purposes: the living marine resources of the Western Central Pacific: cephalopods, crustaceans, holothurians and sharks. Vol. 2 Rome: FAO; 687–1396.
- Charmantier G. (1998). Ontogeny of osmoregulation in crustaceans: a review. Invertebrate Reproduction and Development. 33: 177–190.
- Felix N. and Sudharsan M. (2004). Effect of glycine betaine, a feed attractant affecting growth and feed conversion of juvenile freshwater prawn *Macrobrachium rosenbergii*. Aquaculture Nutrition. 10: 193-197.
- Gilles R. (1983). Volume maintenance and regulation in animal cells: Some features and trends. Molecular Physiology. 90(4): 3-16.
- Gimenez L. and Anger K. (2001). Relationships among salinity, egg size, embryonic development, and larval biomass in the estuarine crab *Chasmagnathus granulata* Dana, 1851. Journal Experimental Marine Biology and Ecology. 260: 241–257
- Hwang J. and Takeda M. (1986). A new freshwater crab of the family Grapsidae from Taiwan. Proceedings of the Japanese Society of Systematic Zoology. 33: 11-18.
- Naiyanetr P. (1998). Check list of crustacean fauna in Thailand. Office for environmental policy and planning, Bangkok.
- Smith D.J.B., Souza A.S., Maciel C.R., Abrunhosa F.A. and Diele K. (2012). Influence of salinity on the larval development of the fiddler crab *Uca vocator* (Ocypodidae) as an indicator of ontogenetic migration towards offshore waters. Helgoland Marine Research. 66: 77–85.
- Taylor H.H. and Seneviratna D. (2005). Ontology of salinity tolerance and hyper-osmoregulation by embryos of the intertidal crabs *Hemigrapsus edwardsi*, *Hemigrapsus crenulatus* (Decapoda, Grapsidae): Survival of acute hyposaline exposure. Comparative Biochemistry and Physiology. 140(4): 495-505.
- Torres G., Gimenez L. and Anger K. (2011). Growth, tolerance to low salinity, and osmoregulation in decapod crustacean larvae. Aquatic Biology. 12: 249-260.

Received: August 8, 2022; Revised: August 19, 2022; Accepted: August 20, 2022

ผลของอัตราการไหลของน้ำต่อการเจริญเติบโตของปลาดุกลูกผสม คื่นช่ายใบหยิก และคุณภาพน้ำในระบบอะควาโปนิคส์ที่ใช้น้ำหมุนเวียน

Effect of water flow rates on growth of hybrid catfish (*Clarias macrocephalus* x *C. gariepinus*), Curl leaf kale (*Brassica oleracea* var. *acephala*) and water quality parameters in aquaponic recirculating system

พีระ มีทรัพย์¹ พวงเพชร พิมพ์จันทร์¹ กฤติมา กษมาวุฒิ¹ และสำเนาวิ เสาวกุล^{1*}Peera Meesap¹, Paongpetch Phimchan¹, Krittima Kasamawut¹ and Samnao Saowakoon^{1*}¹คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์ จังหวัดสุรินทร์

*Corresponding Author E-mail Address: samnao.sa@muti.ac.th

บทคัดย่อ

การศึกษ้อัตราการไหลของน้ำในระบบอะควาโปนิคส์ที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของปลาดุกลูกผสม และคื่นช่ายใบหยิก (*Brassica oleracea* var. *acephala*) คุณภาพน้ำ และประสิทธิภาพในการกำจัดสารอาหารที่มีอยู่ในน้ำ อัตราการไหลที่แตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 2,000 (T₁), 2,400 (T₂) และ 2,700 (T₃) ลิตรต่อชั่วโมง วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ แต่ละทรีตเมนต์มี 3 ซ้ำ ระบบการเลี้ยงปลาใช้ถังขนาด 1,000 ลิตร ปลาดุกลูกผสมมีน้ำหนักเฉลี่ยเริ่มต้น 100 กรัม อัตราการปล่อย 100 ตัวต่อเมตร² ผักคื่นช่ายใบหยิก ซึ่งเพาะเลี้ยงต้นกล้าแล้วจึงย้ายลงรางปลูกในระบบอะควาโปนิคส์ มีขนาดราง 1×5×0.20 เมตร³ จำนวน 50 ต้นต่อชุด ประเมินอัตราการเจริญเติบโต ผลผลิตของปลา พืช และคุณภาพของน้ำ เมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการทดลอง 90 วัน พบว่าอัตราการเจริญเติบโตของปลา มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) โดยมีค่าสูงขึ้นตามอัตราการไหลของน้ำที่เพิ่มขึ้น น้ำหนักเฉลี่ยมีค่าสูงที่สุดที่ T₃ (276.54±2.14 กรัม) โดยค่าเฉลี่ยในกลุ่ม T₂ และ T₁ เท่ากับ 247.11±1.91 กรัม และ 200.50±1.05 กรัม อัตราการอดสูงสุดในกลุ่ม T₃ (99.67±0.58 เปอร์เซ็นต์) รองลงมาคือ T₂ (86.00±2.00 เปอร์เซ็นต์) และ ต่ำสุดใน T₁ (80.33±1.52 เปอร์เซ็นต์) ผลผลิตปลาสุทธิ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) มีค่าสูงที่สุดคือ T₃ (27.56±0.37) รองลงมาคือ T₂ (21.25±0.38) และต่ำสุดใน T₁ (17.71±0.31) ผลผลิตของผักคื่นช่ายใบหยิกมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ผลผลิตในรูปน้ำหนักสดสูงสุดที่พบ คือ T₁ (24.06±0.37 กิโลกรัม) ตามด้วย T₂ (18.58±0.39 กิโลกรัม) และ T₃ (13.05±0.42 กิโลกรัม) โดยน้ำหนักแห้งมีค่าลดลงในลักษณะที่สอดคล้องกัน ระบบอะควาโปนิคส์สามารถลดปริมาณมลพิษของน้ำจากการเลี้ยงปลาได้อย่างมีนัยสำคัญ โดยมีประสิทธิภาพในการลดปริมาณของ BOD₅, TSS, TAN, NO₂-N, NO₃-N และ TP อยู่ในช่วงต่าง ๆ ดังต่อไปนี้ 44.88 – 53.51, 65.04 – 67.15, 2.25 – 85.60, 65.51 – 77.19, 65.82 – 74.77 และ 53.68 – 54.72 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ประสิทธิภาพในการบำบัดมลพิษที่ดีที่อัตราการไหลสูงที่สุดคือ 2,700 ลิตรต่อชั่วโมง

คำสำคัญ : ระบบอะควาโปนิคส์ ผักคื่นช่ายใบหยิก ปลาดุกลูกผสมลูกผสม อัตราการไหล การกำจัดสารอาหาร

Abstract

This study aims to investigate effects of water flow rate in an aquaponics system on growths of hybrid catfish and Curl leaf kale (*Brassica oleracea Acephala*), water quality and efficiency in nutrient removal. There were three different flow rates including 2000 (T₁), 2,400 (T₂) and 2,700 (T₃) liters per hour, according to the completely randomized experimental design of which individual treatments having 3 replicates. The fish culture system consisted of a 1,000 liter tank containing hybrid catfish with an average weight of 100 g, as well as a stocking of 100 fish/m². The kale was seedlings cultivated, and thereafter was transferred to the 1x5x0.20 m³ aquaponics system, having 50 kale plants per experimental set. Growth rate, productivity of the fish and the kale, as well as changes in water quality were assessed at the end of the 90 day trial period. Experimental results showed that the growth rates of the hybrid catfish statistically were significant differences ($p < 0.05$) among all experimental groups. The rates were increased in respects to increases of the water flow rates. The highest mean value of the fish weight was found in T₃ (276.54 ± 2.14 g), meanwhile the values of T₂ and T₃ were 247.11 ± 1.91 g, and 200.50 ± 1.05 g, respectively. The highest fish survival rate was observed in T₃ ($99.67 \pm 0.58\%$), followed by T₂ ($86.00 \pm 2.00\%$), and T₁ ($80.33 \pm 1.52\%$). The highest net yield (kg/m³) was T₃ (27.56 ± 0.37), followed by T₂ (21.25 ± 0.38). and the lowest value was in T₁ (17.71 ± 0.31), respectively. The yields of kale were statistically different. The highest fresh weight yield was found in the flow rate of T₁ (24.06 ± 0.37 kg), followed by T₂ (18.58 ± 0.39 kg) and T₃ (13.05 ± 0.42 kg), respectively. The dry weight yields also were decreased accordingly. This aquaponics system can significantly reduce wastewater pollutions from hybrid catfish cultures. The removal efficiencies of BOD₅, TSS, TAN, NO₂-N, NO₃-N and TP were in the following ranges: 44.88 – 53.51%, 65.04 - 67.15%, 72.25 – 85.60%, 65.51 - 77.19%, 65.82 - 74.77% and 53.68 – 54.72%, respectively. The best pollution treatment efficiency was occurred at the highest flow rate i.e., 2,700 liters/hour.

Keywords: Aquaponic system, Hybrid catfish, Curl leaf kale, Waterflow rate, Nutrient removal

บทนำ

ปัจจุบันการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหนาแน่น (Intensive culture) ทำให้น้ำจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมีของเสียจากการขับถ่ายของสัตว์น้ำและอาหารที่เหลือในปริมาณมาก (Raul, 2003; ดำรงค์, 2555) ซึ่งประกอบด้วยสารอินทรีย์ (Organic matter) และแร่ธาตุ เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และธาตุอื่น ๆ (Ghaly et al., 2005) จะเกิดการสะสมของแร่ธาตุต่าง ๆ โดยเฉพาะสารประกอบไนโตรเจน กลุ่มแอมโมเนีย (ในรูปไอออนแอมโมเนีย และอัลไอออนแอมโมเนีย) ไนเตรท และฟอสฟอรัส (Rafiee and Saad, 2005; Van Rijn et al., 2006) เมื่อมีการเปลี่ยนถ่ายน้ำ จึงมีการปล่อยของเสียที่มีปริมาณสารอินทรีย์จำนวนมากลงสู่แหล่งน้ำส่งผลต่อคุณภาพน้ำทำให้เกิดการเน่าเสียของน้ำอย่างฉับพลัน ปัจจุบันมีการพัฒนานำระบบหมุนเวียนของน้ำมาใช้ในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมากขึ้น ซึ่งระบบนี้จะช่วยลดปริมาณการปล่อยน้ำทิ้งจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ประหยัดน้ำและนำน้ำกลับมาใช้ใหม่อีกครั้ง (Water reuse or Recycle system) ในระบบการหมุนเวียนน้ำ (ดำรงค์,

2555) การเลี้ยงปลาร่วมกับการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน (Aquaponic) เป็นการทำงานร่วมกันของระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ (Aquaculture) และการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดิน (Hydroponic) โดยที่ 2 ระบบมีความสัมพันธ์กันโดยการเลี้ยงปลาจะมีการสะสมของแร่ธาตุที่เป็นประโยชน์ต่อพืช ดังนั้นแนวคิดการนำน้ำจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมาใช้ในการปลูกพืช นอกจากจะเป็นการใช้ประโยชน์จากธาตุอาหารที่สะสมอยู่แล้วยังเป็นการบำบัดน้ำ เพื่อให้มีคุณภาพดีขึ้นด้วย (Rakocy et al., 2004) ซึ่งเรียกว่า อะควาโพนิกส์ (Aquaponics) เป็นการผสมผสานของระบบการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำแบบหมุนเวียนกับการผลิตพืชแบบไม่ใช้ดิน (Rakocy et al., 2006) ระบบหมุนเวียนได้รับการออกแบบในลักษณะที่จะเลี้ยงปลาในปริมาณมากในปริมาณน้ำที่ค่อนข้างน้อย แล้วนำน้ำเสียกลับมาใช้ใหม่หลังจากบำบัดน้ำเพื่อกำจัดของเสียที่เป็นพิษ ซึ่งระบบไฮโดรโพนิกส์จะหมุนเวียนน้ำร่วมการผลิตสัตว์น้ำและการผลิตพืชได้รับการปรับปรุงและพัฒนา จนเป็นที่ยอมรับว่าเป็นระบบที่สามารถใช้ประโยชน์ และควบคุมของเสียที่เกิดจากสารอาหารจากการเลี้ยงปลา ใช้น้ำในปริมาณที่น้อยและได้ผลผลิตพืชเป็นรายได้เพิ่มเติม ดังนั้นพืชผักจึงเป็นที่นิยมนำมาแปรรูปหลายในการปลูกร่วมในระบบอะควาโพนิกส์ เนื่องจากสามารถดูดซับสารอาหารปลาที่ละลายในน้ำซึ่งเป็นสาเหตุของน้ำเสียได้อย่างมีประสิทธิภาพ จึงเป็นสารอาหารสำหรับการเจริญเติบโตของพืช (Dushenkov et al., 1995) แม้ว่า การเลี้ยงปลาและการปลูกพืชไร้ดินจะมีมาตั้งแต่สมัยโบราณ แต่การผสมผสานของทั้งสองสิ่งนี้เข้าด้วยกันนั้นค่อนข้างใหม่ และยังไม่ค่อยประสบความสำเร็จเท่าไรนักในระยะแรก (Diver, 2006) ผักคะน้าใบหยิกหรือผักเคล (Kale; *Brassica oleracea* var. *acephala*) เป็นผักใบตระกูลกะหล่ำ (Brassicaceae) ปัจจุบันผักคะน้าใบหยิกได้รับความนิยมเป็นอย่างมาก และได้รับความสนใจจากนักวิชาการ เนื่องจากอุดมไปด้วยสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพ (Bioactive) เช่น วิตามินซี โพรวิตามินเอ กลูโคซิโนเลต สารประกอบฟีนอล โยอาหาร มีธาตุอาหารรอง (ธาตุเหล็ก สังกะสี และแมงกานีส) และ ธาตุอาหารหลัก (แคลเซียม และแมกนีเซียม) (Khachik et al., 1991; Ayaz et al., 2006; Cartea et al., 2008; Olsen et al., 2009) จากงานวิจัยพบว่า ผักคะน้าใบหยิกช่วยยับยั้งการเกิดโรคหลอดเลือดหัวใจ (Kahlon et al., 2007; Kim et al., 2008; Kural et al., 2011) และ มะเร็ง (Chung et al., 2002) จึงได้รับความนิยมและรู้จักมากขึ้นและถือได้ว่าเป็นอาหารที่มีคุณค่าทางโภชนาการสูงและหลากหลาย เมื่อเทียบกับผักประเภทอื่น ๆ ในปริมาณที่เท่ากัน ในประเทศไทยได้เริ่มมีการปลูกผักคะน้าใบหยิกเพื่อบริโภคมากขึ้น ทั้งแบบรับประทานสดและแปรรูป จึงทำให้มีมูลค่าสูงและเป็นที่ต้องการของตลาด ในการศึกษาการปลูกผักคะน้าใบหยิกร่วมกับระบบอะควาโพนิกส์นั้น ได้มีการศึกษาการเลี้ยงปลาชนิดแตกต่างกันในปลานิลและปลาดุกร่วมกับปลูกผักคะน้าใบหยิกร่วมกับผักชนิดอื่นด้วย (Afolabi, 2020; Arthanawa et al., 2021) การศึกษาการประยุกต์ใช้ออกแบบระบบอะควาโพนิกส์ให้เหมาะสมกับสภาพพื้นที่และทรัพยากรที่มีอยู่อย่างจำกัดได้โดยศึกษาปริมาณของไนโตรเจนร่วมกับผักกินใบ เพื่อศึกษาข้อกังวลเกี่ยวกับการสะสมไนโตรเจน โดยการศึกษาผักสลัดคอส ผักชาร์ดสวิส และผักคะน้าใบหยิก (Wortman, 2015; Pérez-Urrestaraz et al., 2019) ปลาดุกลูกผสมหรือโดยทั่วไปเรียกว่าปลาดุกบิ๊กอุย (*Clarias macrocephalus* x *C. gariepinus*) เป็นปลาน้ำจืดที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจเป็นอันดับสองของประเทศไทยจากปลานิลทั้งเชิงผลผลิตและมูลค่า (กรมประมง, 2562) อีกทั้งเป็นสัตว์น้ำเศรษฐกิจที่สำคัญชนิดหนึ่งของภูมิภาคเอเชียตะวันออกเฉียงใต้ (Yi et al., 2003) ปลาดุกลูกผสมนิยมบริโภคเนื่องจากเนื้อรสชาติดี เจริญเติบโตเร็วและต้านทานโรคได้ดี มีการศึกษาการเลี้ยงปลาดุกลูกผสมในระบบอะควาโพนิกส์หลายรูปแบบ (อุธร และคณะ, 2556ก; 2557ข; วีระรัตน์ และคณะ, 2560) การเลี้ยงปลาร่วมกับการปลูกพืชในระบบอะควาโพนิกส์ที่จะประสบความสำเร็จนั้น ต้องการการจัดการที่ดีและมีกระบวนการที่พิเศษ การศึกษาวิจัยที่ผ่านมาในประเทศไทยนั้นมักจะมุ่งเน้นเกี่ยวกับความหนาแน่นที่เหมาะสมของการเลี้ยงปลา (ปฐมพงษ์ และคณะ, 2557) อัตราส่วนพื้นที่ปลูกและปริมาณน้ำที่เหมาะสม (วีระยุทธ และคณะ, 2557) หรือชนิดของวัสดุกรองสำหรับระบบกรองชีวภาพ (สุฤทธิ์ และคณะ, 2551) เป็นต้น อย่างไรก็ตามการเลี้ยงสัตว์น้ำในระบบอะควาโพนิกส์โดยใช้น้ำหมุนเวียน ภายใต้อัตราการไหลต่าง ๆ ที่ผ่านมานั้นพบว่ามีการศึกษาอยู่น้อย ถึงแม้ว่าการเติบโตของปลาจะเพิ่มขึ้นตามระดับของโปรตีนในอาหารที่เพิ่มขึ้นจนถึงระดับที่เหมาะสม แต่การตายของปลาก็เกิดขึ้นจากการสะสมของเสียในระบบน้ำที่เป็นพิษมากเกินไป การจัดการอัตราการไหลของน้ำที่เหมาะสมสำหรับการปลดปล่อยมลพิษ หรือสมดุลกับการดูดไปใช้ของพืชจึงเป็นสิ่งสำคัญและจำเป็น ดังนั้นวัตถุประสงค์หลักของศึกษานี้เพื่อศึกษาผลของอัตราการไหลของน้ำต่อการเจริญเติบโตของปลาและพืช คุณภาพน้ำและประสิทธิภาพในการบำบัดของเสียในระบบอะควาโพนิกส์

วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

การออกแบบระบบบ่อบำบัดน้ำเสียแบบหมุนเวียนประกอบด้วยถังพลาสติกทรงสี่เหลี่ยมจัตุรัสขนาด 1x1x1 เมตร³ มีความจุของน้ำปริมาตร 1,000 ลิตร จำนวน 9 ถัง (Fig.1) โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design) ประกอบด้วย 3 ทรีตเมนต์ ทรีตเมนต์ละ 3 ซ้ำ ที่อัตราการไหล 2,000 (T₁), 2,400 (T₂) และ 2,700 (T₃) ลิตรต่อชั่วโมง ดำเนินการคัดเลือกปลาดุกลูกผสมลูกผสมที่มีน้ำหนักเฉลี่ย 100 กรัม อัตราการปล่อย 100 ตัวต่อตารางเมตร โดยให้อาหารเม็ดลอยน้ำที่มีโปรตีน 32 เปอร์เซ็นต์ ให้ในอัตราส่วน 3 เปอร์เซ็นต์ต่อน้ำหนักตัวต่อวัน แบ่งให้วันละ 3 ครั้ง ทำจากการสูบน้ำหนักปลาซึ่งน้ำหนักเก็บข้อมูลแต่ละตัวจำนวน 50 ตัว ทุกระยะเวลา 2 สัปดาห์ ประเมินอัตราการเจริญเติบโต ผลผลิตและอัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ (FCR: Feed conversion ratio) ของปลาการทดลองระยะเวลา 90 วัน ศึกษาเกี่ยวกับการปลูกผักคะน้าใบหยิก (*Brassica oleracea* var. *acephala*) โดยเพาะคะน้าใบหยิกลงในถาดปลูกขนาด 3.5 เซนติเมตรเป็นเวลา 15 วัน ด้วยระบบ DRFT (Dynamic Root Floating Technique) ด้วยน้ำเปล่า เป็นระยะเวลา 21 วัน แล้วจึงย้ายลงแปลง ภายในระบบบ่อบำบัดน้ำเสีย 10 เซนติเมตร โดยใช้เพอร์ไลท์เป็นวัสดุปลูก โดยวางปลูกกะโหลกคะน้าใบหยิกขนาด 1x5x0.40 เมตร ระยะปลูก 50x20 เซนติเมตร จำนวน 9 ราง ปลูกรวม 50 ต้นต่อกรรมวิธี สำหรับปริมาณน้ำในรางปลูกนั้นมีความจุ 2000 ลิตร (2 ลูกบาศก์เมตร) ซึ่งจากอัตราการไหลของน้ำแต่ละกรรมวิธีนั้นจะทำให้ปริมาตรของน้ำไหลหมุนเวียนในระบบ 24 ชั่วโมง คือ 47.5, 57.6 และ 64 ลูกบาศก์เมตรต่อวัน ตามลำดับ ใช้ระยะเวลา 90 วัน บันทึกผลผลิตทั้งหมดที่เก็บเกี่ยวได้ทั้งน้ำหนักสด และน้ำหนักแห้ง

ดำเนินการทดลอง ณ มีทรัพย์ฟาร์ม ตำบลตั้งใจ อำเภอเมืองสุรินทร์ จังหวัดสุรินทร์ ห้องปฏิบัติการสาขาประมง และสาขาพืชศาสตร์ สิ่งทอและการออกแบบ คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์ อำเภอเมืองสุรินทร์ จังหวัดสุรินทร์

การวิเคราะห์คุณภาพน้ำและปริมาณสารอาหาร

เพื่อเปรียบเทียบผลของอัตราการไหลต่อคุณภาพน้ำ และประสิทธิภาพของการบำบัดสารอาหารในน้ำด้วยระบบบ่อบำบัดน้ำเสีย โดยวิเคราะห์ค่า BOD₅ (Biochemical oxygen demand) แอมโมเนียไนโตรเจน (Total ammonia nitrogen; TAN) สารแขวนลอยทั้งหมด (Total suspended solid; TSS) ไนไตรท์ (Nitrite; NO₂-N) ไนเตรท (Nitrate; NO₃-N) และฟอสฟอรัสรวม (Total Phosphorous; TP) ในน้ำเสียจากการเลี้ยงปลาดุกลูกผสมลูกผสมไหลผ่านระบบไบโอฟิลเตอร์ (Biofilter) ณ จุดที่เข้าสู่ (Influent) แปลงปลูกผัก 1 จุด และที่น้ำออก (Effluent) จากแปลงปลูกพืช 1 จุด วิเคราะห์คุณภาพน้ำระหว่างช่วงการทดลอง สุ่มตัวอย่างระหว่างเวลา 8.30 น. ถึง 9.30 น. ของวันที่สุ่มตัวอย่างแต่ละครั้ง นำตัวอย่างน้ำไปแช่เย็นที่ 4 องศาเซลเซียส ในขวดโพลีทีนที่ติดฉลากสำหรับการวิเคราะห์ทางเคมี อุณหภูมิของน้ำวัดโดยเทอร์โมมิเตอร์ และวัดค่า pH โดยใช้เครื่องวัด pH meter; YSI pH100 ออกซิเจนที่ละลายน้ำ (Dissolved oxygen; DO) ความกระด้าง (Hardness) ความเป็นด่าง (Alkalinity) แอมโมเนีย ไนไตรท์ และไนเตรท ทำการวิเคราะห์โดยวิธีมาตรฐานของ APHA (2005) ส่วนค่าความนำไฟฟ้า (Electrical conductivity; EC) วัดด้วย Conductivity meter; YSI EC300 ซึ่งทำการตรวจวิเคราะห์ทุก 2 สัปดาห์

การวิเคราะห์ทางสถิติ

เมื่อสิ้นสุดการทดลองในแต่ละช่วงนำมาค่าเฉลี่ยและประเมินอัตราการเจริญเติบโต อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ อัตราการรอดตาย คุณภาพน้ำ ผลผลิตของปลาดุกลูกผสม และผักคะน้าใบหยิก ข้อมูลที่ได้นำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) ตามแผนการทดลองแบบสุ่มตลอด (Completely Randomized Design) และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

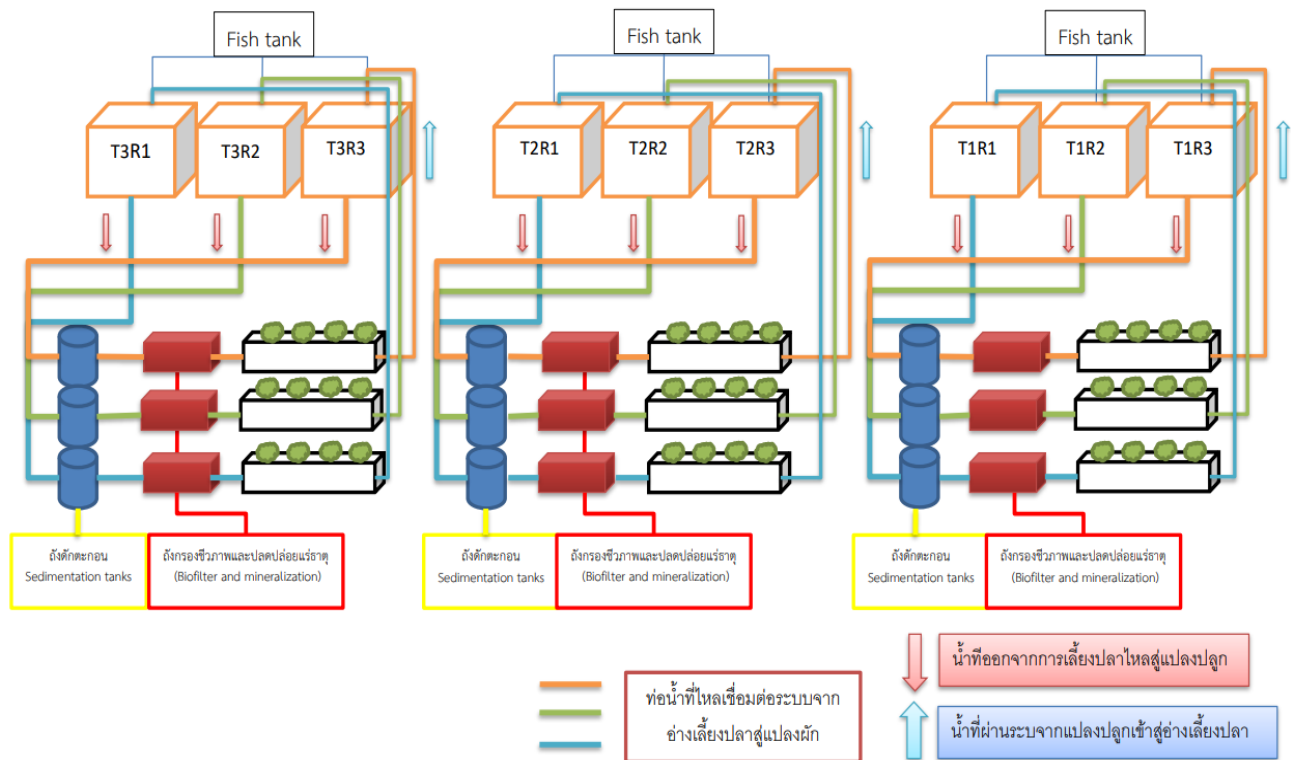


Fig.1 Layout of aquaponic recirculating system. Consists of fish tanks, growing beds, sedimentation tanks, biofilter and mineralization units.

ผลการวิจัย และการอภิปรายผล

การเจริญเติบโตของปลา

การศึกษานี้จัดทำเปรียบเทียบผลของอัตราการไหลของน้ำ 3 รูปแบบ ได้แก่ อัตราการไหล 2,000 (T_1), 2,400 (T_2) และ 2,700 (T_3) ลิตรต่อชั่วโมง ต่อการเจริญเติบโตของปลาดุกลูกผสมบิกอูยและผักคะน้าใบหยิกภายใต้ระบบบ่อควาโปนิคส์ การเจริญเติบโตของปลา ผลผลิตของผักคะน้าใบหยิก การบำบัดสารอาหารในน้ำ และพารามิเตอร์คุณภาพน้ำเป็นตัวชี้วัดความเหมาะสม เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่าน้ำหนักเฉลี่ยของปลาดุกลูกผสมลูกผสมในแต่ละรูปแบบแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยมีค่าสูงขึ้นตามอัตราการไหลของน้ำที่เพิ่มขึ้น ใน T_3 (276.54 ± 2.14 กรัม) ตามด้วย T_2 (247.11 ± 1.91 กรัม) และ T_1 (200.50 ± 1.05 กรัม) ตามลำดับ (Table 1)

อัตราการไหลที่ต่างกันมีผลต่อการรอดชีวิตของปลาในแต่ละกลุ่มปลาทดลอง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) อัตราการรอดสูงสุดพบได้ใน T_3 (99.67 ± 0.58 เปอร์เซ็นต์) ตามด้วย T_2 (86.00 ± 2.00 เปอร์เซ็นต์) และ T_1 (80.33 ± 1.52 เปอร์เซ็นต์) อัตราการเจริญเติบโต (กรัมต่อวัน) มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ในทุกกลุ่มการทดลอง และเป็นไปตามแนวโน้มเดียวกันกับการเพิ่มของผลผลิตสุทธิ (กิโลกรัมต่อลูกบาศก์เมตร) ที่แสดงค่าสูงสุดใน T_3 (27.56 ± 0.37) รองลงมาคือ T_2 (21.25 ± 0.38) และต่ำสุดใน T_1 (17.71 ± 0.31) (Table 1)

อัตราการเปลี่ยนอาหารเป็นเนื้อ (FCR) ของปลาในกลุ่มที่เลี้ยงในอัตราการไหลของน้ำที่แตกต่างกัน ก็พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) ค่า FCR จะลดลงตามอัตราการไหลที่สูงขึ้นคือ 1.47 ± 0.04 , 1.33 ± 0.02 และ 1.24 ± 0.04 ในกลุ่มปลาทดลอง T_1 , T_2 และ T_3 ตามลำดับ ค่า FCR นี้ประเมินจากการเลี้ยงด้วยอาหารที่มีระดับโปรตีน 32 เปอร์เซ็นต์

Table 1. Hybrid catfish and Curl leafed kale (*Brassica oleracea* var. *acephala*) productions under the different water flow rates in an aquaponic system.

Measures	water flows ratios (L/hr.)		
	2,000(T ₁)	2,400(T ₂)	2,700(T ₃)
Catfish			
Initial weight (g fish ⁻¹)	100.33±0.67 ^a	99.67±1.55 ^a	100.70±0.30 ^a
Final weight gain (g fish ⁻¹)	200.50±1.05 ^c	247.11±1.91 ^b	276.54±2.14 ^a
Growth rate (g day ⁻¹)	1.34±0.02 ^c	1.64±0.02 ^b	1.95±0.02 ^a
Net production (kg m ⁻³)	17.71±0.31 ^c	21.25±0.38 ^b	27.56±0.37 ^a
Survival rate (%)	80.33±1.52 ^c	86.00±2.00 ^b	99.67±0.58 ^a
FCR	1.47±0.04 ^c	1.33±0.02 ^b	1.24±0.04 ^a
Plant			
Shoot Height (cm)	20.12±3.75 ^a	19.92±2.43 ^a	13.21±2.14 ^b
Root length (cm)	35.24±5.11 ^a	32.35±4.51 ^a	21.54±5.20 ^b
No. of leaf/shoot	16.13±2.51 ^a	15.42±1.95 ^a	14.13±2.15 ^a
Canopy width (cm)	21.84±3.53 ^a	20.24±3.76 ^a	14.34±1.15 ^b
Fresh Yield (kg)	24.06±0.37 ^a	18.58±0.39 ^b	13.05±0.42 ^c
Dry Yield (kg)	2.18±0.02 ^a	1.69±0.03 ^b	1.13±0.72 ^c

* Values with different superscripts in the same row are significantly different (p<0.05)

ผลผลิตของผักคะน้าใบหยิก

ผลผลิตของพืชเป็นอีกประเด็นที่สำคัญในระบบอะควาโปนิคส์ ในการศึกษาผักคะน้าใบหยิกปลูกบนรางปลูกในระบบ และได้รับน้ำจากการเลี้ยงปลาจากผสมในอัตราการไหลที่แตกต่างกันสามแบบ ในการศึกษาผลผลิตของผักคะน้าใบหยิกมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ระหว่างกลุ่มทดลอง (Table 1) ความสูงเฉลี่ยของผักคะน้าใบหยิกที่มีการตอบสนองดีต่ออัตราการไหลที่ช้าคือ T₁ และ T₂ ดีกว่า T₃ อย่างมีนัยสำคัญ คือ 20.12±3.75, 19.92±2.43 และ 13.21±2.14 เซนติเมตร ส่วนความยาวเฉลี่ยของราก มีค่าเท่ากับ 35.24±5.11, 32.35±4.51 และ 21.54±5.20 เซนติเมตรตามลำดับ รวมถึงองค์ประกอบผลผลิตในด้านอื่น ๆ ก็มีแนวโน้มในการตอบสนองต่ออัตราการไหลที่ช้าดีกว่า อัตราการไหลเร็วเช่นเดียวกัน ได้แก่จำนวนใบต่อดัน ของชุดการทดลอง T₁, T₂ และ T₃ มีค่าเฉลี่ย 16.13±2.51, 15.42±1.95 และ 14.13±2.15 ใบต่อดัน ส่วนความกว้างทรงพุ่มของผักคะน้าหลังการเก็บเกี่ยวก็พบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญระหว่างอัตราการไหลช้า 2 อัตราแรก (T₁ และ T₂) มีค่าสูงกว่าอัตราการไหลเร็ว (T₃) คือ 21.84±3.53, 20.24±3.76 และ 14.34±1.15 เซนติเมตร ตามลำดับ

เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่าผลผลิตผักคะน้าใบหยิกจะมีทิศทางสวนทางกับผลผลิตปลา คือได้ผลผลิตสูงที่สุดเมื่อคิดเป็นน้ำหนักสดพบในระบบการทดลองที่มีอัตราการไหลของน้ำต่ำที่สุดคือ T₁ เท่ากับ 24.06±0.37 กิโลกรัม ตามด้วย T₂ เท่ากับ 18.58±0.39 กิโลกรัม และ T₃ เท่ากับ 13.05±0.42 กิโลกรัม ตามลำดับ โดยเมื่อประเมินเป็นน้ำหนักแห้งก็ได้ค่าที่ลดลงในทางที่สอดคล้องกัน (Table 1)

Table 2. The water qualities in hybrid catfish tanks at different water flow rates.

Parameters	Water flow rates (L/hr.)		
	2,000(T ₁)	2,400(T ₂)	2,700(T ₃)
pH	7.28 – 7.42	7.28 – 7.34	7.34 – 7.56
Dissolved oxygen (mg/L)	4.12 – 4.42	4.24 – 4.61	4.42 – 5.26
Temperature(°C)	27.3 – 28.7	27.2 – 28.9	27.3 – 28.5
Total alkalinity (mg-CaCO ₃ /L)	40.20 – 50.32	41.70 – 52.14	40.35 – 50.39
Total hardness (mg-CaCO ₃ /L)	30.42 – 33.11	31.26 – 33.49	30.54 – 33.21
Electrical conductivity (ms/cm)	0.8 – 1.0	0.8 – 1.1	0.7 – 1.0

คุณภาพน้ำและการเปลี่ยนแปลงของสารอาหาร

อุณหภูมิของน้ำระหว่างช่วงการศึกษาจะอยู่ในช่วง 27.2 – 28.9 องศาเซลเซียส ซึ่งไม่มีความแตกต่างระหว่าง กลุ่มการทดลอง (Table 2) ค่า pH จะแปรผันภายในช่วง 7.28 – 7.56 ในการศึกษาที่มีการเพิ่มปริมาณในระบบน้ำต่อวันประมาณ 5 เปอร์เซ็นต์ เพื่อทดแทนการสูญเสียเนื่องจากกระบวนการระเหยและการคายน้ำของผักคะน้าใบหยิก ซึ่งใกล้เคียงกับการศึกษาของ Lewis et al. (1978) และ Hussain et al. (2014) ที่รายงานว่า การสูญเสียของน้ำเฉลี่ยต่อวันในระบบบะควาโปนิคส์อยู่ที่ประมาณ 6.6 เปอร์เซ็นต์ สอดคล้องกับ McMurtry et al. (1997) ที่แนะนำให้ใช้อัตราการเปลี่ยนน้ำอยู่ระหว่าง 1.2 ถึง 4.7 เปอร์เซ็นต์ต่อวัน

ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (DO) เฉลี่ยสูงสุดพบในระบบทดลองที่มีอัตราการไหลสูงสุด (T₃, 2,700 ลิตรต่อชั่วโมง) มีค่า 5.26 มิลลิกรัมต่อลิตร ตามด้วย T₂ และ T₁ (4.61 และ 4.42 มิลลิกรัมต่อลิตร) ตามลำดับ การควบคุมปริมาณออกซิเจนละลายน้ำมีความสำคัญต่อสุขภาพของปลาและจุลินทรีย์ในระบบกรองชีวภาพ (Somerville et al., 2014) แนะนำว่าควรรักษาระดับออกซิเจนละลายน้ำให้ไม่ต่ำกว่า 4.0 มิลลิกรัมต่อลิตร เพื่อการเจริญเติบโตที่เหมาะสมของปลาในเขตร้อน ในขณะที่การทำงานของจุลินทรีย์กลุ่ม Nitrifying bacteria ที่ทำการเปลี่ยนแอมโมเนียที่เป็นอันตรายไปเป็นไนเตรทที่ก็ต้องการปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำที่เหมาะสมเช่นกัน ซึ่งระดับเหมาะสมดังกล่าวต้องไม่ต่ำกว่า 2 มิลลิกรัมต่อลิตร (Masser et al., 1999) ในการทดลองนี้ พบว่าระดับปริมาณออกซิเจนที่ละลายในน้ำ ในทุกกลุ่มการทดลอง มีค่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสมตลอดระยะเวลาการทดลอง

อัลคาไลน์ (Alkalinity) มีค่าอยู่ระหว่าง 40.20 – 50.39 มิลลิกรัมต่อลิตร และความกระด้าง (Hardness) มีค่า 30.42 - 33.49 มิลลิกรัมต่อลิตร พบว่า อัตราการไหลของน้ำไม่มีผลทำให้ค่าเหล่านี้แตกต่างกันอย่างชัดเจน ความกระด้างจากคาร์บอเนต หรืออัลคาไลน์ ของน้ำในระบบบะควาโปนิคส์ จัดว่าเป็นสิ่งจำเป็น เพราะความกระด้างที่เหมาะสมจะช่วยรักษาค่า pH ให้คงที่ หากค่าอัลคาไลน์ไม่เพียงพอจะทำให้มีการผันผวนของค่า pH อย่างรวดเร็ว ซึ่งจะส่งผลเสียต่อระบบ ต่อปลา และการใช้ประโยชน์จากสารอาหารของพืช (Bregnballe, 2015) อย่างไรก็ตาม Somerville et al. (2014) ได้แนะนำว่าระดับความกระด้างที่เหมาะสมของน้ำในระบบบะควาโปนิคส์คือประมาณ 60 – 140 มิลลิกรัมต่อลิตร ดังนั้นค่าอัลคาไลน์และความกระด้างในการทดลองนี้มีค่าต่ำไปเล็กน้อย สมควรที่จะได้รับการปรับให้อยู่ในระดับที่สูงขึ้นได้ ซึ่งน่าจะส่งผลต่อผลผลิตปลาและผักคะน้าใบหยิกให้สูงขึ้นได้

ค่า EC (Electrical Conductivity) อยู่ในช่วงระหว่าง 0.7 - 1.1 ms/cm. ค่า EC นอกจากจะแสดงถึงปริมาณสารอาหารสำหรับพืชแล้ว ยังเป็นปัจจัยที่มีส่วนเกี่ยวข้องกับกลไกทางออสโมซิส ในการดูดซึมน้ำของพืชด้วย (Somerville et al., 2014) ค่า EC ในระบบทดลองนี้ ค่อนข้างจะคงที่ซึ่งแสดงถึง ความเข้มข้นของสารอาหารในน้ำอยู่ในระดับที่ปกติตลอดช่วงเวลาทดลอง

การบำบัดค่าคุณภาพน้ำในอัตราการไหลต่าง ๆ

อัตราการไหลของน้ำทั้ง 3 อัตรา T_1 (2,000 ลิตรต่อชั่วโมง) T_2 (2,400 ลิตรต่อชั่วโมง) และ T_3 (2,700 ลิตรต่อชั่วโมง) สามารถบำบัดไนเตรทไนโตรเจน ($\text{NO}_3\text{-N}$) ได้เป็นอย่างดีในช่วง 65.82 – 74.77 เปอร์เซ็นต์ (Fig.2) แสดงให้เห็นว่าปริมาณของสารอาหารประเภทไนเตรทที่เกิดขึ้นในระบบจากการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ และจากปุ๋ยที่ปนเปื้อนได้ถูกบำบัด และนำไปใช้ประโยชน์อย่างมีประสิทธิภาพ ไนเตรทไนโตรเจนสะสมในระบบเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำอันเป็นผลมาจากการกระบวนการไนตริฟิเคชัน (Nitrification) และเมื่อสิ้นสุดระยะเวลาของการผลิตปลาและพืชก็สามารถกำจัดไนเตรทไนโตรเจนได้ในอัตราดังกล่าว ในการศึกษา การกำจัดไนเตรทโดยรวมของน้ำในระบบบ่อควาโปนิคส์ลดปริมาณลงตามสัดส่วนตามอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น พบว่าอัตราการไหลที่ 2,700 ลิตรต่อชั่วโมง มีอัตราการขจัดสูงสุดประมาณ 74.77 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งสอดคล้องกับ Endut et al. (2009) ที่พบว่าอัตราการขจัดไนเตรท มีความสัมพันธ์เชิงบวกกับอัตราการไหลของน้ำ

ค่า BOD_5 ซึ่งหมายถึงปริมาณออกซิเจนที่แบคทีเรียต้องการใช้ ในการย่อยสลายสารอินทรีย์ในระบบ ความเข้มข้นของ BOD_5 ในระบบเพิ่มขึ้นเนื่องจากการปลดปล่อยอินทรีย์วัตถุที่ละลายและสะสมออกจากเมล็ดพืชที่กำลังพัฒนาและอาหารปลาที่เหลือ (Viadero et al., 2005) รวมทั้งจากของเสียที่ขับออกจากตัวปลา เป็นแหล่งสำคัญของสารอินทรีย์ในน้ำเสีย เมื่อสิ้นสุดระยะเวลาการผลิต พบว่าค่า BOD_5 ลดลงที่ 44.88–53.51 เปอร์เซ็นต์ ซึ่งพบว่าอัตราการบำบัดมีแนวโน้มสูงขึ้นตามอัตราการไหลของน้ำตามที่แสดงไว้ใน Table 3 และ Fig. 2

อัตราการบำบัดค่าคุณภาพน้ำและพารามิเตอร์ทางกายภาพ เคมี ของน้ำที่อัตราการไหลต่างๆ ได้แสดงใน Table 3 และ Fig. 2 พบว่าเปอร์เซ็นต์การบำบัด BOD_5 , TSS, TAN และ nitrite-N มีการบำบัดได้ดีขึ้นตามอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเป็นการเปรียบเทียบของความเข้มข้นของน้ำที่เข้าสู่ระบบ (Influent) และน้ำที่ไหลออก (Effluent) คิดเป็นเปอร์เซ็นต์ในขณะที่ยอดการบำบัด TP สูงขึ้นเล็กน้อยอัตราการไหลที่เพิ่มขึ้น (Fig. 2)

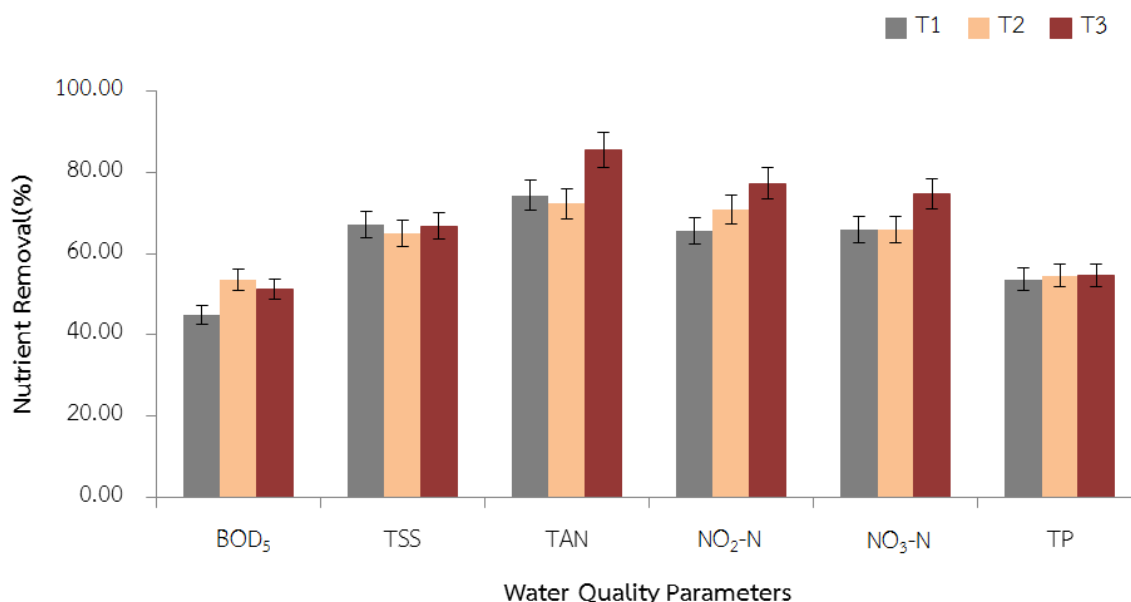
ในการศึกษาที่กำจัด TAN (Total Ammonia Nitrogen) ในน้ำหมุนเวียนได้อย่างมีประสิทธิภาพ 72.25 - 85.60 เปอร์เซ็นต์ การกำจัด TAN นี้มีแนวโน้มว่าเป็นผลมาจากอิทธิพลของอัตราการไหลของน้ำที่สูงขึ้น แม้ว่าจะไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ค่า TAN คือปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดในรูปของ NH_3 และ NH_4^+ ในน้ำ ในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ ความเข้มข้นของ TAN ต้องน้อยกว่า 0.5 มิลลิกรัมต่อลิตร (Somerville et al., 2014) ค่าที่ได้จากการวิเคราะห์น้ำตัวอย่างที่เก็บจากตำแหน่งที่น้ำไหลออก (Effluent) พบว่ามีค่าอยู่ในช่วง 0.11 - 0.17 มิลลิกรัมต่อลิตร แสดงว่าอยู่ในระดับที่ไม่มีผลกระทบต่อภาระเบียดเบียนของปลาทดลอง

ความเข้มข้นของฟอสฟอรัสทั้งหมด (TP) ในแต่ละทรีตเมนต์ จะเพิ่มขึ้นในช่วงระยะเวลาการออกของเมล็ดพืช เนื่องจากการปลดปล่อยสารอาหารออกจากเมล็ดที่กำลังพัฒนา (Nelson, 2004) จะเห็นได้จากการทดลองค่าความเข้มข้นของ TP ลดลงจากเดิม ณ จุดที่น้ำเข้ามีค่าระหว่าง 12.03 - 13.20 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็น 5.23 - 6.40 มิลลิกรัมต่อลิตร ณ จุดที่น้ำออก (Table 3) ซึ่งลดลงอย่างมีนัยสำคัญ ซึ่งเป็นผลมาจากอัตราการไหล ซึ่งถึงแม้ว่าจะไม่มีความแตกต่างกันระหว่างอัตราการไหล เศษอาหารและมูลจากปลาเป็นแหล่งสำคัญของฟอสฟอรัสในน้ำ ในน้ำเสียจากการเลี้ยงสัตว์น้ำ ซึ่งเป็นทั้งฟอสเฟตที่ละลายน้ำได้และไม่ละลายน้ำ ทั้งในรูปแบบอินทรีย์และอนินทรีย์ (Tucker and Boyd, 1985)

Table3. Mean values and percentage removal of water quality variables at various flow rates.

Parameters	Flowrates (L/hr.)	Influent (mg/L)	Effluent (mg/L)	Removal (%)
BOD ₅	2,000(T ₁)	4.73±0.21 ^a	2.60±0.20 ^a	44.88±6.67 ^a
	2,400(T ₂)	5.17±0.25 ^a	2.40±0.10 ^a	53.51±1.86 ^a
	2,700(T ₃)	4.73±0.51 ^a	2.30±0.20 ^a	51.23±4.16 ^a
TSS	2,000(T ₁)	54.33±1.36 ^a	17.87±2.08 ^a	67.15±3.31 ^a
	2,400(T ₂)	57.57±3.97 ^a	20.07±0.15 ^a	65.04±2.11 ^a
	2,700(T ₃)	53.20±0.90 ^a	17.63±1.50 ^a	66.82±3.38 ^a
TAN	2,000(T ₁)	0.71±0.15 ^a	0.17±0.02 ^a	74.35±8.72 ^a
	2,400(T ₂)	0.57±0.25 ^a	0.13±0.02 ^a	72.25±16.59 ^a
	2,700(T ₃)	0.80±0.19 ^a	0.11±0.05 ^a	85.60±6.85 ^a
NO ₂ N	2,000(T ₁)	0.27±0.07 ^a	0.09±0.20 ^a	65.51±7.34 ^a
	2,400(T ₂)	0.26±0.01 ^a	0.08±0.01 ^a	70.84±2.59 ^a
	2,700(T ₃)	0.21±0.02 ^a	0.05±0.15 ^b	77.19±9.31 ^a
NO ₃ N	2,000(T ₁)	16.63±0.91 ^a	5.63±0.31 ^a	66.00±3.64 ^a
	2,400(T ₂)	15.36±1.10 ^a	5.20±0.98 ^a	65.82±8.57 ^a
	2,700(T ₃)	14.80±0.70 ^a	3.73±0.21 ^b	74.77±0.89 ^a
TP	2,000(T ₁)	13.20±0.90 ^a	6.10±0.20 ^a	53.68±2.83 ^a
	2,400(T ₂)	12.03±1.37 ^a	5.43±0.12 ^b	54.53±4.28 ^a
	2,700(T ₃)	12.39±1.15 ^a	5.23±0.12 ^b	54.72±3.15 ^a

* Values with different superscripts of each parameter in the same column are significantly different (p<0.05)

**Fig. 2** Percentage removals of water quality parameters at various flow rates in aquaponic system.

บทสรุป

จากการศึกษาสรุปได้ว่าอัตราการไหลทั้งหมดมีผลในแง่ของการเจริญเติบโตของปลาตุ๊กตากลูผสม ทั้งในด้านอัตราการรอดชีวิต อัตราการเจริญเติบโต และผลผลิตสุทธิ มีความแตกต่างที่มีนัยสำคัญ โดยมีค่าสูงสุดในอัตราการไหลที่สูงที่สุด และรองลงมาตามลำดับ อัตราการไหลของน้ำระบบบ่อควาโปนิคส์ที่มีการเลี้ยงปลาตุ๊กตากลูผสม ส่งผลให้ผักคะน้าใบหยิกมีการเจริญเติบโตได้ดีและตอบสนองเชิงบวกต่อการปลูกโดยใช้น้ำเสียจากระบบการเลี้ยงปลา ในแง่ของการเจริญเติบโตและการผลิตชีวมวลในแนวทางที่ตรงกันข้ามกับผลผลิตปลา โดยพบว่า ความสูงของต้นเฉลี่ยที่เก็บเกี่ยวอยู่ในช่วง 20 - 24 เซนติเมตร และช่วงให้ผลผลิตสด 13.05 - 24.06 กิโลกรัมต่อรางปลูก ซึ่งพบว่าการเจริญเติบโตของพืชสูงที่สุดที่อัตราการไหลของน้ำที่ต่ำที่สุดคือ 2,000 ลิตรต่อชั่วโมง

ผักคะน้าใบหยิกที่ปลูกในระบบบ่อควาโปนิคส์ สามารถลดปริมาณมลพิษของน้ำเสียจากการเลี้ยงสัตว์ปลาตุ๊กตากลูผสมได้อย่างมีนัยสำคัญ BOD₅, TSS, TAN, NO₂-N, NO₃-N และ TP อยู่ในช่วง 44.88 - 53.51, 65.04 - 67.15, 72.25 - 85.60, 65.51 - 77.19, 65.82 - 74.77 และ 53.68 - 54.72 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ผลจากการศึกษานี้แสดงให้เห็นว่าการเจริญเติบโตของพืชดีที่สุดเกิดขึ้นที่อัตราการไหล 2,000 ลิตรต่อชั่วโมง แต่ประสิทธิภาพในการบำบัดมลพิษที่ดีที่สุดเกิดขึ้นที่อัตราการไหลสูงที่สุดคือ 2,700 ลิตรต่อชั่วโมง

ผลการศึกษาชี้ให้เห็นว่าระบบบ่อควาโปนิคส์ มีส่วนสำคัญในการลดมลภาวะต่อสิ่งแวดล้อมอย่างมีประสิทธิภาพ โดยใช้ประโยชน์จากของเสียทางชีวภาพที่เกิดจากระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำ เพื่อการผลิตพืชผักระบบอินทรีย์ซึ่งเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมอย่างยั่งยืน

กิตติกรรมประกาศ

คณะผู้วิจัยขอขอบคุณที่ได้รับการสนับสนุนจากทุนการวิจัยและอุปกรณ์การวิจัย จากหลักสูตรเทคโนโลยีเกษตรและสาขาประมง คณะเกษตรศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสุรินทร์ และมีทรัพย์สินทางปัญญา ตำราตำราใจ อำเภอเมืองสุรินทร์ จังหวัดสุรินทร์ สนับสนุนสถานที่ในการทดลอง จนการศึกษาสำเร็จเรียบร้อยอย่างสมบูรณ์

เอกสารอ้างอิง

- ดำรงค์ โลหะลักษณะเดช, กฤษฎา พรหมณัฐ, วิกิจ ฝนรับ และ ณิชมา มาชู. (2555). การเลี้ยงปลานิลร่วมกับการปลูกผักโดยไม่ใช้ดินแบบ DYNAMIC ROOT FLOATING TECHNIQUE. น.447-454 ใน เรื่องเติมการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 50: สาขาสัตว์, สาขาสัตวแพทยศาสตร์, สาขาประมง. กรุงเทพฯ.
- ธีระรัตน์ ชินแสน, นภาพร เวชกามา, จักรกฤษณ์ วรณวิจิต, เมวิกา อันทะลย์, อภิชาติ ออมอด และ เกศศิริพันธ์ แสงมณี. (2560). ผลของการใช้น้ำเหลือทิ้งจากการเลี้ยงปลาต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของผักกวางตุ้งฮ่องเต้ในระบบการปลูกพืชโดยไม่ใช้ดินแบบสารละลายธาตุอาหารไม่หมุนเวียน. วารสารเกษตรพระวรุณ. 14(1): 71-81.
- อุธร ฤทธิ์ลึก, สรลภา สวงดีกุล และศรัณยา รักเสรี. (2556ก). การวิจัยพัฒนาระบบบ่อควาโปนิคส์สำหรับบำบัดน้ำเสียในระบบเลี้ยงปลาตุ๊กตากลูผสมแบบใช้น้ำหมุนเวียน. วารสารวิจัย. 6(1): 103-112.
- อุธร ฤทธิ์ลึก, สรลภา สวงดีกุล และศรัณยา รักเสรี. (2557b). ผลของความหนาแน่นต่อสมรรถภาพการเจริญเติบโตและผลผลิตของปลาตุ๊กตากลูผสมในบ่อคอนกรีตที่ใช้น้ำเสียจากบ่อเลี้ยงปลานิลระบบบ่อควาโปนิคส์. วารสารวิจัย. 7(2): 77-86.

- ปฐมพงษ์ กาศสกุล, ประจวบ ฉายบุ, ชนกนันต์ จิตมนัส และเกรียงศักดิ์ เม่งอำพัน. (2557). ความหนาแน่นที่เหมาะสมของการเลี้ยงปลานิลในระบบน้ำหมุนเวียนแบบอะควาโปนิคส์. วารสารวิจัยเทคโนโลยีการประมง. 8(1): 23-32.
- วีระยุทธ เลื่อนลอย, พวัน เฟ่งเซ่ง, ปิยะพงศ์ โชติพันธุ์ และสมศักดิ์ มณีพงศ์. (2557). ผลของอัตราส่วนพื้นที่ปลูกและปริมาณน้ำต่อผลผลิตผักบั้งจีน ปลานิลและคุณภาพน้ำในระบบปลูกพืชร่วมกับการเลี้ยงปลา. วารสารวิจัยเทคโนโลยีการประมง 8(2): 10-19.
- สุฤทธิ สมบูรณ์ชัย, ประจวบ ฉายบุ, เกรียงศักดิ์ เม่งอำพัน และอานัฐ ตันโช. (2551). การศึกษาวัสดุกรองทางชีวภาพ เพื่อใช้ในระบบการเลี้ยงปลาตุลุมผสมร่วมกับระบบการปลูกพืชแบบไฮโดรโพนิกส์. วารสารวิจัยเทคโนโลยีการประมง. 2(1): 55-65.
- APHA. (2005). Standards methods for the examination of water and wastewater. 21st Edition. APHA, Washington DC, USA.
- Afolabi K.A. (2020). Productivity of Kale (*Brassica oleracea* var. *acephala*) and Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) Culture in Aquaponic Systems. M.Sc. Thesis. The American University in Cairo, AUC Knowledge Fountain.
- Arthanawa I.G.N., Astiko I.N. Yana D.P.S. and Darmawan I.K. (2021). Utilization of biofloc system catfish pond Waste nutrients in the cultivation of Kale, Spinach, Pakcoy, and Lettuce Using the Aquaponic. System. Sustainable Environment Agricultural Science (SSEA). 5(1): 66-71.
- Ayaz F.A., Glew R.H., Millson M., Huang H.S., Chuang L.T., Sanz C. and Hayırlıoglu-Ayaz S. (2006). Nutrient contents of kale (*Brassica oleraceae* L. var. *acephala* DC.). Food chemistry. 96(4): 572-579.
- Bregnballe J. (2015). A Guide to Recirculation Aquaculture. An introduction to the new environmentally friendly and highly productive closed fish farming systems. Published by the Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO) and EUROFISH International Organization.
- Cartea M.E., Velasco P., Obregón S., Padilla G. and De Haro A. (2008). Seasonal Variation in Glucosinolate Content in Brassica oleracea Crops Grown in Northwestern Spain. Phytochemistry. 69(2): 403-410.
- Chung M.J., Lee S.H. and Sung N.J. 2002. Inhibitory effect of whole strawberries, garlic juice or kale juice on endogenous formation of N-nitrosodimethylamine in humans. Cancer Letters. 182(1): 1-10.
- Diver S. (2006). Aquaponics-integration of hydroponics with aquaculture. Publication no. IP163. ATTRA, National Sustainable Agriculture Information Service.
- Dushenkov V., Kumar PBAN., Motto H. and Raskin L. (1995). Rhizofiltration: the use of plants to remove heavy metals from aqueous streams. Environ Sci Technol. 19: 1239-1245.
- Enduta A., Jusoh A., Ali N., Wan Nik W.N.S. and Hassan A. (2009). Effect of flow rate on water quality parameters and plant growth of water spinach (*Ipomoea aquatica*) in an aquaponic recirculating system. Desalination and Water Treatment. 5: 19-28.
- Ghaly A.E., Kamal M. and Mahmoud N.S. (2005). Phytoremediation of aquaculture wastewater for water recycling and production of fish feed. Environment International. 31(1): 1-13.
- Hussain T., Verma A. K., Tiwari V. K., Prakash C., Rathore G., Shete A. P. and Saharan N. (2014). Effect of water flow rates on growth of Cyprinus carpio var. koi (*Cyprinus carpio* L., 1758) and spinach plant in aquaponic system.

- Khachik F., Beecher G.R. and Goli M.B. (1991). Separation, identification, and quantification of carotenoids in fruits, vegetables and human plasma by high performance liquid chromatography. *Pure and Appl. Chem.* 63(1): 71-80.
- Kahlon T.S., Chapman M.H. and Smith G.E. (2007) In vitro binding of bile acids by spinach, kale, brussels sprouts, broccoli, mustard greens, green bell pepper, cabbage and collards. *Food Chemistry.* 100(4): 1531-1536.
- Kim S.Y., Yoon S., Kwon S.M., Park K.S. and Lee-Kim Y.C. (2008). Kale juice improves coronary artery disease risk factors in hypercholesterolemic men. *Biomedical and Environmental Sciences.* 21(2): 91-97.
- Kural B.V., Kucuk N., Balaban Y. and Orem A. (2011). Effects of kale (*Brassica oleracea*) leave extracts on the susceptibility of very low and low density lipoproteins to oxidation. *Indian Journal. of Biochemistry. and Biophysics.* 2: 361-364.
- Lewis W.M., Yopp J.H., Schramm H.L. and Brandenburg A.M. (1978). Use of hydroponics to maintain quality of recirculated water in a fish culture system. *Transactions of the American Fisheries Society.* 197: 92-99.
- McMurtry M.R., Sanders D.C., Cure J.D., Hodson R.G., Haning B.C. and St Amand P.C. (1997). Efficiency of water use of an integrated fish/vegetable co-culture system. *Journal of the World Aquaculture Society.* 28:4. 20-428.
- Olsen H., Aaby K, and Borge G.I.A. (2009). Characterization and Quantification of Flavonoids and Hydroxycinnamic Acids in Curly Kale (*Brassica oleracea* L. Convar. *acephala* Var. *sabellica*) by HPLC-DAD-ESI-MSⁿ. *Journal of Agricultural and Food Chemistry.* 57(7): 2816-2825.
- Nelson E.B. (2004). Microbial dynamic and interactions in the spermo-sphere. *Annual Review of Phytopathology* 42: 271-309.
- Nuwansi K.K.T., Verma A.K., Prakash C., Tiwari V.K., Chandrakant M.H., Shete A.P. and Prabhat G.P.W.A. (2015). Effect of water flow rate on polyculture of koi carp (*Cyprinus carpio* var. koi) and goldfish (*Carassius auratus*) with water spinach (*Ipomoea aquatica*) in recirculating aquaponic system. *Aquaculture International.* 24: 385-393.
- Pérez-Urrestarazu L., Lobillo-Eguíba J., Fernández-Cañero R., and Fernández-Cabanás V.M. (2019). Food safety concerns in urban aquaponic production: Nitrate contents in leafy vegetables. *Urban Forestry and Urban Greening.* 44: 126431.
- Rakocy J.E., Bailey D.S., Shultz R.C. and Thoman E.S. (2004). Update on Tilapia and vegetable production in the UVI aquaponic system. P. 676-690. In: *New dimensions on farmed Tilapia: Proceedings of the Sixth International symposium on Tilapia in Aquaculture*, Manila, Philippines. [Online]. Available: <http://ag.arizona.edu/azaqua/ista/ista6/html>.
- Rakocy J.E., Masser M.P. and Losordo T.M. (2006). Recirculating aquaculture tank production systems: Aquaponics-integrating fish and plant culture. SRAC publication no. 454: USDA.
- Rafiee G. and Saad C.R. (2005). Nutrient cycle and sludge production during different stages of red tilapia (*Oreochromis* sp.) growth in a recirculating aquaculture system. *Aquaculture.* 244(1-4): 109-118.

- Raul H.P. (2003). Reducing the potential environmental impact of tank aquaculture effluents through intensification and recirculation. *Aquaculture*. 226: 35-44
- Somerville C., Cohen M., Pantanella E., Stankus A. and Lovatelli A. (2014). Small-scale aquaponic food production. Integrated fish and plant farming. *FAO Fisheries and Aquaculture Technical Paper* No. 589. Rome, Italy.
- Tucker C.S. and Boyd C.E. (1985). *Water quality, channel catfish culture*. Elsevier Sci. Publ. Co., Amsterdam, Netherlands.
- Viadero R.C., Cunningham J.H., Semmens K.J. and Tierney A.E. (2005). Effluent and production impacts of flow through aquaculture operations in West Virginia. *Aquacultural Engineering*. 33: 258-270.
- Van Rijn J., Yossi T. and Schreier H.J. (2006). Denitrification in recirculation systems: Theory and applications *Aquacultural Engineering*. 34: 364-376.
- Wortman S.E. (2015). Crop physiological response to nutrient solution electrical conductivity and pH in an ebb-and-flow hydroponic system. *Scientia Horticulturae*. 194: 34-42.
- Yi Y., Lin C.K. and Diana J.S. (2003). Hybrid catfish (*Clarias macrocephalus* x *C. gariepinus*) and Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*) culture in an integrated pen-cum-pond system: growth performance and nutrient budgets. *Aquaculture*. 217: 395-408.

Received: July 9, 2022; Revised: August 17, 2022; Accepted: August 26, 2022

ผลของวิธีการทำแห้งต่อคุณภาพทางกายภาพและทางเคมีของผงชาแก่้นตะวัน ในระหว่างการเก็บรักษา

Effect of drying methods on physical and chemical quality of Jerusalem artichoke tea powders during storage

ภาสุรี ฤทธิเลิศ^{1*}Pasuree Rittilert^{1*}¹คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ จังหวัดปทุมธานี

*Corresponding Author E-mail Address : ps.rittilert@gmail.com

บทคัดย่อ

การทำแห้งสามารถยืดอายุการเก็บรักษาของผลผลิตทางการเกษตรได้นาน และมีประโยชน์อย่างมากสำหรับพืชสมุนไพรที่มีอายุการเก็บรักษาก่อนข้างสั้น อย่างไรก็ตามวิธีการทำแห้งที่แตกต่างกันย่อมส่งผลกระทบต่อคุณภาพของอาหารแห้งที่ต่างกัน ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของวิธีการทำแห้งต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางกายภาพและทางเคมีของผงชาและน้ำชาแก่้นตะวัน โดยศึกษาวิธีการทำแห้งแก่้นตะวันด้วยการทำแห้งด้วยลมร้อน (80 องศาเซลเซียส) การตากแดด (32 องศาเซลเซียส) และการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (-80 องศาเซลเซียส) บดตัวอย่างที่ผ่านการทำแห้งให้เป็นผงแล้วบรรจุในซองเยื่อกระดาษ เก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง (27 ± 2 องศาเซลเซียส) เป็นระยะเวลา 6 เดือน ผลการทดลองพบว่าวิธีการทำแห้งมีผลต่อค่าสี โดยวิธีการทำแห้งด้วยลมร้อนและการตากแดดทำให้ผงชามีสีคล้ำเมื่อเปรียบเทียบกับการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง วิธีการทำแห้งมีผลต่อปริมาณความชื้นและค่าปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ของผงชาแก่้นตะวัน ปริมาณความชื้นและค่า a_w เพิ่มขึ้นเมื่อระยะเวลาการเก็บรักษานานขึ้น ในส่วนของน้ำชาแก่้นตะวัน พบว่า น้ำชาจากทุกชุดการทดลองมีปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ และปริมาณอินูลินชนิดฟรุคแทนมีความแตกต่างกัน อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้มีแนวโน้มลดลงในระหว่างการเก็บรักษาน้ำชาแก่้นตะวันมีปริมาณอินูลินชนิดฟรุคแทนอยู่ในช่วงระหว่าง 1.01 - 1.16 g/ml และทุกชุดการทดลองมีปริมาณอินูลินชนิดฟรุคแทนเพิ่มขึ้นในเดือนที่ 6 ของการเก็บรักษาไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

คำสำคัญ: แก่นตะวัน ผงชาแก่้นตะวัน การทำแห้ง อินูลิน

Abstract

Drying method could extend the shelf life of agricultural products and was very useful for short shelf-life herbs. However, different drying methods affected the quality of dry foods in a different way. Therefore, this research aimed to study the effect of drying methods on physical and chemical quality of Jerusalem artichoke tea powders and Jerusalem artichoke tea drink based on hot air drying (80°C), sun drying (32°C), and freeze drying (-80°C). The dried samples were grinded to powders and contained in a paper sachet. They were kept at room temperature ($27 \pm 2^\circ\text{C}$) for 6 months. The experimental result found that drying methods had an effect on its color. Hot air drying and sun drying gave darker Jerusalem artichoke powder than freeze drying. Drying methods had an effect on more moisture content and higher water activity (a_w) of Jerusalem artichoke powder when they are kept longer. As for Jerusalem artichoke tea, the tea from all experiments had total soluble solid and inulin-type fructans with statistical significance level ($p \leq 0.05$). Total soluble solid seemed to decrease during storage. The tea infusion from Jerusalem artichoke tea powder had inulin-type fructans ranging from 1.01 - 1.16 g/ml. In every experiment, inulin-type fructans increased in the 6th month of the storage but there was no statistical significance level.

Keywords: Jerusalem Artichoke, Jerusalem Artichoke tea powder, Drying, Inulin

บทนำ

แก่นตะวัน (*Jerusalem artichoke*) เป็นแหล่งของอินูลินและฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์ที่มีคุณสมบัติเป็นใยอาหารที่ละลายน้ำ ช่วยเพิ่มปริมาตรของกากอาหาร กระตุ้นการบีบตัวของลำไส้ ทำให้ขับถ่ายสะดวก ช่วยลดการหมักหมมของกากอาหารในลำไส้ จึงลดความเสี่ยงต่อการเกิดมะเร็งลำไส้ (Allsopp et al., 2013) และเป็นพรีไบโอติกของจุลินทรีย์ในลำไส้ของมนุษย์ เช่น *Lactobacilli* และ *Bifidobacteria* (Gibson and Roberfroid, 1995; Tarini and Wolever, 2010) จากข้อมูลงานวิจัยของ กมลวรรณ และคณะ (2556) พบว่าการให้อาสาสมัครชาวไทยบริโภคแก่นตะวัน แบบสดและแบบอบแห้งทำให้ปริมาณ *Bifidobacterium* spp. ในอุจจาระมีจำนวนมากขึ้น นอกจากนี้อินูลินและฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์ยังมีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ (Van den Ende et al., 2011)

ปัจจุบันผู้บริโภคให้ความสำคัญกับสุขภาพมากขึ้น โดยเฉพาะการบริโภคอาหารและเครื่องดื่ม ชาสมุนไพรเป็นอีกผลิตภัณฑ์ที่ได้รับความนิยมมาก โดยนำส่วนต่าง ๆ ของพืช เช่น ดอก ใบ เหง้า และผล มาทำให้แห้งและลดขนาดให้เล็กลงแล้วบรรจุซองสำหรับการแช่เพื่อชงดื่ม ซึ่งแก่นตะวันเป็นพืชสมุนไพรที่มีประโยชน์ต่อสุขภาพ ผู้บริโภคนิยมรับประทานแก่นตะวันแบบหั่นสดและแบบทำแห้ง มีการนำไปใช้เป็นส่วนประกอบในอาหารเพื่อสุขภาพ (Functional food) เช่น โยเกิร์ต ไขมันต่ำจากแป้งแก่นตะวัน (นพพร, 2558) ปรับปรุงคุณภาพทางโภชนาการของเนื้อเทียมด้วยแป้งแก่นตะวัน (วีรยา, 2562) ผลิตภัณฑ์ชาสมุนไพรขมิ้นผสมผงแก่นตะวัน (นุชจรี และคณะ, 2563) การสกัดอินูลิน และฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์จากแก่นตะวัน (ชุดิมา, 2555) นอกจากนี้มีการแปรรูปแก่นตะวันเป็นชาของขมิ้น และแบบเป็นแคปซูลจำหน่ายในเชิงพาณิชย์ ซึ่งการทำชาใช้วิธีการทำแห้งเพื่อยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์ ทำให้เก็บรักษาผลิตภัณฑ์ได้นาน วิธีการที่นิยมใช้ในการทำแห้ง เช่น การตากแดด และการใช้ตู้อบลมร้อน ซึ่งเป็นวิธีการที่สะดวกรวดเร็ว จากข้อมูลงานวิจัยของ ภาสุรี และอรธพล (2561) เปรียบเทียบวิธีการทำแห้งแก่นตะวันด้วยวิธีการตากแดด การทำแห้งด้วยลมร้อน และการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง พบว่า

วิธีการตากแดดช่วยรักษาปริมาณอินูลินชนิดฟรุคแทน โยอาหารที่ไม่ละลายน้ำ และโยอาหารทั้งหมดได้มากกว่าการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งและการทำแห้งด้วยลมร้อน แต่การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีปริมาณโยอาหารที่ละลายน้ำมากกว่าการตากแดด แต่ไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ซึ่งวิธีการทำแห้งแ่งกันตะวันด้วยการตากแดดเป็นวิธีการที่เหมาะสมสำหรับการผลิตแ่งกันตะวันผงโดยรักษาปริมาณโยอาหารได้มากกว่าและมีต้นทุนในการผลิตต่ำกว่า อย่างไรก็ตามยังไม่มีข้อมูลการแปรรูปแ่งกันตะวันเพื่อเป็นชาชงดื่ม ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงสนใจศึกษาผลของวิธีการทำแห้งแ่งกันตะวันด้วยการทำแห้งด้วยลมร้อน การตากแดด และการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งต่อการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางกายภาพและทางเคมีของผงชาและน้ำชาแ่งกันตะวัน เพื่อเป็นแนวทางส่งเสริมการเพาะปลูกแ่งกันตะวันสำหรับทำชาชงดื่มให้กับเกษตรกร และเป็นข้อมูลในการเตรียมแ่งกันตะวันผงเพื่อใช้เป็นส่วนผสมในอาหาร

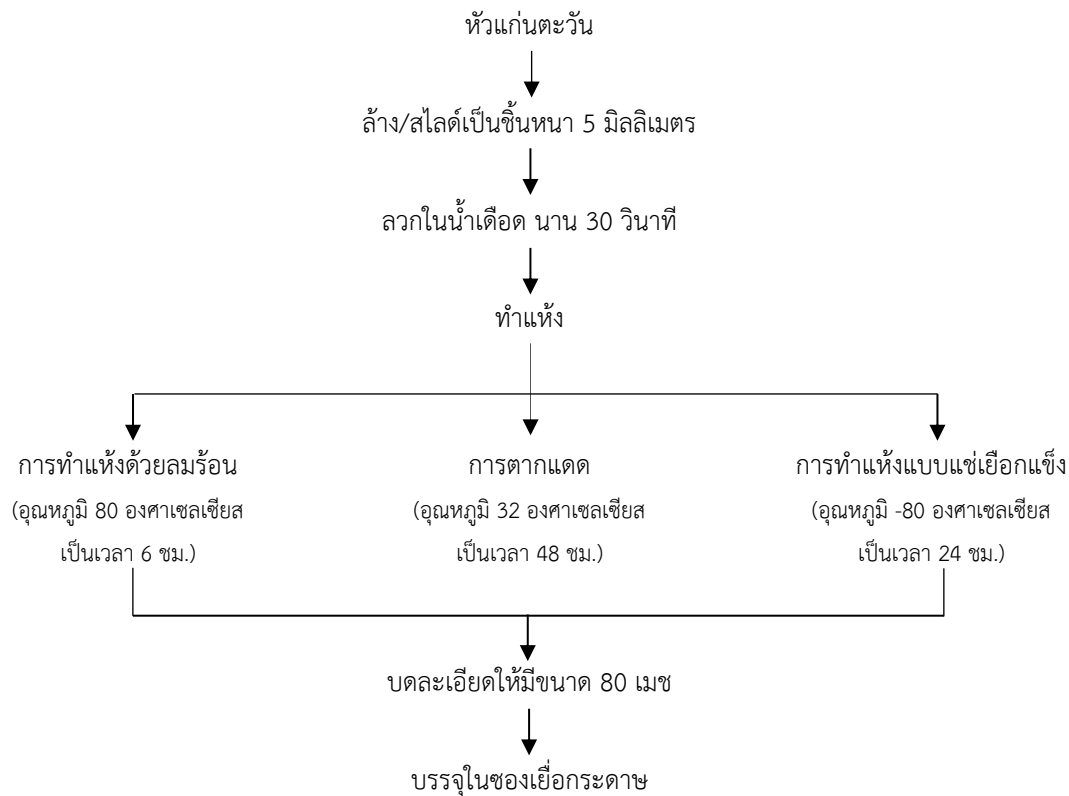
วัสดุ อุปกรณ์ และวิธีการ

วัตถุดิบและการเตรียมวัตถุดิบ

หัวแ่งกันตะวันที่ใช้ในการทดลองสายพันธุ์ JA 102 ที่ผลิตได้จากสถานีวิจัยเพชรบูรณ์ ของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จังหวัดเพชรบูรณ์ นำมาคัดเลือกหัวที่สมบูรณ์ ไม่มีการเน่าเสีย รอยแผลหรือตำหนิ ล้างสิ่งสกปรกออกโดยใช้น้ำประปา และใช้พัดลมเป่าให้สะเด็ดน้ำ หั่นเป็นชิ้นหนา 5 มิลลิเมตร โดยไม่ปอกเปลือก แล้วนำไปลวกในน้ำเดือดตามวิธีการของ Takeuchi and Nagashima (2011) เป็นเวลานาน 30 วินาที

วิธีการผลิตชาแ่งกันตะวัน

นำแ่งกันตะวันที่เตรียมได้ไปทำแห้งทั้งหมด 3 วิธี ได้แก่ 1) การตากแดด (Sun drying) โดยการตากแดดในช่วงเดือนเมษายน - เดือนตุลาคม ที่มีอุณหภูมิเฉลี่ย 32 องศาเซลเซียส (อุณหภูมิต่ำสุด-อุณหภูมิสูงสุดอยู่ที่ 28 - 36 องศาเซลเซียส) 2) การทำแห้งด้วยลมร้อน (Hot air drying) โดยใช้เครื่องทำแห้งแบบถาด (Tray dryer) (กล้วยน้ำไท, ประเทศไทย) ที่อุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส (Rittilert and Nisantia, 2017) ความเร็วลมเฉลี่ย 4.2 เมตรต่อวินาที และ 3) การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง (Freeze drying) โดยนำตัวอย่างไปแช่แข็งที่อุณหภูมิ -38 ± 2 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง แล้วนำไปทำแห้งด้วยเครื่องทำแห้งแบบระเหิด (Freeze dryer) รุ่น FreeZone^{6plus} (LABCONCO, Germany) ที่อุณหภูมิ -80 องศาเซลเซียส ความดัน 0.133 มิลลิบาร์ (รูปที่ 1) กำหนดให้ค่าความชื้นสุดท้ายไม่เกินร้อยละ 12 โดยน้ำหนัก ตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนผักและผลไม้แห้ง (มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน, 2558)



รูปที่ 1 ขั้นตอนการผลิตชาแค้นตะวัน

การเตรียมชาแค้นตะวันผง

นำแค้นตะวันที่ผ่านการทำแห้งที่แตกต่างกัน 3 วิธี มาบดตัวอย่างด้วยเครื่องบดแห้ง ร้อนด้วยตะแกรงขนาด 80 เมช แล้วบรรจุในซองเยื่อกระดาษปริมาณ 2 กรัม ปิดผนึกด้วยเครื่องปิดผนึกไฟฟ้า แล้วนำไปเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง (27 ± 2 องศาเซลเซียส) ติดตามการเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางกายภาพและทางเคมีของผงชาแค้นตะวันและน้ำชาแค้นตะวัน ทุก ๆ 1, 3 และ 6 เดือน ดังนี้

1) นำผงชาแค้นตะวันที่บรรจุในซองเยื่อกระดาษมาวิเคราะห์หาปริมาณความชื้นตามวิธีของ AOAC (AOAC, 2000) วัดค่ากิจกรรมของน้ำอิสระ (Water activity, a_w) ด้วยเครื่อง Aqua Lab รุ่น 3 (Decagon, USA), วัดค่าสีในระบบ CIE ค่า L^* value (ค่าความสว่าง), a^* value (สีแดง/สีเขียว) และ b^* value (สีเหลือง/สีน้ำเงิน) ด้วยเครื่อง Color reader รุ่น CR-10 (Minolta, Japan) และปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด (Total soluble solids) ตามวิธีการของ Takeuchi and Nagashima (2011) โดยชั่งผงชาแค้นตะวัน 1 กรัม เติมน้ำกลั่น 15 มิลลิลิตร บ่มในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ 80 องศาเซลเซียส นาน 20 นาที แล้วปั่นเหวี่ยงด้วยเครื่องเซนตริฟิวจ์ที่ความเร็ว 3000 rpm เป็นเวลา 5 นาที เก็บสารละลายส่วนใส (Supernatants) ที่ได้จากการปั่นเหวี่ยงไว้ จากนั้นทำซ้ำอีกครั้ง แล้วรวมสารละลายส่วนใสที่ได้จากการปั่นเหวี่ยงทั้ง 2 ครั้ง ปรับปริมาตรด้วยน้ำกลั่นให้ได้ 50 มิลลิลิตร วัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด โดยใช้ Digital Refractometer (Model PASL-18S; Atago Co., Ltd., Tokyo, Japan) อ่านค่าเป็น $^{\circ}\text{Brix}$

2) น้ำชาแค้นตะวัน เตรียมน้ำชาตามวิธีการของ จิรภัทร และคณะ (2558) โดยเติมน้ำเดือด 100 มิลลิลิตร ลงในภาชนะที่มีซองเยื่อกระดาษบรรจุชา 1 ซอง ตั้งทิ้งไว้ นาน 2 นาที เขย่าถุงชา 10 ครั้ง ทุก ๆ 1 นาที นำน้ำชาแค้นตะวันที่ได้ไปกรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 แล้วนำไปวิเคราะห์ปริมาณอินูลิน ในวิธีการที่ 997.08 (AOAC, 2005) ด้วยการ

สกัดด้วยน้ำร้อน การย่อยด้วยเอนไซม์ Inulinase และนำสารละลายที่ได้ไปวิเคราะห์ด้วย High Temperature Gas Chromatography (Joye and Hoebregs, 2000) โดยทำการวิเคราะห์ในเดือนที่ 1 และเดือนที่ 6

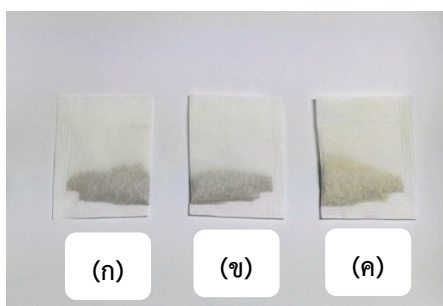
การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) ทำการทดลอง 3 ซ้ำ นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวนทางสถิติ (Analysis of Variance, ANOVA) และความแตกต่างทางสถิติของค่าเฉลี่ยโดย Duncan's New Multiple Range Test (DMRT) วิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ผลการวิจัย และการอภิปรายผล

1. ลักษณะปรากฏของผงชาแก่นตะวันบรรจุซอง

ลักษณะปรากฏของผงชาแก่นตะวันที่ผ่านวิธีการทำแห้งด้วยลมร้อน การตากแดด และการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง แล้วนำมาบรรจุในซองเยื่อกระดาษ ดังรูปที่ 2 จากนั้นเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้อง (27 ± 2 องศาเซลเซียส) สุ่มตัวอย่างทุก ๆ 3 เดือน เป็นระยะเวลา 6 เดือน วิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงคุณภาพทางกายภาพและทางเคมีของผงชาและน้ำชา



รูปที่ 2 ลักษณะของผงชาแก่นตะวันบรรจุซองเยื่อกระดาษ ที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธี (ก) การทำแห้งด้วยลมร้อน (ข) การตากแดด และ (ค) การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

2. ค่าสี

จากการศึกษาคุณภาพด้านสีของผงชาแก่นตะวัน แสดงดังตารางที่ 1 และรูปที่ 2 เมื่อพิจารณาค่าความสว่าง (L^*) ของผงชาแก่นตะวัน พบว่า ผงชาแก่นตะวันที่ได้จากวิธีการตากแดดมีสีคล้ำมากกว่าวิธีการทำแห้งด้วยลมร้อน และการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) ขณะที่เมื่อพิจารณาค่าความเป็นสีแดง (a^*) ผงชาแก่นตะวันที่ได้จากวิธีการตากแดดและการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีสีเขียว ($-a^*$) ไปทางลบเพิ่มขึ้น ($p \leq 0.05$) และให้ค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) แตกต่างจากผงชาแก่นตะวันที่ได้จากการทำแห้งด้วยลมร้อนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$) เนื่องจากการทำแห้งด้วยลมร้อนและการตากแดด เป็นวิธีการทำแห้งด้วยความร้อน และวิธีการตากแดดยังใช้เวลาในการลดความชื้นนาน 2 วัน ทำให้แก่นตะวันสัมผัสกับอากาศร้อนเป็นเวลานาน จึงอาจทำให้เกิดปฏิกิริยาเมลลาร์ดซึ่งเป็นปฏิกิริยาการเกิดสีน้ำตาลชนิด ไม่เกี่ยวข้องกับการเกิดสีน้ำตาลที่เกิดจากปฏิกิริยาระหว่างน้ำตาลรีดิวซ์กับกรดอะมิโน โปรตีน โดยมีความร้อนเร่งปฏิกิริยา แก่นตะวันที่ได้ จึงมีสีคล้ำ สอดคล้องกับรายงานของ Puyanda et al. (2020) พบว่า ผงชาแก่นตะวันที่ได้จากการทำแห้งด้วยตู้อบลมร้อน (65 องศาเซลเซียส) มีสีคล้ำกว่าผงชาแก่นตะวันที่ทำแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ (40 - 55 องศาเซลเซียส) โดยมีค่าความสว่าง (L^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) ต่ำกว่าผงชาแก่นตะวันที่ทำแห้งด้วยพลังงานแสงอาทิตย์ ในขณะที่การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งเป็นกระบวนการที่ผ่านการแช่เย็นจนแข็งมารถเห็ดน้ำออกภายใต้สภาวะสุญญากาศจนกระทั่งตัวอย่างแห้งจึงสามารถรักษาคุณภาพของสีไว้ได้

ในระหว่างการเก็บรักษาพบว่าผงชาแก่นตะวันที่ได้จากทุกวิธีการทำแห้งให้ค่าความสว่าง (L^*) และค่าสีเหลือง (b^*) มีแนวโน้มลดลงตลอดระยะเวลาของการเก็บรักษา 6 เดือน

ตารางที่ 1 ค่าสีของผงชาแก่นตะวันที่ได้จากวิธีการทำแห้งต่างกัน ในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 6 เดือน

ค่าสี	(เดือน)	วิธีการทำแห้ง		
		การทำแห้งด้วยลมร้อน	การตากแดด	การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง
ค่าความสว่าง (L^*)	1	49.55 ^b ±0.92	51.20 ^b ±1.56	62.75 ^a ±1.06
	3	51.00 ^b ±2.55	49.85 ^b ±0.35	64.75 ^a ±1.20
	6	47.00 ^b ±1.84	48.45 ^b ±0.92	63.80 ^a ±1.41
ค่าสีแดง (a^*)	1 ^{ns}	0.15 ^a ±0.07	-0.15 ^a ±0.07	-0.55 ^a ±0.64
	3	-2.45 ^a ±0.78	-2.85 ^{ab} ±0.21	-4.05 ^b ±0.21
	6	-0.90 ^a ±0.42	-1.15 ^a ±0.21	-2.40 ^b ±0.00
ค่าสีเหลือง (b^*)	1	18.20 ^b ±0.14	20.40 ^a ±0.85	20.40 ^a ±0.28
	3 ^{ns}	13.25 ^a ±1.20	14.10 ^a ±0.71	13.60 ^a ±0.14
	6	14.90 ^b ±0.57	16.80 ^{ab} ±0.71	16.90 ^a ±0.57

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

^{a, b} ตัวอักษรต่างกันในแนวนอนแสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$)

3. ปริมาณความชื้น และค่าปริมาณน้ำอิสระ (a_w)

วิธีการทำแห้งมีผลต่อการลดลงของปริมาณความชื้นและค่า a_w ของแก่นตะวันในระหว่างการทำแห้ง ปริมาณความชื้นและค่า a_w ของผงชาแก่นตะวัน มีปริมาณความชื้นอยู่ในช่วงระหว่างร้อยละ 6.100 - 7.961 (โดยน้ำหนักเปียก) และ ค่า a_w อยู่ในช่วง 0.428 - 0.463 แสดงดังตารางที่ 2 และ 3 และมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$) เป็นไปตามมาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนผักและผลไม้แห้ง (มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน, 2558) ที่กำหนดให้ค่าความชื้นไม่เกินร้อยละ 12 และค่า a_w ไม่เกิน 0.6 ซึ่งเป็นจุดวิกฤติที่ทำให้จุลินทรีย์ไม่สามารถเจริญได้ อย่างไรก็ตามผงชาแก่นตะวันที่ได้จากการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีปริมาณความชื้นมากกว่า ในขณะที่มีค่า a_w ต่ำกว่าการทำแห้งด้วยลมร้อน และการตากแดดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$) เนื่องจากกระบวนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง ตัวอย่างต้องผ่านการแช่เยือกแข็งก่อน ซึ่งการแช่เยือกแข็งทำให้ผิวผลไม้เกิดรูพรุนภายในเซลล์และเยื่อหุ้มเซลล์ด้านในมีรอยแตก เนื้อเยื่อมีลักษณะฉีกขาด ในทำนองเดียวกับการอบแห้งแครอทและฟักทองของ Arevalo-Pinedo and Xidieh Murr (2007) มีการเตรียมแครอทและฟักทองด้วยการแช่เยือกแข็งก่อนนำไปทำแห้ง พบว่า การแช่เยือกแข็งส่งผลให้ทำแห้งได้เร็วขึ้น จลนพลศาสตร์ในการทำแห้งสูงขึ้น และเวลาในการทำแห้งเร็วขึ้น เนื่องจากการแช่เยือกแข็งก่อนการทำแห้งเป็นขั้นตอนที่ทำให้เซลล์ถูกทำลายจึงช่วยให้สามารถกำจัดความชื้นได้ง่ายขึ้นในระหว่างการทำแห้ง อย่างไรก็ตามในระหว่างการเก็บรักษาผงชาแก่นตะวัน พบว่าปริมาณความชื้นและค่า a_w ของผงชาเพิ่มขึ้นตลอดช่วงอายุการเก็บรักษา ทั้งนี้อธิบายได้ว่าพื้นผิวที่มีรูพรุนอาจมีขนาดที่โมเลกุลของน้ำสามารถผ่านเข้าไปได้ง่ายขึ้น จึงเกิดการดูดซับความชื้นในระหว่างการเก็บรักษาได้

ตารางที่ 2 ปริมาณความชื้นทั้งหมดของผงชาแก่ที่ผ่านการทำแห้งต่างกัน ในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 6 เดือน

วิธีการทำแห้ง	ปริมาณความชื้นทั้งหมด (% wet basis)		
	เดือนที่ 1	เดือนที่ 3	เดือนที่ 6
การทำแห้งด้วยลมร้อน	6.16 ^b ±0.02	7.53 ^b ±0.16	8.39 ^b ±0.14
การตากแดด	6.10 ^b ±0.02	8.05 ^a ±0.01	9.00 ^a ±0.04
การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง	7.69 ^a ±0.01	8.27 ^a ±0.14	9.31 ^a ±0.13

หมายเหตุ : ^{a, b} ตัวอักษรต่างกันแถวแสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

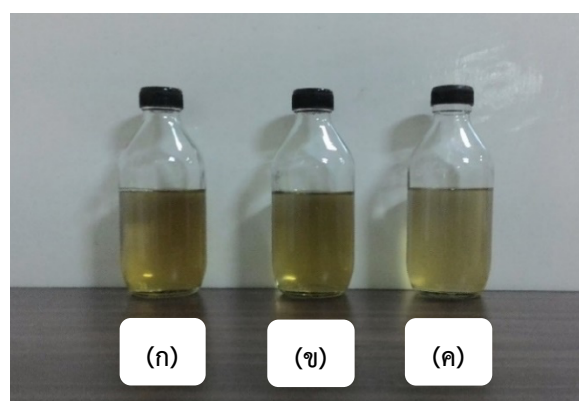
ตารางที่ 3 ค่าปริมาณน้ำอิสระของผงชาแก่ที่ผ่านการทำแห้งต่างกัน ในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 6 เดือน

วิธีการทำแห้ง	ค่าปริมาณน้ำอิสระ (a_w)		
	เดือนที่ 1	เดือนที่ 3	เดือนที่ 6
การทำแห้งด้วยลมร้อน	0.46 ^a ±0.00	0.47 ^b ±0.00	0.50 ^{ab} ±0.01
การตากแดด	0.46 ^a ±0.01	0.49 ^a ±0.00	0.51 ^a ±0.00
การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง	0.43 ^b ±0.00	0.47 ^b ±0.00	0.49 ^b ±0.00

หมายเหตุ : ^{a, b} ตัวอักษรต่างกันแถวแสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

4. ลักษณะปรากฏของน้ำชาแก่ที่ผ่าน

น้ำชาแก่ที่มีสีน้ำตาลอ่อน โดยน้ำชาแก่ที่ผ่านการทำแห้งด้วยลมร้อนแบบถาดและการตากแดด มีความใสมากกว่าวิธีทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งที่ให้น้ำชาขุ่นมากกว่า ดังรูปที่ 3 อาจเป็นเพราะการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งส่งผลให้ผงชาที่มีโครงสร้างเป็นรูพรุนระหว่างการระเหิดของน้ำแข็งภายในเซลล์ เมื่อนำมาบดให้เป็นผงขนาด 80 เมช และชงเป็นชา ผงชาเกิดการคืนสภาพอย่างรวดเร็วจึงมีลักษณะขุ่นเป็นตะกอนแขวนลอย



รูปที่ 3 ลักษณะของน้ำชาจากแก่ที่ผ่านการทำแห้งด้วยวิธี (ก) การทำแห้งด้วยลมร้อน (ข) การตากแดด และ (ค) การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง

5. ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้

จากการศึกษาปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ของน้ำชาแก่้นตะวัน พบว่า น้ำชาที่มีปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้อยู่ระหว่าง 1.11 - 1.31°Brix แสดงดังตารางที่ 4 ในทำนองเดียวกับงานวิจัยของ Khuenpet et al. (2017) พบว่า แก่นตะวันผงที่ได้จากการทำแห้งด้วยลมร้อน เมื่อนำมาสกัดด้วยน้ำร้อนในอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิที่ 90 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 30 นาที พบว่าสารละลายแก่นตะวันผงมีปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ เท่ากับ 1.80°Brix ซึ่งจากรายงานของ Farnworth (1993) ได้ทำการทดลองสกัดน้ำตาลจากหัวแก่นตะวันด้วยวิธีใช้น้ำร้อน พบว่า มีองค์ประกอบของฟรุกโทส กลูโคส ซูโคส และฟรุกแทน ดังนั้นเป็นไปได้ว่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ของน้ำชาแก่นตะวันเป็นผลรวมของโมเลกุลน้ำตาลที่เป็นองค์ประกอบ โดยน้ำชาที่ได้จากการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้มากกว่าวิธีการทำแห้งด้วยลมร้อน และการตากแดดอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) สันนิษฐานว่าเป็นเพราะวิธีการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง ทำให้น้ำชาแก่นตะวันผงมีความเป็นรูพรุนมาก ในทำนองเดียวกับงานวิจัยของ ภาสุรี และอรุณพล (2561) ศึกษาลักษณะโครงสร้างพื้นผิวของแก่นตะวันผงที่มีขนาด 100 ไมครอน ที่ได้จากวิธีการตากแดด การทำแห้งด้วยลมร้อน และการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งโดยส่องกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราดที่กำลังขยาย 200 เท่า พบว่า ผงแก่นตะวันที่ทำผ่านการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งมีลักษณะโครงสร้างที่มีรูพรุนคล้ายฟองน้ำและมีขนาดใหญ่ ส่วนการทำแห้งด้วยลมร้อนและการตากแดดมีลักษณะโครงสร้างที่แน่นกว่า โครงสร้างที่มีความเป็นรูพรุนมาก คาดว่า จะสามารถเพิ่มพื้นที่ในการสัมผัสกับน้ำได้มากขึ้นจึงอาจส่งผลต่อการละลายได้ของโมเลกุลน้ำตาล สามารถสรุปได้ว่าวิธีการทำแห้งส่งผลต่อปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ โดยวิธีการตากแดดส่งผลต่อปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ลดลงในระหว่างการเก็บรักษานาน 6 เดือน

ตารางที่ 4 ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ของน้ำชาแก่นตะวันที่ได้จากวิธีการทำแห้งต่างกัน ในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 6 เดือน

วิธีการทำแห้ง	ปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ (°Brix)		
	เดือนที่ 1	เดือนที่ 3	เดือนที่ 6
การทำแห้งด้วยลมร้อน	1.21 ^b ±0.02	1.19 ^a ±0.02	1.20 ^a ±0.03
การตากแดด	1.11 ^c ±0.02	1.00 ^b ±0.03	1.04 ^b ±0.05
การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง	1.31 ^a ±0.02	1.24 ^a ±0.08	1.23 ^a ±0.04

หมายเหตุ : ^{a, b, c} ตัวอักษรต่างกันในแนวตั้งแสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

6. ปริมาณอินูลินชนิดฟรุกแทน

แก่นตะวันเป็นแหล่งสะสมอินูลินซึ่งเป็นโพลีแซคคาไรด์ชนิดหนึ่งในกลุ่มฟรุกแทน ประกอบด้วยน้ำตาลฟรุกโทสที่เชื่อมต่อกันเป็นสายยาว จากการทดลองพบว่าวิธีการทำแห้งส่งผลต่อปริมาณอินูลินชนิดฟรุกแทนของน้ำชาแก่นตะวัน ดังตารางที่ 5 โดยน้ำชาแก่นตะวันมีปริมาณอินูลินชนิดฟรุกแทนอยู่ระหว่าง 1.01 - 1.16 g/100 ml การทำแห้งแก่นตะวันด้วยวิธีที่แตกต่างกันส่งผลให้น้ำชาแก่นตะวันมีปริมาณอินูลินชนิดฟรุกแทนแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เนื่องจากการทำแห้งแบบลมร้อนและการตากแดด สารสำคัญในตัวอย่างอาจมีการย่อยสลายหรือเกิดการเปลี่ยนแปลงโครงสร้างจากความร้อน ส่วนการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งนั้นเป็นการกำจัดน้ำด้วยการระเหยในสภาวะสุญญากาศจึงเป็นการรักษาสารสำคัญในตัวอย่าง ในทำนองเดียวกับงานวิจัยของ Gupta et al. (2003) พบว่าชิคอรี่ (Chicory) ที่ได้จากการทำแห้งด้วยลมร้อนที่อุณหภูมิ 80 - 90 องศาเซลเซียส มีความเข้มข้นของอินูลินต่ำกว่าเมื่อเปรียบเทียบกับตัวอย่างที่ทำแห้งด้วยการตากแดดที่อุณหภูมิ 30 - 35 องศาเซลเซียส นอกจากนี้ Li et al. (2015) กล่าวว่าอินูลินสามารถเปลี่ยนไปเป็นน้ำตาลชนิดรีดิวซิง (Reducing sugar) ได้ด้วยการไฮโดรไลซิสที่เกิดขึ้นระหว่างอุณหภูมิในการทำแห้ง 35 - 85 องศาเซลเซียส และการทำแห้งที่อุณหภูมิสูงกว่า 65 องศาเซลเซียส ส่งผลต่อการสูญเสียอินูลินมากกว่าการทำแห้งที่อุณหภูมิต่ำกว่าอย่างเห็นได้ชัด

และอินูลินยังสามารถถูกไฮโดรไลซ์เป็นน้ำตาลได้ภายใต้อุณหภูมิการทำแห้งที่ต่ำเนื่องจากมีเอนไซม์ Inulinase โดย Singh et al. (2020) รายงานว่าเอนไซม์ Inulinase เป็นเอนไซม์ที่เร่งปฏิกิริยาการสลายของอินูลิน ทำให้ได้ Inulo-oligosaccharide น้ำตาลฟรุกโตส และน้ำตาลกลูโคส ดังนั้นอาจเป็นไปได้ว่าผลการเก็บรักษาผงชาแก่ชวันในเดือนที่ 6 ทำให้น้ำชาแก่ชวันมีปริมาณอินูลินชนิดฟรุกแทนเพิ่มขึ้นเพราะมีเอนไซม์ Inulinase โดยเอนไซม์ชนิดนี้สามารถพบได้ในพืชที่มีการสะสมอินูลิน

ตารางที่ 5 ปริมาณอินูลินของน้ำชาแก่ชวันที่ได้จากวิธีการทำแห้งต่างกัน ในระหว่างการเก็บรักษาที่อุณหภูมิห้องเป็นระยะเวลา 6 เดือน

วิธีการทำแห้ง	ปริมาณอินูลินชนิดฟรุกแทน (g/100ml)	
	เดือนที่ 1	เดือนที่ 6 ^{ns}
การทำแห้งด้วยลมร้อน	1.01 ^c ±0.00	1.27±0.01
การตากแดด	1.02 ^b ±0.00	1.26±0.00
การทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง	1.16 ^a ±0.00	1.26±0.00

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

^{a, b, c} ตัวอักษรต่างกันในแนวดิ่งแสดงว่ามีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p\leq 0.05$)

บทสรุป

วิธีการทำแห้งแก่ชวันโดยการทำแห้งด้วยลมร้อน การตากแดด และการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็ง ส่งผลต่อค่าสี ปริมาณความชื้น และค่าปริมาณน้ำอิสระ (a_w) ของผงชาแก่ชวัน โดยการทำแห้งแบบแช่เยือกแข็งช่วยรักษาคุณภาพสีของผงชา โดยมีค่าความสว่าง (L^*) มากกว่าเมื่อเปรียบเทียบการทำแห้งแบบใช้ความร้อนที่ทำให้ผงชามีสีคล้ำ การทำแห้งแก่ชวันแบบแช่เยือกแข็งให้น้ำชาที่มีลักษณะขุ่น ไม่ใส และมีปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ ปริมาณอินูลินชนิดฟรุกแทนมากกว่าน้ำชาที่ได้จากการทำแห้งด้วยลมร้อนและการตากแดด การเก็บรักษาผงชาแก่ชวันเป็นระยะเวลา 6 เดือน ทำให้ค่าสี L^* , a^* และ b^* มีแนวโน้มลดลง ปริมาณความชื้นและค่า a_w เพิ่มขึ้น ในขณะที่น้ำชาแก่ชวันมีปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายได้ลดลงตลอดระยะเวลาการเก็บรักษา แต่ปริมาณอินูลินชนิดฟรุกแทนเพิ่มขึ้นเมื่อเก็บรักษาเป็นระยะเวลา 6 เดือน ผลการศึกษาในครั้งนี้จะเป็นประโยชน์ต่อนักวิจัย เกษตรกร และผู้บริโภคทั่วไปได้ทราบถึงการเปลี่ยนแปลงของวิธีการทำแห้ง ซึ่งมีความจำเป็นต่อการเลือกวิธีการแปรรูปและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหารจากแก่ชวัน

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยราชภัฏวไลยอลงกรณ์ ในพระบรมราชูปถัมภ์ ที่สนับสนุนทุนในการวิจัยงบประมาณแผ่นดินครั้งนี้ และขอขอบคุณคณะเทคโนโลยีการเกษตร ที่ให้ความอนุเคราะห์อุปกรณ์และเครื่องมือในการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- กมลวรรณ ลุนหา, อรุณวดี ชนวงษ์, อรุณลักษณ์ ลุติตานนท์, นงนุช เศรษฐสุเถียร, โชติชนะ วิไลลักษณ์, พิพัฒน์ ศรีเบญจลักษณ์, นาถิดา วีรปรียากร, สุชาติ ศิริใจชิงกุล และสนั่น จอกลอย. (2556). ผลของการบริโภคแก่นตะวันแบบสดและแบบอบแห้งต่อปริมาณ *Bifidobacterium* spp. ในอาสาสมัครชาวไทย. วารสารเทคนิคการแพทย์และกายภาพบำบัด. 25(3): 256-263.
- จิรภัทร โอทอง, จิราภรณ์ ทองตัน และทัศนีย์ ลิ่มสุวรรณ. (2558). การพัฒนาชาสมุนไพรย่านางและการศึกษาสมบัติด้านเคมีกายภาพ ฤทธิ์การต้านอนุมูลอิสระ และสารประกอบฟีนอลิกทั้งหมด. ใน การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 53: สาขาพืช, สาขาสัตว์, สาขาสัตวแพทยศาสตร์, สาขาประมง, สาขาส่งเสริมการเกษตรและคหกรรมศาสตร์ 3-6 กุมภาพันธ์ 2558. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์: กรุงเทพฯ. 1544-1551.
- ชุดิมา วันเพ็ญ. (2555). การสกัดอินนูลินและฟรุคโตโอลิโกแซคคาไรด์จากแก่นตะวันด้วยอุตราโซนิก. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีอาหาร บัณฑิตวิทยาลัย มหาวิทยาลัยศิลปากร.
- นพพร สกุลยืนยงสุข. (2558). การพัฒนาโยเกิร์ตไขมันต่ำเสริมแป้งแก่นตะวัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาคหกรรมศาสตร์ คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลพระนคร.
- ภาสุรี ฤทธิเลิศ และอรรถพล สมบูรณ์. (2561). ผลของวิธีการทำแห้งต่อสมบัติทางเคมีกายภาพของแก่นตะวันผง. ใน การประชุมวิชาการและการประกวดนวัตกรรมบัณฑิตศึกษาระดับชาติและนานาชาติ ครั้งที่ 2 “งานวิจัยและนวัตกรรมบัณฑิตศึกษาเพื่อความยั่งยืนทางเศรษฐกิจและสังคม” 17-18 พฤศจิกายน 2561. มหาวิทยาลัยแม่โจ้: เชียงใหม่. 1-10.
- นุชจรี สิงห์พันธ์, เอรวัฒน์ ชาญพหล, น้ำฝน เป้าทองคำ และประมะ แก้วพวง. (2563). การพัฒนาคุณภาพแก่นตะวันเพื่อสุขภาพในจังหวัดเพชรบูรณ์. รายงานวิจัย. คณะเทคโนโลยีการเกษตรและเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏเพชรบูรณ์ เพชรบูรณ์.
- มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชน. (2558). มาตรฐานผลิตภัณฑ์ชุมชนผักและผลไม้แห้ง. ค้นเมื่อ 4 มิถุนายน 2565. [https://tcps.tisi.go.th/pub/tcps0136_58\(ผักและผลไม้แห้ง\).pdf](https://tcps.tisi.go.th/pub/tcps0136_58(ผักและผลไม้แห้ง).pdf)
- วีรยา ศรีอิทธิยาเวทย์. (2562). การปรับปรุงคุณภาพทางโภชนาการของเนื้อเห็ด โดยเสริมแป้งข้าวและแป้งแก่นตะวัน. วิทยานิพนธ์ปริญญาวิทยาศาสตรมหาบัณฑิต สาขาวิชาเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ คณะเทคโนโลยีคหกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี.
- Allsopp P., Possemiers S., Campbell D., Oyarzábal I.S., Gill C. and Rowland I. (2013). An exploratory study into the putative prebiotic activity of fructans isolated from *Agave angustifolia* and the associated anticancer activity. *Anaerobe*. 22: 38-44.
- AOAC. (2000). Official Method of Analysis of AOAC International. 17th Edition. AOAC International. Maryland. USA.
- AOAC. (2005). Official Method of Analysis of AOAC International. 18th Edition. Method: 997.08. AOAC International. Maryland. USA.
- Arévalo-Pinedo A. and Xidieh Murr F.E. (2007). Influence of pre-treatments on the drying kinetics during vacuum drying of carrot and pumpkin. *Journal of Food Engineering*. 80(1): 152-156.
- Farnworth E.R. (1993). Fructans in human and animal diets. In *Science and Technology of Fructans*, edited by M. Suzuki, and N.J. Chatterton, CRC Press., London. 257-272.

- Gibson G.R. and Roberfroid M.B. (1995). Dietary modulation of the human colonic microbiota: Introducing the concept of prebiotics. *Journal of Nutrition*. 125: 1401-1412.
- Gupta A.K., Kaur N. and Kaur N. (2003). Preparation of inulin from chicory roots. *Journal of Scientific and Industrial Research*. 62: 916-920.
- Joye D. and Hoebregs H. (2000). Determination of oligofructose, a soluble dietary fiber, by high-temperature capillary gas chromatography. *Journal of Association Official of Analytical Chemistry International*. 83: 1020-1025.
- Khuenpet K., Fukuoka M., Jittanit W. and Sirisansaneeyakul S. (2017). Spray drying of inulin component extracted from Jerusalem artichoke tuber powder using conventional and ohmic-ultrasonic heating for extraction process. *Journal of Food Engineering*. 194: 67-78.
- Li X., Guo H., Yang G., Zhang Y., Zeng Y. and Shen F. (2015). Thin-layer drying of Jerusalem artichoke tuber slices and sugar conversion as affected by drying temperature. *Journal of Biobased Materials and Bioenergy*. 9: 456-462.
- Puyanda I.R., Uriyapongson S. and Uriyapongson J. (2020). Influence of drying method on qualities of Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) tuber harvested in Northeastern Thailand. *Songklanakarin Journal of Science and Technology*. 42(6): 1279-1285.
- Rittilert P. and Nisuntia P. (2017). Effect of hot air drying temperature on quality of Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) tubers powder. In *Proceedings of the 2017 International Forum-Agriculture, Biology, and Life Science*. June 27-29, 2017 Kyoto: Japan. p. 129-141.
- Singh R.S., Singh T., Hassan M. and Kennedy J.F. (2020). Updates on inulinases: Structural aspects and biotechnological applications. *International Journal of Biological Macromolecules*. 164: 193-210.
- Takeuchi J. and Nagasima T. (2011). Preparation of dried chips from Jerusalem artichoke (*Helianthus tuberosus* L.) tubers and analysis of their functional properties. *Food Chemistry*. 126: 922-926.
- Tarini J. and Wolever T.M.S. (2010). The fermentable fiber inulin increases postprandial serum short-chain fatty acids and reduces free-fatty acids and ghrelin in healthy subjects. *Applied Physiology, Nutrition, and Metabolism*. 35: 9-16.
- Van den Ende W., Peshev D. and De Gara L. (2011). Disease prevention by natural antioxidants and prebiotics acting as ROS scavengers in the gastrointestinal tract. *Trends in Food Science and Technology*. 22: 689-697.

- The study of factors affecting mechanical properties of 3D printing with 6-axis robotic arm
Krit Chantarasamai, Wirot Thasana, Tanagorn Homchampa and Phassakorn Chalisathanakritdakarn
- Calcium lactate production from clam shell waste to reduce environmental issues
Yok Wongchompoo, Banjong Boonchom, Natee Ohpasee, Jinda Chaichuay and sorakit mongkol
- Analysis of saponin content and antifungal activity of East Indian Arrowroot
Supattra Khabuanchalad and Paweena Saleethong
- Development of corn wine production using *Saccharomyces cerevisiae*
Amornrat Suwanposri, Thayiga Inman, Patamaporn Tilarux, Khomsan Supong, Piriyaorn Anartngam and Yupha Boonmee
- The studied of growth, absorption and accumulation of heavy metals by sunflower (*Helianthus annuus* L.) grown on Cd-Zn co-contaminated solution
Piyaporn Waranusantigul, Chetsada Phaenark and Chotivut Kaoyodsing
- Diversity of dragonfly larvae in some parts of northern Thailand
Chatayathon Phattanakarn and Boonsatien Boonsoong
- The effects of various fermented bio-extract on yield of Thai striped eggplant (*Solanum melongena* L.) variety Nang Pha Ya
Kamolmanus Wattana, Rungarun Pankrun and Areeya Sriplai
- Effect of Salinity on Mating, Hatching and Survival Rate of the Zoea Larvae of Sundaic Paddler Crab (*Varuna yui* Hwang & Takeda, 1984)
Dusit Srivilai, Patamaporn Tilarux, Piriyaorn Anartngam, Amornrat Suwanposri Patchara Nithirojpakdee and Kannikar Charoensuk
- Effect of water flow rates on growth of hybrid catfish (*Clarias macrocephalus* x *C. gariepinus*), Curl leaf kale (*Brassica oleracea* var. *acephala*) and water quality parameters in aquaponic recirculating system
Peera Meesap, Paongpetch Phimchan, Krittima Kasamawut and Samnao Saowakoon
- Effect of drying methods on physical and chemical quality of Jerusalem artichoke tea powders during storage
Pasuree Rittilert