



วารสารวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

Rajamangala University of Technology Srivijaya Research Journal

ISSN 1906-6627 (Print)

ISSN 2673-0197 (Online)

ปีที่ 14 ฉบับที่ 1 มกราคม – เมษายน 2565



วารสารวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

คณะกรรมการที่ปรึกษา

ศาสตราจารย์ ดร.อุทัยรัตน์ ณ นคร

มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

ศาสตราจารย์ ดร.สำเริง จักรใจ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ศาสตราจารย์ ดร.เผด็จศักดิ์ จารยะพันธุ์

จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

วารสารวิจัย
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผู้ทรงคุณวุฒิพิจารณาบทความวิจัย (Peer review)

ศาสตราจารย์ ดร.สมเกียรติ ตั้งจิตตติเจริญ	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
รองศาสตราจารย์ ดร.เอกสิทธิ์ นิสารัตนพร	จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย
ดร.พิพัฒน์ จันทร์ประดิษฐ์	มหาวิทยาลัยการกีฬาแห่งชาติ
ศาสตราจารย์ ดร.วันชัย ยอดสุดใจ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.สุปินันต์ย์ ไม้แพ	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไพลิน จิตรชุม	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ภูวคณ โคยดี	มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รองศาสตราจารย์ ดร.บวรศักดิ์ ถินนานนท์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.สมชาย ชวนอุดม	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รองศาสตราจารย์ ดร.สมโภชน์ สุดาจันทร์	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนกร โรจนกร	มหาวิทยาลัยขอนแก่น
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ชนิดา สุวรรณประสิทธิ์	มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ถาวร จันทโชติ	มหาวิทยาลัยทักษิณ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วิไลลักษณ์ กล่อมพงษ์	มหาวิทยาลัยทักษิณ
รองศาสตราจารย์ ดร.วรรณทิษา เสวตบวร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.คณิดา เพ็ชรรัตน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ธนิตชา พุทธิมี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.รัตนกร กฤษณชาญติ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุภาภรณ์ เอี่ยมแข่ง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก
รองศาสตราจารย์ ดร.จตุรงค์ ลังกาพินธุ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สาคร ชลสาคร	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี
รองศาสตราจารย์ ดร.สำเริง รักซ้อน	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลรัตนโกสินทร์
รองศาสตราจารย์ ดร.พรศิลป์ สีเผือก	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
รองศาสตราจารย์ ดร.สุรสิทธิ์ ระวีวงศ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ปริดา ภูมิ	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุชาติ จันทรมณี	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรุณ ลูกจันทร์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ดร.เศรษฐวัฒน์ ถนิมกาญจน์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พิมพ์พรรณ อำพันธ์ทอง	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

ดร.ธนาพล สุขชนะ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.กระวี ตรีอำนรรค

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อารักษ์ ธีรอำพน

ดร.อาบีเค็ง ฮาวา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.บุญรัตน์ ประทุมชาติ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วันศุกร์ เสนานาญ

ดร.ไกรยศ แซ่ลี้

รองศาสตราจารย์ ดร.นิวุฒิ หวังชัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุมาลี เลี่ยมทอง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อรทัย จิตไธสง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อมรรัตน์ ชุมทอง

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ไชนียะ สะมาลา

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.พงษ์ศักดิ์ นพรัตน์

ดร.ณธยา พันธุ์บัว

ศาสตราจารย์ ดร.ธเนศ รัตนวิไล

รองศาสตราจารย์ ดร.วิชัย หวังวโรดม

รองศาสตราจารย์ ดร.สรารุช จริตงาม

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นุจิรา รัศมิ์ไพบูลย์

รองศาสตราจารย์ ดร.บุญส่ง เอกพงษ์

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สรารุช ประเสริฐศรี

ดร.นิมมานรดี พรหมทอง

ศาสตราจารย์ ดร.ปานมนัส ศิริสมบุญ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีสุรนารี

มหาวิทยาลัยนราธิวาสราชนครินทร์

มหาวิทยาลัยบูรพา

มหาวิทยาลัยบูรพา

มหาวิทยาลัยบูรพา

มหาวิทยาลัยแม่โจ้

มหาวิทยาลัยราชภัฏนครศรีธรรมราช

มหาวิทยาลัยราชภัฏเลย

มหาวิทยาลัยราชภัฏสงขลา

มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี

มหาวิทยาลัยราชภัฏสุราษฎร์ธานี

มหาวิทยาลัยรามคำแหง

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

มหาวิทยาลัยสวนดุสิต

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง

บทความทุกเรื่องก่อนลงตีพิมพ์ในวารสารฯ ได้ผ่านการพิจารณาลั่นกรองจากผู้ทรงคุณวุฒิ อย่างน้อย 2 ท่าน

วารสารวิจัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

บรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.สุวัจน์ ธัญรส

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผู้ช่วยบรรณาธิการ

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ประเสริฐ ทองหนู่น้อย

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นพรัตน์ มะเห

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.อภิรักษ์ สงรักษ์

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.วรพร ธารางกูร

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ดร.สุคคณิง ณ ระนอง

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

วารสารวิจัย
มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

กองบรรณาธิการ

ศาสตราจารย์ ดร.อลงกลด แทนอมทอง

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น

ศาสตราจารย์ ดร.ทวนทอง จุฑาเกตุ

คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยอุบลราชธานี

Professor Ir. Dr. Anuar Mat Safar

University Malaysia Perlis, Malaysia

Professor Mitsuhiro Sano

Graduate School of Agricultural and Life Sciences, The University of Tokyo, Japan

Professor Qinghua Zhang

Chongqing University of Posts and Telecommunications, China

Professor Zhangyong Li

Chongqing University of Posts and Telecommunications, China

Professor Clarissa Yvonne Domingo

Central Luzon State University, Philippines

Professor Virginia Venturina

Central Luzon State University, Philippines

Professor Noraine Medina

Central Luzon State University, Philippines

Professor Ravelina Velasco

Central Luzon State University, Philippines

Professor Ronaldo Alberto

Central Luzon State University, Philippines

Professor Edilyn Lansangan

Central Luzon State University, Philippines

Professor Ariel Mactal

Central Luzon State University, Philippines

Associate Professor Dr. David Crookall

University of Nice Sophia Antipolis, France

Associate Professor Dr. Ir. Wan Arfiani Barus, M.P

Universitas Muhammadiyah Sumatera Utara, Indonesia

รองศาสตราจารย์ณัฐวรรธน์ ปภาวสิทธิ์

คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

รองศาสตราจารย์ ดร.ปิ่น จันจุฬา

คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

รองศาสตราจารย์ ดร.ชาตรี หอมเขียว

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

รองศาสตราจารย์ ดร.ศิริโรตม์ เกตุแก้ว

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยรามคำแหง

รองศาสตราจารย์ ดร.พูนสุข อุดม

คณะศึกษาศาสตร์ มหาวิทยาลัยทักษิณ

รองศาสตราจารย์ ดร.อุเทน คำน่าน

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

รองศาสตราจารย์เกษรา คูหา

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลล้านนา

รองศาสตราจารย์ประพจน์ พรหมสมบูรณ์

คณะเกษตรศาสตร์และทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลตะวันออก

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.นิยม กำลังดี

คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าธนบุรี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ร้อยโท (หญิง) ดร.เกิดศิริ เจริญวิศาล

คณะวิทยาการจัดการ มหาวิทยาลัยศิลปากร วิทยาเขตสารสนเทศเพชรบุรี

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สุวิธิดา จรุงเกียรติกุล

คณะครุศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ณัฐพงศ์ แก้วบุญมา

คณะเทคโนโลยีการจัดการ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.ลักษมี วิทยา

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์ ดร.สหพงศ์ สมวงศ์

คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ผู้ช่วยศาสตราจารย์วิกรม ฉันทรางกูร

คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

ดร.ทรงสิน ชีระกุลพิศุทธิ์

คณะวิทยาการจัดการ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์

ดร.ทักษิณ ขาวเนียม

คณะคณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ วิทยาเขตหาดใหญ่
ดร.กิตติมา ตันติหาชัย

คณะศิลปศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

นางสาวกุลิกา ชนะเสวตร

วิทยาลัยการโรงแรมและการท่องเที่ยว มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย

วัตถุประสงค์	เพื่อเป็นสื่อกลางในการเผยแพร่บทความวิจัย (Research article) ของบุคลากร นักศึกษา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย รวมทั้งบทความวิจัยของบุคคลภายนอก
ฝ่ายจัดทำ	นางสาวบุญบรรจง สายลาด สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย นางสาวพนิดา ชูเวท สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
เจ้าของลิขสิทธิ์	มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย
ขอบเขต	เป็นวารสารวิชาการที่ครอบคลุมสาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี
กำหนดการเผยแพร่	ปีละ 3 ฉบับ ฉบับที่ 1 มกราคม - เมษายน ฉบับที่ 2 พฤษภาคม - สิงหาคม ฉบับที่ 3 กันยายน - ธันวาคม
การเผยแพร่	Online
จัดทำโดย	สถาบันวิจัยและพัฒนา มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย 179 หมู่ 3 ตำบลไม้ฝาด อำเภอสิเกา จังหวัดตรัง 92150 โทรศัพท์ 0 7520 4070 โทรสาร 0 7520 4071 E-mail: rdisv.journal@gmail.com Website: https://www.tci-thaijo.org/index.php/rmutsvrj/index
Print ISSN	1906-6627
Online ISSN	2673-0197

สารบัญ

ผลของความเข้มข้น KNO_3 และการให้อากาศในระหว่างการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์.....	1-15
ต่อความงอกและความแข็งแรงของเมล็ดมะละกอพันธุ์แขกดำเกษตร อภिरักษ์ ทองทิพย์ พิจิตรา แก้วสอน และ รัฐพล นัทรบรรยงค์	
การศึกษาประสิทธิภาพการกัดโลหะด้วยไฟฟ้าโดยการประยุกต์ใช้เทคนิคการหมุน.....	16-30
อิเล็กโทรดรวมกับการปล่อยไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโทรด กมลพงศ์ แจ่มกมล และ ศุภวัฒน์ ชูวารี	
การศึกษาเชิงเปรียบเทียบผลกระทบของปริมาณและชนิดเส้นใยปาล์มน้ำมัน.....	31-46
ต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบพอลิพรพิลีนและจี้เลื่อยไม้ยางพารา วรรณพร ชีววุฒิพงศ์ ชาตรี หอมเขียว และ สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์	
การต้านทานการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตที่ผสมวัสดุกันซึมแบบซีเมนต์.....	47-61
ชนิดตกผลึกคริสตัลไลน์ วรัญ ฌ สงขลา	
การพัฒนาเครื่องปลูกกล้าอ้อย.....	62-77
ฐาณูร สระทองทิว และ ศิริศักดิ์ เชิดเกียรติพล	
ผลของปัจจัยต่อความแข็งแรงและการตกผลึก Mg_2Si ของโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 6061.....	78-90
รัตนกรรณ์ วงษ์ทอง และ พรศิริ จงกล	
ผลของสารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลต่อลักษณะทางกายภาพ เคมี.....	91-102
และประสาทสัมผัสของแยมถั่วฝักยาวสีม่วง ณัฐนิชา ทวีแสง กัญญารัตน์ เหลืองประเสริฐ และ ไกรยศ แซ่ลี้	
การออกแบบและสร้างเครื่องคัดขนาดเมล็ดบัวหลวง.....	103-116
จตุรงค์ ลังกาพินธุ์ สุนัน ปานสาคร และ รุ่งเรือง กาลศิริศิลป์	
แหล่งคาร์บอนและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมในการสร้างไบโอฟลอค.....	117-127
พัชรวาลย์ ศรียะศักดิ์ สุพันธุ์ณี สุวรรณภักดี นัทธยา ชำนาญคำ และ พรพิมล พิมลรัตน์	

การเพิ่มการผลิตสารแบคทีเรียโอซินโดยเชื้อ <i>Enterococcus faecium</i> PDN-Ta10.....	128-143
ที่แยกได้จากปลาอุกร้าเพื่อยับยั้งเชื้อ <i>Listeria monocytogenes</i> ศิรินาถ ศรีอ่อนนวล เสาวณีย์ ชัยเพชร และ อภิญา วณิชพันธุ์	
การศึกษาโครงสร้างแสงที่เหมาะสมต่อการผลิตไขน้ำ.....	144-155
นิตยา เกตุแก้ว และ ศักดิ์ศรี รักไทย	
อิทธิพลของการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าขี้เถ้าเทศบาลต่อสมบัติของคอนกรีต.....	156-170
และกำลังอัดของคอนกรีตไหลอัดแน่นด้วยตัวเอง นันทชัย ชูศิลป์ และ จุฑามาศ ลักษณะกิจ	
การพัฒนากระบวนติดตามการกักเก็บคาร์บอนรายเดือนในภาคการเกษตร.....	171-184
แบบใกล้เคียงเวลาจริง รัชดา คำจริง และ ศักดิ์ดา หอมหวล	
ชนิดของดินและปริมาณการให้น้ำต่อการเจริญของต้นกล้าผักกาดขาวโกลน.....	185-196
กิริติกันต์ โพธิ์ทองศิริกุล นัยนา เส็งสุก และ วรางคณา เรียงสุทธิ	
ผลของพันธุ์ข้าวโพด ชั้นเปลือกข้าวโพดและวิธีการแยกเส้นใย.....	197-212
ต่อองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยเปลือกข้าวโพด วัลภา แต้มทอง สุริยลักษณ์ ไกรสุวรรณ และ ขจีจิรัฐ ภิรมย์ธรรมศิริ	
ความหลากหลายและความชุกชุมของแมลงก้นดักในบริเวณแนวหญ้าทะเล.....	213-228
และบริเวณคลองในป่าชายเลน บ้านมดตะนอย จังหวัดตรัง บุญวัฒน์ ผ่อนย่อง และ อิชณิกา ศิวยาพรหมณ์	
ผลของการใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร: น้ำหมักมูลไส้เดือนดินต่อการเจริญเติบโต.....	229-237
ของผักสลัดพันธุ์กรีนโอ๊ค สามารถ ใจเตี้ย และ สุรศักดิ์ นุ่มมีศรี	
การออกแบบและสร้างเครื่องแกะเมล็ดบัวหลวงสด.....	238-252
มานพ แยมแพง และ พิมพพรรณ ปรี่องาม	
ผลของน้ำหมักชีวภาพจากเศษปลาเหลือทิ้งด้วยเชื้อ <i>Lactobacillus casei</i>	253-265
ต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของผักกวางตุ้งฮ่องเต้ ฉานิกา แซ่เง่ ชุกกลิ่น เอนก สวาทอินทร์ และ สุนัขย เคื้อหลี	

ความงอก ความแข็งแรง และการเจริญเติบโตของต้นกล้าข้าวเหลือง..... 266-281

หลังการเคลือบและพอกเมล็ดพันธุ์ร่วมกับ *Bacillus subtilis*

จักรพงษ์ กางโสภา เพชรรัตน์ จีเพชร และ สุริมาศ จันทะอินทร์

ผลของความเข้มข้น KNO_3 และการให้อากาศในระหว่างการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ต่อความงอกและความแข็งแรงของเมล็ดมะละกอพันธุ์แขกดำเกษตร

Effects of KNO_3 Concentration and Aeration during Seed Priming on Seed Germination and Vigor of Papaya cv. Khaek Dam Kaset

อภิราท์ ทองทิพย์ พิจิตรา แก้วสอน* และ รัฐพล นัตถบรรยงค์

Akira Thongtip, Pichitra Kaewsorn* and Rattaphol Chatbanyong

Received: 6 May 2020, Revised: 2 October 2020, Accepted: 4 November 2020

บทคัดย่อ

ศึกษาผลของความเข้มข้น KNO_3 และการให้อากาศในระหว่างการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ต่อความงอกและความแข็งแรงของเมล็ดมะละกอพันธุ์แขกดำเกษตร เพื่อปรับปรุงให้เมล็ดมีความงอกสูงและงอกได้เร็ว ทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีเมล็ดพันธุ์ ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ ระหว่างเดือนพฤศจิกายน 2562 ถึงเดือนมกราคม 2563 โดยจัดตั้งทดลองแบบ 3×2 แฟกทอเรียลในแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ โดยเมล็ดที่ไม่ผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์เป็นชุดควบคุม (control) มี 2 ปัจจัย ได้แก่ ปัจจัย A คือ ความเข้มข้นของ KNO_3 มี 3 ระดับ คือ 0 (น้ำ reverse osmosis), 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ และปัจจัย B คือ การให้อากาศ มี 2 ระดับ คือ การไม่ให้อากาศและการให้อากาศ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นลดความชื้นของเมล็ดลงให้ใกล้เคียงกับความชื้นเริ่มต้นประมาณ 8 เปอร์เซ็นต์ ผลการทดลองพบว่า การเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ด้วยสารละลาย KNO_3 ความเข้มข้น 0, 3 หรือ 5 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับการไม่ให้อากาศและการให้อากาศ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ยกเว้น เมล็ดที่ไม่ผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ (ชุดควบคุม) ไม่มีผลทำให้เมล็ดมีความงอกแตกต่างทางสถิติ แต่ทำให้เมล็ดมีจำนวนวันที่มีรากงอก และเวลาเฉลี่ยในการงอกเร็วกว่าเมล็ดที่ไม่ผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ นอกจากนี้ การไม่ให้อากาศหรือการให้อากาศในระหว่างการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ไม่มีผลทำให้เมล็ดมีความงอก จำนวนวันที่เมล็ดมีรากงอก และเวลาเฉลี่ยในการงอกแตกต่างทางสถิติ ดังนั้น การเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ด้วยสารละลาย KNO_3 ความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยไม่ให้อากาศ สามารถทำให้เมล็ดงอกได้เร็วขึ้นประมาณ 3 วัน เมื่อเปรียบเทียบกับเมล็ดที่ไม่ผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์

คำสำคัญ: ความแข็งแรงของเมล็ดพันธุ์, ความเร็วในการงอก, เวลาเฉลี่ยในการงอก, จำนวนวันที่เมล็ดมีรากงอก

ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพฯ 10900

Department of Horticulture, Faculty of Agriculture, Kasetsart University, 50 Ngam Wong Wan Road, Lat Yao, Chatuchak, Bangkok 10900, Thailand.

* ผู้รับผิดชอบประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): pichitra.k@ku.th Tel: 08 9949 3929

ABSTRACT

The effects of KNO_3 concentration and aeration during seed priming on seed germination and vigor of papaya cv. Khaek Dam Kaset were studied in order to improve seed germination and speed of germination. The experiment was conducted at Seed Technology Laboratory, Department of Horticulture, Faculty of Agriculture, Kasetsart University, Bangkok during November 2019 to January 2020. The experiment was designed in 3×2 factorial in completely randomized design (CRD) with non-primed seeds (control). There were two factors. Factor A was concentration of KNO_3 : 0% (reverse osmosis water), 3% and 5%. Factor B was aeration: non-aeration and aeration for 24 hours. Seeds were then dried until nearly initial seed moisture content was about 8%. The results showed that seed priming with KNO_3 solution at 0%, 3% or 5% without aeration or with aeration for 24 hours, except non-primed seed (control), had no effect on germination but it had faster days to emergence (DTE) and mean germination time (MGT) than non-primed seeds. Moreover, non-aeration and aeration during seed priming had no effect on germination, DTE and MGT. Thus, seed priming with 3% KNO_3 solution for 24 hours without aeration could increase the speed of germination about 3 days when compared with non-primed seeds.

Key words: seed vigor, speed of germination, mean germination time, days to emergence

บทนำ

มะละกอกับผลไม้เขตร้อนที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจของโลก (Chanwichit, 2011) โดยในปี พ.ศ. 2562 ประเทศไทยมีการส่งออกเมล็ดพันธุ์มะละกอซึ่งจัดเป็นเมล็ดพันธุ์ควบคุมประมาณ 28 ล้านบาท (Agricultural Regulatory Office, 2019) พันธุ์มะละกอที่นิยมปลูกมากเป็นการค้า ได้แก่ พันธุ์แขกดำ ซึ่งใช้ประโยชน์ได้ทั้งผลดิบและผลสุก (Editorial Department of Technologychaoban Magazine, 2014) โดยมะละกอพันธุ์แขกดำเกษตรเป็นมะละกอพันธุ์ใหม่ของภาควิชาพืชสวน คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม ซึ่งมีวิตามินซี เบต้าแคโรทีน และไลโคปีนสูง และเป็นพืชไม่ัดแปลงพันธุกรรม (Chayaporn, 2018) การขยายพันธุ์มะละกอทำได้หลายวิธี เช่น การเพาะเมล็ด การปักชำ การตอนกิ่ง และการเสียบยอด แต่เกษตรกรส่วนใหญ่

นิยมขยายพันธุ์ด้วยการเพาะเมล็ด เนื่องจากปฏิบัติได้ง่าย สะดวก รวดเร็ว และผลิตต้นได้ในปริมาณมาก (Sansuk, 2014) คุณภาพเมล็ดพันธุ์จึงเป็นปัจจัยสำคัญในการปลูกมะละกอ ซึ่งปัจจุบันเกษตรกรนิยมเพาะกล้าก่อนย้ายลงปลูกในแปลง แต่มักพบปัญหาเมล็ดมะละกอมีความงอกต่ำและงอกไม่สม่ำเสมอ ซึ่งมีหลายสาเหตุ เช่น เปลือกเมล็ดหนาแข็ง ขัดขวางการดูดซึมน้ำ และเชื้อหุ้มเมล็ดชั้นนอกมีสารยับยั้งการงอก (Owino and Ouma, 2011) สาร benzyl isothiocyanate (BITC) พบบริเวณเนื้อของผล น้ำยางของมะละกอ และเชื้อหุ้มเมล็ด ซึ่งเมล็ดมะละกอจะพบสาร BITC ปริมาณ 2,910 มิลลิกรัมต่อลิตร เมื่อเมล็ดแก่จะมีสาร BITC สูงขึ้นเป็น 6,800 มิลลิกรัมต่อลิตร (Tang, 1971) ซึ่งสารนี้มีคุณสมบัติยับยั้งการงอกของเมล็ดพืชหลายชนิด เช่น ครอบจักรวาล (*Abutilon indicum*) หญ้าจรวงดอกเล็ก (*Pennisetum polystachyon*) (Jantawinuragz, 1988) อย่างไรก็ตาม Rattanaphan

(2019) รายงานการกระตุ้นความงอกของเมล็ดมะละกอพันธุ์แขกดำเกษตรด้วยการแช่เมล็ดในสารละลาย GA₃ ความเข้มข้น 500 มิลลิกรัมต่อลิตร และสารละลายกรดซาลิไซลิก (salicylic acid; SA) ความเข้มข้น 50, 100, 250 และ 500 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 24 ชั่วโมง พบว่าไม่มีผลทำให้เมล็ดมีความงอกแตกต่างทางสถิติกับเมล็ดที่ไม่ได้กระตุ้นความงอก

การเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ หรือ การไพร้มงเมล็ดพันธุ์ (seed priming) เป็นกระบวนการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ก่อนนำไปปลูก โดยการแช่เมล็ดในน้ำหรือสารเคมีที่อุณหภูมิและระยะเวลาที่เหมาะสม เพื่อให้เมล็ดดูดน้ำอย่างเพียงพอและมีการเปลี่ยนแปลงทางชีวเคมีหรือกระบวนการทางเมแทบอลิซึมต่างๆ ที่เกิดขึ้นภายในเมล็ดแต่ไม่ทำให้เมล็ดงอก (Bewley, 1986) การเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์สามารถเพิ่มความสม่ำเสมอในการงอก ความเร็วในการงอก และการเจริญเติบโตของต้นกล้า (Bradford, 1986) การเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ที่นิยมโดยทั่วไป มี 2 วิธี คือ การเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ด้วยน้ำ (hydropriming) เป็นการใช้น้ำเป็นตัวกระตุ้นการงอก ซึ่งเป็นวิธีที่ง่าย ประหยัดค่าใช้จ่าย ปลอดภัยต่อผู้ใช้ ไม่มีสารพิษหรือสารเคมีตกค้างในเมล็ดและสิ่งแวดล้อม (Huang *et al.*, 2006) น้ำที่ใช้ต้องเป็นน้ำสะอาด มีค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) อยู่ในระดับกลาง เพื่อไม่ทำให้เมล็ดเสียหาย และปราศจากเชื้อโรค (McDonald, 2000) และการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ด้วยสารควบคุมแรงดันออสโมซิส (osmopriming) เป็นการนำเมล็ดไปแช่ในสารละลายที่มีค่าศักย์ (water potential) ในระดับต่ำ อาจมีการให้อากาศหรือไม่ให้อากาศในสารละลาย ซึ่งการให้อากาศเป็นการเพิ่มปริมาณออกซิเจนในสารละลายจะทำให้กระบวนการงอกเกิดได้ดีขึ้น (Akers *et al.*, 1984) ซึ่งวิธีการนี้สามารถควบคุมปริมาณน้ำที่เมล็ด

ดูดซึมเข้าสู่ภายในเมล็ดได้โดยเมล็ดจะดูดน้ำอย่างช้าๆ โดยใช้สารเคมี เช่น KNO₃ (McDonald, 2000) ซึ่งเป็นสารที่ช่วยทำลายการพักตัวของเมล็ด หรือส่งเสริมการงอกของเมล็ด (ISTA, 2018) แต่หากได้รับสารในปริมาณหรือความเข้มข้นที่ไม่เหมาะสมอาจเป็นพิษต่อต้นอ่อนที่งอกออกมา หรืออาจยับยั้งการงอกของเมล็ดได้ (Copeland and McDonald, 1995) Boonyuen (2016) รายงานการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์มะละกอพันธุ์ฮอลแลนด์ด้วยสารละลาย KNO₃ ความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ร่วมกับการให้อากาศ 45 นาทีต่อชั่วโมง และบ่มเมล็ดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ไม่มีผลทำให้เมล็ดมีความงอกแตกต่างทางสถิติกับเมล็ดที่ไม่เตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์

การเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์มีหลายปัจจัยที่ส่งผลต่อคุณภาพของเมล็ด เช่น คุณภาพเมล็ดพันธุ์เริ่มต้น วิธีการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ ความเข้มข้นหรือชนิดของสารเคมี ระยะเวลาในการแช่เมล็ดในน้ำหรือสารละลาย และออกซิเจน (Waqas *et al.*, 2019) ซึ่งออกซิเจนเป็นปัจจัยหนึ่งที่มีความสำคัญต่อกระบวนการงอก โดยการให้ออกซิเจนในระหว่างการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ด้วยวิธี osmopriming ทำให้เมล็ดพักหลายชนิดงอกได้เร็วขึ้น เช่น พริก แครอต ผักกาดหอม และกะน้า (Akers *et al.*, 1984) มีการศึกษาเปรียบเทียบระหว่างการไม่ให้อากาศและการให้อากาศในระหว่างการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ด้วยสารละลาย KNO₃ แต่ไม่มีรายงานในเมล็ดมะละกอ เช่น Nascimento (2003) รายงานการให้อากาศในระหว่างการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์แดงไทยด้วยสารละลาย KNO₃ ค่าศักย์ -1.4 MPa เป็นเวลา 3, 6, 9 และ 12 วัน ที่อุณหภูมิ 25 องศาเซลเซียส ทำให้เมล็ดงอกได้เร็วกว่าการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ด้วยสารละลาย KNO₃ โดยการไม่ให้อากาศและเมล็ดที่ไม่ผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ ตามลำดับ ซึ่งการศึกษาการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์มะละกอ

ส่วนมากเป็นการไม่ให้อากาศ เช่น Zimmerman (1994) รายงานการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์มะละกอ 4 พันธุ์ ได้แก่ 'Cariflora', 'Puerto Rico Red', 'Solo64' และ 'Waimanalo 162' ด้วยสารละลาย KNO_3 ความเข้มข้น 232 มิลลิโมลาร์ เป็นเวลา 5 วัน ทำให้เมล็ดมีความงอกสูงที่สุดและมีเวลาเฉลี่ยในการงอกเร็วที่สุด Owino and Ouma (2011) รายงานการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์มะละกอพันธุ์ kamiya ด้วยสารละลาย KNO_3 ความเข้มข้น 0.04 โมล เป็นเวลา 30 นาที ทำให้เมล็ดมีความงอกสูงและมีเวลาเฉลี่ยในการงอกเร็วที่สุด Mohd *et al.* (2016) รายงานการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์มะละกอพันธุ์ eksotika ด้วยสารละลาย KNO_3 ที่ความเข้มข้น 500 หรือ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ไม่มีผลทำให้เมล็ดมีความงอกแตกต่างทางสถิติกับเมล็ดที่ไม่ผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ แต่ทำให้เมล็ดมีเวลาเฉลี่ยในการงอกเร็วกว่าเมล็ดที่ไม่ผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ Mohd and Mohd (2017) รายงานการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์มะละกอพันธุ์ eksotika ด้วยสารละลาย KNO_3 ความเข้มข้น 0.025 โมลาร์ เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำให้เมล็ดมีความงอกสูงที่สุดและงอกได้เร็วที่สุด

เมล็ดมะละกอพันธุ์แขกดำเกษตรมีปัญหาความงอกต่ำ งอกช้า และไม่สม่ำเสมอ ซึ่งอาจมีสาเหตุจากเปลือกเมล็ดหนาหรือมีสารยับยั้งการงอกภายในเมล็ด ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของความเข้มข้นสารละลาย KNO_3 และการไม่ให้อากาศหรือการให้อากาศในระหว่างการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ต่อความงอกและความแข็งแรงของเมล็ดมะละกอพันธุ์แขกดำเกษตร เพื่อให้เมล็ดงอกได้สูงและงอกได้เร็ว

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วิธีการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์

เมล็ดมะละกอพันธุ์แขกดำเกษตร จากภาควิชาพืชสวน คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม เก็บเกี่ยวเมื่อเดือนกันยายน 2562 มีคุณภาพเริ่มต้น ได้แก่ น้ำหนักเมล็ด 16.95 กรัมต่อ 1,000 เมล็ด ความชื้นของเมล็ด 8.1 เปอร์เซ็นต์ และความงอกประมาณ 60 เปอร์เซ็นต์ เมล็ดบรรจุในถุงพลาสติกปิดสนิทและเก็บรักษาที่อุณหภูมิ 5 องศาเซลเซียส ก่อนนำมาศึกษาวิธีการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ ณ ห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีเมล็ดพันธุ์ ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ ระหว่างเดือนพฤศจิกายน 2562 ถึงมกราคม 2563 โดยจัดสิ่งทดลองแบบ 3×2 แฟกทอเรียลในแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ โดยเมล็ดที่ไม่ผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์เป็นชุดควบคุม (control) มี 2 ปัจจัย ได้แก่ ปัจจัย A คือ ความเข้มข้นของสารละลาย KNO_3 มี 3 ระดับ ได้แก่ 0 (น้ำ reverse osmosis; RO) 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ ปัจจัย B คือ การให้อากาศ มี 2 ระดับ ได้แก่ การไม่ให้อากาศและการให้อากาศ

นำเมล็ดมะละกอมาแช่ในสารละลาย KNO_3 ความเข้มข้น 0, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ (200 เมล็ดต่อสารละลายปริมาตร 150 มิลลิลิตร) ร่วมกับการไม่ให้อากาศและการให้อากาศตลอดเวลา เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นนำเมล็ดมาลดความชื้นในตู้ลดความชื้นไฟฟ้า (electric desiccator cabinet) เป็นเวลา 3 วัน จนกระทั่งเมล็ดมีความชื้นใกล้เคียงกับความชื้นเริ่มต้นประมาณ 8 เปอร์เซ็นต์ จากนั้นนำเมล็ดที่ไม่ผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ (ชุดควบคุม) และเมล็ดที่ผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์มาศึกษาคุณภาพของเมล็ดพันธุ์ ดังนี้

2. บันทึกข้อมูล

2.1 ความงอก (germination)

นำเมล็ดมะละกอมาทดสอบความงอกในห้องปฏิบัติการด้วยวิธีการเพาะเมล็ดระหว่างกระดาษขึ้น (between paper; BP) จำนวน 4 ซ้ำ ซ้ำละ 50 เมล็ด วางไว้ในตู้เพาะเมล็ด (germinator) ที่อุณหภูมิ 20 $\leftrightarrow$ 30 องศาเซลเซียส โดยที่อุณหภูมิ 20 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 16 ชั่วโมง ในสภาพไม่มีแสง และที่อุณหภูมิ 30 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ในสภาพมีแสง นับครั้งแรก (first count) ที่ 12 วันหลังเพาะเมล็ด โดยนับเฉพาะต้นอ่อนปกติ ซึ่งมีระบบรากสมบูรณ์ ลำต้นอ่อนได้โผล่ (hypocotyl) ตั้งตรง และใบเลี้ยงสีเขียวมี 2 ใบ และนับครั้งสุดท้าย (final count) ที่ 28 วันหลังเพาะเมล็ด โดยนับจำนวนต้นอ่อนปกติ ต้นอ่อนผิดปกติ เมล็ดสดไม่งอก และเมล็ดตาย ประเมินความงอกตามกฎของสมาคมทดสอบเมล็ดพันธุ์นานาชาติ (ISTA, 2018) จากนั้นนำข้อมูลมาคำนวณความงอกของเมล็ดพันธุ์เป็น เปอร์เซ็นต์ จากสูตร ความงอก = (จำนวนต้นอ่อนปกติ/จำนวนเมล็ดทั้งหมด) $\times$ 100

2.2 จำนวนวันที่เมล็ดมีรากงอก (days to emergence; DTE)

เพาะเมล็ดมะละกอตตามวิธีการทดสอบความงอก นับจำนวนเมล็ดที่มีรากงอกยาวประมาณ 2 มิลลิเมตร ทุกวัน เป็นเวลา 28 วันหลังเพาะเมล็ด จากนั้นนำข้อมูลมาคำนวณจำนวนวันที่เมล็ดมีรากงอก มีหน่วยเป็น วัน จากสูตร $DTE = \sum(n \cdot T) / \sum n$ โดย n คือ จำนวนเมล็ดที่มีรากงอก, T คือ จำนวนวันที่เมล็ดมีรากงอก (Dhillon, 1995)

2.3 เวลาเฉลี่ยในการงอก (mean germination time; MGT)

เพาะเมล็ดมะละกอตตามวิธีการทดสอบความงอก โดยนับจำนวนต้นอ่อนปกติ ทุกวัน เป็นเวลา 28 วันหลังเพาะเมล็ด จากนั้นนำข้อมูลมาคำนวณเวลา

เฉลี่ยในการงอก มีหน่วยเป็น วัน จากสูตร $MGT = \sum(n \cdot T) / \sum n$ โดย n คือ จำนวนต้นอ่อนปกติในแต่ละวัน, T คือ จำนวนวันที่เมล็ดงอกเป็นต้นอ่อนปกติ (Ellis and Roberts, 1980)

3. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

การวิเคราะห์ความแปรปรวนข้อมูลทางสถิติ (analysis of variance) เพื่อหาค่า F-test วิเคราะห์ความแปรปรวนรวมและเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยลักษณะต่างๆ ด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้โปรแกรมสถิติ R

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ความงอก (germination)

การเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์มะละกอพันธุ์แขกดำเกษตรด้วยสารละลาย KNO_3 ที่ความเข้มข้น 0, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ไม่มีผลทำให้เมล็ดมีความงอกแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับเมล็ดที่ไม่ผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ (ชุดควบคุม) โดยมีความงอก 62.25, 62.25, 60.50 และ 58.50 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ตารางที่ 1) แสดงว่าการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์มะละกอพันธุ์แขกดำเกษตรด้วยสารละลาย KNO_3 ที่ความเข้มข้น 0, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ ไม่มีผลในการกระตุ้นความงอกของเมล็ด อาจเป็นเพราะคุณภาพของเมล็ดพันธุ์มะละกอก่อนข้างต่ำ โดยเมล็ดมีความงอกเพียง 58.50 เปอร์เซ็นต์ ต้นอ่อนผิดปกติ 0.50 เปอร์เซ็นต์ เมล็ดสดไม่งอก 2.50 เปอร์เซ็นต์ แต่มีเมล็ดตายค่อนข้างสูง 38.50 เปอร์เซ็นต์ (data not shown) จึงไม่มีผลในการกระตุ้นความงอกของเมล็ด โดยเมล็ดที่มีความงอกต่ำเกินไป หรือความมีชีวิตของเมล็ดต่ำมาก การกระตุ้นความงอกไม่สามารถช่วยให้เมล็ดมีความงอกหรือความมีชีวิตของเมล็ดสูงขึ้นได้ (Trawatha *et al.*, 1990) เช่นเดียวกับ Boonyuen (2016) รายงานการ

เตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์มะละกอพันธุ์ฮอลแลนด์ด้วยสารละลาย KNO_3 ความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ร่วมกับการให้อากาศ 45 นาทีต่อชั่วโมง เปรียบเทียบระหว่างการบ่มเมล็ดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง และการไม่บ่มเมล็ด มีผลทำให้เมล็ดมีความงอก 72.50 และ 62.00 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ซึ่งไม่แตกต่างทางสถิติกับการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ด้วยน้ำ ร่วมกับการให้อากาศ 45 นาทีต่อชั่วโมง และบ่มเมล็ดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรือไม่บ่มเมล็ด (67 และ 66 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ) และเมล็ดพันธุ์ที่ไม่ผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ (67.50 เปอร์เซ็นต์) Mohd *et al.* (2016) รายงานการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์มะละกอพันธุ์ *eksotika* ด้วยสารละลาย KNO_3 ที่ความเข้มข้น 500 หรือ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ไม่มีผลทำให้เมล็ดมีความงอกแตกต่างทางสถิติกับเมล็ดที่ไม่ผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ แต่ไม่สอดคล้องกับ Owino and Ouma (2011) รายงานการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์มะละกอพันธุ์ *kamiya* ด้วยสารละลาย KNO_3 ความเข้มข้น 0.04 โมล เป็นเวลา 30 นาที ทำให้เมล็ดมีความงอกสูงที่สุดคือ 86.7 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับเมล็ดที่ไม่ผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ มีความงอกเพียง 66.7 เปอร์เซ็นต์ อาจเป็นเพราะเมล็ดพืชชนิดเดียวกันแต่ต่างพันธุ์กัน ทำให้มีลักษณะทางพันธุกรรม ลักษณะทางกายภาพ และองค์ประกอบทางเคมีภายในเมล็ดแตกต่างกัน จึงตอบสนองต่อการกระตุ้นความงอกได้แตกต่างกัน (Waqas *et al.*, 2019)

การไม่ให้อากาศและการให้อากาศในระหว่างการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์มะละกอพันธุ์แขกดำเกษตรด้วยสารละลาย KNO_3 ที่ความเข้มข้น 0, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ ไม่มีผลทำให้เมล็ดมีความงอกแตกต่างทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับเมล็ดที่ไม่ผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ โดยเมล็ดมีความงอก

61.83, 61.50 และ 58.50 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ (ตารางที่ 1) แสดงว่าการไม่ให้อากาศหรือการให้อากาศในระหว่างการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ไม่มีผลต่อความงอกของเมล็ดมะละกอพันธุ์แขกดำเกษตร อาจเป็นเพราะปริมาณออกซิเจนในสารละลายเพียงพอต่อกระบวนการงอกของเมล็ด เช่นเดียวกับ Prapanoppasin (1999) รายงานการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์พริกพันธุ์บางช้างด้วยน้ำ โดยการไม่ให้อากาศและการให้อากาศ เป็นเวลา 15, 30, 45 นาทีต่อชั่วโมง และให้อากาศต่อเนื่องเป็นเวลา 5 ชั่วโมง ไม่มีผลต่อความงอกของเมล็ด สอดคล้องกับ Ramnut (2004) รายงานการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์พริกพันธุ์บางช้างในน้ำ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ร่วมกับการให้อากาศ เป็นเวลา 30 นาทีต่อชั่วโมง และการให้อากาศตลอดเวลา ไม่มีผลทำให้เมล็ดมีความงอกแตกต่างทางสถิติ แต่ไม่สอดคล้องกับ Chotanakoon *et al.* (2015) รายงานการให้อากาศในระหว่างการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์พริกพันธุ์บางช้างในน้ำ RO และบ่มเมล็ดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำให้เมล็ดมีความงอกในห้องปฏิบัติการและในสภาพโรงเรือนสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับ การเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์โดยไม่ให้อากาศ นอกจากนี้ Srepho *et al.* (2016) รายงานการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์มะเขือเทศสีดำด้วยน้ำ RO เป็นเวลา 9 ชั่วโมง โดยไม่ให้อากาศ ร่วมกับการบ่มเมล็ด เป็นเวลา 6 ชั่วโมง ทำให้เมล็ดมีความงอกในห้องปฏิบัติการและในสภาพโรงเรือนสูงกว่าเมล็ดที่เตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ร่วมกับการให้อากาศ

เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลร่วมระหว่างความเข้มข้นของสารละลาย KNO_3 และการให้อากาศในระหว่างการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์มะละกอพันธุ์แขกดำเกษตรต่อความงอกของเมล็ด พบว่าไม่มีอิทธิพลร่วมกัน โดยเมล็ดมีความงอก 58.50-65.50 เปอร์เซ็นต์ (ตารางที่ 1 และ ตารางที่ 2)

ตารางที่ 1 ความงอก จำนวนวันที่เมล็ดมีรากงอก และเวลาเฉลี่ยในการงอกของเมล็ดมะละกอพันธุ์แขกดำเกษตรที่ผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ด้วยสารละลาย KNO_3 และการไม่ให้/ให้อากาศในระหว่างการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์

ปัจจัย	ความงอก (เปอร์เซ็นต์)	จำนวนวันที่เมล็ด มีรากงอก (วัน)	เวลาเฉลี่ยในการงอก (วัน)
ชุดควบคุม	58.50	10.31 a	16.70 a
ความเข้มข้นของสารละลาย KNO_3 (A)			
KNO_3 0 เปอร์เซ็นต์	62.25	8.24 b	14.19 b
KNO_3 3 เปอร์เซ็นต์	62.25	7.57 bc	13.18 c
KNO_3 5 เปอร์เซ็นต์	60.50	7.23 c	13.06 c
F-test	ns	*	*
ชุดควบคุม	58.50	10.31 a	16.70 a
การไม่ให้/ให้อากาศ (B)			
ไม่ให้อากาศ	61.83	7.75 b	13.49 b
ให้อากาศ	61.50	7.60 b	13.46 b
F-test	ns	*	*
A×B	ns	*	*
CV (%)	9.01	7.62	5.19

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่เหมือนกันในแนวตั้งแสดงว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT)

ns ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

* มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 2 อิทธิพลร่วมระหว่างความเข้มข้นของสารละลาย KNO_3 และการไม่ให้/ให้อากาศในระหว่างการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ต่อความงอก จำนวนวันที่เมล็ดมีรากงอก และเวลาเฉลี่ยในการงอกของเมล็ดมะละกอพันธุ์แขกดำเกษตร

ปัจจัย	ความงอก (เปอร์เซ็นต์)	จำนวนวันที่เมล็ด มีรากงอก (วัน)	เวลาเฉลี่ยในการงอก (วัน)
ความเข้มข้นของ สารละลาย KNO_3 (A)			
การไม่ให้/ให้อากาศ (B)			
ชุดควบคุม	58.50	10.31 a	16.70 a
KNO_3 0 เปอร์เซ็นต์	65.00	8.50 b	14.43 b
	59.50	7.98 bc	13.94 bc

ตารางที่ 2 (ต่อ)

ปัจจัย		ความงอก	จำนวนวันที่เมล็ด	เวลาเฉลี่ยในการงอก
ความเข้มข้นของ	การไม่ให้/ให้อากาศ	(เปอร์เซ็นต์)	มีรากงอก (วัน)	(วัน)
สารละลาย KNO ₃ (A)	(B)			
KNO ₃ 3 เปอร์เซ็นต์	ไม่ให้อากาศ	59.00	7.76 bc	13.36 bcd
	ให้อากาศ	65.50	7.39 c	13.00 cd
KNO ₃ 5 เปอร์เซ็นต์	ไม่ให้อากาศ	61.50	7.01 c	12.68 d
	ให้อากาศ	59.50	7.45 c	13.44 bcd
F-test		ns	*	*
CV (%)		9.01	7.62	5.19

หมายเหตุ: ตัวอักษรที่เหมือนกันในแนวดังแสดงว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) จากการวิเคราะห์ด้วยวิธี Duncan's New Multiple Range Test (DMRT)

ns ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

* มีความแตกต่างกันทางสถิติอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์

2. จำนวนวันที่เมล็ดมีรากงอก (days to emergence; DTE)

การเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์มะละกอพันธุ์แขกดำเกษตรด้วยสารละลาย KNO₃ ที่ความเข้มข้น 0, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ มีผลทำให้เมล็ดมีจำนวนวันที่มีรากงอกแตกต่างทางสถิติ (ตารางที่ 1) โดยเมล็ดที่ผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ด้วยสารละลาย KNO₃ ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์ มีจำนวนวันที่เมล็ดมีรากงอกเร็วที่สุด คือ 7.23 วัน ซึ่งไม่แตกต่างทางสถิติกับเมล็ดที่ผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ด้วยสารละลาย KNO₃ ความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์ มีจำนวนวันที่เมล็ดมีรากงอกเร็ว 7.57 วัน รองลงมา คือ เมล็ดที่ผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ด้วยสารละลาย KNO₃ ความเข้มข้น 0 เปอร์เซ็นต์ หรือการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ด้วยน้ำ มีจำนวนวันที่เมล็ดมีรากงอก 8.24 วัน ส่วนเมล็ดที่ไม่ผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์มีจำนวนวันที่มีรากงอกช้าที่สุด คือ 10.31 วัน แสดงว่าเมล็ดที่ผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ด้วยน้ำและสาร

ควบคุมแรงดันออกซิเจนด้วยสารละลาย KNO₃ สามารถแทงรากได้เร็วกว่าเมล็ดที่ไม่ผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ เพราะการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์เป็นวิธีการที่ทำให้เมล็ดดูดน้ำได้อย่างเพียงพอโดยยึดช่วงเวลาการดูดน้ำในระยะที่ 2 (lag phase) อย่างช้าๆ ทำให้เชื้อหุ้มเซลล์ เชื้อหุ้มออร์แกนเซลล์ต่างๆ และออร์แกนเซลล์ต่างๆ มีเวลาเพียงพอในการจัดเรียงตัว และซ่อมแซม ตลอดจนมีการกำจัดสารพิษที่สะสมระหว่างการเสื่อมสภาพ เมล็ดดูดใช้ออกซิเจนได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น จึงทำให้เมล็ดงอกได้ดี (Waqas *et al.*, 2019) ดังนั้น เมื่อนำเมล็ดที่ผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ไปปลูกจะทำให้เมล็ดงอกได้เร็วขึ้น เพราะเมล็ดจะดูดน้ำและเข้าสู่ระยะที่ 2 ของรูปแบบการดูดน้ำเร็วและใช้เวลา น้อยลง จากนั้นเข้าสู่การดูดน้ำระยะที่ 3 ได้เร็ว เมล็ดจึงแทงรากได้เร็วกว่าเมล็ดที่ไม่ผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ (Bradford, 1986) สอดคล้องกับ Boonyuen (2016) รายงานการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์มะละกอพันธุ์ฮอลแลนด์ด้วยสารละลาย KNO₃ ความเข้มข้น 3

เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ร่วมกับการให้อากาศ 45 นาทีต่อชั่วโมง และบ่มเมล็ดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรือไม่บ่มเมล็ด ทำให้เมล็ดงอกได้เร็วกว่าเมล็ดที่ไม่ผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ เช่นเดียวกับ Prapanoppasin (1999) รายงานการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์พริกพันธุ์บางช้างในน้ำ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง และการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ด้วยสารละลาย KNO_3 ความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 7 วัน ร่วมกับการให้อากาศ 15 นาทีต่อชั่วโมง ทำให้เมล็ดมีจำนวนวันที่มีรากงอกเร็วกว่าเมล็ดที่ไม่ผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์

นอกจากนี้ เมล็ดมะละกอพันธุ์แขกดำเกษตร ที่ผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ด้วยสารละลาย KNO_3 ความเข้มข้น 3 หรือ 5 เปอร์เซ็นต์ มีรากงอกเร็วกว่าเมล็ดที่ผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ด้วยน้ำ (ตารางที่ 1) เพราะ KNO_3 สัมพันธ์กับเอนไซม์ nitrate reductase ในการสร้าง nitrite หรือ nitric oxide ซึ่งสามารถทำลายการพักตัวของเมล็ดและส่งเสริมการงอกของเมล็ดได้ (Lara *et al.*, 2014) โดย KNO_3 เกิดการแตกตัวของ K^+ และ NO_3^- เกี่ยวข้องกับกระบวนการสังเคราะห์โปรตีนภายในเมล็ด (McIntyre *et al.*, 1996) รวมถึงสารละลาย KNO_3 ช่วยในการดูดซึมของออกซิเจนในเมล็ดได้ โดยมีผลช่วยในกระบวนการหายใจและกระบวนการย่อยสลายสารอาหารภายในเมล็ด (Hilton and Thomas, 1986) สอดคล้องกับ Nankorn (2020) รายงานการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์พริกเขียวในสารละลาย KNO_3 ความเข้มข้น 3 หรือ 5 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ทำให้เมล็ดมีจำนวนวันที่มีรากงอกเร็วกว่าเมล็ดที่ผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ด้วยน้ำ แต่ไม่สอดคล้องกับ Boonyuen (2016) รายงานการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์มะละกอพันธุ์ฮอลแลนด์ด้วยสารละลาย KNO_3 ความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ร่วมกับการให้อากาศ 45 นาทีต่อชั่วโมง และบ่มเมล็ดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง

หรือไม่บ่มเมล็ด ไม่มีผลทำให้เมล็ดมีเวลาเฉลี่ยในการงอกแตกต่างทางสถิติกับการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ด้วยน้ำ ร่วมกับการให้อากาศ 45 นาทีต่อชั่วโมง และบ่มเมล็ดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรือไม่บ่มเมล็ด นอกจากนี้ Prapanoppasin (1999) รายงานการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์พริกพันธุ์บางช้างด้วยน้ำ ทำให้เมล็ดสามารถงอกได้เร็วกว่าการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ด้วยสารละลาย KNO_3 ความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 7 วัน

การเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์มะละกอพันธุ์แขกดำเกษตรด้วยการไม่ให้อากาศและการให้อากาศ ไม่มีผลทำให้เมล็ดมีจำนวนวันที่มีรากงอกแตกต่างทางสถิติ (ตารางที่ 1) โดยเมล็ดมีจำนวนวันที่มีรากงอกเร็วที่สุดและไม่แตกต่างทางสถิติ คือ 7.75 และ 7.60 วัน ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างทางสถิติกับเมล็ดที่ไม่ผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ โดยมีจำนวนวันที่มีรากงอกช้าที่สุด คือ 10.31 วัน แสดงว่าการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์มะละกอด้วยการไม่ให้อากาศหรือการให้อากาศไม่มีผลทำให้เมล็ดแทงรากได้เร็วขึ้น อาจเป็นเพราะปริมาณออกซิเจนในสารละลายเพียงพอต่อกระบวนการงอกแล้ว ดังนั้น การเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์มะละกอไม่จำเป็นต้องให้อากาศเพิ่มในสารละลาย KNO_3 ความเข้มข้น 0, 3 หรือ 5 เปอร์เซ็นต์ เช่นเดียวกับ Prapanoppasin (1999) รายงานการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์พริกพันธุ์บางช้างในน้ำ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง เปรียบเทียบระหว่างการไม่ให้อากาศและการให้อากาศ เป็นเวลา 15, 30, 45 นาทีต่อชั่วโมง และการให้อากาศตลอดเวลา พบว่าการไม่ให้อากาศหรือการให้อากาศในระหว่างการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ไม่มีผลทำให้เมล็ดมีจำนวนวันที่เมล็ดมีรากงอกแตกต่างทางสถิติ

นอกจากนี้ การเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ด้วยการไม่ให้อากาศหรือการให้อากาศทำให้เมล็ดมะละกอพันธุ์แขกดำเกษตรมีรากงอกเร็วกว่าเมล็ดที่ไม่ผ่านการ

เตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ แสดงว่าเมล็ดที่ผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์สามารถแทงรากได้เร็วกว่าเมล็ดที่ไม่ผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ สอดคล้องกับ Prapanoppasin (1999) รายงานการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์พริกพันธุ์บางช้างด้วยน้ำ โดยการเปรียบเทียบระหว่างการไม่ให้อากาศและการให้อากาศเป็นเวลา 15, 30, 45 นาทีต่อชั่วโมง และให้อากาศต่อเนื่อง เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ไม่มีผลทำให้เมล็ดมีจำนวนวันที่มีรากงอกแตกต่างทางสถิติ แต่การเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์พริกพันธุ์บางช้างด้วยน้ำทำให้เมล็ดมีจำนวนวันที่มีรากงอกเร็วกว่าเมล็ดที่ไม่ผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ประมาณ 2 วัน ซึ่งไม่สอดคล้องกับ Ramnut (2004) รายงานการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์พริกพันธุ์บางช้างในน้ำ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง ร่วมกับการให้อากาศ 30 นาทีต่อชั่วโมง และการให้อากาศตลอดเวลา ทำให้เมล็ดมีจำนวนวันที่มีรากงอกเร็วกว่าเมล็ดที่ผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์โดยไม่ให้อากาศ

เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลร่วมระหว่างความเข้มข้นของสารละลาย KNO_3 และการให้อากาศในระหว่างการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์จะละกอกพันธุ์แขกดำเกษตร พบว่ามีอิทธิพลร่วมกัน (ตารางที่ 1 และ ตารางที่ 2) โดยเมล็ดที่ผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ด้วยสารละลาย KNO_3 ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์ โดยไม่ให้อากาศ มีจำนวนวันที่เมล็ดมีรากงอกเร็วที่สุด คือ 7.01 วัน ซึ่งไม่แตกต่างทางสถิติกับเมล็ดที่ผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ด้วยสารละลาย KNO_3 ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับการให้อากาศ เมล็ดผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ด้วยสารละลาย KNO_3 ความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับการไม่ให้อากาศและให้อากาศ และเมล็ดผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ด้วยสารละลาย KNO_3 ความเข้มข้น 0 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับการให้อากาศ มีจำนวนวันที่เมล็ดมีรากงอก 7.45, 7.76, 7.39 และ

7.98 วัน ตามลำดับ แสดงว่าการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์จะละกอกด้วยน้ำร่วมกับการให้อากาศ และการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ด้วยสารละลาย KNO_3 ความเข้มข้น 3 หรือ 5 เปอร์เซ็นต์ โดยการไม่ให้อากาศหรือการให้อากาศ มีผลทำให้เมล็ดสามารถงอกหรือแทงรากได้เร็วกว่าเมล็ดที่ไม่ผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์

3. เวลาเฉลี่ยในการงอก (mean germination time; MGT)

การเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์จะละกอกพันธุ์แขกดำเกษตรด้วยสารละลาย KNO_3 ที่ความเข้มข้น 0, 3 และ 5 เปอร์เซ็นต์ มีผลทำให้เมล็ดมีเวลาเฉลี่ยในการงอกแตกต่างทางสถิติ (ตารางที่ 1) โดยเมล็ดที่ผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ด้วยสารละลาย KNO_3 ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์ มีเวลาเฉลี่ยในการงอกเร็วที่สุด คือ 13.06 วัน ซึ่งไม่แตกต่างทางสถิติกับเมล็ดที่ผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ด้วยสารละลาย KNO_3 ความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์ มีเวลาเฉลี่ยในการงอก 13.18 วัน รองลงมา คือ เมล็ดพันธุ์ที่ผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ด้วยสารละลาย KNO_3 ความเข้มข้น 0 เปอร์เซ็นต์ หรือการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ด้วยน้ำ มีเวลาเฉลี่ยในการงอก 14.19 วัน ส่วนเมล็ดที่ไม่ได้ผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์มีเวลาเฉลี่ยในการงอกช้าที่สุด คือ 16.70 วัน แสดงว่าเมล็ดที่ผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์สามารถงอกและพัฒนาเป็นต้นอ่อนปกติได้เร็วกว่าเมล็ดที่ไม่ผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ เพราะการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์เป็นการทำให้เมล็ดเกิดกระบวนการทางชีวเคมีภายในเมล็ดให้พร้อมสำหรับการงอก ซึ่งกิจกรรมต่างๆ ภายในเมล็ดจะมีการกระตุ้นการสังเคราะห์ การสร้าง และการทำงานของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายอาหารสะสมภายในเมล็ด การเคลื่อนย้ายอาหารสะสมต่างๆ เพื่อใช้ในกระบวนการงอกของเมล็ด เช่น เอนไซม์ β - และ α -amylase ที่ย่อยสลายคาร์โบไฮเดรต

เป็นน้ำตาลกลูโคสและเอนไซม์ proteinases ย่อยสลายโปรตีนเป็นกรดอะมิโน (Varier *et al.*, 2010) ดังนั้น เมื่อนำเมล็ดที่ผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ไปปลูกจะทำให้เมล็ดงอกได้เร็วขึ้น สอดคล้องกับ Boonyuen (2016) รายงานการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์มะละกอพันธุ์ฮอลแลนด์ด้วยสารละลาย KNO_3 ความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ร่วมกับการให้อากาศ 45 นาติต่อชั่วโมง และบ่มเมล็ดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรือไม่บ่มเมล็ด ทำให้เมล็ดมีเวลาเฉลี่ยในการงอกเร็วกว่าเมล็ดที่ไม่ผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ เช่นเดียวกับ Zimmerman (1994) รายงานการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์มะละกอด้วยสารละลาย KNO_3 ความเข้มข้น 232 มิลลิโมลาร์ เป็นเวลา 5 วัน ทำให้เมล็ดมีเวลาเฉลี่ยในการงอกเร็วที่สุด Owino and Ouma (2011) รายงานการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์มะละกอพันธุ์ kamiya ด้วยสารละลาย KNO_3 ความเข้มข้น 0.04 โมล เป็นเวลา 30 นาที ทำให้เมล็ดมีเวลาเฉลี่ยในการงอกเร็วที่สุด Mohd *et al.* (2016) รายงานการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์มะละกอพันธุ์ eksotika ด้วยสารละลาย KNO_3 ที่ความเข้มข้น 500 หรือ 1,000 มิลลิกรัมต่อลิตร เป็นเวลา 1 ชั่วโมง ทำให้เมล็ดมีเวลาเฉลี่ยในการงอกเร็วกว่าเมล็ดที่ไม่ผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์

นอกจากนี้ เมล็ดมะละกอพันธุ์แขกดำเกษตรที่ผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ด้วยสารละลาย KNO_3 ความเข้มข้น 3 หรือ 5 เปอร์เซ็นต์ สามารถงอกและพัฒนาเป็นต้นอ่อนจนปกติได้เร็วกว่าเมล็ดที่ผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ด้วยน้ำ (ตารางที่ 1) แสดงว่าการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ด้วยสารละลาย KNO_3 ทำให้เมล็ดงอกได้เร็วกว่าการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ด้วยน้ำ เพราะ KNO_3 ความเข้มข้น 3 หรือ 5 เปอร์เซ็นต์ เป็นสารละลายที่มีค่าซลัคยต่ำ ช่วยเพิ่มความหนืดของน้ำ ทำให้เมล็ดดูดน้ำได้ช้าลง (McDonald, 2000) จึงเป็นการยืดระยะเวลาในการดูดน้ำของเมล็ดใน

ระยะที่ 2 (lag phase) ส่งผลให้เมล็ดเกิดกระบวนการเมแทบอลิซึมได้นานขึ้น เกิดการสังเคราะห์กรดนิวคลีอิกและโปรตีนเพื่อใช้ในกระบวนการงอก (Bradford, 1995; Singh *et al.*, 1999) เช่นเดียวกับ Chotanakoon (2016) รายงานการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์พริกพันธุ์บางช้างในสารละลาย KNO_3 ความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 8 ชั่วโมง ร่วมกับการให้อากาศ 45 นาติต่อชั่วโมง และบ่มเมล็ดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง มีผลทำให้เมล็ดมีเวลาเฉลี่ยในการงอกเร็วกว่าการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ด้วยน้ำ แต่ขัดแย้งกับ Boonyuen (2016) รายงานการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์มะละกอพันธุ์ฮอลแลนด์ด้วยสารละลาย KNO_3 ความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ร่วมกับการให้อากาศ 45 นาติต่อชั่วโมง และบ่มเมล็ดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรือไม่บ่มเมล็ด ไม่มีผลทำให้เมล็ดมีเวลาเฉลี่ยในการงอกแตกต่างทางสถิติกับการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ด้วยน้ำ ร่วมกับการให้อากาศ 45 นาติต่อชั่วโมง และบ่มเมล็ดเป็นเวลา 24 ชั่วโมง หรือไม่บ่มเมล็ด

การไม่ให้อากาศหรือการให้อากาศระหว่างการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์มะละกอพันธุ์แขกดำเกษตรด้วยสารละลาย KNO_3 ที่ความเข้มข้นต่างๆ ไม่มีผลทำให้เมล็ดมีเวลาเฉลี่ยในการงอกแตกต่างทางสถิติ โดยเมล็ดมีเวลาเฉลี่ยในการงอกเร็วที่สุด คือ 13.49 และ 13.46 วัน ตามลำดับ (ตารางที่ 1) แสดงว่าการไม่ให้หรือการให้อากาศในระหว่างการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์มะละกอไม่มีผลต่อความเร็วในการงอกของเมล็ด สอดคล้องกับ Prapanoppasin (1999) รายงานการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์พริกพันธุ์บางช้างในน้ำเป็นเวลา 5 ชั่วโมง เปรียบเทียบระหว่างการไม่ให้อากาศ และการให้อากาศ เป็นเวลา 15, 30, 45 นาติต่อชั่วโมง และให้อากาศตลอดเวลา พบว่าการไม่ให้หรือการให้อากาศไม่มีผลทำให้เมล็ดมีความเร็วในการงอกแตกต่างทางสถิติ

นอกจากนี้ การเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์มะละกอพันธุ์แขกดำเกษตรด้วยการไม่ให้อากาศหรือการให้อากาศมีผลทำให้เมล็ดมีเวลาเฉลี่ยในการงอกแตกต่างทางสถิติกับเมล็ดที่ไม่ผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ โดยเมล็ดที่ผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์มีเวลาเฉลี่ยในการงอกเร็วกว่าเมล็ดที่ไม่ผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ประมาณ 3 วัน เนื่องจากการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ทำให้เกิดกระบวนการเมแทบอลิซึมต่างๆ และการเปลี่ยนแปลงภายในเมล็ด เพราะระหว่างการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์จะกระตุ้นให้มีการสังเคราะห์และมีกิจกรรมการทำงานของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องกับการย่อยสลายอาหารสะสมภายในเมล็ด เช่น เอนไซม์ β -amylase และ α -amylase ที่ย่อยสลายคาร์โบไฮเดรตเป็นน้ำตาลกลูโคส และเอนไซม์ proteinases ย่อยสลายโปรตีนเป็นกรดอะมิโน ในการเคลื่อนย้ายอาหารสะสมต่างๆ ไปยังจุดเจริญเพื่อให้เกิดกระบวนการงอกของเมล็ด (Chanprasert, 2010) สอดคล้องกับ Prapanoppasin (1999) รายงานการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์พริกบางช้างในน้ำ เป็นเวลา 5 ชั่วโมง เปรียบเทียบระหว่างการไม่ให้อากาศ และการให้อากาศ เป็นเวลา 15, 30, 45 นาทีต่อชั่วโมง และให้อากาศตลอดเวลา พบว่าการไม่ให้/ให้อากาศไม่มีผลทำให้เมล็ดมีความเร็วในการงอกแตกต่างทางสถิติ ซึ่งแตกต่างกับ Na nakorn (2020) รายงานการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ฟักเขียวในสารละลาย KNO_3 ความเข้มข้น 3 หรือ 5 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับการให้อากาศ เป็นเวลา 72 ชั่วโมง ทำให้เมล็ดมีเวลาเฉลี่ยในการงอกเร็วกว่าการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ด้วยสารละลาย KNO_3 ความเข้มข้น 3 หรือ 5 เปอร์เซ็นต์ โดยไม่ให้อากาศ

เมื่อพิจารณาถึงอิทธิพลร่วมระหว่างความเข้มข้นของสารละลาย KNO_3 และการให้อากาศในระหว่างการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์มะละกอพันธุ์แขกดำเกษตร พบว่ามีอิทธิพลร่วมกัน (ตารางที่ 1 และ

ตารางที่ 2) โดยเมล็ดที่ผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ด้วยสารละลาย KNO_3 ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับการไม่ให้อากาศในระหว่างการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ มีเวลาเฉลี่ยในการงอกเร็วที่สุด คือ 12.68 วัน ซึ่งไม่แตกต่างทางสถิติกับเมล็ดที่ผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ด้วยสารละลาย KNO_3 ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับการให้อากาศ เมล็ดที่ผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ด้วยสารละลาย KNO_3 ความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับการไม่ให้อากาศ และการให้อากาศ มีเวลาเฉลี่ยในการงอก 13.44, 13.36 และ 13.00 วัน ตามลำดับ ส่วนเมล็ดที่ไม่ผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ มีเวลาเฉลี่ยในการงอกช้าที่สุด คือ 16.70 วัน แสดงว่าการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ด้วยสารละลาย KNO_3 ความเข้มข้น 0, 3 หรือ 5 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับการไม่ให้อากาศหรือการให้อากาศ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ทำให้เมล็ดงอกและพัฒนาเป็นต้นอ่อนปกติได้เร็วกว่าเมล็ดที่ไม่ผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ นอกจากนี้ การเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ด้วยสารละลาย KNO_3 ความเข้มข้น 5 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับการไม่ให้อากาศ ทำให้เมล็ดงอกและพัฒนาเป็นต้นอ่อนปกติได้เร็วกว่าการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ด้วยสารละลาย KNO_3 ความเข้มข้น 0 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับการไม่ให้อากาศหรือการให้อากาศ

จากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่าการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์มะละกอพันธุ์แขกดำเกษตรสามารถเลือกใช้วิธีการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ได้ 2 วิธี คือ การเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ด้วยน้ำ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยไม่ให้อากาศ เพราะเป็นวิธีประหยัดต้นทุนค่าสารเคมี และยังทำให้เมล็ดงอกและพัฒนาเป็นต้นอ่อนปกติได้เร็วกว่าเมล็ดที่ไม่ผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ประมาณ 2 วัน (2.27 วัน) และการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ด้วยสารละลาย KNO_3 ความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดย

ไม่ให้อากาศ ทำให้เมล็ดสามารถงอกและพัฒนาเป็นต้นอ่อนปกติได้เร็วกว่าเมล็ดที่ไม่ผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ประมาณ 3 วัน (3.31 วัน) นอกจากนี้เมล็ดยังงอกได้เร็วกว่าวิธีการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ด้วยน้ำ ประมาณ 1 วัน (1.07 วัน) ซึ่ง KNO_3 สามารถหาซื้อได้ง่ายและราคาไม่แพง อีกทั้งใช้ในปริมาณน้อย

สรุป

1. การเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์มะละกอพันธุ์แขกดำเกษตรด้วยสารละลาย KNO_3 ที่ความเข้มข้น 0, 3 หรือ 5 เปอร์เซ็นต์ ร่วมกับการไม่ให้อากาศหรือการให้อากาศ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ไม่มีผลทำให้เมล็ดมีความงอกแตกต่างทางสถิติ แต่ทำให้เมล็ดมีจำนวนวันที่เมล็ดมีรากงอก และเวลาเฉลี่ยในการงอกเร็วกว่าเมล็ดที่ไม่ผ่านการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์
2. การไม่ให้หรือการให้อากาศในระหว่างการเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ไม่มีผลทำให้เมล็ดมีความงอก จำนวนวันที่เมล็ดมีรากงอก และเวลาเฉลี่ยในการงอกแตกต่างทางสถิติ
3. การเตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ด้วยสารละลาย KNO_3 ความเข้มข้น 3 เปอร์เซ็นต์ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง โดยไม่ให้อากาศ ทำให้เมล็ดสามารถงอกและพัฒนาเป็นต้นอ่อนปกติได้เร็วกว่าเมล็ดที่ไม่เตรียมพร้อมเมล็ดพันธุ์ประมาณ 3 วัน (3.31 วัน)

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณ ผศ.เกรียงศักดิ์ ไทยพงษ์ ภาควิชาพืชสวน คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม ที่อนุเคราะห์เมล็ดพันธุ์มะละกอพันธุ์แขกดำเกษตรเพื่อใช้สำหรับงานวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- Agricultural Regulatory Office. 2019. **Quantity and value of exported controlled seeds in 2019**. Department of Agriculture. Available Source: <http://www.doa.go.th/ard/wp-content/uploads/2019/11/EX62.pdf>, April 13, 2020. (in Thai)
- Akers, S.W., Brede, J. and Bates, J.J. 1984. Why some vegetable seed cannot be primed in aerated solutions. **HortScience** 19: 540.
- Bewley, J.D. 1986. Membrane changes in seed as related to germination and the perturbations resulting from deteriorating in storage, pp. 27-47. In McDonald, M.B. and Nelson, C.J., eds. **Physiology of Seed Deterioration**. CSSA Spec. Pub., USA.
- Boonyuen, P. 2016. Effect of Seed Priming on Quality and Storability of 'Holland' Papaya Seeds. Master Thesis of Horticulture, Kasetsart University. (in Thai)
- Bradford, K.J. 1986. Manipulation of seed water relation via osmotic priming to improve germination under stress condition. **HortScience** 21: 1105-1112.
- Bradford, K.J. 1995. Water relations in seed germination, pp. 351-396. In Kigel, J. and Galili, G., eds. **Seed Development and Germination**. Marcel Dekker, New York.
- Chanprasert, W. 2010. **Seed Physiology**. Extension and Training Office Press, Kasetsart University, Bangkok. (in Thai).
- Chanwichit, P. 2011. **Cultivation of Papaya**. 4th ed. Thanathud Printing co., Ltd., Bangkok. (in Thai)

- Chayaporn, C. 2018. New Cultivar of 'Khaek Dam Kaset' Papaya. **Khakaset** 42(2): 88-91. (in Thai)
- Chotanakoon, K. 2016. Effect of Seed Priming on Germinability, Storability and Seedling Growth of Pepper (*Capsicum annuum* L. cv. Bang Chang). Master Thesis of Horticulture, Kasetsart University. (in Thai)
- Chotanakoon, K., Kaewsorn, P., Chulaka, P. and Chanprasert, W. 2015. Effect of hydropriming on pepper seed quality of 2 cultivars. **Agricultural Science Journal** 46(3) (Suppl.): 617-620. (in Thai)
- Copeland, L.O. and McDonald, M.B. 1995. **Seed Science and Technology**. Chapman & Hill, New York.
- Dhillon, N.P.S. 1995. Seed priming of male sterile muskmelon (*Cucumis melo* L.) for low temperature germination. **Seed Science and Technology** 23(3): 881-884.
- Editorial Department of Technologychaoban Magazine. 2014. **Papaya is an Economic Crop to Conquer the Rich Way**. Matichon Publishing House, Bangkok. (in Thai)
- Ellis, R.H. and Roberts, E.H. 1980. Improved equation for the prediction of seed longevity. **Annals of Botany** 45(1): 13-30.
- Hilton, J.R. and Thomas, J.A. 1986. Regulation of pregerminative rates of respiration in seeds of various weed species by potassium nitrate. **Journal of Experimental Botany** 37(10): 1516-1524.
- Huang, R., Sukprakarn, S., Phavaphutanon, L., Juntakool, S. and Chaikul, C. 2006. Changes in antioxidant enzyme activity, lipid peroxidation and seedling growth of cucumber seed induced by hydropriming and electric field treatment. **Kasetsart Journal** 40: 825-834.
- ISTA. 2018. **International Rules for Seed Testing**. International Seed Testing Association, Basserdorf, Switzerland.
- Jantawinuragz, R. 1988. The Effects of Extracts from the Root and Seed of Some Papaya Cultivars on Germination and Growth of *Abutilon hirtum* and *Pennisetum polystachyon*. Master Thesis of Horticulture, Kasetsart University. (in Thai).
- Lara, T.S., Lira, J.M.S., Rodrigues, A.C., Rakocovic, M. and Alvarenga, A.A. 2014. Potassium nitrate priming affects the activity of nitrate reductase and antioxidant enzymes in tomato germination. **Journal of Agricultural Science** 6(2): 72-80.
- McDonald, M.B. 2000. Seed deterioration: physiology, repair and assessment. **Seed Science and Technology** 27: 177-237.
- McIntyre, G.I., Cessna, A.J. and Hsiao, A.I. 1996. Seed dormancy in *Avena fatua*: Interacting effects of nitrate, water and seed coat injury. **Physiologia Plantarum** 97: 291-302.
- Mohd, N.Z. and Mohd, S.J. 2017. Effects of seed priming durations and potassium nitrate concentrations on germination of eksotika

- papaya. **Transactions of the Malaysian Society of Plant Physiology** 24: 21-26.
- Mohd, N.Z., Amyita, W.U. and Mohd, S.J. 2016. Effects of hormonal and halo priming treatments on papaya (*Carica papaya* cv. eksotika) seed germination. **Transactions of the Malaysian Society of Plant Physiology** 23: 74-79.
- Na nakorn, P. 2020. Effects of KNO₃ Concentration and Aeration during Seed Priming on Quality of Wax Gourd [*Benincasa hispida* (Thunb.) Cogn.] Seeds. B.S. Special Problem of Horticulture, Kasetsart University. (in Thai)
- Nascimento, W.M. 2003. Muskmelon seed germination and seedling development in response to seed priming. **Scientia Agricola** 60(1): 71-75.
- Owino, D.O. and Ouma, G. 2011. Effect of potassium priming on papaya (*Carica papaya* var. *kamiya*). **Journal of Animal and Plant Sciences** 11(2): 1418-1423.
- Prapanoppasin, P. 1999. Studies on Pepper Seed Priming by Hydropriming and Osmoconditioning. B.S. Special Problem of Horticulture, Kasetsart University. (in Thai)
- Ramnut, W. 2004. Germination Enhancement Using Hydropriming Technique in Chilli Seed. Master Thesis of Horticulture, Kasetsart University. (in Thai)
- Rattanaphan, W. 2019. Effects of Salicylic Acid Solutions on Seed Germination and Seedling Growth of 'Khaek Dam Kaset' Papaya. B.S. Special Problem of Horticulture, Kasetsart University. (in Thai)
- Sansuk, M. 2014. **Papaya is Making Rich Money**. Nana Publishing, Bangkok. (in Thai)
- Singh, G., Gill, S.S. and Sandhu, K.K. 1999. Improved performance of muskmelon (*Cucumis melo*) seeds with osmoconditioning. **Acta Agrobotanica** 52: 121-126.
- Srepho, P., Kaewsorn, P. and Chulaka, P. 2016. Effect of hydropriming on quality and storability of tomato (*Lycopersicon esculentum* Mill.) seed, pp. 249-258. **In Proceedings of the 13th National Seed Conference 2016**. Rajamangala University of Technology Esarn, Surin Campus. (in Thai)
- Tang, C.S. 1971. Benzy isothiocyanate of papaya fruit. **Phytochemistry** 10: 117-121.
- Trawatha, S.E., Steiner, J.J. and Bradford, K.J. 1990. Laboratory vigor tests to predict pepper seedling field emergence performance. **Crop Science** 30: 713-717.
- Varier, A., Vari, A.K. and Dadlani, M. 2010. The subcellular basic of seed priming. **Current Science** 99(4): 450-456.
- Waqas, M., Korres, N.E., Khan, M.D., Nizami, A.S., Deeba, F., Ali, I. and Hussain, H. 2019. Advances in the concept and methods of seed priming, pp. 11-41. **In Hasanuzzaman, M. and Fotopoulos, V., eds. Priming and Pretreatment of Seeds and Seedlings**. Springer Nature Singapore Pte Ltd., Singapore.
- Zimmerman, W.T. 1994. Priming papaya seeds reduce seed germination time. **Caribbean Food Crops Society** 30: 329-332.

การศึกษาประสิทธิภาพการกัดโลหะด้วยไฟฟ้าโดยการประยุกต์ใช้เทคนิคการ หมุนอิเล็กโทรดร่วมกับการปล่อยไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโทรด

A Study of Electrical Discharge Machining Performance by Applied Rotating Electrode with Dielectric Flushing through the Axis of Electrode

กมลพงศ์ แจ่มกมล และ สุภาวัฒน์ ชูวาริ *

Kamonpong Jamkamon and Suppawat Chuvaree *

Received: 20 November 2020, Revised: 11 February 2021, Accepted: 14 May 2021

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการเจาะรูชิ้นงานเหล็กกล้าแม่พิมพ์ด้วยเครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้าโดยการประยุกต์ใช้เทคนิคการหมุนอิเล็กโทรดร่วมกับการปล่อยไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโทรด ในการศึกษาใช้อุปกรณ์จับอิเล็กโทรดแบบหมุนพร้อมปล่อยไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโทรด ถูกออกแบบและติดตั้งบนหัวเครื่องจักรเพื่อใช้ในการเจาะรูชิ้นงานเหล็กกล้า AISI P20 ด้วยอิเล็กโทรดทองแดง จากการควบคุมความเร็วในการหมุนของอิเล็กโทรด 30, 90, 150, 210 และ 270 รอบต่อนาที ร่วมกับการปล่อยไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลาง และฉีดด้านข้างอิเล็กโทรด พบว่า ประสิทธิภาพการทำงานจากการประเมินเวลาที่ใช้ในการเจาะลดลง 62, 61 และ 28 เปอร์เซ็นต์ และอัตราการกำจัดเนื้องานเพิ่มสูงขึ้น 154, 144 และ 40 เปอร์เซ็นต์ สำหรับการปล่อยไดอิเล็กทริกแบบฉีดผ่านแกนกลาง แบบฉีดผ่านแกนกลาง และแบบฉีดด้านข้างอิเล็กโทรด ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับ การเจาะรูแบบทั่วไป นอกจากนี้ยังพบว่า เวลาที่ใช้ในการเจาะรูและอัตราการกำจัดเนื้องานสำหรับการปล่อยไดอิเล็กทริกแบบฉีดผ่านแกนกลางอิเล็กโทรดไม่ขึ้นอยู่กับความเร็วในการหมุนของอิเล็กโทรด อย่างไรก็ตามอัตราการกำจัดเนื้องานที่มากขึ้นส่งผลให้ความหนาผิวเฉลี่ยของผนังรูเจาะเพิ่มสูงขึ้น แต่ระยะห่างของช่องว่างระหว่างอิเล็กโทรดกับผนังงานชิ้นงานถูกปรับปรุงให้มีขนาดลดลงเมื่อเปรียบเทียบกับ การเจาะรูแบบทั่วไป

คำสำคัญ: การกัดโลหะด้วยไฟฟ้า, การหมุนอิเล็กโทรด, การปล่อยไดอิเล็กทริก

ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกลและอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ เขตสาทร กรุงเทพมหานคร 10120

Department of Mechanical and Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Krungthep, Sathon, Bangkok 10120, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): suppawat.c@mail.rmuk.ac.th

ABSTRACT

The aim of this research is to investigate the machining performance for drilling hole on the tool steel in the electrical discharge machining. The applied rotating electrode with modified dielectric flushing through the axle of electrode was performed in this study. In this work, a rotary electrode holding device with dielectric flushing through the axis of electrode was designed and mounted on the head of machine for drilling AISI P20 steel with copper electrode. The rotational speed of electrode was controlled at 30, 60, 90, 150, 210 and 270 rev/min for the dielectric flow through the axis and side flushing of electrode. The obtained results found that the machining time was reduced by 62, 61 and 28 % and the material removal rate was increased by 154, 144 and 40 % for the suction flushing, pressure flushing and side flushing respectively, when compared to side flushing with conventional electrode. In addition, the machining time and material removal rate in the suction flushing through the axis of electrode were independent of the rotating speed. Moreover, higher material removal rate resulted in an increase in the surface roughness of drilled wall but the gap clearance was improved by dielectric flushing through the axis of electrode.

Keywords: electrical discharge machining, rotating electrode, dielectric flushing

บทนำ

การกัดโลหะด้วยไฟฟ้า (Electrical discharge machining, EDM) เป็นการแปรรูปชิ้นงานโดยอาศัยความร้อนที่เกิดจากปฏิกิริยาทางไฟฟ้า (Discharge current) เพื่อให้เกิดการสปาร์ก (Sparking) ซึ่งเพียงพอต่อการกำจัดวัสดุออกจากเนื้องานภายใต้ของเหลวไดอิเล็กทริก (Dielectric fluid) ที่ปกคลุมและกั้นกลางระหว่างอิเล็กโทรด (Electrode) กับชิ้นงาน (Workpiece) ทำให้สามารถกำจัดเนื้อโลหะโดยไม่ขึ้นอยู่คุณสมบัติทางกลของวัสดุ (Choudhary and Jadoun, 2014) ด้วยเหตุนี้การกัดโลหะด้วยไฟฟ้าจึงเป็นที่นิยมใช้ในการแปรรูปชิ้นงานที่มีความแข็งสูงและยากต่อการแปรรูปด้วยกระบวนการทางกล (Difficult-to-cut material) สำหรับการผลิตชิ้นส่วนอากาศยาน ชิ้นส่วนยานยนต์ และอุตสาหกรรมแม่พิมพ์ เป็นต้น (Jeevamalar and Ramabalan, 2015)

ประสิทธิภาพการแปรรูปวัสดุชิ้นงานสำหรับการกัดโลหะด้วยไฟฟ้าขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมและปัจจัยในการทำงานที่แตกต่างกัน เช่น ชนิดของวัสดุอิเล็กโทรด วัสดุชิ้นงานและโดยเฉพาะอย่างยิ่งพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการแปรรูป จากการศึกษาวิจัยเกี่ยวกับพารามิเตอร์ที่เหมาะสมในการกัดโลหะด้วยไฟฟ้า พบว่าผลการทดลองมีแนวโน้มเป็นไปในทิศทางเดียวกัน (Barenji *et al.*, 2016) ศึกษาประสิทธิภาพการแปรรูปเหล็กกล้าเครื่องมือ AISI D6 ด้วยวัสดุอิเล็กโทรดทองแดง พบว่าระยะเวลาการปล่อยกระแสไฟฟ้า (Pulse on-time) ที่ยาวนานส่งผลให้อัตราการกำจัดเนื้องาน (Material removal rate, MRR) มีค่าสูงขึ้นและอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (Electrode wear ratio, EWR) ลดต่ำลง ผลการทดลองของ (Pavani *et al.*, 2017) แสดงให้เห็นว่ากระแสไฟฟ้า (Current) ส่งผลต่ออัตราการกำจัดเนื้องานและคุณภาพผิวงาน

(Surface Quality, Ra) โดยตรง (Tanjilul *et al.*, 2018) พบว่าความสัมพันธ์ระหว่างกระแสไฟฟ้ากับระยะเวลาการปล่อยกระแสไฟฟ้า ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของช่องว่างในการแปรรูป (Gap clearance, GC) และระยะเวลาในการทำงาน (Machining time, MT) นอกจากนี้งานวิจัยเกี่ยวกับผลกระทบที่เกิดขึ้นจากการสะสมของเศษอนุภาคเนื่องงาน (Debris Particles) ที่หลุดออกมาระหว่างการกัดเซาะและความสามารถในการรักษาเสถียรภาพในบริเวณพื้นที่การสปาร์กได้รับการศึกษาและให้ความสนใจสำหรับงานวิจัยในปัจจุบันนี้

การหมุนอิเล็กโทรดเป็นอีกเทคนิคใหม่ที่จะช่วยให้เกิดการไหลวนของไดอิเล็กทริกซึ่งมีผลโดยตรงต่อความสามารถในการกำจัดเศษเนื่องงานออกจากช่องว่างการแปรรูป (Sapkal and Jagtap, 2018) พบว่า การหมุนของอิเล็กโทรดขณะทำการแปรรูปสามารถเพิ่มอัตราการกำจัดเนื่องงานและลดอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดได้ มากไปกว่านั้น การปล่อยไดอิเล็กทริกผ่านแท่งอิเล็กโทรดยังสามารถช่วยเพิ่มประสิทธิภาพและความแม่นยำในการแปรรูปได้ (Risto *et al.*, 2016) รวมไปถึงการปรับแต่งรูปทรงของวัสดุอิเล็กโทรดเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการแปรรูปยังคงได้รับความสนใจในช่วงเวลาที่ผ่านมา (Kumar and Singh, 2019) อย่างไรก็ตามในงานวิจัยเหล่านั้นไม่ได้บ่งชี้ถึงรูปแบบการปล่อยไดอิเล็กทริกที่มีผลต่อประสิทธิภาพการแปรรูปโดยการกัดโลหะด้วยไฟฟ้าและความสามารถในการแปรรูปด้านอื่นๆ ที่สำคัญ

งานวิจัยฉบับนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกัดโลหะด้วยไฟฟ้าโดยการประยุกต์ใช้เทคนิคการหมุนอิเล็กโทรดขณะการแปรรูปร่วมกับการปล่อยไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลาง

อิเล็กโทรด ทั้งแบบฉีดไดอิเล็กทริกผ่านอิเล็กโทรดไปยังพื้นที่สปาร์ก (Pressure flushing, PF) การดูดไดอิเล็กทริกออกจากพื้นที่การสปาร์กผ่านอิเล็กโทรด (Suction flushing, SUC) และการฉีดไดอิเล็กทริกด้านข้างอิเล็กโทรด (Side flushing, SF) เปรียบเทียบกับการกัดโลหะด้วยไฟฟ้าแบบทั่วไปที่อิเล็กโทรดไม่หมุนและฉีดไดอิเล็กทริกด้านข้าง (Conventional side flushing, SF 0 rev) ทั้งนี้ประสิทธิภาพการทำงานประเมินจาก เวลาที่ใช้ในการแปรรูป อัตราการกำจัดเนื่องงาน อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด ในส่วนคุณภาพของชิ้นงานประเมินจาก ความหยาบผิวของผั้งรูเจาะ และความแม่นยำในการแปรรูปประเมินจากช่องว่างที่เกิดจากการสปาร์กระหว่างผั้งรูเจาะกับอิเล็กโทรด

วิธีดำเนินการวิจัย

ในงานวิจัยฉบับนี้เป็นการทดลองเพื่อศึกษาการปรับปรุงประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้าโดยการประยุกต์ใช้เทคนิคการหมุนอิเล็กโทรดร่วมกับการปล่อยไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางสำหรับการเจาะรูเหล็กกล้าแม่พิมพ์พลาสติกเกรด AISI P20 เนื่องจากเหล็กกล้าแม่พิมพ์เกรดดังกล่าวมีคุณสมบัติด้านความเหนียว ด้านทานความร้อนและการกัดกร่อนทางเคมีที่ดี รวมไปถึงคุณสมบัติด้านการต้านทานการเกิดความล้าตัวขณะใช้งาน นอกจากนี้เหล็กกล้าแม่พิมพ์เกรด AISI P20 ยังสามารถแปรรูปได้ง่ายทั้งกรรมวิธีทางกลและทางความร้อน ทำให้นิยมถูกนำมาแปรรูปเป็นแม่พิมพ์พลาสติก ตารางที่ 1 แสดงส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าแม่พิมพ์พลาสติก เกรด AISI P20 (Dewangan *et al.*, 2015)

ตารางที่ 1 ส่วนประกอบทางเคมีของเหล็กกล้าแม่พิมพ์พลาสติกเกรด AISI P20

ส่วนประกอบทางเคมี	C	Mn	Cr	Mo	Si	Cu	S	Fe
เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก (Wt) %	0.4	1	1.2	0.35	0.4	0.25	<0.03	Bal.

วัสดุอิเล็กทรอนิกส์ทองแดงถูกนำมาใช้ในการแปรรูปชิ้นงานในงานวิจัยฉบับนี้ เนื่องจากเป็นวัสดุใช้เป็นอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้อย่างแพร่หลายในอุตสาหกรรมเนื่องจากสามารถแปรรูปได้ง่าย (Jaharah *et al.*, 2008) อีกทั้งมีอัตราการขจัดเนื้องานที่สูงสำหรับการแปรรูปวัสดุชิ้นงานที่เป็นเหล็กกล้า (Muthuramalingam and Mohan, 2013) ทั้งนี้ส่วนประกอบและเงื่อนไขต่างๆ ที่เกี่ยวข้องกับการทดลองมีดังนี้

1. เครื่องมือและเครื่องจักรที่ใช้ในการวิจัย

ในงานวิจัยได้ออกแบบอุปกรณ์จับอิเล็กทรอนิกส์แบบหมุนพร้อมปล่อยสารไดอิเล็กทริกให้ไหลผ่านแกนกลางของอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งถูกติดตั้งเข้ากับเครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้ายี่ห้อ Aristech รุ่น CNC EDM 430 (Taiwan) โดยแผนภาพและหลักการการทำงานของเครื่องจักรและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองแสดงดังภาพที่ 1

สำหรับหัวจับอิเล็กทรอนิกส์ถูกสร้างขึ้นมาจากสำหรับจับอิเล็กทรอนิกส์ได้สูงสุด 9.5 มิลลิเมตร และสามารถปรับความเร็วรอบโดยการปรับความถี่ของแรงดันไฟฟ้าเพื่อควบคุมมอเตอร์สำหรับขับเคลื่อนเพลาอิเล็กทรอนิกส์ ซึ่งส่งถ่ายกำลังผ่านชุดสายพานฟันเฟือง ความเร็วการหมุนของอิเล็กทรอนิกส์สามารถปรับได้ในช่วง 10 ถึง 330 รอบต่อนาที ในส่วนของไดอิเล็กทริกสามารถไหลผ่านแกนกลางของอิเล็กทรอนิกส์โดยใช้ข้อต่อแบบหมุน (Rotary joint) และมีอุปกรณ์วัดอัตราการไหล (Flow meter) เพื่อใช้ควบคุมปริมาณการไหลของไดอิเล็กทริกให้คงที่สำหรับทุกรูปแบบการทดลอง

ในการทดลองค่าความลึกในการกัดเซาะ (Machining depth) และเวลาที่ใช้ (Machining time)

ถูกบันทึกโดยตรงจากหน้าจอแสดงผลการทำงานของเครื่องจักรเพื่อใช้ในการคำนวณค่าอัตราการกำจัดเนื้องาน ในส่วนของปริมาตรเนื้องานที่ถูกกำจัดออกจะทำการประเมินโดยการชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งดิจิทัล ยี่ห้อ Jadever รุ่น SKY-150 (Taiwan) ซึ่งมีค่าความละเอียด 0.005 กรัม ระยะการสึกของอิเล็กทรอนิกส์จะทำการประเมินจากความต่างของอิเล็กทรอนิกส์ก่อนและหลังการสปาร์กโดยใช้ไมโครมิเตอร์เป็นเครื่องมือวัด ความหนาของผิวเฉลี่ยของผนังรูจะทำการตรวจสอบด้วยเครื่องวัดความหนาของผิว ยี่ห้อ Mahr รุ่น MarSurf PS1 (Germany) ขนาดของช่องว่างระหว่างอิเล็กทรอนิกส์กับผนังชิ้นงานที่เกิดจากการสปาร์กทำการตรวจสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสง ยี่ห้อ Olympus รุ่น STM6 (Japan)

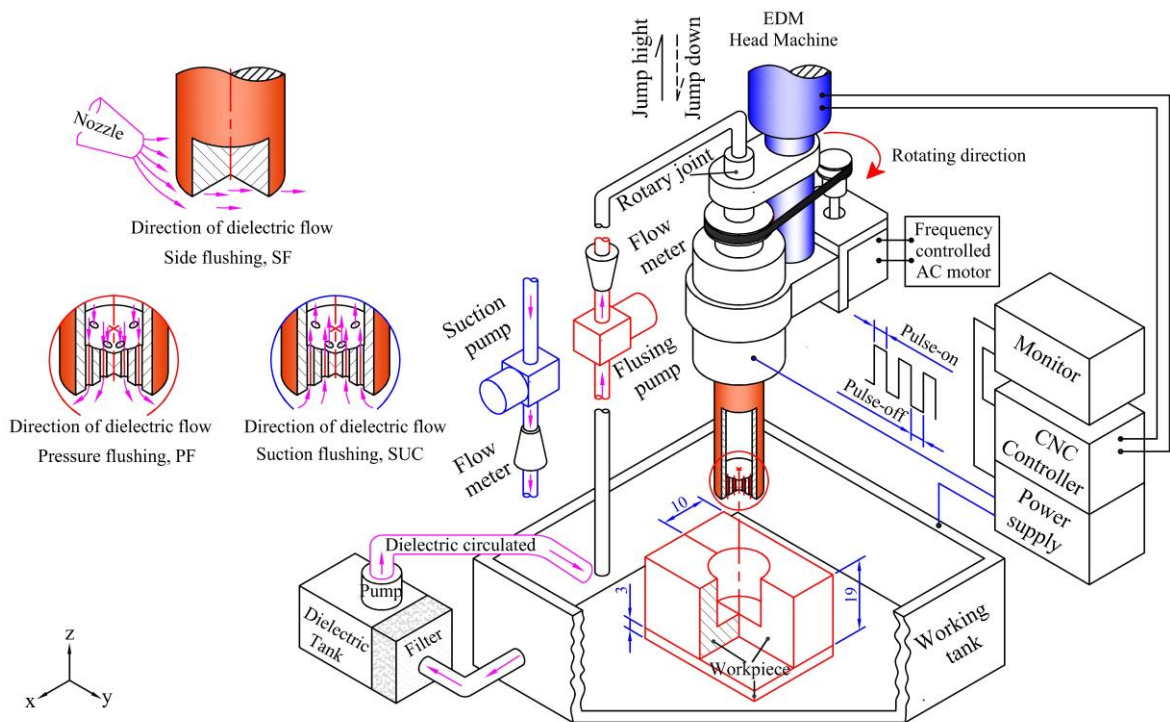
2. วัสดุชิ้นงานและอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้ในการวิจัย

วัสดุชิ้นงานเป็นเหล็กกล้าสำหรับสร้างแม่พิมพ์พลาสติกเกรด AISI P20 ขนาด $10 \times 25 \times 65$ มิลลิเมตร ผ่านการเจียรระไนปรับผิวเรียบ ในการทดลองชิ้นงาน 2 แผ่น (Plate 1, Plate 2) จะถูกนำมาประกบกันโดยมีแผ่นรอง (Plate 3) ที่มีความหนา 5 มิลลิเมตร ประกอบเข้าด้วยกันโดยใช้อุปกรณ์ช่วยในการจับยึดดังแสดงในภาพที่ 2 เพื่อใช้เป็นชิ้นงานสำหรับการเจาะรูลึก 27 มิลลิเมตร วัสดุอิเล็กทรอนิกส์ที่ใช้เป็นทองแดงแท่งตัน (Copper electrode) ขนาด 9 มิลลิเมตร ประกอบด้วยอิเล็กทรอนิกส์แท่งตันแบบทั่วไปที่ใช้สำหรับการปล่อยไดอิเล็กทริกแบบฉีดด้านข้างอิเล็กทรอนิกส์ (SF) และอิเล็กทรอนิกส์ที่มีการเจาะรู (Modified electrode) เพื่อฉีดไดอิเล็กทริกไปยังบริเวณพื้นผิวที่สปาร์ก (PF) และเพื่อดูไดอิเล็กทริก

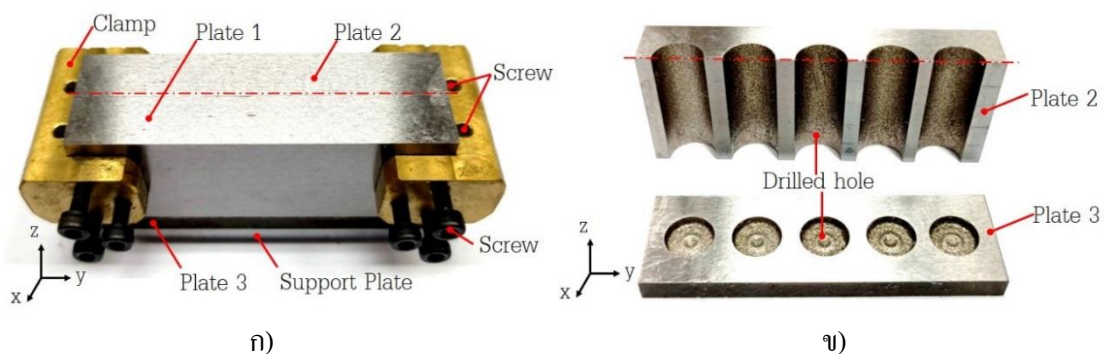
จากบริเวณพื้นผิวที่สปาร์กผ่านแกนกลางอิเล็กโทรด (SUC) ดังแสดงในภาพที่ 1

การฉีดหรือดูดไดอิเล็กทริกผ่านอิเล็กโทรดกระทำโดยการสลับทางการต่อท่อไดอิเล็กทริกเข้ากับ

ชุดปั๊ม ทั้งนี้ระบบไหลวนไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโทรดถูกออกแบบให้ทำงานแยกจากระบบการไหลวนและกรองไดอิเล็กทริกของถังโตะงาน



ภาพที่ 1 การติดตั้งชิ้นงานและอุปกรณ์ที่ใช้ในการทดลองบนเครื่องกัดโลหะด้วยไฟฟ้า



ภาพที่ 2 ชิ้นงานเหล็กกล้า AISI P20 ที่ใช้ในการทดลอง

ก) การประกอบชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง ข) ชิ้นงานที่ถูกแยกชิ้นหลังจากการทดลอง

ตารางที่ 2 สภาวะแวดล้อมและเงื่อนไขการทดลอง

สภาวะแวดล้อมและเงื่อนไขในการทดลอง	รายละเอียด
ขั้วไฟฟ้าของอิเล็กโทรด (Polarity)	Anode (+)
แรงดันไฟฟ้าสูงสุด (Voltage)	150 (โวลต์)
เวลาเปิด (Pulse on-time)	150 (ไมโครวินาที)
เวลาปิด (Pulse off-time)	2 (ไมโครวินาที)
กระแสไฟฟ้า (Discharge current)	16 (แอมแปร์)
เวลาในการสปาร์ก (Working time)	2 (วินาที)
ระยะในการยกอิเล็กโทรด (Jump height) or (Jump time)	2 (มิลลิเมตร) or (0.75 วินาที)
ของเหลวไดอิเล็กทริก (Dielectric fluid)	DIEL MS 7000, TOTAL
อัตราการไหลของไดอิเล็กทริก	0.75 (ลิตรต่อนาที)
ความเร็วรอบของอิเล็กโทรด (Rotational speed)	30, 90, 150, 210, 270 (รอบต่อนาที)
รูปแบบการปล่อยไดอิเล็กทริก (Dielectric flushing)	Side flushing, Pressure flushing, Suction flushing

3. สภาวะแวดล้อมและเงื่อนไขในการทดลอง

การประยุกต์ใช้เทคนิคการหมุนอิเล็กโทรด ร่วมกับการปล่อยไดอิเล็กทริกผ่านอิเล็กโทรดเพื่อ ศึกษาประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องกัดด้วยไฟฟ้า โดยคงที่ระดับกระแสไฟฟ้า (Discharge current) ที่ 16 แอมแปร์ ทำการปรับตั้งค่า เวลาเปิด (Pulse on-time) ที่ระดับ 150 ไมโครวินาที และค่าเวลาปิด (Pulse off-time) ที่ระดับ 2 ไมโครวินาที ค่าตัวแปรเหล่านี้ได้มาจากการทดลองปรับตัวแปรซึ่ง ส่งผลให้เกิดอัตราการกำจัดเนื้องานสูงสุดจากการกัด ไดอิเล็กทริกด้านข้างอิเล็กโทรดแบบทั่วไป (Jamkamon and Janmanee, 2014) สำหรับการปล่อยไดอิเล็กทริก ทุกรูปแบบในการทดลองกำหนดอัตราการไหลคงที่ 0.75 ลิตรต่อนาที และการหมุนของอิเล็กโทรดจะทำการปรับเปลี่ยนความเร็ว 5 ระดับ ประกอบด้วย 30, 90, 150, 210 และ 270 รอบต่อนาทีโดยสภาวะแวดล้อมและเงื่อนไขการทดลองสรุปได้ดังแสดง ตารางที่ 2 ความเร็วรอบการหมุนของอิเล็กโทรดทำการกำหนดโดยคำนึงถึงระยะเวลาในการทำงาน (Working time, WT) กล่าวคือ อิเล็กโทรดที่สร้างขึ้น

สำหรับการปล่อยไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางมีรูเจาะ บนพื้นผิวอิเล็กโทรดที่ใช้ในการกัดโลหะด้วยไฟฟ้า ซึ่งตำแหน่งของรูเจาะจะหมุนครบ 360 องศาสำหรับ ทุกระดับความเร็วรอบก่อนที่จะเข้าสู่สภาวะการยกอิเล็กโทรด (Jump time, JT) เป็นวัฏจักรจนถึงระดับ ความลึกของการกัดเจาะที่กำหนด (27 มิลลิเมตร)

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

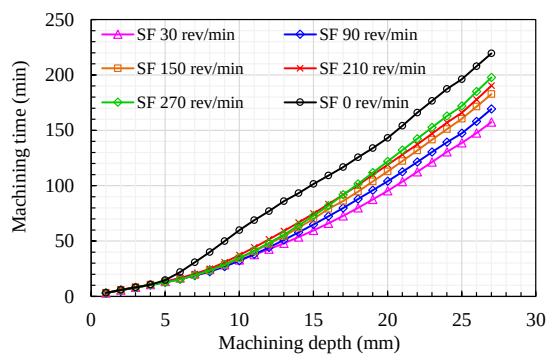
1. เวลาที่ใช้ในการเจาะรูและอัตราการกำจัดเนื้องาน

ในการทดลองปรับความเร็วรอบอิเล็กโทรด และการปล่อยไดอิเล็กทริกแบบฉีดด้านข้าง อิเล็กโทรด (SF) แบบฉีดผ่านแกนกลางอิเล็กโทรด (PF) และดูดผ่านแกนกลางอิเล็กโทรด (SUC) แสดงผลความสัมพันธ์ของระดับความลึกในการเจาะ กับเวลาที่ใช้ในการแปรรูปดังภาพที่ 3

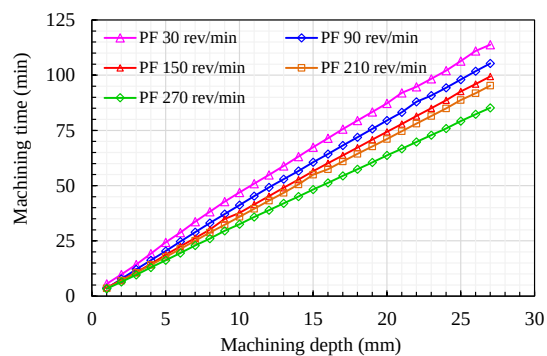
ภาพที่ 3 ก) แสดงผลการทดลองจากการ เจาะรูชิ้นงานแบบทั่วไป (อิเล็กโทรดไม่หมุน, SF 0 rev/min) และการเจาะรูโดยหมุนอิเล็กโทรดร่วมกับ ปล่อยไดอิเล็กทริกแบบฉีดด้านข้าง พบว่า เวลาที่ใช้ ในการเจาะรูชิ้นงานแบบทั่วไปเพิ่มขึ้นตามระดับ

ความลึกของรูเจาะเนื่องจากระดับความลึกของรูเจาะเพิ่มมากขึ้นทำให้ความสามารถในการไหลของไดอิเล็กทริกผ่านพื้นที่การกัดเซาะลดลง ส่งผลให้เกิดเศษอนุภาคที่ต้องกำจัดออกในระหว่างการกัดเซาะตกค้างในบริเวณพื้นผิวการสปาร์คเป็นเหตุให้ไดอิเล็กทริกขาดความเสถียรทำการสปาร์คในวัฏจักรถัดไปมีความรุนแรงลดลงเนื่องจากเกิดการกระจายตัวของพลังงาน ทำให้การเจาะรูชิ้นงานลึก 27 มิลลิเมตร ต้องใช้เวลามากถึง 219.47 นาที ทั้งนี้เมื่อทำการฉีดไดอิเล็กทริกด้านข้างร่วมกับการปรับความเร็วในการ

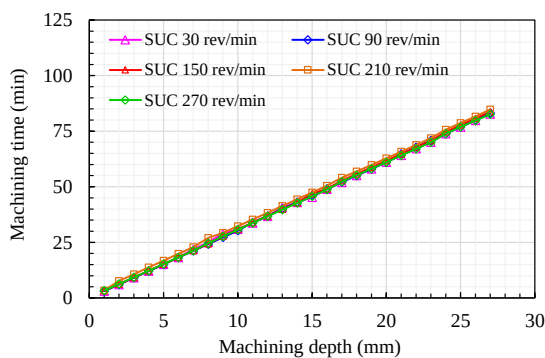
หมุนของอิเล็กโทรด 30, 90, 150, 210 และ 270 รอบต่อนาที พบว่า เวลาที่ใช้ในการเจาะรูเป็น 157.42, 169.15, 182.67, 190.17 และ 197.70 นาที ตามลำดับ ผลจากการทดลองนี้ทำให้สรุปได้ว่าเทคนิคการหมุนอิเล็กโทรดร่วมกับการฉีดไดอิเล็กทริกด้านข้างส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการเจาะรูลดลง และมีประสิทธิภาพสูงสุดที่ระดับความเร็วในการหมุนของอิเล็กโทรด 30 รอบต่อนาที ซึ่งเวลาที่ใช้ในการเจาะรูลดลงสูงสุด 28 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการกัดเซาะแบบทั่วไป (คำนวณจาก $(100) \times ((219.47 - 157.42) / 219.47)$)



ก) การปล่อยไดอิเล็กทริกแบบฉีดด้านข้างอิเล็กโทรด



ข) แบบฉีดไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโทรด



ค) แบบดูดไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโทรด

ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์ของความลึกการกัดเซาะ เวลาที่ใช้ในการแปรรูป ความเร็วรอบของอิเล็กโทรดและรูปแบบการปล่อยไดอิเล็กทริก

ภาพที่ 3 ข) แสดงผลการทดลองจากการปรับความเร็วในการหมุนของอิเล็กโทรดโดยปล่อยไดอิเล็กทริกแบบฉีดผ่านแกนกลางอิเล็กโทรด พบว่า เวลาที่ใช้ในการเจาะรูมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับความลึกของรูเจาะ และการเพิ่มความเร็วในการหมุน

ของอิเล็กโทรดที่ 30, 90, 150, 210 และ 270 รอบต่อ นาที ส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการเจาะรูลึก 27 มิลลิเมตร ลดลงเป็น 113.75, 105.32, 99.40, 95.22 และ 85.20 นาที ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการเจาะรูแบบทั่วไป พบว่า เวลาที่ใช้ในการเจาะรูลดลงสูงสุด 61

เปอร์เซ็นต์ (คำนวณจาก $(100)((219.47 - 85.20)/219.47)$) ที่ระดับความเร็วในการหมุนของอิเล็กโทรด 270 รอบต่อนาที

ภาพที่ 3 ค) แสดงผลการประยุกต์ใช้การหมุนอิเล็กโทรดร่วมกับการดูดสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลาง พบว่า เวลาที่ใช้ในการกัดเซาะเพิ่มขึ้นตามความระดับความลึกรูเจาะ และความเร็วในการหมุนของอิเล็กโทรดแทบจะไม่ส่งผลต่อเวลาที่ใช้ในการเจาะรู จากการปรับความเร็วรอบ 30, 90, 150, 210 และ 270 รอบต่อนาที พบว่า เวลาที่ใช้ในการเจาะรูลึก 27 มิลลิเมตร อยู่ที่ 82.73, 83.17, 83.77, 84.80 และ 82.60 นาที ตามลำดับ เมื่อเปรียบเทียบกับการเจาะรูแบบทั่วไป พบว่า เวลาที่ใช้ในการเจาะรูลดลงสูงสุด 62 เปอร์เซ็นต์ (คำนวณจาก $(100)((219.47 - 82.60)/219.47)$) จากผลการทดลองเหล่านี้ทำให้สามารถสรุปได้ว่าการดูดสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโทรดทำให้สามารถกำจัดเศษอนุภาคโลหะออกพื้นที่การกัดเซาะและรักษาความเสถียรในการสปาร์คได้ดีที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับกรณีผ่านแกนกลางและฉีดสารไดอิเล็กทริกด้านข้างอิเล็กโทรด

อัตราการกำจัดเนื้องานในงานวิจัยฉบับนี้ คำนวณจากปริมาตรเนื้องานที่ถูกกำจัดออกต่อหน่วย

เวลาที่ใช้ในการแปรรูปดังสมการที่ 1 (Sapkal and Jagtap, 2018) จากการประยุกต์ใช้เทคนิคการหมุนของอิเล็กโทรดร่วมกับการปล่อยสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโทรด ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 4 พบว่า อัตราการกำจัดเนื้องานสำหรับการปล่อยไดอิเล็กทริกแบบฉีดด้านข้างอิเล็กโทรดมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเร็วในการหมุนของอิเล็กโทรดเพิ่มมากขึ้น โดยอัตราการกำจัดเนื้องานเพิ่มขึ้นสูงสุด 40 เปอร์เซ็นต์ (คำนวณจาก $(100)((12.21 - 8.70)/8.70)$) ที่ระดับความเร็วในการหมุนของอิเล็กโทรด 30 รอบต่อนาทีเมื่อเทียบกับการกัดโลหะด้วยไฟฟ้าแบบทั่วไป ในส่วนของการฉีดไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโทรด พบว่าความเร็วในการหมุนของอิเล็กโทรด 30, 90, 150, 210 และ 270 รอบต่อนาที ส่งผลให้อัตราการกำจัดเนื้องานเพิ่มมากขึ้นตามลำดับเป็น 84, 99, 111, 120 และ 144 เปอร์เซ็นต์ เมื่อเทียบกับการกัดโลหะด้วยไฟฟ้าแบบทั่วไป ทั้งนี้อัตราการกำจัดเนื้องานจากการใช้เทคนิคการหมุนของอิเล็กโทรดร่วมกับการดูดไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโทรดเพิ่มขึ้นสูงสุด 154 ± 3 เปอร์เซ็นต์ โดยไม่ขึ้นอยู่กับการความเร็วในการหมุนของอิเล็กโทรด

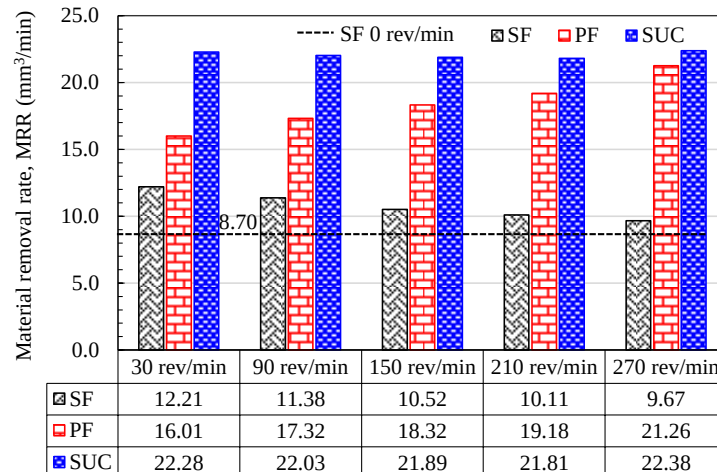
$$\text{Material removal rate} = ((M_1 - M_2)/(\rho \times t)) \times 10^3 \quad (1)$$

เมื่อ Material removal rate (MRR) คือ อัตราการกำจัดเนื้องาน (ลูกบาศก์มิลลิเมตรต่อนาที), M_1 คือน้ำหนักของชิ้นงานก่อนการแปรรูป (กรัม), M_2 คือน้ำหนักของชิ้นงานหลังการแปรรูป (กรัม), ρ คือความหนาแน่นของเหล็กกล้า AISI P20 ($\rho = 7.775$ กรัมต่อลูกบาศก์เซนติเมตร) และ t คือ เวลาที่ใช้ในการเจาะรู (นาที)

จากผลการทดลอง สามารถสรุปได้ว่าการประยุกต์ใช้เทคนิคการหมุนอิเล็กโทรดช่วยลดเวลาที่ใช้ในการแปรรูปรูเจาะ โดยความเร็วรอบที่เหมาะสมสำหรับการปล่อยไดอิเล็กทริกแบบฉีดด้านข้างอิเล็กโทรดอยู่ที่ความเร็ว 30 รอบต่อนาที ส่วนการฉีดไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโทรดร่วมกับการหมุนอิเล็กโทรดทำให้เกิดแรงเหวี่ยงหนีศูนย์กลางไดอิเล็กทริกและส่งผลให้อนุภาคเศษโลหะ

เคลื่อนตัวจากบริเวณแกนกลางของอิเล็กโทรดไปยังแนวรัศมีของรูเจาะทำให้การเพิ่มขึ้นของระดับความเร็วรอบของอิเล็กโทรดส่งเสริมให้เกิดการกำจัดอนุภาคของเศษโลหะออกจากบริเวณพื้นผิวที่สปาร์กมีประสิทธิภาพมากขึ้น ซึ่งจากผลที่ได้พบว่ามีความ

สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Makenzi and Ikua, 2012) ทั้งนี้ในส่วนของการดูดโคอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโทรดสามารถกำจัดเศษอนุภาคเนื้องานและรักษาความเสถียรในการกัดเจาะ โดยเป็นอิสระจากความเร็วในการหมุนของอิเล็กโทรด



ภาพที่ 4 อัตราการกำจัดเนื้องานจากการหมุนร่วมกับการปล่อยโคอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโทรด

2. อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด

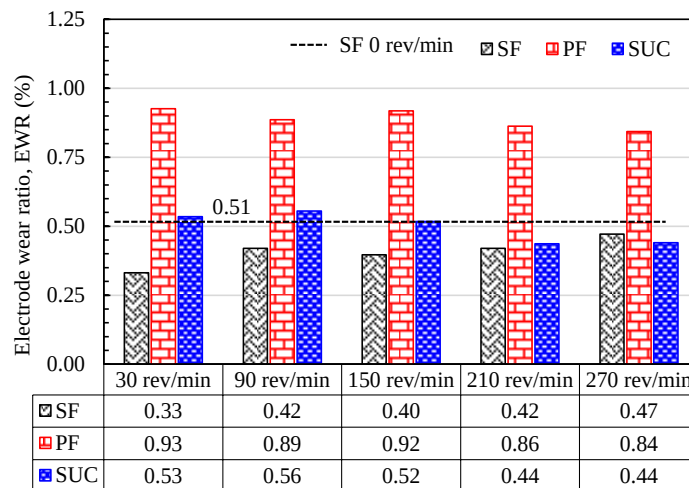
อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดในการทดลองนี้คำนวณจากระยะความยาวของอิเล็กโทรดที่สึกหรอต่อความระยะความลึกของรูเจาะแสดงดังสมการที่ 2 (Yilmaz and Okka, 2010) ผลจากการทดลองแสดงดังภาพที่ 5 พบว่า มีอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดสูงสุดสำหรับการปล่อยโคอิเล็กทริกทุกรูปแบบมีค่าต่ำกว่า 1 เปอร์เซนต์ การฉีดโคอิเล็กทริกด้านข้างอิเล็กโทรดมีแนวโน้มการสึกหรอของอิเล็กโทรดเพิ่มมากขึ้นตามระดับความเร็วรอบในการ

หมุนของอิเล็กโทรด ในขณะที่การสึกหรอของอิเล็กโทรดที่มีการดูดโคอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโทรดมีแนวโน้มลดลงเพียงเล็กน้อยโดยที่อัตราการสึกหรอของทั้งสองรูปแบบนี้แตกต่างกันน้อยมาก และมีอัตราการสึกหรอต่ำกว่าการกัดเจาะด้วยอิเล็กโทรดแบบธรรมดาที่ไม่มีการหมุนของอิเล็กโทรด แต่การฉีดโคอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโทรดมีอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดที่สูงกว่าการเจาะรูโดยปล่อยโคอิเล็กทริกแบบอื่นๆ

$$\text{Electrode wear ratio} = (\text{Consumed electrode in length} / \text{Depth of drilled hole}) \times (100) \quad (2)$$

เมื่อ Electrode wear ratio (EWR) คือ อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรด (เปอร์เซ็นต์), Consumed electrode in length คือ ระยะความยาวของอิเล็กโทรด

ที่สึกหรอ (มิลลิเมตร) และ Depth of drilled hole คือ ความลึกจริงบนชิ้นงาน (มิลลิเมตร)



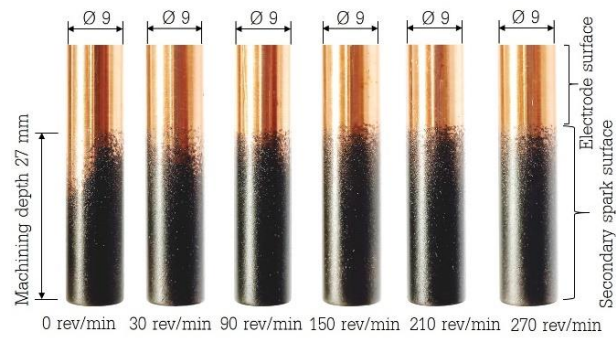
ภาพที่ 5 อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดจากการหมุนร่วมกับการปล่อยไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโทรด

อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดแบบฉีดไดอิเล็กทริกด้านข้างมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระดับความเร็วในการหมุนของอิเล็กโทรด เนื่องจากการหมุนของอิเล็กโทรดส่งผลให้เกิดการแรงเคลื่อนของไดอิเล็กทริกทำให้เกิดการกระจายตัวของอนุภาคเศษโลหะที่กักจัดออกกระจายตัวในช่องว่างระหว่างชิ้นงานกับอิเล็กโทรดส่งผลให้เกิดการสปาร์กซ้าด้านข้างอิเล็กโทรดตลอดความลึกของรูจะดังแสดงหลักฐานการเกิดการสปาร์กซ้ำในทดลองดังภาพที่ 6 ก) การเกิดการสปาร์กซ้ำที่ผนังด้านข้างเป็นเหตุให้ความรุนแรงในการสปาร์กบริเวณพื้นผิวส่วนปลายอิเล็กโทรดลดลงทำให้อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาที่ใช้ในการสปาร์ก ทั้งนี้เมื่อทำการเจาะรูบนอิเล็กโทรดเพื่อปล่อยไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางทำให้เกิดการสปาร์กซ้ำบนพื้นผิวด้านข้างอิเล็กโทรดลดลงเนื่องจากการกักจัดเศษเนื่องงานออกจากพื้นที่การสปาร์กมีประสิทธิภาพมากขึ้นซึ่งผลแสดงดังภาพที่ 6 ข) และ ค)

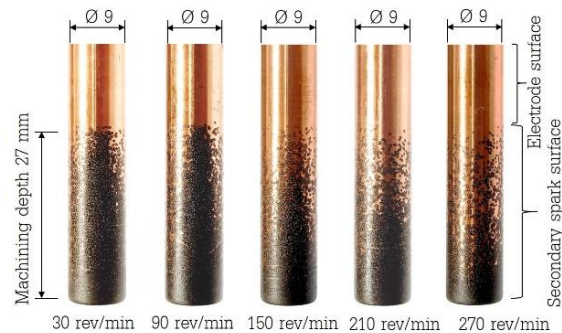
อย่างไรก็ตามการลดลงของการสปาร์กซ้ำบนผนังด้านข้างอิเล็กโทรดที่ปล่อยไดอิเล็กทริกผ่าน

แกนกลางทำให้ความรุนแรงของการสปาร์กในพื้นที่หลัก (การสปาร์กที่ผนังด้านข้างของปลายอิเล็กโทรด) เพิ่มขึ้นและส่งผลให้การสึกหรอของอิเล็กโทรดเพิ่มสูงขึ้นเนื่องจากการเจาะรูบนอิเล็กโทรดทำให้พื้นที่ของอิเล็กโทรดที่ใช้ในการสปาร์กลดลง

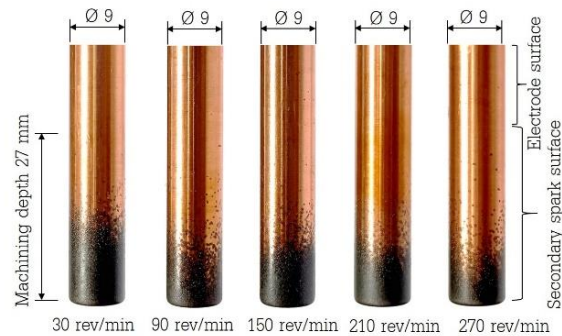
ในส่วนของการดูดไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโทรดมีอัตราการสึกหรอที่ต่ำกว่าการฉีดไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโทรดอาจมีสาเหตุมาจากการดูดไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางทำให้เศษอนุภาคที่กระจายอยู่ด้านข้างอิเล็กโทรดถูกดูดกลับเข้ามายังแกนกลางของอิเล็กโทรดทำให้เศษโลหะเกิดการเคลื่อนตัวผ่านในบริเวณพื้นผิวการสปาร์กหลักของอิเล็กโทรด ส่งผลให้ความรุนแรงในการสปาร์กในบริเวณส่วนปลายของอิเล็กโทรดลดลง ในขณะเดียวกัน การกักจัดเศษโลหะจากพื้นผิวด้านข้างอิเล็กโทรดมีความสมบูรณ์มากขึ้นทำให้มีความเป็นไปได้ที่การสึกหรอของอิเล็กโทรดลดลง สามารถสังเกตได้จากการสปาร์กซ้ำที่พื้นผิวด้านข้างที่ลดลงในภาพที่ 6 ก)



ก) พื้นผิวอิเล็กโทรดที่ใช้ในการทดลองสำหรับการกัดไดอิเล็กทริกด้านข้างอิเล็กโทรด



ข) พื้นผิวอิเล็กโทรดที่ใช้ในการทดลองสำหรับการกัดไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโทรด



ค) พื้นผิวอิเล็กโทรดที่ใช้ในการทดลองสำหรับการกัดไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโทรด

ภาพที่ 6 ลักษณะพื้นผิวอิเล็กโทรดที่ผ่านการกัดโลหะด้วยไฟฟ้าสำหรับเจาะรูลึก 27 มิลลิเมตร

3. คุณภาพของรูเจาะ

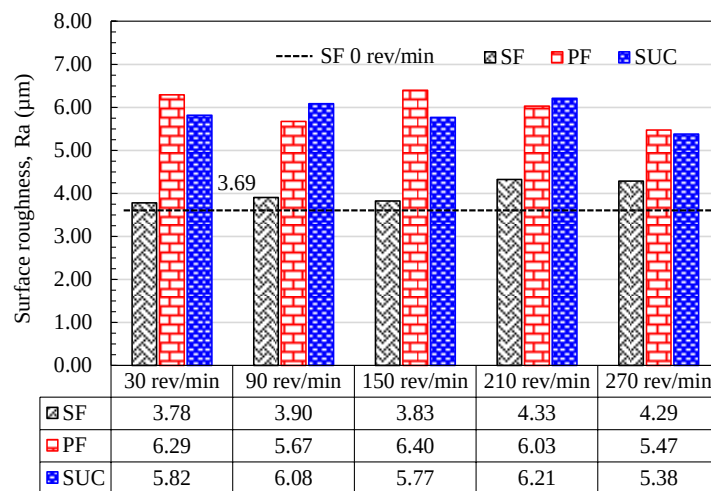
คุณภาพผิวงานของผนังรูเจาะจากการวัดความหยาบผิวเฉลี่ยแสดงผลดังภาพที่ 7 จากผลการประเมิน พบว่า การสปาร์กโดยการกัดสารไดอิเล็กทริกด้านข้างอิเล็กโทรด ให้ค่าความหยาบผิวเฉลี่ยต่ำกว่าการปล่อยไดอิเล็กทริกแบบอื่นๆ และเทคนิคการหมุนอิเล็กโทรดมีแนวโน้มส่งผลให้เกิดความหยาบผิวเฉลี่ยสูงกว่าการเจาะรูด้วยอิเล็กโทรดแบบธรรมดา เนื่องจากอิทธิพลของการหมุนอิเล็กโทรดและการปล่อยสารสารไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโทรด

เป็นการเร่งให้เศษอนุภาคของโลหะเคลื่อนตัวออกจากพื้นผิวการสปาร์ก ส่งผลให้การสปาร์กเข้าบนผนังรูเจาะลดลงและหลงเหลือพื้นผิวที่มีความเสียหายจากการสปาร์กอย่างรุนแรง

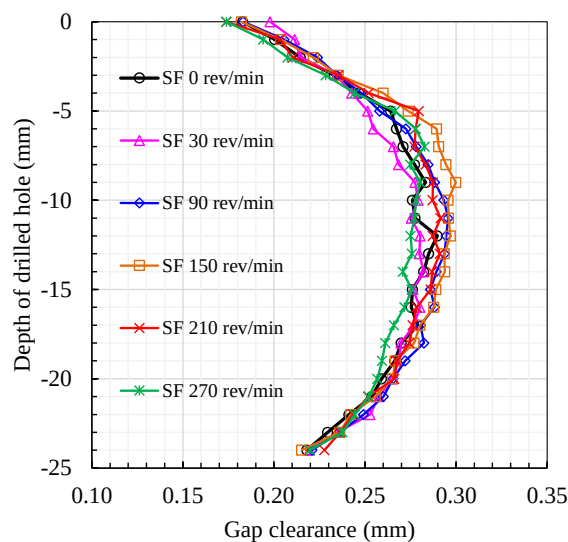
คุณภาพของรูเจาะประเมินจากการวัดระยะห่างของช่องว่างระหว่างผิวอิเล็กโทรดกับผนังรูเจาะแสดงดังภาพที่ 8 ผลจากการตรวจสอบแสดงให้เห็นว่า ระยะห่างของผนังอิเล็กโทรดกับรูเจาะไม่ขึ้นอยู่กับความเร็วรอบของอิเล็กโทรด แต่รูปแบบการปล่อยไดอิเล็กทริกส่งผลกระทบโดยตรงต่อ

ลักษณะของผนังรูเจาะและระยะห่างของช่องว่างที่เกิดจากการสปาร์ค การปล่อยไดอิเล็กทริกแบบฉีดด้านข้างอิเล็กโทรดทำให้เกิดพื้นผิวรูเจาะที่มีลักษณะโค้งเว้าเข้าไปในเนื้อชิ้นงานดังแสดงในรูป 8 ก) ซึ่งระยะห่างสูงสุดโดยอ้างอิงจากขอบอิเล็กโทรดถึงผนังชิ้นงานสำหรับทุกระดับความเร็วในการหมุนของอิเล็กโทรดมีค่าอยู่ในช่วง 0.282 ถึง 0.300 มิลลิเมตร ในส่วนของการทดลองปล่อยไดอิเล็กทริกผ่าน

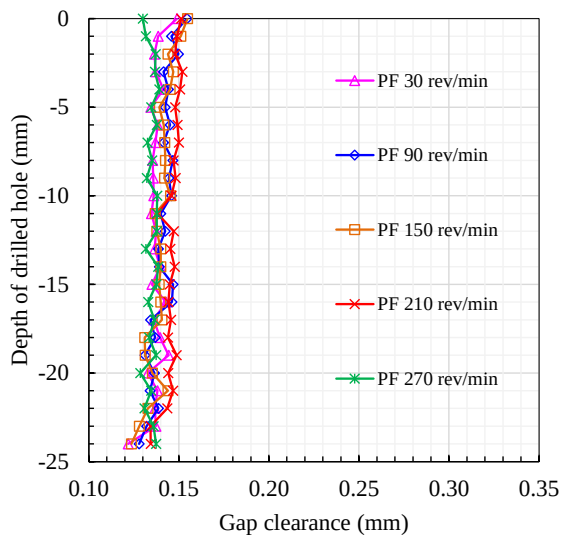
แกนกลางอิเล็กโทรด พบว่า ลักษณะของผนังมีแนวโน้มเป็นเส้นตรงและมีระยะห่างระหว่างพื้นผิวอิเล็กโทรดกับผิวชิ้นงานมีค่าอยู่ในช่วง 0.139 ถึง 0.155 มิลลิเมตร สำหรับการฉีดไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโทรดดังแสดงผลในรูป 8 ข) และมีค่าอยู่ในช่วง 0.156 ถึง 0.171 มิลลิเมตร สำหรับการฉีดไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโทรดดังแสดงผลในรูป 8 ค)



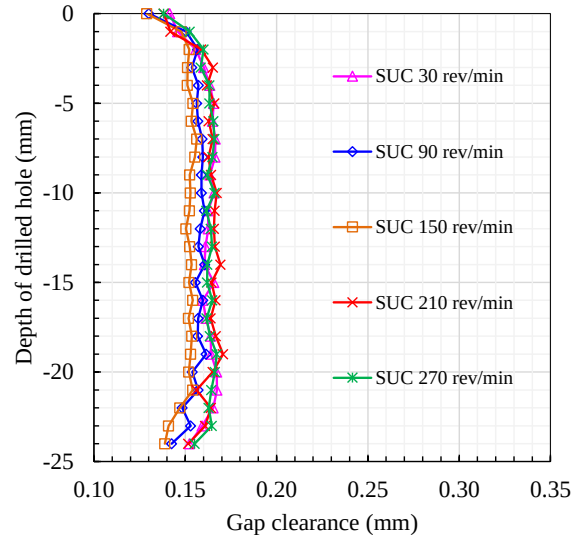
ภาพที่ 7 ความหยาบผิวเฉลี่ยของผนังรูเจาะ



ก) การปล่อยไดอิเล็กทริกแบบฉีดด้านข้างอิเล็กโทรด



ข) แบบชนิดไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโทรด



ค) แบบดูดไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโทรด

ภาพที่ 8 ระยะห่างของช่องว่างที่เกิดจากการกัดโลหะด้วยไฟฟ้า

จากผลการวิจัยนี้ทำให้สามารถสรุปได้ว่าการกัดไดอิเล็กทริกด้านข้างส่งผลให้ชิ้นงานมีความหนาแน่นขึ้นเนื่องจากการเกิดการสปาร์คซ้ำบนผนังของรูเจาะ อย่างไรก็ตามการสปาร์คซ้ำดังกล่าวส่งผลให้เกิดความคลาดเคลื่อนในการแปรรูปทางด้านขนาดและรูปทรงซึ่งผลจากการทดลองสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Murray *et al.*, 2012) ทั้งนี้ความแม่นยำในการแปรรูปเพิ่มขึ้นเมื่อใช้การปล่อยไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโทรดแต่ความหนาแน่นชิ้นงานจะเพิ่มมากขึ้น เนื่องจากการกำจัดอนุภาคเศษโลหะที่มีประสิทธิภาพทำให้การสปาร์คซ้ำในบริเวณด้านข้างหรือผนังของรูเจาะลดลง

การประยุกต์ใช้เทคนิคการหมุนอิเล็กโทรดร่วมกับการปล่อยไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโทรดช่วยลดเวลาในการเจาะรูชิ้นงานเนื่องจากการอนุภาคโลหะที่เกิดจากการกัดเซาะสามารถเคลื่อนตัวออกจากพื้นผิวการสปาร์คได้ง่ายขึ้น ดังสังเกตได้จากพื้นผิวอิเล็กโทรดที่เกิดจากการสปาร์คซ้ำและการโค้งเว้าของผนังรูเจาะลดลงเมื่อเทียบกับการปล่อยไดอิเล็กทริกแบบชนิดด้านข้างอิเล็กโทรด การลดลงของการสปาร์คซ้ำบนผนังด้านข้างรูเจาะส่งผล

ให้อัตราการกำจัดเนื้องานเพิ่มขึ้นเนื่องจากการสปาร์คโดยส่วนใหญ่เกิดขึ้นในพื้นที่การสปาร์คหลักในส่วนปลายของอิเล็กโทรด และความหนาแน่นของผนังรูเจาะมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นตามอัตราการกำจัดเนื้องาน การเจาะรูอิเล็กโทรดเพื่อกัดไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางทำให้อัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นเนื่องจากพื้นที่หน้าตัดของอิเล็กโทรดลดลง อย่างไรก็ตามอัตราการสึกหรอของอิเล็กโทรดที่ปล่อยไดอิเล็กทริกแบบดูดผ่านแกนกลางอิเล็กโทรดมีแนวโน้มลดลงเนื่องจากผงอนุภาคของเศษโลหะบริเวณโดยรอบถูกดูดเข้าหาแกนกลางของอิเล็กโทรดตลอดเวลาทำให้เกิดการสปาร์คผ่านอนุภาคเศษโลหะซึ่งช่วยลดความรุนแรงของการกัดเซาะบนพื้นผิวอิเล็กโทรดเป็นเหตุให้การสึกกร่อนลดลง

สรุป

การทดลองเพื่อศึกษาประสิทธิภาพการกัดโลหะด้วยไฟฟ้าโดยการประยุกต์ใช้เทคนิคการหมุนอิเล็กโทรดร่วมกับการปล่อยไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโทรดสรุปได้ดังนี้

1. การใช้เทคนิคการหมุนอิเล็กโทรดร่วมกับการฉีดไดอิเล็กทริกด้านข้างส่งผลให้เวลาที่ใช้ในการแปรรูปลดลงเมื่อเทียบกับการเจาะรูแบบทั่วไป อย่างไรก็ตามเวลาที่ใช้ในการเจาะจะเพิ่มสูงขึ้นตามความเร็วในการหมุนของอิเล็กโทรด

2. การปล่อยไดอิเล็กทริกแบบดูดผ่านแกนกลางอิเล็กโทรดสามารถเพิ่มประสิทธิภาพการทำงานโดยการลดเวลาที่ใช้ในการเจาะรูได้สูงสุด 62 เปอร์เซ็นต์ และมีอัตราการกำจัดเนื้องานเพิ่มขึ้นสูงถึง 154 ± 3 เปอร์เซ็นต์โดยไม่ขึ้นอยู่กับการเร็วของการหมุนของอิเล็กโทรด ในส่วนของการปล่อยไดอิเล็กทริกแบบฉีดผ่านแกนกลางอิเล็กโทรดสามารถลดเวลาในการเจาะรูได้สูงสุด 61 เปอร์เซ็นต์ และมีอัตราการกำจัดเนื้องานเพิ่มขึ้นสูงถึง 144 เปอร์เซ็นต์ ที่ระดับความเร็วการหมุนของอิเล็กโทรด 270 รอบต่อนาที เมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการกัดโลหะด้วยไฟฟ้าแบบทั่วไป

3. การสึกหรอของอิเล็กโทรดสำหรับทุกการทดลองมีค่าต่ำกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ และอัตราการสึกหรอของการปล่อยไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโทรดมีแนวโน้มลดลงเมื่อความเร็วในการหมุนของอิเล็กโทรดเพิ่มมากขึ้น

4. การปล่อยไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโทรดเป็นการเร่งกำจัดอนุภาคเศษโลหะออกจากพื้นที่การสปาร์คส่งผลให้เกิดความรุนแรงของการกัดเซาะที่ส่วนปลายอิเล็กโทรดเพิ่มมากขึ้นโดยที่การสปาร์คเข้าบนพื้นผนังรูเจาะลดลงส่งผลให้ประสิทธิภาพการทำงานในรูปแบบของความหยาบผิวเฉลี่ยไม่ถูกปรับปรุงโดยการปล่อยไดอิเล็กทริกผ่านแกนกลางอิเล็กโทรด อย่างไรก็ตามการลดลงของการสปาร์คส่งผลให้การโก่งของผนังรูเจาะลดลงและช่องว่างระหว่างผิวอิเล็กโทรดโดยเฉลี่ยลดลง

กิตติกรรมประกาศ

ผลงานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลกรุงเทพ และสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัย และนวัตกรรม (สกสว.)

เอกสารอ้างอิง

- Barenji, R.V., Pourasl, H.H. and Khojastehnezhad, V.M. 2016. Electrical discharge machining of the AISI D6 tool steel: Prediction and modeling of the material removal rate and tool wear ratio. **Precision Engineering** 45: 435-444.
- Choudhary, S.K. and Jadoun, R.S. 2014. Current advanced research development of electric discharge machining (EDM): a review. **International Journal of Research in Advent Technology** 2(3): 273-297.
- Dewangan, S., Gangopadhyay, S. and Biswas, C.K. 2015. Multi-response optimization of surface integrity characteristics of EDM process using grey-fuzzy logic-based hybrid approach. **Engineering Science and Technology, an International Journal** 18: 361-368.
- Jamkamon, K. and Janmanee, P. 2014. Deep hole of AISI P20 mold steel material by electrical discharge machining. **Applied Mechanics and Materials** 590: 244-248.
- Jaharah, A.G., Liang, C.G., Wahid, S.Z., Rahman, A. and Hassan, C.H. 2008. Performance of copper electrode in electrical discharge machining (EDM) of AISI H13 harden

- steel. **International Journal of Mechanical and Materials Engineering** 3(1): 25-29.
- Jeevamalar, J. and Ramabalan, S. 2015. Die sinking EDM process parameters: a review. **International Journal of Mechanical Engineering and Robotics Research** 4(1): 315-326.
- Kumar, R. and Singh, I. 2019. A modified electrode design for improving process performance of electric discharge drilling. **Journal of Materials Processing Technology** 264: 211-219.
- Makenzi, M.M. and Ikua, B.W. 2012. A review of flushing techniques used in electrical discharge machining, pp. 162-165. *In Proceedings of the 2012 Mechanical Engineering Conference on Sustainable Research and Innovation Conference.* Africa Institute for Capacity Development (AICAD), Juja, Kenya.
- Murray, J., Zdebski, D. and Clare, A.T. 2012. Workpiece debris deposition on tool electrodes and secondary discharge phenomena in micro-EDM. **Journal of Materials Processing Technology** 212(7): 1537-1547.
- Muthuramalingam, T. and Mohan, B. 2013. Influence of tool electrode properties on machinability in spark erosion machining. **Materials and manufacturing processes** 28(8): 939-943.
- Pavani, P.N.L., Rao, R.P. and Santa Rao, K. 2017. Performance assessment and mathematical modeling of process parameters in electrical discharge machining of EN-31 tool steel material using taguchi DOE. **Engineering Journal** 21(2): 227-236.
- Risto, M., Haas, R. and Munz, M. 2016. Optimization of the EDM drilling process to increase the productivity and geometrical accuracy. **Procedia CIRP** 42(1): 537-542.
- Sapkal, S.U. and Jagtap, P.S. 2018. Optimization of micro EDM drilling process parameters for titanium alloy by rotating electrode. **Procedia Manufacturing** 20: 119-126.
- Tanjilul, M., Ahmed, A., Kumar, A.S. and Rahman, M. 2018. A study on EDM debris particle size and flushing mechanism for efficient debris removal in EDM-drilling of Inconel 718. **Journal of Materials Processing Technology** 255: 263-274.
- Yilmaz, O. and Okka, M.A. 2010. Effect of single and multi-channel electrodes application on EDM fast hole drilling performance. **The International Journal of Advanced Manufacturing Technology** 51: 185-194.

การศึกษาเชิงเปรียบเทียบผลกระทบของปริมาณและชนิดเส้นใยปาล์มน้ำมันต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนและขี้เลื่อยไม้ยางพารา

A Comparative Study on the Effect of Oil Palm Fiber Contents and Types on Properties of Rubberwood Sawdust-Polypropylene Composites

วรรณพร ชีววุฒิปงศ์^{1,2*} ชาตรี หอมเขียว^{1,2} และ สุรสิทธิ์ ระวังวงศ์^{1,2}

Wattanaphon Cheewawuttipong^{1,2*}, Chatree Homkhiew^{1,2} and Surasit Rawangwong^{1,2}

Received: 15 May 2020, Revised: 2 August 2020, Accepted: 16 September 2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์ผลกระทบของปริมาณและชนิดเส้นใยปาล์มน้ำมันต่อสมบัติทางกลทางกายภาพ และทางความร้อนของวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนและขี้เลื่อยไม้ยางพารา ในการผลิตวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ดำเนินการโดยใช้เครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่เพื่อผสมส่วนผสมต่างๆ และขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่าง ผลจากการทดสอบพบว่า วัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยทะเลลายปาล์มน้ำมัน หรือเส้นใยลูกปาล์มน้ำมัน หรือเส้นใยทางปาล์มน้ำมัน มีสมบัติทางกลและทางกายภาพดีกว่าวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยขี้เลื่อยไม้ยางพารา ในขณะที่เดียวกันการเติมขี้เลื่อยไม้ยางพาราหรือเส้นใยปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสมในพอลิโพรพิลีน ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงลดลงอย่างชัดเจน แต่ทำให้ค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้น และพบด้วยว่า วัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยเส้นใยทะเลลายปาล์มน้ำมันมีความแข็งแรง การดูดซึมน้ำ และการเสถียรทางความร้อนมากกว่าวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยเส้นใยลูกปาล์มน้ำมัน หรือด้วยเส้นใยทางปาล์มน้ำมัน นอกจากนี้วัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนที่เสริมแรงด้วยขี้เลื่อยไม้ยางพาราและเส้นใยทางปาล์มน้ำมันปริมาณ 5-10 wt% มีสมบัติเด่นกว่าวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนและขี้เลื่อยไม้ยางพารา ในค่ามอดูลัสการดึง 42.64% การดูดซึมน้ำ 18.06% และการพองตัว 61.64%

คำสำคัญ: วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้, เส้นใยลูกปาล์มน้ำมัน, ทะลายปาล์มน้ำมัน, ทางใบปาล์มน้ำมัน

¹ สาขาวิศวกรรมอุตสาหกรรม คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ตำบลบ่อทราย อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000

¹ Department of Industrial Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Boyang, Muang, Songkhla 90000, Thailand.

² หน่วยวิจัยเทคโนโลยีการแปรรูปวัสดุ คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ตำบลบ่อทราย อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000

² Materials Processing Technology Research Unit, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Boyang, Muang, Songkhla 90000, Thailand.

* ผู้รับผิดชอบประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): watthanaphon.c@rmuts.ac.th

ABSTRACT

This research aimed to analyze the effect of oil palm fiber contents and types on mechanical, physical and thermal properties of composites from polypropylene and rubberwood sawdust. In manufacturing the composites, a twin-screw extruder was used to blend mixture components and to form composite samples. From results of the experiment, the polypropylene composites with oil palm fruit bunch fiber or oil palm mesocarp fiber or oil palm fond fiber exhibited lower mechanical and physical properties than the composites with rubberwood sawdust. Likewise, the addition of rubberwood sawdust or oil palm fibers into polypropylene matrix clearly decreased the strength but increased the modulus. The polypropylene composites reinforced with oil palm fruit bunch fiber gave higher strength, water absorption and thermal stability than that of the composites reinforced with oil palm mesocarp fiber or oil palm fond fiber. Furthermore, the polypropylene composites reinforced with rubberwood sawdust and oil palm fond fiber 5-10 wt% gave better tensile modulus 42.64%, water absorption 18.06% and thickness swelling 61.64% than rubberwood sawdust-polypropylene composites.

Key words: wood-plastic composites, oil palm mesocarp fiber, oil palm fruit bunch, oil palm fond

บทนำ

วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ (Wood-Plastic Composites; WPCs) เป็นวัสดุที่มีแนวโน้มของการประยุกต์ใช้งานเพิ่มมากขึ้นอย่างต่อเนื่อง เพื่อทดแทนไม้สำหรับการก่อสร้างหรือผลิตภัณฑ์ที่ผลิตมาจากไม้ เนื่องจากเป็นวัสดุที่เป็นมิตรต่อสิ่งแวดล้อมหรือวัสดุก่อสร้างสีเขียว (Green building materials) และสามารถใช้เป็นวัสดุตกแต่งภายนอกอาคารได้ดี เพราะดูดซับน้ำน้อย ความเสถียรทางด้านรูปร่างสูง ความทนทานและต้านทานเชื้อราสูง ต้นทุนการบำรุงรักษาต่ำ และที่สำคัญสามารถนำวัสดุเหลือใช้ เช่นเดียวกับวัสดุประเภทเทอร์โมพลาสติกทั่วไป (Clemons, 2002; Hatch, 2008; Slaughter, 2004) จากข้อมูลเหล่านี้สามารถกล่าวได้ว่า วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้จะเข้ามามีบทบาทและมีการประยุกต์ใช้งานทดแทนไม้จากธรรมชาติในอนาคต (Homkhiew, 2014)

ในการผลิตวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้จะประกอบด้วยวัสดุหลัก 2 ชนิดคือ พลาสติกและไม้ ซึ่งไม้ที่นิยมใช้มีศักยภาพด้านปริมาณของประเทศไทยคือ ไม้ยางพารา เนื่องจากเมื่อต้นยางพาราให้ผลผลิตที่ไม่คุ้มค่าต่อการปลูกหรือมีอายุประมาณ 25 ปี ต้นยางพาราเหล่านี้จะถูกตัด (Rimdisut *et al.*, 2011) และจากการตัดจะเกิดของเสียในรูปของขี้เลื่อย ผงไม้ และเศษไม้ประมาณ 34% (Prasertsan and Vanapruk, 1998; Petchpradab *et al.*, 2009) ซึ่งถือว่าเป็นสัดส่วนที่สูงมาก (Homkhiew and Ratanawilai, 2014) นอกจากนี้เส้นใยจากอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันนับเป็นวัสดุธรรมชาติอีกประเภทหนึ่งที่มีศักยภาพเพียงพอสำหรับการนำมาใช้เป็นส่วนผสมในวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ เพราะจากข้อมูลสำนักงานเศรษฐกิจการเกษตรมีการรายงานว่า ในปี พ.ศ. 2561 ประเทศไทยมีพื้นที่ปลูกปาล์มน้ำมันประมาณ 5.87 ล้านไร่ และมีเนื้อที่ให้ผลผลิตประมาณ 5.35 ล้านไร่ ได้ผลผลิตปาล์มทะลายสด

15.53 ล้านตัน และมีผลผลิตเฉลี่ย 2.9 ตัน/ไร่ ซึ่งจากอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันทำให้เกิดเส้นใยธรรมชาติเป็นจำนวนมาก เช่น เส้นใยทะลายปาล์มน้ำมัน เส้นใยลูกปาล์มน้ำมัน และเส้นใยทางใบปาล์มน้ำมัน เป็นต้น ดังนั้นจากข้อมูลเหล่านี้การนำเส้นใยธรรมชาติที่เกิดขึ้นในอุตสาหกรรมปาล์มน้ำมันมาเป็นวัสดุเสริมแรงให้แก่วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้จึงมีความเป็นไปได้และมีความเหมาะสม เนื่องจากเป็นวัสดุเหลือใช้ที่เกิดขึ้นเป็นจำนวนมากในประเทศไทย และมีมากเพียงพอต่อการนำมาใช้เป็นส่วนผสมในวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้เชิงพาณิชย์

เมื่อทบทวนงานวิจัยในอดีตพบว่า มีการนำเส้นใยปาล์มน้ำมันผสมกับพลาสติกเพื่อพัฒนาเป็นวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้จำนวนมาก ยกตัวอย่าง Ratanawilai *et al.* (2014) วิเคราะห์ผลกระทบชนิดผงไม้วางผงไม้ยางพารากับผงที่ได้จากเส้นใยลูกปาล์มน้ำมันต่อสมบัติของวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนรีไซเคิล ซึ่งพบว่า วัสดุเชิงประกอบที่ผสมผงไม้ยางพารามีสมบัติการดูด การดึง การอัด และความแข็งแรงสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบที่ผสมผงเส้นใยลูกปาล์มน้ำมัน ขณะเดียวกัน Essabir *et al.* (2016) ผลิตวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนความหนาแน่นสูงที่เสริมแรงด้วยเส้นใยปาล์มน้ำมันและเคลย์ (Clay) และพบว่า วัสดุเชิงประกอบพลาสติกที่เสริมแรงด้วยเส้นใยปาล์มน้ำมัน 12.5 wt% และเคลย์ 12.5 wt% มีสมบัติการดึงดีที่สุด ขณะที่ Olusunmade *et al.* (2016) พัฒนาวัสดุเชิงประกอบพอลิเอทิลีนความหนาแน่นต่ำเชิงเส้นและเส้นใยลูกปาล์มน้ำมัน โดยแสดงให้เห็นว่าค่าความแข็งแรงดึงลดลงอย่างช้าๆ ตามปริมาณเส้นใยที่เดิมเป็นส่วนผสม

แต่เมื่อคุณลักษณะการดึงกลับมีค่าเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยลูกปาล์มน้ำมัน นอกจากนี้ Adam and Asik (2019) นำเส้นใยทะลายปาล์มน้ำมันเสริมแรงในวัสดุเชิงประกอบพอลิเอสเตอร์ และเปิดเผยว่า การดูดซับน้ำของวัสดุเชิงประกอบฯ เพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยทะลายปาล์มน้ำมันและระยะเวลาการแช่น้ำ ซึ่งจากข้อมูลเหล่านี้จะเห็นได้ว่า มีการนำเส้นใยปาล์มน้ำมันมาผสมกับพลาสติกหลายชนิดเป็นวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ แต่ยังไม่พบการนำเส้นใยทะลายปาล์มน้ำมัน เส้นใยลูกปาล์มน้ำมัน หรือเส้นใยทางใบปาล์มน้ำมันผสมในวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนและจีลีโอไม้อย่างพาราที่งานวิจัยนี้สนใจจะศึกษา

อย่างไรก็ตามก่อนการนำเส้นใยปาล์มน้ำมันเหล่านี้ไปใช้เป็นส่วนผสมในวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและจีลีโอไม้อย่างพารา มีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องศึกษาวิจัยเพื่อทราบผลกระทบของปริมาณและชนิดเส้นใยปาล์มน้ำมันต่อสมบัติทางกล ทางกายภาพ และทางความร้อนของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและจีลีโอไม้อย่างพารา เนื่องจากเส้นใยธรรมชาติแต่ละชนิดมีความแข็งแรง โครงสร้างภายใน และองค์ประกอบทางเคมีที่แตกต่างกัน ดังแสดงในตารางที่ 1 ดังนั้นผลจากงานวิจัยนี้จะเป็นประโยชน์อย่างมากต่ออุตสาหกรรมผลิตไม้เทียมจากวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ และอุตสาหกรรมที่นำวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ไปประยุกต์ใช้งาน ดังเช่นอุตสาหกรรมผลิตชิ้นส่วนยานยนต์ เนื่องจากวัสดุชนิดนี้มีน้ำหนักเบากว่าพลาสติก ทำให้ลดการสิ้นเปลืองเชื้อเพลิงและลดต้นทุนการผลิต (Ashori, 2008)

ตารางที่ 1 องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยปาล์มน้ำมัน

ชนิดเส้นใย	องค์ประกอบทางเคมี (%)				มอดุลัสการดึง (MPa)
	เซลลูโลส	เฮมิเซลลูโลส	ลิกนิน	เถ้า	
เส้นใยทะลายปาล์มน้ำมัน	44.2 ¹	33.5 ¹	20.4 ¹	3.5 ¹	1703 ⁵
เส้นใยลูกปาล์มน้ำมัน	42.8 ²	33.1 ²	20.5 ²	3.6 ²	500 ⁶
เส้นใยทางใบปาล์มน้ำมัน	49.8 ³	33.7 ³	20.5 ³	2.4 ³	-
ไม้ยางพารา	39.0 ⁴	29.0 ⁴	28.0 ⁴	4.0 ⁴	2252 ⁷

¹Khalid *et al.*, 2008; ²Nordin *et al.*, 2013; ³Abdul Khalil *et al.* 2006; ⁴Petchpradab *et al.*, 2009; ⁵Yusoff *et al.*, 2009; ⁶Sreekala *et al.* 1997; ⁷Devi and Maji, 2002

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้สามารถแบ่งวิธีการดำเนินการวิจัยได้เป็น 3 ส่วนหลัก คือ วัสดุที่ใช้ในการวิจัย การขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่าง และการวิเคราะห์และการทดสอบสมบัติ โดยมีรายละเอียดดังต่อไปนี้

1. วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย พลาสติกพอลิโพรพิลีน เกรด 1100NK ผลิตโดยบริษัท ไออาร์พีซี จำกัด (มหาชน) และวัสดุเสริมแรง

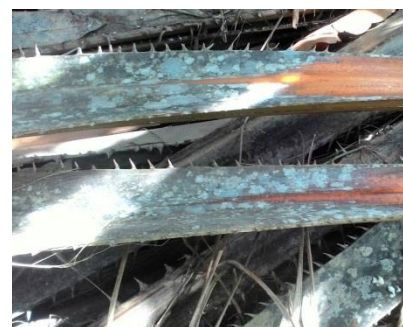
คือ 1) จี๊เลื่อยไม้ยางพารา ได้รับจากโรงงานแปรรูปเฟอร์นิเจอร์ไม้ยางพาราในจังหวัดสงขลา 2) เส้นใยทะลายปาล์มน้ำมัน ดังภาพที่ 1(ก) จัดหามาจากพื้นที่ใน อ.เชียรใหญ่ จ.นครศรีธรรมราช 3) เส้นใยลูกปาล์มน้ำมัน ดังภาพที่ 1(ข) จัดหามาจากพื้นที่ใน อ.เชียรใหญ่ จ.นครศรีธรรมราช และ 4) ทางใบปาล์มน้ำมัน ดังภาพที่ 1(ค) จัดหามาจากพื้นที่ใน อ.หัวไทร จ.นครศรีธรรมราช



(ก)



(ข)



(ค)

ภาพที่ 1 ลักษณะ (ก) เส้นใยทะลายปาล์มน้ำมัน (ข) เส้นใยลูกปาล์มน้ำมัน และ (ค) ทางใบปาล์มน้ำมัน

2. การขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่าง

ก่อนการขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่าง ดำเนินการเตรียมจี๊เลื่อยไม้ยางพาราและเส้นใยจากปาล์มน้ำมัน โดยการนำจี๊เลื่อยไม้ยางพารามาคัดแยกขนาดโดยใช้เครื่องร่อน และร่อนให้จี๊เลื่อยผ่านตะแกรงขนาด 40

เมช ในขณะที่เดียวกันนำเส้นใยทะลายปาล์มน้ำมัน เส้นใยลูกปาล์มน้ำมัน และเส้นใยทางปาล์มน้ำมันมาทำการลดขนาดให้มีความยาวไม่เกิน 1 เซนติเมตร โดยใช้เครื่องบดแบบค้อน (Hammer mill) จากนั้นนำจี๊เลื่อยไม้ยางพาราและเส้นใยปาล์มน้ำมันทั้ง 3 ชนิด

ไปอบเพื่อลดความชื้นที่อุณหภูมิ 110 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

ในการขึ้นรูปชิ้นงานตัวอย่างเริ่มจากการนำเม็ดพลาสติกพอลิโพรพิลีนผสมกับขี้เลื่อยไม้ยางพาราและเส้นใยปาล์มน้ำมันเบื้องต้นตามสูตรที่กำหนดดังแสดงในตารางที่ 2 โดยการเขย่าให้เกิดการกระจายตัวประมาณ 5 นาที จากนั้นนำวัสดุที่ได้จากการผสมเบื้องต้นไปผสมและขึ้นรูปเป็นวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้โดยใช้เครื่องอัดรีดแบบ

เกลียวคู่ (รุ่น CTE-D25L40 บริษัท เจริญทัศน์ จำกัด สมุทรปราการ ประเทศไทย) ที่มีการควบคุมอุณหภูมิอยู่ในช่วง 165-195 องศาเซลเซียส และความเร็วหมุนของเกลียว คือ 60 รอบต่อนาที เมื่อวัสดุถูกอัดรีดผ่านเครื่องอัดรีดแบบเกลียวคู่จะได้ชิ้นงานตัวอย่างที่มีลักษณะเป็นแท่งหน้าตัดสี่เหลี่ยมผืนผ้า เพื่อนำไปเตรียมเป็นชิ้นงานทดสอบตามมาตรฐานการทดสอบต่างๆ ต่อไป

ตารางที่ 2 สูตรส่วนผสมของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ (เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก; wt%)

Sample code	PP (wt%)	RWF (wt%)	OPBF (wt%)	OPMF (wt%)	OPFF (wt%)
P100	100				
P60R40	60	40			
P60B40	60		40		
P60M40	60			40	
P60F40	60				40
P60R35B5	60	35	5		
P60R30B10	60	30	10		
P60R25B15	60	25	15		
P60R20B20	60	20	20		
P60R35M5	60	35		5	
P60R30M10	60	30		10	
P60R25M15	60	25		15	
P60R20M20	60	20		20	
P60R35F5	60	35			5
P60R30F10	60	30			10
P60R25F15	60	25			15
P60R20F20	60	20			20

หมายเหตุ PP คือ พอลิโพรพิลีน RWF คือ ขี้เลื่อยไม้ยางพารา OPBF คือ เส้นใยทะลายปาล์มน้ำมัน OPMF คือ เส้นใยลูกปาล์มน้ำมัน OPFF คือ เส้นใยทางปาล์มน้ำมัน และ wt% คือ เปอร์เซ็นต์โดยน้ำหนัก

3. การวิเคราะห์และการทดสอบสมบัติ

1) การวิเคราะห์โครงสร้างพื้นฐานวิทยา

ในการวิเคราะห์โครงสร้างพื้นฐานวิทยาดำเนินการโดยการส่องด้วยกล้องจุลทรรศน์

อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (Scanning Electron Microscopy; SEM, รุ่น Quanta 400, FEI company, Oregon, USA) เพื่อวิเคราะห์รูพรุนภายในโครงสร้างและการยึดเกาะระหว่างวัสดุเสริมแรงกับเมทริกซ์

พลาสติกของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ อย่างไรก็ตาม ก่อนการส่องด้วย SEM ชิ้นงานทั้งหมดต้องเคลือบด้วยทองคำบริเวณผิวหน้าที่แตกหัก

2) การทดสอบสมบัติทางกล

การทดสอบการดัด (Flexural test) การทดสอบการดึง (Tensile test) และการทดสอบความแข็ง (Hardness test) เป็นการทดสอบที่ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D790-92, ASTM D638-99 และ ASTM D2240-91 ตามลำดับ ในการทดสอบการดัดเป็นการดัดแบบ 3 จุด ซึ่งชิ้นงานทดสอบมีขนาด $4.8 \times 13 \times 100$ มิลลิเมตร³ บารองรับชิ้นงาน (Span distance) มีระยะห่าง 80 มิลลิเมตร และความเร็วที่ใช้ในการดัด คือ 2 มิลลิเมตรต่อนาที โดยใช้เครื่องทดสอบสมบัติทางกลอเนกประสงค์ (รุ่น NRI-TS500-50 บริษัท นรินทร์ อินสตรูเมนต์ จำกัด สมุทรปราการ ประเทศไทย) สำหรับการทดสอบการดึง ใช้ชิ้นงานทดสอบประเภทที่ 4 โดยชิ้นงานทดสอบมีขนาด $115 \times 19 \times 4$ มิลลิเมตร³ และความเร็วที่ใช้ดึง คือ 5 มิลลิเมตรต่อนาที โดยใช้เครื่องทดสอบสมบัติทางกลอเนกประสงค์เช่นเดียวกัน นอกจากนี้ในการทดสอบความแข็ง ชิ้นงานทดสอบมีขนาด $30 \times 30 \times 6$ มิลลิเมตร³ และวัดความแข็งด้วย Durometer แบบ Shore D scale (รุ่น GS-702G บริษัท Teclock corporation จำกัด Nagano, Japan) ในการทดสอบสมบัติทางกลทั้ง 3 ประเภท ดำเนินการที่อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส และทดลองแบบสุ่ม 5 ตัวอย่าง ของแต่ละสูตรการทดลอง

3) การทดสอบสมบัติทางกายภาพ

การทดสอบการดูดซับน้ำและการพองตัวเพื่อหาเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำและเปอร์เซ็นต์การพองตัว ดำเนินการตามมาตรฐาน ASTM D570-88 โดยชิ้นงานทดสอบมีขนาด $10 \times 20 \times 6$ มิลลิเมตร³ อย่างไรก็ตามก่อนการทดสอบ นำชิ้นงานทดสอบไปอบที่อุณหภูมิ 50 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง

จากนั้นนำชิ้นงานทดสอบไปชั่งน้ำหนักด้วยเครื่องชั่งดิจิทัลที่มีความละเอียด 0.001 กรัม และวัดขนาดความหนาด้วยเวอร์เนียร์ดิจิทัลที่มีความละเอียด 0.01 มิลลิเมตร หลังจากนั้นนำชิ้นงานทดสอบไปแช่ในน้ำที่อุณหภูมิห้อง 25 องศาเซลเซียส เป็นระยะเวลา 24 ชั่วโมง เมื่อครบเวลาที่กำหนด นำชิ้นงานทดสอบชั่งน้ำหนักและวัดขนาดความหนาอีกครั้ง เพื่อนำข้อมูลที่ได้ไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำและเปอร์เซ็นต์การพองตัว

4) การทดสอบสมบัติทางความร้อน

การทดสอบสมบัติทางความร้อนเป็นการทดสอบการสูญเสียน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อน (Thermogravimetric Analysis; TGA) ซึ่งในการทดสอบ TGA กระทำด้วยเครื่อง Perkin Elmer (TGA-7, USA) โดยใช้ปริมาณตัวอย่างประมาณ 5-8 มิลลิกรัม และให้ความร้อนที่อัตราคงที่ คือ 10 องศาเซลเซียสต่อนาที จากอุณหภูมิ 40 ถึง 700 องศาเซลเซียส

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

ในการออกแบบการทดลองมีตัวแปรอิสระคือ ปริมาณและชนิดเส้นใยธรรมชาติ ซึ่งสามารถออกแบบสูตรที่ใช้ในการทดลองได้ 17 สูตร และค่าผลตอบแทนที่ได้จากการทดสอบคือ โครงสร้างพื้นฐานวิทยา ความแข็งแรงดัด โมดูลัสการดัด ความแข็งแรงดึง โมดูลัสการดึง ความแข็ง เปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ เปอร์เซ็นต์การพองตัว และการสูญเสียน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อน

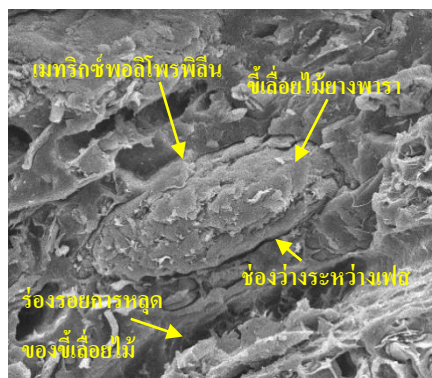
1. ผลกระทบของปริมาณและชนิดเส้นใยปาล์มน้ำมันต่อโครงสร้างพื้นฐานวิทยา

โครงสร้างพื้นฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนและเส้นใยธรรมชาติ แสดงดังภาพที่ 2 โดยแสดงให้เห็นว่า การเติมเส้นใยธรรมชาติคือ ขี้เลื่อยไม้ยางพารา (ภาพที่ 2(ก)) หรือ

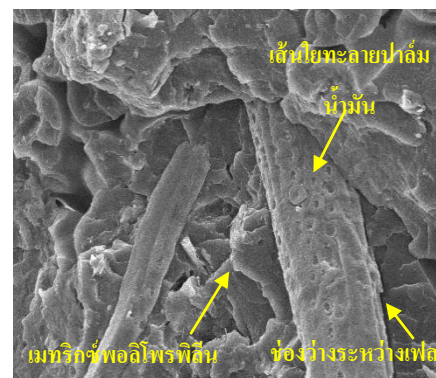
เส้นใยทะเลสาปาล์มน้ำมัน (ภาพที่ 2(ข)) หรือเส้นใยลูกปาล์มน้ำมัน (ภาพที่ 2(ค)) หรือเส้นใยทางปาล์มน้ำมัน (ภาพที่ 2(ง)) ปริมาณ 40 wt% ส่งผลให้โครงสร้างภายในของวัสดุเชิงประกอบมีรูพรุนและช่องว่างเกิดขึ้นจำนวนมาก ซึ่งจะเห็นได้ว่าการยึดเกาะระหว่างเมทริกซ์พลาสติกและเส้นใยธรรมชาติค่อนข้างอ่อนแอ สังเกตได้จากร่องรอยการหลุดของเส้นใยจากเมทริกซ์พลาสติก ขณะเดียวกันจะเห็นได้ว่า มีช่องว่างเกิดขึ้นเป็นแนวยาวตามความยาวของซีลี้อยไม้และเส้นใยธรรมชาติ และการเกิดรูพรุนและช่องว่างภายในโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยเส้นใยปาล์มน้ำมันมีมากกว่าวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยซีลี้อยไม้ยางพารา

ภาพที่ 3 แสดงโครงสร้างพื้นฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนและซีลี้อยไม้

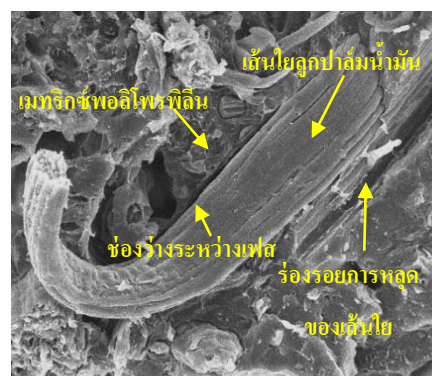
ยางพารากับเส้นใยปาล์มน้ำมัน ซึ่งพบว่า เมื่อเติมเส้นใยปาล์มน้ำมันปริมาณ 15 wt% เป็นส่วนผสมในวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนและซีลี้อยไม้ยางพารา ส่งผลให้โครงสร้างพื้นฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบมีรูพรุนเพิ่มขึ้น เมื่อเปรียบเทียบกับโครงสร้างพื้นฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและซีลี้อยไม้ในภาพที่ 2(ก) เนื่องจากเมทริกซ์พลาสติกจะไหลตัวได้ยากขึ้น เพราะจะถูกขัดขวางการไหลทั้งจากอนุภาคของซีลี้อยไม้และเส้นใยยาวจากปาล์มน้ำมัน นอกจากนี้จะเห็นได้ว่า เส้นใยปาล์มน้ำมันจะกระจายห่างๆ อยู่ภายในโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบ ซึ่งมีลักษณะเป็นเส้นใยยาว ในขณะที่ซีลี้อยไม้มีลักษณะเป็นก้อนอนุภาคกระจายอยู่ทั่วทั้งโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบ



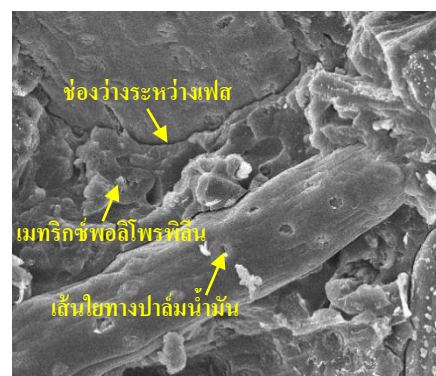
(ก)



(ข)



(ค)



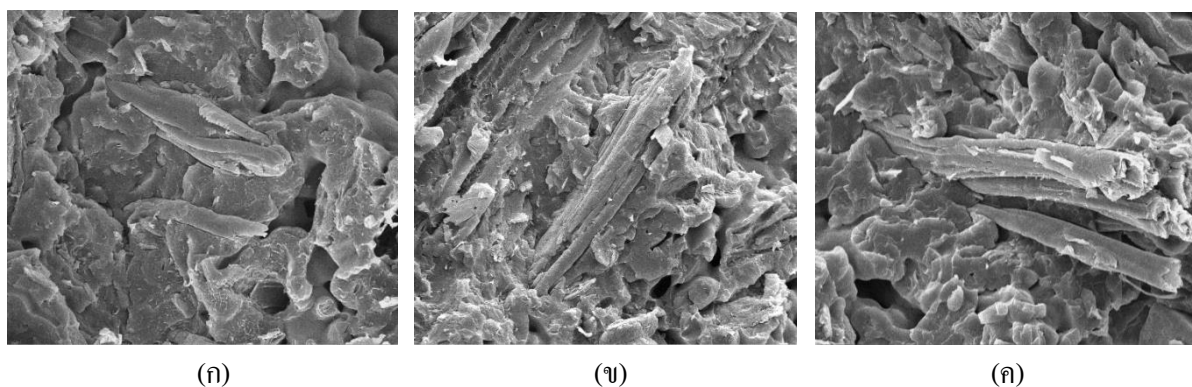
(ง)

ภาพที่ 2 โครงสร้างพื้นฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนและเส้นใยธรรมชาติในสูตร (ก) P60R40 (ข) P60B40 (ค) P60M40 และ (ง) P60F40 ที่กำลังขยาย 500 เท่า

2. ผลกระทบของปริมาณและชนิดเส้นใยปาล์มน้ำมันต่อสมบัติการตัด

ผลกระทบของปริมาณและชนิดเส้นใยปาล์มน้ำมันต่อค่าความแข็งแรงดัดและค่ามอดูลัสการดัดของวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนและจี้เลื่อยไม้ยางพารา แสดงในภาพที่ 4(ก) และ 4(ข) ตามลำดับ ซึ่งชี้ให้เห็นว่า การเติมจี้เลื่อยไม้ยางพาราหรือเส้นใยปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสมในพลาสติกพอลิโพรพิลีนส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดัดลดลงอย่างชัดเจน เนื่องจากการกระจายตัวและการยึดเกาะที่ไม่ดีของเส้นใยธรรมชาติในเมทริกซ์พลาสติก (Ratanawilai *et*

al., 2012) แต่สำหรับค่ามอดูลัสการดัดพบว่า การเติมจี้เลื่อยไม้ยางพาราหรือเส้นใยปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสมในพลาสติกพอลิโพรพิลีนกลับส่งผลให้ค่ามอดูลัสการดัดเพิ่มขึ้น เพราะในวัสดุเชิงประกอบมีเส้นใยธรรมชาติที่แข็งแกร่งสูงและเมทริกซ์พลาสติกที่แข็งแกร่งต่ำ ทำให้การเติมจี้เลื่อยไม้เป็นส่วนผสมมากขึ้นส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบฯ มีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น (Homkhiew *et al.*, 2018a) ขณะเดียวกัน Jamil *et al.* (2006) กล่าวว่า การเพิ่มขึ้นของค่ามอดูลัสมีสาเหตุมาจากการลดลงของความยืดหยุ่นของเมทริกซ์พลาสติก



ภาพที่ 3 โครงสร้างพื้นฐานวิทยาของวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนและเส้นใยธรรมชาติในสูตร (ก) P60R25B15 (ข) P60R25M15 และ (ค) P60R25F15 ที่กำลังขยาย 500 เท่า

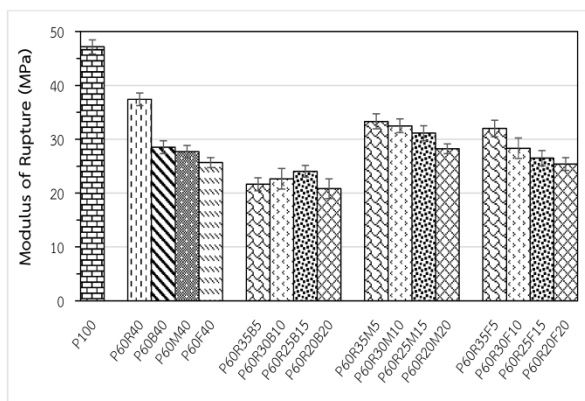
นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์ผลกระทบของชนิดเส้นใยปาล์มน้ำมันพบว่า วัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีน และเส้นใยทะเลสาปาล์มน้ำมัน (P60B40) มีค่าความแข็งแรงดัดมากกว่าวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยเส้นใยลูกปาล์มน้ำมัน (P60M40) หรือที่เสริมแรงด้วยเส้นใยทางปาล์มน้ำมัน (P60F40) อย่างไรก็ตามกลับพบว่าวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยเส้นใยทางปาล์มน้ำมันมีค่ามอดูลัสการดัดสูงที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับเสริมแรงด้วยเส้นใยปาล์มน้ำมันชนิดอื่น เช่นเดียวกันพบว่า วัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนและเส้นใยปาล์มน้ำมัน ได้แก่ เส้นใยทะเลสาปาล์มน้ำมัน เส้นใยลูกปาล์มน้ำมัน และ

เส้นใยทางปาล์มน้ำมัน มีค่าความแข็งแรงดัดและค่ามอดูลัสการดัดต่ำกว่าวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนและจี้เลื่อยไม้ยางพารา สิ่งนี้สามารถอธิบายได้จากโครงสร้างพื้นฐานวิทยา ซึ่งสังเกตเห็นได้ว่า การเกิดรูพรุนและช่องว่างภายในโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยเส้นใยปาล์มน้ำมันมีมากกว่าวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยจี้เลื่อยไม้ยางพารา ทำให้การถ่ายทอดแรงภายในโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนและจี้เลื่อยไม้ยางพารามีประสิทธิภาพมากกว่า ขณะเดียวกัน เนื่องจากไม้ยางพารามีองค์ประกอบทางเคมีคือ ลิกนิน (Lignin) ในปริมาณที่มากกว่าเส้นใยปาล์มน้ำมัน ดังแสดงใน

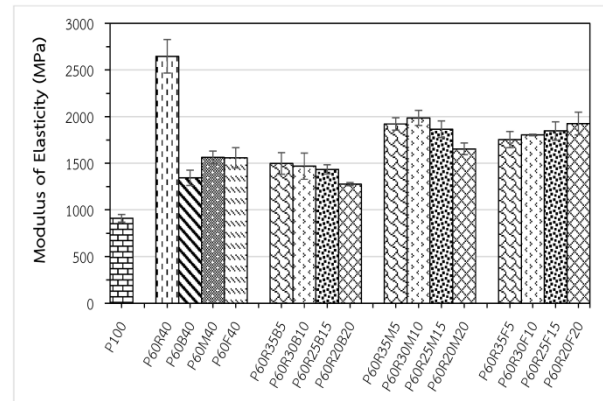
ตารางที่ 1 ซึ่งหมู่ไฮดรอกซิล (OH group) ของลิกนิน คือ ตัวประสานกับไฮโดรเจนอะตอม ณ ตำแหน่งแอลฟารามเทริกซ์พลาสติก (Ge *et al.*, 2004; Homkhiew, 2014) ซึ่งเส้นใยที่อุดมด้วยลิกนินจะมีความเข้ากันได้กับเมทริกซ์พลาสติกมากขึ้น (Nygård *et al.*, 2008; Homkhiew *et al.*, 2019)

เมื่อวิเคราะห์ผลกระทบปริมาณการเติมเส้นใยปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสมในวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนและจีลีโอไมยางพาราพบว่า การเติมเส้นใยทะเลปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสมเพิ่มขึ้นในช่วง 5-15 wt% ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดัดเพิ่มขึ้น แต่ค่ามอดูลัสการดัดลดลงตามปริมาณเส้นใยทะเลปาล์มน้ำมันที่เติมเป็นส่วนผสม อย่างไรก็ตามเมื่อเติมเส้น

ใยทะเลปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสม 20 wt% ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดัดลดลง เมื่อพิจารณาผลกระทบของเส้นใยลูกปาล์มน้ำมันพบว่า การเติมเส้นใยลูกปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสมเพิ่มขึ้นในช่วง 5-20 wt% ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดัดลดลงตามปริมาณเส้นใยลูกปาล์มน้ำมันที่เติมเป็นส่วนผสม ในขณะที่ค่ามอดูลัสการดัดพบว่า การเติมเส้นใยลูกปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสม 10 wt% ให้ค่ามอดูลัสการดัดสูงที่สุด นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์ผลกระทบของเส้นใยทางปาล์มน้ำมันพบว่า การเติมเส้นใยทางปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสมเพิ่มขึ้นในช่วง 5-20 wt% ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดัดลดลง แต่ค่ามอดูลัสการดัดเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยทางปาล์มน้ำมันที่เติมเป็นส่วนผสม



(ก)



(ข)

ภาพที่ 4 ผลกระทบของปริมาณและชนิดเส้นใยปาล์มน้ำมันต่อ (ก) ค่าความแข็งแรงดัด และ (ข) ค่ามอดูลัสการดัดของวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนและจีลีโอไมยางพารา

3. ผลกระทบของปริมาณและชนิดเส้นใยปาล์มน้ำมันต่อสมบัติการดึง

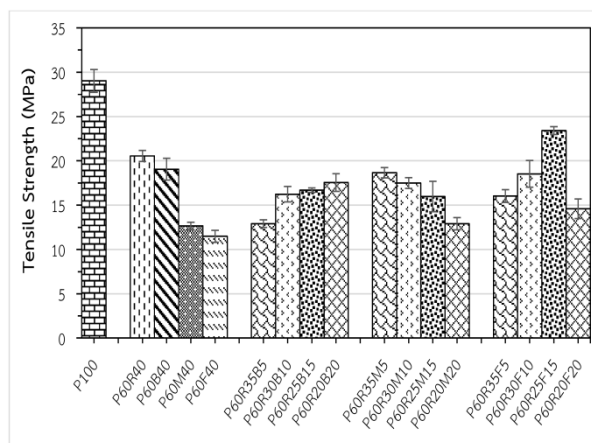
ภาพที่ 5(ก) และ 5(ข) แสดงผลกระทบของปริมาณและชนิดเส้นใยปาล์มน้ำมันต่อค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดูลัสการดึง ตามลำดับ ของวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีน ซึ่งแสดงให้เห็นว่า การเติมจีลีโอไมยางพาราหรือเส้นใยปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสมในพลาสติกพอลิโพรพิลีน ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงลดลงอย่างชัดเจน แต่กลับส่งผลให้

ค่ามอดูลัสการดึงเพิ่มขึ้น โดย Väisänen *et al.* (2016) กล่าวว่า เส้นใยธรรมชาติมีค่ามอดูลัสสูงกว่าพลาสติกหลายเท่า ดังนั้นการเติมเส้นใยธรรมชาติในพลาสติกจะทำให้วัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม่มีค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้น (Homkhiew *et al.*, 2018b) เช่นเดียวกันเมื่อพิจารณาผลกระทบของชนิดเส้นใยปาล์มน้ำมันพบว่า วัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนและเส้นใยทะเลปาล์มน้ำมันมีค่าความแข็งแรงดึงสูงที่สุด รองลงมาคือ วัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนและเส้นใยลูก

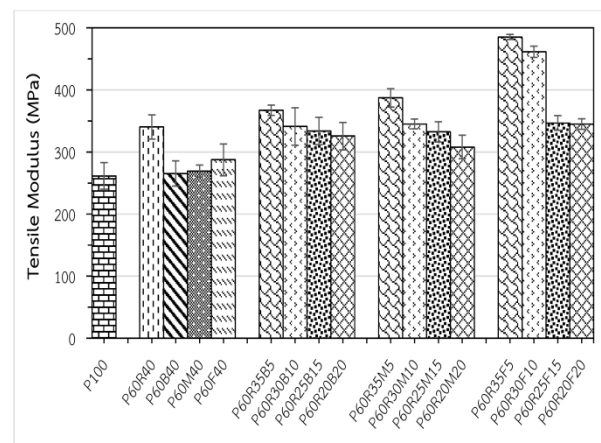
ปาล์มน้ำมัน และวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยทางปาล์มน้ำมันมีค่าความแข็งแรงดึงต่ำที่สุด ในทางกลับกันวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนและเส้นใยทางปาล์มน้ำมันมีค่ามอดูลัสการดึงสูงที่สุด และวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนและเส้นใยทะเลลายปาล์มน้ำมันมีค่ามอดูลัสการดึงน้อยที่สุด นอกจากนี้ยังพบว่าวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนและเส้นใยปาล์มน้ำมันมีค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดูลัสการดึงน้อยกว่าวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนที่เสริมแรงด้วยขี้เลื่อยไม้ยางพารา สิ่งนี้เกิดจากวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนกับเส้นใยปาล์มน้ำมันมีรูพรุนและขนาดช่องว่างในโครงสร้างใหญ่กว่า อีกทั้งเส้นใยปาล์มน้ำมันมีความแข็งแรงน้อยกว่าไม้ยางพารา ดังแสดงข้อมูลในตารางที่ 1 ทำให้มีค่ามอดูลัสต่ำกว่า

เมื่อวิเคราะห์ผลกระทบปริมาณการเติมเส้นใยปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสมในวัสดุเชิงประกอบพอลิ

โพรพิลีนและขี้เลื่อยไม้ยางพาราพบว่า การเติมเส้นใยทะเลลายปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสมเพิ่มขึ้นในช่วง 5-20 wt% ส่งผลให้ค่ามอดูลัสการดึงลดลงตามปริมาณเส้นใยทะเลลายปาล์มน้ำมันที่เติมเป็นส่วนผสม แต่ว่าการเติมเส้นใยทะเลลายปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสมเพิ่มขึ้นในวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนและขี้เลื่อยไม้ยางพาราในช่วงปริมาณ 5-20 wt% ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยที่เติมเป็นส่วนผสม อย่างไรก็ตามการเติมเส้นใยลูกปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสมเพิ่มขึ้นในช่วง 5-20 wt% กลับส่งผลให้ค่าความแข็งแรงดึงและค่ามอดูลัสการดึงลดลงตามปริมาณเส้นใยที่เติมเป็นส่วนผสมเพิ่มขึ้น นอกจากนี้พบว่า การเติมเส้นใยทางปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสม 15 wt% ในวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนและขี้เลื่อยไม้ยางพาราให้ค่าความแข็งแรงดึงสูงที่สุด



(ก)



(ข)

ภาพที่ 5 ผลกระทบของปริมาณและชนิดเส้นใยปาล์มน้ำมันต่อ (ก) ค่าความแข็งแรงดึง และ (ข) ค่ามอดูลัสการดึงของวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนและขี้เลื่อยไม้ยางพารา

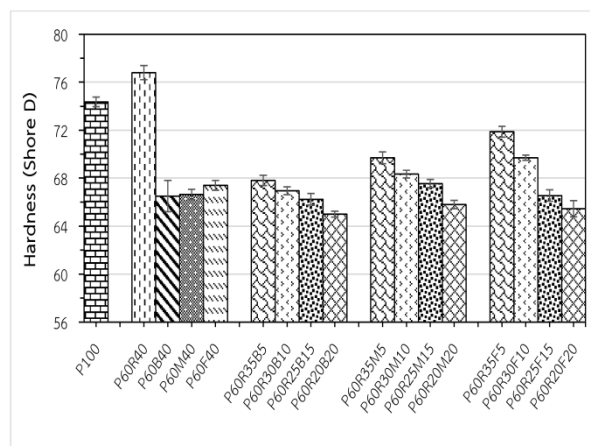
4. ผลกระทบของปริมาณและชนิดเส้นใยปาล์มน้ำมันต่อสมบัติความแข็งแรง

ผลกระทบของปริมาณและชนิดเส้นใยปาล์มน้ำมันต่อค่าความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบพอลิ

โพรพิลีนและขี้เลื่อยไม้ยางพารา แสดงดังภาพที่ 6 โดยชี้ให้เห็นว่า การเติมขี้เลื่อยไม้ยางพาราเป็นส่วนผสมในพลาสติกพอลิโพรพิลีน (P60R40) ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงของวัสดุเชิงประกอบฯ เพิ่มขึ้นอย่าง

ชัดเจน เมื่อเปรียบเทียบกับพลาสติก 100% แต่การเติมเส้นใยปาล์มน้ำมันทั้ง 3 ชนิด กลับส่งผลให้ค่าความแข็งของวัสดุเชิงประกอบฯ ลดลง เนื่องจากจีลีโอไม้อย่างพารามีขนาดเล็กกว่าเส้นใยปาล์มน้ำมัน ทำให้จีลีโอไมไม่มีการกระจายตัวในวัสดุเชิงประกอบฯ ได้ทั่วถึงและสม่ำเสมอว่าเส้นใยปาล์มน้ำมัน ขณะเดียวกันวัสดุเชิงประกอบกับจีลีโอไมไม่มีรูพรุนเกิดขึ้นน้อยกว่า นอกจากนี้ไม่มีความแข็งมากกว่าพลาสติก (Kord, 2011; Homkhiew *et al.*, 2015) ทำให้วัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยจีลีโอไมไม่มีความแข็งมากกว่าพลาสติก 100% เมื่อพิจารณาผลกระทบของชนิดเส้นใยปาล์มน้ำมันที่ปริมาณการเติมเป็นส่วนผสมในพลาสติกเท่ากันพบว่า วัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนและเส้นใยทางปาล์มน้ำมันมีค่าความแข็งสูงสุด รองลงมาคือ วัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนและเส้นใยลูกปาล์มน้ำมัน และวัสดุเชิงประกอบ

พอลิโพรพิลีนและเส้นใยทะเลสาบปาล์มน้ำมันมีค่าความแข็งน้อยที่สุด นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์ผลกระทบปริมาณการเติมเส้นใยปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสมในวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนและจีลีโอไม้อย่างพาราพบว่า การเติมเส้นใยทะเลสาบปาล์มน้ำมันหรือเส้นใยลูกปาล์มน้ำมันหรือเส้นใยทางปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสมเพิ่มขึ้นในช่วง 5-20 wt% ส่งผลให้ค่าความแข็งลดลงตามปริมาณเส้นใยทั้ง 3 ชนิด ที่เติมเป็นส่วนผสมเพิ่มขึ้น เพราะการเติมเส้นใยเพิ่มขึ้น เป็นการเพิ่มรูพรุนภายในโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบฯ อีกทั้งการยึดเกาะที่ไม่แข็งแรงระหว่างเส้นใยธรรมชาติและเมทริกซ์พลาสติกมีมากขึ้น ทำให้หวัคความแข็งสามารถแทรกเข้าสู่เนื้อของวัสดุเชิงประกอบฯ ได้ง่ายขึ้น เป็นสาเหตุให้ค่าความแข็งลดลง



ภาพที่ 6 ผลกระทบของปริมาณและชนิดเส้นใยปาล์มน้ำมันต่อค่าความแข็งของวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนและจีลีโอไม้อย่างพารา

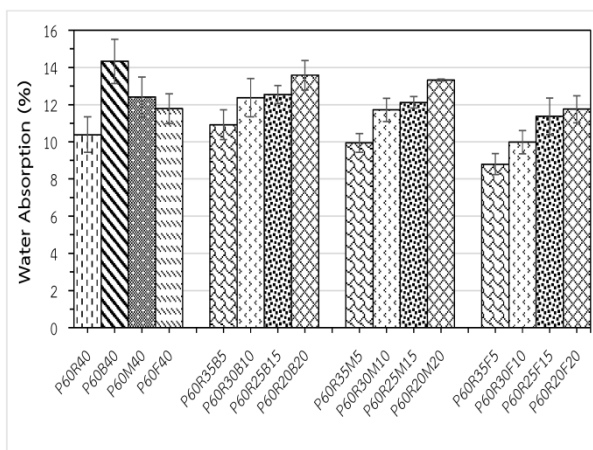
5. ผลกระทบของปริมาณและชนิดเส้นใยปาล์มน้ำมันต่อสมบัติการดูดซับน้ำ

ภาพที่ 7(ก) และ 7(ข) แสดงผลกระทบปริมาณและชนิดเส้นใยปาล์มน้ำมันต่อค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำและค่าเปอร์เซ็นต์การพองตัว ตามลำดับของวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนและจีลีโอไม้อย่างพารา

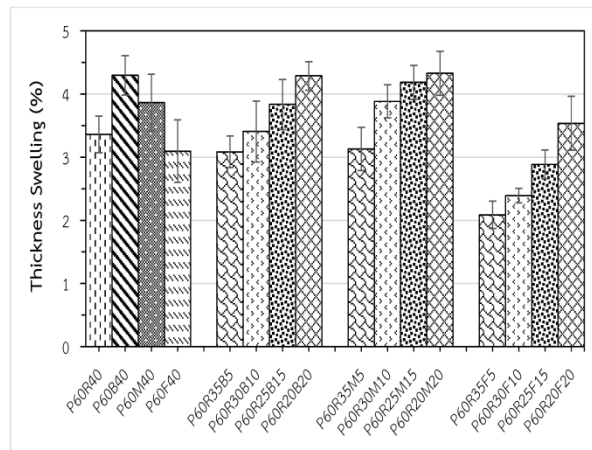
ซึ่งแสดงให้เห็นว่า วัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนและเส้นใยปาล์มน้ำมันมีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำและค่าเปอร์เซ็นต์การพองตัวสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนและจีลีโอไม้อย่างพารา พฤติกรรมนี้เกิดจากวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยเส้นใยปาล์มน้ำมันมีรูพรุนและช่องว่างเกิดขึ้นภายใน

โครงสร้างมากกว่าวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยซี่เลื่อยไม้ยางพารา ซึ่งสามารถพิสูจน์ได้จากโครงสร้างสัณฐานวิทยา ทำให้เป็นการเพิ่มที่อยู่อาศัยให้กับน้ำ ซึ่งส่งผลให้วัสดุเชิงประกอบฯ สามารถดูดซับน้ำได้เพิ่มมากขึ้น (Homkhiew, 2015) อย่างไรก็ตามวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนและเส้นใยทางปาล์มน้ำมันมีค่าเปอร์เซ็นต์การพองตัวต่ำกว่าวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยซี่เลื่อยไม้ยางพารา ดังนั้นสามารถกล่าวได้ว่า วัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนและเส้นใยทางปาล์มน้ำมันมีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำน้อยและค่าเปอร์เซ็นต์การพองตัวน้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยเส้นใยทะเลปาล์มน้ำมันหรือเส้นใยลูกปาล์มน้ำมัน นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์ผลกระทบปริมาณการเติมเส้นใยปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสมในวัสดุเชิงประกอบ

พอลิโพรพิลีนและซี่เลื่อยไม้ยางพาราพบว่า การเติมเส้นใยทะเลปาล์มน้ำมันหรือเส้นใยลูกปาล์มน้ำมันหรือเส้นใยทางปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสมเพิ่มขึ้นในช่วง 5-20 wt% ส่งผลให้ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำและค่าเปอร์เซ็นต์การพองตัวเพิ่มขึ้นตามปริมาณเส้นใยทั้ง 3 ชนิด ที่เดิมเป็นส่วนผสม เนื่องจากอุณหภูมิภายในโครงสร้างของวัสดุเพิ่มมากขึ้นตามปริมาณเส้นใย ทำให้เป็นการเพิ่มที่อยู่อาศัยให้กับน้ำเช่นเดียวกันยังสามารถกล่าวได้ด้วยว่า วัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนที่เสริมแรงด้วยซี่เลื่อยไม้ยางพาราและเส้นใยทางปาล์มน้ำมันมีค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำและค่าเปอร์เซ็นต์การพองตัวต่ำที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับการผสมเส้นใยปาล์มน้ำมันชนิดอื่นที่ปริมาณส่วนผสมเท่ากัน



(ก)



(ข)

ภาพที่ 7 ผลกระทบของปริมาณและชนิดเส้นใยปาล์มน้ำมันต่อ (ก) ค่าเปอร์เซ็นต์การดูดซับน้ำ และ (ข) ค่าเปอร์เซ็นต์การพองตัวของวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนและซี่เลื่อยไม้ยางพารา

6. ผลกระทบของปริมาณและชนิดเส้นใยปาล์มน้ำมันต่อสมบัติการสูญเสียน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อน

การวิเคราะห์การสูญเสียน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อน (TGA) ของวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนและเส้นใยธรรมชาติ แสดงดังภาพที่ 8 ซึ่งพบว่าการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อนมีอยู่

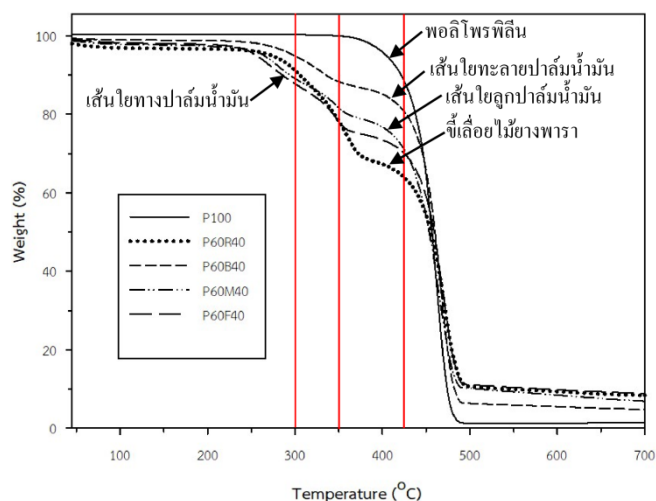
2 ช่วง เนื่องจากวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม่มีส่วนผสมหลักคือ พลาสติก และเส้นใยธรรมชาติ โดยการสลายตัวในช่วงแรกเป็นการสลายตัวของเส้นใยธรรมชาติ ซึ่งปกติสารเซลลูโลส เฮมิเซลลูโลส และลิกนินของเส้นใยธรรมชาติจะสลายตัวที่อุณหภูมิช่วง 194-386 องศาเซลเซียส (Mohanty *et al.*, 2006)

และการสลายตัวของพลาสติกพอลิโพรพิลีนที่อุณหภูมิประมาณ 460 องศาเซลเซียส เมื่อวิเคราะห์ผลกระทบชนิดเส้นใยธรรมชาติต่อสมบัติการสูญเสียน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อนของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้พบว่า วัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนและเส้นใยทะเลลายปาล์มน้ำมัน (P60B40) มีการเสถียรทางความร้อนสูงกว่าวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนและจี้เลื่อยไม้ยางพารา (P60R40) หรือเส้นใยลูกปาล์มน้ำมัน (P60M40) หรือเส้นใยทางปาล์มน้ำมัน (P60F40) ในช่วงอุณหภูมิ 300-425 องศาเซลเซียส ในขณะที่วัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนและเส้นใยทางปาล์มน้ำมันจะมีการเสถียรทางความร้อนต่ำที่สุดที่อุณหภูมิ 300 องศาเซลเซียส อย่างไรก็ตามเมื่ออุณหภูมิเกิน 350 องศาเซลเซียส พบว่า วัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนและจี้เลื่อยไม้ยางพารา (P60R40) มีการเสถียรทางความร้อนต่ำที่สุด นอกจากนี้พบด้วยว่า วัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนและเส้นใยธรรมชาติมีการเสถียรทางความร้อนน้อยกว่าพลาสติกพอลิโพรพิลีน (P100) อย่างเห็นได้ชัด

สรุป

ผลจากการศึกษาผลกระทบของปริมาณและชนิดเส้นใยปาล์มน้ำมันต่อสมบัติทางกล ทางกายภาพ และทางความร้อนของวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนและจี้เลื่อยไม้ยางพาราพบว่า การเติมจี้เลื่อยไม้ยางพาราหรือเส้นใยปาล์มน้ำมันเป็นส่วนผสมในพอลิโพรพิลีน ส่งผลให้ค่าความแข็งแรงลดลงอย่าง

ชัดเจน เนื่องจากการเกิดรุกรานจำนวนมาก และการยึดเกาะที่ไม่แข็งแรงระหว่างเส้นใยธรรมชาติและเมทริกซ์พลาสติกในโครงสร้างของวัสดุเชิงประกอบพลาสติกและไม้ แต่ทำให้ค่ามอดูลัสเพิ่มขึ้น เพราะไม้หรือเส้นใยธรรมชาติมีความแข็งแรงที่สูงกว่าพลาสติก นอกจากนี้เมื่อวิเคราะห์ผลกระทบของชนิดเส้นใยปาล์มน้ำมันพบว่า วัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนและเส้นใยทะเลลายปาล์มน้ำมันมีความแข็งแรง การดูดซับน้ำ และการเสถียรทางความร้อนมากกว่าวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยเส้นใยลูกปาล์มน้ำมัน หรือที่เสริมแรงด้วยเส้นใยทางปาล์มน้ำมัน อย่างไรก็ตามกลับพบว่า วัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยเส้นใยทางปาล์มน้ำมันมีค่ามอดูลัสและความแข็งแรงสูงที่สุด เพราะเส้นใยทางปาล์มน้ำมันมีความแข็งแรงมากที่สุด เช่นเดียวกันพบด้วยว่า วัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนที่เสริมแรงด้วยเส้นใยทะเลลายปาล์มน้ำมัน หรือเส้นใยลูกปาล์มน้ำมัน หรือเส้นใยทางปาล์มน้ำมัน มีสมบัติทางกลและทางกายภาพด้อยกว่าวัสดุเชิงประกอบที่เสริมแรงด้วยจี้เลื่อยไม้ยางพารา นอกจากนี้วัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนที่เสริมแรงด้วยจี้เลื่อยไม้ยางพาราและเส้นใยทางปาล์มน้ำมันปริมาณ 5-10 wt% มีสมบัติเด่นกว่าวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีนและจี้เลื่อยไม้ยางพารา ในค่ามอดูลัสการดึง 42.64% การดูดซับน้ำ 18.06% และการพองตัว 61.64%



ภาพที่ 8 ผลกระทบของชนิดเส้นใยธรรมชาติต่อค่าการสูญเสียน้ำหนักเมื่อได้รับความร้อนของวัสดุเชิงประกอบพอลิโพรพิลีน

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากงบประมาณเงินแผ่นดิน มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ประจำปี 2561 และสำนักงานคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.)

เอกสารอ้างอิง

- Abdul Khalil, H.P.S., Siti Alwani, M. and Mohd Omar, A.K. 2006. Chemical composition, anatomy, lignin distribution, and cell wall structure of Malaysian plant waste fibers. **Bioresources** 1: 220-232.
- Adam, N.A. and Asik, J. 2019. Mechanical performance of oil palm empty fruit bunches fibre reinforced polyester resin. **IOP Conference Series: Materials Science and Engineering** 469: 1-7.
- Ashori, A. 2008. Wood-plastic composites as promising green-composites for automotive industries. **Bioresource Technology** 99: 4661-4667.

Clemons, C. 2002. Wood-plastic composites in the United States. **Forest Products Journal** 52: 10-18.

Devi, R.R. and Maji, T.K. 2002. Studies of properties of rubber wood with impregnation of polymer. **Bulletin of Materials Science** 25: 527-531.

Essabir, H., Boujmal, R., Bensalah, M.O., Rodrigue, D., Bouhfid, R. and Qaiss, A. 2016. Mechanical and thermal properties of hybrid composites: Oil-palm fiber/clay reinforced high density polyethylene. **Mechanics of Materials** 98: 36-43.

Ge, X.C., Li, X.H. and Meng, Y.Z. 2004. Tensile properties, morphology, and thermal behavior of PVC composites containing pine flour and bamboo flour. **Journal of Applied Polymer Science** 93: 1804-1811.

Hatch, M.C. 2008. Processing, Mechanical, and Environmental Performance of Engineering Polymer Wood-Plastic Composites. Master

- Thesis in Civil Engineering, Washington State University.
- Homkhiew, C. 2014. Development and applications of natural fiber/thermoplastic composites for industrial. **The Journal of Industrial Technology** 10(2): 97-110. (in Thai)
- Homkhiew, C. and Ratanawilai, T. 2014. Optimal proportions of composites from polypropylene and rubberwood flour after water immersion using experimental design. **KKU Research Journal** 19(6): 780-793. (in Thai)
- Homkhiew, C. 2015. Factors affecting water absorption behavior of wood-plastic composites. **The Journal of Industrial Technology** 11(2): 94-111. (in Thai)
- Homkhiew, C., Ratanawilai, T. and Thongruang, W. 2015. Composites from recycled polypropylene and rubberwood flour: Effects of composition on mechanical properties. **Journal of Thermoplastic Composite Materials** 28(2): 179-194.
- Homkhiew, C., Boonchouytan, W., Cheewawuttipong, W. and Ratanawilai, T. 2018a. Potential utilization of rubberwood flour and sludge waste from natural rubber manufacturing process as reinforcement in plastic composites. **Journal of Material Cycles and Waste Management** 20: 1792-1803.
- Homkhiew, C., Rawangwong, S., Boonchouytan, W., Thongruang, W. and Ratanawilai, T. 2018b. Composites from thermoplastic natural rubber reinforced rubberwood sawdust: Effects of sawdust size and content on thermal, physical, and mechanical properties. **International Journal of Polymer Science** ID 7179527: 1-11.
- Homkhiew, C., Rawangwong, S., Boonchouytan, W. and Ratanawilai, T. 2019. Influence of natural wood types and pigment contents on properties of wood-plastic composites. **Engineering Journal Chiang Mai University** 26(1): 33-47. (in Thai)
- Jamil, M.S., Ahmad, I. and Abdullah, I. 2006. Effects of rice husk filler on the mechanical and thermal properties of liquid natural rubber compatibilized high-density polyethylene/natural rubber blends. **Journal of Polymer Research** 13(4): 315-321.
- Khalid, M., Ratnam, C.T., Chuah, T.G., Salmiaton Ali and Choong, T.S.Y. 2008. Comparative study of polypropylene composites reinforced with oil palm empty fruit bunch fiber and oil palm derived cellulose. **Materials and Design** 29: 173-178.
- Kord, B. 2011. Effect of wood flour content on the hardness and water uptake of thermoplastic polymer composites. **World Applied Science Journal** 12: 1632-1634.
- Mohanty, S., Verma, S.K. and Nayak, S.K. 2006. Dynamic mechanical and thermal properties of MAPE treated jute/HDPE composites. **Composites Science and Technology** 66(3-4): 538-547.
- Nordin, N.I.A.A., Ariffin, H., Andou, Y., Hassan, M.A., Shirai, Y., Nishida, H., Yunus, W.Z.W., Karuppuchamy, S. and Ibrahim, N.A. 2013. Modification of oil palm mesocarp fiber

- characteristics using superheated steam treatment. **Molecules** 18: 9132-9146.
- Nygård, P., Tanem, B.S., Karlsen, T., Brachet, P. and Leinsvang, B. 2008. Extrusion-based wood fibre-PP composites: Wood powder and pelletized wood fibres - a comparative study. **Composites Science and Technology** 68: 3418-3424.
- Olusunmade, O.F., Adetan, D.A. and Ogunnigbo, C.O. 2016. A study on the mechanical properties of oil palm mesocarp fibre-reinforced thermoplastic. **Journal of Composites** 2016(ID 3137243): 1-7.
- Petchpradab, P., Yoshida, T., Charinpanitkul, T. and Matsumura, Y. 2009. Hydrothermal pretreatment of rubber wood for the Saccharification process. **Industrial & Engineering Chemistry Research** 48(9): 4587-4591.
- Prasertsan, S. and Vanapruk, P. 1998. **Rubber Plantations: An Overlooked Dendropower Option**. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Manila.
- Ratanawilai, T., Nakawiro, K., Deachsrijan, A. and Homkhiew, C. 2014. Influence of wood species and particle size on mechanical and thermal properties of wood polypropylene composites. **Fibers and Polymers** 15(10): 2160-2168.
- Ratanawilai, T., Thanawattanasirikul, N. and Homkhiew, C. 2012. Mechanical and thermal properties of oil palm wood sawdust reinforced post-consumer polyethylene composites. **ScienceAsia** 38: 289-294.
- Rimdusit, S., Smittakorn, W., Jittarom, S. and Tiptipakorn, S. 2011. Highly filled polypropylene rubber wood flour composites. **Engineering Journal** 15(2): 17-30.
- Slaughter, A.E. 2004. Design and Fatigue of a Structural Wood-Plastic Composite. Master Thesis in Civil Engineering, Washington State University.
- Sreekala, M.S., Kumaran, M.G. and Thomas, S. 1997. Oil palm fibers: Morphology, chemical composition, surface modification, and mechanical properties. **Journal of Applied Polymer Science** 66: 821-835.
- Väisänen, T., Haapala, A., Lappalainen, R. and Tomppo, L. 2016. Utilization of agricultural and forest industry waste and residues in natural fiber-polymer composites: A review. **Waste Management** 54: 62-73.
- Yusoff, M.Z.M., Salit, M.S. and Ismail, N. 2009. Tensile properties of single oil palm empty fruit bunch fibre. **Sains Malaysiana** 38(4): 525-529.

การต้านทานการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตที่ผสมวัสดุกันซึมแบบซีเมนต์ ชนิดตกผลึกคริสตัลไลน์

Water Permeable Resistance in Concrete Combined with Waterproofing Material Cement of Crystalline Type

วรัญ ณ สงขลา *

Warun Na Songkhla *

Received: 15 April 2020, Revised: 14 September 2020, Accepted: 9 October 2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ทำการศึกษาเกี่ยวกับการต้านทานการซึมผ่านของน้ำและการสร้างชั้นผลึกคริสตัลไลน์ในคอนกรีตที่ผสมวัสดุกันซึมแบบซีเมนต์ ผลการวิจัยพบว่า ตัวอย่างที่ผสมวัสดุกันซึมมีความสามารถต้านทานการซึมผ่านของน้ำในสภาวะมีแรงดันได้มากกว่าตัวอย่างคอนกรีตควบคุม โดยมีค่าการซึมผ่านน้ำเฉลี่ยที่วัดได้อยู่ที่ 3.16 เซนติเมตร และ 7.5 เซนติเมตร ตามลำดับ ส่วนค่าความหนาของการเกิดชั้นผลึกคริสตัลไลน์รอบๆ ผิวตัวอย่าง มีค่าความหนาประมาณ 2.5 - 3 เซนติเมตร เมื่อตัดส่วนที่เกิดผลึกออกจะมีการสร้างชั้นผลึกคริสตัลไลน์ขึ้นใหม่อีกครั้ง หากตัวอย่างได้สัมผัสกับน้ำจากภายนอก และผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS คอนกรีตที่ผสมวัสดุกันซึมแบบซีเมนต์บริเวณผิวที่เกิดผลึก พบสารประกอบไททาเนียม (Ti) ซึ่งเป็นสารประกอบโลหะทรานซิชันในปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเมอร์ จึงสามารถยืนยันผลทดสอบได้ว่าตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมวัสดุกันซึมมีการสร้างผลึกคริสตัลไลน์ขึ้นจริงในเนื้อคอนกรีต ซึ่งมีผลที่สอดคล้องกับสารประกอบทางเคมีของวัสดุกันซึมแบบซีเมนต์ ชนิดตกผลึกคริสตัลไลน์ ที่มีสารประกอบไททาเนียมไดออกไซด์ผสมอยู่

คำสำคัญ: วัสดุกันซึมแบบซีเมนต์, คริสตัลไลน์, การซึมผ่านของน้ำ

สาขาวิชาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ 14 ถนนนันทบุรี 1 ตำบลบางกระสอ จังหวัดนนทบุรี 11000

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering and Architecture, Rajamangala University of Technology Suvarnabhumi, 144 Nonthaburi 1 Road, Bang Krasor, Nonthaburi 11000, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): warun.w@rmutsb.ac.th Tel: 08 6698 1389

ABSTRACT

The research aims to study water permeable resistance and crystallization of concrete mixed with cement-based waterproofing material. In this study, it demonstrates that the samples merged with waterproofing material result in better water permeable resistance capability under pressure condition than the regular concrete as the control sample. The average numbers of water permeability of the samples and the control one were 3.16 and 7.50 centimeters respectively whereas the thickness of crystalline layers occurring around the samples were 2.50 to 3 centimeters. When crystalline areas were cut, new crystalline areas were rebuilt under relevant water situation. Based on mineral analysis using EDS technique, the results demonstrated that Titanium compound, a transitional metal compound in polymer synthesis reaction, was detected at crystalline area of concrete combined with cement-based waterproofing material. This confirmed that concrete blended with waterproofing material generating crystals within concrete. In agreement with chemical compound of cement-based waterproofing material crystallization type, Titanium dioxide compound was internally mixed.

Key words: cement waterproofing, crystalline, water permeability

บทนำ

การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตให้มีคุณสมบัติด้านการรับกำลังสามารถทำได้โดยง่ายและให้ผลที่ค่อนข้างชัดเจนตามสัดส่วนผสมที่ออกแบบไว้ แต่คุณสมบัติด้านความคงทนของคอนกรีตค่อนข้างมีความซับซ้อนมากกว่าคุณสมบัติด้านการรับกำลัง เนื่องจากสภาพแวดล้อมจริงที่คอนกรีตสัมผัสมีปัจจัยหลายอย่างที่ส่งผลต่อการทำลายและไม่สามารถควบคุมได้ (Zhao *et al.*, 2011) เช่น โครงสร้างคอนกรีตที่สัมผัสกับน้ำและความชื้นสูง ส่งผลให้ความคงทนของคอนกรีตลดลง เนื่องจากการซึมผ่านของน้ำที่เข้าทำลายเหล็กเสริมส่งผลให้เกิดความเสียหายกับโครงสร้างได้ การปรับปรุงคุณสมบัติของคอนกรีตโดยใช้วัสดุปอซโซลานที่มีคุณภาพดี เช่น เถ้าถ่านหิน หรือเถ้าชีวมวลบดละเอียด และวัสดุกึ่งปอซโซลานกึ่งปูนซีเมนต์ เช่น ซิลิกาฟูม และตะกอนเตาถลุงเหล็ก ให้ผลไปในทิศทางที่ดีและสามารถเพิ่มการป้องกันการซึมผ่านของน้ำได้

(Mindess *et al.*, 2002) ดังรายงานวิจัยของ Benthia and Mindess (1998) ได้ศึกษาหาค่าการซึมผ่านน้ำของซีเมนต์เพสต์โดยการศึกษาใช้ปูนซีเมนต์ประเภทที่ 1 และ 3 โดยจะมีการเปรียบเทียบการผสมซิลิกาฟูม การให้ความดันน้ำเป็นลักษณะแรงอัดสามแกน การหาการซึมผ่านน้ำแสดงในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีต จากสมการของดาร์ซีที่สามารถสรุปได้ว่า ค่าการซึมผ่านน้ำจะมีค่าลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปฏิกิริยาไฮเดรชัน หรือระยะเวลาการบ่ม และการผสมซิลิกาฟูมร้อยละ 10 - 15 สามารถลดค่าการซึมผ่านน้ำได้ และในปีเดียวกัน Ludirdja *et al.* (1989) ได้ศึกษาวิธีการและเครื่องมือในการหาค่าการซึมผ่านน้ำของคอนกรีต โดยศึกษาผลของน้ำหนักกระทำ สภาพการบ่ม และการผสมซิลิกาฟูม การหาค่าการซึมผ่านน้ำแสดงในรูปของค่าสัมประสิทธิ์การซึมผ่านน้ำของคอนกรีต จากการศึกษาสามารถสรุปได้ว่า ผลของน้ำหนักกระทำจะทำให้ค่าการซึมผ่านน้ำมีค่าเพิ่มขึ้นหลังจากตัวอย่างรับน้ำหนักร้อยละ 75

ของกำลังอัดประลัย ผลจากการบ่มในคอนกรีตธรรมชาติอุณหภูมิการบ่มที่เพิ่มสูงขึ้นจะเพิ่มค่าการซึมผ่านน้ำของตัวอย่างในขณะบ่ม (สำหรับตัวอย่างที่ถูกทำให้แห้งก่อนนำมาบ่ม) และผลของการผสมซิลิกาฟูมจะลดค่าการซึมผ่านน้ำได้

ในปัจจุบันการใช้สารเคมีในรูปแบบวัสดุกันซึมก็เป็นอีกทางเลือกที่มีอยู่แพร่หลายในอุตสาหกรรมการก่อสร้างในประเทศไทย แต่ข้อมูลด้านคุณสมบัติการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตที่ผสมวัสดุกันซึมแบบซีเมนต์ ชนิด ตกผลึกคริสตัลไลน์ยังไม่มีข้อมูลที่แน่ชัดในด้านการต้านทานการซึมผ่านและการสร้างชั้นผลึก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์ที่จะศึกษาคุณสมบัติการซึมผ่านของน้ำในคอนกรีตและการสร้างชั้นผลึกคริสตัลไลน์ ที่ผสม

วัสดุกันซึมแบบซีเมนต์ ชนิด ตกผลึกคริสตัลไลน์ให้ข้อมูลที่แน่ชัดมากขึ้น

วิธีดำเนินการวิจัย

1. วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยและสัดส่วนผสมคอนกรีต

วัสดุกันซึมที่นำมาวิจัย คือ ซีเมนต์กันซึม Penetron Admix (PA) ชนิดตกผลึก (Integral Crystalline Waterproofing Admixture) สำหรับผสมในคอนกรีต ดังแสดงในภาพที่ 1 และสารประกอบทางเคมี ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยอัตราส่วนที่ใช้ ร้อยละ 1 ต่อ น้ำหนักปูนซีเมนต์ ซึ่งเป็นอัตราส่วนที่ไม่มีผลกระทบต่อค่าการยุบตัวของคอนกรีตในช่วง 7.5 - 12.5 เซนติเมตร ตามการออกแบบสัดส่วนผสมคอนกรีต และเป็นอัตราส่วนผสมสูงสุดที่ผู้ผลิตแนะนำ



ภาพที่ 1 วัสดุกันซึม ชนิด ตกผลึก

ตารางที่ 1 สารประกอบทางเคมีของวัสดุกันซึมแบบซีเมนต์ ชนิด ตกผลึกคริสตัลไลน์

Compound	Integral Crystalline Waterproofing Admixture (%)
CaO	44
SiO ₂	17.6
Fe ₂ O ₃	1.6
Al ₂ O ₃	1.3
SO ₃	1.5
MgO	1.0
K ₂ O	0.3
Na ₂ O	2.3
TiO ₂	1.17
Other	36.73
Carbon	3.1

การออกแบบสัดส่วนผสมคอนกรีต โดยกำหนดค่ากำลังอัดประลัยที่ 28 วัน เท่ากับ 32 MPa (เป็นกำลังอัดที่ใช้โดยทั่วไปในโครงสร้างคอนกรีตด้านอุตสาหกรรม และวัสดุกันซึมแบบซีเมนต์ ชนิดตกผลึกคริสตัลไลน์ก็ถูกนำมาใช้ในงานการก่อสร้างประเภทอุตสาหกรรมเป็นหลัก) อัตราน้ำต่อ

ปูนซีเมนต์ เท่ากับ 0.54 ค่าการยุบตัวอยู่ที่ 7.5 - 12.5 เซนติเมตร และแสดงอัตราส่วนผสมคอนกรีต ดังตารางที่ 2 โดยกำหนดชื่อเรียกตัวอย่าง ดังนี้ ตัวอย่างที่ไม่ผสมวัสดุกันซึมจะเรียกว่า ตัวอย่างควบคุม (Control) และตัวอย่างที่ผสมวัสดุกันซึมจะเรียกว่า ตัวอย่างคริสตัลไลน์ (Crystalline)

ตารางที่ 2 อัตราส่วนผสมของคอนกรีต

Mix Proportion (kg/m ³)				
Cement	Water	Aggregates		Crystalline Admix
		Fine	Coarse	
		Control		
362	196	870	1,010	-
Crystalline				
362	196	870	1,010	3.62

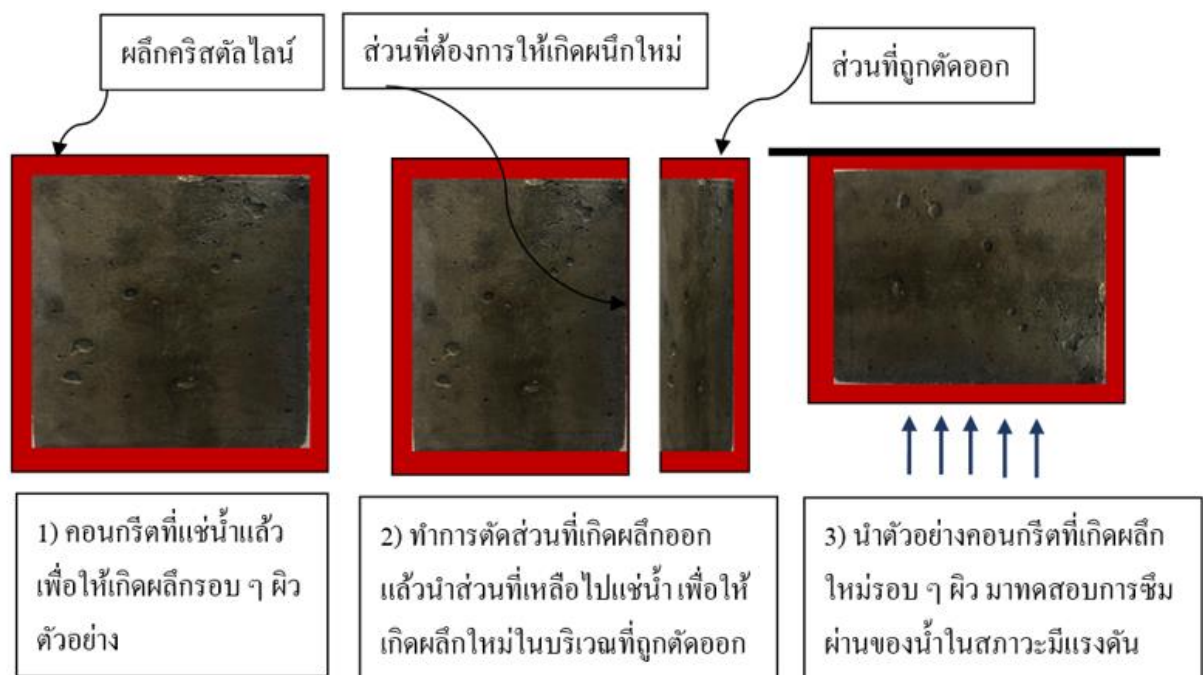
2. ขั้นตอนการวิจัย

นำตัวอย่างคอนกรีตขนาด 15×15×15 เซนติเมตร ที่ผสมวัสดุกันซึมแบบซีเมนต์ชนิด

คริสตัลไลน์ในเนื้อคอนกรีตบ่มน้ำเป็นเวลา 28 วัน เพื่อให้ได้กำลังตามที่ออกแบบส่วนผสมไว้ และให้เกิดผลึกคริสตัลไลน์ในตัวอย่างคอนกรีต (การสร้าง

ชั้นผลึกคริสตัลไลน์จะต้องอาศัยการซึมผ่านเบื้องต้นของน้ำจากภายนอกเป็นหลัก จะอาศัยแค่ปริมาณน้ำในส่วนผสมของคอนกรีตนั้นไม่เพียงพอและน้ำในส่วนนี้จะใช้ในปฏิกิริยาไฮเดรชันเป็นหลัก การซึมผ่านของน้ำจากภายนอกในปริมาณที่เหมาะสมสำหรับการทำปฏิกิริยากับวัสดุกันซึม ส่งผลให้เกิดการสร้างชั้นผลึกคริสตัลไลน์ขึ้นรอบๆ ผิวของตัวอย่างในปริมาณที่หนาแน่นกว่าบริเวณภายในเนื้อตัวอย่าง ชั้นผลึกคริสตัลไลน์ที่เกิดขึ้นจะป้องกันน้ำไม่ให้ซึมผ่านเข้าไปในตัวอย่างได้อีก การเกิดผลึกภายในตัวอย่างจึงไม่สามารถเกิดขึ้นเพิ่มเติมจากเดิมได้อีก (Kunlong *et al.*, 2019; José *et al.*, 2019; Wongprachum, 2019) นำตัวอย่างที่เกิดชั้นผลึกแล้วไปทดสอบการซึมผ่านของน้ำในสภาวะมีแรงดันตามมาตรฐาน DIN 1048: Teil 5 (1991) หลังจากนั้น

ทำการตัดส่วนรอบๆ พื้นผิวตัวอย่างที่เกิดผลึกออกในการทดสอบส่วนนี้เพื่อต้องการที่จะทราบว่า หากตัวอย่างที่ถูกตัดส่วนที่เกิดผลึกรอบผิวตัวอย่างออกแล้ว จะมีการสร้างชั้นผลึกขึ้นมาใหม่แทนที่ชั้นผลึกเก่าอีกครั้งหรือไม่ ในขณะที่ตัวอย่างสัมผัสกับน้ำจากภายนอกอีกครั้ง โดยนำตัวอย่างคอนกรีตส่วนที่เหลือไปแช่น้ำที่ 28 วัน เพื่อให้เกิดชั้นผลึกอีกครั้ง (สารประกอบของวัสดุกันซึมที่อยู่ภายในเนื้อตัวอย่างจะไม่สามารถสร้างผลึกคริสตัลไลน์เพิ่มเติมได้ เพราะถูกชั้นผลึกคริสตัลไลน์รอบๆ ผิวตัวอย่างป้องกันไม่ให้น้ำจากภายนอกซึมเข้าไปได้ จึงต้องตัดส่วนที่เกิดผลึกรอบๆ พื้นผิวตัวอย่างออกเพื่อให้ น้ำซึมเข้าทำปฏิกิริยาต่อไปได้) และนำตัวอย่างกลับมาทดสอบการซึมผ่านของน้ำในสภาวะมีแรงดันอีก ตามภาพที่ 2



ภาพที่ 2 ลักษณะการเตรียมตัวอย่างคอนกรีต

3. มาตรฐานการทดสอบที่ใช้ในงานวิจัย

3.1 การทดสอบการต้านทานการซึมผ่านของน้ำ

การทดสอบการต้านทานการซึมผ่านของน้ำเป็นไปตามมาตรฐาน DIN 1048: Teil 5 (1991) โดยจะทำการทดสอบตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมวัสดุกันซึม

แบบซีเมนต์ชนิดคริสตัลไลน์ในเนื้อคอนกรีตที่เกิดผลึกคริสตัลไลน์รอบๆ ขั้นตอนการทดสอบจะทำการอัดก้อนตัวอย่างด้วยความดันน้ำ 500 kPa เป็นเวลา 48

ชั่วโมง หลังจากนั้นผ่าก้อนทดสอบออกและทำการวัดความลึกของน้ำที่ผ่านเข้ามาในเนื้อตัวอย่างทดสอบ เครื่องทดสอบดังแสดงในภาพที่ 3



ภาพที่ 3 การทดสอบการต้านทานการซึมผ่านของน้ำตามมาตรฐาน DIN 1048: Teil 5 (1991)

3.2 การทดสอบกำลังรับแรงอัด

การทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ โดยทดสอบตามมาตรฐาน

BS 1881: Part 4 (1970) โดยใช้ก้อนตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์ ขนาด 15×15×15 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 4



ภาพที่ 4 การทดสอบกำลังรับแรงอัดของก้อนตัวอย่างรูปทรงลูกบาศก์

3.3 การทดสอบลักษณะโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตที่ผสมวัสดุกันซึมแบบซีเมนต์ ชนิดคริสตัลไลน์

การถ่ายภาพขยายกำลังสูงโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) แบบส่องกราด เป็นการสร้างภาพทำได้โดยการตรวจวัดอิเล็กตรอนที่สะท้อนจากพื้นผิวหน้าของ ตัวอย่างที่

ทำการสำรวจ ซึ่งภาพที่ได้จากเครื่อง SEM นี้จะเป็น
ภาพลักษณะของ 3 มิติ

การวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคด้วยเทคนิค
Energy Dispersive Spectrometry (EDS) แบบส่อง

กราด เป็นเครื่องมือตัวหนึ่งที่อยู่ในระบบของ SEM
สำหรับใช้วิเคราะห์ธาตุต่างๆ ที่มีอยู่ในสารตัวอย่าง
ซึ่งทำหน้าที่รับสัญญาณ X-Ray จากสารตัวอย่าง ดัง
แสดงในภาพที่ 5



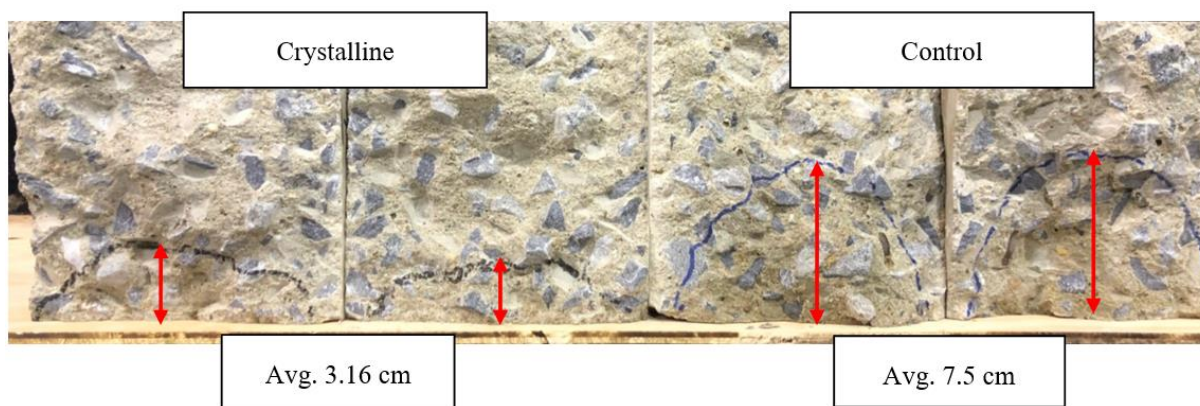
ภาพที่ 5 เครื่อง Scanning Electron Microscope และ Energy Dispersive Spectrometry

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. การต้านทานการซึมผ่านของน้ำในสภาวะมีแรงดัน

เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติการต้านทานการ
ซึมผ่านของน้ำในสภาวะมีแรงดันของตัวอย่างที่ผสม
วัสดุกันซึมคริสตัลไลน์ (Crystalline) กับตัวอย่าง
คอนกรีตควบคุม (Control) โดยทำการผ่าตัวอย่าง
ออกแล้ววัดค่าเฉลี่ยของรอยน้ำที่เกิดขึ้นจากการซึม
ผ่านของน้ำในเนื้อตัวอย่างคอนกรีต พบว่า ตัวอย่างที่
ผสมวัสดุกันซึมคริสตัลไลน์ มีความสามารถต้านทาน
การซึมผ่านของน้ำในสภาวะมีแรงดันได้มากกว่า
ตัวอย่างคอนกรีตควบคุม โดยมีค่าการซึมผ่านน้ำ

เฉลี่ยที่วัดได้อยู่ที่ 3.16 เซนติเมตร และ 7.5
เซนติเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 6 เนื่องจาก
เกิดการสร้างขึ้นผลึกคริสตัลไลน์ในเนื้อคอนกรีต
บริเวณรอบๆ ผิวตัวอย่างที่ผสมวัสดุกันซึม
คริสตัลไลน์ โดยชั้นผลึกคริสตัลไลน์ที่เกิดขึ้นจะอุด
ปิดช่องว่างโพรงและรอยร้าวขนาดเล็กในเนื้อ
คอนกรีต ทำให้คอนกรีตบริเวณที่สร้างขึ้นผลึก
คริสตัลไลน์ มีความหนาแน่นเพิ่มขึ้น ส่งผลให้
คอนกรีตมีความทึบน้ำเพิ่มขึ้นตามไปด้วย ซึ่งสอดคล้อง
กับรายงานวิจัยของ (Nasiru *et al.*, 2015; Kunlong *et al.*, 2019; José *et al.*, 2019)



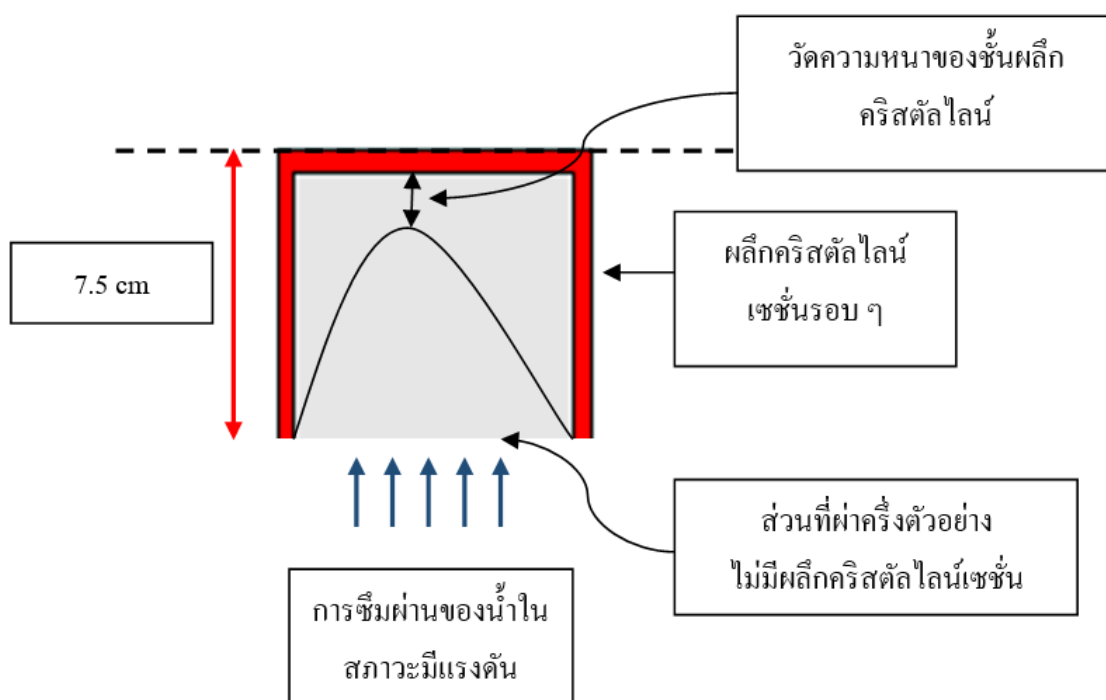
ภาพที่ 6 แสดงระยะการซึมของน้ำที่ตัวอย่างขนาด 15×15×15 เซนติเมตร

2. ค่าความหนาชั้นผลึกคริสตัลไลน์ที่เกิดขึ้นรอบๆ

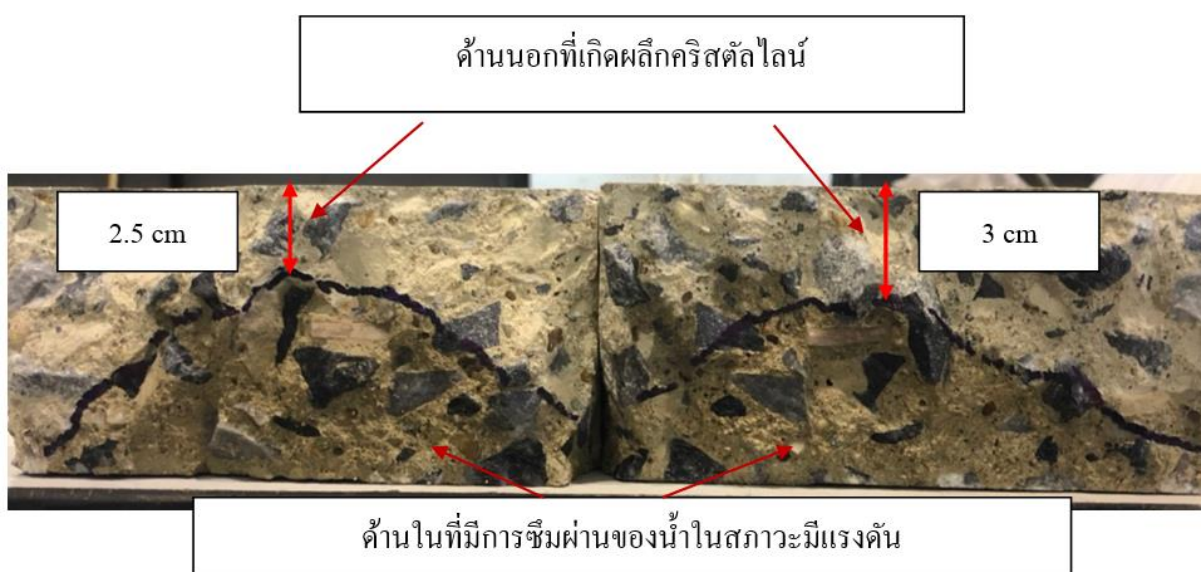
ตัวอย่างที่ผสมวัสดุกันซึม

หลังจากได้ค่าการต้านทานการซึมผ่านของน้ำในสภาวะมีแรงดัน เป็นที่เรียบร้อยแล้ว จึงทำการทดสอบหาค่าความหนาของการเกิดชั้นผลึกคริสตัลไลน์ที่เกิดขึ้นรอบตัวอย่างที่ผสมวัสดุกันซึม คริสตัลไลน์ (Crystalline) สามารถทำได้โดยการผ่าครึ่งตัวอย่าง (ให้มีขนาดความหนา 7.5 เซนติเมตร เท่ากับความหนาที่น้ำซึมผ่านในตัวอย่างควบคุมเฉลี่ยที่ 7.5 เซนติเมตร) ที่มีการสร้างชั้นผลึกคริสตัลไลน์ในเนื้อคอนกรีตบริเวณรอบผิวตัวอย่างออก 1 ด้าน แล้วนำด้านที่ตัดชั้นผลึกคริสตัลไลน์ออกไปทดสอบการซึมผ่านของน้ำในสภาวะมีแรงดัน ดังแสดงในภาพที่ 7 หลังจากนั้นทำการวัดค่าความหนาส่วนที่น้ำไม่สามารถซึมผ่านได้ พบว่า ส่วนที่น้ำไม่สามารถซึมผ่านได้ จะมีความหนาประมาณ 2.5 - 3 เซนติเมตร ซึ่งเป็นชั้นความหนาของผลึกคริสตัลไลน์ที่เกิดขึ้นรอบๆ ผิวตัวอย่างหลังจากสัมผัสกับน้ำจากภายนอก ดังแสดงในภาพที่ 8 โดยที่สารประกอบของวัสดุกันซึมที่อยู่ภายในตัวอย่างยังไม่สามารถสร้างชั้นผลึกคริสตัลไลน์ได้เต็มที่ และชั้นผลึกคริสตัลไลน์ที่เกิดขึ้นรอบๆ ผิวของตัวอย่างในปริมาณที่หนาแน่น

กว่าบริเวณภายในเนื้อตัวอย่างนั้น เนื่องจากต้องอาศัยการซึมผ่านเบื้องต้นของน้ำจากภายนอกเข้าไปทำปฏิกิริยากับสารประกอบ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) และชะล้างสารประกอบแคลเซียมไฮดรอกไซด์ (CH) ในตัวอย่างให้ละลายตัวออกมา แล้วจึงทำปฏิกิริยากับสารประกอบซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) และสารประกอบอื่นๆ (Other) ที่มีในวัสดุกันซึม ส่งผลให้เกิดการสร้างชั้นผลึกแคลเซียมไฮดรอกไซด์ ผลึกแคลเซียมซิลิเกตไฮเดรต (CSH) และผลึกคริสตัลไลน์รอบๆ ผิวตัวอย่าง เมื่อผลึกเกิดขึ้นหนาแน่นสมบูรณ์แล้ว น้ำจากภายนอกก็ไม่สามารถซึมผ่านชั้นผลึกคริสตัลไลน์เข้าไปในเนื้อคอนกรีตได้อีก (Kunlong *et al.*, 2019; José *et al.*, 2019; Wongprachum, 2019) ซึ่งปฏิกิริยาดังกล่าวมีความคล้ายคลึงกับปฏิกิริยาของวัสดุกึ่งปอซโซลานและกึ่งปูนซีเมนต์ (Mindess *et al.*, 2002; Guangyan *et al.*, 2019) และจากผลการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตผสมวัสดุกันซึมแบบซีเมนต์ ยังพบสารประกอบทางเคมีของวัสดุกันซึมแบบซีเมนต์ ชนิด ตกผลึกคริสตัลไลน์ ที่มีสารประกอบไททานเนียมไดออกไซด์ผสมอยู่ในผลึกคริสตัลไลน์ที่เกิดขึ้นรอบผิวตัวอย่างทดสอบ



ภาพที่ 7 แบบจำลองการทดสอบหาค่าความหนาของชั้นฟลิกคริสตัลไลน์ที่เกิดขึ้นรอบ ๆ ตัวอย่างที่ผสมวัสดุกันซึม



ภาพที่ 8 ความหนาของชั้นฟลิกคริสตัลไลน์รอบ ๆ ตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมวัสดุกันซึมคริสตัลไลน์

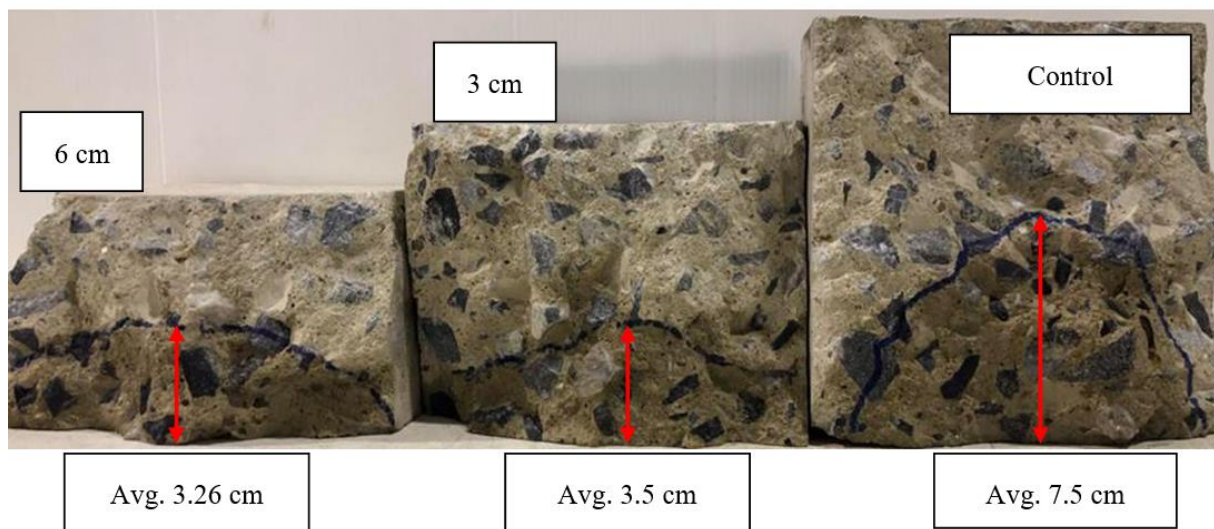
3. การสร้างชั้นฟลิกคริสตัลไลน์ใหม่ภายในเนื้อโครงสร้างคอนกรีตหลังตัดชั้นฟลิกภายนอกออก

ในหัวข้อนี้จะเป็นการตรวจหาชั้นฟลิกคริสตัลไลน์ที่ถูกสร้างขึ้นใหม่ภายในเนื้อโครงสร้างคอนกรีตหลังจากตัดชั้นฟลิกรอบๆ ผิวตัวอย่างออกแล้ว โดยเป็นที่ทราบกันดีแล้วว่า เมื่อน้ำ

จากภายนอกไม่สามารถซึมผ่านชั้นฟลิกคริสตัลไลน์รอบผิวตัวอย่างได้ การฟลิกภายในตัวอย่างจึงไม่สามารถเกิดขึ้นเพิ่มเติมจากเดิมได้ ชั้นฟลิกคริสตัลไลน์ที่เกิดขึ้นรอบๆ ผิวของตัวอย่างในปริมาณที่หนาแน่นกว่าบริเวณภายในเนื้อตัวอย่างนั้น ต้องอาศัยการซึมผ่านเบื้องต้นของน้ำจากภายนอกเข้าไปทำปฏิกิริยา

ผู้วิจัยได้ตั้งสมมุติฐานว่า หากมีการตัดส่วนชั้นผลึกคริสตัลไลน์รอบๆ ผิวตัวอย่างออก และให้ส่วนที่เหลือได้สัมผัสกับการเกิดผลึกคริสตัลไลน์จะสามารถเกิดขึ้นได้อีกครั้ง และเมื่อได้ทราบค่าความหนาของการเกิดชั้นผลึกคริสตัลไลน์ที่เกิดขึ้นรอบๆ ผิวตัวอย่างแล้ว จึงทำการตัดตัวอย่างคอนกรีตส่วนที่เกิดผลึกออกที่ระยะ 3 เซนติเมตร และ 6 เซนติเมตร ซึ่งเป็นระยะที่ลึกเกินความหนาของชั้นผลึกคริสตัลไลน์รอบๆ ผิวตัวอย่าง นำตัวอย่างคอนกรีตส่วนที่เหลือไปแช่น้ำให้เกิดผลึก และจากนั้นนำตัวอย่างกลับมาทดสอบการซึมผ่านของน้ำในสภาวะมีแรงดันอีกครั้ง โดยที่สามารถเปรียบเทียบค่าการทดสอบการซึมผ่านของน้ำในสภาวะมีแรงดันกับตัวอย่างคอนกรีตควบคุม (Control) พบว่า ตัวอย่างที่ผสมวัสดุกันซึม

คริสตัลไลน์ (Crystalline) ที่ได้ตัดส่วนที่เกิดผลึกออกที่ระยะ 3 เซนติเมตร 6 เซนติเมตร และตัวอย่างคอนกรีตควบคุม มีค่าการซึมผ่านของน้ำอยู่ที่ 3.26 เซนติเมตร 3.5 เซนติเมตร และ 7.5 เซนติเมตร ตามลำดับ ดังแสดงในภาพที่ 9 ตัวอย่างที่ผสมวัสดุกันซึมคริสตัลไลน์จะสามารถต้านทานการซึมผ่านของน้ำได้ดีกว่าตัวอย่างควบคุมประมาณ 2.14 เท่า ซึ่งจากผลการทดสอบสามารถบ่งชี้ได้ว่า ตัวอย่างคอนกรีตที่ตัดส่วนที่เกิดผลึกรอบๆ ผิวตัวอย่างออก ที่ระยะ 3 เซนติเมตร และ 6 เซนติเมตร สามารถสร้างชั้นผลึกคริสตัลไลน์ขึ้นใหม่รอบๆ ผิวตัวอย่างได้อีกครั้ง และผลการซึมผ่านของน้ำในตัวอย่างคอนกรีตควบคุม ก็มีค่าเท่ากับค่าการต้านทานการซึมผ่านของน้ำในสภาวะมีแรงดัน



ภาพที่ 9 ผลการทดสอบการซึมผ่านของน้ำในตัวอย่างที่สร้างชั้นผลึกคริสตัลไลน์ใหม่

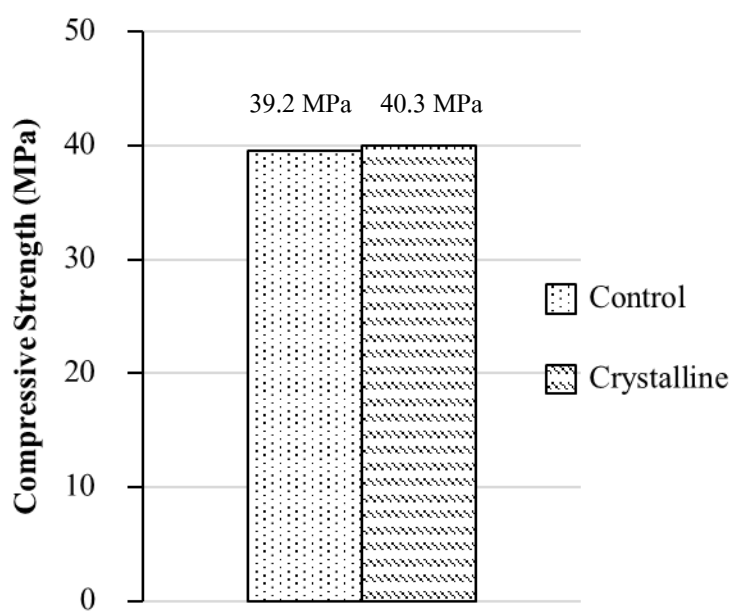
4. กำลังอัดของคอนกรีตผสมวัสดุกันซึมคริสตัลไลน์

การทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต (Compressive Strength of Concrete) ที่บ่มน้ำเป็นเวลา 28 วัน พบว่า ค่ากำลังอัดสูงสุดของตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมวัสดุกันซึมคริสตัลไลน์ (Crystalline) มีค่าเท่ากับ 40.3 MPa สูงกว่าตัวอย่างคอนกรีตควบคุม (Control) ที่มีค่าเท่ากับ 39.2 MPa เพียง

เล็กน้อย ดังแสดงในภาพที่ 10 เนื่องจากการทดสอบกำลังอัดแบบทำลาย ค่าการต้านทานกำลังอัดแบบทำลายมาจากโครงสร้างภายในเนื้อตัวอย่างคอนกรีตเป็นหลัก ชั้นผลึกคริสตัลไลน์จะเกิดขึ้นรอบๆ ผิวของตัวอย่างในปริมาณที่หนาแน่นกว่าบริเวณภายในเนื้อตัวอย่างคอนกรีต และตัวอย่างคอนกรีตจะรับแรงอัดเต็มพื้นที่หน้าตัดเกิดการส่งผ่านกระจายแรงไปทั่ว

โครงสร้างภายในเนื้อของตัวอย่างคอนกรีต ตัวอย่างคอนกรีตรับแรงจนถึงระดับใกล้สู่การวิบัติจะเกิดรอยร้าวขนาดเล็ก (Micro Crack) ขึ้นภายในเนื้อโครงสร้างคอนกรีตจนถึงระดับที่ตัวอย่างคอนกรีตไม่สามารถรับกำลังต่อไปได้ รอยร้าวขนาดเล็กจะ

ขยายตัวนำไปสู่รอยร้าวขนาดใหญ่ (Macro Crack) ส่งผลให้เกิดการวิบัติในตัวอย่างคอนกรีต (Mindess *et al.*, 2002) เพราะเหตุนี้การผสมวัสดุกันซึมคริสตัลไลน์ จึงไม่ส่งผลให้มีค่ากำลังอัดที่เพิ่มขึ้นจากเดิมมากนัก



ภาพที่ 10 ผลการทดสอบกำลังอัด

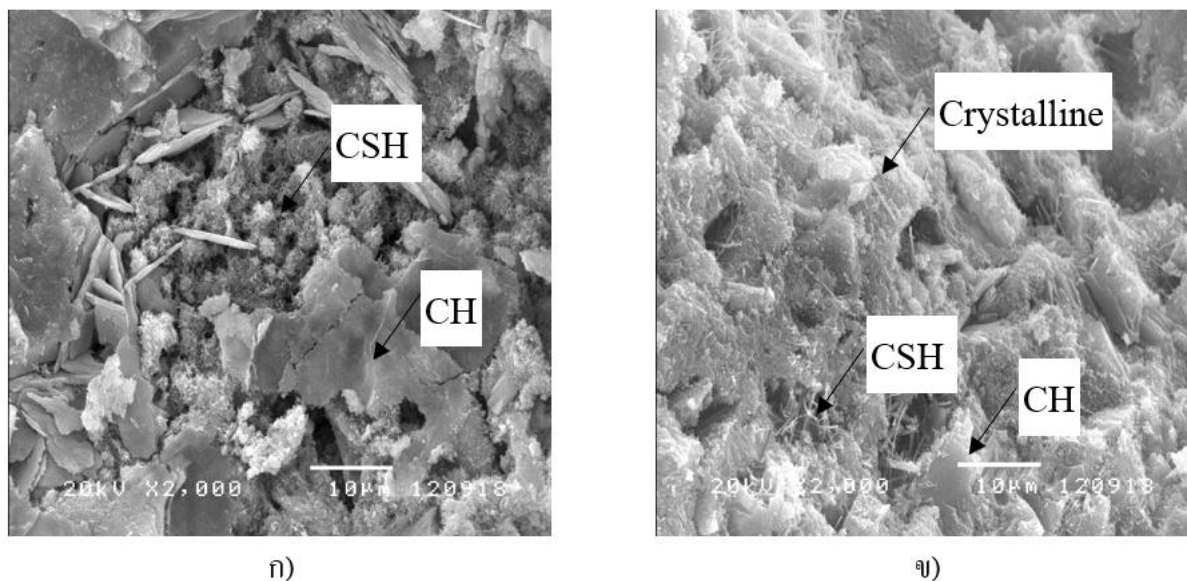
5. ลักษณะโครงสร้างจุลภาคของคอนกรีตที่ผสมวัสดุกันซึมแบบซีเมนต์ ชนิด คริสตัลไลน์

การเจาะเก็บตัวอย่างคอนกรีตเพื่อนำมาทดสอบการถ่ายภาพขยายกำลังสูงโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM) และการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค Energy Dispersive Spectrometry (EDS) โดยจะเก็บตัวอย่างบริเวณผิวที่เกิดขึ้นผลึกคริสตัลไลน์ของคอนกรีตผสมวัสดุกันซึม (Crystalline) ที่ช่วงระยะ 2.5 - 3 เซนติเมตร และตัวอย่างคอนกรีตควบคุม (Control) ก็จะเก็บในตำแหน่งเดียวกัน

5.1 การถ่ายภาพขยายกำลังสูงโดยใช้เครื่อง

Scanning Electron Microscope (SEM)

จากภาพถ่ายขยายกำลังสูงโดยใช้เครื่อง SEM แบบส่องกราด พบว่า บริเวณผิวที่เกิดผลึกคริสตัลไลน์ของคอนกรีตที่ผสมวัสดุกันซึม มีผลึกคริสตัลไลน์เกิดขึ้น และการเกิดผลึกแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (CSH) เกิดขึ้นหนาแน่นและกระจายตัวในโครงสร้างภายในมากกว่าตัวอย่างคอนกรีตควบคุม ดังแสดงในภาพที่ 11



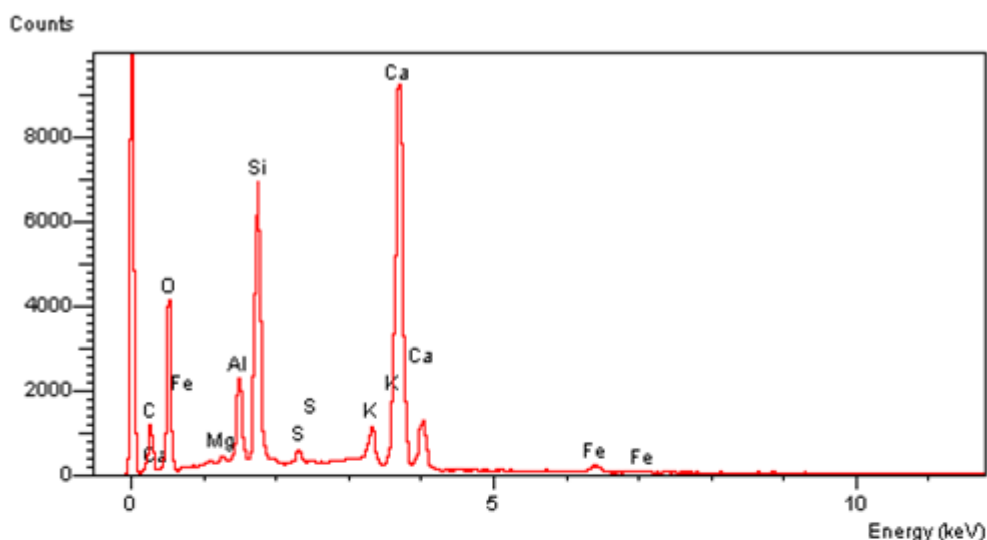
ภาพที่ 11 ภาพถ่ายขยายกำลังสูงโดยใช้เครื่อง Scanning Electron Microscope (SEM)

ก) คอนกรีตควบคุม ข) คอนกรีตผสมวัสดุกันซึม

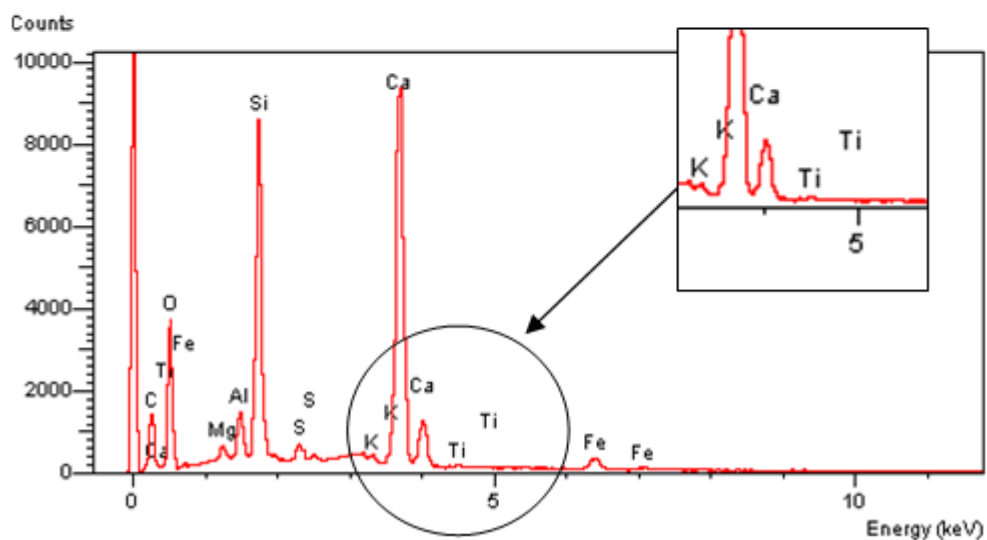
5.2 ผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค Energy Dispersive Spectrometry (EDS)

จากผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS แบบส่องกราด พบว่า คอนกรีตที่ผสมวัสดุกันซึมแบบซีเมนต์ ชนิดคริสตัลไลน์ บริเวณผิวที่เกิดผลึกพบสารประกอบไททาเนียม (Ti) ซึ่งเป็นสารประกอบโลหะทรานสิชันในปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเมอร์ และโครงสร้างผลึกคริสตัลไลน์ก็จัดอยู่ในรูปแบบพอลิเมอร์ชนิดหนึ่ง (Mandelkern, 1964; Michael *et al.*,

2016; Vanessa *et al.*, 2016) แต่ในตัวอย่างคอนกรีตควบคุม ไม่พบสารประกอบไททาเนียม (Ti) ดังแสดงในภาพที่ 12 จึงสามารถยืนยันผลทดสอบได้ว่าตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมวัสดุกันซึมมีการสร้างผลึกคริสตัลไลน์ขึ้นจริงในเนื้อคอนกรีตบริเวณผิวที่ทดสอบ และมีผลที่สอดคล้อง กับสารประกอบทางเคมีของวัสดุกันซึมแบบซีเมนต์ ชนิดคผลึกคริสตัลไลน์ ที่มีสารประกอบไททาเนียมไดออกไซด์ (Titanium dioxide : TiO_2) ผสมอยู่ร้อยละ 1.17



ก)



ข)

ภาพที่ 12 การวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค Energy Dispersive Spectrometry (EDS)

ก) คอนกรีตควบคุม (Control) ข) คอนกรีตผสมวัสดุกันซึม (Crystalline)

สรุป

ตัวอย่างที่ผสมวัสดุกันซึมมีความสามารถต้านทานการซึมผ่านของน้ำในสภาวะมีแรงดันได้มากกว่าตัวอย่างคอนกรีตควบคุม โดยมีค่าการซึมผ่านน้ำเฉลี่ยที่วัดได้อยู่ที่ 3.16 เซนติเมตร และ 7.5 เซนติเมตร ตามลำดับ ส่วนค่าความหนาของการเกิดขึ้นผลึกคริสตัลไลน์รอบๆ ผิวตัวอย่าง มีค่าความหนาประมาณ 2.5 - 3 เซนติเมตร เมื่อตัดส่วนที่เกิดผลึกออกจะมีการสร้างชั้นผลึกคริสตัลไลน์ขึ้นใหม่อีกครั้ง

หากตัวอย่างได้สัมผัสกับน้ำจากภายนอก จากภาพถ่าย SEM แบบส่องกราด พบว่า บริเวณผิวที่เกิดผลึกคริสตัลไลน์ของคอนกรีตที่ผสมวัสดุกันซึม มีผลึกคริสตัลไลน์เกิดขึ้น และการเกิดผลึกแคลเซียมซิลิเกตไฮดรอกไซด์ (CSH) เกิดขึ้นหนาแน่นและกระจายตัวในโครงสร้างภายในมากกว่าตัวอย่างคอนกรีตควบคุม และผลการวิเคราะห์ธาตุด้วยเทคนิค EDS คอนกรีตที่ผสมวัสดุกันซึมแบบซีเมนต์บริเวณผิวที่เกิดผลึก พบสารประกอบไททาเนียม (Ti) ซึ่งเป็น

สารประกอบโลหะทรานซิชันในปฏิกิริยาการสังเคราะห์พอลิเมอร์ จึงสามารถยืนยันผลทดสอบได้ว่าตัวอย่างคอนกรีตที่ผสมวัสดุกันซึมมีการสร้างผลึกคริสตัลไลน์ขึ้นจริงในเนื้อคอนกรีต ซึ่งมีผลที่สอดคล้องกับสารประกอบทางเคมีของวัสดุกันซึมแบบซีเมนต์ ชนิดตกผลึกคริสตัลไลน์ ที่มีสารประกอบไททานเนียมไดออกไซด์ผสมอยู่ร้อยละ 1.17

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบพระคุณสถาบันวิจัยวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีพระจอมเกล้าพระนครเหนือ และบริษัทเพนตรอน (ไทยแลนด์) จำกัด ที่ได้ให้การสนับสนุนทุนวิจัย และขอขอบพระคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์และสถาปัตยกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลสุวรรณภูมิ ที่สนับสนุนเครื่องมือและสถานที่จนทำให้งานวิจัยนี้สำเร็จ

เอกสารอ้างอิง

- Benthia, N. and Mindess, S. 1998. Water Permeability of Cement Paste. **Cement and Concrete Research** 19(5): 727-736.
- BS 188: Part 4. 1970. **Methods of Testing Concrete for Strength**. British Standard (BS). London, England. Available Source: <https://www.techstreet.com>, March 25, 2019.
- DIN 1048: Teil 5. 1991. **Testing Concrete, Testing of Hardened Concrete**. German Industrial Standard (DIN), Prüfverfahren für Beton, Jun, Berlin, Germany. Available Source: <https://www.beuth.de/de/norm/din-1048-5/1708160>, March 20, 2019.

- Guangyan, L., Xiaofeng, H., Jiesheng, L., Xiang, J. and Xinya, Z. 2019. Activated Chemicals of Cementitious Capillary Crystalline Waterproofing Materials and Their Self-healing Behavior. **Construction and Building Materials** 200(1): 36-45.
- José, L.G.C., Mercedes, S.M., Pedro, C., Filipe, P. and Fabiano, T. 2019. Improvement of the Concrete Permeability by Using Hydrophilic Blended Additive. **General Materials Science** 12(15): 1-12.
- Kunlong, Z., Xiaohua, Y., Rui, C. and Lixiao, X. 2019. Application of A Capillary Crystalline Material to Enhance Cement Grout for Sealing Tunnel Leakage. **Construction and Building Materials** 214: 497-505.
- Ludirdja, D., Berger, R.L. and Young, J.F. 1989. Simple Method for Measuring Water Permeability of Concrete. **ACI Materials Journal** 86(5): 433-439.
- Mandelkern, L. 1964. **Crystalline of Polymers**. Mc Graw - Hill, New York.
- Michael, C., Zhang, B.H.G. and Jun, X. 2016. A Review on Polymer Crystalline Theories. **Crystals Journal** 7(1): 1-37.
- Mindess, S., Young, J.F. and Darwin, D. 2002. **Concrete**. 20nd ed. Pearson Education, New Jersey.
- Nasiru, Z.M., Ali, K.M., Majid, Z.A.M. and Arezou, S. 2015. Waterproof Performance of Concrete: A Critical Review on Implemented Approaches. **Construction and Building Materials** 101(1): 80-90.

- Vanessa, P., Mirna, C.B., Rudy, G., Marie, F.B., Philippe, M. and Samuel, B. 2016. Polymer-Derived Si-C-Ti Systems: From Titanium Nanoparticle-Filled Polycarbosilanes to Dense Monolithic Multi-Phase Components with High Hardness. **Journal of the European Ceramic Society** 36(15): 3671-3679.
- Wongprachum, W. 2019. The Crystallization of Cement Waterproofing Coated on Concrete Surface. **The Journal of Industrial Technology** 7(2): 42-50. (in Thai)
- Zhao, F.Q., Li, H. and Liu, S.J. 2011. Preparation and Properties of An Environment Friendly Polymer-Modified Waterproof Mortar. **Construction and Building Materials** 25(5): 2635-2638.

การพัฒนาเครื่องปลูกกล้าอ้อย

Development of Sugarcane Seedling Transplanter

ฐาคุร สระทองทิ้ว และ ศิริศักดิ์ เชิดเกียรติพล *

Thakun Srathongtiw and Sirisak Choedkiatphon *

Received: 18 April 2020, Revised: 12 October 2020, Accepted: 4 November 2020

บทคัดย่อ

เครื่องปลูกกล้าอ้อยถูกพัฒนาขึ้นเพื่อปลูกต้นกล้าที่เพาะจากข้อตาอ้อย โดยระยะห่างการปลูกระหว่างต้นถูกกำหนดด้วยขนาดเส้นรอบวงของล้อส่งกำลังที่มีขนาด 120 150 และ 180 เซนติเมตร ซึ่งสามารถปลูกได้ในระยะ 40 50 และ 60 เซนติเมตร ตามลำดับ เป็นอุปกรณ์แบบสำหรับต่อพ่วงรถแทรกเตอร์ โดยใช้ผู้ปฏิบัติงาน 1 คน (ไม่รวมคนขับรถแทรกเตอร์) และสามารถปลูกได้ครั้งละ 1 แถว เครื่องปลูกอ้อยประกอบด้วย ชุดกลไกงานปลูก ชุดกลไกดันต้นกล้า ชุดเปิดร่องและกลบดิน และชุดปรับระดับความลึกการปลูก ผลทดสอบประสิทธิภาพของเครื่องปลูกอ้อยกล้าอ้อยที่ความเร็วการเดินทาง 1.34 2.00 และ 2.90 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ความลึกในการปลูก 10 และ 15 เซนติเมตร สภาวะการทำงานที่เหมาะสมของเครื่องปลูกกล้าอ้อย คือ ความเร็วการเคลื่อนที่ 1.34 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ล้อส่งกำลังขนาดเส้นรอบวง 180 เซนติเมตร (ระยะปลูก 60 เซนติเมตร) และระดับความลึกการปลูก 10 เซนติเมตร มีความสามารถในการทำงานของอุปกรณ์ 0.8 ไร่ต่อชั่วโมง และมีอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง 6.2 ลิตรต่อไร่

คำสำคัญ: เครื่องปลูกกล้าอ้อย, ข้อตาอ้อย, วิธีปลูกอ้อย

สาขาวิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน เลขที่ 1 หมู่ 6 ตำบลกำแพงแสน อำเภอกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, Kasetsart University, Kamphaengsean Campus, 1 Moo 6, Kamphaengsean, Kamphaengsean, Nakhon Pathom 73140, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): fengsrcp@ku.ac.th

ABSTRACT

Sugarcane seedling transplanter was developed for planting seedlings from the sugarcane bud. The planting distance between plants was determined by the size of the ground wheel circumference which was 120, 150 and 180 cm. It was able to grow at the distance of 40, 50 and 60 cm, respectively. The transplanter was attached behind and pulled by a tractor. It required one operator (excluding a tractor driver) and was able to plant in one row. The transplanter consisted of planting disc mechanism, bud pushing mechanism, soil opener and soil closure, and planting depth adjustment set. The efficiency of the planter was tested with traveling speed condition of 1.34, 2.00 and 2.90 km·h⁻¹ and at planting depth of 10 and 15 cm. The results showed that working speed of the tractor at 1.34 km h⁻¹, circumference of ground wheel 180 cm (planting distance at 60 cm), and planting depth of 10 cm were the optimal operating condition of the planter. The capability and the fuel consumption rate of the planter were 0.8 rai·h⁻¹ and 6.2 L·rai⁻¹, respectively.

Key words: sugarcane-seedling transplanter, sugarcane bud chip, how to plant sugarcane

บทนำ

อ้อยเป็นพืชเศรษฐกิจสำคัญชนิดหนึ่งของประเทศไทยที่มีการปลูกมากที่สุดเป็นอันดับที่ 3 รองมาจากข้าว และยางพารา โดยในปี พ.ศ. 2560 ประเทศไทยมีการส่งออกน้ำตาลสูงถึง 6,940,721.15 ตัน ซึ่งส่งออกเป็นอันดับ 2 ของโลก (Office of Cane and Sugar Board, 2017) ปัจจุบันพบว่าโรคระบาดในอ้อย ได้แก่ โรคใบขาว โรคไส้แดง โรคราสนิม เป็นต้น เป็นหนึ่งในสาเหตุสำคัญของการผลิตอ้อยที่ทำให้ได้ผลผลิตไม่เป็นตามที่ต้องการ การผลิตอ้อยพันธุ์ปลอดโรคโดยการใช้ข้อดาอ้อยในการปลูกแทนการใช้ท่อนพันธุ์จึงเป็นแนวทางหนึ่งที่สามารถลดปัญหาการเกิดโรคระบาดในอ้อยได้ (Department of Agriculture, 2012) ดังนั้นแล้วเครื่องปลูกกล้าอ้อยจึงถูกพัฒนาขึ้นเพื่อใช้ในกระบวนการปลูกอ้อยด้วยต้นกล้าอ้อยจากการเพาะในถาดโดยการใช้ข้อดา เนื่องด้วยการเพาะต้นกล้าอ้อยด้วยข้อดา มีข้อได้เปรียบหลายประการ ได้แก่ 1) ใช้ปริมาณท่อนพันธุ์ที่น้อยกว่าการปลูกอ้อยแบบปกติ โดยสามารถลดปริมาณ

พันธุ์อ้อยได้ถึง 80 % โดยน้ำหนัก 2) สามารถคัดเลือกพันธุ์อ้อยที่มีคุณภาพและตรวจสอบหรือกำจัดโรคที่ติดมากับต้นพันธุ์ได้ และ 3) การปลูกด้วยข้อดา มีปริมาณการแตกหน่อที่ดีกว่าการปลูกด้วยท่อนพันธุ์ (Radha *et al.*, 2010) ซึ่งจากการศึกษาพบว่า มีงานวิจัยที่ข้องเกี่ยวกับการพัฒนาอุปกรณ์สำหรับปลูกพืช ทั้งการปลูกอ้อยแบบใช้ข้อดาและการปลูกพืชเศรษฐกิจอื่นๆ เช่นงานวิจัยของ (Chansrakoo *et al.*, 2018) ซึ่งได้พัฒนาเครื่องปลูกสับปะรดแบบพ่วงท้ายรถแทรกเตอร์แถวคู่กว้าง 50 เซนติเมตร ระยะระหว่างต้น 35-45 เซนติเมตร ผลการทดสอบพบว่าเครื่องปลูกมีความสามารถในการทำงาน 0.63 ไร่ต่อชั่วโมง ที่ความเร็วการทำงาน 1 กิโลเมตรต่อชั่วโมง อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง 2.15 ลิตรต่อไร่ ประสิทธิภาพการปลูกประมาณ 96.05 % หน่อมีความเอียงเฉลี่ย 72.02° จากแนวระนาบ ความลึกการปลูกเฉลี่ย 16.20 เซนติเมตร ระยะห่างระหว่างต้นเฉลี่ย 34.08 เซนติเมตร (Sriwongras *et al.*, 2020) ได้พัฒนาเครื่องปลูกอ้อยแบบใหม่โดยใช้ชิ้นดาอ้อยเป็น

วัสดุปลูกและเป็นแบบต่อฟ่วงรด์แทรกเตอร์ขนาด 30 แรงม้า พบว่าเครื่องปลูกสามารถทำงานได้อย่างเหมาะสมที่ความเร็วการเคลื่อนที่ระดับเกียร์ต่ำ 3 ของรด์แทรกเตอร์ โดยที่ระดับเกียร์ต่ำดังกล่าวทำให้เครื่องปลูกมีความสามารถเชิงไร้ทางทฤษฎีเท่ากับ 1.89 ไร่ต่อชั่วโมง ค่าความสามารถเชิงไร้จริงเท่ากับ 1.25 ไร่ต่อชั่วโมง และประสิทธิภาพการทำงานเท่ากับ 66 % (Naik *et al.*, 2012) ได้พัฒนาเครื่องปลูกอ้อยแบบใช้ข้อดาแบบ 2 แถว โดยใช้วิธีการปักชำสำหรับต่อฟ่วงรด์แทรกเตอร์ขนาด 35 แรงม้า ซึ่งได้ผลการทำงานที่เหมาะสมที่ความเร็วการเดินทาง 1.4 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เปอร์เซนต์ความเสียหายของข้อดาอ้อยที่ปลูก 2.33 % สมรรถนะการทำงานของอุปกรณ์ 0.94 ไร่ต่อชั่วโมง และพบว่าสามารถประหยัดค่าใช้จ่ายและแรงงานได้ถึง 40 - 85 %

ถึงแม้ว่าเครื่องปลูกกล้าอ้อยได้ถูกพัฒนาขึ้นมาบ้างแล้วในต่างประเทศ แต่ในประเทศไทยยังไม่พบการศึกษาและงานวิจัยที่เป็นทางการเกี่ยวกับเครื่องปลูกกล้าอ้อย และเนื่องด้วยเครื่องปลูกกล้าอ้อยจากต่างประเทศนั้นมีราคาที่สูง การนำเข้ามาในประเทศไทยจึงยังไม่ค่อยเป็นที่ต้องการ เนื่องจากเกษตรกรผู้ปลูกอ้อยของไทยส่วนใหญ่เป็นเกษตรกรรายย่อย รวมถึงปัจจัยอื่นๆ เช่น ขนาดร่องปลูก ขนาดรด์แทรกเตอร์ หรือรวมไปถึงรูปแบบของอุปกรณ์ต่อฟ่วงทางการเกษตรของต่างประเทศมีความแตกต่างจากของไทย

งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาเครื่องปลูกกล้าอ้อย และศึกษาสมรรถนะการทำงานของอุปกรณ์รวมถึงการประเมินประสิทธิภาพเชิงไร้ของเครื่องปลูกกล้าอ้อยที่พัฒนา

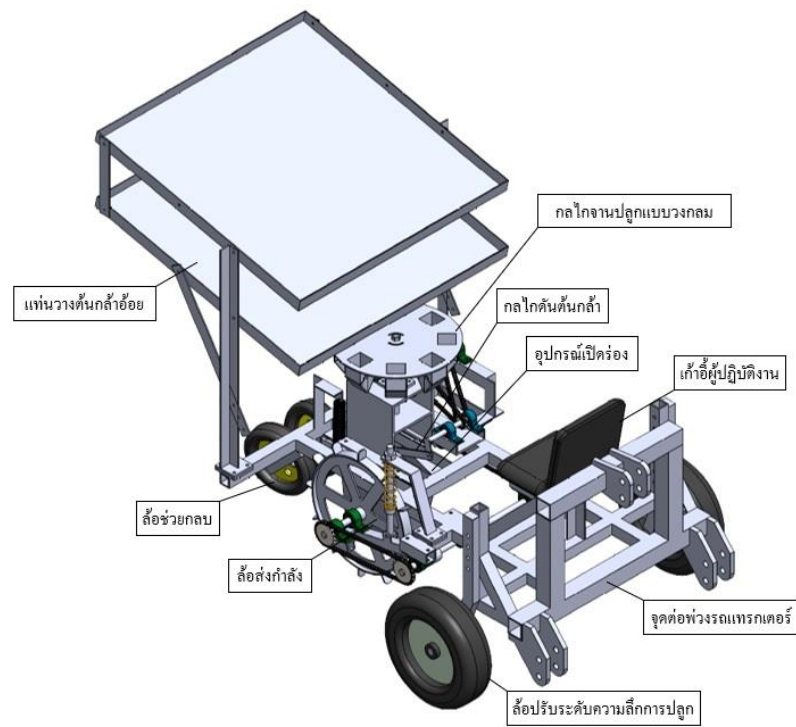
วิธีดำเนินการวิจัย

1. เครื่องปลูกกล้าอ้อย

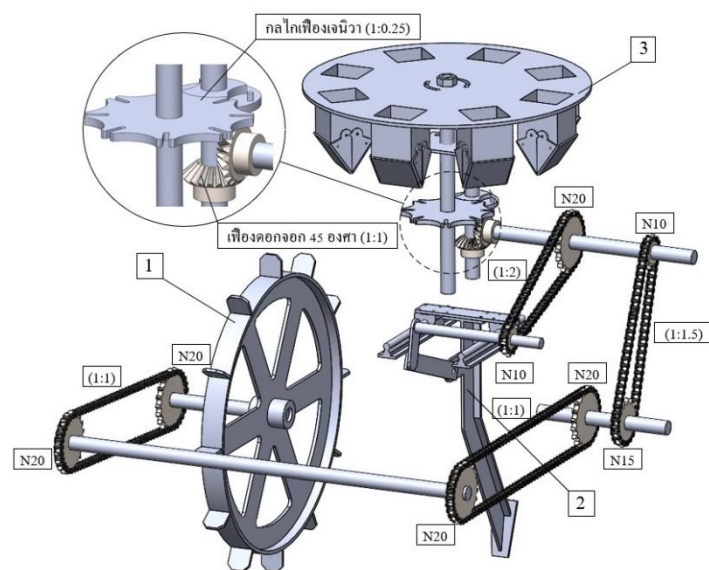
เครื่องปลูกกล้าอ้อยถูกพัฒนาเพื่อเป็นเครื่องมือทุ่นแรงทางการเกษตรสำหรับปลูกต้นกล้าอ้อยที่ได้จากการเพาะในถาดเพาะกล้า โดยล้อส่งกำลัง (Ground wheel) ถูกนำมาใช้เป็นตัวกำหนดระยะปลูกต้นกล้าอ้อย เพื่อศึกษาผลเนื่องจากการล้อส่งกำลัง 3 ขนาด ได้แก่ ล้อส่งกำลังที่มีเส้นรอบวง 120 150 และ 180 เซนติเมตร ซึ่งทำให้ระยะปลูกอ้อยเท่ากับ 40 50 และ 60 เซนติเมตร ตามลำดับ เครื่องปลูกกล้าอ้อยมีส่วนประกอบดังแสดงในภาพที่ 1 และมิกสไกการทำงานดังนี้

1.1 กลไกงานปลูกแบบวงกลม

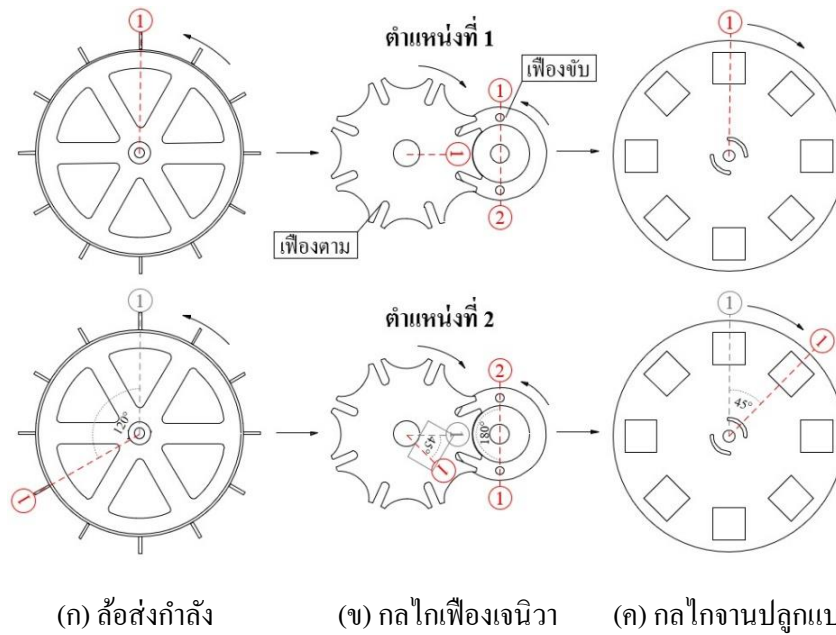
กลไกงานปลูกแบบวงกลม (ภาพที่ 2 ตำแหน่งที่ (3)) จะทำงานโดยอาศัยชุดล้อเจนิวา (Geneva wheel) ภาพที่ 3 (ข) เป็นตัวกำหนดรอบการหมุน ชุดล้อเจนิวาประกอบด้วยอุปกรณ์ 2 ตัว คือ ล้อขับเคลื่อนเส้นผ่าศูนย์กลาง 7.65 เซนติเมตร และล้อเจนิวาขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 15 เซนติเมตร ล้อขับเคลื่อนเป็นแกนหลัก 2 ตัว ที่ยึดบนล้อขับเคลื่อนโดยทำมุมห่างกัน 180° เพื่อใช้สอดเข้าไปในล้อเจนิวาให้หมุนตามจังหวะที่กำหนดได้ ดังภาพที่ 3 (ข) ตำแหน่ง 1 และ 2 โดยขณะทำงานล้อขับเคลื่อนจะหมุนตลอดแต่ล้อเจนิวาจะหมุนตามแล้วหยุดเป็นจังหวะ การหมุนของล้อขับเคลื่อน 1 รอบ จะทำให้ล้อเจนิวาหมุนเปลี่ยนตำแหน่งไป 2 จังหวะ กลไกงานปลูกแบบวงกลมถูกเชื่อมต่ออยู่บนเพลาคู่เดียวกับล้อเจนิวา โดยมีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 50 เซนติเมตร มีช่องสำหรับใส่ต้นกล้า 8 ช่อง ขนาด 7.5×7.5 เซนติเมตร² ลึก 10 เซนติเมตร ดังภาพที่ 2 ตำแหน่งที่ (3) แต่ละช่องจะมีแผ่นเหล็ก 2 แผ่น ลักษณะเป็นฝาประกบอยู่ด้านล่างสามารถเปิด - ปิดได้ (ปกติปิด) ทำหน้าที่รองรับต้นกล้าอ้อยและปล่อยต้นกล้า



ภาพที่ 1 เครื่องปลูกกล้าอ้อย



ภาพที่ 2 ระบบการส่งกำลัง

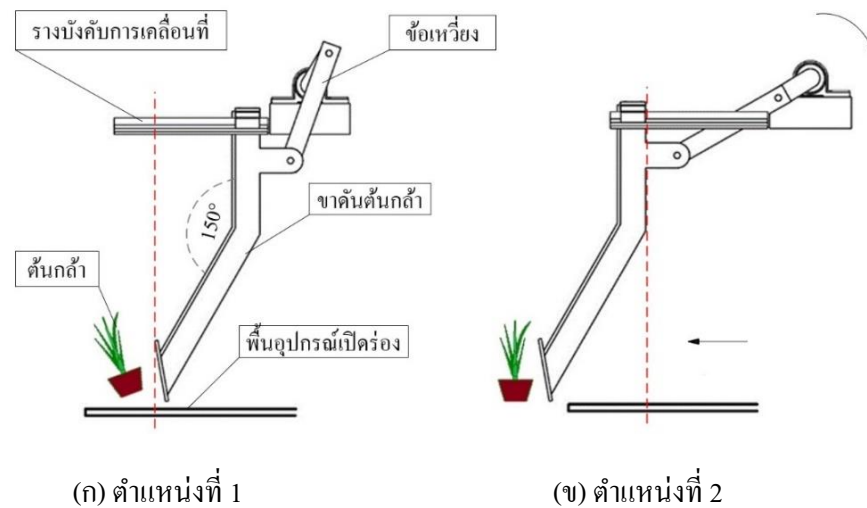


ภาพที่ 3 ความสัมพันธ์การเคลื่อนที่ของล้อส่งกำลัง กลไกเฟืองเจนิวา และกลไกงานปลูกแบบวงกลม

1.2 กลไกดันต้นกล้า

กลไกดันต้นกล้าจะมีลักษณะเป็นขาของทำมุม 150° ติดตั้งอยู่บนรางบังคับการเคลื่อนที่ โดยจะสามารถเลื่อนเข้า-ออกได้ ซึ่งใช้หลักการทำงานแบบข้อเหวี่ยง กลไกดันต้นกล้าจะทำงานสัมพันธ์กับ

กลไกงานปลูกแบบวงกลม เมื่อต้นกล้าถูกปล่อยลงมา ดังภาพที่ 4 (ก) กลไกดันต้นกล้าจะทำงานโดยผลักดันกล้าออกจนพ้นบริเวณพื้นล่างของอุปกรณ์เปิดร่องลงไปยังพื้นดินดังภาพที่ 4 (ข)



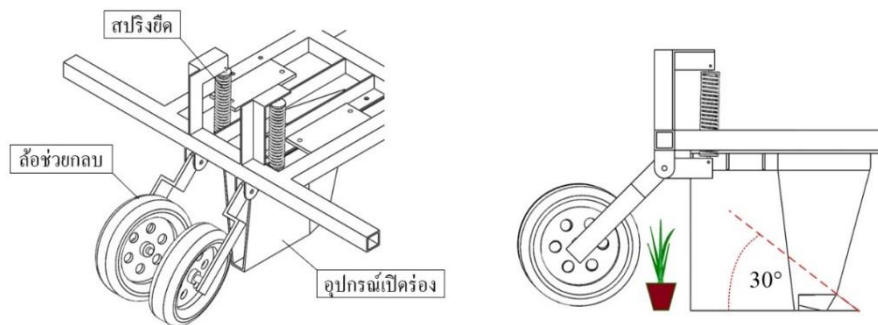
ภาพที่ 4 กลไกดันต้นกล้า

1.3 ล้อปรับระดับความลึกการปลูก

ล้อปรับระดับความลึกการปลูกจะถูกติดตั้งอยู่ทั้ง 2 ด้านของเครื่องปลูกกล้าอ้อยสามารถปรับ

ให้สูงขึ้นหรือต่ำลงได้ช่วงละ 5 เซนติเมตร ดังแสดงในภาพที่ 1 (ล้อปรับระดับความลึกการปลูก)

1.4 อุปกรณ์เปิดร่องและล้อช่วยกลบ



ภาพที่ 5 อุปกรณ์เปิดร่องและล้อช่วยกลบ

2. หลักการทำงาน

เครื่องปลูกกล้าอ้อยถูกออกแบบให้ใช้งานสำหรับต่อพ่วงรถแทรกเตอร์ ขนาด 35 แรงม้า ขึ้นไป โดยในการทดสอบใช้รถแทรกเตอร์ยี่ห้อ MASSEY-FERGUSON รุ่น 4245 ขนาด 85 hp สามารถปลูกได้ครั้งละ 1 แถว ซึ่งระยะปลูกที่ทดสอบมี 3 ระยะ คือ 40 50 และ 60 เซนติเมตร กลไกการทำงานถูกออกแบบให้การหมุนของล้อส่งกำลัง 120° ทำให้กลไกงานปลูกแบบวงกลมหมุนไป 45° ดังภาพที่ 3 (ค) หรือสามารถปลูกต้นกล้าอ้อยได้ 1 ต้น การทำงานเริ่มจากล้อส่งกำลังที่ส่งกำลังผ่านเฟืองโซ่และเพลาลูกส่งกำลังไปยังกลไกการทำงาน 2 ส่วน คือ กลไกงานปลูกแบบวงกลมและกลไกดันต้นกล้า ขณะทำงาน ผู้ปฏิบัติงานจะทำการป้อนต้นกล้าลงยังช่องของกลไกงานปลูกแบบวงกลมครั้งละ 1 ต้น กลไกงานปลูกจะหมุนพาต้นกล้าไปยังตำแหน่งปลูกและถูกปล่อยตกแบบอิสระสู่บริเวณพื้นของอุปกรณ์เปิดร่อง จากนั้นจะเป็นจังหวะที่กลไกดันต้นกล้าเคลื่อนออกและพาต้นกล้าพ้นจากพื้นของอุปกรณ์เปิดร่องลงยังพื้นดิน ซึ่งต้นกล้าจะถูกดินที่อยู่บริเวณด้านข้างของ

อุปกรณ์เปิดร่องไหลเข้ามากลบอย่างอัตโนมัติ จากนั้นล้อช่วยกลบจะทำหน้าที่ช่วยกลบดินและอัดดินบริเวณด้านข้างของต้นกล้าให้แน่นเป็นการสิ้นสุดขั้นตอนการปลูกโดยสมบูรณ์

3. แผนการทดสอบ

การประเมินผลการทดสอบเครื่องปลูกกล้าอ้อย ดำเนินการทดลองโดยพิจารณาปัจจัยดังแสดงรายละเอียดในตารางที่ 1 และวางแผนการทดลองแบบบล็อกสุ่มสมบูรณ์ (Randomized complete block design, RCBD) ศึกษาผลเนื่องจาก 3 ปัจจัย ได้แก่ ขนาดเส้นรอบวงล้อส่งกำลัง (Ground wheel diameter) 3 ระดับ ได้แก่ 120 150 และ 180 เซนติเมตร (หรือระยะปลูกที่ 40 50 และ 60 เซนติเมตร ตามลำดับ) ความเร็วการทำงาน 3 ระดับ ได้แก่ 1.34 2.00 และ 2.90 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และความลึกการปลูก 2 ระดับ ได้แก่ 10 และ 15 เซนติเมตร ที่มีต่อความคลาดเคลื่อนของระยะการปลูกจริง ความ ความเอียงต้นกล้า อัตราการปลูกสำเร็จ การสิ้นเปลืองของรถแทรกเตอร์

ตารางที่ 1 เงื่อนไขการทดสอบเครื่องปลูกกล้าอ้อย

ปัจจัย	รายละเอียด	ระดับ
1	ระยะปลูก (เซนติเมตร) (ขนาดเส้นรอบวงล้อส่งกำลัง, เซนติเมตร)	40 50 และ 60 (120 150 และ 180)
2	ความเร็วการทำงาน (กิโลเมตรต่อชั่วโมง)	1.34 2.00 และ 2.90
3	ความลึกการปลูก (เซนติเมตร)	10 และ 15
	จำนวนซ้ำ	2 ครั้ง
	การทดลองทั้งหมด	36 การทดลอง

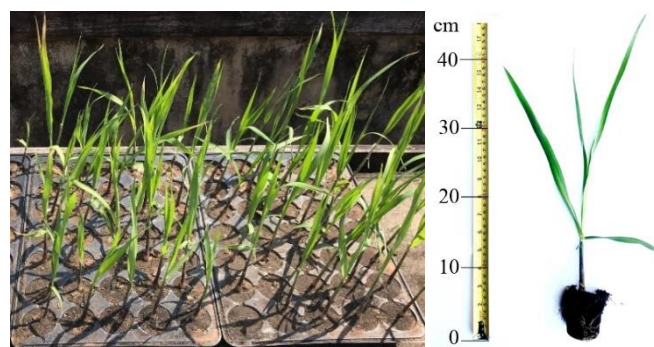
4. การเตรียมตัวอย่าง

การทดสอบใช้อ้อยสายพันธุ์ขอนแก่น 3 อายุประมาณ 8 เดือน นำมาปลูกในถาดเพาะขนาด 35 หลุม ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 5.5 เซนติเมตร ลึก 5 เซนติเมตร โดยใช้เฉพาะส่วนข้อตาในการปลูก ซึ่งจะถูกตัดบริเวณเหนือตา 2.5 เซนติเมตร และต่ำกว่าตา

2.5 เซนติเมตร ดังภาพที่ 6 ใช้ระยะเวลาปลูก 25 - 35 วัน จนต้นกล้าอ้อยมีขนาดความสูงประมาณ 30 - 35 เซนติเมตร ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางต้นประมาณ 0.8 เซนติเมตร และมีใบจำนวน 2 ใบขึ้นไป ดังแสดงในภาพที่ 7



ภาพที่ 6 ขนาดข้อตาอ้อยและลักษณะการเพาะกล้า

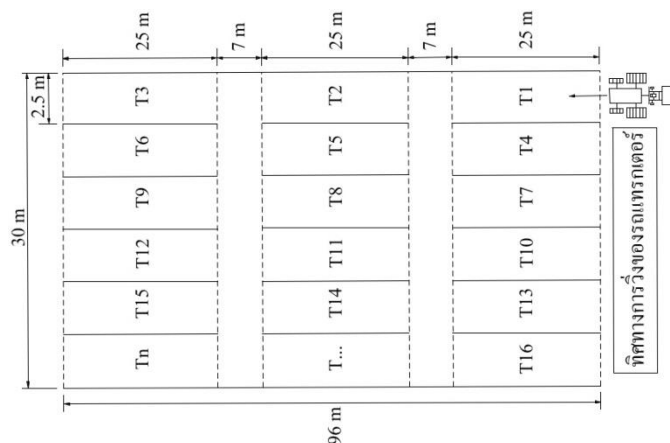


ภาพที่ 7 ต้นกล้าอ้อยอายุ 30 วัน และขนาดต้นกล้าอ้อย

5. แปลงทดสอบ

เครื่องปลูกกล้าอ้อยได้ดำเนินการทดสอบในแปลงทดลองของภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม ชนิดของดินเป็นดินร่วน (Loam) ประกอบไปด้วยอนุภาคดินทราย (Sand) 39.29 % อนุภาคดินทรายแป้ง (Silt) 45.97 % และอนุภาคดินเหนียว (Clay) 14.73 % (Kongklum, 2019)

โดยพื้นที่ที่ใช้ทดสอบจะมีขนาด 30×96 เซนติเมตร² แบ่งเป็น 3 ช่วงการทดลอง ดังภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ผังการทดสอบเครื่องปลูกกล้าอ้อย

ซึ่งใน 1 การทดลองจะใช้พื้นที่ 2.5×25 ตารางเมตร ไถเตรียมสภาพดินในแปลงทดลองโดยการไถด้วยอุปกรณ์ไถจาน (Standard disk plow) 1 เทียว และไถย่อยก่อนดินด้วยอุปกรณ์ไถพรวนแนวตั้ง (Power harrow) 2 เทียว เก็บตัวอย่างดินที่ระดับความลึกระหว่าง 5 - 10 เซนติเมตร โดยวิธีการสุ่มจำนวน 9 ตัวอย่าง เพื่อหาปริมาณความชื้นภายในดิน ขนาดของก้อนดิน และวัดค่าความต้านทานการแทงทะลุของดิน (Cone index, C.I.) โดยใช้ Cone penetrometer

6. การประเมินสมรรถนะการปลูกอ้อย

6.1 ความคลาดเคลื่อนของระยะการปลูกจริง

ความคลาดเคลื่อนของระยะการปลูกจริง (Distance error) คือ การวัดระยะห่างระหว่างต้นกล้าอ้อยจำนวน 15 ต้น ติดต่อกัน ต่อ 1 การทดลอง เทียบ

กับระยะปลูกที่ควรได้ทางทฤษฎีคือ 40 50 และ 60 เซนติเมตร ซึ่งสัมพันธ์กับขนาดของล้อส่งกำลังขนาดเส้นรอบวง 120 150 และ 180 เซนติเมตร ตามลำดับ เพอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของระยะการปลูกจริง คำนวณด้วยสมการที่ 1

$$\% \text{Distance error} = \frac{S_t - S_s}{S_t} \times 100 \quad (1)$$

โดย S_t = ระยะห่างต้นกล้าทางทฤษฎี (เซนติเมตร)

S_s = ระยะห่างต้นกล้าจริง (เซนติเมตร)

6.2 ความเอียงของต้นกล้า

ความเอียงของต้นกล้า (Tilt angle) คือ การวัดมุมของต้นกล้าเอียงที่กระทำกับแนวตั้งฉาก จำนวน 15 ต้น ติดต่อกัน ต่อ 1 การทดลอง โดยกำหนดให้ความเอียงของต้นกล้าเอียงที่ควรเป็นต้องน้อยกว่าหรือเท่ากับ 45°

6.3 อัตราการปลูกสำเร็จ

อัตราการปลูกสำเร็จ (Success rate) คือ จำนวนต้นกล้าที่ถูกปลูกได้ทั้งหมดต่อ 1 การทดลอง

$$\% \text{Success} = \frac{N_s}{N_t} \times 100\% \quad (2)$$

โดย N_s = จำนวนต้นกล้าที่ปลูกได้จริง

N_t = จำนวนต้นกล้าที่ปลูกได้ทางทฤษฎี

6.4 การลื่นไถลของรถแทรกเตอร์

การลื่นไถลของล้อรถ (Wheel slip) จะเกิดขึ้นขณะล้อรถแทรกเตอร์เคลื่อนที่โดยลากอุปกรณ์ที่มีแรงฉุดลาก ทำให้ระยะทางการเคลื่อนที่ลดลงกว่าการเคลื่อนที่โดยไม่มีแรงฉุดลาก การหา

$$\% \text{Slip} = \frac{A-B}{B} \times 100 \quad (3)$$

โดย A = ระยะการเคลื่อนที่ขณะไม่มีภาระ (เมตร)

B = ระยะการเคลื่อนที่ขณะมีภาระ (เมตร)

6.5 ความสามารถในการทำงานจริงเชิงพื้นที่
ความสามารถในการทำงานจริงเชิงพื้นที่ (Effective field capacity) หาได้จากการกำหนดแปลงทดสอบขนาด 10×80 ตารางเมตร ภาพที่ 9 และทำ

$$C_a = \frac{A}{T_t} \times 100 \quad (4)$$

โดย C_a = อัตราการทำงานเชิงไร่ (ไร่ต่อชั่วโมง)

A = พื้นที่การทำงาน (ไร่)

T_t = เวลาในการทำงานทั้งหมด (ชั่วโมง)

เปรียบเทียบกับจำนวนต้นกล้าที่ปลูกได้ทางทฤษฎีในระหว่างการปลูก 25 เมตร ซึ่งทางทฤษฎีจะมีจำนวนต้นกล้าต่อระยะปลูก 40 50 และ 60 เซนติเมตร เท่ากับ 63 50 และ 42 ต้น ตามลำดับ โดยต้นกล้าที่ถูกปลูกสำเร็จนั้นจะมีเงื่อนไขคือ บริเวณส่วนโคนของต้นกล้าจะต้องถูกดินกลบแบบสมบูรณ์ แต่จะไม่คำนึงถึงความคลาดเคลื่อนของระยะการปลูกและความเอียงของต้นกล้าเอียง สามารถคำนวณหาอัตราการปลูกสำเร็จได้จากสมการที่ 2

เปอร์เซ็นต์การลื่นไถลหาจากการวัดระยะของรอบล้อขณะที่ต่ออุปกรณ์ที่มีแรงฉุดลากและขณะที่ไม่มีแรงฉุดลาก โดยจะทำการวัดระยะทางจำนวน 4 รอบการหมุนของล้อรถแทรกเตอร์ คำนวณเปอร์เซ็นต์การลื่นไถลได้จากสมการที่ 3 (RNAM, 1983)

การปลูกกล้าเอียงที่ระยะห่างระหว่างแถว 1.65 เมตร จับเวลาขณะเริ่มทำงานจนครบพื้นที่ทดสอบ ซึ่งสามารถหาอัตราการทำงานเชิงไร่ได้จากสมการที่ 4 (RNAM, 1983)

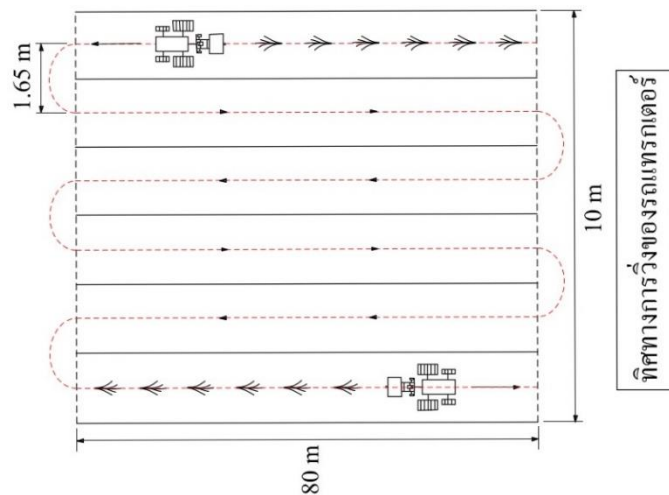
6.6 การหาอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิง
อัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน (Fuel consumption)
โดยก่อนการทดสอบเพื่อหาอัตราการทำงานเชิงไร
จะต้องทำการเติมน้ำมันให้เต็มถังรถแทรกเตอร์ก่อน
การทดสอบ จากนั้นทำเครื่องหมายตำแหน่งความสูง
ของระดับของน้ำมันไว้ เมื่อการทดสอบเสร็จสิ้นทำ

การตวงน้ำมันใส่หลอดตวงขนาด 5 ลิตร แล้วเติมให้
น้ำมันให้เท่ากับระดับที่ทำเครื่องหมายไว้ก่อนการ
ทดสอบจะได้ปริมาณน้ำมันที่ถูกใช้ไปทั้งหมด ซึ่ง
สามารถหาอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันเชื้อเพลิงได้จาก
สมการที่ 5 (RNAS, 1983)

$$\text{Fuel consumption (L}\cdot\text{rai}^{-1}) = \frac{M_t}{A} \times 100 \quad (5)$$

โดย M_t = ปริมาณน้ำมันเชื้อเพลิง (ลิตร)

A = พื้นที่การทำงาน (ไร่)



ภาพที่ 9 ผังการทดสอบหาอัตราการทำงานเชิงไร

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

สภาพของดินก่อนการทดสอบพบว่า มี
ปริมาณความชื้นเท่ากับร้อยละ 18.13 (มาตรฐานแห้ง)
ขนาดของก้อนดินเฉลี่ยเท่ากับ 1.33 เซนติเมตร และ
ความต้านทานการแทงทะลุของดินที่ระดับความลึก
10 15 และ 20 เซนติเมตร เท่ากับ 1.11 0.97 และ 1.10
เมกกะปาสกาล ตามลำดับ

1. ผลการทดสอบสภาวะการทำงานที่เหมาะสม

การวิเคราะห์ผลของปัจจัยในการทดลอง
ได้แก่ ระยะปลูก ความเร็วการเคลื่อนที่ และความลึก
การปลูก ได้ผลดังนี้

1.1 ระยะปลูก

เมื่อพิจารณาผลเนื่องจากปัจจัยระยะปลูกดัง
แสดงในตารางที่ 2 และภาพที่ 10 พบว่าที่ระยะปลูก
40 50 และ 60 เซนติเมตร (ล้อย่างกำลังขนาดเส้นรอบ
วง 120 150 และ 180 เซนติเมตร ตามลำดับ)
ความคลาดเคลื่อนของระยะปลูกจริง 88.92 ± 72.71^b
 52.64 ± 28.64^a และ 33.70 ± 17.69^a เปอร์เซ็นต์
ตามลำดับ เห็นได้ว่าที่ขนาดเส้นรอบวงล้อย่างกำลัง
180 เซนติเมตร ค่าเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของ
ระยะการปลูกจริงน้อยที่สุด เหตุผลเนื่องจากขณะที่
ล้อย่างกำลังที่มีขนาดใหญ่หมุนส่งกำลังนั้นทำให้

กลไกงานปลุกและกลไกกลไกคันดันกล้าของเครื่องปลุกกล้าอ้อยคันแบบทำงานสัมพันธ์กันดีที่สุด คนป้อนต้นกล้าอ้อยบนจานปลุกสามารถทำงานได้อย่างสอดคล้องกับความเร็วการหมุนของจานปลุก อย่างไรก็ตามผลวิเคราะห์ทางสถิติแสดงให้เห็นว่าระยะการปลุกจริงกรณีล้อยส่งกำลังขนาดเส้นรอบวง 150 และ 180 เซนติเมตร มีความคลาดเคลื่อนของระยะปลุกจริงไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

จำนวนต้นกล้าที่เอียงมากกว่า 45° ที่ระยะการปลุก 40 50 และ 60 เซนติเมตร (ตารางที่ 2) ผลการวิเคราะห์ทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 พบว่าจำนวนต้นกล้าที่เอียงมากกว่า 45° เท่ากับ 31.67 ± 25.48^b , 18.35 ± 17.15^a และ 12.67 ± 9.70^a เปอร์เซ็นต์ตามลำดับ ซึ่งแสดงให้เห็นว่าที่ขนาดเส้นรอบวงล้อยส่งกำลัง 180 เซนติเมตร มีจำนวนต้นกล้าที่เอียงมากกว่า 45° น้อยที่สุด เมื่อเปรียบเทียบกับล้อยส่งกำลังขนาดเส้นรอบวง 120 และ 150 เซนติเมตร อย่างมีนัยสำคัญ

อัตราการปลุกสำเร็จ (ตารางที่ 2) แสดงให้เห็นว่าที่เงื่อนไขระยะการปลุก 60 เซนติเมตร เครื่องปลุกกล้าอ้อยปลุกกล้าอ้อยด้วยอัตราการปลุกสำเร็จสูงสุดนั่นคือ 69.24 ± 11.23 เปอร์เซ็นต์ ในขณะที่เงื่อนไขระยะปลุก 40 และ 60 เซนติเมตร ปลุกอ้อยด้วยอัตราการปลุกอ้อยสำเร็จ 50.13 ± 20.52 และ 60.83 ± 14.71 เปอร์เซ็นต์ ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าล้อยส่งกำลังขนาดเส้นรอบวงขนาด 180 เซนติเมตร ปลุกอ้อยสำเร็จสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับการใช้ล้อยส่งกำลังขนาดเส้นรอบวง 120 และ 150 เซนติเมตร อย่างมีนัยสำคัญ

เมื่อพิจารณาผลการทดสอบปัจจัยระยะการปลุก 40 50 และ 60 เซนติเมตร ที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของระยะปลุกจริง จำนวนต้นกล้าที่เอียงมากกว่า 45° และอัตราการปลุกสำเร็จ แสดงให้

เห็นอย่างชัดเจนว่าอุปกรณ์คันแบบเครื่องปลุกกล้าอ้อยปลุกอ้อยได้ดีที่สุดด้วยล้อยส่งกำลังขนาดเส้นรอบวง 180 เซนติเมตร สาเหตุเพราะล้อยส่งกำลังที่มีขนาดใหญ่กว่าจะส่งผลให้กลไกงานปลุก กลไกคันดันกล้า และคนป้อนต้นกล้าทำงานได้อย่างสัมพันธ์กัน อีกทั้งในการปลุกอ้อยยังมีปัจจัยอื่นๆ ที่ส่งผลต่อความสำเร็จในการปลุก ได้แก่ ความเร็วในการย้ายต้นกล้าป้อนใส่ช่องบนจานปลุก จังหวะการเปิด-ปิดช่องปล่อยต้นกล้าอ้อย และลักษณะดินที่ติดสะสมที่ตำแหน่งปลายกลไกคันดันกล้า (ได้แก่ ขนาดก้อนดิน ชนิดดิน และปริมาณความชื้นดิน ล้วนส่งผลต่อความสมบูรณ์ในการทำงานของกลไกคันดันกล้า) และเห็นได้ว่าเมื่อความเร็วการเคลื่อนที่เพิ่มขึ้นก็จะส่งผลให้ผู้ปฏิบัติงานต้องทำงานเร็วขึ้นจึงเกิดความผิดพลาดในการป้อนต้นกล้าอ้อย ซึ่งสอดคล้องกับการทำลองของ (Suggs, 1979; Way and Wrigh, 1987) ด้วยเหตุนี้เมื่อใช้ล้อยส่งกำลังที่มีขนาดเล็กลง (ล้อยส่งกำลังขนาดเส้นรอบวง 120 และ 150 เซนติเมตร ที่ระยะปลุก 40 และ 60 เซนติเมตร ตามลำดับ) ก็จะส่งผลให้ทั้งกลไกงานปลุกและกลไกคันดันต้นกล้าทำงานด้วยความเร็วที่เพิ่มขึ้นเป็นผลทำให้ความสำเร็จในการปลุกต้นกล้าอ้อยลดลง

การสิ้นเปลืองของรถแทรกเตอร์ แสดงให้เห็นว่ามีการนุดลากรรถแทรกเตอร์ขณะเครื่องกำลังปลุกกล้าอ้อย โดยพบว่าที่ระยะการปลุก 40 50 และ 60 เซนติเมตร ส่งผลทำให้เกิดการสิ้นเปลือง 3.16 $\pm$ 2.76^b 0.71 $\pm$ 1.28^a และ 0.42 $\pm$ 0.77^a พบว่าการใช้ล้อยส่งกำลังขนาดเส้นรอบวง 120 เซนติเมตร (ระยะปลุก 40 เซนติเมตร) ก่อให้เกิดแรงนุดลากรรถแทรกเตอร์สูงอย่างมีนัยสำคัญ สาเหตุเพราะในขณะที่อุปกรณ์ทำงานพร้อมกับล้อยส่งกำลังที่มีขนาดเล็ก จะส่งผลทำให้กลไกปลุกกล้าอ้อยทำงานด้วยความเร็วสูงส่งผลทำให้เกิดการสะสมของดินบริเวณปลายกลไกคันดันกล้าจนกระทั่งกลไกคันดันกล้าหยุดทำงานในบาง

จังหวะ การสะสมดินในกลไกดังกล่าวก่อให้เกิดแรงเสียดทานขณะปลูกเพิ่มขึ้นเป็นสาเหตุทำให้แรงฉุดลากเพิ่มขึ้น และเป็นสาเหตุทำให้เปอร์เซ็นต์การสิ้นไถลเพิ่มขึ้น

1.2 ความเร็วการเคลื่อนที่

ตารางที่ 2 และภาพที่ 11 แสดงให้เห็นว่าเมื่อเครื่องกำลังปลูกต้นกล้าอ้อยที่ความเร็วการเดินทางเพิ่มขึ้นส่งผลทำให้ค่าความคลาดเคลื่อนของระยะปลูกจริงและจำนวนต้นกล้าที่เอียงมากกว่า 45° เพิ่มขึ้น โดยพบว่าที่ความเร็วการเดินทาง 1.34 2.00 และ 2.90 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ส่งผลทำให้เกิดความคลาดเคลื่อนของระยะปลูกจริง 32.54 ± 15.93^a 48.37 ± 38.04^a และ 94.34 ± 64.72^b เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ และจำนวนต้นกล้าที่เอียงมากกว่า 45° เท่ากับ 6.58 ± 7.97^a 23.76 ± 18.13^b และ 32.35 ± 21.85^b เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ในขณะที่ความเร็วการเดินทาง 1.34 2.00 และ 2.90 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ได้อัตราการปลูกสำเร็จเท่ากับ 71.78 ± 7.63^c 60.22 ± 16.55^b และ 48.20 ± 18.12^a เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เห็นได้ว่าเมื่อความเร็วการทำงานเพิ่มขึ้นความสำเร็จในการปลูกอ้อยลดลงอย่างมีนัยสำคัญ และพบว่าแทรกเตอร์เกิดการสิ้นไถลสูงสุดขณะเครื่องปลูกกล้าอ้อยทำงานที่ความเร็วการเดินทางน้อยที่สุด (1.34 กิโลเมตรต่อชั่วโมง) อย่างมีนัยสำคัญ เนื่องด้วยที่ความเร็วการเดินทางช้าเครื่องปลูกกล้าอ้อยสามารถปลูกอ้อยได้อย่างสม่ำเสมอ ขณะที่รถแทรกเตอร์วิ่งทำงานที่ความเร็วสูงทำให้เกิดการสั่นโยกในแนวดิ่งของเครื่องปลูกกล้าอ้อยส่งผลทำให้ความลึกการปลูกไม่สม่ำเสมอและทำให้ปลูกกล้าอ้อยที่ความลึกน้อยลงเป็นสาเหตุทำให้แรงฉุดลากลดลงเป็นสาเหตุทำให้เปอร์เซ็นต์การสิ้นไถลของรถแทรกเตอร์น้อยลง

จากผลการทดลองเห็นได้ว่าเงื่อนไขการทดสอบความเร็วการเดินทาง 1.34 กิโลเมตรต่อ

ชั่วโมง เป็นความเร็วการทำงานที่เหมาะสมที่สุดสำหรับเครื่องปลูกกล้าอ้อยที่พัฒนา

1.3 ความลึกการปลูก

ปัจจัยความลึกการปลูกกล้าอ้อยที่ความลึกการปลูก 10 และ 15 เซนติเมตร เมื่อพิจารณาผลการวิเคราะห์ทางสถิติ (ตารางที่ 2 และภาพที่ 12) ปรากฏว่ามีความคลาดเคลื่อนของระยะการปลูกจริง 51.82 ± 44.57^a และ 65.02 ± 56.45^a ตามลำดับ จำนวนต้นกล้าที่เอียงมากกว่า 45° เท่ากับ 18.88 ± 14.37^a และ 22.91 ± 24.30^a ตามลำดับ และการสิ้นไถลของรถแทรกเตอร์ 1.59 ± 2.94^a และ 1.27 ± 0.92^a ตามลำดับ ซึ่งระดับความลึกไม่ส่งผลให้ค่าเหล่านี้แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 อย่างไรก็ตามที่ระดับความลึกการปลูก 10 และ 15 เซนติเมตร ส่งผลทำให้ได้ค่าอัตราการปลูกสำเร็จ 64.34 ± 15.77^b และ 55.80 ± 18.34^a ตามลำดับ ซึ่งแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ดังนั้นจะเห็นได้ว่าความลึกการปลูก 10 เซนติเมตร เป็นความลึกการปลูกที่เหมาะสมสำหรับเครื่องปลูกกล้าอ้อยที่พัฒนา

1.4 อิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยระยะปลูก ความเร็วการเคลื่อนที่ และความลึกการปลูก

เมื่อวิเคราะห์ผลของอิทธิพลร่วม 2 ปัจจัยพบว่าระยะปลูกกับความเร็วการเคลื่อนที่มีผลทำให้เปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของระยะการปลูกและเปอร์เซ็นต์การสิ้นไถลของรถแทรกเตอร์แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ความเชื่อมั่น 95% เมื่อพิจารณาผลของเปอร์เซ็นต์ความคลาดเคลื่อนของระยะการปลูก พบว่าความเร็วการเคลื่อนที่ที่ส่งผลในระยะปลูก 40 เซนติเมตร มีความแตกต่างกันในทุกความเร็ว และที่ระยะปลูก 50 เซนติเมตร พบว่ามีความแตกต่างกันในความเร็วการเคลื่อนที่ 1.34 กิโลเมตรต่อชั่วโมง กับ 2.90 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เมื่อพิจารณาผลของเปอร์เซ็นต์การสิ้นไถลของรถแทรกเตอร์ พบว่าความเร็วการเคลื่อนที่ที่ส่งผลใน

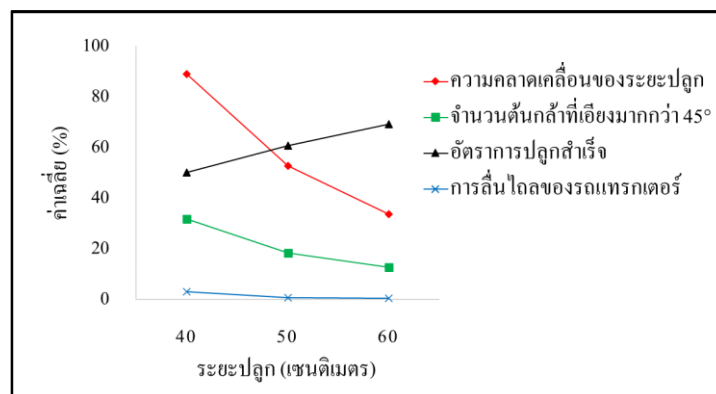
ระยะปลูก 40 เซนติเมตร มีเปอร์เซ็นต์การขึ้นไถลของรถแทรกเตอร์แตกต่างกันในทุกความเร็วการเคลื่อนที่ และในระยะปลูก 50 เซนติเมตร พบว่ามี มีเปอร์เซ็นต์การขึ้นไถลของรถแทรกเตอร์แตกต่างกัน ที่ความเร็วการเคลื่อนที่ 1.34 กิโลเมตรต่อชั่วโมง กับ

2.90 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และความเร็วการเคลื่อนที่ 2.00 กิโลเมตรต่อชั่วโมง กับ 2.90 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ส่วนการวิเคราะห์ผลของอิทธิพลร่วม 3 ปัจจัย พบว่าทั้ง 3 ปัจจัย ไม่ส่งผลร่วมกัน

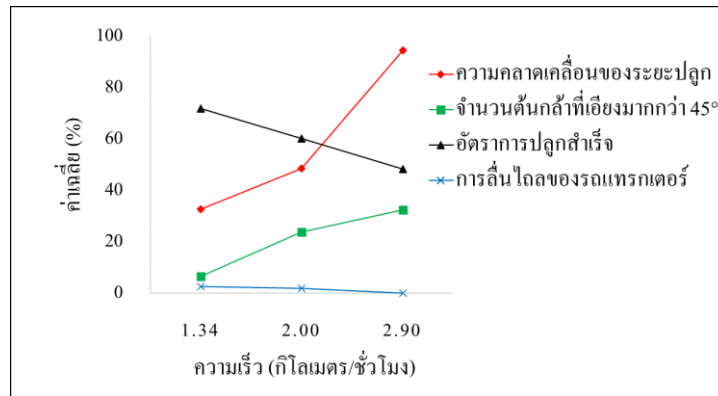
ตารางที่ 2 แสดงค่าเฉลี่ยความคลาดเคลื่อนของระยะการปลูกจริง จำนวนต้นกล้าที่มีความเอียงมากกว่า 45° อัตราการปลูกสำเร็จและการขึ้นไถลของรถแทรกเตอร์ ในแต่ละปัจจัยการทดลอง

เงื่อนไขการทดลอง		ความคลาดเคลื่อนของ ระยะการปลูกจริง (เฉลี่ย)	จำนวนต้นกล้าที่เอียง มากกว่า 45° (เฉลี่ย)	อัตราการปลูก สำเร็จ (เฉลี่ย)	การขึ้นไถลของรถ แทรกเตอร์ (เฉลี่ย)
		%	%	%	%
ระยะปลูก (เซนติเมตร)	40.00	88.92±72.71 ^b	31.67±25.48 ^b	50.13±20.52 ^a	3.16±2.76 ^b
	50.00	52.64±28.64 ^a	18.35±17.15 ^a	60.83±14.71 ^b	0.71±1.28 ^a
	60.00	33.70±17.69 ^a	12.67±9.70 ^a	69.24±11.23 ^c	0.42±0.77 ^a
ความเร็ว	1.34	32.54±15.93 ^a	6.58±7.97 ^a	71.78±7.63 ^c	2.44±2.80 ^b
การเดินทาง (กิโลเมตรต่อ ชั่วโมง)	2.00	48.37±38.04 ^a	23.76±18.13 ^b	60.22±16.55 ^b	1.81±1.55 ^b
	2.90	94.34±64.72 ^b	32.35±21.85 ^b	48.20±18.12 ^a	0.04±1.06 ^a
ความลึกการ ปลูก (เซนติเมตร)	10.00	51.82±44.57 ^a	18.88±14.37 ^a	64.34±15.77 ^b	1.59±2.94 ^a
	15.00	65.02±56.45 ^a	22.91±24.30 ^a	55.80±18.34 ^a	1.27±0.92 ^a

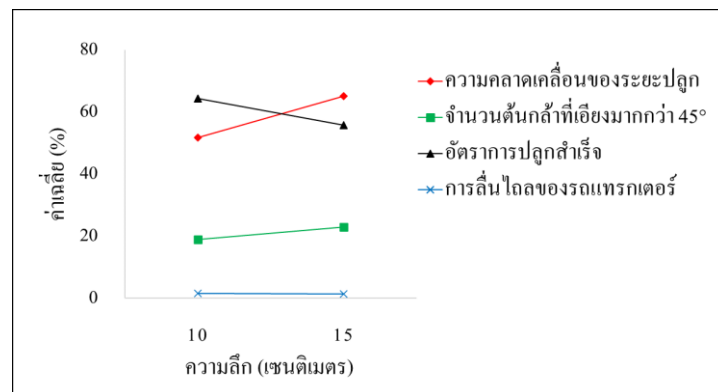
หมายเหตุ ตัวอักษรภาษาอังกฤษที่เหมือนกันในคอลัมน์เดียวกันของแต่ละปัจจัยแสดงว่าผลการทดลองไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่น 95 %



ภาพที่ 10 ค่าเฉลี่ยเมื่อวิเคราะห์ที่ปัจจัยระยะปลูก



ภาพที่ 11 ค่าเฉลี่ยเมื่อวิเคราะห์ที่ปัจจัยความเร็วการเดินทาง



ภาพที่ 12 ค่าเฉลี่ยเมื่อวิเคราะห์ที่ปัจจัยความลึกการปลูก

จากผลการทดสอบพบว่ายังมีปัจจัยที่ส่งผลต่อความคลาดเคลื่อนของระยะการปลูก ความเอียงของต้นกล้าอ้อย อัตราการปลูกสำเร็จรวมถึงการสิ้นเปลืองของรถแทรกเตอร์ ดังนี้

1) ปริมาณความชื้นในดินแต่ละตำแหน่งของแปลงทดสอบมีความแตกต่างกันมาก ซึ่งส่งผลต่อการทดสอบคือ ต้นกล้าอ้อยจะไม่ถูกกลบโดยสมบูรณ์เนื่องจากก้อนดินที่มีความชื้นสูงจะเกิดการยึดเกาะกันและไม่สามารถเคลื่อนเข้ามากลบต้นกล้าได้ เปอร์เซ็นต์การสิ้นเปลืองของรถแทรกเตอร์เพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณความชื้นในดินมาก เนื่องจากการยึดเกาะกันของก้อนดินส่งผลทำให้เกิดแรงปฏิกิริยาที่กระทำต่ออุปกรณ์เปิดร่องมากขึ้น

2) สภาพพื้นที่แปลงทดสอบไม่สม่ำเสมอหรือขนาดก้อนดินมีขนาดต่างกัน ทำให้บริเวณพื้นที่ผิวรอบนอกของล้อส่งกำลังซึ่งเป็นตัวกำหนดระยะ

ปลูก ไม่สัมผัสกับผิวดินได้ทั้งหมดจึงทำให้มีระยะการปลูกที่คลาดเคลื่อน

3) ขนาดของความสูงต้นกล้าอ้อยที่ต่างกัน มีผลในขั้นตอนการปลูดย้ายต้นกล้า เนื่องจากการปลูดย้ายอย่างอิสระทำให้ต้นกล้าที่มีความสูงไม่สามารถหล่นพ้นจากกลไกงานปลูกแบบวงกลมได้ทัน ส่วนต้นกล้าที่มีขนาดความสูงน้อยเมื่อตกลงยังร่องปลูกจะถูกกลบจนมิด

4) ความผิดพลาดของอุปกรณ์ขณะทำงานเนื่องจากขณะที่กลไกดันกล้าทำงานในจังหวะเลื้อยกลับ ดินบริเวณด้านข้างอุปกรณ์เปิดร่องจะไหลเข้ามากลบต้นกล้าโดยอัตโนมัติซึ่งทำให้ก้อนดินบางส่วนถูกดึงกลับเข้าไปในอุปกรณ์เปิดร่อง จึงทำให้เกิดการทำงานที่ติดขัดในบางจังหวะ

2. ผลการทดสอบประสิทธิภาพการทำงาน

จากการทดสอบอัตราการทำงานเชิงไร่ของเครื่องปลูกกล้าอ้อย ได้ทำการทดสอบที่เงื่อนไขระยะปลูก 60 เซนติเมตร ความเร็วการเคลื่อนที่ 1.34 กิโลเมตรต่อชั่วโมง ความลึกการปลูก 10 เซนติเมตร พบว่าเครื่องปลูกกล้าอ้อยสามารถทำงานได้ในอัตรา 0.8 ไร่ต่อชั่วโมง และมีอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน 6.2

ลิตรต่อไร่ ซึ่งจะเห็นได้ว่าเป็นอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมันที่สูงเมื่อเทียบกับงานวิจัยการพัฒนาเครื่องปลูกสับประดแบบพ่วงท้ายรถแทรกเตอร์แถวคู่ของ (Chansrakoo *et al.*, 2018) ที่มีอัตราการสิ้นเปลืองน้ำมัน 2.15 ลิตรต่อไร่ เนื่องจากการทดสอบเครื่องปลูกกล้าอ้อยใช้รถแทรกเตอร์ที่มีขนาดใหญ่และกำลังแรงม้าสูงกว่ามาก



ภาพที่ 13 ลักษณะการทำงานของเครื่องปลูกกล้าอ้อย

สรุป

ในการศึกษาและพัฒนาเครื่องปลูกกล้าอ้อยภายใต้เงื่อนไขการทดลองที่ระยะปลูก 3 ระยะ คือ 40 50 และ 60 เซนติเมตร (ขนาดเส้นรอบวงของล้อส่งกำลัง 3 ขนาด ได้แก่ 120 150 และ 180 เซนติเมตร ตามลำดับ) ความเร็วการเดินทางของรถแทรกเตอร์ต่างกัน 3 ระดับ คือ 1.34 2.00 และ 2.90 กิโลเมตรต่อชั่วโมง และความลึกในการปลูก 2 ระดับ คือ 10 และ 15 เซนติเมตร พบว่า

1. ล้อส่งกำลังเส้นรอบวง 180 เซนติเมตร (ระยะปลูก 60 เซนติเมตร) เป็นขนาดล้อส่งกำลังที่เหมาะสมที่สุด และความเร็วในการทำงานที่เหมาะสมที่สุดคือ 1.34 กิโลเมตรต่อชั่วโมง เนื่องด้วยขณะที่เครื่องกำลังปลูกกล้าอ้อยเกิดความคลาดเคลื่อนของระยะปลูกจริงและจำนวนต้นกล้าอ้อยที่เอียงมากกว่า 45° น้อย และมีอัตราการปลูกอ้อยสำเร็จสูง

เมื่อเปรียบเทียบกับล้อส่งกำลังขนาดเส้นรอบวง 120 และ 150 เซนติเมตร (ระยะปลูก 40 และ 50 เซนติเมตร ตามลำดับ)

2. เครื่องปลูกกล้าอ้อยที่พัฒนาสามารถปลูกอ้อยได้อย่างสม่ำเสมอที่ความลึกการปลูก 10 เซนติเมตร เนื่องจากมีอัตราการปลูกอ้อยสำเร็จสูงกว่าการปลูกอ้อยที่ความลึกการปลูก 15 เซนติเมตร

3. สมรรถนะการทำงานเชิงไร่ของเครื่องปลูกกล้าอ้อยขณะปลูกอ้อยด้วยล้อส่งกำลังขนาดเส้นรอบวง 180 เซนติเมตร ความเร็วการเดินทาง 1.34 กิโลเมตร และความลึกการปลูก 10 เซนติเมตร พบว่ามีสมรรถนะการทำงานเชิงไร่ 0.8 ไร่ต่อชั่วโมง และปริมาณการใช้น้ำมันเชื้อเพลิง 6.2 ลิตรต่อไร่

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนจากสำนักงานกองทุนสนับสนุนการวิจัย (สกว.) โครงการวิจัย “เครื่องปลูกอ้อยแบบใช้ข้อตาเพื่อการผลิตพันธุ์อ้อยสะอาด” รหัสโครงการ RDG62T0090 และขอขอบคุณ คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่ให้ทุนสนับสนุนการนำเสนอผลงานวิจัย และภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ที่สนับสนุนอุปกรณ์วัด เครื่องมือทดสอบ และสถานที่ทำการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- Chansrakoo, W., Arsawang, S., Wannaronk, K., Yothatoon, T., Chantongon, P. and Panpoom, A. 2018. Development Pineapple Transplanter Attached with Tractor. **Agricultural Science** 49(1): 207-212. (in Thai)
- Kongklum, R. 2019. Research and Development of a Sugarcane-Trash Disk Tiller for Small Tractors. Master of Engineering (Agricultural Engineering), Kasetsart University. (in Thai)
- Naik, R., Annamalai, S.J.K., Nair, N.V. and Prasad, N.R. 2012. Studies on Mechanisation of Planting of Sugarcane Bud Chip Settlings Raised in Protrays. **Sugar Tech** 15(1): 27-35.
- Office of Cane and Sugar Board. 2017. **Report on sugar exports to foreign sales.** Available Source: <http://www.ocsb.go.th/th/เซนต์ิเมตร s/detail.php?ID=9707&SystemModuleKey=cuntry>, May 12, 2018. (in Thai)
- Radha, J., Solomon, S., Shrivastava, A.K. and Chandra, A. 2010. Sugarcane bud chips: A promising seed material. **Sugar Tech** 12(1): 67-69.
- RNAM. 1983. **RNAM test codes and procedures for farm machinery.** (2nd ed.). Pasay City, Philippines.
- Sriwongras, P., Sayasoonthon, S., Maneewan, S. and Bhuwakiatkhamjorn, N. 2020. Development of a Novel Sugar Cane Planter for Bud Chip as Planting Material. **The Journal of King Mongkut's University of Technology North Bangkok** 30(1): 4-15. (in Thai)
- Suggs, C.W. 1979. Development of a transplanter with multiple loading stations. **Transactions of the ASAE** 22(2): 260-263.
- Thinkham, P. and Sansayawichai, T. 2012. **Research Report on Seed Multiplication Methods to Clean Seed Cane: Suitable Containers and Age of Sugarcane Seedling from Sugarcane Setts.** Department of Agriculture. (in Thai)
- Way, T.R. and Wright, M.E. 1987. Human transplanter in mechanical transplanting of sweet potato. **Transactions of ASAE** 30(2): 317-323.

ผลของปัจจัยต่อความแข็งและการตกผลึก Mg_2Si

ของโลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 6061

Effect of Factors on Hardness and Precipitation of Mg_2Si of Aluminum Alloy 6061

รัตนารณ์ วงษ์ทอง* และ พรศิริ จงกล

Rattanaporn Wongthong* and Pornsiri Jongkol

Received: 24 June 2020, Revised: 18 August 2020, Accepted: 22 September 2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้ได้ศึกษาผลของปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งของโลหะผสมอะลูมิเนียม 6061 หลังผ่านการอบชุบด้วยวิธีการตกผลึก (Precipitation Hardening) หรือเอจิง ในการทดลองได้ใช้การออกแบบแผนการทดลองแบบ 3^3 แฟคทอเรียล กำหนดให้ใช้ปัจจัย 3 ตัวแปร คือ อุณหภูมิอบละลาย (Solution Temperature) เวลาเอจิง (Aging Time) และอุณหภูมิเอจิง (Aging Temperature) โดยแต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ ดังนี้ อุณหภูมิอบละลาย ($^{\circ}C$) : 520, 540 และ 560; เวลาเอจิง (ชั่วโมง) : 2, 8 และ 14 และอุณหภูมิเอจิง ($^{\circ}C$) : 175, 200 และ 225 และพิจารณาตัวแปรตามคือค่าความแข็งเท่านั้น จากนั้นจึงวิเคราะห์ผลการทดลองโดยใช้หลักการวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance) จากการทดลองพบว่าปัจจัยหลักทุกปัจจัยมีผลต่อค่าความแข็งอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนี้ยังมีอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิอบละลายกับเวลาเอจิง อุณหภูมิอบละลายกับอุณหภูมิเอจิง และเวลาเอจิงกับอุณหภูมิเอจิง โดยการอบละลายที่อุณหภูมิสูงส่งผลให้ค่าความแข็งหลังการการอบชุบสูงขึ้นเนื่องจากการใช้อุณหภูมิอบละลายสูงทำให้แมกนีเซียมและซิลิคอนแพร่เข้าไปในเนื้อพื้กลายเป็นเฟสเดียวกันได้ นอกจากนั้นการใช้เวลาเอจิงนานก็ส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นเช่นเดียวกับการเพิ่มอุณหภูมิเอจิงแต่การเอจิงควรระวังไม่ให้อุณหภูมิสูงเกินไปจะทำให้ค่าความแข็งที่ได้ลดลงเนื่องจากแรงเชื่อมประสานระหว่างอนุภาคนาโนเล็กของ Mg_2Si กับเนื้อพื้อะลูมิเนียมหมดไป และจากการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคและองค์ประกอบทางเคมีของธาตุด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) ด้วยวิธี Point Analysis พบว่าโครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมอะลูมิเนียมที่ผ่านการอบชุบแข็งด้วยวิธีการตกตะกอนหรือเอจิงปรากฏอนุภาคนาโนเล็กของเฟส Mg_2Si การกระจายตัวอยู่บนเนื้อพื้อะลูมิเนียมส่งผลให้โลหะผสมอะลูมิเนียมดังกล่าวมีค่าความแข็งสูงขึ้น

คำสำคัญ: การบ่มเทียม, โลหะผสมอะลูมิเนียม 6061, การออกแบบการทดลอง

ABSTRACT

This research investigates the effects of factors on hardness of aluminum Al6061 which are treated by precipitation hardening or aging hardening. The 3^3 factorial design is used and the main factors are solution temperature (520, 540 and 560°C), aging time (2, 8 and 14 hours), and aging temperature (175, 200, 225°C). The dependent variable is hardness. Analysis of variance was used to analyze the data. The results showed that all factors affected hardness significantly. Two factor interactions which were significantly found included solution temperature and aging time, solution temperature and aging temperature, and aging time and aging temperature. The study found that higher hardness was obtained at a higher solution temperature because using high solution temperature made more Mg and Si diffuse into the matrix and became homogeneous phase. Then increasing aging time caused an increase in hardness values as well. However, using too high aging temperature resulted in a decrease in hardness because bonding force between Mg_2Si particles with matrix aluminum was depleted. Furthermore, the results of microstructure from scanning electron microscope (SEM) and energy dispersive x-ray spectroscopy (EDS) revealed that Mg_2Si particles were distributed all over aluminum. This resulted in greater hardness.

Key words: artificial aging, aluminum alloy grade 6061, design of experiment

บทนำ

อะลูมิเนียมเป็นโลหะที่ถูกนำมาใช้อย่างแพร่หลายเนื่องจากมีคุณสมบัติโดดเด่นหลายประการ เช่น มีน้ำหนักเบา แปรรูปได้ง่าย มีสีสวยงาม ไม่เป็นพิษกับร่างกาย มีความสามารถในการเพิ่มความแข็งและความแข็งแรง อะลูมิเนียมผสมเกรด 6061 เป็นอะลูมิเนียมที่ได้รับความนิยมเนื่องจากคุณสมบัติที่ทนการกัดกร่อน ขึ้นรูปง่ายและมีความสามารถเพิ่มความแข็งด้วยความร้อนได้ จึงถูกนำมาใช้งานโครงสร้าง ยานยนต์ เรือ เฟอร์นิเจอร์ และอื่นๆ (Ozturk *et al.*, 2009; Chauhan, 2017) ซึ่งการนำมาใช้งานนั้นต้องมีการปรับปรุงสมบัติทางกลเพื่อให้เหมาะสมกับการใช้งาน การเพิ่มความแข็งด้วยความร้อนเป็นอีกวิธีที่ช่วยปรับปรุงสมบัติทางกล ซึ่ง

การเพิ่มความแข็งด้วยวิธีนี้เป็นการทำให้เกิดการตกผลึกของเฟสที่สองในเนื้อพื้นอะลูมิเนียมส่งผลให้ความแข็งและต้านทานแรงเพิ่มขึ้น (Gowrishankar *et al.*, 2014; Pal *et al.*, 2008) โดยในขั้นตอนการเพิ่มความแข็งด้วยความร้อนหรือกระบวนการชุบแข็งแบบตกตะกอน (Precipitation Hardening) มีขั้นตอนการทำคือ การให้ความร้อนกับชิ้นงานจนทำให้เฟสที่สองละลายกลับเข้าไปในเฟสเนื้อพื้นกลายเป็นเฟสเดียว (Solution Heat Treatment) จากนั้นนำชิ้นงานชุบน้ำหรือน้ำมันอย่างรวดเร็ว (Quenching) และทำให้เกิดการตกตะกอนของสารประกอบอีกครั้ง ส่งผลให้อะลูมิเนียมมีความแข็งเพิ่มขึ้น (Davis *et al.*, 1991) การตกตะกอนนี้เป็นการตกตะกอนของธาตุที่ละลายอยู่ในโครงสร้างพื้นของอะลูมิเนียมโดย

ลักษณะของการเกิดการตกตะกอนจะมีการเปลี่ยนแปลงตามลำดับคือ GP-Zone, Needle-Shaped) และ Lath-Shaped (Buchanan *et al.*, 2017; Zeid, 2019) ซึ่งการเพิ่มความแข็งแรงด้วยวิธีนี้ถ้าปล่อยให้การตกตะกอนเกิดขึ้นที่อุณหภูมิปกติเรียกว่าเอนจิงโดยธรรมชาติ (Natural Aging) แต่ถ้ามีการนำมาให้ความร้อนเรียกว่าการเอนจิงเทียมหรือ Artificial Aging

ปัจจุบันได้มีงานวิจัยที่ศึกษาเกี่ยวกับปัจจัยที่มีผลต่อค่าความแข็งแรงและสมบัติทางกลหลังการชุบแข็งด้วยวิธีการตกตะกอนหรือการทำเอนจิง โดยได้ศึกษาผลของการทำเอนจิงต่อสมบัติทางกลและโครงสร้างจุลภาคในการศึกษาใช้อุณหภูมิอบละลาย 530 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง จากนั้นเอนจิงที่อุณหภูมิ 220 °C เป็นเวลา 0.5-8 ชั่วโมง จากการศึกษาพบว่าค่าความแข็งแรงเพิ่มขึ้นตามเวลาที่ใช้ในการทำเอนจิงและให้ค่าความแข็งแรงสูงสุดที่ 2 ชั่วโมง (Toozandehjani *et al.*, 2016) สอดคล้องกับงานวิจัยที่ได้ศึกษาผลของค่าความแข็งแรงหลังการทำเอนจิงด้วยอุณหภูมิและเวลาในการทำอบละลายเดียวกันคือ อบละลาย 530 °C เป็นเวลา 4 ชั่วโมง และเอนจิงที่อุณหภูมิ 145, 165, 185, 205 และ 225 °C และใช้เวลาเอนจิงนานสูงสุด 6 ชั่วโมง พบว่าให้ค่าความแข็งแรงสูงสุด 137 HV ที่อุณหภูมิ 220 °C นาน 1 ชั่วโมง และที่อุณหภูมิ 225 °C นาน 2 ชั่วโมง (Masoud *et al.*, 2012) นอกจากนี้จากผลการศึกษาผลของการทำเอนจิงต่อค่าความแข็งแรงโดยใช้อุณหภูมิอบละลาย 550 °C เป็นเวลา 2 ชั่วโมง และอุณหภูมิเอนจิง 100, 150 และ 200 °C พบว่าการเอนจิงที่อุณหภูมิต่ำจะให้ค่าความแข็งแรงสูงกว่าการเอนจิงที่อุณหภูมิสูงแต่การเอนจิงต้องใช้เวลานาน (Gowrishankar *et al.*, 2014)

ถึงแม้ว่าในปัจจุบันมีการศึกษาค้นคว้าเกี่ยวกับกระบวนการอบชุบแข็งด้วยวิธีการ

ตกตะกอนของโลหะอะลูมิเนียมเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพกระบวนการอบชุบมามากแล้ว แต่ในการใช้หลักสถิติในการออกแบบการทดลองเพื่อศึกษาอิทธิพลของปัจจัยดังกล่าวร่วมกับการวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคของโลหะผสมนั้นอยู่ในวงจำกัด ดังนั้นงานวิจัยนี้ใช้การทดลองแบบ 3³ แฟคทอเรียล คือ พิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิอบละลาย (Solution Temperature), เวลาเอนจิง (Aging Time) และอุณหภูมิเอนจิง (Aging Temperature) และทำการทดลองที่ 3 ระดับของแต่ละปัจจัย งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของปัจจัยที่มีผลต่อความแข็งแรงและการตกตะกอน Mg₂Si ของโลหะผสมอะลูมิเนียม 6061 โดยใช้หลักการออกแบบการทดลองแบบแฟคทอเรียล

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การวางแผนการทดลอง

การออกแบบการทดลองใช้แผนการทดลองแบบ 3³ แฟคทอเรียลอย่างเต็มรูปแบบ (Full Factorial Experiments) ลำดับการทดลองเป็นแบบสุ่มบริบูรณ์ (Completely Randomized Design) โดยกำหนดปัจจัยที่ใช้ 3 ตัวแปร คือ อุณหภูมิอบละลาย เวลาเอนจิงและอุณหภูมิเอนจิง โดยแต่ละปัจจัยมี 3 ระดับ ดังนี้ อุณหภูมิอบละลาย (°C) : 520, 540 และ 560 ; เวลาเอนจิง (ชั่วโมง) : 2, 8 และ 14 และอุณหภูมิเอนจิง (°C) : 175, 200 และ 225 ดังแสดงในตารางที่ 1 จากการกำหนดปัจจัยและระดับปัจจัยสามารถออกแบบเงื่อนไขการทดลองได้ทั้งหมด 27 เงื่อนไข และกำหนดให้มีการทดลองซ้ำแต่ละเงื่อนไขดังนั้นมีมีการทดลองทั้งหมด 54 ครั้ง

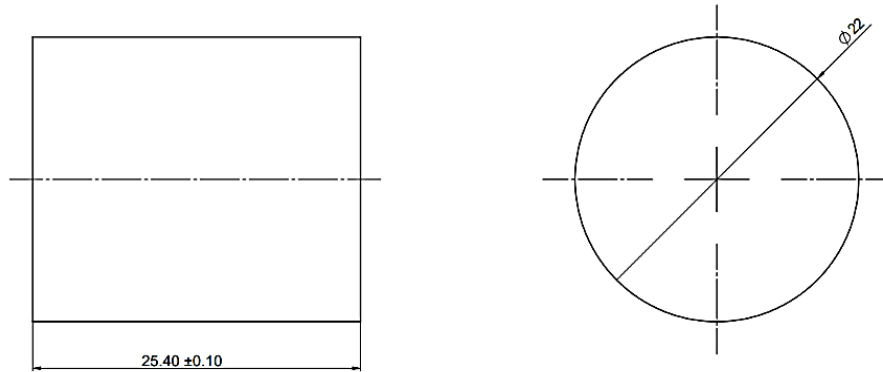
ตารางที่ 1 ปัจจัยและระดับปัจจัย

ปัจจัย	ระดับต่ำ	ระดับกลาง	ระดับสูง
อุณหภูมิอบละลาย, A : (°C)	520	540	560
เวลาเอจิง, B : (ชั่วโมง)	2	8	14
อุณหภูมิเอจิง, C : (°C)	175	200	225

2. การเตรียมชิ้นงานทดลอง

การทดลองครั้งนี้ใช้โลหะผสมอะลูมิเนียมเกรด 6061 ชิ้นงานมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 22 มิลลิเมตรยาว 25.4 ± 0.10 มิลลิเมตร จำนวน 54 ชิ้น

ดังแสดงในภาพที่ 1 และแสดงส่วนผสมทางเคมีตรวจสอบด้วยเครื่องสเปกโตรมิเตอร์ รุ่น ARL 4460 ดังตารางที่ 2



ภาพที่ 1 ตัวอย่างชิ้นงานที่ใช้ในการทดลอง

ตารางที่ 2 ส่วนผสมทางเคมีของโลหะผสมอะลูมิเนียม 6061

Cu	Si	Mg	Zn	Fe	Mn	Al
0.19	0.70	0.87	0.04	0.57	0.10	97.27

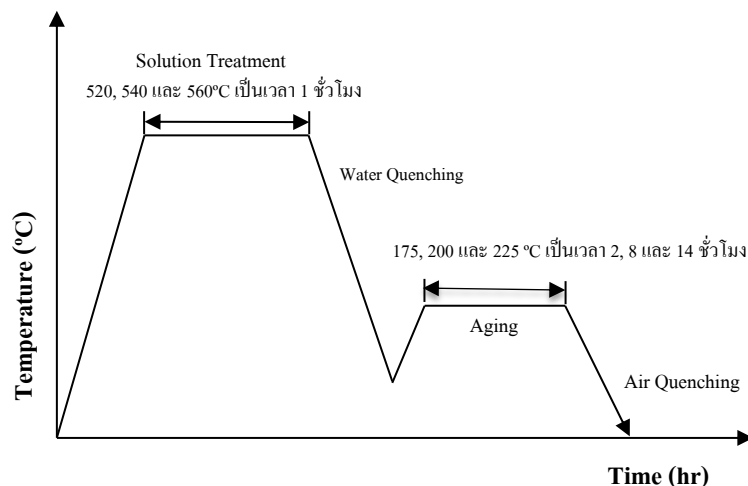
3. การทดลอง

ภาพที่ 2 แสดงขั้นตอนการทดลองโดยมีขั้นตอนอยู่ 3 ขั้นตอน คือ การอบละลาย (Solution Treatment) การชุบในน้ำ (Quenching) และการทำเอจิง (Aging) โดยอุณหภูมิของการอบละลาย เวลา และอุณหภูมิเอจิงในการอบชุบแต่ละครั้งนั้นกำหนดโดยเงื่อนไขของแต่ละลำดับการทดลอง ในส่วนของการอบละลายนั้นใช้เวลาเท่ากันทุกเงื่อนไข คือ 2 ชั่วโมง หลังจากชิ้นงานผ่านการอบชุบตาม

เงื่อนไขที่กำหนดแล้วนำชิ้นงานมาวัดความแข็งแบบบริเนลตามมาตรฐาน ASTM E10 โดยใช้เครื่องยี่ห้อ Wilson รุ่น MJ ขนาดหัวกด 10 มิลลิเมตร โหลด 500 kgf กดแช่เป็นเวลา 10 วินาที จากนั้นนำชิ้นงานทดสอบมาขัดเตรียมผิวชิ้นงานด้วยกระดาษทรายเบอร์ 320, 400, 600, 800, 1000 และ 1200 ตามลำดับ และขัดด้วยผ้าสักหลาดโดยใช้ผงขัดอะลูมินาขนาด 0.3 และ 0.05 ไมครอน ตามลำดับให้ผิวชิ้นงานเรียบและเงาเพื่อนำไปตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วย

กล้องจุลทรรศน์แบบใช้แสงกล้องจุลทรรศน์แบบ
อิเล็กตรอนยี่ห้อ HITACHI รุ่น S-3000N และ
ตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค Energy

Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) แบบ Point
Analysis (Donik, 2018)



ภาพที่ 2 ขั้นตอนการทดลอง

4. วิธีการวิเคราะห์ผล

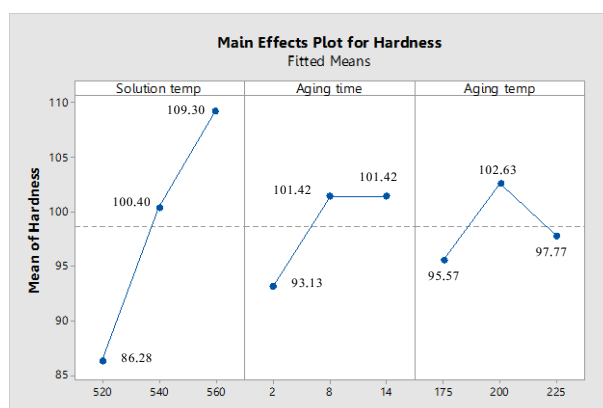
จากการทดลองตามแผนการทดลองที่
ออกแบบไว้แบบ 3³ แฟคทอเรียล อย่างเต็มรูปแบบ
โดยมีการทดลองซ้ำจะได้ค่าความแข็งทั้งหมด 54
ข้อมูล นำค่าความแข็งที่ได้มาวิเคราะห์ความ
แปรปรวน (Analysis of Variances) ที่ระดับความ
เชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ เพื่อพิจารณาปัจจัยหลักและ
ปัจจัยร่วมที่มีผลต่อค่าความแข็งอย่างมีนัยสำคัญและ
ตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคด้วยกล้องจุลทรรศน์
แบบใช้แสง กล้องจุลทรรศน์แบบอิเล็กตรอนและ
ตรวจสอบองค์ประกอบทางเคมีด้วยเทคนิค Energy
Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) แบบ Point
Analysis

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

จากการทดลองนำผลของค่าความแข็งที่
ได้มาวิเคราะห์โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูปทางสถิติ
และแสดงผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนได้ดัง
ตารางที่ 3 จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนในตาราง
ที่ 3 แสดงให้เห็นว่าปัจจัยหลักทุกปัจจัยมีอิทธิพล
ส่งผลต่อค่าความแข็งอย่างมีนัยสำคัญ นอกจากนั้นยัง
มีอิทธิพลร่วมระหว่างปัจจัยที่ส่งผลต่อค่าความแข็ง
อีกด้วย คือ อิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิอบละลาย
กับเวลาเอจิง (AB), อุณหภูมิอบละลายกับอุณหภูมิ
เอจิง (AC) และเวลาเอจิงกับอุณหภูมิเอจิง (BC)
เมื่อนำข้อมูลมาพล็อตระหว่างค่าความแข็งเทียบกับ
ระดับของปัจจัยหลักและปัจจัยร่วมแสดงในภาพที่ 3,
4, 5 และ 6

ตารางที่ 3 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนสำหรับการทดลองแบบแฟคทอเรียล 3³

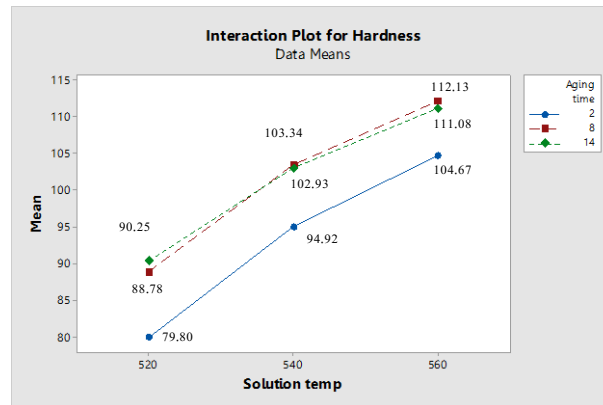
Source	DF	Sum of Squares	Mean of Squares	F ₀	P-Value
A	2	4848.72	2424.36	1961.30	0.000
B	2	824.80	412.40	333.63	0.000
C	2	470.45	235.22	190.29	0.000
AB	4	25.79	6.45	5.22	0.003
AC	4	54.35	13.59	10.99	0.000
BC	4	983.83	245.96	198.98	0.000
ABC	8	7.09	0.89	0.72	0.675
error	27	33.37	1.24		
total	54	7248.41			



ภาพที่ 3 กราฟค่าความแข็งเฉลี่ยกับระดับของปัจจัยหลักแต่ละปัจจัย

ภาพที่ 3 เมื่อพิจารณาอิทธิพลของปัจจัยหลักแต่ละปัจจัยพบว่า การเพิ่มอุณหภูมิอบละลายส่งผลให้ค่าความแข็งสูงขึ้นเมื่อมีการเพิ่มอุณหภูมิอบละลาย (Pajaroen *et al.*, 2013) โดยให้ค่าความแข็งเท่ากับ 86.28, 100.40 และ 109.30 BHN ที่อุณหภูมิ 520 °C, 540 °C และ 560 °C ตามลำดับ เมื่อพิจารณาอิทธิพลของเวลาอบจึงพบว่าค่าความแข็งเพิ่มขึ้นในช่วงการเปลี่ยนแปลงเวลาจาก 2 ชั่วโมง เป็น 8 ชั่วโมง

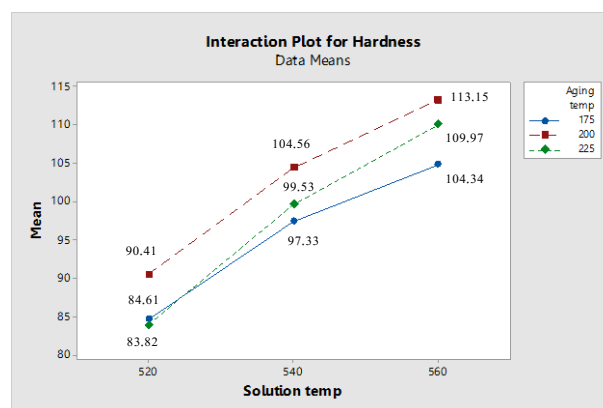
หลังจากนั้นค่าความแข็งไม่มีการเปลี่ยนแปลงเมื่อเวลาอบจึงเพิ่มขึ้น และเมื่อพิจารณาอิทธิพลของอุณหภูมิอบจึงจากกราฟพบว่าเมื่อเปลี่ยนอุณหภูมิอบจึงจาก 175 °C เป็น 200 °C ทำให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น เช่นเดียวกับการเปลี่ยนแปลงอุณหภูมิอบละลายและเวลาอบจึงแต่พบว่าค่าความแข็งมีแนวโน้มลดลงเมื่ออุณหภูมิอบจึงสูงขึ้น (Luengaksorn *et al.*, 2012)



ภาพที่ 4 กราฟค่าความแข็งเฉลี่ยของอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิอบละลายและเวลาเอจิง

ภาพที่ 4 แสดงอิทธิพลระหว่างอุณหภูมิอบละลายและเวลาเอจิง พบว่าเมื่อใช้อุณหภูมิอบละลายสูงขึ้นและ เอจิงนานขึ้นตามระดับของปัจจัย ส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นดังภาพ เนื่องจากการใช้อุณหภูมิอบละลายสูงจะทำให้การสลายตัวของเฟส Mg_2Si เข้าไปในเนื้อพื้นได้มากขึ้นเพราะการสลายตัวเป็นไปในลักษณะการแพร่และเมื่อชิ้นงานถูกทำให้เย็นตัวอย่างรวดเร็ว โครงสร้างของอะลูมิเนียมจะมีแมกนีเซียมและซิลิคอนละลายในโครงสร้างเกินสมดุลเรียกโครงสร้างแบบนี้ว่า Supersaturated Solid

Solution และยังมีลักษณะเป็นกลุ่มของอนุภาค (Clusters) ของแมกนีเซียมและซิลิคอนและเมื่อเวลาในการ ทำเอจิงนานขึ้นกลุ่มของอนุภาคจะเปลี่ยนแปลงเป็น GP-Zones พร้อมทั้งจะเปลี่ยนแปลงไปเป็นเฟส $\beta''(Mg_2Si)$ ที่มีลักษณะเป็น Needle-Shaped ส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น (Kolobnev *et al.*, 2011; Buchanan *et al.*, 2017) จากกราฟพบว่าค่าความแข็งที่ได้จะเพิ่มขึ้นตามการเปลี่ยนแปลงของอุณหภูมิอบละลายและเวลาที่ใช้ในการทำเอจิง



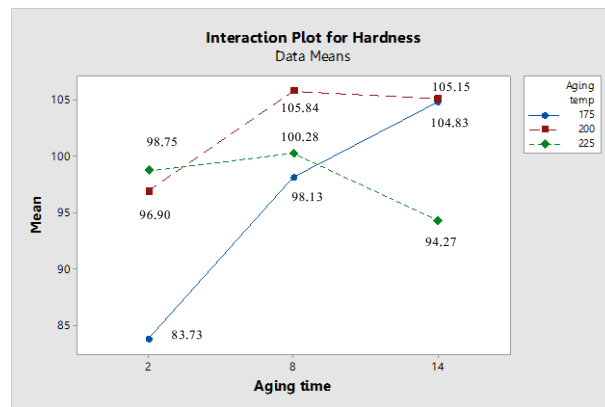
ภาพที่ 5 กราฟค่าความแข็งเฉลี่ยของอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิอบละลายและอุณหภูมิเอจิง

ภาพที่ 5 ซึ่งให้เห็นอิทธิพลระหว่างอุณหภูมิอบละลายและอุณหภูมิเอจิง จากภาพพบว่าการเอจิงที่อุณหภูมิ 175 °C, 200 °C และ 225 °C หลังขึ้นงานผ่านการอบละลายที่อุณหภูมิ 560 °C ให้ค่า

ความแข็งสูงกว่าการอบละลายที่อุณหภูมิต่ำ โดยให้ค่าความแข็งเท่ากับ 104.56, 113.15 และ 109.97 BHN ตามลำดับ จากค่าความแข็งจะเห็นว่าค่าความแข็งที่อุณหภูมิเอจิง 200 °C นั้นสูงกว่าการเอจิงที่

อุณหภูมิ 225 °C ที่เป็นเช่นนี้เนื่องจากการเอจิงที่อุณหภูมิสูงจะทำให้นิวเคลียสเกิดขึ้นได้น้อยและขยายตัวได้เร็วกว่าการเอจิงที่อุณหภูมิต่ำ จากภาพสามารถอธิบายความสัมพันธ์ระหว่างค่าความแข็งกับอุณหภูมิอบละลายและอุณหภูมิเอจิงได้ว่าเนื่องจากการอบละลายที่อุณหภูมิสูงจะส่งผลให้แมกนีเซียมและซิลิคอนเข้าไปในเนื้อพื้นได้มากขึ้นและได้โลหะผสมที่ความอึดตัวอย่างยิ่งยวดหลังจุ่มขึ้นงานในน้ำ

(Quenching) และเมื่อชิ้นงานได้รับความร้อนอีกครั้งในขั้นตอนการทำเอจิง (Artificial Aging) จะทำให้กลุ่มอนุภาคของแมกนีเซียมและซิลิคอนเกิดเป็น GP-Zones และเปลี่ยนเป็น $\beta''(\text{Mg}_2\text{Si})$ และ $\beta'(\text{Mg}_2\text{Si})$ ซึ่งตะกอน $\beta''(\text{Mg}_2\text{Si})$ และ $\beta'(\text{Mg}_2\text{Si})$ มีแรงยึดเหนี่ยวกับโครงสร้างเนื้อพื้นอะลูมิเนียมส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นซึ่งการเปลี่ยนแปลงที่เกิดขึ้นเป็นไปในลักษณะของการแพร่ (Pogatscher *et al.*, 2011)



ภาพที่ 6 กราฟค่าความแข็งเฉลี่ยของอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิอบละลายและอุณหภูมิเอจิง

จากภาพที่ 6 ค่าความแข็งหลังการเอจิงที่อุณหภูมิและเวลาแตกต่างกัน พบว่าการเอจิงโดยใช้เวลา 2 ชั่วโมง ที่ใช้อุณหภูมิสูงจะให้ค่าความแข็งสูงกว่า โดยให้ค่าความแข็งเท่ากับ 83.73, 96.90 และ 98.75 BHN ที่อุณหภูมิ 175 °C, 200 °C และ 225 °C ตามลำดับ แต่เมื่อเพิ่มเวลาถึง 14 ชั่วโมง พบว่าที่อุณหภูมิเอจิง 225 °C ให้ค่าความแข็งลดลงจากผลที่เกิดขึ้นสอดคล้องกับงานวิจัยอื่นที่พบว่าการเอจิงที่อุณหภูมิสูงจะให้ค่าความแข็งสูงกว่าการเอจิงที่อุณหภูมิต่ำในระยะเวลาสั้นแต่เมื่อเวลานานขึ้นพบว่าการใช้อุณหภูมิเอจิงต่ำจะให้ค่าความแข็งสูงสุดสูงกว่าการเอจิงด้วยอุณหภูมิสูง (Gowrishankar *et al.*, 2014) เพราะการเกิดตะกอนของ Mg_2Si ที่ทำให้โลหะเกิดความแข็งจะเกิดในลักษณะการแพร่ (Pogatscher *et al.*, 2011) ดังนั้นถ้าการทำเอจิง

เกิดขึ้นที่อุณหภูมิสูงปริมาณของนิวเคลียสจะเกิดได้น้อยแต่ด้วยอุณหภูมิที่สูงจึงส่งผลให้นิวเคลียสหรือตะกอนที่เกิดเปลี่ยนเป็นเฟส $\beta''(\text{Mg}_2\text{Si})$ และ $\beta'(\text{Mg}_2\text{Si})$ ได้เร็วซึ่งเฟสนี้เองจะมีแรงเชื่อมประสานกับโครงสร้างพื้นฐานส่งผลให้ค่าความแข็งสูงขึ้น (Tan and Said, 2009)

ดังนั้นการเอจิงที่อุณหภูมิต่ำถึงแม้ว่าค่าความแข็งจะต่ำในช่วงแรกเพราะการแพร่จะดำเนินไปอย่างช้าๆ และเกิดเป็นนิวเคลียสหรือตะกอนเป็นจำนวนมากเมื่อเวลาในการทำเอจิงนานจะส่งผลให้เปลี่ยนไปเป็นเฟสที่มีแรงเชื่อมประสานกับโครงสร้างเนื้อพื้นส่งผลให้ค่าความแข็งสูงกว่าการเอจิงด้วยอุณหภูมิสูงแต่ทั้งการเอจิงด้วยอุณหภูมิสูงและต่ำเมื่อเวลาผ่านไปจะพบว่าค่าความแข็งที่ได้จะลดลง จากภาพเห็นว่าการเอจิงที่ 225 °C จะให้ค่า

ความแข็งเท่ากับ 100.28 BHN ที่เวลาเอจิงนาน 8 ชั่วโมง และค่าความแข็งลดลงเท่ากับ 94.27 BHN หลังเอจิงนาน 14 ชั่วโมง เนื่องจากเฟส β'' (Mg_2Si) และ β' (Mg_2Si) เปลี่ยนเป็นสมดุลเฟสทำให้แรงเชื่อมประสานระหว่างตะกอนกับโครงสร้างเนื้อพื้น

อะลูมิเนียมหมดไปหรือเกิดปรากฏการณ์ Over Aging

ผลจากการทดลองเมื่อนำไปสร้างแบบจำลองเพื่อทำนายค่าความแข็งโดยใช้วิธีการวิเคราะห์การถดถอยได้สมการดังนี้

$$\text{Hardness} = -2293 + 7.099A + 15.605B + 2.582C - 0.006534A^2 - 0.11515B^2 - 0.009542C^2 - 0.00842AB + 0.003000AC - 0.04263BC$$

เมื่อ A คือ อุณหภูมิอบละลาย

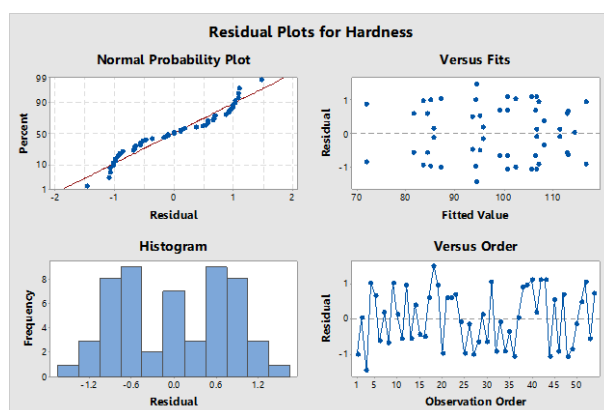
B คือ เวลาเอจิง

C คือ อุณหภูมิเอจิง

โดยโมเดลนี้มีค่า R^2 เท่ากับ 99.54 % แสดงว่าโมเดลสามารถแทนค่าหรือครอบคลุมข้อมูลจากการทดลองได้ถึง 99.54% สามารถประมาณค่าความแข็งที่มีค่าความผิดพลาดไม่เกิน ± 2.28 BHN ที่ความเชื่อมั่น 95%

ตรวจสอบความถูกต้องของแบบจำลอง (Model Adequacy Checking)

การตรวจสอบความถูกต้องข้อมูลทำได้โดยการตรวจสอบค่าความผิดพลาดซึ่งต้องมีการแจกแจงแบบปกติมีความอิสระต่อกันและมีความแปรปรวนคงที่ จากการตรวจสอบพบว่าค่าความผิดพลาดมีความแปรปรวนคงที่มีการแจกแจงแบบปกติและความอิสระของข้อมูล ดังภาพที่ 7



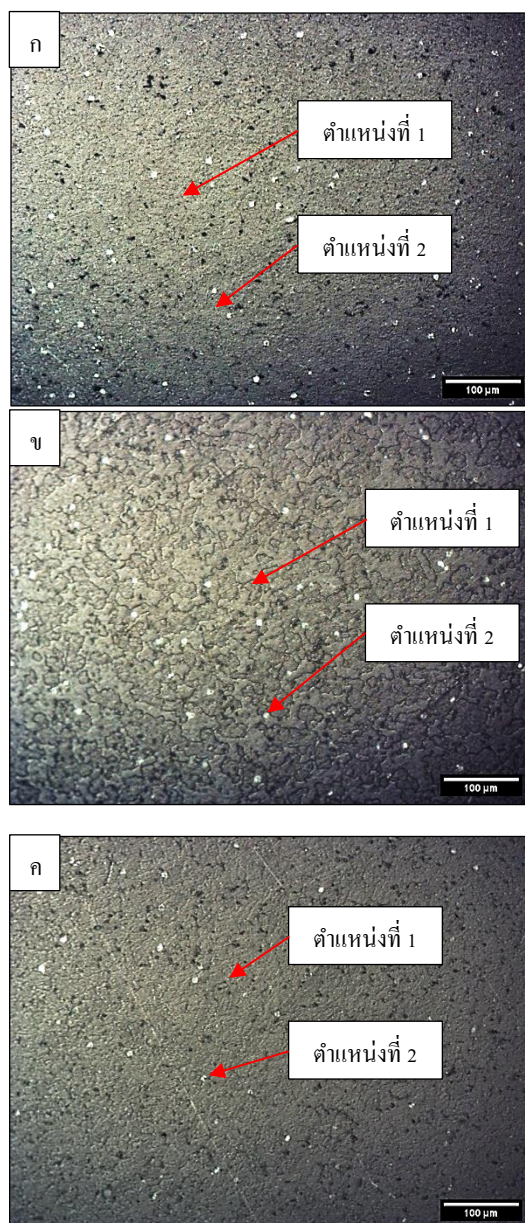
ภาพที่ 7 กราฟพลีอกระหว่างค่าส่วนเหลือคงค้าง

ผลการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาค

ในการศึกษาครั้งนี้ใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสง กล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องกราด (SEM) และเทคนิค Energy Dispersive X-ray

Spectroscopy (EDS) ในการตรวจสอบโครงสร้างจุลภาคภาพที่ 8 แสดงโครงสร้างจุลภาคที่ตรวจสอบโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบแสงที่กำลังขยาย 20X ของชิ้นงานที่ผ่านการอบละลาย 520 °C, 540 °C และ

560 °C และเลือกเงื่อนไขเองจึงที่อุณหภูมิ 175 °C *et al.*, 1991)
เป็นเวลา 8 ชั่วโมง มาแสดงโครงสร้างจุลภาค (Davis



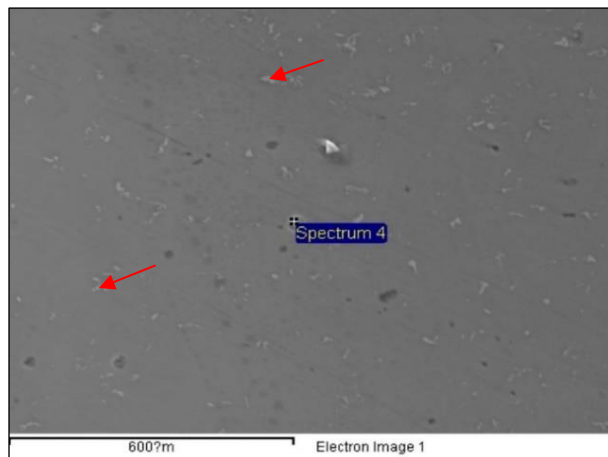
ภาพที่ 8 โครงสร้างจุลภาค (ก) อบละลายที่ 520 °C และเองจึงที่อุณหภูมิ 175 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง
(ข) อบละลายที่ 540 °C และเองจึงที่อุณหภูมิ 175 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง
(ค) อบละลายที่ 560 °C และเองจึงที่อุณหภูมิ 175 °C เป็นเวลา 8 ชั่วโมง

จากภาพโครงสร้างแบ่งออกเป็น 2 บริเวณ
อย่างชัดเจน คือบริเวณเนื้อพื้นอะลูมิเนียม (α Phase)
(ตำแหน่งที่ 1) และบริเวณสีขาว (ตำแหน่งที่ 2) และ
เมื่อพิจารณาบริเวณสีขาวในตำแหน่งที่ 2 ที่กระจาย

ตัวบนเนื้อพื้นอะลูมิเนียมเพื่อตรวจสอบโครงสร้าง
ดังกล่าวและจากภาพพบว่าภาพ (ก) (ข) และ (ค) มี
โครงสร้างแบ่งออกเป็น 2 บริเวณอย่างชัดเจนทั้ง 3
ภาพ ในบทความนี้นำเสนอผลของการนำชิ้นงานที่

ผ่านการอบละลาย 540 °C มาวิเคราะห์โครงสร้างจุลภาคโดยใช้กล้องจุลทรรศน์แบบส่องกราด (SEM) และเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy

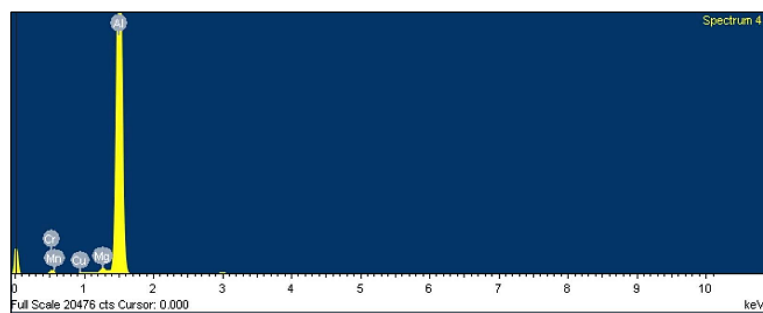
(EDS) และวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีเพิ่มเติม โดยมีผลดังภาพที่ 9, 10 และตารางที่ 4



ภาพที่ 9 จุดตรวจสอบด้วยเทคนิค Energy Dispersive X-ray Spectroscopy (EDS) แบบ Point Analysis

ภาพที่ 9 แสดงให้เห็นถึงโครงสร้างเนื้อพื้น (α Phase) และมีการกระจายตัวของเฟสสีขาวกระจายตัว อยู่ในเนื้อพื้นดังลูกศรชี้ตรวจสอบเฟส

ดังกล่าวด้วยการทำ Point Analysis ที่จุดสเปกตรัมที่ 4 ได้ผลการตรวจสอบดังแสดงในภาพที่ 10



ภาพที่ 10 สเปกตรัม EDS จากการวิเคราะห์จุดตรวจสอบแบบ Point Analysis

ภาพที่ 10 สเปกตรัม EDS แสดงความสัมพันธ์ระหว่างจำนวนสัญญาณเอกซ์เรย์ที่ตรวจจับได้ (X-ray Counts) กับพลังงาน (Energy)

จากพีคที่เกิดขึ้นในสเปกตรัมแสดงให้เห็นองค์ประกอบของธาตุบริเวณจุดตรวจสอบบนชิ้นงานทดสอบและได้ผลของปริมาณธาตุดังตารางที่ 4

ตารางที่ 4 ผลการตรวจสอบส่วนผสมทางเคมีด้วยเทคนิค EDS

Element	Mg	Al	Si	Cr	Mn	Fe	Cu
Weight%	0.62	97.03	0.22	0.08	0.08	0.03	0.12

ผลการวิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีแบบ Point Analysis พบว่าจุดดังกล่าวมีปริมาณของธาตุอะลูมิเนียมเท่ากับ 97.03% แมกนีเซียม 0.62% ซิลิกอน 0.22% และมีธาตุอื่นเพียงเล็กน้อย ดังแสดงในตารางที่ 4 จากปริมาณของธาตุที่ตรวจสอบสามารถวิเคราะห์ได้ว่าการใช้วิธีตรวจสอบแบบ Point Analysis ในการตรวจสอบอาจทำให้จุดที่ต้องการตรวจสอบไม่ถูกตรวจสอบทั้งหมดและบริเวณเนื้อพื้นถูกตรวจสอบเนื่องจากจุดตรวจสอบมีขนาดเล็กและตรวจสอบเพียงจุดเดียว

สรุป

การทดลองครั้งนี้ได้ใช้ประโยชน์ของการออกแบบแฟคทอเรียลที่สามารถศึกษาผลของปัจจัยหลักและยังสามารถศึกษาผลของปัจจัยร่วม โดยใช้การออกแบบแบบ 3^3 แฟคทอเรียล จากการทดลองสามารถสรุปได้ว่าปัจจัยหลักทุกปัจจัย คือ อุณหภูมิ ระยะเวลา และอุณหภูมิ เองจึงส่งผลต่อค่าความแข็งหลังการอบชุบด้วยวิธีการตกผลึกหรือตกตะกอนอย่างมีนัยสำคัญ โดยพบว่าการใช้อุณหภูมิอบละลายสูง การใช้เวลาในการทำเองจึงเป็นเวลานานส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น มีเพียงอุณหภูมิเองจึงที่พบว่าการเพิ่มอุณหภูมิส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้นในช่วงแรกและค่าความแข็งลดลงเมื่อใช้อุณหภูมิเองจึงสูงเกินไป

นอกจากนั้นยังมีอิทธิพลร่วมระหว่างสองปัจจัยคือ อุณหภูมิอบละลายกับระยะเวลาเอง อุณหภูมิอบละลายกับอุณหภูมิเอง และเวลาเองกับอุณหภูมิเอง โดยการใช้อุณหภูมิอบละลายสูง ร่วมกับการเองจึงเป็นเวลานานและการใช้อุณหภูมิอบละลายสูง ร่วมกับการใช้อุณหภูมิเองจึงสูงส่งผลให้ค่าความแข็งเพิ่มขึ้น มีเพียงอิทธิพลร่วมระหว่างอุณหภูมิเองและเวลาเองจึงที่ส่งผลให้ค่าความแข็งลดลงเมื่อใช้อุณหภูมิเองจึงสูงเกินไปและใช้เวลานาน

ความแข็งที่สูงขึ้นเกิดจากการตกตะกอนของเฟส Mg_2Si ในลักษณะเฟสที่ไม่สมดุลคือ $\beta''(Mg_2Si)$ และ $\beta'(Mg_2Si)$ บนเนื้อพื้นอะลูมิเนียมหลังจากผ่านกระบวนการอบชุบด้วยวิธีการตกตะกอนส่งผลให้ความแข็งสูงขึ้น และสามารถสร้างโมเดลประมาณค่าความแข็งที่สามารถประมาณค่าความแข็งที่มีค่าความผิดพลาดไม่เกิน ± 2.28 BHN ที่ความเชื่อมั่น 95%

เอกสารอ้างอิง

- Buchanan, K., Colas, K., Ribis, J., Lopez, A. and Garnier, J. 2017. Analysis of the metastable precipitates in peak-hardness aged Al-MgSi (-Cu) alloys with differing Si contents. **Acta Materialia** 132: 209-221.
- Chauhan, K.P.S. 2017. Influence of heat treatment on the mechanical properties of aluminium alloys (6xxx Series): A literature review. **International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)** 6(03): 386-389.
- Davis, J.R., Davidson, G.M., Lampman, S.R., Zorc, T.B., Daquila, J.L., Ronke, A.W. and Henniger, K.R. 1991. **ASM Handbook: Heat treating**. ASM International, United States of America.
- Donik, C. 2018. Influence of artificial aging on the electrochemical properties of the aluminium AA 6063 Alloy. **Materials and Technology** 52: 71-75.
- Gowri Shankar, M.C., Shravan, Rakesh, Rahul, Kini, A. and Sharma, S.S. 2014. Effect of artificial aging on strength and wear behaviour of solutionized aluminium 6061 alloy, pp. 388-393. *In 3rd World Conference on Applied*

- Sciences, Engineering & Technology, 27-29 September 2014.** Kathmandu, Nepal.
- Kolobnev, N.I., Ber, L.B., Khokhlatova, L.B. and Ryabov, D.K. 2011. Structure, properties and application of alloys of the Al - Mg - Si - (Cu) system. **Metal Science and Heat Treatment** 53: 440-444.
- Luengakorn, N., Pleamjit, N. and Meemongkol, N. 2012. Study the mechanical properties of aluminum alloy 6061 with semi-solid process and heat treatments T6, pp. 1337-1343. *In IE Network Conference 2012.* Sripatum University, Bangkok. (in Thai)
- Masoud, I.M., Abu, M.T. and Al-Jarrah, J.A. 2012. Effect of heat treatment on the microstructure and hardening properties of 6061aluminum alloy. **Journal of Applied Sciences Research** 8(10): 5106-5113.
- Ozturk, F., Sisman, A., Toros, S., Kilic, S. and Picu, R.C. 2009. Influence of aging treatment on mechanical properties of 6061 aluminum alloy. **Materials and Design** 31(2010): 972-975.
- Pajaroen, N., Plookphol, T., Wannasin, J. and Wisutmethangoon, S. 2013. Influence of solution heat treatment temperature and time on the microstructure and mechanical properties of gas induced semi-solid (GISS) 6061 aluminum alloy. **Applied Mechanics and Materials** 313-314(2013): 67-71.
- Pal, S., Khajuria, A. and Akhtar, M. 2018. Influence of aging on hardness and tool wear of artificially aged aluminium alloy 6061. **Jaetsd Journal for Advanced Research in Applied Sciences** 5(2): 477-481.
- Pogatscher, S., Antrekowitsch, H., Leitner, H., Ebner, T. and Uggowitzer, P.J. 2011. Mechanisms controlling the artificial aging of Al-Mg-Si Alloys. **Acta Materialia** 59(2011): 3352-3363.
- Tan, C.F. and Said, M.R. 2009. Effect of hardness test on precipitation hardening aluminium alloy 6061-T6. **Chiang Mai Journal Science** 36(3): 276-286.
- Toozandehjani, M., Mustapha, F., Ariffin, M.K.A., Zahari, N.I., Matori, K.A., Ostovan, F. and Fadaeifard, F. 2016. Effect of artificial aging on the microstructure and mechanical properties of aluminum alloy AA6061-T6. **Metal Science and Heat Treatment** 58: 283-286.
- Zeid, A.E.F. 2019. Mechanical and electrochemical characteristics of solutionized AA 6061, AA6013 and AA 5086 aluminum alloys. **Journal of Materials Research and Technology** 8(2): 1870-1877.

ผลของสารให้ความหวานทดแทนน้ำตาลต่อลักษณะทางกายภาพ เคมี และ ประสาทสัมผัสของแยมถั่วฝักยาวสีม่วง

Effects of Alternative Sweeteners on Physical, Chemical and Sensory Characteristics of Purple Yard Long Bean Jam

ณัฐนิชา ทวีแสง^{1*} กัญญารัตน์ เหลืองประเสริฐ² และ ไกรยศ แซ่ลิ่ม²

Natnicha Thaweeseang^{1*}, Kanyarat Lueangprasert² and Kraiyot Saclim²

Received: 5 April 2020, Revised: 11 November 2020, Accepted: 8 December 2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อตรวจสอบผลของอัตราส่วนของซูโครสต่อสารให้ความหวาน (ไซลิทอล และ ซูคราโลส) ต่อลักษณะคุณภาพของแยมถั่วฝักยาวสีม่วง โดยในการทดลองได้แปรอัตราส่วนของซูโครสต่อสารให้ความหวานเป็น 20:35 10:45 และ 0:55 นอกจากนี้ยังได้เตรียมแยมที่มีลักษณะส่วนประกอบของซูโครสเพื่อเปรียบเทียบด้วย จากการทดลองพบว่า การเพิ่มการทดแทนด้วยซูโครสด้วยไซลิทอลและซูคราโลสทำให้ค่าความสว่าง (L*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b*) ของตัวอย่างแยมเพิ่มขึ้น ตัวอย่างแยมที่มีระดับของซูโครสต่อสารให้ความหวานในปริมาณต่างๆ มีค่า pH อยู่ในช่วง 3.02-3.52 แยมที่มีส่วนผสมของซูคราโลสมีค่า a_w สูงกว่าแต่มีค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดและค่า rupture strength ต่ำกว่าตัวอย่างควบคุมและตัวอย่างที่ใช้ไซลิทอล ($p \leq 0.05$) ตัวอย่างแยมที่ผลิตจากซูโครสต่อไซลิทอลเป็น 20:35 มีค่าคะแนนความชอบในด้าน สีกลิ่น รสชาติ เนื้อสัมผัส การกระจายตัว ความหวาน และความชอบโดยรวมเทียบกับตัวอย่างสูตรควบคุม ($p > 0.05$) นอกจากนี้แล้วยังมีปริมาณแอนโทไซยานินสูงกว่าสูตรควบคุม ($p \leq 0.05$)

คำสำคัญ: ถั่วฝักยาวสีม่วง, ไซลิทอล, ซูคราโลส, แยม

¹ สาขาวิชาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการอาหาร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏกาญจนบุรี ตำบลหนองบัว อำเภอเมือง จังหวัดกาญจนบุรี 71190

¹ Department of Food Science and Technology, Faculty of Science and Technology, Kanchanaburi Rajabhat University, Nong Bua, Muang, Kanchanaburi 71190, Thailand.

² คณะเทคโนโลยีการเกษตร มหาวิทยาลัยบูรพา วิทยาเขตสระแก้ว ถนนสุวรรณศร อำเภอวัฒนานคร จังหวัดสระแก้ว 27160

² Faculty of Agricultural Technology Burapha University, Sakaeo Campus, Suwannasorn Road, Watthana Nakhon, Sakaeo 27160, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): natnicha@kru.ac.th Tel: 09 8315 9036, 0 3453 4092

ABSTRACT

This research aimed to investigate the effects of sucrose to sweetener (xylitol and sucralose) on quality characteristics of Purple Yard Long Bean jam. The ratio of sweetener was varied as 20:35, 10:45 and 0:55. In addition, jam sample containing only sucrose was prepared for comparison. It was found that an increase in substitution on sucrose with xylitol and sucralose led to an increase in lightness (L^*) and yellowness (b^*) of jam sample. The jam sample with different levels of sucrose to sweetener had pH value in the range of 3.02-3.52. Jam containing sucralose exhibited higher a_w and lower total soluble solid and rupture strength than the control and the samples with xylitol ($p \leq 0.05$). The jam sample made from sucrose to xylitol as 20:35 had sensory likeability scores in terms of color, odor, taste, texture, spread ability, sweetness and overall liking similar to the control sample ($p > 0.05$). In addition, it had higher anthocyanin content than the control sample ($p \leq 0.05$).

Key words: purple yard long bean, xylitol, sucralose, jam

บทนำ

ถั่วฝักยาวสีม่วงสิรินธรเบอร์ 1 (*Vigna unguiculata* subsp. *sesquipedalis*) เกิดจากการผสมระหว่างสายพันธุ์แม่ที่มีฝักยาวพันธุ์เนื้อฝักสีเขียว กับสายพันธุ์พ่อที่มีฝักยาวสีแดง ลักษณะเด่น คือ ฝักสีม่วงอมแดง และเมล็ดมีสีแดงลายขาว (Agricultural Research and Extension Maejo University, 2014) ถั่วฝักยาวสีม่วงสิรินธรเบอร์ 1 อุดมไปด้วยแร่ธาตุ ใยอาหาร และมีแอนโทไซยานิน ซึ่งเป็นสารในกลุ่มฟลาโวนอยด์ ที่มีคุณสมบัติเป็นสารต้านอนุมูลอิสระ ช่วยชะลอความเสื่อมของร่างกาย และลดความเสี่ยงต่อการเกิดโรคต่างๆ เช่น โรคหลอดเลือดหัวใจ โรคเรื้อรัง และมะเร็งบางชนิด (Randhawa *et al.*, 2015; Dulce and Michael, 2017)

เสาวรสเป็นผลไม้เพื่อสุขภาพชนิดหนึ่งที่มีต้นกำเนิดในแถบทวีปอเมริกาใต้ ผลมีลักษณะกลม ผลอ่อนจะมีสีเขียว มี 2 ชนิด คือ ชนิดผลสีม่วง และผลสีเหลือง อุดมไปด้วย วิตามินซี โปรวิตามินเอ สารประกอบฟีนอลิก และฟลาโวนอยด์ เช่น เควอซิทิน คาเทชิน แครโธทีนอยด์ เป็นต้น ซึ่งมีคุณสมบัติใน

การเป็นสารต้านอนุมูลอิสระช่วยชะลอการเกิดริ้วรอย และช่วยเสริมสร้างภูมิคุ้มกันของร่างกายให้แข็งแรง (Reisa *et al.*, 2018) ดังนั้น ในการวิจัยนี้ จึงเลือกใช้เสาวรสเพื่อช่วยในการปรับค่าความเป็นกรดด่าง (pH) ของผลิตภัณฑ์แยม เนื่องจากเสาวรสเป็นผลไม้ที่มีรสเปรี้ยวมีค่าประมาณ pH 2.8 และเสาวรสดูดซับไปคุณค่าทางโภชนาการที่เป็นประโยชน์ต่อร่างกาย

ในปัจจุบันผู้บริโภคให้ความสำคัญกับการรับประทานอาหารมากขึ้น โดยลดการบริโภคอาหารที่มีปริมาณน้ำตาลทรายสูง ดังนั้นสารให้ความหวาน (sweetener) จึงถูกนำมาใช้ในอาหารหลายชนิด เพื่อเป็นทางเลือกให้กับผู้บริโภคในกลุ่มรักสุขภาพ หรือกลุ่มที่ต้องควบคุมปริมาณน้ำตาลทราย สารให้ความหวานสามารถแบ่งได้ 2 ประเภท คือ สารให้ความหวานที่มีคุณค่าทางโภชนาการ (nutritive sweeteners) คือ กลุ่มน้ำตาลแอลกอฮอล์ เช่น ซอร์บิทอล ไซลิทอล และแมนนิทอล เป็นต้น และสารให้ความหวานที่ไม่มีคุณค่าทางโภชนาการ (non-nutritive sweeteners) หรือสารให้ความหวานเทียม เช่น สตีวิโอไซด์ ชูคราโลส และแซ็กคาริน เป็นต้น (Carocho *et al.*,

2017) Albuquerque *et al.* (2014) รายงานการศึกษาเกี่ยวกับการใช้ไซลิทอลทดแทนน้ำตาลทรายเพื่อลดแคลอรีในอาหารชนิดต่างๆ เช่น คัพเค้ก ลูกเกด ฝรั่งเชื่อม และช็อกโกแลต เป็นต้น

ไซลิทอลจัดเป็นน้ำตาลแอลกอฮอล์หรือโพลีออล (polyols) ประกอบด้วยคาร์บอน 5 อะตอม เกิดจากปฏิกิริยาไฮโดรจีเนชันของไซโลส ไซลิทอลเป็นสารให้ความหวานที่เกิดขึ้นตามธรรมชาติสกัดได้จากพืช เช่น ต้นเบิร์ช เปลือกอัลมอนด์ และงาช้างโปด เป็นต้น ไซลิทอลให้ความหวานเท่ากับน้ำตาลซูโครสแต่ให้พลังงานต่ำ โดยให้พลังงานเพียง 2.4 กิโลแคลอรี/กรัม และถูกดูดซึมช้า ทำให้ถูกนำมาใช้ในทางการแพทย์สำหรับผู้ป่วยโรคเบาหวาน นอกจากนี้ไซลิทอลยังสามารถยับยั้งการเจริญเติบโตของแบคทีเรียบางชนิด จึงถูกนำมาใช้อุตสาหกรรมอาหารและอุตสาหกรรมต่างๆ เช่น ฝรั่งเชื่อม ลูกอม แยม เยลลี่ น้ำยาบ้วนปาก ยาสีฟัน เป็นต้น (Carocho *et al.*, 2017)

ซูโครโลสสร้างจากการใช้น้ำตาลซูโครสเป็นสารตั้งต้น จากนั้นแทนที่กลุ่มไฮดรอกซิล 3 ตำแหน่งด้วยอะตอมสารคลอไรด์ ทำให้มีสูตรโครงสร้างคล้ายกับน้ำตาล มีความหวานประมาณ 400-800 เท่าของน้ำตาลซูโครส มีลักษณะเป็นผลึกแข็งสีขาว มีความคงตัวที่อุณหภูมิสูงและในสภาวะที่เป็นกรดได้ดี ไม่เกิดรสขมหลังบริโภค ร่างกายไม่สามารถดูดซึม จึงไม่ให้พลังงานแก่ร่างกาย ซูโครโลสถูกนำมาใช้ผลิตภัณฑ์อาหารและเครื่องดื่มพลังงานต่ำหลายชนิด เช่น แยม เยลลี่ ฝรั่งเชื่อม ลูกเกด ฝรั่งเชื่อมและพาย เป็นต้น (Carocho *et al.*, 2017; Basu *et al.*, 2013)

แยมเป็นผลิตภัณฑ์ที่ผลิตจากผัก ผลไม้ หรือ สมุนไพร ผสมกับน้ำตาลทราย กรด เพคติน และส่วนผสมอื่นๆ เช่น สารแต่งกลิ่น สารแต่งสี ทำให้ร้อนเพื่อให้มีความข้นหนืดพอเหมาะ ปริมาณ

ของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดอยู่ระหว่าง 60-65 % และควรมีปริมาณผลไม้น้อยกว่า 45 % (CODEX, 2009) แยมเป็นอาหารที่ให้พลังงานสูงเนื่องจากมีส่วนผสมของน้ำตาลในปริมาณสูง ดังนั้น งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการทดแทนปริมาณน้ำตาลทรายด้วยไซลิทอลและซูโครโลสต่อลักษณะคุณภาพด้านเคมี กายภาพและประสาทสัมผัสของแยมถั่วฝักยาวสีม่วง ถั่วฝักยาวสีม่วงเพื่อผลิตภัณฑ์อาหารเพื่อสุขภาพจากถั่วฝักยาวสีม่วงสีรินทรเบอร์ 1 ในระยะเก็บเกี่ยวที่เหมาะสม และเพิ่มมูลค่าให้ผลผลิตทางการเกษตร

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมวัตถุดิบ

- ถั่วฝักยาวสีม่วงสีรินทรเบอร์ 1 ที่ปลูกในจังหวัดราชบุรี ถั่วฝักยาวสีม่วงสีรินทรเบอร์ 1 ที่นำมาใช้ในการทดลองระยะการเก็บเกี่ยวประมาณ 10-14 วัน หลังดอกบาน นำมาแช่เย็นที่อุณหภูมิ 4 °C ก่อนนำมาทำการทดลอง และนำมาล้างให้สะอาด จากนั้นตัดให้เป็นชิ้นเล็กๆ แล้วนำไปปั่นกับน้ำอัตราส่วน 1:1 ด้วยเครื่องปั่นน้ำผลไม้ให้ละเอียด

- เสาวรสพันธุ์สีม่วง ชื่อวิทยาศาสตร์ *Passiflora edulis* ชื่อจากตลาดในจังหวัดกาญจนบุรี นำมาล้างให้สะอาด ผ่าครึ่งใช้ช้อนตักเอาเมล็ดและน้ำเสาวรสน้ำเสาวรสที่ใช้ในการทดลองมีค่า pH เท่ากับ 2.78 จากนั้นนำไปกรองด้วยผ้าขาวบาง เก็บที่อุณหภูมิ 4 °C

- เพคติน (Apple pectin APC140, High Methoxyl) ไซลิทอล และซูโครโลส ชื่อจากบริษัท เคมีภัณฑ์ คอร์ปอเรชั่น จำกัด

2. การศึกษาการทดแทนปริมาณน้ำตาลทรายด้วยไซลิทอลและซูโครโลสต่อลักษณะคุณภาพด้านเคมี กายภาพและประสาทสัมผัสของแยมถั่วฝักยาวสีม่วง

ในการทดลองครั้งนี้ได้ผลิตแยมถั่วฝักยาวสีม่วง จำนวน 7 สูตร ดังแสดงในตารางที่ 1 โดยศึกษา

3. การศึกษาคุณค่าทางโภชนาการและปริมาณแอนโทไซยานินของแยมถั่วฝักยาวสีม่วง

เลือกแยมถั่วฝักยาวสีม่วงสิรินธรเบอร์ 1 สูตรที่เหมาะสมจำนวน 1 สูตร จากการทดลองข้อที่ 2 และสูตรควบคุม มาวิเคราะห์ปริมาณความชื้น เถ้า ไขมัน โปรตีน โยอาหาร คาร์โบไฮเดรต และแอนโทไซยานิน (AOAC, 2005)

สำหรับการวิเคราะห์ด้านกายภาพและเคมี ได้วางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) และการทดสอบความชอบของผู้ทดสอบชิมวางแผนการทดลองแบบ Randomized Complete Block Design (RCBD) โดยวิเคราะห์ความแปรปรวน ANOVA (analysis of variance) ของข้อมูล และทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยใช้ Duncan's Multiple Range Test ที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ผลการศึกษาการทดแทนปริมาณน้ำตาลทรายด้วยไซลิทอลและซูคราโลสต่อลักษณะคุณภาพด้านเคมีกายภาพและประสาทสัมผัสของแยมถั่วฝักยาวสีม่วง

จากการศึกษาการทดแทนน้ำตาลทรายด้วยไซลิทอล และซูคราโลสในแยมถั่วฝักยาวสีม่วงที่ระดับต่างๆ และนำไปวิเคราะห์คุณภาพด้านต่างๆ ได้ผลการทดลอง ดังนี้

ตารางที่ 2 แสดงค่าสีของแยมถั่วฝักยาวสีม่วงสิรินธรเบอร์ 1 ที่ทดแทนน้ำตาลทรายด้วยไซลิทอล และ ซูคราโลสที่ระดับต่างๆ พบว่า การเพิ่มปริมาณการทดแทนน้ำตาลทรายด้วยไซลิทอลและซูคราโลสทำให้แยมถั่วฝักยาวสีม่วงสิรินธรเบอร์ 1 มีค่าความสว่าง (L^*) และมีค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) เพิ่มขึ้น แต่มีค่าความเป็นสีแดง (a^*) ลดลง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะความร้อนที่ใช้ในการผลิตแยมทำให้เกิดการสลายตัวของแอนโทไซยานินและกรด

แอสคอร์บิกรวมทั้งเกิดปฏิกิริยาสีน้ำตาล (maillard reaction) ในแยม จึงทำให้ตัวอย่างแยมที่เพิ่มปริมาณไซลิทอลและซูคราโลสเพื่อทดแทนน้ำตาลทรายมีค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) เพิ่มขึ้นและค่าความเป็นสีแดง (a^*) ลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Basu *et al.* (2013) ที่ศึกษาเกี่ยวกับผลการใช้หญ้าหวานและซูคราโลสในผลิตภัณฑ์แยมมะม่วง โดยพบว่าแยมมะม่วงที่ใช้หญ้าหวานและซูคราโลส มีค่าความสว่าง (L^*) และค่าความเป็นสีเหลือง (b^*) เพิ่มขึ้น

ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ของแยมถั่วฝักยาวสีม่วงสิรินธรเบอร์ 1 ที่ทดแทนน้ำตาลทรายด้วยไซลิทอลและซูคราโลสที่ระดับต่างๆ แสดงดังตารางที่ 3 พบว่า แยมถั่วฝักยาวสีม่วงสิรินธรเบอร์ 1 มีค่า pH อยู่ในช่วง 3.02-3.52 โดยแยมสูตรที่ 6 (น้ำตาลทราย 10 : ซูคราโลส 45) มีค่า pH ต่ำที่สุด ($p \leq 0.05$) สอดคล้องกับงานวิจัยของ Ngampeerpong (2014) ที่รายงานแยมกระเจียบลดพลังงานโดยใช้สตีวียอไซด์และซูคราโลสทดแทนน้ำตาลซูโครสมีค่า pH อยู่ในช่วง 3.22-3.31 Belovic *et al.* (2017) รายงานว่า แยมกามะเขือที่ใช้สตีวียอไซด์และฟรักโทสมีปริมาณกรดทั้งหมดและค่า pH สูงกว่าแยมสูตรควบคุม ค่า pH มีผลต่อการเกิดเจลและความแข็งแรงของเจล ค่า pH ที่เหมาะสมที่ทำให้เจลของแยมมีความคงตัวดีที่สุดคือ 3.2 ถ้าค่า pH สูงกว่า 3.5 จะทำให้เจลมีลักษณะอ่อน และค่าความแข็งของเจลเพิ่มขึ้นเมื่อค่า pH ลดลง (Ngampeerpong, 2014)

แยมถั่วฝักยาวสีม่วงสิรินธรเบอร์ 1 ที่เติมซูคราโลสทั้ง 3 ระดับ มีค่า a_w สูงกว่าแยมสูตรควบคุม และสูตรที่เติมไซลิทอลที่ระดับต่างๆ (ตารางที่ 3) ทั้งนี้เนื่องจากในโครงสร้างของการซูคราโลสมีหมู่ไฮดรอกซิลน้อยกว่าน้ำตาลทรายและไซลิทอลดังนั้นจึงจับโมเลกุลของน้ำได้น้อยจึงทำให้แยมที่มีส่วนผสมของซูคราโลสมีค่า a_w สูงกว่ากรณีที่ใช้น้ำตาลทรายและไซลิทอล แยมถั่วฝักยาวสีม่วงสิรินธรเบอร์ 1 ทั้ง

7 สูตร มีค่า a_w อยู่ในช่วง 0.46-0.69 0 ซึ่งเป็นช่วงที่สามารถยับยั้งการเจริญของจุลินทรีย์บางชนิดได้ เพราะโดยทั่วไปยีสต์จะเริ่มเจริญได้เมื่ออาหารมีค่า a_w อยู่ในช่วง 0.70-0.80 ส่วนราเจริญได้เมื่อค่า a_w มากกว่า 0.70 และแบคทีเรียจะเจริญได้เมื่อค่า a_w มากกว่า 0.80

ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดในแฮมถั่วฝักยาวสีม่วงสิรินธรเบอร์ 1 แสดงดังตารางที่ 3 พบว่าแฮมที่ทดแทนน้ำตาลทรายด้วยซูคราโลสเพิ่มขึ้นทำให้ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดลดลงและต่ำกว่าแฮมที่ทดแทนน้ำตาลทรายด้วยข้าวไรซ์

ทอลและสูตรควบคุม ($p \leq 0.05$) ทั้งนี้อาจจะเนื่องจากปริมาณน้ำตาลทรายลดลงจึงทำให้ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Basu *et al.* (2013) รายงานว่า ปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดของแฮมมะม่วงสดเมื่อปริมาณสตีวียโอไซด์และซูคราโลสเพิ่มขึ้น แฮมที่เตรียมด้วยสตีวียโอไซด์มากกว่าร้อยละ 25 และซูคราโลสมากกว่าร้อยละ 25 มีลักษณะเป็นของเหลวและไม่สามารถพิจารณาได้ว่าเป็นแฮม ซึ่งลักษณะนี้แสดงให้เห็นว่าการเกิดโครงสร้างเจลของเพคตินไม่แข็งแรง

ตารางที่ 2 ค่าสีของแฮมถั่วฝักยาวสีม่วงสิรินธรเบอร์ 1 ที่ทดแทนน้ำตาลทรายด้วยโซลิตอลและซูคราโลสที่ระดับต่างๆ

สูตรที่ (น้ำตาล:โซลิตอล/ซูคราโลส)	ค่าความสว่าง (L*)	ค่าความเป็นสีแดง (a*)	ค่าความเป็นสีเหลือง (b*)
1 (55:0) ควบคุม	20.74±0.63 ^f	18.95±0.72 ^a	19.82±0.04 ^d
2 (20: โซลิตอล 35)	21.29±0.19 ^{cf}	18.05±0.44 ^a	20.23±0.08 ^{cd}
3 (10: โซลิตอล 45)	23.15±0.76 ^d	18.77±0.31 ^a	21.12±0.84 ^c
4 (0: โซลิตอล 55)	21.98±0.55 ^c	16.20±0.38 ^b	19.44±0.72 ^d
5 (20: ซูคราโลส 35)	28.97±0.24 ^c	15.17±0.12 ^c	19.76±0.02 ^d
6 (10: ซูคราโลส 45)	35.51±0.48 ^b	13.55±0.10 ^d	23.09±0.44 ^b
7 (0: ซูคราโลส 55)	40.33±0.14 ^a	12.13±0.01 ^c	24.70±0.04 ^a

หมายเหตุ: a,b,c... ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันในกลุ่มเดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 3 ค่าความเป็นกรดต่าง (pH) water activity (a_w) และของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมด ของแฮมถั่วฝักยาวสีม่วงสิรินธรเบอร์ 1 ที่ทดแทนน้ำตาลทรายด้วยโซลิตอลและซูคราโลสที่ระดับต่างๆ

สูตรที่ (น้ำตาล:โซลิตอล/ซูคราโลส)	ค่าความเป็นกรดต่าง (pH)	ค่า a_w	ของแข็งที่ละลายได้ ทั้งหมด (°Brix)
1 (55:0) ควบคุม	3.29±0.00 ^{ab}	0.57±0.01 ^c	65.00±0.00 ^a
2 (20: โซลิตอล 35)	3.37±0.04 ^a	0.49±0.00 ^d	65.50±0.70 ^a
3 (10: โซลิตอล 45)	3.44±0.01 ^a	0.47±0.00 ^c	66.00±0.00 ^a
4 (0: โซลิตอล 55)	3.52±0.00 ^a	0.46±0.00 ^c	66.00±0.00 ^a
5 (20: ซูคราโลส 35)	3.33±0.01 ^{ab}	0.65±0.00 ^b	45.50±0.70 ^b

ตารางที่ 3 (ต่อ)

สูตรที่ (น้ำตาล:ไซลิทอล/ซูคราโลส)	ค่าความเป็นกรดต่าง (pH)	ค่า a_w	ของแข็งที่ละลายได้ ทั้งหมด ($^{\circ}$ Brix)
6 (10: ซูคราโลส 45)	3.02 $\pm$ 0.36 ^b	0.68 $\pm$ 0.01 ^a	31.50 $\pm$ 0.70 ^c
7 (0: ซูคราโลส 55)	3.28 $\pm$ 0.00 ^{ab}	0.69 $\pm$ 0.00 ^a	15.50 $\pm$ 0.70 ^d

หมายเหตุ: a,b,c... ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันในกลุ่มเดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ค่า Rupture Strength และค่า Brittleness ของแยมที่ทดแทนน้ำตาลทรายด้วยไซลิทอลและซูคราโลสที่ระดับต่างๆ แสดงดังตารางที่ 4 พบว่า แยมถั่วฝักยาวสีม่วงสิรินธรเบอร์ 1 ที่ทดแทนน้ำตาลทรายด้วยซูคราโลสทั้ง 3 ระดับ มีค่า Rupture Strength ต่ำที่สุด ($p \leq 0.05$) เนื่องจากน้ำตาลทรายเป็นส่วนประกอบสำคัญที่ช่วยให้เพคตินเจลเกิดโครงร่างตาข่ายที่แข็งแรง เมื่อลดปริมาณน้ำตาลลงจึงมีผลทำให้ความแข็งแรงของเจลลดลง สอดคล้องกับงานวิจัยของ Basu *et al.* (2013) รายงานว่าผลิตภัณฑ์แยมมะม่วงที่ใช้ซูคราโลสและสตีวียา 100 % มีปริมาณของแข็งทั้งหมดลดลง และแยมถั่วฝักยาวสีม่วงสิรินธรเบอร์ 1 ที่ทดแทนน้ำตาลทรายด้วยไซลิทอลทั้ง 3 ระดับ มีค่า Rupture Strength สูงกว่าสูตรควบคุม Basu and Shivhare (2010) รายงานว่าค่า

ความแข็ง (hardness) ของเจลแยมขึ้นกับปริมาณความเข้มข้นของน้ำตาล โดยน้ำตาลจะจับกับเพคตินได้ดีขึ้นเมื่ออยู่ในสภาวะที่เป็นกรดทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายที่แน่นขึ้นจึงทำให้เจลมีความแข็งเพิ่มขึ้น และการเพิ่มปริมาณเพคตินมีผลทำให้ค่าความแข็งของเจลเพิ่มขึ้นด้วย เนื่องจากปริมาณเพคตินทำให้เพิ่มสายพอลิเมอร์ที่จะจับกับน้ำตาลทำให้เกิดโครงร่างตาข่ายที่ในเจลทำให้เจลแข็งขึ้น แยมถั่วฝักยาวสีม่วงสิรินธรเบอร์ 1 ที่ทดแทนน้ำตาลทรายด้วยซูคราโลส 55% มีค่า Brittleness สูงที่สุด ($p \leq 0.05$) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าความแข็งแรงของเจลลดลง หากค่า Brittleness ต่ำความแข็งแรงของเจลจะเพิ่มขึ้น แต่ความยืดหยุ่นจะลดลง

ตารางที่ 4 ค่า Rupture Strength และค่า Brittleness ของแยมถั่วฝักยาวสีม่วงสิรินธรเบอร์ 1 ที่ทดแทนน้ำตาลทรายด้วยไซลิทอลและซูคราโลสที่ระดับต่างๆ

สูตรที่ (น้ำตาล:ไซลิทอล/ซูคราโลส)	ค่า Rupture Strength (g)	ค่า Brittleness (mm)
1 (55:0) ควบคุม	405.44 $\pm$ 48.50 ^c	16.20 $\pm$ 0.48 ^b
2 (20: ไซลิทอล 35)	507.89 $\pm$ 10.29 ^b	15.84 $\pm$ 1.04 ^b
3 (10: ไซลิทอล 45)	577.94 $\pm$ 29.04 ^b	15.34 $\pm$ 0.10 ^b
4 (0: ไซลิทอล 55)	668.17 $\pm$ 41.88 ^a	14.82 $\pm$ 0.53 ^b
5 (20: ซูคราโลส 35)	19.73 $\pm$ 0.57 ^d	15.96 $\pm$ 0.44 ^b

ตารางที่ 4 (ต่อ)

สูตรที่ (น้ำตาล:ไซลิทอล/ซูคราโลส)	ค่า Rupture Strength (g)	ค่า Brittleness (mm)
6 (10: ซูคราโลส 45)	20.60±0.07 ^d	15.79±0.54 ^b
7 (0: ซูคราโลส 55)	36.35±2.86 ^d	18.60±0.86 ^a

หมายเหตุ: a,b,c... ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันในกลุ่มเดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 5 คะแนนความชอบของผู้ทดสอบชิมต่อลักษณะด้านต่างๆ ของแยมที่ทดแทนน้ำตาลทรายด้วยไซลิทอล และซูคราโลสที่ระดับต่างๆ

สูตรที่	สี	กลิ่น	รสชาติ	ลักษณะเนื้อ สัมผัส	การกระจาย ตัว	ความหวาน	ความชอบ โดยรวม
1	6.93±1.46 ^a	6.30±1.66 ^{ab}	6.90±1.60 ^a	6.67±1.66 ^a	6.70±1.46 ^a	6.43±1.65 ^a	7.60±1.06 ^a
2	6.57±1.75 ^{ab}	6.67±1.58 ^a	7.03±1.60 ^a	6.68±1.58 ^a	6.60±1.81 ^a	6.43±2.19 ^a	7.10±1.39 ^{ab}
3	6.63±1.44 ^{ab}	6.17±1.28 ^{ab}	6.47±1.69 ^{ab}	6.47±1.63 ^a	6.20±1.68 ^{ab}	6.07±1.79 ^a	6.53±1.96 ^b
4	6.03±1.60 ^b	5.77±1.61 ^{bc}	6.67±1.39 ^a	6.47±1.61 ^a	6.73±1.36 ^a	6.50±1.54 ^a	6.87±1.63 ^{ab}
5	4.73±1.81 ^c	5.63±1.47 ^{bc}	5.80±1.73 ^{bc}	5.43±1.90 ^b	5.77±2.14 ^b	5.80±1.82 ^a	6.43±1.77 ^b
6	4.13±2.01 ^c	5.23±2.07 ^c	5.07±2.19 ^c	4.90±2.21 ^b	4.80±2.15 ^c	4.97±2.20 ^b	5.57±2.17 ^c
7	2.83±1.08 ^d	3.00±0.90 ^d	3.00±0.74 ^d	3.07±1.49 ^c	3.17±0.91 ^d	3.13±0.97 ^c	3.13±0.93 ^d

หมายเหตุ: a,b,c... ค่าเฉลี่ยที่มีอักษรกำกับต่างกันในกลุ่มเดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

น้ำตาล:ไซลิทอล : สูตรที่ 1 สูตรควบคุม (55:0) ; สูตรที่ 2 (20:35) ; สูตรที่ 3 (10:45) ; สูตรที่ 4 (0:55)

น้ำตาล:ซูคราโลส : สูตรที่ 5 (20:35) ; สูตรที่ 6 (10:45) ; สูตรที่ 7 (0:55)

ตารางที่ 6 องค์ประกอบทางเคมีของแยมถั่วฝักยาวสีม่วงสตรินเบอร์ 1 ทดแทนน้ำตาลทรายด้วยไซลิทอล

สูตร	โปรตีน (%)	ความชื้น* (%)	ไขมัน (%)	ใยอาหาร (%)	เถ้า (%)	คาร์โบไฮเดรต (%)
1	1.38±0.28	29.34±0.03	0.08±0.02	25.18±1.01	0.47±0.00	43.54±1.06
2	1.29±0.23	28.82±0.09	0.05±0.00	26.09±0.04	0.48±0.01	43.26±0.02

หมายเหตุ: น้ำตาล:ไซลิทอล : สูตรที่ 1 (55:0) ควบคุม ; สูตรที่ 2 (20:35); * หมายถึง มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 7 ปริมาณแอนโทไซยานินของแฮมถั่วฝักยาวสีม่วงสิรินธรเบอร์ 1 ทดแทนน้ำตาลทรายด้วยโซลิทอล

สูตร (น้ำตาล:โซลิทอล)	ปริมาณแอนโทไซยานิน (mg/L)
1 (55:0) ควบคุม	3.48±0.08
2 (20:35)*	4.07±0.32

หมายเหตุ:* หมายถึง มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ตารางที่ 5 แสดงคะแนนความชอบของผู้ทดสอบชิมต่อลักษณะด้านต่างๆ ของแฮมที่ทดแทนน้ำตาลทรายด้วยโซลิทอลและชูคราโลสที่ระดับต่างๆ พบว่า แฮมถั่วฝักยาวสีม่วงสิรินธรเบอร์ 1 ที่ทดแทนน้ำตาลทรายด้วยชูคราโลสที่ระดับต่างๆ มีคะแนนความชอบด้านสี กลิ่น รสชาติ ลักษณะเนื้อสัมผัส การกระจายตัว ความหวาน และความชอบโดยรวมต่ำที่สุด ($p \leq 0.05$) แฮมถั่วฝักยาวสีม่วงสิรินธรเบอร์ 1 ที่ทดแทนน้ำตาลทรายด้วยโซลิทอลสูตรที่ 2 (20:35) มีคะแนนความชอบด้านสี กลิ่น รสชาติ ลักษณะเนื้อสัมผัส การกระจายตัว ความหวาน และความชอบโดยรวมไม่แตกต่างกันทางสถิติกับสูตรควบคุม ทั้งนี้เนื่องจากโซลิทอลให้ความหวานเท่ากับน้ำตาลซูโครส จึงทำให้ผู้ทดสอบชิมให้คะแนนความชอบไม่แตกต่างจากสูตรควบคุม Basu *et al.* (2011) รายงานว่าแฮมมะม่วงที่ใช้ซอร์บิทอลทดแทนซูโครสมีคะแนนความชอบโดยรวมสูงกว่าแฮมมะม่วงที่ใช้ซูโครส

2. ผลการศึกษาคุณค่าทางโภชนาการและปริมาณแอนโทไซยานินของแฮมถั่วฝักยาวสีม่วง

จากผลการวิเคราะห์คุณภาพด้านต่างๆ คณะผู้วิจัยได้เลือกแฮมถั่วฝักยาวสีม่วงสิรินธรเบอร์ 1 มา 2 สูตร ได้แก่สูตรที่ 1 คือ สูตรควบคุม (55:0) และสูตรที่ 2 คือสูตรน้ำตาลทราย 20% และโซลิทอล 35% ซึ่งเป็นสูตรที่มีคะแนนความชอบไม่แตกต่างจากสูตรควบคุม และมีคะแนนความชอบด้านรสชาติอยู่ในระดับชอบปานกลาง มาวิเคราะห์องค์ประกอบ

ทางเคมีและปริมาณแอนโทไซยานินได้ผลการทดลองแสดงดังนี้

องค์ประกอบทางเคมีของแฮมถั่วฝักยาวสีม่วงสิรินธรเบอร์ 1 สูตรควบคุม และสูตรทดแทนน้ำตาลทรายด้วยโซลิทอล 35% (ตารางที่ 6) พบว่าแฮมทั้ง 2 สูตร มีปริมาณโปรตีน ไขมัน โยอาหาร เถ้า และปริมาณคาร์โบไฮเดรตไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p > 0.05$) แฮมสูตรที่ทดแทนน้ำตาลทรายด้วยโซลิทอล 35% มีปริมาณความชื้นต่ำกว่าสูตรควบคุม ($p \leq 0.05$) และแฮมถั่วฝักยาวสีม่วงสิรินธรเบอร์ 1 ทั้ง 2 สูตร มีปริมาณใยอาหารไม่แตกต่างกัน ($p > 0.05$) Thaweeseang and Lueangprasert (2018) รายงานว่าลูกก๊ากที่เติมแป้งถั่วฝักยาวสิรินธร เบอร์- 1 มีปริมาณใยอาหาร ปริมาณ ฟีนอลิกทั้งหมด และเปอร์เซ็นต์การออกฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระเพิ่มขึ้น Belovic *et al.* (2017) ทดลองผลิตแฮมเคลือบดำโดยใช้ใยอาหารจากกากมะเขือเทศและใช้สตีวียาไฮโดรไลซ์และฟรักโทสทดแทนซูโครส พบว่า แฮมที่เติมกากมะเขือเทศเพิ่มขึ้นมีปริมาณใยอาหารเพิ่มขึ้น แต่มีปริมาณคาร์โบไฮเดรตและให้พลังงานลดลง และพบว่าแฮมกากมะเขือเทศมีปริมาณใยอาหารสูงกว่าแฮมที่ผลิตเชิงการค้า เส้นใยอาหารเป็นส่วนประกอบของผนังเซลล์ในพืช ซึ่งเป็นคาร์โบไฮเดรตที่มีโมเลกุลเชิงซ้อน ได้แก่ เซลลูโลส เพกติน เฮมิเซลลูโลส เป็นต้น เส้นใยอาหารยังช่วยในการปรับปรุงคุณสมบัติในผลิตภัณฑ์อาหาร เช่น ปรับปรุงลักษณะเนื้อสัมผัสของผลิตภัณฑ์โดยป้องกันการแยกชั้นของของเหลวจากการหดตัวของเจล และใยอาหารเป็น

ส่วนประกอบในผลิตภัณฑ์อาหารหลายชนิด ได้แก่ ผลิตภัณฑ์ขนมอบ ผลิตภัณฑ์เนื้อสัตว์ แยม เป็นต้น (Mudgil and Barak, 2013; Elleuch *et al.*, 2011)

จากตารางที่ 7 พบว่าแยมถั่วฝักยาวสีม่วงสิรินธรเบอร์ 1 ที่ทดแทนน้ำตาลทรายด้วยไซลิทอล 35% มีปริมาณแอนโทไซยานินสูงกว่าสูตรควบคุม ($p \leq 0.05$) ทั้งนี้เนื่องจากเกิดการสลายตัวของแอนโทไซยานินในระหว่างกระบวนการแปรรูป โดยทั่วไปแล้วการอุณหภูมิและเวลาที่ทำให้ความร้อนจะทำให้แอนโทไซยานินสลายตัวมากขึ้น นอกจากนั้นการสลายตัวของแอนโทไซยานินด้วยร้อนจะเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณของแข็งที่ละลายได้ทั้งหมดสูงขึ้น แอนโทไซยานินเป็นรงควัตถุที่ละลายน้ำได้ พบในผัก ผลไม้ที่มีสีม่วงแดง สีแดงและสีน้ำเงิน เป็นต้น แอนโทไซ-ยานินในเซลล์พืชมีความคงตัวค่อนข้างต่ำ โดยเฉพาะในระหว่างกระบวนการแปรรูปและการเก็บรักษา ซึ่งมีผลกระทบต่อคุณภาพของผลิตภัณฑ์สุดท้ายโดยเฉพาะด้านสีและคุณค่าทางโภชนาการ Kovacevic *et al.* (2015) รายงานว่าในระหว่างกระบวนการแปรรูปผลิตภัณฑ์พุเร (puree) และแยมสตอเบอร์รี่ ปริมาณแอนโทไซยานินเฉลี่ยลดลง 28% และจากการศึกษาอื่นๆ ในผลิตภัณฑ์แยมสตอเบอร์รี่และเชอร์รี่น้ำตาลมีการสูญเสียแอนโทไซยานินถึง 92-93% (Poiana *et al.*, 2011)

สรุป

การเพิ่มปริมาณการทดแทนน้ำตาลทรายด้วยไซลิทอลและซูคราโลสมีผลทำให้แยมถั่วฝักยาวสีม่วงสิรินธรเบอร์ 1 มีค่าความสว่าง (L^*) เพิ่มขึ้น และค่าความเป็นสีแดง (a^*) ลดลง แยมถั่วฝักยาวสีม่วงสิรินธรเบอร์ 1 ที่ทดแทนน้ำตาลทรายด้วยไซลิทอลและซูคราโลสมีค่า pH อยู่ในช่วง 3.02-3.52 แยมสูตรควบคุม (น้ำตาลทราย 55%) และสูตรที่ทดแทนน้ำตาลทรายด้วยไซลิทอลมีค่า a_w สูงกว่าแยมสูตรที่

ทดแทนน้ำตาลทรายด้วยซูคราโลส แยมสูตรที่ทดแทนน้ำตาลทรายด้วยซูคราโลสเพิ่มขึ้นมีปริมาณของที่ละลายได้ทั้งหมดลดลงเมื่อเทียบกับสูตรควบคุม ($p \leq 0.05$) แยมสูตรที่ทดแทนน้ำตาลทรายด้วยซูคราโลสมีค่า Rupture Strength ต่ำที่สุด ($p \leq 0.05$) แยมถั่วฝักยาวสีม่วงสิรินธรเบอร์ 1 ที่ทดแทนน้ำตาลทรายด้วยซูคราโลส 55% มีค่า Brittleness สูงที่สุด ($p \leq 0.05$) แยมสูตรที่ 2 ซึ่งใช้น้ำตาลทราย 20% และ ไซลิทอล 35% มีคะแนนความชอบด้านสี กลิ่น รสชาติ ลักษณะเนื้อสัมผัส การกระจายตัว ความหวาน และความชอบโดยรวมไม่แตกต่างกันทางสถิติกับสูตรควบคุม แยมที่ทดแทนน้ำตาลทรายด้วยไซลิทอล 35% มีปริมาณแอนโทไซยานินสูงกว่าสูตรควบคุม ($p \leq 0.05$) และมีปริมาณโปรตีน ไขมัน โยอาหาร เกลือ และคาร์โบไฮเดรตไม่แตกต่างจากสูตรควบคุม

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณงบประมาณเงินรายได้จากเงินอุดหนุนรัฐบาล (งบประมาณแผ่นดิน) ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2561 มหาวิทยาลัยบูรพาที่ให้ทุนสนับสนุนการทำวิจัยในครั้งนี้ และขอบคุณมหาวิทยาลัยราชภัฏกาญจนบุรี ขอขอบคุณคณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีที่ให้การสนับสนุนและสถานที่ในการทำวิจัยในครั้งนี้

เอกสารอ้างอิง

- Agricultural Research and Extension Maejo University.
2014. **Purple Yard Long Bean (*Vigna unguiculata* subsp. *Sesquipedalis*)**. Available Source: <http://portal.rae.mju.ac.th/dbplant/index.php/horticulture/vegetable/item/vigna-unguiculata>, September 15, 2014. (in Thai)

- Albuquerque, T.L., Silva, J.I.J., Macedob, G.R. and Rochaa, M.V.P. 2014. Biotechnological production of xylitol from lignocellulosic wastes: A review. **Process Biochemistry** 49: 1779-1789.
- AOAC. 2005. **Official methods of analysis of AOAC international**. 18th Ed. AOAC International, USA.
- Basu, S. and Shivhare, U.S. 2010. Rheological, textural, micro-structural and sensory properties of mango jam. **Journal of Food Engineering** 100: 357-365.
- Basu, S., Shivhare, U.S. and Singh, T.V. 2013. Effect of substitution of stevioside and sucralose on rheological, spectral, color and microstructural characteristics of mango jam. **Journal of Food Engineering** 114: 465-476.
- Basu, S., Shivhare, U.S., Singh, T.V. and Beniwal, V.S. 2011. Rheological, textural and spectral characteristics of sorbitol substituted mango jam. **Journal of Food Engineering** 105(3): 503-512.
- Belovic, M., Torbica, A., Pajic, I. and Mastilovic, J. 2017. Development of low calorie jams with increased content of natural dietary fibre made from tomato pomace. **Food Chemistry** 237: 1226-1233.
- Carocho, M., Morales, P. and Ferreira, I.C.F.R. 2017. Sweeteners as food additives in the XXI century: A review of what is known, and what is to come. **Food and Chemical Toxicology** 107: 302-317.
- CODEX. 2009. **Codex standard 296: Standard for Jams, Jellies and Marmalades**. Available Source: <http://www.codexalimentarius.net>, September 10, 2018.
- Dulce, M.J. and Michael, A.G. 2017. Minerals, vitamin C, phenolics, flavonoids and antioxidant activity of Amaranthus leafy vegetables. **Journal of Food Composition and Analysis** 58: 33-39.
- Elleuch, M., Bedigian, D., Roiseux, O., Besbes, S., Blecker, C. and Attia, H. 2011. Dietary fibre and fibre-rich by-products of food processing: Characterisation, technological functionality and commercial applications: A review. **Food Chemistry** 124(2):411-421.
- Kovacevic, D.B., Putnik, P., Dragovic-Uzelac, V., Vahcic, N., Babojelic, M.S. and Levaj, B. 2015. Influences of organically and conventionally grown strawberry cultivar on anthocyanins content and color in purees and low-sugar jams. **Food Chemistry** 181: 94-100.
- Mudgil, D. and Barak, S. 2013. Composition properties and health benefits of indigestible carbohydrate polymers as dietary fiber: A review. **International Journal of Biological Macromolecules** 61: 1-6.
- Ngampeerpong, N. 2014. Development of Reduced Sugar Roselle Jam Product. Master Thesis of Science (Agro-Industrial Product Development), Maejo University. (in Thai)

- Poiana, M.A.M.D., Dogaru, D., Mateescu, C., Raba, D. and Gergen, J. 2011. Processing and storage impact on the antioxidant properties and color quality of some lowsugar fruit jams Romanian. **Biotechnological Letters** 16(5): 6504-6512.
- Randhawa, M.A., Khan, A.A., Javed, M.S. and Sajid, M.W. 2015. Chapter 18 - Green leafy vegetables: a health promoting source, pp. 205-220. In Watson, R.R., ed. **Handbook of Fertility**. Academic Press, San Diego, CA, USA.
- Reisa, L.C.R., Faccob, E.M.P., Floresa, S.H. and Riosa, A.O. 2018. Stability of functional compounds and antioxidant activity of fresh and pasteurized orange passion fruit (*Passiflora caerulea*) during cold storage. **Food Research International** 106: 481-486.
- Thaweeseang, N. and Lucangprasert, K. 2018. Substitution of Wheat Flour with Purple Yard Long Bean Flour (*Vigna unguiculata* subsp. *sesquipedalis*) cv. Sirindhorn No.1 in cookies. **Science and Technology Journal** 26(7): 1222-1233. (in Thai)

การออกแบบและสร้างเครื่องคัดขนาดเมล็ดบัวหลวง

Design and Fabrication of Lotus Seeds Sizing Machine

จตุรงค์ ลังกาพินธุ์* สุนัน ปานสาคร และ รุ่งเรือง กาลศิริศิลป์

Jaturong Langkapin*, Sunan Parnsakhorn and Roongruang Kalsirisilp

Received: 27 April 2020, Revised: 9 October 2020, Accepted: 4 November 2020

บทคัดย่อ

เครื่องคัดขนาดเมล็ดบัวหลวงถูกออกแบบสร้างขึ้นเพื่อศึกษาและทดสอบหาหลักการทำงานที่มีแนวโน้มเหมาะสมที่สุดสำหรับการคัดขนาดเมล็ดบัวหลวง เครื่องต้นแบบประกอบด้วย โครงสร้างหลัก ถังป้อนเมล็ด ชุดคัดขนาด ระบบส่งกำลัง และใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 1 แรงม้า เป็นต้นกำลัง หลักการทำงานของเครื่องเริ่มจากผู้ทำงานป้อนเมล็ดบัวหลวงลงในถังป้อนเมล็ดเข้าทางด้านบนของเครื่อง หลังจากนั้นเมล็ดบัวหลวงจะไหลเข้าสู่ชุดคัดขนาดที่ประกอบด้วยตะแกรงทรงกระบอก 3 ชั้น ที่สามารถคัดขนาดเมล็ดบัวได้ 3 ขนาด และเมล็ดบัวหลวงที่ผ่านการคัดขนาดจะไหลสู่ช่องทางออกต่างๆ ทางด้านหน้าเครื่อง จากการทดสอบโดยใช้ช่องป้อน 3 ขนาด และใช้ความเร็วรอบของเพลาลำดับชุดคัดขนาด 20, 25 และ 30 รอบต่อนาที ตามลำดับ พบว่าเครื่องคัดขนาดเมล็ดบัวหลวงสามารถทำงานได้ดีที่สุดที่ช่องป้อนขนาดใหญ่ (15×10 เซนติเมตร²) ด้วยอัตราการป้อน 330 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และความเร็วรอบของเพลาลำดับชุดคัดขนาด 25 รอบต่อนาที (ความเร็วเชิงเส้น 0.67 เมตรต่อวินาที) มีความสามารถในการทำงาน 128.2 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ความแม่นยำในการคัดขนาดเฉลี่ย 92.1% โดยเมล็ดบัวหลวงไม่มีความเสียหาย และใช้พลังงานไฟฟ้า 0.33 กิโลวัตต์-ชั่วโมง

คำสำคัญ: การออกแบบ, เครื่องคัดขนาด, เมล็ดบัวหลวง, บัวหลวง

ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี อำเภอธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Thanyaburi, Pathumthani 12110, Thailand.

* ผู้รับผิดชอบประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): jaturong.l@en.rmutt.ac.th

ABSTRACT

The lotus seeds sizing machine was designed and fabricated to study and test factors affecting the grading of lotus seeds. The machine consists of a main frame, a hopper, a seeds sizing unit, a power transmission unit, and a 1 hp electric motor which was used as a prime mover. In the operation, the lotus seeds were fed manually into feeding chute on the top of the machine, then the seeds fell through the seed sizing unit which composed of 3 cylindrical sieves that served for grading into 3 sizes. After that, seeds were released through outlet chute at the front of the machine. The prototype was tested for 3 different sizes of feeding, and at the seeds sizing unit speed of 20, 25 and 30 rpm, respectively. It indicated that the optimal performance was achieved when the machine was operated at seeds sizing unit rotational speed of 25 rpm (Linear speed of the screen for grading is 0.67 m/s), using large size of feeding ($15 \times 10 \text{ cm}^2$) with feeding rate of 330 kg/hour. The working capacity was 128.2 kg/hour and the percentage of grading was found to be 92.1% with no percentage of damaged seeds. It consumed 0.33 kW-hour of energy.

Key words: design, sizing machine, lotus seed, lotus

บทนำ

บัวหลวงเป็นพืชที่สามารถเจริญเติบโตได้ดีในทุกพื้นที่ของประเทศไทย ดังนั้นภาครัฐจึงได้สนับสนุนให้ปลูกบัวหลวงเพิ่มขึ้นโดยเฉพาะในพื้นที่ที่มีน้ำท่วมขังไม่สามารถปลูกพืชชนิดอื่นได้อีกทั้งปัจจุบันการทำนาข้าวประสบปัญหาทั้งในเรื่องการขาดน้ำ และราคาข้าวไม่แน่นอน นาบัวจึงเป็นทางเลือกใหม่ทางหนึ่งที่มีความเหมาะสมกับพื้นที่นาข้าว นาบ้วยังสามารถดูแลรักษาง่ายกว่านาข้าว มีโรคและแมลงรบกวนน้อย ใช้น้ำน้อยกว่า สามารถเก็บเกี่ยวผลผลิตทั้งในรูปดอกตูมและเก็บเมล็ด ซึ่งผลผลิตทั้งสองรูปแบบนี้ยังเป็นที่ต้องการของทั้งในประเทศและต่างประเทศ ทำให้เกษตรกรจำนวนมากในหลายจังหวัดได้เปลี่ยนมายึดการปลูกบัวเป็นอาชีพหลักแทนการปลูกข้าว (Suwannaro, 2007; Mueangsuk, 2016; Anonymous, 2017)

เมล็ดบัวคือส่วนเมล็ดที่อยู่ในฝักบัวหลวง เมล็ดบัวสดจะมีวิตามินซีสูง ส่วนเมล็ดบัวแห้งจะมี

คาร์โบไฮเดรตเป็นส่วนประกอบหลักมากถึง 60% มีโปรตีนสูง มีฟอสฟอรัสและธาตุเหล็ก แต่ไม่มีไขมัน ในตำราแพทย์แผนจีน เมล็ดบัวมีสรรพคุณเด่นช่วยในเรื่องของการบำรุงเลือด ช่วยขับลม แก้ท้องผูก ท้องเฟ้อ นอกจากนี้ยังมีสรรพคุณทางยาอีกมาก (Suksawat, 2017; Jolly, 2018) ปัจจุบันเมล็ดบัวหลวงได้ถูกนำมาแปรรูปเป็นเมล็ดบัวอบกรอบเป็นสินค้าโอท็อปของหลายจังหวัดที่มีการทำนาบัว วางจำหน่ายตามโมเดิร์นเทรด (Modern Trade) เช่น ที่อปลัสซูเปอร์มาร์เก็ต เซเว่น-อีเลฟเว่น เป็นต้น (Vijitwittayapong, 2013; Langkapin *et al.*, 2018a)

ขั้นตอนการแปรรูปเมล็ดบัวหลวงในปัจจุบัน เริ่มจากการคัดแยกเมล็ดบัวที่มีขนาดเล็กเกินไป และเปลือกโดยใช้มีด และลอกเยื่อจนได้เมล็ดบัวสีขาว ซึ่งขั้นตอนการทำงานดังกล่าวยังใช้แรงงานคนเป็นหลัก ทำให้ต้องใช้เวลาในการเตรียมเมล็ดบัวเพื่อการแปรรูปสูง อีกทั้งในประเทศไทยยังไม่มีเครื่องทุ่นแรงสำหรับใช้ในกระบวนการแปรรูป

เมล็ดบัวหลวง ส่วนเครื่องทุ่นแรงที่มีใช้ในต่างประเทศ เช่นในประเทศจีนนั้นไม่เหมาะที่จะนำมาใช้กับเมล็ดบัวพันธุ์ที่นิยมปลูกในประเทศไทย เนื่องจากเมล็ดบัวหลวงมีลักษณะทางกายภาพที่แตกต่างกัน (เมล็ดบัวหลวงของประเทศจีนจะมีขนาดใหญ่และยาวกว่าเมล็ดบัวหลวงที่ปลูกในประเทศไทย) และราคานำเข้าค่อนข้างแพง จึงได้มีการวิจัยและพัฒนาเครื่องแกะเมล็ดบัวหลวง (Langkapin *et al.*, 2018a) และเครื่องลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวง (Langkapin *et al.*, 2019) รวมทั้งเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดบัวหลวงขึ้น (Langkapin *et al.*, 2015; Langkapin *et al.*, 2018b) เพื่อใช้งานในประเทศ ซึ่งเครื่องต้นแบบดังกล่าวที่ได้วิจัยมีเปอร์เซ็นต์ในการแกะและการกะเทาะเมล็ดบัวหลวงระหว่าง 79.8 - 81.0% จะเห็นว่าเครื่องต้นแบบไม่สามารถแกะหรือกะเทาะเปลือกเมล็ดบัวได้ประมาณ 20% เนื่องจากเมล็ดบัวกลุ่มนี้มีขนาดเล็กกว่าเมล็ดบัวกลุ่มที่แกะหรือกะเทาะได้สมบูรณ์ ซึ่งกรณีของเครื่องแกะเมล็ดบัวหลวงต้องทำการปรับตั้งระยะใบมีดของเครื่องให้เล็กลงจึงจะสามารถแกะเปลือกของเมล็ดบัวดังกล่าวได้ ส่วนเครื่องกะเทาะเปลือกก็ต้องปรับตั้งระยะของลูกกะเทาะให้เล็กลงเช่นกันทำให้เสียเวลาในการทำงาน ดังนั้น จตุรงค์และคณะ จึงได้ออกแบบและสร้างเครื่องคัดขนาดเมล็ดบัวหลวงขึ้นมาเพื่อใช้งาน แต่เครื่องดังกล่าวยังมีปัญหาในเรื่องของเมล็ดบัวหลวงติดตะแกรงคัดขนาด (Langkapin *et al.*, 2020) ดังนั้นคณะวิจัยจึงได้นำเรื่องนี้มาทำการวิจัยเพื่อพัฒนาเครื่องคัดขนาดเมล็ดบัวหลวงขึ้นใหม่สำหรับคัดขนาดเมล็ดบัวหลวงพันธุ์ที่ปลูกในประเทศไทย เช่น บัวหลวงพันธุ์พุม ให้ง่ายต่อการดำเนินงานที่ดีขึ้นและเพิ่มประสิทธิภาพให้กับเครื่องแกะและเครื่องกะเทาะเมล็ดบัวหลวงต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้มีระเบียบวิธีการวิจัย ดังนี้

1. ศึกษาข้อมูลที่เป็นต่อการออกแบบ

1.1 ศึกษาปัญหาและวิธีการแกะเปลือกเมล็ดบัวหลวงเพื่อแปรรูป

วัตถุประสงค์เพื่อให้ทราบถึงปัญหาและวิธีการแกะเปลือกเมล็ดบัวหลวงของเกษตรกรในปัจจุบัน เพื่อใช้เป็นข้อมูลสำหรับออกแบบและเปรียบเทียบการทำงานระหว่างเครื่องคัดขนาดเมล็ดบัวหลวงให้สอดคล้องกับวิธีที่ใช้อยู่ในปัจจุบัน จากการสัมภาษณ์กลุ่มแม่บ้านบึงสีไฟ อ.เมือง จ.พิจิตร ได้ผลการศึกษา ดังนี้

- แรงงานในกระบวนการผลิตมาจากแรงงานในกลุ่มสหกรณ์ในชุมชนซึ่งมีสมาชิก 30 คน หรือหมู่บ้านใกล้เคียง ซึ่งในปัจจุบันจำนวนแรงงานมีจำนวนลดลง

- ค่าจ้างแรงงานสำหรับการคัดแยกเมล็ดบัว การแกะและลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวงประมาณ 10-20 บาทต่อกิโลกรัม

- ปริมาณการคัดแยกเมล็ดบัว การแกะและลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวงในแต่ละวันประมาณ 24-36 กิโลกรัม (ทำงานไม่เกิน 8 ชั่วโมง) โดยขึ้นอยู่กับความชำนาญในการทำงานของแรงงานแต่ละคน

- ปัญหาที่พบในขั้นตอนการคัดแยกเมล็ดบัว การแกะและลอกเยื่อเมล็ดบัวหลวง คือ ความล่าช้าในการทำงาน ความไม่ปลอดภัยในการทำงาน เช่น เกิดอุบัติเหตุจากมีดบาด (Langkapin *et al.*, 2018a; Langkapin *et al.*, 2019)

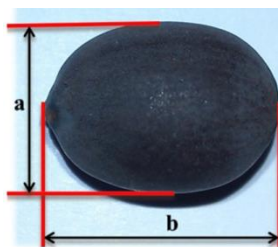
1.2 ลักษณะทางกายภาพของเมล็ดบัวหลวง

การศึกษาในขั้นตอนนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อให้ได้ข้อมูลลักษณะทางกายภาพของเมล็ดบัวหลวงสำหรับใช้ในการออกแบบเครื่องต้นแบบ ได้แก่ เส้นผ่านศูนย์กลาง (a) และความยาว (b) ของเมล็ดบัวหลวง ดังภาพที่ 1 และความชื้นของเมล็ดบัวหลวง

แห่ง (William and George, 2005) โดยเมล็ดบัวหลวงที่ใช้ศึกษาเป็นเมล็ดบัวหลวงแห้งที่เก็บจากบึงสีไฟ อ.เมือง จ.พิจิตร จากการสุ่มวัดขนาดเมล็ดบัวหลวงแห้งจำนวน 200 เมล็ด ด้วยเวอร์เนียร์คาลิเปอร์ (ยี่ห้อ Mitutoyo รุ่น 530-118 ผลิตจากประเทศญี่ปุ่น) ได้เส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 11.2-12.7 มิลลิเมตร มีค่าเฉลี่ย 11.8 ± 0.29 มิลลิเมตร ความยาวระหว่าง 15.0-18.3 มิลลิเมตร ค่าเฉลี่ย 16.1 ± 0.5 มิลลิเมตร และความชื้นของเมล็ดบัว 7.5% w.b.

จากการวิเคราะห์หาค่าความถี่ของเส้นผ่านศูนย์กลางของเมล็ดบัวหลวงแห้ง โดยแบ่งขนาดของ

เมล็ดบัวออกเป็น 3 กลุ่ม คือ เมล็ดบัวขนาดเล็ก (เส้นผ่านศูนย์กลางน้อยกว่า 11.5 มิลลิเมตร) ขนาดกลาง (เส้นผ่านศูนย์กลางระหว่าง 11.5-12.0 มิลลิเมตร) และขนาดใหญ่ (เส้นผ่านศูนย์กลางใหญ่กว่า 12.0 มิลลิเมตร) พบว่าเมล็ดบัวหลวงอยู่ในกลุ่ม ขนาดเล็ก ขนาดกลาง และขนาดใหญ่ เท่ากับ 11, 65 และ 24% ตามลำดับ ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของจตุรงค์และคณะ (Langkapin *et al.*, 2020) โดยจะใช้ขนาดทั้ง 3 กลุ่มนี้กำหนดขนาดของรูตะแกรงของชุดคัดขนาด



ภาพที่ 1 ความยาวและเส้นผ่านศูนย์กลางของเมล็ดบัวหลวงแห้ง (Langkapin *et al.*, 2018b)

2. การออกแบบและสร้างเครื่องคัดขนาดเมล็ดบัวหลวง

เครื่องคัดขนาดเมล็ดบัวหลวงได้ถูกออกแบบและสร้างขึ้นโดยใช้ข้อมูลที่เป็นต่อการออกแบบตามหัวข้อข้างต้นและมีเกณฑ์ในการออกแบบ ดังต่อไปนี้

- คัดขนาดเมล็ดบัวหลวงสำหรับบัวพันธุ์ที่นิยมปลูกภายในประเทศ
- กลไกการทำงานของเครื่องไม่ซับซ้อนมากเกินไป และผู้ปฏิบัติงานสามารถปฏิบัติได้สะดวก และมีความปลอดภัย
- โรงงานเครื่องจักรกลเกษตรทั่วไปสามารถนำไปผลิตได้ และซ่อมแซมบำรุงรักษาง่าย อุปกรณ์ชิ้นส่วนหากชำรุด สามารถถอดเปลี่ยนได้ง่าย และมีจำหน่ายทั่วไปตามท้องตลาด
- ใช้ผู้ปฏิบัติงานไม่เกิน 2 คน

นอกจากนั้นยังได้ประยุกต์ใช้ความรู้และหลักการออกแบบเครื่องจักรกลและเครื่องจักรกลเกษตร (Shigley and Mischke, 1989; Krutz *et al.*, 1994) รวมทั้งใช้โปรแกรมคอมพิวเตอร์ช่วยในการออกแบบและเขียนแบบ (Langkapin, 2018) ซึ่งมีส่วนประกอบหลักดังภาพที่ 2 (ก) และ (ข) คือ ซึ่งประกอบด้วย 1) โครงสร้างหลัก 2) ถังป้อนเมล็ด 3) ชุดคัดขนาด 4) ระบบส่งกำลังและโซ่มอเตอร์ไฟฟ้า ขนาด 1 แรงม้า เป็นต้นกำลัง มีรายละเอียด ดังนี้

โครงสร้างหลัก ใช้สำหรับติดตั้งอุปกรณ์ต่างๆ ของเครื่องต้นแบบ มีขนาด $830 \times 1,300 \times 840$ มิลลิเมตร (กว้าง×ยาว×สูง) สร้างจากเหล็กฉากขนาด 40×40 มิลลิเมตรหนา 4 มิลลิเมตร เชื่อมประกอบกันเป็นโครงสร้าง โดยอุปกรณ์ส่วนใหญ่ถูกยึดเข้ากับโครงสร้างด้วยนอตและสกรู

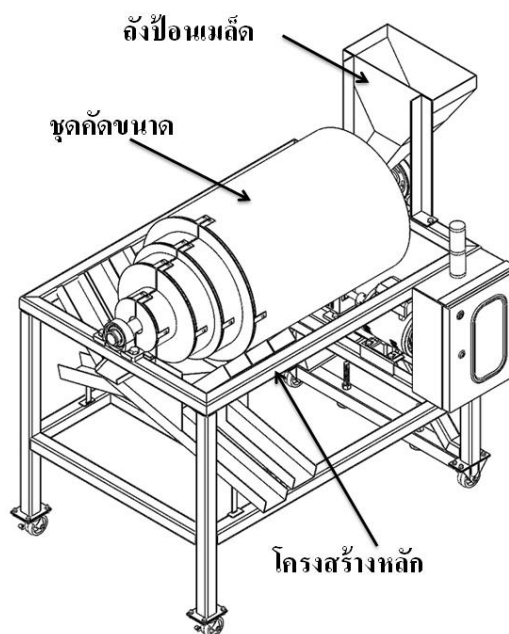
ชุดคัดขนาด ประกอบด้วยตะแกรงทรงกระบอกหมุน 3 ชั้นดังภาพที่ 2 (ก) สามารถคัดขนาดเมล็ดบัวหลวงได้ 3 ขนาด และด้านหน้ามีฝาครอบกันเมล็ดกระเด็น โดยตะแกรงทรงกระบอกหมุนทั้ง 3 ชั้น เรียงเชื่อมต่อกัน และมีรูแบบร่องสลอต (Slot) มีความกว้างของรูต่างกัน 3 ขนาด คือ 11.0 มิลลิเมตร 11.5 มิลลิเมตร และ 12.0 มิลลิเมตร เพื่อป้องกันไม่ให้เมล็ดบัวติดตามรูตะแกรงและเพิ่มประสิทธิภาพในการคัดขนาด เมล็ดบัวหลวงที่ผ่านการคัดขนาดแล้วจะไหลสู่ช่องทางออกต่างๆ ของเครื่อง

ถังป้อนเมล็ด ถูกออกแบบให้มีปริมาตรบรรจุเมล็ดบัวหลวงขั้นต่ำ 5 กิโลกรัม สร้างจากแผ่นสแตนเลสหนา 2 มิลลิเมตร เชื่อมประกอบกันมีลักษณะดังภาพที่ 2 (ก) ช่องทางออกของถังป้อนเมล็ดที่ป้อนเมล็ดบัวเข้าสู่ชุดคัดขนาด มีลักษณะเป็นรูปสี่เหลี่ยมสามารถปรับขนาดช่องป้อนได้ 3 ระดับ

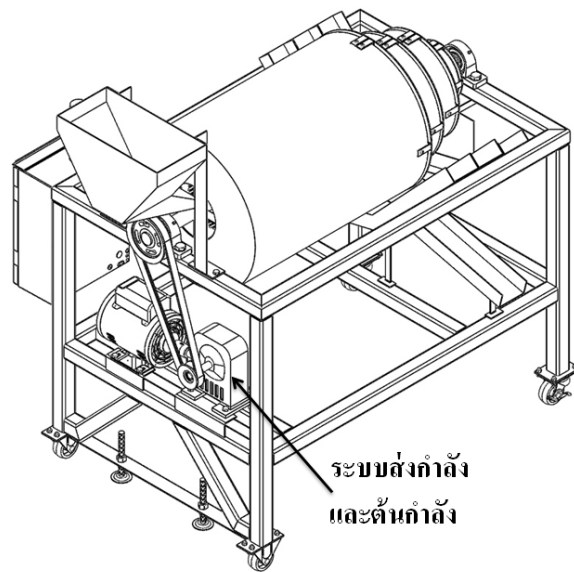
คือ ขนาดเล็ก (5×10 เซนติเมตร²) ขนาดกลาง (10×10 เซนติเมตร²) และขนาดใหญ่ (15×10 เซนติเมตร²)

การส่งกำลังไปยังส่วนประกอบต่างๆ ของเครื่องต้นแบบ จะใช้พูลเลย์ (Pulley) สายพาน และชุดเกียร์ทดรอบ เนื่องจากออกแบบง่าย ไม่เกิดเสียงดังขณะทำงาน ราคาถูก และหาซื้อง่าย ใช้อินเวอร์เตอร์ (Inverter) ในการควบคุมความเร็วของมอเตอร์ไฟฟ้า

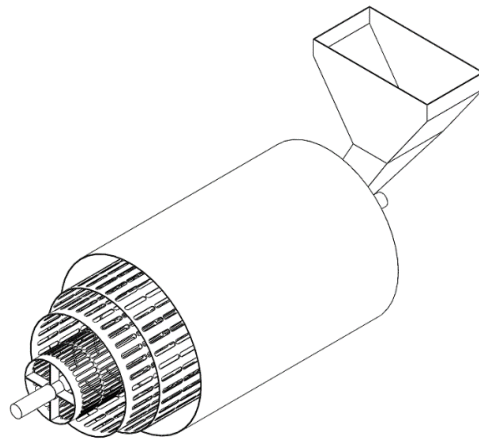
หลักการทำงานของเครื่องเริ่มจากผู้ทำงานป้อนเมล็ดบัวหลวงลงในถังป้อนเมล็ดเข้าทางด้านบนของเครื่อง หลังจากนั้นเมล็ดบัวหลวงจะไหลเข้าสู่ชุดคัดขนาดที่ประกอบด้วยตะแกรงทรงกระบอก 3 ชั้นที่สามารถคัดขนาดเมล็ดบัวได้ 3 ขนาด และเมล็ดบัวหลวงที่ผ่านการคัดขนาดจะไหลสู่ช่องทางออกต่างๆ ทางด้านหน้าเครื่องลงสู่ภาชนะที่รองรับ ซึ่งเครื่องต้นแบบที่สร้างเสร็จแสดงดังภาพที่ 2 (ง) และปัจจุบันเครื่องต้นแบบได้จดอนุสิทธิบัตรเรียบร้อยแล้ว (เลขที่อนุสิทธิบัตร 16393)



ก) แบบด้านหน้าของเครื่องต้นแบบ



ข) แบบด้านหลังของเครื่องต้นแบบ



ค) แบบชุดคัดขนาดเมล็ดบัวหลวง



ง) เครื่องคัดขนาดเมล็ดบัวหลวงต้นแบบ

ภาพที่ 2 แบบและเครื่องคัดขนาดเมล็ดบัวหลวง

3. ทดสอบและประเมินสมรรถนะเครื่องคัดขนาดเมล็ดบัวหลวง

เครื่องคัดขนาดเมล็ดบัวหลวงได้ถูกทดสอบและประเมินสมรรถนะในการทำงาน รวมทั้งความแม่นยำในการคัดขนาดเฉลี่ยเมล็ดบัวหลวง โดยใช้เปอร์เซ็นต์ความแม่นยำในการคัดขนาดเฉลี่ยความสามารถในการทำงานจริง เปอร์เซ็นต์ความ

เสียหายของเมล็ด และการใช้พลังงานไฟฟ้า เป็นค่าชี้ผลการศึกษา ซึ่งหาได้จากสมการต่อไปนี้

1) เปอร์เซ็นต์ความแม่นยำในการคัดขนาดเฉลี่ย คือความแม่นยำเฉลี่ยในการคัดขนาดเมล็ดบัวทุกขนาดที่คัดได้จากเครื่องต้นแบบ คำนวณได้จากสมการที่ (1)

$$C_t = \frac{W_1}{W} \times 100 \quad (1)$$

C_t = เปอร์เซ็นต์ความแม่นยำในการคัดขนาดเฉลี่ย (%)

W_1 = น้ำหนักของเมล็ดบัวหลวงที่มีขนาดถูกต้องหลังการคัดขนาด (กิโลกรัม)

W = น้ำหนักของเมล็ดบัวหลวงตามขนาดที่กำหนดทั้งหมด (กิโลกรัม)

2) ความสามารถในการทำงานจริง คำนวณได้จากสมการที่ (2)

$$C_a = \frac{W_2}{T} \quad (2)$$

C_a = ความสามารถในการทำงานจริง (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)

W_2 = น้ำหนักของเมล็ดบัวหลวงที่ผ่านการคัดขนาดทั้งหมด (กิโลกรัม)

T = เวลาในการทำงานทั้งหมด (กิโลกรัม)

3) เปอร์เซ็นต์ความเสียหายของเมล็ดบัว คือ เมล็ดบัวหลวงที่แตกผิรูปร่างเมล็ดเดิมทุกๆ รูปแบบจากการ

ทดสอบถือว่าเป็นเมล็ดบัวที่เสียหายทั้งหมด คำนวณได้จากสมการที่ (3)

$$D_g = \frac{W_3}{W} \times 100 \quad (3)$$

D_g = เปอร์เซ็นต์ความเสียหายของเมล็ด (%)

W_3 = น้ำหนักของเมล็ดบัวหลวงที่เสียหาย (กิโลกรัม)

W = น้ำหนักของเมล็ดบัวหลวงตามขนาดที่กำหนดทั้งหมด (กิโลกรัม)

4) การสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า คำนวณได้จากสมการที่ (4)

$$P = \frac{IVt}{1000} \quad (4)$$

P = การสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)

I = กระแสไฟฟ้า (แอมแปร์)

V = แรงเคลื่อนไฟฟ้า (โวลต์)

t = เวลา (ชั่วโมง)

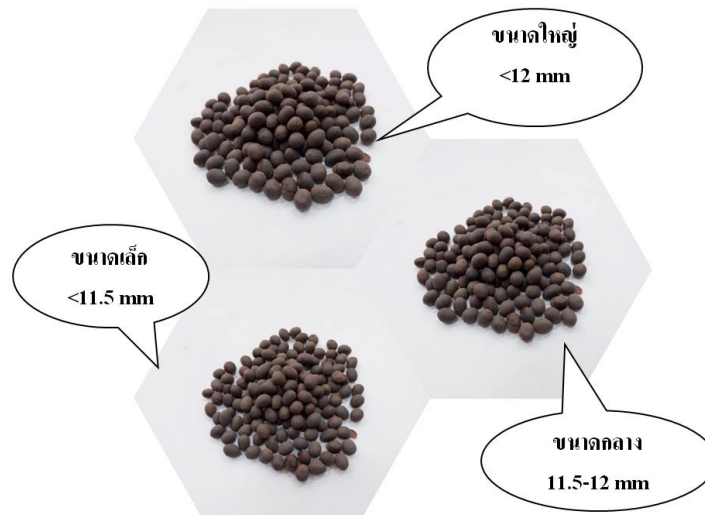
จากการทดสอบเบื้องต้นพบว่าต้องเดินเครื่องที่ความเร็วรอบของเพลาคับชุดคัตขนาดน้อยกว่า 30 รอบต่อนาที ซึ่งถ้าความเร็วรอบของเพลาคับชุดคัตขนาดสูงกว่านี้จะทำให้เมล็ดบัวหลวงจะไหลเคลื่อนที่เร็วเกินไปทำให้ความแม่นยำในการคัตขนาดเฉลี่ยลดลง ดังนั้นปัจจัยที่ได้ทำการศึกษามี 2 ปัจจัย คือ ความเร็วรอบของเพลาคับชุดคัตขนาด 3 ระดับ คือ 20, 25 และ 30 รอบต่อนาที (ความเร็วเชิงเส้นเท่ากับ 0.54, 0.67 และ 0.80 เมตรต่อวินาที) และขนาดช่องป้อนเข้าสู่ชุดคัตขนาด 3 ระดับ คือ ขนาดเล็ก (5×10 เซนติเมตร²; อัตราการป้อน 110 กิโลกรัมต่อชั่วโมง) ขนาดกลาง (10×10 เซนติเมตร²; อัตราการป้อน 220 กิโลกรัมต่อชั่วโมง) และขนาดใหญ่ (15×10 เซนติเมตร²; อัตราการป้อน 330 กิโลกรัมต่อชั่วโมง) โดยทดสอบซ้ำ 3 ซ้ำ

การทดสอบใช้เมล็ดบัวหลวงพันธุ์ปทุมตลอดการทดสอบ โดยแต่ละการทดสอบใช้เมล็ดบัวหลวง 3 กิโลกรัม ป้อนลงในถังป้อนแล้วเปิดช่องป้อนตามขนาดที่กำหนดปล่อยให้เมล็ดบัวไหลเข้าสู่ชุดคัตขนาดอย่างต่อเนื่อง ซึ่งเมล็ดบัวหลวงที่ใช้ประกอบด้วยเมล็ดบัวหลวงที่มีขนาดใหญ่กว่า 12.0 มิลลิเมตร ขนาดระหว่าง 11.5-12.0 มิลลิเมตร และ

ขนาดเล็กกว่า 11.5 มิลลิเมตร อย่างละ 1 กิโลกรัม ผสมรวมกัน ความชื้นของเมล็ดบัว 7.4% w.b. และบันทึกเวลาที่ใช้ในการทำงานทั้งหมด กระแสไฟฟ้าน้ำหนักเมล็ดบัวที่ไหลออกมาจากช่องทางออกต่างๆ น้ำหนักเมล็ดบัวที่ปนกับเมล็ดบัวขนาดอื่น และน้ำหนักเมล็ดบัวที่เสียหาย เพื่อใช้เป็นข้อมูลในการคำนวณค่าชี้ผลการศึกษา และวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS เวอร์ชัน 20 ที่ระดับความแตกต่างทางสถิติ 95% (One-way analysis of variance (ANOVA)) และทำการเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยตามวิธีของ Duncan New's Multiple Range Test (DMRT)

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

ในการทดสอบสมรรถนะการทำงานของเครื่องคัตขนาดเมล็ดบัวหลวง เครื่องต้นแบบสามารถคัตขนาดเมล็ดบัวหลวงได้ 3 ขนาด แสดงดังภาพที่ 3 คือ ขนาดใหญ่กว่า 12.0 มิลลิเมตร ขนาดระหว่าง 11.5-12.0 มิลลิเมตร และขนาดเล็กกว่า 11.5 มิลลิเมตร โดยการทดสอบไม่พบเมล็ดบัวหลวงที่แตกเสียหายหลังจากการทดสอบ



ภาพที่ 3 เมล็ดบัวหลวงหลังการทดสอบ

ซึ่งผลการทดสอบเครื่องคัดขนาดเมล็ดบัวหลวงที่ความเร็วรอบของเพลาลับชุดคัดขนาดและขนาดช่องป้อนต่างๆ จะนำเสนอตามค่าชี้ผลการศึกษา ดังนี้

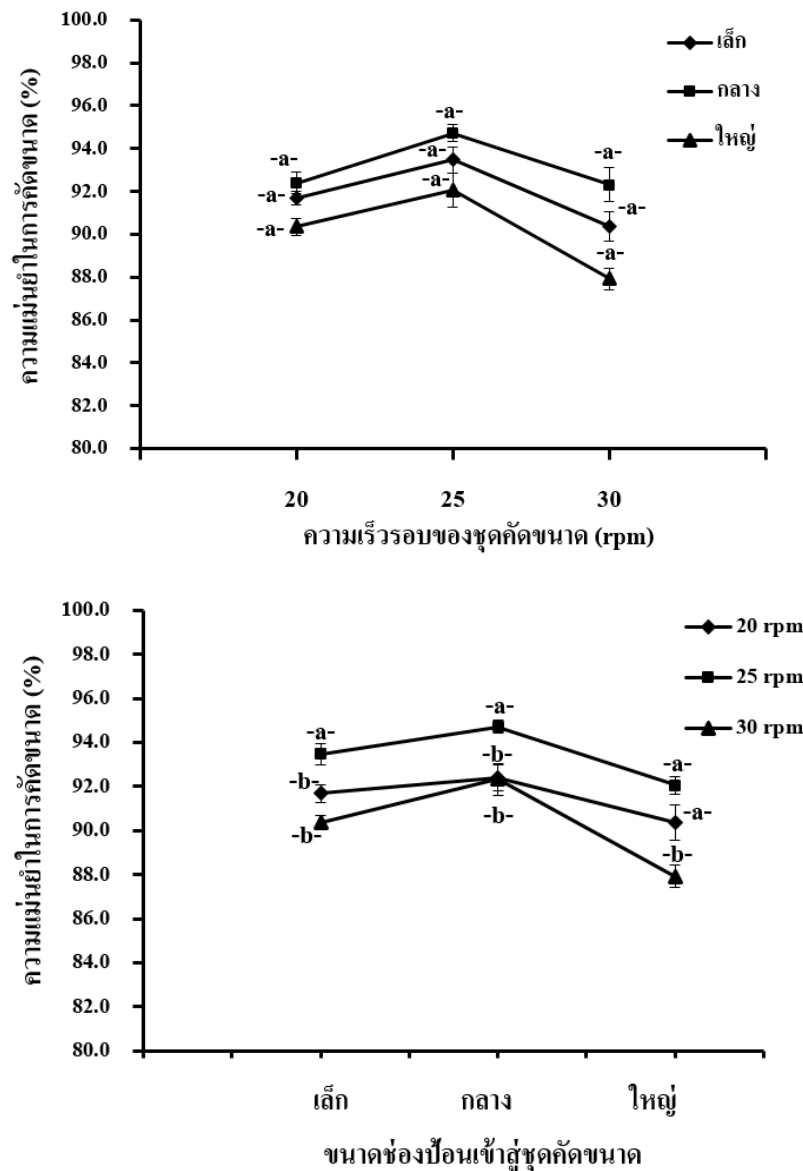
1. เปอร์เซ็นต์ความแม่นยำในการคัดขนาดเฉลี่ย

ผลการทดสอบเครื่องคัดขนาดเมล็ดบัวหลวงดังภาพที่ 4 ที่ความเร็วรอบของเพลาลับชุดคัดขนาด 20, 25 และ 30 รอบต่อนาที โดยกำหนดขนาดช่องป้อน ขนาดเล็ก ขนาดกลาง และขนาดใหญ่ ตามลำดับ พบว่ามีค่าความแม่นยำในการคัดขนาดเฉลี่ยระหว่าง 87.9 - 94.7% จากการวิเคราะห์ทางสถิติพบว่าความแม่นยำในการคัดขนาดเฉลี่ยไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ในการทดสอบโดยใช้ขนาดช่องป้อนต่างๆ ของแต่ละกลุ่มความเร็วรอบของเพลาลับชุดคัดขนาด แต่ความแม่นยำในการคัดขนาดเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทาง

สถิติในการทดสอบโดยใช้ความเร็วรอบของเพลาลับชุดคัดขนาดต่างๆ ของแต่ละกลุ่มขนาดช่องป้อน

จากภาพที่ 4 จะเห็นว่าขนาดของช่องป้อนไม่มีผลต่อความแม่นยำในการคัดขนาดเฉลี่ย แต่ความเร็วรอบของเพลาลับชุดคัดขนาดจะมีผลต่อความแม่นยำในการคัดขนาดเฉลี่ย พบว่าเมื่อเพิ่มความเร็วรอบของชุดคัดขนาดให้มากขึ้นความแม่นยำในการคัดขนาดเฉลี่ยเมล็ดบัวหลวงจะเพิ่มขึ้นในทุกๆ ขนาดของช่องป้อน และความแม่นยำมีแนวโน้มจะลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วรอบขึ้นอีกเนื่องจากเมล็ดบัวหลวงจะไถลเคลื่อนที่เร็วขึ้นทำให้ความแม่นยำในการคัดขนาดเฉลี่ยลดลงนั่นเอง

จากผลการทดลองดังกล่าวเครื่องคัดขนาดเมล็ดบัวหลวงสามารถคัดขนาดเมล็ดบัวหลวงได้สูงที่สุดที่ช่องป้อนขนาดกลาง (10×10 เซนติเมตร²) และความเร็วรอบของเพลาลับชุดคัดที่ระดับ 25 รอบต่อนาที มีความแม่นยำในการคัดขนาดเฉลี่ย 94.7%



ภาพที่ 4 เปอร์เซนต์ความแม่นยำในการคัดขนาดเฉลี่ยที่ความเร็วรอบของเพลาลับชุดคัดขนาดและขนาดช่องป้อนต่างๆ (^{abc} อักษรที่แตกต่างกันในแต่ละชุดการทดสอบแสดงว่าความแม่นยำในการคัดขนาดเฉลี่ยมีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05)

2. ความสามารถในการทำงานจริง

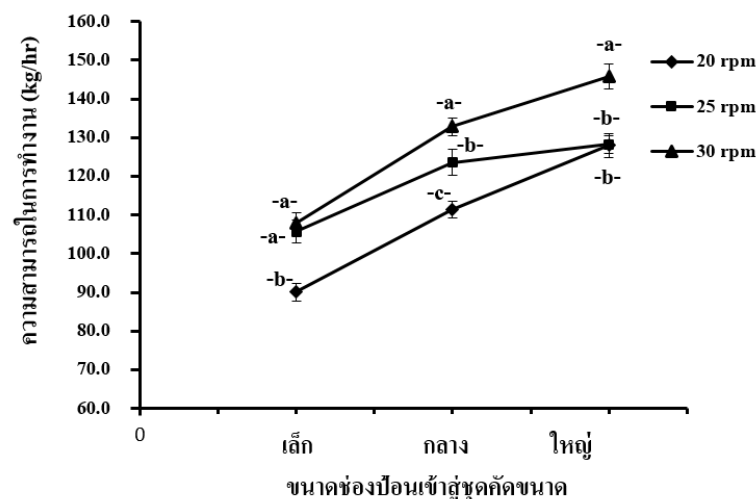
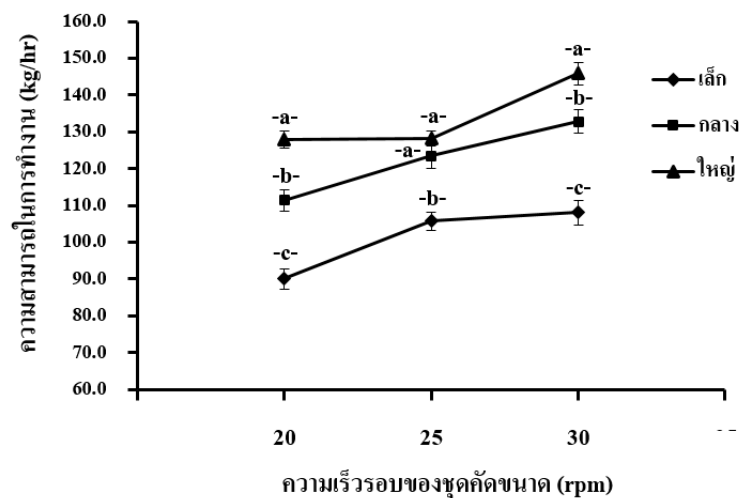
จากการวิเคราะห์ทางสถิติดังภาพที่ 5 พบว่าความสามารถในการทำงานมีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ทั้งการทดสอบโดยใช้ขนาดช่องป้อนต่างๆ ของแต่ละกลุ่มความเร็วรอบของเพลาลับชุดคัดขนาด และการทดสอบโดยใช้ความเร็วรอบของเพลาลับชุดคัดขนาดต่างๆ ของแต่ละขนาดช่องป้อน

ผลการทดลองดังภาพที่ 5 โดยใช้ความเร็วรอบของเพลาลับชุดคัดขนาด และขนาดช่องป้อนต่างๆ พบว่าความสามารถในการทำงานมีค่าระหว่าง 90.1 - 145.9 กิโลกรัมต่อชั่วโมง ซึ่งความสามารถในการทำงานจะเพิ่มขึ้นเมื่อเพิ่มขนาดของช่องป้อนและความเร็วรอบของเพลาลับชุดคัดขนาด เนื่องจากเมล็ดบัวหลวงจะไหลเคลื่อนที่เร็วขึ้นในปริมาณที่มากขึ้นทำให้เมล็ดบัวเคลื่อนที่เข้าสู่ชุดตะแกรงคัดขนาดได้

เร็วขึ้น แต่ความแม่นยำในการคัดขนาดเฉลี่ยก็จะลดลงเมื่อเพิ่มความเร็วขึ้นอีกดังที่ได้กล่าวไว้ข้างต้น

จากผลการทดลองเครื่องคัดขนาดเมล็ดบัวหลวงสามารถคัดขนาดเมล็ดบัวหลวงได้แม่นยำที่สุด 94.7% ที่ความเร็วรอบของเพลาลับชุดคัดขนาด 25 รอบต่อนาที และช่องป้อนขนาดกลาง (10×10 เซนติเมตร²) มีความสามารถในการทำงาน 123.5 กิโลกรัมต่อชั่วโมง แต่เมื่อเปรียบเทียบกับความเร็วรอบของเพลาลับชุดคัดขนาดเดียวกัน (25 รอบต่อนาที)

ที่ขนาดช่องป้อนขนาดใหญ่ (15×10 เซนติเมตร²) เครื่องต้นแบบจะมีความแม่นยำในการคัดที่ 92.1% (ซึ่งไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05) และยังมีความสามารถในการทำงานสูงกว่าช่องป้อนขนาดกลาง โดยมีความสามารถในการทำงาน 128.2 กิโลกรัมต่อชั่วโมง หรือคิดเป็น 1,025.6 กิโลกรัมต่อวัน (1 วันทำงาน 8 ชั่วโมง) ดังนั้นจึงเลือกใช้ค่านี้เป็นค่าที่เหมาะสมของเครื่องต้นแบบ



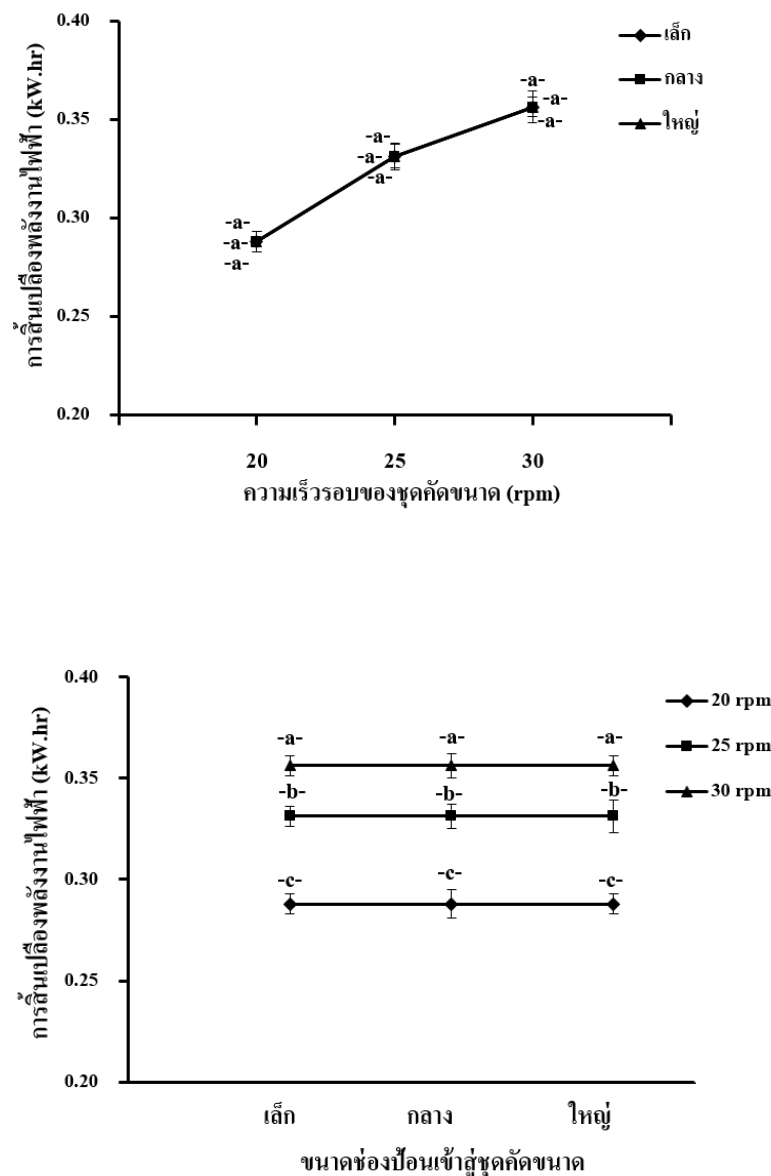
ภาพที่ 5 ความสามารถในการทำงานที่ความเร็วรอบของเพลาลับชุดคัดขนาดและขนาดช่องป้อนต่างๆ

(^{abc} อักษรที่แตกต่างกันในแต่ละชุดการทดสอบแสดงความสามารถในการทำงานมีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05)

3. การสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า

จากการวิเคราะห์ทางสถิติ พบว่าการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ในการทดสอบโดยใช้ขนาดช่องป้อนต่างๆ ของแต่ละกลุ่มความเร็วรอบของเพลาลับชุดคัตขนาด แต่มีความแตกต่างกันทางสถิติในการทดสอบโดยใช้ความเร็วรอบของเพลาลับชุดคัตขนาดต่างๆ ของแต่ละขนาดช่องป้อน ดังภาพที่

6 พบว่าช่วงความเร็วที่ใช้ขับเคลื่อนเครื่องคัตขนาดเมล็ดบัวหลวง มีการใช้พลังงานไฟฟ้าเพิ่มขึ้นตามความเร็วการหมุนของมอเตอร์ไฟฟ้ามีค่าระหว่าง 0.29-0.36 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ที่ความเร็วรอบของเพลาลับชุดคัตขนาด 25 รอบต่อนาที และขนาดช่องป้อนใหญ่ (15×10 เซนติเมตร) เป็นค่าที่เหมาะสมสำหรับนำเครื่องคัตขนาดเมล็ดบัวหลวงไปใช้งาน ซึ่งมีค่าการใช้พลังงานไฟฟ้า 0.33 กิโลวัตต์-ชั่วโมง



ภาพที่ 6 การสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้าที่ความเร็วรอบของเพลาลับชุดคัตขนาดและขนาดช่องป้อนต่างๆ (^{abc} อักษรที่แตกต่างกันในแต่ละชุดการทดสอบแสดงว่าการสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้ามีความแตกต่างกันทางสถิติที่ระดับนัยสำคัญ 0.05)

ตารางที่ 1 แสดงการเปรียบเทียบสมรรถนะการทำงานระหว่างเครื่องคัดขนาดเมล็ดบัวหลวงแบบตะแกรงทรงกระบอกที่คณะวิจัยได้พัฒนาขึ้นมา กับเครื่องคัดขนาดเมล็ดบัวหลวงแบบตะแกรงเรียบของ จตุรงค์และคณะ (Langkapin *et al.*, 2020) พบว่าเครื่องคัดขนาดแบบตะแกรงทรงกระบอกมีเปอร์เซ็นต์ความแม่นยำในการคัดขนาดเฉลี่ย และความสามารถในการทำงานสูงกว่าเครื่องคัดขนาดแบบตะแกรงเรียบ โดยเครื่องทั้งสองแบบไม่ทำให้เมล็ดบัวเสียหายขณะทำงาน นอกจากนี้เครื่องคัด

ขนาดแบบตะแกรงทรงกระบอกยังใช้พลังงานไฟฟ้าน้อยกว่า และไม่มีปัญหาเมล็ดบัวติดตะแกรงคัดขนาดเหมือนเครื่องคัดขนาดแบบตะแกรงเรียบ ซึ่งถือว่างานวิจัยนี้ได้บรรลุวัตถุประสงค์ที่ได้ตั้งไว้ รวมทั้งสามารถนำเครื่องคัดขนาดแบบตะแกรงทรงกระบอกไปใช้งานร่วมกับเครื่องแกะเมล็ดบัวหลวง (Langkapin *et al.*, 2018a) และเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดบัวหลวงขึ้น (Langkapin *et al.*, 2015; Langkapin *et al.*, 2018b) เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำงานของทั้งสองเครื่องต่อไป

ตารางที่ 1 เปรียบเทียบสมรรถนะการทำงานระหว่างเครื่องคัดขนาดเมล็ดบัวหลวงแบบต่างๆ

หัวข้อในการเปรียบเทียบ	เครื่องคัดขนาดแบบ	เครื่องคัดขนาดแบบ
	ตะแกรงเรียบ	ตะแกรงทรงกระบอก
1. เปอร์เซนต์ความแม่นยำในการคัดขนาดเฉลี่ย (%)	89.8	92.1
2. ความสามารถในการทำงาน (กิโลกรัมต่อชั่วโมง)	118.5	128.2
3. เปอร์เซนต์ความเสียหายของเมล็ด (%)	ไม่มี	ไม่มี
4. การสิ้นเปลืองพลังงานไฟฟ้า (กิโลวัตต์-ชั่วโมง)	0.61	0.33
5. จำนวนแรงงานที่ใช้ควบคุม (คน)	1	1
6. ปัญหาเมล็ดบัวติดตะแกรงคัดขนาด	มี	ไม่มี

สรุป

จากการทดสอบสมรรถนะเครื่องคัดขนาดเมล็ดบัวหลวงโดยใช้ค่าชี้ผลการศึกษา คือ เปอร์เซนต์ความแม่นยำในการคัดขนาดเฉลี่ย ความสามารถในการทำงานจริง เปอร์เซนต์ความเสียหายของเมล็ด และการใช้พลังงานไฟฟ้า พบว่าเครื่องคัดขนาดเมล็ดบัวหลวงสามารถคัดขนาดเมล็ดบัวหลวงได้ดีที่สุดที่ความเร็วรอบของเพลาลูกขับเคลื่อน 25 รอบต่อนาที และช่องป้อนขนาดกลาง (15×10 เซนติเมตร²) มีความแม่นยำในการคัดขนาดเฉลี่ย 92.1% ไม่มีเมล็ดบัวหลวงเสียหาย ความสามารถในการทำงาน 128.2 กิโลกรัมต่อชั่วโมง และใช้พลังงานไฟฟ้า 0.33 กิโลวัตต์-ชั่วโมง ซึ่งเครื่องคัดขนาดเมล็ดบัวหลวง

แบบตะแกรงทรงกระบอกเป็นเครื่องที่เหมาะสมสำหรับใช้ทดแทนแรงงานคนได้ในอนาคตต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากงบประมาณรายจ่ายประจำปี 2562 ของมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี โดยคณะกรรมการวิจัยแห่งชาติ (วช.) รวมทั้งขอขอบคุณภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี ที่สนับสนุนสถานที่และอุปกรณ์ในการทดสอบต่างๆ

เอกสารอ้างอิง

- Anonymous. 2017. **Lotus production situation**. Bangkok. Department of Agriculture Extension. Available Source: <http://www.doae.go.th/LIBRARY/>, Jul 9, 2018. (in Thai)
- Jolly, RS. 2018. **Benefits of the lotus plant**. Mumbai. Available Source: <https://caloriebee.com/nutrition/Health-Benefits-Of-Lotus-Roots-Or-Stem-Seeds-Leaves-And-Flowers>, January 25, 2019.
- Krutz, G., Thomson, L. and Claar, P. 1994. **Design of agricultural machinery**. 1st ed. John Wiley and Sons, New York.
- Langkapin, J., Parnsakhorn, S. and Akarakulthorn, P. 2015. Development of a dry lotus seed sheller. **Thai Society of Agricultural Engineering Journal** 21(1): 38-44. (in Thai)
- Langkapin, J., Parnsakhorn, S., Kalsirisilp, R., Prorod, M. and Khotpromsrt, N. 2018a. Study and testing of a lotus seed peeling machine. **Journal of Engineering RMUTT** 15(1): 35-42. (in Thai)
- Langkapin, J., Parnsakhorn, S., Kalsirisilp, R. and Sangsawang, S. 2018b. Development of a dried lotus seed sheller. **Research Journal RMUTT** 17(2): 11-22. (in Thai)
- Langkapin, J. 2018. **Solidworks**. 3rd ed. Triple Education Co., Ltd, Bangkok. (in Thai)
- Langkapin, J., Parnsakhorn, S., Kalsirisilp, R., Samseemoung, G., Ngmanil, P. and Juey, T. 2019. Design and fabrication of a lotus seed membrane peeling machine. **Journal of Engineering RMUTT** 17(1): 127-137. (in Thai)
- Langkapin, J., Parnsakhorn, S., Kalsirisilp, R., Samseemoung, G., Pookamkong, M. and Suwanwijit, P. 2020. Study and testing of lotus seeds sizing unit. **Journal of Engineering RMUTT** 18(1): 121-129. (in Thai)
- Mueangsuk, S. 2016. **Lotus farming in Bueng Kan**. Bangkok, kaosod Online. Available Source: https://www.kaosod.co.th/view_newsonline.php?newsid, Feb 15, 2016. (in Thai)
- Shigley, J.E. and Mischke, C.R. 1989. **Mechanical engineering design**. 5th ed. McGraw-Hill Book Company, USA.
- Suwannaro, T. 2007. **Lotus farming**. Extension and Training Office. Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)
- Suksawat, W. 2017. **7 benefits of Thai grains**. Bangkok. Available Source: <http://www.tnaws.co.th/contents>, April 23, 2018. (in Thai)
- Vijitwittayapong, P. 2013. **Lotus seeds product of Phichit**. Bangkok, Matichon Online. Available Source: http://www.matichon.co.th/matichon/view_news, Feb 13, 2013. (in Thai)
- William, H. and George, W.L. 2005. **Official methods of analysis of AOAC International**. 18th ed. AOAC International, Texas.

แหล่งคาร์บอนและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสม ในการสร้างไบโอฟลอค

Suitable Carbon Sources and C/N Ratio for Biofloc Production

พัชราราลัย ศรียะศักดิ์^{1*}, สุพันธุ์ณี สุวรรณภักดี¹, นัตติยา ชำนาญค้า¹ และ พรพิมล พิมลรัตน์²

Patcharawalai Sriyasak^{1*}, Supannee Suwanpakdee¹, Nattiya Chumnanka¹ and Pornpimol Pimolrat²

Received: 8 June 2020, Revised: 5 January 2021, Accepted: 8 April 2021

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อหาแหล่งคาร์บอนและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมในการสร้างไบโอฟลอค มี 2 การทดลอง การทดลองที่ 1 เป็นการศึกษาแหล่งคาร์บอนที่เหมาะสมในการสร้างไบโอฟลอคจากแป้งข้าวเจ้า รำละเอียด และกากน้ำตาล ผลการศึกษาพบว่าชุดการทดลองที่ใช้แป้งข้าวเจ้า รำละเอียด และกากน้ำตาลเป็นแหล่งคาร์บอนมีปริมาณแอมโมเนียรวมต่ำกว่าชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยรำละเอียดสามารถลดปริมาณแอมโมเนียในน้ำได้สูงที่สุด นอกจากนี้ชุดการทดลองที่ใช้รำละเอียดเป็นแหล่งคาร์บอนยังมีปริมาณสารแขวนลอยในน้ำสูงกว่าแป้งข้าวเจ้า กากน้ำตาล และชุดควบคุม อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ดังนั้นในการทดลองที่ 2 จึงเลือกรำละเอียดเป็นแหล่งคาร์บอนในการสร้างไบโอฟลอคและใช้ยูเรียเป็นแหล่งไนโตรเจน เพื่อศึกษาอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมในการสร้างไบโอฟลอค โดยแบ่งสัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนเป็นดังนี้ (C/N ratio) 10:1; 15:1; 20:1 และ ชุดควบคุม (ไม่ใส่คาร์บอน) ผลการศึกษาพบว่าชุดการทดลองที่ C/N ratio 20:1 สามารถลดแอมโมเนียในน้ำได้มากที่สุด (91.62%) และมีปริมาณสารแขวนลอยในน้ำมากกว่าชุดการทดลองอื่นๆ อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ในการศึกษาครั้งนี้แหล่งคาร์บอนที่เหมาะสมคือรำละเอียด สำหรับอัตราส่วนของคาร์บอนกับไนโตรเจนที่เหมาะสมในการสร้างไบโอฟลอค คือ C/N ratio 20:1 เนื่องจากสามารถลดปริมาณแอมโมเนียในน้ำได้ดีที่สุด

คำสำคัญ: ไบโอฟลอค, แหล่งคาร์บอน, อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน

¹ สาขาวิชาประมง คณะทรัพยากรธรรมชาติ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน วิทยาเขตสกลนคร อำเภอพังโคน จังหวัดสกลนคร 47160

¹ Department of Fisheries, Faculty of Natural Resources, Rajamangala University of Technology Isan, Sakon Nakhon Campus, Phan khon, Sakon Nakhon 47160, Thailand.

² สาขาวิชาการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำชายฝั่ง คณะมหาวิทยาลัยแม่โจ้-ชุมพร อำเภอละแม จังหวัดชุมพร 86170

² Department of Coastal Aquaculture, Faculty of Maejo University at Chumphon, Lamae, Chumphon 86170, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): patcharawalai.sriyasal@gmail.com

ABSTRACT

This study aims to investigate the appropriate carbon sources and C/N ratio required for biofloc formation. This study involves two experiments. The first experiment compares the use of three different carbon sources i.e. rice flour, rice bran and molasses for biofloc formation. The results showed that total ammonia of the treatment groups that added rice flour, rice bran, and molasses was statistically lower than that of the control group ($p < 0.05$). The treatment group that added rice bran could reduce total ammonia most effectively. Besides, total suspended solids in the water of the treatment group with added rice bran were statistically higher than those of the treatment groups with added rice flour and molasses and those of the control group ($p < 0.05$). Therefore, in the second experiment, rice bran was chosen as a potential carbon source for biofloc formation while urea was selected as a source of nitrogen to find out a suitable carbon-nitrogen (C/N) ratio for biofloc formation. The effect of four different initial C/N ratios (10:1, 15:1, 20:1 and no carbon sources) were evaluated. The results indicated that a C/N ratio of 20:1 could reduce total ammonia most effectively (91.62%) and total suspended solids in water were statistically higher ($p < 0.05$) than using the other ratios. In conclusion, the most suitable carbon source was rice bran and the appropriate C/N ratio for biofloc formation was 20:1 as they could reduce total ammonia most effectively.

Key words: biofloc, carbon sources, C/N ratio

บทนำ

ปัจจุบันการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำมีการขยายตัวมากขึ้นจากความต้องการสินค้าสัตว์น้ำที่เพิ่มขึ้นของผู้บริโภค ทำให้การเลี้ยงสัตว์น้ำส่วนใหญ่เป็นการเลี้ยงแบบพัฒนา คือมีการปล่อยสัตว์น้ำที่ระดับความหนาแน่นสูงเพื่อให้ได้ผลผลิตสูง ส่งผลให้คุณภาพน้ำในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำเสื่อมโทรม เนื่องจากมีของเสียจำพวกไนโตรเจนที่เกิดจากอาหารเหลือที่สัตว์น้ำไม่กินและของเสียที่ขับถ่ายจากสัตว์น้ำสะสมเป็นจำนวนมาก (Avnimelech *et al.*, 1995; Hargreaves, 1998; Cao *et al.*, 2007) ทำให้ต้องมีการเปลี่ยนถ่ายน้ำบ่อยครั้ง ซึ่งน้ำเสียที่ปล่อยจากฟาร์มเลี้ยงสัตว์น้ำลงสู่แหล่งน้ำสาธารณะส่งผลกระทบต่อคนนำน้ำไปใช้ของฟาร์มใกล้เคียงและส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมการใช้เทคโนโลยีไบโอฟล็อก (biofloc technology)

เป็นแนวทางหนึ่งในการจัดการของเสียที่เกิดขึ้นในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำ เป็นการพัฒนาระบบการเลี้ยงสัตว์น้ำที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม และทำให้เกิดความยั่งยืนในการเลี้ยงสัตว์น้ำ (Naylor *et al.*, 2000; Avnimelech, 2009) โดยช่วยบำบัดน้ำในระหว่างการเลี้ยง ลดความถี่ในการเปลี่ยนถ่ายน้ำ ลดต้นทุนค่าอาหาร และช่วยป้องกันการเกิดโรคสัตว์น้ำจากการใช้น้ำจากแหล่งน้ำสาธารณะอีกด้วย (Wasielisky *et al.*, 2006; Hargreaves, 2013; Wankanapol *et al.*, 2017)

เทคโนโลยีไบโอฟล็อก เป็นการใช้ตะกอนจุลินทรีย์ (biofloc) มาช่วยในการย่อยสลายซากของเสียจำพวกแอมโมเนียและเปลี่ยนของเสียนั้นให้กลายเป็นอาหารของสัตว์น้ำ (Crab *et al.*, 2007; Roselien *et al.*, 2012) ตะกอนจุลินทรีย์หรือไบโอฟล็อกเกิดจากการรวมกลุ่มกันของสาหร่าย แบคทีเรีย

โปรโตซัว และสารอินทรีย์ (Hargreaves, 2013) ตะกอนจุลินทรีย์นี้เป็นจุลินทรีย์กลุ่มเฮเทอโรโทรฟิก (Heterotrophic bacteria) ซึ่งใช้สารอินทรีย์เป็นอาหารในการสร้างเซลล์ใหม่และเป็นพลังงานในการดำรงชีวิต (Anand *et al.*, 2013; Wankanapol *et al.*, 2017) จุลินทรีย์กลุ่มนี้จะมีการดึงไนโตรเจน ได้แก่ แอมโมเนีย (NH_3) และไนไตรท์ (NO_2^-) มาใช้เพื่อสร้างเซลล์ใหม่ในการเจริญเติบโต ทำให้ปริมาณของแอมโมเนียในน้ำลดลง ตะกอนจุลินทรีย์นี้เป็นสารประกอบโปรตีน ซึ่งสัตว์น้ำสามารถกินเป็นอาหารได้ (Azim and Little, 2008; Avnimelech, 2009; Crab *et al.*, 2012) การเจริญเติบโตของจุลินทรีย์นี้ต้องใช้คาร์บอนและไนโตรเจนเป็นแหล่งพลังงานหลัก (Anand *et al.*, 2013) หลักการสำคัญของระบบไบโอฟลอกคือการหมุนเวียนของธาตุอาหาร โดยการจัดการอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) ในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำให้มีปริมาณเหมาะสมเพียงพอสำหรับการเจริญเติบโตของจุลินทรีย์กลุ่มเฮเทอโรโทรฟิก (Avnimelech, 1999; Azim and Little, 2008) การเพิ่มอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนจาก 10/1 เป็น 20/1 จะช่วยลดสารประกอบไนโตรเจนในน้ำได้ เนื่องจากระบบไบโอฟลอกจะมีปริมาณจุลินทรีย์กลุ่มเฮเทอโรโทรฟิกในน้ำและตะกอนเพิ่มมากขึ้น (Asaduzzaman *et al.*, 2008) ซึ่งแบคทีเรียนี้จะดึงไนโตรเจนไปใช้ในการสร้างเซลล์ในการเจริญเติบโต ทำให้ปริมาณของแอมโมเนียในน้ำลดลง (Asaduzzaman *et al.*, 2010) อัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในน้ำควรอยู่ระหว่าง 10-20/1 (Hargreaves, 2013) แต่ในบ่อเลี้ยงสัตว์น้ำทั่วไปจะมีอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนอยู่ที่ 3-5/1 ดังนั้นในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำจะต้องมีการเติมแหล่งคาร์บอน เช่น แป้ง กากน้ำตาล เพิ่มลงไปเพื่อกระตุ้นให้เกิดไบโอฟลอก (Koydon, 2014) แหล่งคาร์บอนเป็นปัจจัยสำคัญในการจัดการ

ระบบไบโอฟลอก (Crab *et al.*, 2012) ซึ่งแหล่งคาร์บอนที่ดีจะต้องมีคุณค่าทางโภชนาการ ราคาถูก และทำให้เกิดจุลินทรีย์กลุ่มเฮเทอโรโทรฟิก ซึ่งทำให้ปริมาณแอมโมเนียลดลงได้ การศึกษามีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาแหล่งคาร์บอนจากวัสดุที่มีในท้องถิ่นและอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมในการสร้างไบโอฟลอกในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ เพื่อเป็นข้อมูลในการพัฒนาการเลี้ยงสัตว์น้ำด้วยเทคโนโลยีไบโอฟลอกต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

การศึกษาแหล่งคาร์บอนที่เหมาะสมในการสร้างไบโอฟลอก

ในการทดลองนี้จะทำการศึกษาแหล่งคาร์บอนที่เหมาะสมในการสร้างไบโอฟลอก โดยใช้แป้งข้าวเจ้า รำละเอียด และกากน้ำตาลเป็นแหล่งคาร์บอน ทำการวิเคราะห์ปริมาณคาร์บอน (organic carbon) (Boyd and Tucker, 1992) พบว่าในแป้งข้าวเจ้ามีปริมาณคาร์บอน 42.34% รำละเอียดมี 55.52% และกากน้ำตาลมี 40.08% วางแผนการทดลองแบบสุ่มตลอด (Complete randomized design; CRD) โดยแบ่งการทดลองออกเป็น 4 ชุดการทดลอง ชุดการทดลองละ 3 ซ้ำ ดังนี้

ชุดการทดลองที่ 1 ชุดควบคุม (ไม่ใส่แหล่งคาร์บอน)

ชุดการทดลองที่ 2 ใช้แป้งข้าวเจ้า แหล่งคาร์บอน

ชุดการทดลองที่ 3 ใช้รำละเอียด แหล่งคาร์บอน

ชุดการทดลองที่ 4 ใช้กากน้ำตาล แหล่งคาร์บอน

ทำการทดลองในถังขนาด 6 ลิตร เติมน้ำประปาที่พักให้หมดคลอรีนจำนวน 5 ลิตร จากนั้นใส่ยูเรีย ($\text{CO}(\text{NH}_2)_2$) ความเข้มข้น 2 mg/L เป็นแหล่ง

ไนโตรเจน พร้อมเติมอากาศตลอดเวลา ตรวจวัดคุณภาพน้ำในถังทดลองเวลาประมาณ 10.00 น. ในวันที่ 0 1 3 5 7 10 และ 14 ของการทดลอง โดยแหล่งคาร์บอนที่ทำให้เกิดไบโอฟลอคมากที่สุดและสามารถลดปริมาณแอมโมเนียในน้ำได้สูงที่สุดใน การทดลองนี้จะนำไปใช้ในการศึกษาอัตราส่วนของคาร์บอนกับไนโตรเจนที่เหมาะสมในการสร้างไบโอฟลอคต่อไป

การศึกษาอัตราส่วนของคาร์บอนกับไนโตรเจนที่เหมาะสมในการสร้างไบโอฟลอค

ศึกษาอัตราส่วนของคาร์บอนกับไนโตรเจนที่เหมาะสมในการสร้างไบโอฟลอค (ใช้แหล่งคาร์บอนที่ดีที่สุดจากการทดลองที่ 1) โดยใช้ยูเรียเป็นแหล่งไนโตรเจน และใช้รำละเอียดเป็นแหล่งคาร์บอน วิธีการสร้างไบโอฟลอคคัดแปลงจากวิธีของ Burford *et al.* (2004) วางแผนการทดลองแบบสุ่มทดลอง (Complete randomized design; CRD) แบ่งการทดลองเป็น 4 ชุดการทดลอง ชุดการทดลองละ 3 ชั่วโมง ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 ชุดการทดลองในการศึกษาอัตราส่วนของคาร์บอนกับไนโตรเจนในการสร้างไบโอฟลอค

ชุดการทดลอง	คาร์บอน (mg/L)	ไนโตรเจน (mg/L)
ชุดควบคุม (ไม่ได้ใส่คาร์บอน)	0	2
ชุดการทดลองที่ 2 สัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) = 10:1	20	2
ชุดการทดลองที่ 3 สัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) = 15:1	30	2
ชุดการทดลองที่ 4 สัดส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจน (C/N ratio) = 20:1	40	2

ทำการทดลองในถังขนาด 6 ลิตร พร้อมเติมอากาศตลอดเวลา ตรวจวัดคุณภาพน้ำเวลาประมาณ 10.00 น. ในวันที่ 0 1 3 5 7 10 และ 14 ของการทดลอง

การวิเคราะห์คุณภาพน้ำ

ตรวจวัดคุณภาพน้ำในแต่ละชุดการทดลอง ได้แก่ อุณหภูมิ น้ำ ความเป็นกรด-ด่าง (pH) และปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ (dissolved oxygen) ด้วย multi probe system (YSI model 556) แอมโมเนียรวม (total ammonia-N) ด้วยวิธี phenate ไนไตรท์ (nitrite-N) ด้วยวิธี diazotizing colorimetric ไนเตรท (nitrate-N) ด้วยวิธี cadmium reduction (Boyd and Tucker, 1992) ปริมาณสารแขวนลอยในน้ำ (Total suspended solid; TSS) (APHA, 1980) และ ตรวจวัดปริมาณตะกอนทั้งหมด (Total settleable solids) ด้วย Imhoff

cone เพื่อตรวจสอบปริมาณไบโอฟลอค (Hargreaves, 2013)

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

นำข้อมูลคุณภาพน้ำมาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance; ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) ที่ระดับความเชื่อมั่น 95 เปอร์เซ็นต์ โดยใช้โปรแกรมสำเร็จรูป SPSS

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

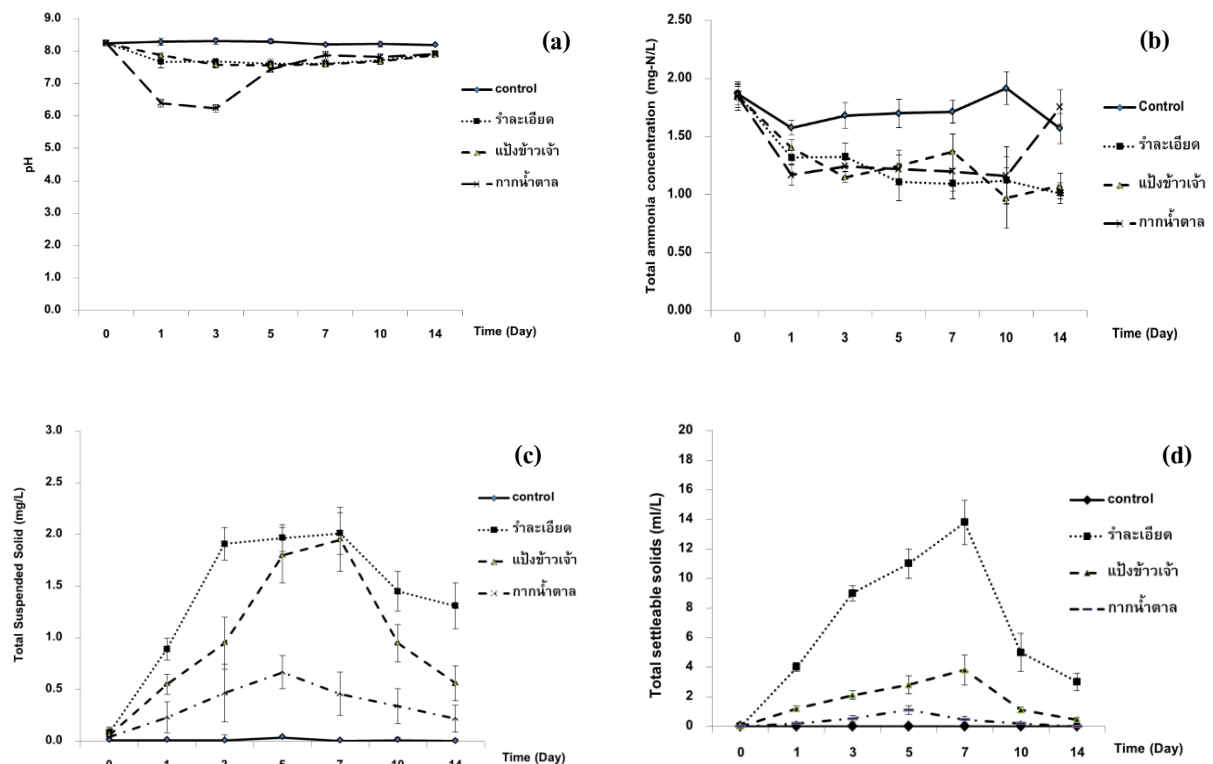
แหล่งคาร์บอนที่เหมาะสมในการสร้างไบโอฟลอค

การทดลองแหล่งคาร์บอนที่เหมาะสมในการสร้างไบโอฟลอค พบว่าชุดควบคุมมีค่า pH ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ และปริมาณแอมโมเนีย

รวมสูงกว่าชุดการทดลองที่เติมรำละเอียด แป้งข้าวเจ้าและกากน้ำตาลอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) (ตารางที่ 2) จากการทดลองพบว่าค่า pH ของชุดที่ใช้กากน้ำตาลเป็นแหล่งคาร์บอนมีค่า pH ลดต่ำลงในวันที่ 1 และ 3 ของการทดลอง (ภาพที่ 1a) ส่วนปริมาณแอมโมเนียรวมของชุดที่ใช้กากน้ำตาลมีค่าเพิ่มมากขึ้นในวันที่ 14 ของการทดลอง (ภาพที่ 1b) ปริมาณสารแขวนลอยในน้ำและปริมาณตะกอนทั้งหมดพบว่าชุดการทดลองที่เติมรำละเอียดมีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับชุดการทดลองอื่นๆ ($p<0.05$) โดยชุดการทดลองที่เติมรำละเอียดมีปริมาณสารแขวนลอยในน้ำและปริมาณตะกอนทั้งหมดมากที่สุด รองลงมาคือชุดการทดลองที่เติมแป้งข้าวเจ้า ชุดการทดลองที่เติมกากน้ำตาล และชุดควบคุม ตามลำดับ (ภาพที่ 1c และ 1d) ซึ่งปริมาณ

สารแขวนลอยได้มีการนำไปตรวจสอบภายใต้กล้องจุลทรรศน์ พบว่ามีลักษณะเป็นไบโอฟล็อกที่มีแพลงก์ตอนและโปรโตซัวเป็นองค์ประกอบเป็นตะกอนแขวนลอยในมวลน้ำ (ภาพที่ 3) ส่วนอุณหภูมิของน้ำ ความเข้มข้นของไนโตรเจนและไนเตรทในทุกชุดการทดลองไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) (ตารางที่ 2)

จากผลการทดลองครั้งนี้ ผู้วิจัยได้เลือกรำละเอียดเป็นแหล่งคาร์บอนที่เหมาะสมในการสร้างไบโอฟล็อก สำหรับการศึกษาอัตราส่วนของคาร์บอนกับไนโตรเจนที่เหมาะสมในการสร้างไบโอฟล็อกต่อไป เนื่องจากทำให้เกิดไบโอฟล็อกมากที่สุด สามารถลดปริมาณแอมโมเนียในน้ำได้สูงที่สุด และมีราคาถูกกว่าแหล่งคาร์บอนชนิดอื่นๆ



ภาพที่ 1 คุณสมบัติของน้ำในการทดสอบแหล่งคาร์บอน (a) ค่า pH (b) ปริมาณแอมโมเนียรวม (c) ปริมาณสารแขวนลอยในน้ำ และ (d) ปริมาณตะกอนทั้งหมด

ตารางที่ 2 คุณสมบัติของน้ำในการทดสอบแหล่งคาร์บอนในการสร้างไบโอฟล็อก

พารามิเตอร์	ชุดการทดลอง			
	ชุดควบคุม	รำละเอียด	แป้งข้าวเจ้า	กากน้ำตาล
อุณหภูมิของน้ำ (°C)	27.3±0.5 ^a	27.5±0.4 ^a	27.7±0.4 ^a	27.9±0.4 ^a
pH	8.26±0.04 ^a	7.78±0.06 ^b	7.78±0.04 ^b	7.42±0.04 ^c
Dissolved oxygen (mg/L)	7.78±0.05 ^a	6.86±0.07 ^b	6.50±0.05 ^c	6.05±0.08 ^d
แอมโมเนียรวม (mg-N/L)	1.72±0.13 ^a	1.26±0.19 ^b	1.30±0.22 ^b	1.37±0.20 ^b
ไนโตรเจน (mg-N/L)	0.061±0.026 ^a	0.054±0.035 ^a	0.045±0.031 ^a	0.062±0.027 ^a
ไนเตรท (mg-N/L)	0.030±0.016 ^a	0.030±0.022 ^a	0.028±0.019 ^a	0.030±0.017 ^a
TSS (mg/L)	0.01±0.02 ^d	1.37±0.06 ^a	0.97±0.09 ^b	0.35±0.07 ^c
Total settleable solids (ml/L)	0.00±0.00 ^d	6.54±2.82 ^a	1.64±0.77 ^b	0.35±0.22 ^c

หมายเหตุ: ตัวอักษรอังกฤษที่ต่างกันในแนวนอนของค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)

อัตราส่วนของคาร์บอนกับไนโตรเจนที่เหมาะสมในการสร้างไบโอฟล็อก

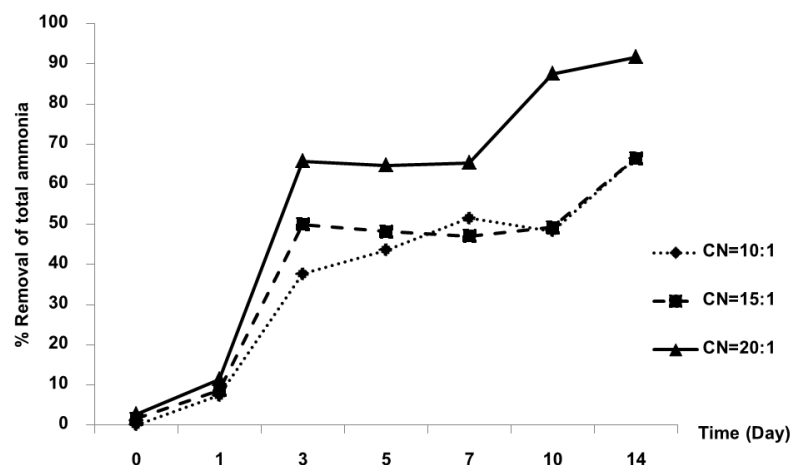
การทดลองนี้ใช้รำละเอียดเป็นแหล่งคาร์บอนและใช้ยูเรียเป็นแหล่งไนโตรเจน เมื่อสิ้นสุดการทดลองพบว่าความเข้มข้นของแอมโมเนียรวมในชุดการทดลองที่ C/N ratio = 20:1 มีปริมาณแอมโมเนียรวมน้อยที่สุด ($p<0.05$) รองลงมาคือชุดการทดลองที่ C/N ratio = 15:1 ชุดการทดลองที่ C/N ratio = 10:1 และชุดควบคุม ตามลำดับ (ตารางที่ 3, ภาพที่ 2) โดยชุดการทดลองที่ C/N ratio = 20:1 สามารถลดแอมโมเนียได้สูงสุดที่ 91.62% และชุดการทดลองที่ C/N ratio = 15:1 และ C/N ratio = 10:1 สามารถลดแอมโมเนียได้สูงสุดที่ 66.50% เมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม (ภาพที่ 2) ค่า pH และ

ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำชุดการทดลองที่ C/N ratio = 10:1 C/N ratio = 15:1 และ C/N ratio = 20:1 มีค่าต่ำกว่าชุดควบคุมอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$) สำหรับปริมาณสารแขวนลอยในน้ำพบว่าชุดการทดลองที่ C/N ratio = 20:1 มีปริมาณสารแขวนลอยในน้ำมากที่สุด ซึ่งเป็นการบ่งบอกได้ว่ามีปริมาณไบโอฟล็อกมากที่สุด รองลงมาคือชุดการทดลองที่ C/N ratio = 15:1 ชุดการทดลองที่ C/N ratio = 10:1 และชุดควบคุม ตามลำดับ (ตารางที่ 3) ปริมาณไบโอฟล็อกจะมีลักษณะเป็นตะกอนแขวนลอยในมวลน้ำ ยึดเกาะเป็นกลุ่ม (ภาพที่ 3) ส่วนอุณหภูมิของน้ำ ความเข้มข้นของไนโตรเจนและไนเตรทในทุกชุดการทดลองไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) (ตารางที่ 3)

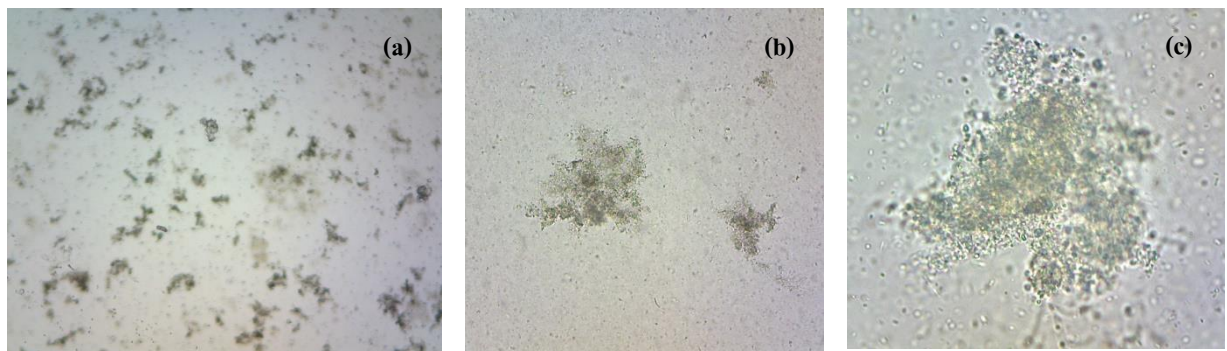
ตารางที่ 3 คุณสมบัติของน้ำในทดสอบแหล่งคาร์บอนในการทดสอบอัตราส่วนคาร์บอนกับไนโตรเจนในการสร้างไบโอฟล็อก

พารามิเตอร์	ชุดการทดลอง			
	ชุดควบคุม	C/N=10:1	C/N=15:1	C/N=20:1
อุณหภูมิของน้ำ (°C)	27.5±0.3 ^a	27.7±0.4 ^a	27.7±0.3 ^a	27.5±0.4 ^a
pH	8.06±0.02 ^a	7.92±0.02 ^b	7.89±0.04 ^b	7.85±0.05 ^b
Dissolved oxygen (mg/L)	7.69±0.04 ^a	6.86±0.11 ^b	6.75±0.09 ^b	6.89±0.10 ^b
แอมโมเนียรวม (mg-N/L)	1.82±0.09 ^a	1.17±0.08 ^b	1.13±0.07 ^b	0.83±0.05 ^c
ไนไตรท์ (mg-N/L)	0.334±0.034 ^a	0.309±0.037 ^a	0.306±0.051 ^a	0.304±0.067 ^a
ไนเตรท (mg-N/L)	0.026±0.021 ^a	0.036±0.029 ^a	0.021±0.021 ^a	0.033±0.032 ^a
TSS (mg/L)	0.01±0.02 ^d	0.66±0.04 ^c	0.94±0.06 ^b	1.37±0.04 ^a

หมายเหตุ: ตัวอักษรอังกฤษที่ต่างกันในแนวนอนของค่าเฉลี่ย±ส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p<0.05$)



ภาพที่ 2 อัตราการลดแอมโมเนียรวม (%) ของการทดสอบอัตราส่วนคาร์บอนกับไนโตรเจนเมื่อเปรียบเทียบกับชุดควบคุม



ภาพที่ 3 ไบโอฟลอคภายใต้กล้องจุลทรรศน์ (a) กำลังขยาย 4x (b) กำลังขยาย 10x (c) กำลังขยาย 40x

การศึกษาแหล่งคาร์บอนที่เหมาะสมในการสร้างไบโอฟล็อก อุณหภูมิของน้ำ ปริมาณไนโตรเจนและไนเตรทของทุกชุดการทดลองไม่แตกต่างกันทางสถิติ ($p>0.05$) อุณหภูมิของน้ำอยู่ในช่วง 26.67-28.47 °C ปริมาณไนโตรเจนที่อยู่ในช่วง 0.01-0.11 mg-N/L และปริมาณไนเตรทอยู่ระหว่าง 0.00-0.06 mg-N/L ซึ่งไม่เป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำ ค่าความเข้มข้นของไนโตรเจนที่เหมาะสมในการเลี้ยงสัตว์น้ำไม่ควรเกิน 1 mg-N/L (Forteath, 1990) และไนเตรทในระดับที่เป็นพิษต่อสัตว์น้ำคือมีค่ามากกว่า 60 mg-N/L (Van Wyk and Scarpa, 1999) ค่า pH ในชุดควบคุมจะมีค่าสูงกว่าชุดการทดลองอื่นๆ แต่ค่า pH ของทุกชุดการทดลองอยู่ในช่วงที่เหมาะสมในการเจริญเติบโตของสัตว์น้ำ คือ 7.5-8.5 (Boyd and Fast, 1992) ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำอยู่ในระดับที่เหมาะสมในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำ โดยทุกชุดการทดลองมีปริมาณออกซิเจนเกินกว่า 5 mg/L (Boyd and Fast, 1992) สำหรับปริมาณสารแขวนลอยในน้ำในทุกชุดการทดลองมีค่าที่ไม่เป็นอันตรายต่อสัตว์น้ำ เนื่องจากมีปริมาณไม่เกิน 15 mg/L (Boyd and Tucker, 1998)

ปริมาณแอมโมเนียรวมของชุดการทดลองที่เติมรำละเอียด แปะข้าวเจ้า และกากน้ำตาลมีปริมาณแอมโมเนียรวมน้อยกว่าชุดควบคุม การเติมแหล่งคาร์บอนในการสร้างไบโอฟล็อกส่งผลให้มีปริมาณจุลินทรีย์กลุ่มเฮเทอโรโทรฟิกในน้ำเพิ่มมากขึ้น ซึ่งแบคทีเรียเหล่านี้จึงมีการดึงไนโตรเจนมาใช้ในการสร้างเซลล์ใหม่เพื่อการเจริญเติบโตมากขึ้น ทำให้ปริมาณแอมโมเนียในน้ำลดลง (Crab *et al.*, 2012) การที่ปริมาณแอมโมเนียรวมของชุดการทดลองที่ใช้กากน้ำตาลมีค่าเพิ่มมากขึ้นในวันที่ 14 ของการทดลอง เนื่องจากกากน้ำตาลสามารถละลายน้ำและปล่อยคาร์บอนได้อย่างรวดเร็ว (Serra *et al.*, 2015) จึงสามารถลดปริมาณแอมโมเนียได้ดีในช่วงวันแรกๆ ของการทดลอง เมื่อแบคทีเรียใช้กากน้ำตาลหมดทำ

ให้ไม่มีการดึงแอมโมเนียไปใช้ในการสร้างเซลล์ใหม่ จึงทำให้ปริมาณแอมโมเนียเพิ่มขึ้น ในขณะที่การใช้รำละเอียดเป็นแหล่งคาร์บอนมีปริมาณแอมโมเนียลงช้าๆ อย่างต่อเนื่อง (ภาพ 1b) เนื่องจากรำละเอียดเป็นแหล่งคาร์บอนที่ได้จากพืชจะมีการละลายและปล่อยคาร์บอนออกมาได้ช้า (Avnimelech 2009; Crab *et al.*, 2009) ทำให้แบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟิกสามารถใช้แหล่งคาร์บอนได้เรื่อยๆ ซึ่งจะเห็นได้จากปริมาณสารแขวนลอยในน้ำของชุดที่ใช้รำละเอียดเป็นแหล่งคาร์บอนที่มีปริมาณสูงกว่าการใช้แหล่งคาร์บอนจากกากน้ำตาลและแปะข้าวเจ้า

ในการทดลองนี้ผู้วิจัยได้เลือกแหล่งคาร์บอนที่เหมาะสมที่สุดในการสร้างไบโอฟล็อกคือรำละเอียด เนื่องจากเป็นชุดการทดลองที่สร้างไบโอฟล็อกได้ดี สามารถลดปริมาณแอมโมเนียรวมได้ดีและไม่ส่งผลกระทบต่อคุณภาพน้ำและสัตว์น้ำ อีกทั้งเป็นแหล่งคาร์บอนจากพืชที่มีโปรตีนต่ำ หาง่าย และราคาถูก เหมาะสำหรับเกษตรกรที่จะนำไปใช้ในการเลี้ยงสัตว์น้ำในระบบไบโอฟล็อก ซึ่ง Crab *et al.* (2009) และ Asaduzzaman *et al.* (2010) ได้กล่าวว่า การใช้แหล่งคาร์บอนจากพืชในการสร้างไบโอฟล็อกเป็นการลดต้นทุนในการผลิตเนื่องจากมีราคาถูก ทำให้เกิดความยั่งยืนในการเลี้ยงสัตว์น้ำและช่วยเพิ่มประสิทธิภาพทางโภชนาการในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำอีกด้วย

การศึกษาอัตราส่วนของคาร์บอนกับไนโตรเจนที่เหมาะสมในการสร้างไบโอฟล็อกนั้น ค่าคุณสมบัติของน้ำ ได้แก่ อุณหภูมิของน้ำ ค่า pH ปริมาณออกซิเจนที่ละลายน้ำ ปริมาณแอมโมเนียรวม ไนโตรเจน และไนเตรทที่มีค่าอยู่ในช่วงที่เหมาะสมต่อการเลี้ยงสัตว์น้ำ ในการศึกษาพบว่าชุดการทดลองที่ C/N ratio = 20:1 สามารถลดแอมโมเนียได้สูงสุด ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Asaduzzaman *et al.* (2008) ที่พบว่าการเพิ่มอัตราส่วนคาร์บอนต่อ

ไนโตรเจนจาก 10:1 เป็น 20:1 สามารถลดสารประกอบไนโตรเจนในน้ำได้ดี การเพิ่มอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนจะทำให้ปริมาณแบคทีเรียกลุ่มเฮเทอโรโทรฟิกเพิ่มขึ้น ซึ่งจะช่วยในการย่อยสลายสารอินทรีย์และมีการดึงไนโตรเจนมาใช้ในการสร้างเซลล์ใหม่เพื่อการเจริญเติบโต ทำให้ปริมาณของแอมโมเนียลดลง จำนวนเซลล์ใหม่ที่ถูกสร้างขึ้นใหม่เมื่อมีการรวมตัวกันจึงเรียกกันว่าไบโอฟล็อก (Asaduzzaman *et al.*, 2010) สำหรับประสิทธิภาพของการบำบัดแอมโมเนียโดยไบโอฟล็อก จะให้ความสำคัญกับสัดส่วนระหว่างคาร์บอนกับไนโตรเจน (C/N ratio) เป็นหลัก ซึ่ง C/N ratio ที่เหมาะสมจะสามารถกำจัดสารประกอบไนโตรเจนได้ดี (Hari *et al.*, 2004; Hargreaves, 2013) ทั้งนี้การใช้ระบบไบโอฟล็อกในการเพาะเลี้ยงสัตว์น้ำควรมีการเติมแหล่งคาร์บอนทุก 7 วัน เนื่องจากปริมาณไบโอฟล็อกจะลดลงหลังจาก 7 วัน เพื่อช่วยในการรักษาอัตราส่วนคาร์บอนต่อไนโตรเจนในน้ำให้อยู่ในระดับที่เหมาะสม

สรุป

การศึกษานี้แหล่งคาร์บอนที่เหมาะสมคือรำละเอียด สำหรับอัตราส่วนของคาร์บอนต่อไนโตรเจนที่เหมาะสมในการสร้างไบโอฟล็อก คือ 20:1 เนื่องจากสามารถลดปริมาณแอมโมเนียได้ดีที่สุด และมีปริมาณไบโอฟล็อกมากที่สุด

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนสนับสนุนการวิจัยจากมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลอีสาน ปีงบประมาณ 2562 สัญญาเลขที่ SKC2562REV074

เอกสารอ้างอิง

- Anand, P.S., Kohli, M.P.S., Kumar, S., Sundaray, J.K., Roy, S., Venkateshwarlu, G., Sinha, A. and Pailan, G.H. 2013. Effect of dietary supplementation of biofloc on growth performance and digestive enzyme activities in *Penaeus monodon*. **Aquaculture** 418-419: 108-115.
- APHA. 1980. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. American public health association, Washington DC.
- Asaduzzaman, M., Wahab, M.A., Verdegem, M.C.J., Huque, S., Salam, M.A. and Azim, M.E. 2008. C/N ratio control and substrate addition for periphyton development jointly enhance freshwater prawn *Macrobrachium rosenbergii* production in ponds. **Aquaculture** 280: 117-123.
- Asaduzzaman, M., Wahab, M.A., Verdegem, M.C.J., Adhikary, R.K., Rahman, S.M.S., Azim, M.E. and Verreth, J.A.J. 2010. Effects of carbohydrate source for maintaining a high C:N ratio and fish driven re-suspension on pond ecology and production in periphyton-based freshwater prawn culture systems. **Aquaculture** 37: 46-301.
- Avnimelech, Y., Mozes, N., Shaher Diab, S. and Kochba, M. 1995. Rates of organic carbon and nitrogen degradation in intensive fish ponds. **Aquaculture** 134: 211-216.
- Avnimelech, Y. 1999. C/N ratio as a control element in aquaculture systems. **Aquaculture** 176(3-4): 227-235.

- Avnimelech, Y. 2009. **Biofloc Technology-A Practical Guide Book**. 1st ed. World Aquaculture Society, Baton Rouge, LA.
- Azim, M.E. and Little, D.C. 2008. The biofloc technology (BFT) in indoor tanks: Water quality, biofloc composition, and growth and welfare of Nile tilapia (*Oreochromis niloticus*). **Aquaculture** 283: 29-35.
- Boyd, C.E. and Fast, A.W. 1992. Pond monitoring and management, pp. 497-513. In Fast, A.W. and Lester, L.J., eds. **Marine shrimp culture: principles and practices. Developments in aquaculture and fisheries science, volume 23**. 1st ed. Elsevier Science Publisher B.V., Amsterdam.
- Boyd, C.E. and Tucker, C.S. 1992. **Water quality and pond soil analyses for aquaculture**. 1st ed. Alabama Agricultural Experiment Station, Auburn University, Alabama.
- Boyd, C.E. and Tucker, C.S. 1998. **Pond aquaculture water quality management**. 1st ed. Kluwer academic publishers, New York.
- Burford, M.A., Preston, N.P., Glibert, P.M. and Dennison, W.C. 2004. Tracing the fate of 15N enriched feed in an intensive shrimp system. **Aquaculture** 206: 199-216.
- Cao, L., Wang, W., Yang, Y., Yang, C., Yuan, Z., Xiong, S. and Diana, J. 2007. Environmental impact of aquaculture and countermeasures to aquaculture pollution in China. **Environment Science Pollution Research** 14(7): 452-462.
- Crab, R., Avnimelech, Y., Defoirdt, T., Bossier, P. and Verstraete, W. 2007. Nitrogen removal techniques in aquaculture for a sustainable production. **Aquaculture** 270: 1-14.
- Crab, R., Kochva, M., Verstraete, W. and Avnimelech, Y. 2009. Bio-flocs technology application in over-wintering of tilapia. **Aquaculture Engineering** 40: 105-112.
- Crab, R., Defoirdt, T., Bossier, P. and Verstraete, W. 2012. Biofloc technology in aquaculture: beneficial effects and future challenges. **Aquaculture** 356: 351-356.
- Forteath, N. 1990. **A handbook on recirculating systems for aquatic organisms**. 1st ed. Fishing industry training board of Tasmania Inc, Hobart.
- Hargreaves, J.A. 1998. Nitrogen biogeochemistry of aquaculture ponds. **Aquaculture** 166: 181-212.
- Hargreaves, J.A. 2013. **Biofloc production systems for aquaculture**. SRAC publication, United States.
- Hari, B., Kurup, M.B., Varghese, T., Schrama, J.W. and Verdegem, M.C.S. 2004. Effects of carbohydrate addition on production in extensive shrimp culture systems. **Aquaculture** 241: 179-194.
- Koydon, S. 2014. Nitrogen elimination in zero waste aquaculture system. **RMUTSB Academic Journal** 2(1): 66-80. (in Thai)
- Naylor, R.L., Goldburg, R.J., Primavera, J.H., Kautsky, N., Beveridge, M.C.M., Clay, J., Folke, C., Lubchenco, J., Mooney, H. and Troell, M. 2000. Effect of aquaculture on world fish supplies. **Nature** 405: 1017-1024.

- Roselien, C., Tom, D., Peter, B. and Willy, V. 2012. Biofloc technology in aquaculture: Beneficial effect and future challenges. **Aquaculture** 356-357: 351-356.
- Serra, P.T., Gaona, A.C., Furtado, S.P., Poersch, H.L. and Wasielesky, W. 2015. Use of different carbon sources for the biofloc system adopted during the nursery and grow-out culture of *Litopenaeus vannamei*. **Aquaculture International** 23(6): 1-16.
- Van Wyk, P. and Scarpa, J. 1999. Water quality and management, pp 128-138. In Van Wyk, P., Hodgkins, M.D., Laramore, R., Main, K.L., Mountain, J. and Scarpa, J., eds. **Farming marine shrimp in recirculating freshwater systems**. Harbor Branch Oceanographic Institution, Tallahassee.
- Wankanapol, A., Chaibu, P. and Soonthornvipat, S. 2017. Evaluation of different carbon sources for biofloc production in tilapia (*Oreochromis niloticus* L.) culture. **Silpakorn University Sciences & Technology Journal** 11(3): 17-24.
- Wasielesky, W., Atwood, H., Stokes, A. and Browdy, C.L. 2006. Effect of natural production in a zero-exchange suspended microbial floc based super-intensive culture system for white shrimp *Litopenaeus vannamei*. **Aquaculture** 258: 396-403.

การเพิ่มการผลิตสารแบคทีเรียโอซินโดยเชื้อ *Enterococcus faecium* PDN-Ta10 ที่แยกได้จากปลาตุ๊กตาเพื่อยับยั้งเชื้อ

Listeria monocytogenes

Enhancement of Bacteriocin Production by *Enterococcus faecium* PDN-Ta10, Isolated from Pladukra to Inhibit *Listeria monocytogenes*

ศิรินาถ ศรีอ่อนนวล *, เสาวณีย์ ชัยเพชร และ อภิญญา วณิชพันธุ์

Sirinath Srionnual *, Saowanee Chaipetch and Apinya Vanichpan

Received: 26 June 2020, Revised: 20 October 2020, Accepted: 8 December 2020

บทคัดย่อ

Enterococcus faecium PDN-Ta10 เป็นแบคทีเรียแลคติกที่สร้างสารแบคทีเรียโอซินที่มีฤทธิ์ยับยั้งการเติบโตของเชื้อ *Listeria monocytogenes* DMST17303 ได้ ในงานวิจัยนี้ศึกษาถึงการเติบโตของเชื้อ *E. faecium* PDN-Ta10 และกิจกรรมของสารแบคทีเรียโอซินในอาหารเลี้ยงเชื้อสำเร็จรูปทางการค้า 4 ชนิด คือ APT broth, BHI broth, M17 broth และ MRS broth และอาหารธรรมชาติ ได้แก่ นมเปรี้ยว และถั่วเหลืองบดผสมโมลาส พบว่า เชื้อ *E. faecium* PDN-Ta10 เติบโตและสร้างสารแบคทีเรียโอซินได้ดีที่สุดในอาหารเลี้ยงเชื้อสำเร็จรูปทางการค้า คือ MRS broth และอาหารธรรมชาติ คือ นมเปรี้ยว โดยมีค่ากิจกรรมการยับยั้งเชื้อ *L. monocytogenes* DMST17303 เป็น 5,020 AU/ml และ 1,280 AU/ml ตามลำดับ โดยค่า pH เริ่มต้นของอาหารเลี้ยงเชื้อ และอุณหภูมิ ที่เหมาะสมในการผลิตสารแบคทีเรียโอซิน คือ 6.0 และ 35 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ที่ระยะเวลาในการเลี้ยงเชื้อ 14 ชั่วโมง เมื่อทำการเลี้ยงเชื้อในอาหาร MRS สูตรดัดแปลงเพื่อศึกษาแหล่งไนโตรเจน 4 ชนิด คือ beef extract, peptone, yeast extract และ tryptone ที่เหมาะสมต่อการสร้างสารแบคทีเรียโอซิน พบว่า เชื้อ *E. faecium* PDN-Ta10 สร้างสารแบคทีเรียโอซินได้ดีที่สุดในอาหารเลี้ยงเชื้อ MRS สูตรดัดแปลงที่เสริมด้วยแหล่งไนโตรเจน คือ tryptone ร้อยละ 3 โดยมีค่ากิจกรรมการยับยั้งเป็น 2,560 AU/ml และเมื่อเสริมด้วยแหล่งคาร์บอน 4 ชนิด คือ fructose, lactose, maltose และ

สาขานวัตกรรมอาหารและการจัดการ คณะอุตสาหกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย ตำบลทุ่งใหญ่ อำเภอทุ่งใหญ่ จังหวัดนครศรีธรรมราช 80240

Department of Food Innovation and Management, Faculty of Agro-Industry, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Thungyai, Thungyai, Nakhon Si Thammarat 80240, Thailand.

* ผู้รับผิดชอบประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): sirinat.s@rmutsv.ac.th Tel. 082-430-8651

mannose พบว่าน้ำตาลทั้ง 4 ชนิด ไม่ทำให้เชื้อมีค่ากิจกรรมการยับยั้งเพิ่มขึ้น และเชื้อ *E. faecium* PDN-Ta10 มีค่ากิจกรรมการยับยั้งเมื่อเลี้ยงเชื้อในอาหารน้ำมะพร้าวที่เสริมด้วย tryptone ร้อยละ 3 และ mannose ร้อยละ 3 เป็น 2,560 AU/ml

คำสำคัญ: *Enterococcus faecium* PDN-Ta10, *Listeria monocytogenes* DMST17303, สารแบคทีเรียโอซิน, ปลาตุ๋น

ABSTRACT

Enterococcus faecium PDN-Ta10 is lactic acid bacteria (LAB) which has bacteriocin like activity against *L. monocytogenes* DMST17303. This research aimed to study the growth phase and bacteriocin production of *E. faecium* PDN-Ta10 in 4 commercial culture media (APT broth, BHI broth, M17 broth and MRS broth) and 2 types of natural media (coconut water broth and soy flour with molasses broth). The maximum growth and bacteriocin production were observed when *E. faecium* PDN-Ta10 was cultured in MRS broth and coconut water broth with bacteriocin activity of 5,020 AU/ml and 1,280 AU/ml, respectively. The optimum initial pH and temperature for bacteriocin production by *E. faecium* PDN-Ta10 were pH 6.0 and 35 °C, respectively after 14 h of incubation. Four nitrogen sources including beef extract, peptone, yeast extract and tryptone were used as the sole nitrogen source in MRS broth to optimize the production of bacteriocin. The results showed that maximal bacteriocin production (2,560 AU/ml) was recorded in the presence of 3% tryptone. Bacteriocin production was not stimulated by the addition of 4 carbon sources (fructose, lactose, maltose and mannose). *E. faecium* PDN-Ta10 showed bacteriocin activity of 2,560 AU/ml in coconut water supplemented with 3% tryptone and 3% mannose.

Key words: *Enterococcus faecium* PDN-Ta10, *Listeria monocytogenes* DMST17303, bacteriocin, pladukra

บทนำ

แบคทีเรียแลคติกเป็นกลุ่มแบคทีเรียแกรมบวก ไม่สร้างสปอร์ เติบโตได้ในที่ไม่มีออกซิเจน หรือ เติบโตได้ทั้งในที่มีออกซิเจน และไม่มีออกซิเจน มีรูปร่างกลมหรือแท่ง สามารถผลิตกรดแลคติกเป็นผลิตภัณฑ์หลักจากกระบวนการหมักน้ำตาล (Quinto *et al.*, 2014) สกุลของแบคทีเรียที่จัดอยู่ในกลุ่มของแบคทีเรียแลคติกที่จัดโดย Bergey's manual of systematic bacteriology ประกอบด้วย *Aerococcus* *Lactobacillus* *Leuconostoc* *Pediococcus* และ

Streptococcus (Sneath *et al.*, 1986) ต่อมาได้จัดให้แบคทีเรียสกุลต่อไปนี้เป็นแบคทีเรียแลคติก ได้แก่ *Aerococcus* *Carnobacterium* *Enterococcus* *Lactobacillus* *Lactococcus* *Leuconostoc* *Oenococcus* *Pediococcus* *Streptococcus* *Tetragenococcus* *Vagococcus* และ *Weissella* (Axelsson, 2004) แบคทีเรียแลคติกมีบทบาทในการผลิตผลิตภัณฑ์อาหารหมักหลายชนิด ในทวีปเอเชียมีการแบ่งกลุ่มอาหารหมักเป็น 5 กลุ่ม ได้แก่ ผลิตภัณฑ์ถั่วเหลืองหมัก ผลิตภัณฑ์ปลาหมัก ผลิตภัณฑ์ผักดอง ผลิตภัณฑ์แป้งหมัก และผลิตภัณฑ์

เครื่องดื่มแอลกอฮอล์โดยพบว่าในทุกกลุ่มของผลิตภัณฑ์ที่มีเชื้อแบคทีเรียแลคติกเข้าไปเกี่ยวข้องทั้งในแง่ที่เป็นประโยชน์ และเป็นโทษ (Rhee *et al.*, 2011) สิ่งที่ทำให้แบคทีเรียแลคติกมีความสำคัญในการผลิตอาหารหมัก คือ แบคทีเรียชนิดนี้ทำให้ผลิตภัณฑ์อาหารหมักมีอายุการเก็บที่ยาวนานขึ้นเมื่อเทียบกับวัตถุดิบ โดยพบว่าแบคทีเรียแลคติกสามารถสร้างสารยับยั้งจุลินทรีย์ที่สำคัญ คือ กรดแลคติกที่ทำให้ค่า pH ของอาหารลดลง นอกจากนี้แบคทีเรียแลคติกยังสร้างสารยับยั้งอื่นๆ อีก เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ไคโอะซิดิล และแบคเทอริโอซิน (De Vuyst and Vandamme, 1994; Atrih *et al.*, 2001; Messens and De Vuyst, 2002) แบคเทอริโอซินเป็นสารเปปไทด์หรือโปรตีนที่ผลิตจากไรโบโซม (Jack *et al.*, 1995) และมีฤทธิ์ยับยั้งการเติบโตของแบคทีเรียอื่นที่มีสายพันธุ์ใกล้เคียงกับแบคทีเรียที่ผลิตแบคเทอริโอซิน (Klaenhammer, 1993) หรือสามารถยับยั้งการเติบโตของแบคทีเรียสายพันธุ์อื่นได้ทั้งแบคทีเรียแกรมบวก (Coventry *et al.*, 1997; Ennahar *et al.*, 2000; Garneau *et al.*, 2002) หรือแบคทีเรียแกรมลบ (Ko and Ahn, 2000; Messi *et al.*, 2001; Caridi, 2002) โดยแบคเทอริโอซินที่สร้างขึ้นไม่เป็นพิษต่อเซลล์ที่ผลิต แบคเทอริโอซินสร้างได้จากทั้งแบคทีเรียแกรมบวกและแบคทีเรียแกรมลบ โดยพบว่าในกลุ่มของแบคทีเรียแกรมบวกนั้นแบคทีเรียแลคติกจัดเป็นเชื้อกลุ่มใหญ่ที่สามารถผลิตสารแบคเทอริโอซินและมีการนำไปใช้ในอาหารได้เนื่องจากแบคทีเรียแลคติกได้รับการยอมรับว่าสามารถบริโภคได้อย่างปลอดภัย (Generally Recognized as Safe-GRAS) (Savadogo *et al.*, 2004; Widyastuti *et al.*, 2014)

Listeria monocytogenes เป็นเชื้อแบคทีเรียแกรมบวก ไม่สร้างสปอร์ เซลล์มีขนาดเล็ก เติบโตได้ทั้งในที่ที่มีออกซิเจน และไม่มีออกซิเจน หรือชอบ

ออกซิเจนน้อยๆ และก่อให้เกิดโรคลิสเทอริโอซิส (Listeriosis) ในคนและสัตว์ (Ryser and Marth, 1991) สำหรับในคนพบว่าการเกิดโรคลิสเทอริโอซิสโดยทั่วไปแล้วจะเกิดเฉพาะกับคนที่มีภูมิคุ้มกันบกพร่อง หญิงมีครรภ์ ทารกในท้อง และผู้สูงอายุเท่านั้น ซึ่งผู้ป่วยที่เป็นโรคลิสเทอริโอซินั้นเกิดจากสารพิษประเภทเอนเทอโรทอกซิน (Enterotoxin) ที่สร้างจากเชื้อ *L. monocytogenes* โดยจะมีอาการแตกต่างกันไป เช่น โลหิตเป็นพิษ วิงเวียนศีรษะ เยื่อหุ้มสมองอักเสบ เป็นไข้และอาเจียน ทำให้เกิดอาการแพ้ในหญิงมีครรภ์ เป็นต้น แต่เดิมเชื่อว่าการติดเชื้อนี้เกิดจากการสัมผัสกับสัตว์ที่เป็นพาหะ แต่ต่อมาได้มีการค้นพบว่าการตรวจพบเชื้อในอาหารประเภทนม ผักและเนื้อสัตว์ จึงทำให้ทราบว่าเชื้อ *L. monocytogenes* สามารถติดต่อทางอาหารได้ (foodborne pathogen) ดังนั้นหากมีการปนเปื้อนแบคทีเรีย *L. monocytogenes* ในอาหารย่อมทำให้เกิดผลเสียต่างๆ ตามมา (Chanwitayanuchit, 2010) ด้วยเหตุนี้การศึกษาการเพิ่มการผลิตสารแบคเทอริโอซินโดยเชื้อแบคทีเรียแลคติก *Enterococcus faecium* PDN-Ta10 ที่แยกได้จากปลาตุ๋นเพื่อยับยั้งเชื้อ *L. monocytogenes* จึงเป็นแนวทางหนึ่งที่จะลดการปนเปื้อนของเชื้อก่อโรคในอาหารโดยไม่ใช้สารเคมีได้

แบคทีเรียแลคติกเป็นเชื้อกลุ่มที่ต้องการอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีความอุดมสมบูรณ์มากในการเติบโต ดังนั้นเพื่อที่จะเลี้ยงเชื้อให้ได้ปริมาณเซลล์สูงและมีการสร้างสารต่างๆ ที่ต้องการได้สูง จึงต้องมีการพัฒนาให้ได้สูตรอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีประสิทธิภาพเอื้อต่อการผลิตมวลเซลล์ของแบคทีเรียแลคติกสำหรับองค์ประกอบต่างๆ ในอาหารนั้นพบว่าการผลิตสารแบคเทอริโอซินของแบคทีเรียแลคติกต่างชนิดกันก็จะมีความสามารถในการผลิตที่แตกต่างกัน นอกจากนี้ อุณหภูมิ และค่า pH เริ่มต้นของอาหารเลี้ยงเชื้อที่เหมาะสมในการผลิตสารแบคเทอริโอซิน

ของแบคทีเรียแลคติกต่างชนิดกันจะมีความแตกต่างกันไปด้วย (Yunchalard and Nontasen, 2011) งานวิจัยนี้จึงได้ทำการศึกษาการเพิ่มการผลิตสารแบคเทอรีโอซินจากเชื้อ *E. faecium* PDN-Ta10 ในอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดต่างๆ และศึกษาสภาวะที่เหมาะสมในการผลิตสารแบคเทอรีโอซิน เพื่อยับยั้งเชื้อ *L. monocytogenes* DMST 17303

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การผลิตสารแบคเทอรีโอซินในอาหารเลี้ยงเชื้อชนิดต่างๆ

1.1 การเตรียมแบคทีเรียแลคติกที่ผลิตสารแบคเทอรีโอซิน

ถ่ายเชื้อ *E. faecium* PDN-Ta10 ซึ่งเป็นแบคทีเรียแลคติกที่แยกได้จากปลาตุกร้า ปริมาตร 10 ไมโครลิตร จาก glycerol stock ลงในอาหาร MRS broth ปริมาตร 4 มิลลิลิตร บ่มที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นดูดเชื้อ 100 ไมโครลิตร ลงในอาหาร MRS broth ปริมาตร 10 มิลลิลิตร บ่มที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 ชั่วโมง จากนั้นดูดเชื้อ 10 มิลลิลิตร ลงในอาหารเลี้ยงเชื้อที่ต้องการทดสอบการผลิตสารแบคเทอรีโอซินปริมาตร 500 มิลลิลิตร (2 % inoculums; v/v) โดยชนิดของอาหารเลี้ยงเชื้อที่ใช้มีดังนี้

อาหารสำเร็จรูป ได้แก่ อาหารเลี้ยงเชื้อ APT broth ยี่ห้อ : Fluka อาหารเลี้ยงเชื้อ Brain Heart Infusion Broth (BHI broth) ยี่ห้อ : Fluka อาหารเลี้ยงเชื้อ Lactobacillus MRS Broth (MRS broth) ยี่ห้อ : Himedia และอาหารเลี้ยงเชื้อ M17 broth ยี่ห้อ : Himedia

อาหารธรรมชาติ ได้แก่ อาหารน้ำมะพร้าว มีส่วนประกอบ คือ น้ำมะพร้าว (น้ำมะพร้าวแก่ และน้ำมะพร้าวอ่อน) 1000 มิลลิลิตร Peptone 10 กรัม Yeast extract 5 กรัม Tween 80 1 กรัม Ammonium

sulphate 2 กรัม Sodium acetate 5 กรัม (Hongeak *et al.*, 2009) และ อาหารถั่วเหลืองบดผสมโมลาส มีส่วนประกอบ คือ ถั่วเหลืองบดร้อยละ 10 และ โมลาสร้อยละ 2, 4, 6, 8, 10 โดยอัตราส่วนจะเปลี่ยนแปลงเฉพาะโมลาส ส่วนถั่วเหลืองบดไม่เปลี่ยนแปลง

1.2 การเตรียมแบคทีเรียอินดิเคเตอร์

ถ่ายเชื้อ *L. monocytogenes* DMST17303 ปริมาตร 10 ไมโครลิตร จาก Glycerol stock ลงในอาหาร Nutrient broth ปริมาตร 4 มิลลิลิตร บ่มที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 24 ชั่วโมง จากนั้นดูดเชื้อ 100 ไมโครลิตร ลงในอาหาร Nutrient broth ปริมาตร 10 มิลลิลิตร บ่มที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 14 ชั่วโมง จากนั้นดูดเชื้อ 100 ไมโครลิตร ลงในอาหารเลี้ยงเชื้อ Nutrient soft agar 4 มิลลิลิตร

1.3 การทดสอบความสามารถในการผลิตสารยับยั้งเชื้อแบคทีเรียอินดิเคเตอร์ด้วยวิธี agar well diffusion

นำเชื้อแบคทีเรีย *E. faecium* PDN-Ta10 ที่เลี้ยงในอาหารเลี้ยงเชื้อที่ต้องการทดสอบการผลิตสารแบคเทอรีโอซิน บ่มที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เก็บตัวอย่างทุก 2 ชั่วโมง เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ไปศึกษาความหนาแน่นของเซลล์ โดยวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ 660 นาโนเมตร และหาประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อ *L. monocytogenes* DMST 17303 โดยหมุนแยกเซลล์ออกโดยใช้ความเร็ว 6,000 rpm เป็นเวลา 15 นาที นำส่วนใสไปปรับ pH ให้เป็นกลาง (โดยใช้ 1 N NaOH) จากนั้นดูดส่วนใสปริมาตร 100 ไมโครลิตร ใส่ลงหลอดขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 8 มิลลิเมตร ในอาหารเลี้ยงเชื้อ Nutrient agar ปริมาตร 30 มิลลิลิตร ที่เททับด้วยเชื้อแบคทีเรีย *L. monocytogenes* DMST17303 จากข้อ 1.2 บ่มที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เป็นเวลา 18 - 24 ชั่วโมง รายงานผลเป็นค่า Arbitrary Unit/ml (AU/ml) โดยนำส่วนใส มาทำ 2 fold dilution ตรวจสอบผลการยับยั้งเชื้ออินดิเคเตอร์

ของสารแบคทีเรียโอซินโดยดูจากระดับความเจือจาง
สุดท้ายที่ทำให้เกิดวงใสในการยับยั้งเชื้ออินดิเคเตอร์

(Srionnual *et al.*, 2007)

กิจกรรมการยับยั้ง = $\frac{1,000 \times \text{ความเจือจางสุดท้ายที่ทำให้เกิดวงใสในการยับยั้งเชื้ออินดิเคเตอร์}}{100}$
(AU/ml)

2. ศึกษา pH เริ่มต้นของอาหารเลี้ยงเชื้อและอุณหภูมิ ที่เหมาะสมในการผลิตสารแบคทีเรียโอซิน

เลี้ยงเชื้อแบคทีเรียแลคติก *E. faecium* PDN-Ta10 ความเข้มข้นร้อยละ 2 (2% inoculums; v/v) ในอาหารเลี้ยงเชื้อที่แบคทีเรียแลคติกสามารถ
สร้างสารแบคทีเรียโอซินได้สูงสุดปริมาณ 500
มิลลิกรัม โดยปรับ pH เริ่มต้นของอาหารเลี้ยงเชื้อ
เป็น 4.5, 5.0, 5.5, 6.0 และ 6.5 (Todorov and Dicks,
2006) และเลี้ยงเชื้อที่อุณหภูมิ 20, 25, 30, 35, 37, 40
และ 45 องศาเซลเซียส เก็บตัวอย่างทุก 2 ชั่วโมง
เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ไปศึกษาความหนาแน่นของ
เซลล์ โดยวัดค่าดูดกลืนแสงที่ 660 นาโนเมตร (OD
660 nm) และหาประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อ
แบคทีเรียอินดิเคเตอร์ *L. monocytogenes*
DMST17303 โดยวิธี agar well diffusion และ
รายงานผลการยับยั้งในหน่วย Arbitrary Unit/ml

3. ศึกษาแหล่งของสารคาร์บอน และ สารไนโตรเจนที่ เหมาะสมต่อการผลิตสารแบคทีเรียโอซิน

ถ่ายเชื้อแบคทีเรียแลคติก *E. faecium* PDN-Ta10 ความเข้มข้นร้อยละ 2 (2% inoculums; v/v)
ในสูตรอาหารเลี้ยงเชื้อที่แบคทีเรียแลคติกสามารถ
สร้างสารแบคทีเรียโอซินได้สูงสุดปริมาณ 500
มิลลิกรัม (โดยมีการดัดแปลงให้เป็นสูตรอาหาร
พื้นฐานที่มีส่วนผสมทุกอย่างเหมือนอาหารเลี้ยงเชื้อ
ทางการค้าแต่ไม่มีสารอินทรีย์ และน้ำตาล) เสริม
ด้วยแหล่งไนโตรเจน คือ Tryptone, Meat extract,
Yeast extract และ Peptone (ร้อยละ 0.1, 1.0, 2.0
และ 3.0 w/v) และแหล่งคาร์บอน คือ น้ำตาล

Fructose, Lactose, Maltose และ Mannose (ร้อยละ
0.1, 1.0, 2.0 และ 3.0 w/v) ปรับ pH และบ่มที่
อุณหภูมิที่เชื้อสามารถสร้างสารแบคทีเรียโอซินได้
สูงสุด เก็บตัวอย่างที่ชั่วโมงที่เชื้อสามารถสร้างสาร
แบคทีเรียโอซินได้สูงสุด ไปศึกษาความหนาแน่น
ของเซลล์ โดยวัดค่าดูดกลืนแสงที่ 660 นาโนเมตร
และหาประสิทธิภาพการยับยั้งเชื้อแบคทีเรียอินดิเค
เตอร์ *L. monocytogenes* DMST17303 โดยวิธี agar
well diffusion และรายงานผลการยับยั้งในหน่วย
Arbitrary Unit/ml และทำการเสริมแหล่งของสาร
คาร์บอน และ สารไนโตรเจนที่ทำให้เชื้อแบคทีเรีย
แลคติก *E. faecium* PDN-Ta10 ผลิตสารแบคทีเรีย
โอซินได้สูงสุดในอาหารเลี้ยงเชื้อสำเร็จรูปลงใน
อาหารสูตรธรรมชาติ บ่มที่อุณหภูมิที่เชื้อสามารถ
สร้างสารแบคทีเรียโอซินได้สูงสุด และเก็บตัวอย่าง
ที่ชั่วโมงที่เชื้อสามารถสร้างสารแบคทีเรียโอซินได้
สูงสุด ไปศึกษาความหนาแน่นของเซลล์ โดยวัดค่า
ดูดกลืนแสงที่ 660 นาโนเมตร และหาประสิทธิภาพ
การยับยั้งเชื้อแบคทีเรียอินดิเคเตอร์ *L.*
monocytogenes DMST17303 โดยวิธี agar well
diffusion และรายงานผลการยับยั้งในหน่วย
Arbitrary Unit/ml

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

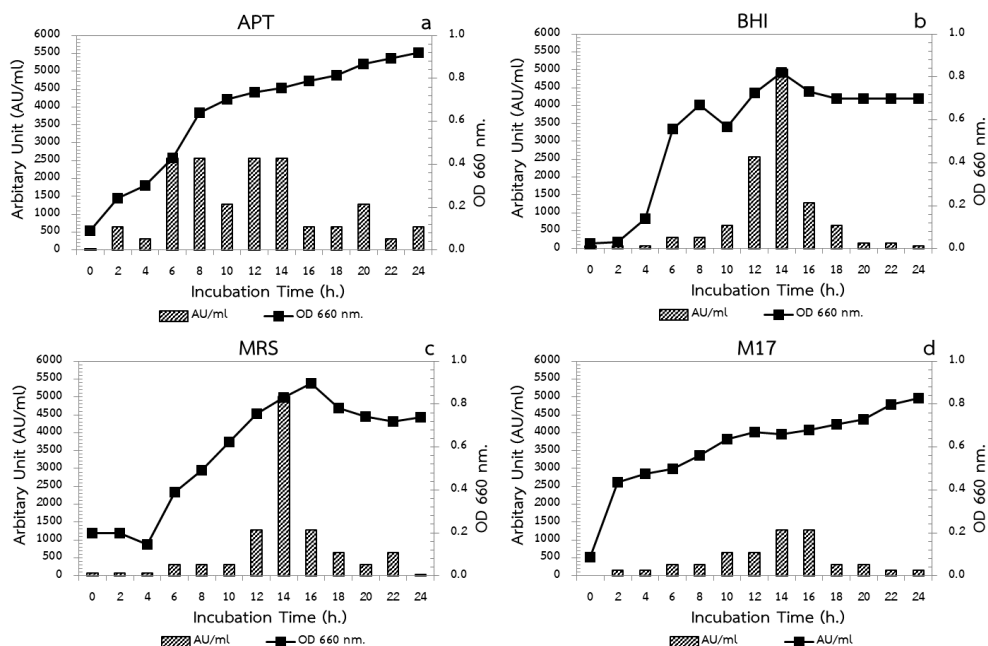
เชื้อ *E. faecium* PDN-Ta10 ที่ใช้ในงานวิจัย
นี้เป็นเชื้อแบคทีเรียแลคติกที่แยกได้จากปลาอุกร้า
และสามารถผลิตสารแบคทีเรียโอซินที่มีฤทธิ์ในการ

ยับยั้งเชื้อก่อโรค *L. monocytogenes* DMST17303 (Srionnuan and Mahae, 2013)

แบคทีเรียโอซินมีปริมาณเพิ่มขึ้นตามการเติบโตของเซลล์แบคทีเรียที่สร้าง โดยเฉพาะแบคทีเรียโอซินที่สร้างจากแบคทีเรียแลกติก ดังนั้น ชนิดของอาหารเลี้ยงเชื้อ และสภาวะในการเติบโตจึงมีความสำคัญต่อการสร้างสารแบคทีเรียโอซิน ซึ่งพบว่าอาหารเลี้ยงเชื้อที่เหมาะสมจะเป็นอาหารที่มีองค์ประกอบที่ซับซ้อน เช่น APT BHI MRS และ M17 เป็นต้น โดยในการผลิตแบคทีเรียโอซินจะต้องคำนึงถึงแหล่งและปริมาณสารคาร์บอน ปริมาณไนโตรเจน ปริมาณฟอสเฟต และสารลดแรงตึงผิวต่างๆ ที่เป็นองค์ประกอบในอาหารเลี้ยงเชื้อ โดยพบว่าปัจจัยที่จะส่งผลต่อการผลิตสารแบคทีเรียโอซิน

ของแบคทีเรียแลกติกมาก คือ สารคาร์บอน และสารไนโตรเจน

การทดลองเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียแลกติก *E. faecium* PDN-Ta10 ในอาหารเลี้ยงเชื้อเหลว APT BHI MRS และ M17 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส ผลการทดลองแสดงดังภาพที่ 1 พบว่าเชื้อ *E. faecium* PDN-Ta10 มีการเติบโตได้ดีในอาหารเลี้ยงเชื้อทั้ง 4 ชนิด โดยมีค่าความหนาแน่นของเซลล์ใกล้เคียงกัน ($OD_{660\text{ nm}} = 0.7 - 0.9$ ในระยะเวลาการเลี้ยงเชื้อ 24 ชั่วโมง) และพบว่าเชื้อ *E. faecium* PDN-Ta10 สามารถผลิตสารแบคทีเรียโอซินได้สูงในอาหารเลี้ยงเชื้อ BHI และ MRS (ภาพที่ 1b และ c) โดยมีค่าการผลิตสารแบคทีเรียโอซินเท่ากับ 5,020 AU/ml. ในชั่วโมงที่ 14 ของการเลี้ยงเชื้อ



ภาพที่ 1 การเติบโตและผลิตสารแบคทีเรียโอซินของเชื้อ *E. faecium* PDN-Ta10 ในอาหารเลี้ยงเชื้อทางการค้า

เนื่องจากอาหารเลี้ยงเชื้อสำหรับแบคทีเรียแลกติกที่ผลิตจำหน่ายทางการค้ามักมีราคาแพง เมื่อเทียบกับอาหารเลี้ยงเชื้อที่ใช้สำหรับแบคทีเรียทั่วไป การผลิตสารแบคทีเรียโอซินจากแบคทีเรียแลกติกจึงมีต้นทุนค่อนข้างสูงถ้ามีการใช้อาหารสำเร็จรูปทาง

การค้าในการเลี้ยงเชื้อเพื่อผลิตแบคทีเรียโอซิน แต่การหาแหล่งอาหารที่มีราคาถูกมาใช้ในการผลิตต้องคำนึงถึงปริมาณสารอาหารที่จำเป็นต่อการเติบโตและปริมาณสารแบคทีเรียโอซินที่ผลิตได้จากอาหารนั้น และในอาหารนั้นต้องไม่มีสารพิษที่เป็นอันตราย

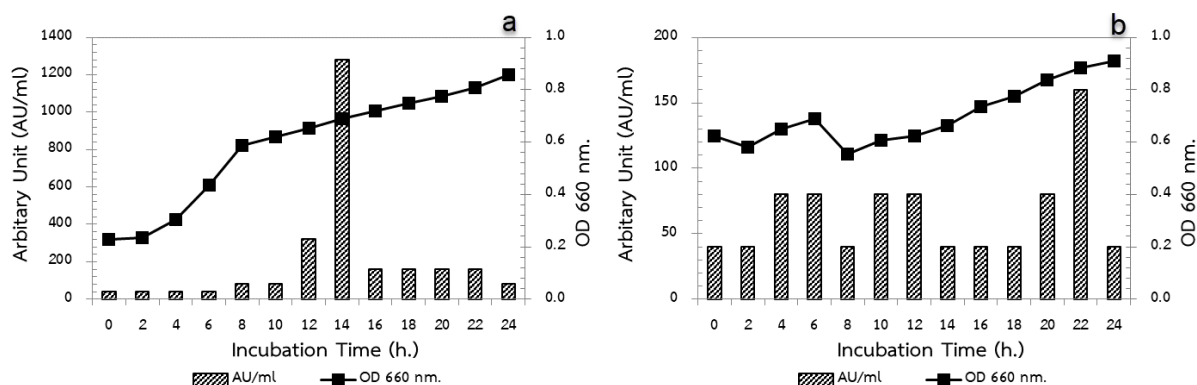
ต่อเชื้อแบคทีเรียแลคติก ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงได้ทำการทดลองใช้อาหารน้ำมะพร้าวและอาหารถั่วเหลืองบดผสมโมลาสมาใช้เป็นอาหารสำหรับเลี้ยงเชื้อ *E. faecium* PDN-Ta10 เพื่อลดค่าใช้จ่ายของอาหารเลี้ยงเชื้อ

จากการทดลองเลี้ยงเชื้อ *E. faecium* PDN-Ta10 ในอาหารธรรมชาติ ได้แก่ น้ำมะพร้าวแก่ น้ำมะพร้าวอ่อน และอาหารถั่วเหลืองบดร้อยละ 10 ผสมโมลาสร้อยละ 2 - 10 ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส เก็บตัวอย่างที่เวลา 12, 14 และ 16 ชั่วโมง เนื่องจากเป็นช่วงเวลาที่พบว่าเชื้อ *E. faecium* PDN-Ta10 ผลิตสารแบคทีเรียโอซินได้สูง พบว่า เชื้อ *E. faecium* PDN-Ta10 ผลิตสารแบคทีเรียโอซินได้สูงสุดในอาหารน้ำมะพร้าวแก่ และในอาหารถั่วเหลืองบดร้อยละ 10 ที่มีโมลาสร้อยละ 6 (ไม่ได้แสดงข้อมูล) จึงได้คัดเลือกอาหาร 2 สูตรดังกล่าวไปศึกษากิจกรรมการยับยั้งโดยแบคทีเรียโอซินจากเชื้อ *E. faecium* PDN-Ta10 ตั้งแต่ชั่วโมงที่ 0 - 24 ต่อไป

เมื่อทำการทดลองเลี้ยงเชื้อ *E. faecium* PDN-Ta10 ในอาหารน้ำมะพร้าวแก่ เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส พบว่าเชื้อ *E. faecium* PDN-Ta10 มีการผลิตสารแบคทีเรียโอซินด้วยค่าสูงสุด เท่ากับ 1,280 AU/ml ในชั่วโมงที่ 14 (ภาพที่ 2a) ในขณะที่เมื่อทำการทดลองเลี้ยงเชื้อ *E. faecium* PDN-Ta10 ในอาหารถั่วเหลืองบดร้อยละ 10

ผสมโมลาส ร้อยละ 6 เป็นเวลา 24 ชั่วโมง ที่อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส พบว่าเชื้อ *E. faecium* PDN-Ta10 มีการผลิตสารแบคทีเรียโอซินด้วยค่าสูงสุด เท่ากับ 160 AU/ml ในชั่วโมงที่ 22 (ภาพที่ 2b)

สำหรับน้ำมะพร้าวจัดเป็นแหล่งอาหารราคาถูกที่สามารถนำมาใช้สำหรับการผลิตแบคทีเรียโอซินได้ เนื่องจากในน้ำมะพร้าวมีสารอาหารต่างๆ ที่จุลินทรีย์สามารถนำไปใช้ในการเติบโตได้ โดยพบว่าน้ำมะพร้าวแก่มีสารอาหารต่างๆ รวมทั้งน้ำตาลรีดิวซ์ซึ่งมากกว่าในน้ำมะพร้าวอ่อน (Krishnakutty, 1987) และจากการทดลองของ Hongek et al. (2009) พบว่าเชื้อแบคทีเรียแลคติก *Pediococcus acicilactici* CP7-3 และ *Weissella confusa* CP3-1 มีการสร้างสารแบคทีเรียโอซินที่สามารถยับยั้งเชื้อแบคทีเรียทดสอบได้ดีเมื่อเลี้ยงเชื้อในอาหารสูตรน้ำมะพร้าวสำหรับในอาหารถั่วเหลืองบดร้อยละ 10 ผสมโมลาสร้อยละ 6 พบว่าเชื้อ *E. faecium* PDN-Ta10 สามารถเติบโตและผลิตสารแบคทีเรียโอซินได้น้อยลงเนื่องจากเชื้อ *E. faecium* PDN-Ta10 มีความต้องการสารอาหารที่เฉพาะเจาะจง (specific nutrients) สำหรับการเติบโต เช่นเดียวกับการทดลองของ Todorov and Dicks (2007) ที่พบว่าเชื้อ *Lactobacillus pentosus* ST712BZ มีการเติบโตและผลิตสารแบคทีเรียโอซินได้น้อยมากเมื่อเลี้ยงเชื้อในอาหารนมถั่วเหลืองและโมลาสร้อยละ 10



ภาพที่ 2 การเติบโตและผลิตสารแบคทีเรียโอซินของเชื้อ *E. faecium* PDN-Ta10 ในอาหารน้ำมะพร้าวแก้ว (a) และอาหารถั่วเหลืองบดร้อยละ 10 ผสมโมลาสร้อยละ 6 (b)

เนื่องจากงานวิจัยส่วนใหญ่พบว่าการผลิตสารแบคทีเรียโอซินจากแบคทีเรียแลคติกนั้นขึ้นอยู่กับ การเติบโตของเชื้อที่ผลิต โดยเมื่อการเติบโตของแบคทีเรียแลคติกเพิ่มขึ้น ก็จะสร้างสารแบคทีเรียโอซินที่มีค่าการยับยั้งแบคทีเรียอินดิเคเตอร์สูงขึ้นเช่นกัน (Parente and Riccardi, 1999) ดังนั้นสภาวะที่เหมาะสมต่อการเติบโตของเชื้อจะส่งผลให้การผลิตสารแบคทีเรียโอซินมีปริมาณมากที่สุดด้วย และจากผลการทดลองที่ได้ข้างต้นทางผู้วิจัยจึงได้คัดเลือกอาหารสำเร็จรูป คือ อาหารเลี้ยงเชื้อ MRS เนื่องจากมีราคาถูกกว่าอาหารเลี้ยงเชื้อ BHI และแหล่งอาหารธรรมชาติ คือ น้ำมะพร้าวแก้ว เป็นอาหารสำหรับศึกษา pH อุณหภูมิ และองค์ประกอบของอาหารเลี้ยง

เชื้อที่มีผลต่อการเพิ่มการผลิตแบคทีเรียโอซินโดยเชื้อ *E. faecium* PDN-Ta10

จากการศึกษาผลของค่า pH และอุณหภูมิ ที่มีผลต่อการเพิ่มการผลิตสารแบคทีเรียโอซินของเชื้อแบคทีเรียแลคติก *E. faecium* PDN-Ta10 เมื่อเลี้ยงในอาหาร MRS broth พบว่าแบคทีเรียแลคติก *E. faecium* PDN-Ta10 สร้างสารแบคทีเรียโอซินได้สูงสุดในช่วงชั่วโมงที่ 14 ของการเลี้ยงเชื้อในอาหารสำเร็จรูป MRS ในทุกค่า pH ที่ทำการทดลอง คือ pH 4.5 5.0 5.5 6.0 และ 6.5 อุณหภูมิในการเพาะเลี้ยง 35 องศาเซลเซียส โดยเชื้อมีกิจกรรมการยับยั้งแบคทีเรีย *L. monocytogenes* DMST17303 ได้สูงสุดเป็น 1,280 AU/ml (ภาพที่ 3)



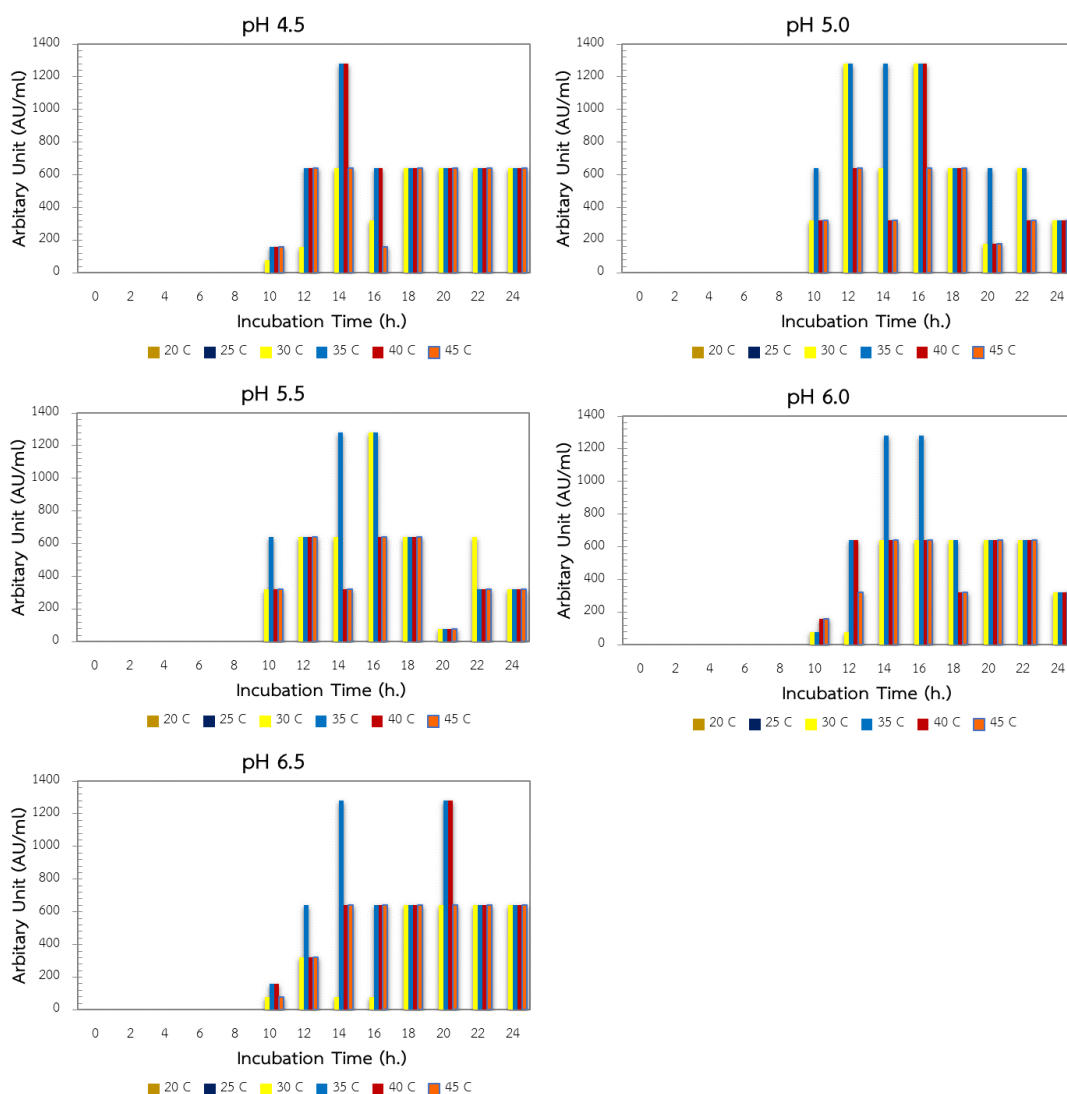
ภาพที่ 3 การเติบโตและผลิตสารแลกเทอริโอซินของเชื้อ *E. faecium* PDN-Ta10 ในอาหาร MRS broth ที่ pH และอุณหภูมิต่างๆ

เมื่อทำการทดลองเลี้ยงเชื้อ *E. faecium* PDN-Ta10 ในอาหารน้ำมะพร้าวแก่ พบว่าเชื้อ *E. faecium* PDN-Ta10 มีกิจกรรมการยับยั้งแบคทีเรีย *L. monocytogenes* DMST17303 ได้สูงสุดเป็น 1,280 AU/ml ที่อุณหภูมิในการเพาะเลี้ยง 35 องศาเซลเซียส ที่ทุกค่า pH ที่ทำการทดลอง (ภาพที่ 4) แต่ที่ค่า pH 6.0 เชื้อจะมีค่าความหนาแน่นของเซลล์ที่ค่า OD 660 nm มากที่สุด (ไม่ได้แสดงข้อมูล) และจะเห็นได้ว่าเชื้อ *E. faecium* PDN-Ta10 เริ่มมีการผลิตสารแลกเทอริโอซินในอาหารเลี้ยงเชื้อ MRS ตั้งแต่ชั่วโมงที่ 2 ของการบ่มเชื้อ แต่จะเริ่มผลิตสารแลกเทอริโอซินในอาหารน้ำมะพร้าวแก่ตั้งแต่ชั่วโมงที่ 10 ของการบ่มเชื้อ อาจเนื่องมาจากเชื้อแบคทีเรียแลกติกสามารถเติบโตในอาหาร MRS ได้เร็วกว่าอาหาร

น้ำมะพร้าว เช่นเดียวกับการทดลองของ Hongsak et al. (2009) ที่พบว่าเชื้อแบคทีเรียแลกติก *Pediococcus acidilactici* CP7-3 เติบโตได้เร็วในอาหาร MRS broth แต่เติบโตได้ช้าในอาหารน้ำมะพร้าวโดยมีค่า Specific growth rate (μ) เท่ากับ 0.62 h^{-1} และ 0.39 h^{-1} ตามลำดับ สำหรับอุณหภูมิ และ pH ที่เหมาะสมในการผลิตสารแลกเทอริโอซินในอาหารสำเร็จรูป และอาหารธรรมชาติโดยเชื้อ *E. faecium* PDN-Ta10 มีความสอดคล้องกับการผลิตสารแลกเทอริโอซินจากเชื้อ *E. faecium* สายพันธุ์อื่นๆ หลายสายพันธุ์ เช่น จากการทดลองของ Kang and Lee (2005) พบว่าเชื้อ *E. faecium* GM-1 ที่แยกได้จากอุจจาระของเด็กทารกสามารถผลิตสารแลกเทอริโอซินได้สูงสุดที่ค่า pH 6.0-6.5 อุณหภูมิ 35 - 40 องศาเซลเซียส ในขณะที่

ที่เชื้อ *E. faecium* CTC492 ผลิตสารแบคทีริโอซิน A และ B ได้สูงสุดในอาหารเลี้ยงเชื้อ MRS ที่ค่า pH 6-7.5 อุณหภูมิตั้งแต่ 25 ถึง 35 องศาเซลเซียส (Aymerich *et al.*, 2000) เช่นเดียวกับการทดลองของ Kumar and Srivastava (2010) ที่พบว่าเชื้อ *E. faecium* LR/6 ผลิต enteriocin ในอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีค่า pH 6.0

การทดลองนี้จึงทำการคัดเลือกเวลาในการเพาะเลี้ยง เชื้อที่ เวลา 14 ชั่วโมง อุณหภูมิ 35 องศาเซลเซียส และค่า pH 6.0 ในการทดลองศึกษาแหล่งไนโตรเจน และแหล่งคาร์บอนที่เหมาะสมในการผลิตสาร แบคทีริโอซิน



ภาพที่ 4 การเติบโตและผลิตสารแบคทีริโอซินของเชื้อ *E. faecium* PDN-Ta10 ในอาหารน้ำมะพร้าวแก่ ที่ pH และอุณหภูมิต่างๆ

จากการศึกษาผลของแหล่งไนโตรเจนที่เหมาะสมต่อการผลิตสารแบคทีริโอซิน พบว่า เชื้อแบคทีเรียแลคติก *E. faecium* PDN-Ta10 ผลิตสาร

แบคทีริโอซินได้ดีที่สุดในอาหาร MRS broth สูตรพื้นฐานที่มีการเสริมด้วย Tryptone ร้อยละ 3 รองลงไป คือ Beef extract ร้อยละ 3 ส่วนใน Peptone และ

Yeast extract ไม่แสดงกิจกรรมการยับยั้งเชื้อ *L. monocytogenes* DMST17303 (ตารางที่ 1) จากการศึกษาสารอาหารที่มีผลต่อการเพิ่มการผลิตสารแบคทีเรียโอซินของเชื้อสายพันธุ์ต่างๆ พบว่าเมื่อมี Tryptone อยู่ในสูตรอาหารจะทำให้เชื้อผลิตสารแบคทีเรียโอซินได้มาก สอดคล้องกับการทดลองของ Saraniya and Jeevaratnam (2014) พบว่าเชื้อ *Lactobacillus pentosus* ผลิตสารแบคทีเรียโอซินได้สูงในอาหารที่มีส่วนผสมประกอบด้วย Tryptone หรือ Soy peptone, Yeast extract, Glucose, Triammonium citrate, $MnSO_4$, Dipotassium hydrogen phosphate และ Tween 80 เช่นเดียวกับ Khay *et al.* (2013) ที่พบว่าเชื้อ *Enterococcus durans* E204 ซึ่งเป็นเชื้อที่แยกได้จากนมอูฐสามารถผลิตสารแบคทีเรียโอซินในอาหารเลี้ยงเชื้อ MRS ที่เสริมด้วย

Tryptone, Yeast extract, Glucose และ Tween 80 ได้สูงกว่าเมื่อเลี้ยงเชื้อในอาหาร MRS สูตรปกติ และจากการทดลองของ Todorov and Dicks (2006) พบว่าการผลิตสารแบคทีเรียโอซินโดยเชื้อ *Lactobacillus plantarum* ST341LD เพิ่มขึ้นได้เมื่อมี Tryptone เป็นส่วนผสมในอาหารเลี้ยงเชื้อ และการผลิตสารแบคทีเรียโอซินจะลดลงร้อยละ 50 เมื่อมี Glucose ปริมาณ 10 หรือ 40 กรัมต่อลิตร หรือมี KH_2PO_4 ปริมาณ 5 หรือ 10 กรัมต่อลิตรในอาหารเลี้ยงเชื้อ จึงเลือกใช้อาหาร MRS broth สูตรพื้นฐานร่วมกับ Tryptone ร้อยละ 3 ในการศึกษาผลของแหล่งคาร์บอนที่เหมาะสมต่อการผลิตสารแบคทีเรียโอซินต่อไป

ตารางที่ 1 ผลของแหล่งไนโตรเจนที่เหมาะสมต่อการผลิตสารแบคทีเรียโอซินในอาหาร MRS สูตรพื้นฐาน

ร้อยละของ แหล่งไนโตรเจน	Tryptone				Beef extract				Peptone				Yeast extract			
	0.1	1	2	3	0.1	1	2	3	0.1	1	2	3	0.1	1	2	3
OD 660 nm	0.14	0.24	0.32	0.51	0.20	0.31	0.44	0.55	0.15	0.25	0.42	0.49	0.13	0.28	0.60	0.67
ค่ากิจกรรมการยับยั้ง (AU/ml)	80	320	640	2,560	40	80	160	1,280	0	0	0	0	0	0	0	0

เมื่อมีการใช้แหล่งไนโตรเจนคือ Tryptone ร้อยละ 3 ร่วมกับแหล่งคาร์บอน คือ Fructose, Lactose, Maltose และ Mannose ในอาหาร MRS สูตรพื้นฐาน พบว่าเชื้อ *E. faecium* PDN-Ta10 สามารถผลิตสารแบคทีเรียโอซินได้สูงสุดเมื่อเลี้ยงในอาหารที่มีการเสริมด้วย Tryptone ร้อยละ 3 ร่วมกับการใช้น้ำตาล Mannose ร้อยละ 3 เป็นแหล่งคาร์บอน โดยมีค่ากิจกรรมการยับยั้งเชื้อ *L. monocytogenes* DMST17303 เป็น 2,560 AU/ml. และพบว่าการเพิ่มแหล่งคาร์บอนอื่นๆ คือ Fructose, Lactose และ Maltose ร่วมกับแหล่งไนโตรเจนที่เหมาะสม ไม่มีผลต่อการเพิ่มการผลิตสารแบคทีเรียโอซินของเชื้อ *E. faecium* PDN-Ta10 และแหล่ง

คาร์บอนบางอย่างทำให้การผลิตสารแบคทีเรียโอซินลดลงด้วย (ตารางที่ 2) สำหรับผลของแหล่งคาร์บอนต่อการผลิตสารแบคทีเรียโอซินพบว่าเชื้อแบคทีเรียแลคติกส่วนใหญ่ใช้น้ำตาลกลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอนได้ดี แต่ในบางครั้งพบว่าเชื้อแบคทีเรียแลคติกบางชนิดสามารถผลิตสารแบคทีเรียโอซินได้ดีเมื่อมีการใช้น้ำตาลชนิดอื่นๆ เป็นแหล่งคาร์บอน โดยเฉพาะเชื้อ *E. faecium* เนื่องจากแบคทีเรียแลคติกมีความสามารถในการเมตาบอลิซึมแหล่งคาร์บอนได้แตกต่างกันขึ้นอยู่กับกิจกรรมจำเพาะของเอนไซม์ที่เชื้อผลิตขึ้นว่าจะมีความสามารถในการย่อยสลายแหล่งคาร์บอนได้หรือไม่ ในบางครั้งการเติมน้ำตาลชนิดต่างๆ เป็นแหล่งคาร์บอน ทำให้การผลิตสาร

แบคทีเรียโอซินลดลงได้ เนื่องจากน้ำตาลที่ใช้ไม่เหมาะสมต่อการเติบโตของแบคทีเรียแลคติก ทำให้เกิดความเครียดออสโมติก (osmotic stress) ส่งผลให้เชื้อแบคทีเรียแลคติกมีความต้องการพลังงานมากขึ้น

การผลิตสารแบคทีเรียโอซินจึงลดลง (Abbasilasi *et al.*, 2017)

ตารางที่ 2 ผลของแหล่งคาร์บอนที่เหมาะสมต่อการผลิตสารแบคทีเรียโอซินในอาหาร MRS สูตรพื้นฐานเมื่อใช้ Tryptone ร้อยละ 3 เป็นแหล่งไนโตรเจน

ร้อยละของแหล่งคาร์บอน	Fructose				Lactose				Maltose				Mannose			
	0.1	1	2	3	0.1	1	2	3	0.1	1	2	3	0.1	1	2	3
OD 660 nm	0.62	0.56	0.7	0.82	0.41	0.53	0.64	0.78	0.53	0.67	0.71	0.79	0.65	0.7	0.85	0.93
ค่ากิจกรรมการยับยั้ง (AU/ml)	0	0	160	160	0	0	160	320	0	0	0	20	640	640	2,560	2,560

จะเห็นได้ว่ากิจกรรมการยับยั้งของเชื้อ *E. faecium* PDN-Ta10 ในอาหารเลี้ยงเชื้อ MRS แต่ละครั้งมีความแตกต่างกันโดยในส่วนของการเปรียบเทียบชนิดของอาหารเลี้ยงเชื้อสำเร็จรูปทางการค้า พบว่ามีกิจกรรมการยับยั้งสูงสุดเป็น 5,020 AU/ml. แต่เมื่อทำการศึกษาผลของอุณหภูมิ และค่า pH ที่เหมาะสมต่อการผลิตสารแบคทีเรียโอซิน พบว่ามีกิจกรรมการยับยั้งเป็น 1,280 AU/ml. อาจเนื่องมาจากการเลี้ยงเชื้อในครั้งนี้ใช้เชื้อที่เก็บไว้นาน โดยไม่ได้ทำการ subculture ใหม่จึงทำให้การผลิตสารแบคทีเรียโอซินลดลง ทางผู้วิจัยจึงทำการ subculture เชื้อใหม่ และเมื่อเลี้ยงเชื้อในอาหารเลี้ยงเชื้อ MRS สูตรพื้นฐานเสริมด้วยแหล่งไนโตรเจนและคาร์บอน พบว่ามีกิจกรรมการยับยั้งเป็น 2,560 AU/ml. ซึ่งยังน้อยกว่าในอาหาร MRS สำเร็จรูปทางการค้า ซึ่งอาจเป็นไปได้ว่าส่วนผสมต่างๆ ในอาหาร MRS สูตรพื้นฐานมีคุณภาพที่แตกต่างกับอาหาร MRS สำเร็จรูปทางการค้า จึงควรมีการควบคุมคุณภาพของสารต่างๆ ที่นำมาใช้เป็นส่วนผสมในอาหาร MRS สูตรพื้นฐานให้มีคุณภาพที่ได้มาตรฐาน

เดียวกับส่วนผสมในอาหาร MRS สำเร็จรูปทางการค้า

การที่แบคทีเรียแลคติกต้องการอาหารที่มีความอุดมสมบูรณ์มากในการเติบโต ดังนั้นเพื่อการเลี้ยงเชื้อให้ได้ปริมาณเซลล์และสามารถผลิตสารแบคทีเรียโอซินได้สูงเพียงพอต่อความต้องการ จึงมีความจำเป็นอย่างยิ่งที่ต้องพัฒนาให้ได้สูตรอาหารเลี้ยงเชื้อที่มีประสิทธิภาพเพื่อการผลิตแบคทีเรียโอซิน โดยพบว่า อาหารที่นิยมใช้ในการเลี้ยงเชื้อแบคทีเรียแลคติก คือ อาหาร MRS ซึ่งสามารถผลิตสารแบคทีเรียโอซินได้สูงสุดเมื่อเทียบกับการใช้อาหารเลี้ยงเชื้อชนิดอื่นๆ สำหรับองค์ประกอบต่างๆ ในอาหารนั้นพบว่าการผลิตแบคทีเรียโอซินของแบคทีเรียแลคติก ต่างชนิดกันก็จะมีความสามารถในการผลิตที่แตกต่างกันโดยแบคทีเรียแลคติกส่วนใหญ่สามารถใช้น้ำตาลกลูโคสเป็นแหล่งคาร์บอนได้ดีกว่าน้ำตาลฟรุคโตส และสามารถใช้แหล่งไนโตรเจนที่เป็นสารอินทรีย์ที่ไม่ซับซ้อน เช่น Tryptone ได้ดีกว่าการใช้แหล่งไนโตรเจนที่เป็นสารอินทรีย์ซับซ้อน เช่น Meat extract (Yunchalard and Nontasen, 2011) ซึ่งผลการศึกษาในงานวิจัยนี้พบว่า เชื้อ *E. faecium*

PDTa10 ผลิตภัณฑ์แบคทีเรียโอซินได้ดีที่สุดในอาหาร MRS broth สูตรพื้นฐานที่มีการเสริมด้วย Tryptone และ Mannose สำหรับอุณหภูมิ และค่า pH เริ่มต้นของอาหารเลี้ยงเชื้อที่เหมาะสมในการผลิตแบคทีเรียโอซินของแบคทีเรียแลคติกต่างชนิดกันจะมีความแตกต่างกันไปด้วย

เมื่อทำการทดลองเลี้ยงเชื้อ *E. faecium* PDN-Ta10 ในสูตรอาหารน้ำมะพร้าวแก่ที่มีการเติมแหล่งอาหารต่างๆ เสริมด้วยแหล่งไนโตรเจน คือ

Tryptone 30 กรัม และ แหล่งไนโตรเจน คือ Mannose 30 กรัม พบว่าเชื้อ *E. faecium* PDN-Ta10 สามารถผลิตสารแบคทีเรียโอซินได้โดยมีค่ากิจกรรมการยับยั้งเชื้อ *L. monocytogenes* DMST 17303 เป็น 2,560 AU/ml. (ตารางที่ 3) เท่ากับการใช้อาหารเลี้ยงเชื้อ MRS สูตรพื้นฐาน จึงมีความเป็นไปได้ที่จะใช้แหล่งอาหารจากธรรมชาติมาเป็นอาหารเลี้ยงเชื้อเพื่อใช้ในการผลิตสารแบคทีเรียโอซิน

ตารางที่ 3 การผลิตสารแบคทีเรียโอซินในอาหารน้ำมะพร้าวแก่เสริมด้วย Tryptone และ Mannose

สูตรอาหารน้ำมะพร้าวแก่	น้ำมะพร้าวแก่	Bacto-peptone	Yeast extract	Tween 80	Ammonium citrate	Sodium acetate	Tryptone	Mannose
	1 ลิตร	10 กรัม	5 กรัม	1 มิลลิลิตร	2 กรัม	5 กรัม	30 กรัม	30 กรัม
OD 660 nm	0.81							
ค่ากิจกรรมการยับยั้ง (AU/ml)	2,560							

สรุป

เชื้อ *E. faecium* PDN-Ta10 เติบโตและสร้างสารแบคทีเรียโอซินได้ดีที่สุดในอาหารเลี้ยงเชื้อสำเร็จรูปทางการค้า คือ MRS broth และอาหารธรรมชาติ คือ น้ำมะพร้าว โดยมีค่ากิจกรรมการยับยั้งเชื้อ *L. monocytogenes* DMST17303 เป็น 5,020 AU/ml และ 1,280 AU/ml ตามลำดับ ที่ค่า pH เริ่มต้นของอาหารเลี้ยงเชื้อ และอุณหภูมิ ที่เหมาะสมในการผลิตสารแบคทีเรียโอซิน คือ 6.0 และ 35 องศาเซลเซียส ตามลำดับ ระยะเวลาในการเลี้ยงเชื้อ 14 ชั่วโมง

เชื้อ *E. faecium* PDN-Ta10 สร้างสารแบคทีเรียโอซินได้ดีที่สุดในอาหารเลี้ยงเชื้อ MRS สูตรดัดแปลงที่เสริมด้วยแหล่งไนโตรเจน คือ tryptone ร้อยละ 3 โดยมีค่ากิจกรรมการยับยั้งเป็น 2,560 AU/ml และแหล่งคาร์บอน 4 ชนิด คือ Fructose, Lactose, Maltose และ Mannose ไม่ทำให้เชื้อมีค่า

กิจกรรมการยับยั้งเพิ่มขึ้น แต่เชื้อ *E. faecium* PDN-Ta10 สามารถผลิตสารแบคทีเรียโอซินได้สูงสุดเมื่อเลี้ยงในอาหารที่มีการเสริมด้วย Tryptone ร้อยละ 3 ร่วมกับการใช้น้ำตาล Mannose ร้อยละ 3 เป็นแหล่งคาร์บอน โดยมีค่ากิจกรรมการยับยั้งเป็น 2,560 AU/ml

เชื้อ *E. faecium* PDN-Ta10 มีค่ากิจกรรมการยับยั้งเมื่อเลี้ยงเชื้อในอาหารน้ำมะพร้าวที่เสริมด้วย Tryptone ร้อยละ 3 และ Mannose ร้อยละ 3 เป็น 2,560 AU/ml ซึ่งมีความเป็นไปได้ที่จะใช้แหล่งอาหารจากธรรมชาติมาเป็นอาหารเลี้ยงเชื้อเพื่อใช้ในการผลิตสารแบคทีเรียโอซิน

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากงบประมาณแผ่นดิน งบประมาณประจำปี 2558

เอกสารอ้างอิง

- Abbasiliasi, S., Tan, J.S., Ibrahim, T.A.T., Bashokouh, F., Ramakrishnan, N.R., Mustafaab, S. and Ariff, A.B. 2017. Fermentation factors influencing the production of bacteriocins by lactic acid bacteria: A review. **The Royal Society of Chemistry** 7: 29395-29420.
- Atrih, A., Rekhif, N., Moir, A.J.G., Lebrihi, A. and Lefebvre, G. 2001. Mode of action, purification and amino acid sequence of plantaricin C19, an anti-*Listeria* bacteriocin produced by *Lactobacillus plantarum* C19. **International Journal of Food Microbiology** 68: 93-104.
- Axelsson, L. 2004. Lactic acid bacteria: Classification and physiology, pp. 1-66. In Salminen, S., von Wright and Ouwehand, A., eds. **Lactic Acid Bacteria: Microbiology and Functional Aspects**. Marcel Dekker, Inc, New York.
- Aymerich, T., Artigas, M.G., Garriga, M., Monfort, J.M. and Hugas, M. 2000. Effect of sausage ingredients and additives on the production of enterocin A and B by *E. faecium* CTC492. Optimization of in vitro production and anti-listerial effect in dry fermented sausages. **Journal of Applied Microbiology** 88(4): 668-694.
- Caridi, A. 2002. Selection of *Escherichia coli*-inhibiting strains of *Lactobacillus paracasei* subsp. *paracasei*. **Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology** 29: 303-308.
- Chanwitayanuchit, S. 2010. *Corynebacterium*, *Listeria*, *Erysipelothrix* and *Lactobacillus*, pp. 157-172. In Chanwitayanuchit, I. and Rungseephanurat, W., eds. **Medical Bacteriology**. ChulaPress, Bangkok. (in Thai)
- Coventry, M.J., Gordon, J.B.A., Wilcock, K., Harmark, B.E., Davidson, M.W., Hickey, A.J. Hillier and Wan, J. 1997. Detection of bacteriocins of lactic acid bacteria isolated from food and comparison with pediocin and nisin. **Journal of Applied Microbiology** 83: 248-258.
- De Vuyst, L. and Vandamme, E.J. 1994. Lactic acid bacteria and bacteriocins: Their practical importance, pp. 1-11. In De Vuyst, L. and Vandamme, E.J., eds. **Bacteriocins of Lactic Acid Bacteria**. Blackie Academic & Professional, Glasgow.
- Ennahar, S., Sashihara, T., Sonomoto, K. and Ishizaki, A. 2000. Class Ila bacteriocins: biosynthesis, structure and activity. **FEMS Microbiology Reviews** 24: 85-106.
- Garneau, S., Martin, N.I. and Vederas, J.C. 2002. Two-peptide bacteriocins produced by lactic acid bacteria. **Biochimie** 84: 577-592.
- Hongek, S., Vatanyoopaisarn, S. and Phalakornkule, C. 2009. Cell growth and bacteriocinogenic activity of *Pediococcus acidilactici* CP7-3 and *Weissella confusa* CP3-1 under different culture media, pp. 620-629. In **The 47th Kasetsart University Annual Conference**. Kasetsart university, Bangkok. (in Thai)

- Jack, R.W., Tagg, J.R. and Ray, B. 1995. Bacteriocins of gram-positive bacteria. **Microbiological Reviews** 59: 171-200.
- Kang, J.H. and Lee, M.S. 2005. Characterization of a bacteriocin produced by *Enterococcus faecium* GM-1 isolated from an infant. **Journal of Applied Microbiology** 98(5): 1169-1176.
- Khay, E.O., Ouhsassi, M., Harsal, A., Idaomar, M. and AbriniI, J. 2013. Optimization of bacteriocin-like production by *Enterococcus durans* E204 isolated from camel milk of Morocco. **Current Research in Microbiology and Biotechnology** 1(4): 155-159.
- Klaenhammer, T.R. 1993. Genetics of bacteriocins produced by lactic acid bacteria. **FEMS Microbiology Reviews** 12: 39-85.
- Ko, S.H. and Ahn, C. 2000. Bacteriocin production by *Lactococcus lactis* KCA2386 isolated from white kimchi. **Food Science and Biotechnology** 9: 263-269.
- Krishnankutty, S. 1987. **Tender Coconut Water**. Available Source: http://www.navimpex.com/fic_bdd/produits_pdf_fr_fichier/12500044750_Tender_Coconut_Water.pdf, January 9, 2020.
- Kumar, M. and Srivastava, S. 2010. Enhanced production of enteriocin from *E. faecium* LR/6 by statistical optimization of the growth medium. **Trakia Journal of Sciences** 8(4): 12-21.
- Messens, W. and De Vuyst, L. 2002. Inhibitory substances produced by *Lactobacilli* isolated from sourdoughs-A review. **International Journal of Food Microbiology** 72: 31-43.
- Messi, P., Bondi, M., Sabia, C., Battini, R. and Manicardi, G. 2001. Detection and preliminary characterization of a bacteriocin (plantaricin 35d) produced by a *Lactobacillus plantarum* strain. **International Journal of Food Microbiology** 64: 193-198.
- Parente, E. and Ricciardi, A. 1999. Production, recovery and purification of bacteriocins from lactic acid bacteria. **Applied Microbiology and Biotechnology** 52(5): 628-638.
- Quinto, E.J., Jiménez1, P., Caro, I., Tejero, J., Mateo, J. and Girbés, T. 2014. Probiotic lactic acid bacteria: A Review. **Food and Nutrition Sciences** 5: 1765-1775.
- Rhee, S.J., Lee, J.E. and Lee, C.H. 2011. Importance of lactic acid bacteria in Asian fermented foods, pp. 1-13. *In* 10th **Symposium on Lactic Acid Bacterium**. Microbial Cell Factories, Netherlands.
- Ryser, E.T. and Marth, E.H. 1991. **Listeria, Listeriosis and Food Safety**. Marcel Dekker, New York.
- Saraniya, A. and Jeevaratnam, K. 2014. Optimization of nutritional and non-nutritional factors involved for production of antimicrobial compounds from *Lactobacillus pentosus* SJ65 using response surface methodology. **Brazilian Journal of Microbiology** 45(1): 81-88.
- Savadogo, A., Ouattara, C.A.T., Bassole, I.H.N. and Traore, A.S. 2004. Antimicrobial activities of lactic acid bacteria strains isolated from

- Burkina Faso fermented milk. **Pakistan Journal of Nutrition** 3(3): 174-179.
- Sneath, P.H.A., Mair, N.S., Sharpe, M.E. and Holt, J.G. 1986. **Bergey's Manual of Systematic Bacteriology**. (1st ed. vol. 2). Williams & Wilkins, Baltimore.
- Srionnual, S., Yanagida, F., Lin, L.H., Hsiao, K.N. and Chen, Y.S. 2007. Weissellicin 110, a newly discovered bacteriocin from *Weissella cibaria* 110, isolated from *plaa-som*, a fermented fish product from Thailand. **Applied and Environmental Microbiology** 73: 2247-2250.
- Srionnual, S. and Mahae, N. 2013. Screening of bacteriocin-producing lactic acid bacteria from dry fermented catfish (pla-duk-ra). **RMUTSV Research Journal** 5(2): 1-14. (in Thai)
- Todorov, S.D. and Dicks, L.M.T. 2006. Effect of medium components on bacteriocin production by *Lactobacillus plantarum* strains ST23LD and ST341LD, isolated from spoiled olive brine. **Microbiological Research** 161: 102-108.
- Widyastuti, Y., Rohmatussolihat, R. and Febrisiantosa, A. 2014. The role of lactic acid bacteria in milk fermentation. **Food and Nutrition Sciences** 5(4): 435-442
- Yunchalard, S. and Nontasen, K. 2011. Bacteriocin from lactic acid bacteria which is used instead of food preservatives. **Journal of Academic Service, Khon Kaen University** 19(1-2): 4-10. (in Thai)

การศึกษาโครงสร้างแสงที่เหมาะสมต่อการผลิตไข่น้ำ

The Study of Optimum Light Structures for the Production of the Aquatic Macrophyte (*Wolffia globosa*)

นิตยา เกตุแก้ว * และ ศักดิ์ศรี รักไทย

Nittaya Ketkaew * and Saksri Rakthai

Received: 2 July 2020, Revised: 2 November 2020, Accepted: 8 December 2020

บทคัดย่อ

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อ 1) ศึกษาระดับความเข้มแสง และ 2) ศึกษาช่วงระยะเวลาการรับแสงที่เหมาะสมต่อการผลิตไข่น้ำ วิธีการศึกษาแบ่งออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ 1) ขั้นตอนที่ 1 วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) ประกอบด้วยความเข้มแสงที่ต่างกัน 5 ระดับๆ ละ 4 ชั่วโมง คือ 4,000, 8,000, 12,000, 16,000 และ 20,000 ลักซ์ ตามลำดับ เพื่อคัดเลือกระดับความเข้มแสงที่มีผลทำให้มีผลผลิตไข่น้ำเพิ่มขึ้นสูงสุดมาทำการศึกษาในขั้นตอนที่ 2 และ 2) ขั้นตอนที่ 2 วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) ประกอบด้วยช่วงระยะเวลาการรับแสงที่ต่างกัน 5 ระดับๆ ละ 4 ชั่วโมง คือ 8, 10, 12, 14 และ 16 ชั่วโมงต่อวัน ตามลำดับ เก็บรวบรวมข้อมูลอุณหภูมิ ความเป็นกรดด่าง และค่าการนำไฟฟ้าของน้ำทุกวันๆ ละ 2 ครั้ง น้ำหนักไข่น้ำสดทุกๆ 5 วัน และเมื่อสิ้นสุดการทดลอง 30 วัน นำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยระหว่างสิ่งทดลองด้วยวิธี DMRT ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 ผลการศึกษาพบว่าโครงสร้างแสงที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไข่น้ำคือ ความเข้มแสงที่ระดับ 12,000 ลักซ์ ช่วงระยะเวลาการรับแสง 14 ชั่วโมงต่อวัน ผลผลิตไข่น้ำเพิ่มขึ้นสูงสุดเท่ากับ 295.20 ± 17.96 กรัม และน้ำหนักแห้ง 11.44 ± 0.66 กรัม

คำสำคัญ: โครงสร้างแสง, การผลิต, ไข่น้ำ

หลักสูตรเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมเพื่อการเกษตร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน เลขที่ 833 ถนนพระราม 1 แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กรุงเทพมหานคร 10330

Department of Environmental Technology for Agriculture, Faculty of Science and Technology, Pathumwan Institute of Technology, 833 Rama 1 Road, Wangmai, Pathumwan, Bangkok 10330, Thailand.

* ผู้ติดต่อประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): nitta.2513@gmail.com Tel: 08 8275 1499

ABSTRACT

The objectives of this study were to (1) examine the light intensity and to (2) investigate the light period for the production of *Wolffia globosa*. The methodology of this research was divided into 2 steps: (1) the first step employed a completely randomized design (CRD) with 5 treatments and 4 replications including 4,000, 8,000, 12,000, 16,000 and 20,000 lux in order to select the light intensity level affecting the maximum marginal yields, and (2) the second step used a completely randomized design (CRD) with 5 treatments and 4 replications including 8, 10, 12, 14 and 16 hours per day, respectively. The data were collected twice per day as follows: temperature, pH and electrical conductivity of water quality for every 5 days for the 30-day period. The data were analyzed by means of analysis of variance (ANOVA) and Duncan's Multiple Range Test (DMRT) at the 0.05 level of significance. The results showed that the optimum light structure for the production of the aquatic macrophyte (*Wolffia globosa*) was light intensity 12,000 lux with 14 hours per day of the light period which produced maximum marginal the aquatic macrophyte yield (295.20 ± 17.96 grams) and the aquatic macrophyte dry weight yields (11.44 ± 0.66 grams).

Key words: light structures, production, the aquatic macrophyte

บทนำ

ใ้มน้ำ มีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Wolffia globosa* (L.) Wimm. จัดเป็นพืชลอยน้ำ อยู่ในวงศ์ Lemnaceae (duckweed) มีขนาดเล็กมองเห็นเป็นเม็ดสีเขียวกลมหรือเกือบกลม มีขนาดเส้นผ่าศูนย์กลางประมาณ 0.5-1.5 มิลลิเมตร ใ้มน้ำพบมากทางภาคเหนือและภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศไทย (Panwanitdumrong, 2009) ใ้มน้ำมีโปรตีน 35 เปอร์เซ็นต์ (Rowchai and Somboon, 2007) ปริมาณคลอโรฟิลล์ 30.10 มิลลิกรัมต่อ 100 กรัม แะโรทีนอยด์รวม 699.5 ไมโครกรัมต่อกรัม (air-dry basis) (Niyanuch and Tangwongchai, 2010) ใ้มน้ำจึงเป็นแหล่งโปรตีนทางเลือกชนิดหนึ่งที่ใช้ระยะเวลาขยายพันธุ์สั้น ได้ผลผลิตมาก และต้นทุนการผลิตต่ำ (Tira-umphon and Nitwatthanakull, 2018) ปัจจุบันมีการนำใ้มน้ำไปใช้ในการบริโภคหลายรูปแบบ เช่น ทำเป็นส่วนผสมช็อกโกแลตชิพมัทฟิน (Boonwittaya *et al.*, 2016) ทำเป็นผลิตภัณฑ์ใ้มน้ำแผ่น

(Deepanya, 2012) เป็นอาหารสัตว์น้ำ การบริโภคแบบสด หรือแบบแห้ง เป็นส่วนผสมในอาหารปลา (Sricharoen *et al.*, 2001) รังสีปลาสวยงาม (Panwanitdumrong, 2009) และเป็นส่วนผสมในอาหารสัตว์ปีก (Chantiratikul *et al.*, 2010) แต่เนื่องจากสภาพแวดล้อมธรรมชาติที่เปลี่ยนแปลงไป แหล่งน้ำตื้นเขิน เป็นผลให้พบใ้มน้ำในธรรมชาติได้น้อยลง รวมทั้งปัญหาแหล่งน้ำสกปรกและเน่าเสีย (Tira-umphon and Nitwatthanakull, 2018) ใ้มน้ำจึงมีข้อจำกัดด้านการยอมรับของผู้บริโภคในเรื่องสุขอนามัย และสารพิษตกค้าง (Jutasong, 1999) ด้วยเหตุนี้การศึกษาวิจัยในปัจจุบันจึงให้ความสำคัญกับการศึกษาวิธีเพิ่มผลผลิตใ้มน้ำและควบคุมคุณภาพของใ้มน้ำให้เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคเพิ่มมากขึ้น อาทิ เช่น การผลิตใ้มน้ำด้วยปุ๋ยไฮโดรโปนิกส์ทำให้ใ้มน้ำเจริญเติบโตเร็ว สะอาด ปลอดภัย และไม่มีกลิ่นคาว (Damna *et al.*, 2017) การผลิตใ้มน้ำที่ความ

หนาแน่นเริ่มต้น 15 เปอร์เซ็นต์ (Ruckaewma, 2011) การเก็บเกี่ยวไข่น้ำที่ระยะเวลาการผลิต 20 วัน (Tira-umphon and Nitwatthanakull, 2018) การผลิตไข่น้ำในระบบน้ำไหลเวียนในแนวราบที่ทำให้ได้ผลผลิตไข่น้ำมีปริมาณโปรตีนสูงกว่าเลี้ยงในระบบน้ำนิ่ง (Ruckaewma *et al.*, 2015) อย่างไรก็ตามนอกจากวิธีการเพิ่มผลผลิตไข่น้ำดังกล่าวข้างต้นแล้ว หลักการควบคุมโครงสร้างสิ่งแวดล้อมธรรมชาติก็เป็นหลักการหนึ่งที่สามารถใช้ในการเพิ่มผลผลิตและควบคุมคุณภาพของไข่น้ำให้เป็นที่ยอมรับของผู้บริโภคได้เช่นกัน ทั้งนี้เนื่องจากสภาพแวดล้อมธรรมชาติในแต่ละพื้นที่ที่มีความเฉพาะและแตกต่างกัน ดังนั้นหากควบคุมโครงสร้างสิ่งแวดล้อมธรรมชาติได้แล้วจะส่งผลต่อผลผลิตทางการเกษตรที่ดีขึ้นได้ เห็นได้จากการศึกษาการควบคุมอุณหภูมิและความชื้นในการปลูกผักสลัดในระบบไฮโดรโปนิคส์โดยใช้รากพืชแช่อยู่ในสารละลายโดยตรง (Nutrient Film Technique, NFT) ทำให้ได้ผลผลิตเพิ่มขึ้น (Sangkrasae *et al.*, 2015) การควบคุมความเป็นกรดด่าง และอุณหภูมิของสารอาหารอัตโนมัติสำหรับการปลูกผักไฮโดรโปนิคส์ (Chaowanakun *et al.*, 2018) การควบคุมอุณหภูมิและความชื้นสัมพัทธ์เพื่อลดการติดเชื้อ *Phytophthora palmyra* (Khunjet, 2017) ด้วยเหตุนี้การวิจัยครั้งนี้จึงนำหลักการควบคุมโครงสร้างสิ่งแวดล้อมธรรมชาติมาพัฒนาเป็นการศึกษาโครงสร้างแสงที่มีผลต่อผลผลิตไข่น้ำโดยมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาระดับความเข้มแสง และระยะเวลาการรับแสงที่มีผลต่อผลผลิตไข่น้ำในพื้นที่อำเภอนม จังหวัดสุราษฎร์ธานี โดยแบ่งการศึกษออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ 1) ศึกษาความเข้มแสงที่เหมาะสมต่อการผลิตไข่น้ำจากระดับความเข้มแสง 5 ระดับแล้วคัดเลือกระดับความเข้มแสงที่มีผลทำให้ได้ผลผลิตไข่น้ำสูงสุด มาทำการศึกษาในขั้นตอนที่ 2) คือ ศึกษาช่วงระยะเวลาการรับแสงที่เหมาะสมต่อ

การผลิตไข่น้ำ 5 ระดับ และคัดเลือกช่วงระยะเวลาการรับแสงที่ดีที่สุด นำมาสรุปเป็นโครงสร้างแสงที่เหมาะสมสำหรับการผลิตไข่น้ำ ผลจากการศึกษาวิจัยครั้งนี้ นอกจากจะได้โครงสร้างแสงที่ประกอบด้วยระดับความเข้มแสง และช่วงระยะเวลาการรับแสงที่เหมาะสมต่อการผลิตไข่น้ำแล้วยังสามารถนำผลการศึกษาที่ได้ใช้เป็นแนวทางในการศึกษาวิจัยการสร้างเทคโนโลยีเพื่อควบคุมโครงสร้างสิ่งแวดล้อมธรรมชาติที่มีผลต่อผลผลิตไข่น้ำภายใต้หลักการวิจัยและพัฒนา 4 ขั้นตอนคือ การศึกษาโครงสร้างสิ่งแวดล้อมที่มีผลต่อผลผลิตไข่น้ำ การสร้างเทคโนโลยีเพื่อควบคุมโครงสร้างสิ่งแวดล้อมธรรมชาติที่มีผลต่อผลผลิตของไข่น้ำ การทดสอบประสิทธิภาพของเทคโนโลยี และการนำเทคโนโลยีไปใช้ประโยชน์โดยผู้ที่ใช้อยู่จริงในห้องถัดไป

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยครั้งนี้แบ่งขั้นตอนในการดำเนินการวิจัยออกเป็น 2 ขั้นตอนคือ 1) ศึกษาความเข้มแสงที่เหมาะสมต่อผลผลิตไข่น้ำ และ 2) ศึกษาช่วงระยะเวลาการรับแสงที่เหมาะสมต่อผลผลิตไข่น้ำ รายละเอียดมีดังนี้

1. ศึกษาความเข้มแสงที่เหมาะสมต่อผลผลิตของไข่น้ำ

1.1 ตัวแปรต้นได้แก่ ความเข้มแสงซึ่งมี 5 ระดับคือ 4,000, 8,000, 12,000, 16,000 และ 20,000 ลักซ์ ตัวแปรตามจำนวน 4 ตัวแปร ได้แก่ อุณหภูมิ, ความเป็นกรดด่าง, ค่าการนำไฟฟ้า และ น้ำหนักสดและแห้งไข่น้ำ และ ตัวแปรควบคุม จำนวน 6 ตัวแปร ได้แก่ น้ำที่ใช้ทดลอง น้ำหนักไข่น้ำสดเริ่มต้น ชนิดและปริมาณสารละลายธาตุอาหารพืช ระยะเวลาการเลี้ยง ความลึกของน้ำ และระยะเวลาการรับแสง

1.2 วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) ประกอบด้วย

5 สิ่งทดลอง 4 ซ้ำ รวม 20 หน่วยทดลอง แต่ละสิ่งทดลองได้รับความเข้มแสงต่างกัน 5 ระดับคือ 4,000, 8,000, 12,000, 16,000 และ 20,000 ลักซ์ ตามลำดับ

1.3 อุปกรณ์ที่ใช้ในการวิจัย ได้แก่ เครื่องวัดความเข้มแสง อุณหภูมิ ความเป็นกรดค่า การนำไฟฟ้า เครื่องชั่ง เครื่องอบลมร้อน ภาชนะพลาสติกสีดำทรงกลม หลอดไฟชนิดหลอดขาวพร้อมอุปกรณ์ไฟฟ้า เครื่องหน่วงเวลา สวิตช์ไฟอัตโนมัติ บรรทัดชั้นเหล็กสำหรับวางชุดการทดลอง สารละลายธาตุอาหารพืช น้ำสะอาด ไข่น้ำสด สารเคมีปรับความเป็นกรดค่าของน้ำ

1.4 วิธีการวิจัยและเก็บรวบรวมข้อมูล

1.4.1 เตรียมชุดการทดลอง 20 หน่วยทดลอง ในแต่ละหน่วยทดลองประกอบด้วย น้ำดื่ม สารละลายธาตุอาหารพืชความเข้มข้น 0.77 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร ค่าความเป็นกรดค่า (pH) ในระดับ 5.70 จำนวน 12 ลิตร ระดับความลึก 10 เซนติเมตร ไข่น้ำสด 30.00 กรัม จากแหล่งน้ำธรรมชาติ คัดล้างหลอดไฟโดยปรับให้มีความเข้มแสงตามที่กำหนดไว้ในแผนการทดลอง

1.4.2 เก็บข้อมูลตัวแปรตาม ได้แก่ อุณหภูมิ ความเป็นกรดค่า และค่าการนำไฟฟ้าของน้ำทุกวันๆ ละ 2 ครั้ง น้ำหนักไข่น้ำสดทุกๆ 5 วัน และเมื่อสิ้นสุดการทดลอง 30 วันเก็บรวบรวมไข่น้ำทั้งหมด ชั่งน้ำหนักสดและนำไปอบแห้งโดยใช้เครื่องอบลมร้อน

1.5 การวิเคราะห์ข้อมูลตัวแปรตาม ได้แก่ ผลผลิตน้ำหนักสดของไข่น้ำที่เพิ่มขึ้น น้ำหนักแห้งไข่น้ำ อุณหภูมิ ความเป็นกรดค่า ค่าการนำไฟฟ้า โดยนำข้อมูลที่ได้นำมาคำนวณค่าทางสถิติ และวิเคราะห์ข้อมูลโดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of Variance: ANOVA) เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยด้วยวิธี DMRT ที่ระดับนัยสำคัญ 0.05

2. ศึกษาระยะเวลาการรับแสงที่เหมาะสมต่อผลผลิตไข่น้ำ

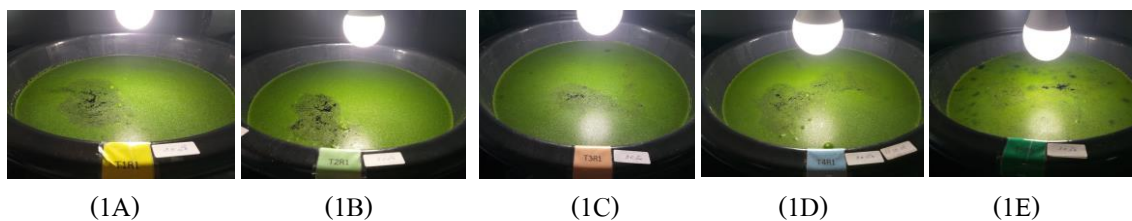
ดำเนินการวิจัยโดยมีขั้นตอนการศึกษา เช่นเดียวกับการศึกษาระดับความเข้มแสงที่เหมาะสมต่อผลผลิตของไข่น้ำ โดยนำระดับความเข้มแสงที่ทำให้ได้ผลผลิตไข่น้ำสูงสุดที่ได้จากการศึกษาในข้อ 1 มาทำการศึกษาระยะเวลาการรับแสงที่เหมาะสมต่อผลผลิตไข่น้ำ โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) 5 สิ่งทดลอง คือ 8, 10, 12, 14 และ 16 ชั่วโมงต่อวัน สิ่งทดลองละ 4 ซ้ำ รวม 20 หน่วยทดลอง โดยใช้ไข่น้ำสด 30.00 กรัม ที่เป็นผลผลิตที่ได้จากการศึกษาในขั้นตอนที่ 1

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ผลการศึกษาความเข้มแสงที่เหมาะสมต่อผลผลิตไข่น้ำ

1.1 อุณหภูมิ ความเป็นกรดค่า และค่าการนำไฟฟ้า ผลการศึกษาพบว่า อุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 26.97-28.16 องศาเซลเซียส ความเป็นกรดค่าอยู่ระหว่าง 5.70-7.39 และค่าการนำไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 0.69-0.89 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร

1.2 ลักษณะทางกายภาพของไข่น้ำ ผลการศึกษา พบว่า สิ่งทดลองที่ 1 ความเข้มแสง 4,000 ลักซ์ สิ่งทดลองที่ 2 ความเข้มแสง 8,000 ลักซ์ สิ่งทดลองที่ 3 ความเข้มแสง 12,000 ลักซ์ และสิ่งทดลองที่ 4 ความเข้มแสง 16,000 ลักซ์ ไข่น้ำมีลักษณะปกติ สีเขียวเข้ม ไม่มีสิ่งเจือปน ไข่น้ำเพิ่มปริมาณเต็มพื้นที่ผิวน้ำดังแสดงในภาพที่ 1A, 1B, 1C และ 1D ตามลำดับ ในขณะที่สิ่งทดลองที่ 5 ความเข้มแสง 20,000 ลักซ์ พบตะไคร่น้ำเกิดขึ้นรวมอยู่กับไข่น้ำเล็กน้อย ดังแสดงในภาพ 1E



ภาพที่ 1 ลักษณะทางกายภาพของไข่น้ำภายใต้ความเข้มแสงที่ต่างกันเมื่อสิ้นสุดการทดลอง 30 วัน คือ
 สิ่งทดลองที่ 1 ความเข้มแสง 4,000 ลักซ์ (1A) สิ่งทดลองที่ 2 ความเข้มแสง 8,000 ลักซ์ (1B)
 สิ่งทดลองที่ 3 ความเข้มแสง 12,000 ลักซ์ (1C) สิ่งทดลองที่ 4 ความเข้มแสง 16,000 ลักซ์ (1D)
 สิ่งทดลองที่ 5 ความเข้มแสง 20,000 ลักซ์ (1E)

1.3 ผลผลิตของไข่น้ำ ผลการศึกษา
 โครงสร้างแสงที่มีต่อการผลิต จำแนกผลผลิตของ
 ไข่น้ำออกเป็น 2 ส่วน คือ น้ำหนักไข่น้ำสดที่เพิ่มขึ้น
 เฉลี่ยและน้ำหนักแห้งไข่น้ำ รายละเอียดดังนี้

1.3.1 น้ำหนักไข่น้ำสดเพิ่มขึ้นเฉลี่ย
 ภายใต้ความเข้มแสงต่างกัน 5 ระดับ ผลการศึกษา
 พบว่า สิ่งทดลองที่ 2 ความเข้มแสง 8,000 ลักซ์
 มีน้ำหนักไข่น้ำสดเพิ่มขึ้นเฉลี่ยสูงสุด เท่ากับ
 156.70 ± 12.41 กรัม รองลงมาคือสิ่งทดลองที่ 4 ความ
 เข้มแสง 16,000 ลักซ์ มีน้ำหนักไข่น้ำสดเพิ่มขึ้นเฉลี่ย
 151.76 ± 24.96 กรัม สิ่งทดลองที่ 3 ความเข้มแสง
 12,000 ลักซ์ มีน้ำหนักไข่น้ำสดเพิ่มขึ้นเฉลี่ย
 144.32 ± 19.63 กรัม สิ่งทดลองที่ 5 ความเข้มแสง
 20,000 ลักซ์ น้ำหนักไข่น้ำสดเพิ่มขึ้นเฉลี่ย
 137.08 ± 22.23 กรัม และ สิ่งทดลองที่ 1 ความเข้มแสง
 4,000 ลักซ์ น้ำหนักไข่น้ำสดเพิ่มขึ้นเฉลี่ยต่ำสุด
 เท่ากับ 79.58 ± 7.59 กรัมตามลำดับ เมื่อนำมาวิเคราะห์

ทางสถิติพบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ
 ทางสถิติ ($p < 0.05$) (ตารางที่ 1)

1.3.2 น้ำหนักแห้งของไข่น้ำเมื่อสิ้นสุด
 การทดลองภายใต้ความเข้มแสงต่างกัน 5 ระดับ ผล
 การศึกษาพบว่า สิ่งทดลองที่ 2 ความเข้มแสง 8,000
 ลักซ์ มีน้ำหนักไข่น้ำแห้งเฉลี่ยสูงสุด เท่ากับ
 6.59 ± 0.24 กรัม รองลงมาคือสิ่งทดลองที่ 4 ความเข้ม
 แสง 16,000 ลักซ์ มีน้ำหนักไข่น้ำแห้งเฉลี่ย
 6.37 ± 0.46 กรัม สิ่งทดลองที่ 3 ความเข้มแสง 12,000
 ลักซ์ มีน้ำหนักไข่น้ำแห้งเฉลี่ย 6.11 ± 0.35 กรัม สิ่ง
 ทดลองที่ 5 ความเข้มแสง 20,000 ลักซ์ น้ำหนักไข่น้ำ
 แห้งเฉลี่ย 5.86 ± 0.43 กรัม และ สิ่งทดลองที่ 1 ความ
 เข้มแสง 4,000 ลักซ์ น้ำหนักไข่น้ำแห้งเฉลี่ยต่ำสุด
 เท่ากับ 3.82 ± 0.10 กรัมตามลำดับ เมื่อนำมาวิเคราะห์
 ทางสถิติพบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ
 ทางสถิติ ($p < 0.05$) (ตารางที่ 1) และเมื่อวิเคราะห์
 เปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้งในไข่น้ำ พบว่าทุกสิ่งทดลอง
 มีน้ำหนักแห้งเฉลี่ยระหว่าง 3.49-3.50 เปอร์เซ็นต์

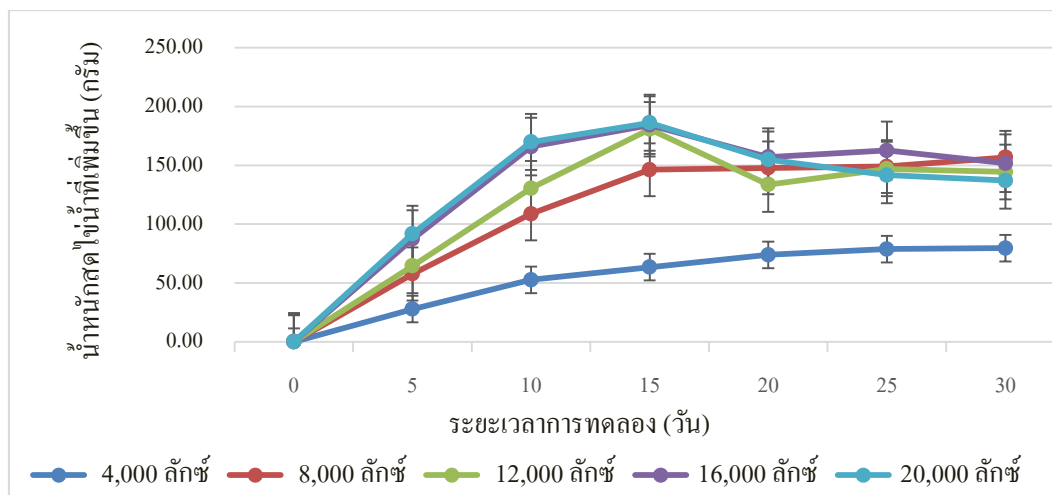
ตารางที่ 1 น้ำหนักสดที่เพิ่มขึ้นและน้ำหนักแห้งของไข่น้ำภายใต้ระดับความเข้มแสงที่ต่างกัน

ระดับความเข้มแสง (ลักซ์)	น้ำหนักสดที่เพิ่มขึ้น (กรัม)	น้ำหนักแห้ง (กรัม)
4,000	79.58±7.59 ^b	3.82±0.10 ^b
8,000	156.70±12.41 ^a	6.59±0.24 ^a
12,000	144.32±19.63 ^a	6.11±0.35 ^a
16,000	151.76±24.96 ^a	6.37±0.46 ^a
20,000	137.08±22.23 ^a	5.86±0.43 ^a

^{ab}: ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

จากผลการวิจัย ความเข้มแสงที่เหมาะสมต่อผลผลิตของไข่น้ำ โดยการศึกษาความเข้มแสงต่างกัน 5 ระดับ ระยะเวลาการศึกษา 30 วัน พบว่าผลผลิตไข่น้ำเพิ่มขึ้นเฉลี่ยสูงสุด ที่ระดับความเข้มแสง 12,000 ลักซ์ ในระยะเวลา 15 วัน ผลผลิตไข่น้ำไม่แตกต่างกับระดับความเข้มแสง 16,000 ลักซ์ และ 20,000 ลักซ์ (ภาพที่ 2) ในการวิจัยขั้นตอนที่ 2 จึงเลือกระดับความเข้มแสง 12,000 ลักซ์ เป็นตัวแปรต้น และระยะเวลาการรับแสงต่างกันตามที่กำหนดไว้ในสิ่งทดลอง ผลผลิตไข่น้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในอัตราที่เพิ่มขึ้นตั้งแต่วันที่ 1-10 ของการทดลอง จากนั้นจะเพิ่มขึ้นในอัตราที่ลดลงจนถึงวันที่ 15 และมีแนวโน้มลดลงในอัตราที่ลดลงจนถึงวันที่ 30 ของการผลิต สอดคล้องกับการวิจัยของ Sukjarone (1999) ที่พบว่าไข่น้ำสามารถเจริญเติบโตได้ในช่วงความเข้มแสงระหว่าง 4,000-15,000 ลักซ์ Chantiratikul *et al.* (2010) ที่พบว่าระดับความเข้มแสงที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของไข่น้ำอยู่ในช่วง 12,000-15,000 ลักซ์ Ruekaewma *et al.* (2015) ที่พบว่าไข่น้ำเจริญเติบโตที่

มีความเข้มแสง 16,000 ลักซ์ โดยไข่น้ำจะแตกหน่อมากขึ้นตามปริมาณความเข้มแสงที่เพิ่มขึ้น และผลผลิตไข่น้ำจะต่ำสุดที่ระดับความเข้มแสง 2,000 ลักซ์ และ Ruekaewma *et al.* (2015) ที่พบว่าไข่น้ำสืบพันธุ์โดยการแตกหน่อในระยะเวลา 4 วัน และมีอายุการเจริญเติบโตเฉลี่ย 15 วัน จากการศึกษาของ Sanwilat (1999) พบว่าความเข้มแสงที่มีระดับต่ำกว่าระดับที่เหมาะสมจะทำให้พืชเจริญเติบโตช้า ในขณะที่ความเข้มแสงที่มีระดับสูงมากเกินไปอาจทำให้เกิดภาวะการยับยั้งกระบวนการสังเคราะห์แสงของพืช ดังนั้นค่าความเข้มแสงที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของไข่น้ำจึงควรมีความเข้มแสงสูงกว่า 5,000 ลักซ์ นอกจากนี้จากลักษณะทางธรรมชาติของไข่น้ำจะขยายพันธุ์และเจริญเติบโตอยู่บริเวณผิวน้ำ เมื่อปริมาณไข่น้ำขยายจนเต็มพื้นที่ผิวน้ำ ส่งผลให้บังแสงซึ่งพืชใช้ในกระบวนการสังเคราะห์แสง อัตราการเพิ่มผลผลิตของไข่น้ำจึงเริ่มลดลง (Panwanitdumrong, 2009)



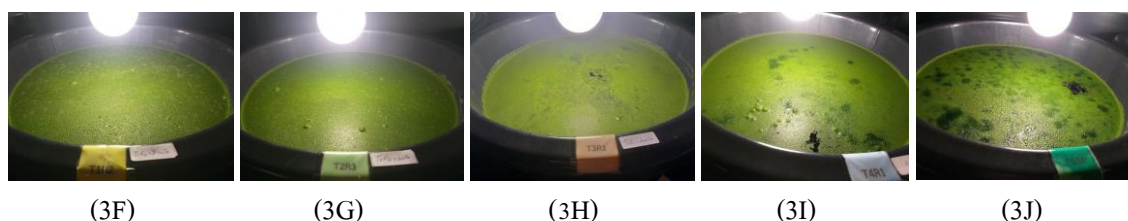
ภาพที่ 2 น้ำหนักไข่น้ำสดที่เพิ่มขึ้นภายใต้ระดับความเข้มแสงที่ต่างกัน

2. ผลการศึกษาระยะเวลาการรับแสงที่เหมาะสมต่อผลผลิตไข่น้ำ

2.1 อุณหภูมิ ความเป็นกรดด่าง และค่าการนำไฟฟ้า ผลการศึกษาพบว่า อุณหภูมิเฉลี่ยอยู่ระหว่าง 25.80-29.20 องศาเซลเซียส ความเป็นกรดด่างอยู่ระหว่าง 5.39-6.86 และค่าการนำไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 0.68-0.77 มิลลิซีเมนตต่อเซนติเมตร

2.2 ลักษณะทางกายภาพของไข่น้ำ ผลการศึกษาลักษณะทางกายภาพของไข่น้ำ พบว่า สิ่งทดลองที่ 1 ระยะเวลาการรับแสง 8 ชั่วโมงต่อวัน สิ่ง

ทดลองที่ 2 ระยะเวลาการรับแสง 10 ชั่วโมงต่อวัน และ สิ่งทดลองที่ 3 ระยะเวลาการรับแสง 12 ชั่วโมงต่อวัน ไข่น้ำมีลักษณะปกติ สีเขียวเข้ม ไม่มีสิ่งเจือปน ไข่น้ำเพิ่มปริมาณเต็มพื้นที่ผิวหน้า ดังแสดงในภาพที่ 3F, 3G และ 3H ตามลำดับ ในขณะที่สิ่งทดลองที่ 4 ระยะเวลาการรับแสง 14 ชั่วโมงต่อวัน และสิ่งทดลองที่ 5 ระยะเวลาการรับแสง 16 ชั่วโมงต่อวัน เริ่มพบตะไคร่น้ำเกิดขึ้นรวมอยู่กับไข่น้ำบริเวณผิวหน้า และเพิ่มขึ้นตามความเข้มแสงที่เพิ่มขึ้น ดังแสดงในภาพที่ 3I และ 3J



ภาพที่ 3 ลักษณะทางกายภาพไข่น้ำภายใต้ระยะเวลาการรับแสงที่ต่างกันเมื่อสิ้นสุดการทดลอง 30 วัน คือ สิ่งทดลองที่ 1 ระยะเวลาการรับแสง 8 ชั่วโมงต่อวัน (3F) สิ่งทดลองที่ 2 ระยะเวลาการรับแสง 10 ชั่วโมงต่อวัน (3G) สิ่งทดลองที่ 3 ระยะเวลาการรับแสง 12 ชั่วโมงต่อวัน (3H) สิ่งทดลองที่ 4 ระยะเวลาการรับแสง 14 ชั่วโมงต่อวัน (3I) และสิ่งทดลองที่ 5 ระยะเวลาการรับแสง 16 ชั่วโมงต่อวัน (3J)

2.3 ผลผลิตไข่น้ำ

2.3.1 น้ำหนักไข่น้ำสดที่เพิ่มขึ้นภายใต้ระดับความเข้มแสง 12,000 ลักซ์ และระยะเวลาการรับแสงต่างกัน 5 ระดับ ผลการศึกษาพบว่า สิ่งทดลองที่ 4 ระยะเวลาการรับแสง 14 ชั่วโมงต่อวัน มีน้ำหนักไข่น้ำสดเพิ่มขึ้นเฉลี่ยสูงสุด เท่ากับ 295.20 ± 17.96 กรัม รองลงมาคือสิ่งทดลองที่ 5 ระยะเวลาการรับแสง 16 ชั่วโมงต่อวัน น้ำหนักไข่น้ำสดเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 222.98 ± 25.70 กรัม สิ่งทดลองที่ 3 ระยะเวลาการรับแสง 12 ชั่วโมงต่อวัน น้ำหนักไข่น้ำสดเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 245.53 ± 7.62 กรัม สิ่งทดลองที่ 2 ระยะเวลาการรับแสง 10 ชั่วโมงต่อวัน น้ำหนักไข่น้ำสดเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 178.04 ± 10.97 กรัม และ สิ่งทดลองที่ 1 ระยะเวลาการรับแสง 8 ชั่วโมงต่อวัน น้ำหนักไข่น้ำสดเพิ่มขึ้นเฉลี่ยต่ำสุดเท่ากับ 118.78 ± 6.94 กรัมตามลำดับ เมื่อนำมาวิเคราะห์ทางสถิติพบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) (ตารางที่ 2)

2.3.2 น้ำหนักแห้งไข่น้ำเมื่อสิ้นสุดการ

ทดลองภายใต้ความเข้มแสงต่างกัน 5 ระดับ ผลการศึกษาพบว่า สิ่งทดลองที่ 4 ระยะเวลาการรับแสง 14 ชั่วโมงต่อวัน มีน้ำหนักไข่น้ำแห้งสูงสุด เท่ากับ 11.44 ± 0.66 กรัม รองลงมาคือสิ่งทดลองที่ 3 ระยะเวลาการรับแสง 12 ชั่วโมงต่อวัน น้ำหนักไข่น้ำแห้งเฉลี่ย 9.67 ± 0.29 กรัม สิ่งทดลองที่ 5 ระยะเวลาการรับแสง 16 ชั่วโมงต่อวัน มีน้ำหนักไข่น้ำแห้งเฉลี่ย 8.91 ± 0.90 กรัม สิ่งทดลองที่ 2 ระยะเวลาการรับแสง 10 ชั่วโมงต่อวัน น้ำหนักไข่น้ำแห้งเฉลี่ย 7.33 ± 0.44 กรัม และ สิ่งทดลองที่ 1 ระยะเวลาการรับแสง 8 ชั่วโมงต่อวัน น้ำหนักไข่น้ำสดแห้งเฉลี่ยต่ำสุดเท่ากับ 5.20 ± 0.25 กรัมตามลำดับ เมื่อนำมาวิเคราะห์ทางสถิติพบว่ามีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญ ($p < 0.05$) (ตารางที่ 2) และเมื่อวิเคราะห์เปอร์เซ็นต์น้ำหนักแห้งของไข่น้ำทุกสิ่งทดลอง พบว่าอยู่ระหว่าง 3.49-3.52 เปอร์เซ็นต์

ตารางที่ 2 น้ำหนักสดที่เพิ่มขึ้นและน้ำหนักแห้งของไข่น้ำภายใต้ระยะเวลาการรับแสงต่างกัน

ระยะเวลาการรับแสง (ชั่วโมงต่อวัน)	น้ำหนักสดที่เพิ่มขึ้น (กรัม)	น้ำหนักแห้ง (กรัม)
8	118.78 ± 6.94^d	5.20 ± 0.25^d
10	178.04 ± 10.97^c	7.33 ± 0.44^c
12	245.53 ± 7.62^b	9.67 ± 0.29^b
14	295.20 ± 17.96^a	11.44 ± 0.66^a
16	222.98 ± 25.70^{bc}	8.91 ± 0.90^{bc}

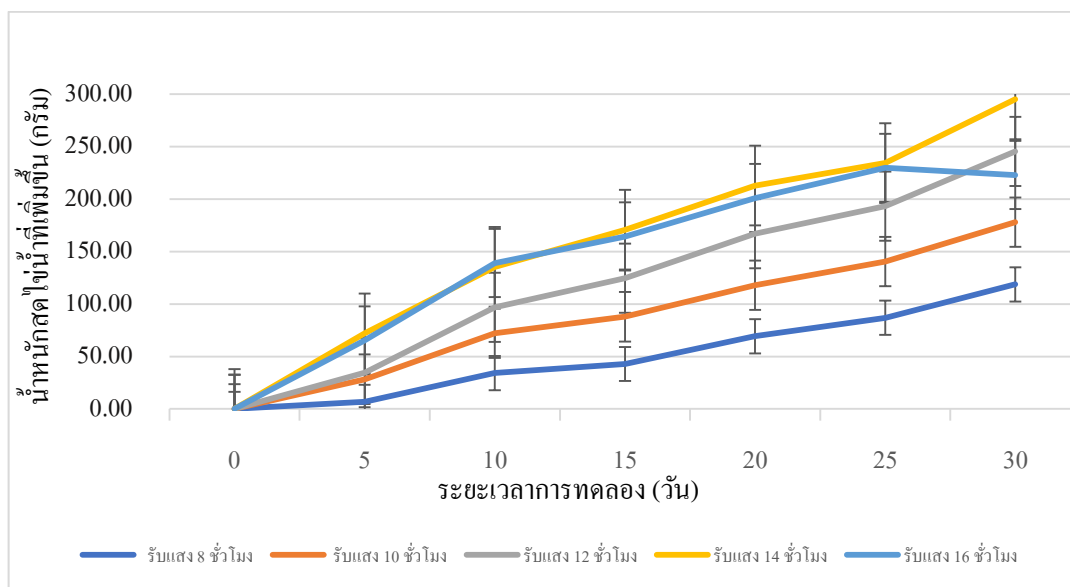
abcd: ค่าเฉลี่ยในคอลัมน์เดียวกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ระยะเวลาการรับแสงที่เหมาะสมต่อผลผลิตของไข่น้ำ จากการศึกษาพบว่า ระยะเวลาการรับแสง 14 ชั่วโมงต่อวัน มีผลทำให้ได้ผลผลิตไข่น้ำเพิ่มขึ้นสูงสุด โดยผลผลิตไข่น้ำมีแนวโน้มเพิ่มขึ้นในอัตราที่เพิ่มขึ้นตั้งแต่วันที่ 1-10 ของการทดลอง จากนั้นจะเพิ่มขึ้นในอัตรารองที่ถึงวันที่ 25 ยกเว้นผลผลิตไข่น้ำที่ใช้ระยะเวลาการรับแสง 16 ชั่วโมงต่อวัน มีแนวโน้ม

ลดลงหลังจากการเลี้ยง 25 วัน (ภาพที่ 4) สอดคล้องกับการวิจัยของ Chatrakul *et al.* (2012) ที่พบว่าไข่น้ำมีอัตราการเจริญเติบโตและผลผลิตเพิ่มสูงในช่วงการ 12-18 วัน จากนั้นมีแนวโน้มให้ผลผลิตลดลง แต่อย่างไรก็ตาม ผลการวิจัยที่พบว่า ความเข้มแสง 12,000 ลักซ์ ระยะเวลาการรับแสง 14 ชั่วโมงต่อวัน ให้ผลผลิตไข่น้ำเพิ่มขึ้นสูงสุดแตกต่างจากการศึกษา

ของ Chatrakul *et al.* (2012) ที่พบว่าความเข้มแสง 8,000 ลักซ์ ระยะเวลาการรับแสง 16 ชั่วโมงต่อวันให้ผลผลิตไข่น้ำเพิ่มขึ้นสูงสุด ทั้งนี้จะเป็นผลสืบเนื่องมาจากระยะเวลาการผลิตไข่น้ำที่มีความแตกต่าง

กันกล่าวคือในการศึกษารั้งนี้ใช้ระยะเวลาในการศึกษา 30 วัน ในขณะที่การวิจัยของ Chatrakul *et al.* (2012) ใช้ระยะเวลา 12-18 วัน



ภาพที่ 4 น้ำหนักไข่น้ำสดที่เพิ่มขึ้นภายใต้ช่วงระยะเวลาการรับแสงที่ต่างกัน

จากผลการวิจัยใน 2 ขั้นตอน พบว่าระยะเวลาการผลิตไข่น้ำที่ให้ผลผลิตไข่น้ำเพิ่มขึ้นสูงสุดในขั้นตอนที่ 1 และขั้นตอนที่ 2 มีความแตกต่างกัน กล่าวคือในขั้นตอนที่ 1 ผลผลิตไข่น้ำเพิ่มขึ้นสูงสุดในวันที่ 15 และลดลงจนถึงวันที่ 30 ในขณะที่ขั้นตอนที่ 2 ผลผลิตไข่น้ำเพิ่มขึ้นตามระยะเวลาการผลิตจนถึงวันที่ 30 ทั้งนี้อาจเนื่องมาจากไข่น้ำสดเริ่มต้นของการวิจัยมีความแตกต่างกัน โดยในขั้นตอนที่ 1 ไข่น้ำที่ใช้ในการศึกษาเป็นไข่น้ำจากธรรมชาติซึ่งได้รับธาตุอาหารพืชไม่ครบถ้วน สังเกตได้จากไข่น้ำมีลักษณะสีซีดในขณะที่ในขั้นตอนที่ 2 ไข่น้ำที่ใช้ในการศึกษาเป็นไข่น้ำที่ได้จากการผลิตด้วยสารละลายธาตุอาหารพืชเป็นระยะเวลา 60 วัน จึงเป็นไข่น้ำที่ได้รับธาตุอาหารที่จำเป็นสำหรับการขยายพันธุ์ ไข่น้ำมีลักษณะสีเขียวเข้ม ส่งผลให้ผลผลิตเพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องเป็นไปตามที่ Osotsapa

(2000) ได้รายงานว่าการที่พืชขาดธาตุอาหารใดธาตุอาหารหนึ่งที่เป็นต่อพืชนั้นจะส่งผลให้พืชไม่สามารถดำรงชีวิตได้จนถึงระยะสืบพันธุ์ หรือส่งผลให้ระยะการเจริญพันธุ์ไม่ครบตามวัฏจักรชีวิตของพืชนั้น

จากการเก็บรวบรวมข้อมูลตัวแปรที่ควบคุมอันได้แก่ อุณหภูมิ ความเป็นกรดด่าง และ ค่าการนำไฟฟ้าของน้ำ พบว่าอุณหภูมิของน้ำอยู่ระหว่าง 25.80-29.20 องศาเซลเซียส สอดคล้องกับการวิจัยของ Ruekaewma *et al.* (2015) กล่าวว่าไข่น้ำจะเจริญเติบโตได้ดีที่อุณหภูมิเฉลี่ย 26.04 องศาเซลเซียส ความเป็นกรดด่างของน้ำอยู่ระหว่าง 5.39-7.39 สอดคล้องกับการวิจัยของ Panwanitdumrong (2009) กล่าวว่าความเป็นกรดด่างของน้ำระหว่าง 5.00-6.00 เป็นระดับที่เหมาะสมต่อผลผลิตของไข่น้ำและค่าความเป็นกรดด่างของน้ำที่สูงเกินไปจะทำให้แพลงก์ตอนพืชในน้ำ

เจริญเติบโตอย่างรวดเร็วแสดงว่าน้ำมีธาตุอาหารพืชมากเกินไป และจะทำให้พืชน้ำเจริญเติบโตอย่างรวดเร็วเมื่อตายลงจะสะสมอยู่บริเวณพื้นบ่อสุดท้ายก็จะลอยขึ้นมาอยู่บริเวณผิวน้ำจะทำให้เน่าเสียและขาดออกซิเจนได้ ค่าการนำไฟฟ้าอยู่ระหว่าง 0.69-0.89 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร สอดคล้องกับการวิจัยของ Damna *et al.* (2017) ที่ได้ศึกษาอิทธิพลของชนิดปุ๋ยและระดับการพรางแสงต่อผลผลิตและคุณภาพของไข่น้ำ โดยใช้ค่าการนำไฟฟ้าระหว่าง 0.5-1.0 มิลลิซีเมนต์ต่อเซนติเมตร แสดงให้เห็นว่าการศึกษารังนี้สามารถควบคุมความสม่ำเสมอในการศึกษาวิจัยให้สอดคล้องกับการศึกษาวิจัยที่ผ่านมาได้

สรุป

การศึกษาโครงสร้างแสงที่เหมาะสมต่อการผลิตไข่น้ำ แบ่งการทดลองออกเป็น 2 ขั้นตอน คือ ขั้นตอนที่ 1 ศึกษาระดับความเข้มแสง และขั้นตอนที่ 2 ศึกษาช่วงระยะเวลาการรับแสงที่เหมาะสมต่อการผลิตไข่น้ำ ผลการศึกษาในขั้นตอนที่ 1 พบว่าความเข้มแสงที่ระดับ 12,000 ลักซ์ ระยะเวลา 15 วัน ผลผลิตไข่น้ำดีที่สุดกล่าวคือมีลักษณะปกติสีเขียวเข้ม ไม่มีสิ่งเจือปน ไข่น้ำเพิ่มปริมาณเต็มพื้นที่ผิวน้ำ ผลผลิตเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 180.70 ± 12.93 กรัม/น้ำหนักแห้ง 6.11 ± 0.35 กรัม ผลการศึกษาในขั้นตอนที่ 2 พบว่าระดับความเข้มแสง 12,000 ลักซ์ ช่วงระยะเวลาการรับแสง 14 ชั่วโมงต่อวัน ผลผลิตไข่น้ำดีที่สุดกล่าวคือมีลักษณะปกติสีเขียวเข้ม ไม่มีสิ่งเจือปน ไข่น้ำเพิ่มปริมาณเต็มพื้นที่ผิวน้ำ ผลผลิตเพิ่มขึ้นเฉลี่ย 295.20 ± 17.96 กรัม น้ำหนักแห้ง 11.44 ± 0.66 กรัม

กิตติกรรมประกาศ

รายงานการวิจัยเรื่อง การศึกษาโครงสร้างแสงที่เหมาะสมต่อการผลิตไข่น้ำ ผู้วิจัย

ขอขอบพระคุณ หลักสูตรเทคโนโลยีสิ่งแวดล้อมเพื่อการเกษตร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี สถาบันเทคโนโลยีปทุมวัน ที่สนับสนุนทุนการวิจัย และเครื่องมือวิจัยบางส่วน ตลอดจนวิทยาลัยเกษตรและเทคโนโลยีสุราษฎร์ธานี ที่สนับสนุนสถานที่สำหรับใช้ในการทำวิจัยเป็นอย่างสูง

เอกสารอ้างอิง

- Boonwittaya, W., Tongcom, N. and Rittilert, P. 2016. Effect of added The Aquatic Macrophyte added Chocolate Chip Muffin Quality. **Research and Development Journal Science and Technology** 11(3): 41-53. (in Thai)
- Chaowanakun, N., Lalun, K and Budbun, C. 2018. The Automatic Control System of pH and Temperature for Hydroponic Vegetables via Android. **Journal of Project in Computer Science and Information Technology** 4(1): 67-72. (in Thai)
- Chatrakul, A., Uttama-ang, S., Deepanya, W. and Phanrattanachai, K. 2012. **Research Report on Technology of production and utility of Water meal [*Wolffia arrhiza* (L.) Wimm.] in commerce.** Technology and Industrial Technology, Phetchabun Rajabhat University. (in Thai)
- Chantiratikul, A., Chantiratikul, P., Sangdee, A., Maneechote, U., Bunchasak, C. and Chinrasri, O. 2010. Performance and carcass characteristics of Japanese quails fed diets containing Water meal [*Wolffia globosa* (L.) Wimm.] as a protein replacement for

- soybean meal. **International Journal of Poultry Science** 9: 562-566.
- Damna, N., Saikaew, W. and Tira-umphon, A. 2017. Effect of Fertilizer Type and Light Filter Level to Yield and Quality of Wolffia [*Wolffia arrhiza* (L.) Wimm.]. **Songklanakarin Journal of Plant Science** 4(3): 60-64. (in Thai)
- Deepanya, W. 2012. **Research Report on Development of Products Water meal [*Wolffia arrhiza* (L.) Wimm.] leather.** Food Science and Technology, Phetchabun Rajabhat University. (in Thai)
- Jutasong, C. 1999. Growth and Protein of Duckweed [*Wolffia arrhiza* (L.) Wimm.] Cultivated in Sewage Water from Cassava Flour Factory. Master of Science Thesis, M.S., Mahasarakham University. (in Thai)
- Khunjet, S. 2017. **Research Report on Production of Durian Seedling cv. Monthlong with Reducing *Phytophthora palmivora* Infections by Controlling Temperature and Relative Humidity in Nursery using Fuzzy Control Systems.** Faculty of Science & Arts, Burapha University. (in Thai)
- Niyanuch, U. and Tangwongchai, R. 2010. Effect of temperature and storage time on the composition changes of *Wolffia arrhiza* (Linn) Wimm. **Agricultural Science Journal** 41(1)(Suppl.): 247-250. (in Thai)
- Osotsapa, Y. 2000. **Plant nutrients.** Kasetsart University Press, Bangkok. (in Thai)
- Panwanitdumrong, K. 2009. Studies on Factors Effecting Growth of Wolffia [*Wolffia arrhiza* (L.) Wimm.] and Methodology for Mass Production Culture. Master of Science Thesis, M.S., Kasetsart University. (in Thai)
- Rowchai, S. and Somboon, S. 2007. Study on factors effecting growth of wolffia [*Wolffia arrhiza* (L.) Wimm.]. **Thai Fisheries Gazette** 60(5): 405-413. (in Thai)
- Ruekaewma, N. 2011. Optimal conditions for production of Khai-nam *Wolffia globosa*. Ph.D. Thesis (Program in Biotechnology), Faculty of Science, Chulalongkorn University. (in Thai)
- Ruekaewma, N., Piyatiratitivorakul, S. and Powtongsook, S. 2015. Culture system for *Wolffia globosa* L. (Lemnaceae) for hygiene human food. **Songklanakarin Journal of Science and Technology** 37(5): 575-580.
- Sangkrasae, W., Klinkaset, T. and Mathulapransan, S. 2015. Environment Control System for lettuce Plant in NFT Hydroponic System. Bachelor of Engineering (Computer Engineering), Kasetsart University. (in Thai)
- Sanwilat, S. 1999. Growth and protein content of Water meal [*Wolffia arrhiza* (Linn.) Wimm.] cultured with different diet formulas and light intensity levels in outdoor conditions. Master Thesis, M.S. (Program in Biology), Mahasarakham University. (in Thai)
- Sricharoen, S., Chareontesprasit, N., Jiwyam, W., Pangphairee, P. and Choocheep, R. 2001. Culture of Wolffia (*Wolffia arrhiza*) for reduction of fish feed cost. **KKU Research Journal** 6(2): 6-15. (in Thai)

- Sukjarone, A. 1999. Effects of Culture Media and Light Intensity on the Growth and Protein Content of Duckweeds (*Wolffia arrhiza* (Linn.) in an Outdoor Condition. Master Thesis, M.S. (Program in Biology), Mahasarakham University. (in Thai)
- Tira-umphon, A. and Nitwatthanakull, N. 2018. The Suitable Harvested Date and Storage Temperature of *Wolffia arrhiza* (L.) Wimm. **Agricultural Science Journal** 49(4 Suppl.): 87-90. (in Thai)

อิทธิพลของการแทนที่ซีเมนต์ด้วยเถ้าขยะเทศบาลต่อสมบัติของคอนกรีตสด และกำลังอัดของคอนกรีตไหลอัดแน่นด้วยตัวเอง

Influence of Municipal Solid Waste Ash as a Replacement of Cement on Fresh Properties and Compressive Strength of Self-Compacting Concrete

นันทชัย ชูศิลป์* และ จุฑามาศ ลักษณกิจ

Nuntachai Chusilp* and Chuthamat Laksanakit

Received: 3 March 2020, Revised: 12 September 2020, Accepted: 4 November 2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้เป็นการศึกษาความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตไหลอัดแน่นด้วยตัวเองผสมเถ้าขยะเทศบาลนครหาดใหญ่ ในสภาวะคอนกรีตสด ประกอบด้วย ความสามารถในการไหล ความต้านทานการแยกตัว และความสามารถในการไหลผ่านสิ่งกีดขวาง โดยชุดทดสอบ Slump flow V-Funnel และ L-Box ตามลำดับ และในสภาวะแข็งตัวแล้วโดยการทดสอบกำลังอัด วัสดุประสานใช้เถ้าขยะเทศบาลแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1 ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนักของวัสดุเชื่อมประสาน ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน 0.40 ส่วนผสมคอนกรีตใช้น้ำยากันซึมและน้ำยาซูเปอร์พลาสติกไฮเซอร์เป็นสารผสมเพิ่ม แบ่งการทดสอบออกเป็น 2 แบบ คือ แบบผสมและไม่ผสมน้ำยาซูเปอร์พลาสติกไฮเซอร์ จากผลการทดสอบพบว่ารูปแบบความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตสดและกำลังรับแรงอัดของทั้ง 2 แบบแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) โดยค่า Slump flow ลดลงต่ำสุดที่การแทนที่ร้อยละ 10 เมื่อมีการแทนที่เพิ่มขึ้นคอนกรีตสดใช้เวลาไหลผ่าน V-funnel เพิ่มขึ้น เนื่องจากมีความหนืดสูงขึ้นจึงส่งผลให้ค่าอัตราส่วน L-Box ลดลง นอกจากนี้พบว่า ที่อายุบ่ม 28 วัน การแทนที่ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ด้วยเถ้าขยะเทศบาลในส่วนผสมของคอนกรีตอัตราร้อยละ 15 ส่งผลให้กำลังอัดของคอนกรีตมีค่าสูงขึ้น ใกล้เคียงกับอัตราส่วนของคอนกรีตควบคุม

คำสำคัญ: คอนกรีตไหลอัดแน่นด้วยตัวเอง, เถ้าขยะเทศบาลนครหาดใหญ่, คอนกรีตสด, กำลังอัด

สาขาวิศวกรรมโยธา คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย เลขที่ 2/4 ถนนราชดำเนินนอก ตำบลบ่อหย่าง อำเภอเมือง จังหวัดสงขลา 90000

Department of Civil Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Srivijaya, 2/4 Ratchadamnoen-nok Road, Boyang, Muang, Songkhla 90000, Thailand.

* ผู้รับผิดชอบประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): nuntachai.c@rmutsv.ac.th

ABSTRACT

The research aims to study workability of self-compacting concrete (SCC) integrating with Hat Yai Municipal's solid waste ash as a replacement of cement., segregate resistance and passing ability were tested by using slump flow, V-funnel and L-box methods, respectively. The compressive strength of the hardened concrete was presented. The municipal solid waste ash was used as a binder replacing the Portland cement type 1 at varying weight percentages of 0%, 5%, 10% and 15%, and the binder ratio at 0.40. The waterproof and superplasticizer were also used as concrete admixture. According to concrete admixture, two designs of experiment were done- admixture with superplasticizer and without superplasticizer. The results show that there is no significant difference ($p>0.05$) between workability patterns of the two types. The 10% replacement of cement gives the lowest slump. The higher percentage of waste ash as a replacement increase, the flow time of V-funnel increases. This higher viscosity, as a result, decreases the L-box ratio. Moreover, it was found that at curing age of 28 days, the replacement of cement with municipal waste ash mixed with 15 percent of concrete can result in a higher compressive strength which is roughly the same as the control mixture.

Key words: self-compacting concrete, municipal solid waste ash, fresh concrete, compressive strength

บทนำ

คอนกรีตเป็นวัสดุที่มีความสำคัญต่ออุตสาหกรรมก่อสร้างซึ่งเป็นภาคส่วนที่มีมูลค่าและอิทธิพลสูงต่อเศรษฐกิจของประเทศไทย การลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ซึ่งเป็นส่วนผสมหลักของคอนกรีตถือเป็นการลดต้นทุนและลดปัญหาสิ่งแวดล้อมได้อีกทางหนึ่ง ที่ผ่านมามีการนำวัสดุประเภทเถ้าจากธรรมชาติ เถ้าลอย และเถ้าขยะซึ่งเป็นผลพลอยได้จากอุตสาหกรรมและเกษตรกรรมมาแทนที่ปูนซีเมนต์ อย่างไรก็ตาม การใช้เถ้าจากแหล่งต่างๆ ซึ่งมีองค์ประกอบทางเคมีและลักษณะอนุภาคแตกต่างกันส่งผลต่อสมบัติเชิงกลและความคงทนของคอนกรีต การนำเถ้ากลับซึ่งมีซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2) เป็นองค์ประกอบหลักส่งผลต่อการเกิดปฏิกิริยาไฮเดรชันของคอนกรีตในสถานะสดและทำให้เกิดปฏิกิริยาปอซโซลานที่ต่อเนื่องอย่างช้าๆ ในระยะเวลาดำเนินการ และส่งผลต่อสมบัติเชิงกล

ของคอนกรีตในสถานะแข็งตัว (Sua-Iam and Makul, 2013; Sua-Iam and Makul, 2012; Zerbino *et al.*, 2011) การศึกษาการใช้เถ้าลอยเป็นวัสดุยึดประสานในคอนกรีตของ (Chindapasert *et al.*, 2008) พบว่าเถ้าลอยช่วยปรับปรุงให้สมบัติเชิงกลและความทนทานดีขึ้น (Kroehong *et al.*, 2016) พบว่าการใช้เถ้าลอยแทนที่ปูนซีเมนต์ช่วยให้คอนกรีตมีค่าการนำความร้อนลดลง นอกจากเถ้าจากธรรมชาติและเถ้าลอยแล้ว มีการนำเถ้าขยะซึ่งเป็นผลพลอยได้จากเตาเผาขยะของชุมชนซึ่งมีปริมาณมากขึ้นอย่างต่อเนื่องทุกปีมาใช้ประโยชน์ในการก่อสร้างการศึกษาของ (Puangmanee, 2004; Tradtarntip, 2005; Ngarmkham, 2016; Chusilp *et al.*, 2017) พบว่ามอร์ตาร์และคอนกรีตที่ผสมเถ้าขยะสูงกว่าร้อยละ 20 ทำให้กำลังอัดลดลง ในขณะที่คอนกรีตผสมเถ้าขยะในปริมาณน้อยกว่าร้อยละ 10 มีกำลังรับแรงอัดที่สูงกว่าคอนกรีตควบคุม นอกจากนี้ยังมี

รายงานวิจัยที่นำเถ้าลอยขยะมาผสมกับซีเมนต์และดินลูกรังเพื่อผลิตบล็อกประสานสามารถรับแรงอัดได้ตามเกณฑ์บล็อกรับน้ำหนักของ มอก. ซึ่งพบว่า ค่าการแพร่ความร้อนมีค่าต่ำลง (Lerskittikulyotin, 2017) สอดคล้องกับการศึกษาของ (Garcia-Lodeiro *et al.*, 2016) ที่พบว่า การนำเถ้าหนักจากขยะเทศบาลมาเป็นส่วนผสมของปูนซีเมนต์ไฮบริดช่วยให้การพัฒนากำลังอัดที่อายุ 28 วัน อยู่ในระดับดี (สูงกว่า 32.5 MPa)

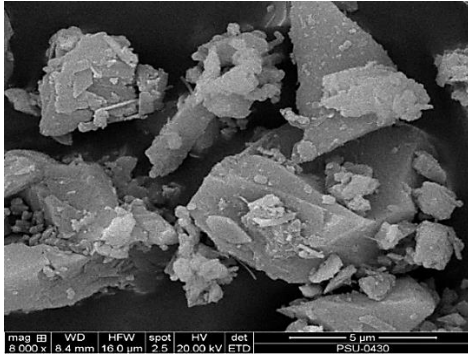
นอกจากนี้ในการก่อสร้างยังมีข้อจำกัดหลายด้าน เช่น กำลังแรงงานที่หายาก ระยะเวลาในการทำงาน ความสามารถของแรงงานในการทำงาน คอนกรีตผ่านโครงสร้างที่ซับซ้อน และงบประมาณ จึงได้มีการพัฒนาคอนกรีตไหลอัดแน่นตัวเอง (Self-Compacting Concrete, SCC) ซึ่งเป็นนวัตกรรมหนึ่งของคอนกรีตเทคโนโลยีซึ่งเริ่มเป็นที่นิยมและยอมรับในอุตสาหกรรมก่อสร้าง (Okamura *et al.*, 1993; Okamura and Ouchi, 2003; Maekawa and Noguchi, 2008; Attchayawuth *et al.*, 2015) เพื่อมาแก้ปัญหาที่กล่าวมาในข้างต้น คอนกรีตไหลอัดแน่นด้วยตัวเองมีคุณสมบัติในการไหลแผ่เข้าแบบได้สูงกว่าคอนกรีตทั่วไป ไม่ต้องจี้เขย่าและไม่เกิดการแยกตัวของส่วนผสม สมบัติของคอนกรีตสดจึงเป็นเกณฑ์สำคัญที่ชี้วัดความสามารถในการทำงานได้ (Workability) ของคอนกรีตไหลอัดแน่นด้วยตัวเอง ดังนั้นผู้วิจัยจึงใช้เถ้าขยะเทศบาลแทนที่ซีเมนต์ในบางส่วน เพื่อลดปริมาณการใช้ปูนซีเมนต์ในส่วนผสมของคอนกรีต

เป็นการนำผลพลอยได้จากการจัดการขยะที่มีเพิ่มมากขึ้นทุกปีมาใช้ประโยชน์และลดการเกิดผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมและเพิ่มประสิทธิภาพการใช้ทรัพยากรธรรมชาติในกระบวนการผลิตปูนซีเมนต์ โดยศึกษาอัตราส่วนการแทนที่ปูนซีเมนต์ด้วยเถ้าขยะที่มีผลต่อสมรรถนะความสามารถในการทำงานได้ของคอนกรีตสดและกำลังอัดของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

วิธีดำเนินการวิจัย

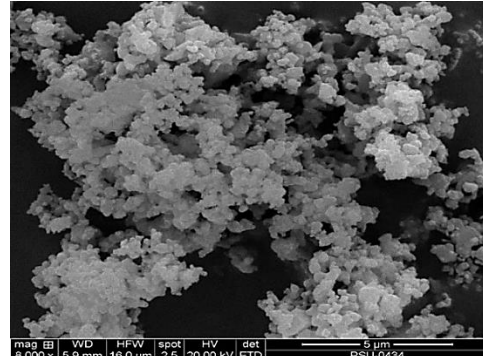
1. วัสดุที่ใช้ในการวิจัย

วัสดุที่ใช้ในงานวิจัยนี้ประกอบด้วย วัสดุเชื่อมประสาน คือ ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าขยะจากเตาเผาขยะเทศบาลนครหาดใหญ่ อำเภหาดใหญ่ จังหวัดสงขลา เมื่อถ่ายภาพที่ กำลังขยายขนาด 8,000 เท่า พบว่า ลักษณะฐานของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีลักษณะรูปร่างเป็นก้อนหลายเหลี่ยมที่มีผิวขรุขระ มีขนาดเล็กใหญ่ปะปนกัน ส่วนเถ้าขยะมีลักษณะฐานเป็นทรงกลม ดังภาพที่ 1 และ 2 ตามลำดับ วัสดุมวลรวม นำทรายแม่น้ำมาใช้เป็นมวลรวมละเอียด นำหินมาใช้เป็นมวลรวมหยาบ ส่วนน้ำที่ใช้ผสมคอนกรีตเป็นน้ำประปา และใช้สารเคมีผสมเพิ่มในการปรับปรุงสมบัติของคอนกรีตได้แก่ น้ำยากันซึมและน้ำยาซูเปอร์พลาสติกไซเซอร์



ภาพที่ 1 ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์

กำลังขยายขนาด 8,000 เท่า



ภาพที่ 2 เถ้าขี้เถ้าเทศบาล

กำลังขยายขนาด 8,000 เท่า

2. อัตราส่วนผสมของคอนกรีต

การออกแบบส่วนผสมคอนกรีตไหลอัดแน่นด้วยตัวเอง (SCC) หรือ “คอนกรีต SCC” จะใช้เถ้าขี้เถ้าเป็นส่วนผสมแทนที่ปูนซีเมนต์ ในอัตราส่วนร้อยละ 0, 5, 10 และ 15 โดยน้ำหนักของวัสดุเชื่อมประสาน ใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุเชื่อมประสาน (W/B) คงที่เท่ากับ 0.40 และใช้น้ำยากันซึมเพื่อช่วยให้มีความสามารถในการทำงานและช่วยลดอัตราการ

ซึมผ่านของน้ำในปริมาณ 1,000 ลูกบาศก์เซนติเมตรต่อปูนซีเมนต์ 100 กิโลกรัม โดยแบ่งเป็น 2 แบบ คือแบบที่ผสมน้ำยาซูเปอร์พลาสติกไฮเซอร (SP) และแบบที่ไม่ผสมน้ำยาซูเปอร์พลาสติกไฮเซอร (NSP) อย่างละ 4 อัตราส่วนผสม รวมทั้งสิ้น 8 อัตราส่วนผสม ดังตารางที่ 1 แต่ละอัตราส่วนผสมบ่มที่อายุ 7, 14 และ 28 วัน ก่อนนำไปทดสอบสมบัติของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

ตารางที่ 1 อัตราส่วนผสมของคอนกรีต SCC ผสมเถ้าขี้เถ้าเทศบาล

อัตราส่วนผสม	วัสดุประสาน		มวลรวม		W/B	น้ำ	น้ำยากันซึม	น้ำยาซูเปอร์พลาสติกไฮเซอร์	
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าขยะเทศบาล	ทราย	หิน					
(กก/ม ³)	% (กก/ม ³)	(กก/ม ³)	(กก/ม ³)	(กก/ม ³)	(กก/ม ³)	(กก/ม ³)			
SCC1-W0-NSP*	660	0	0	977	561	0.40	257	6.58	0.00
SCC1-W0-SP**	660	0	0	977	561	0.40	257	6.58	0.07
SCC1-W5-NSP	627	5	22.34	977	561	0.40	257	6.58	0.00
SCC1-W5-SP	627	5	22.34	977	561	0.40	257	6.58	0.07
SCC1-W10-NSP	594	10	44.68	977	561	0.40	257	6.58	0.00
SCC1-W10-SP	594	10	44.68	977	561	0.40	257	6.58	0.07
SCC1-W15-NSP	561	15	67.02	977	561	0.40	257	6.58	0.00
SCC1-W15-SP	561	15	67.02	977	561	0.40	257	6.58	0.07

หมายเหตุ : * อัตราส่วนควบคุมของแบบที่ผสมน้ำยาซูเปอร์พลาสติกไฮเซอร (SP)

** อัตราส่วนควบคุมของแบบที่ไม่ผสมน้ำยาซูเปอร์พลาสติกไฮเซอร (NSP)

3. อุปกรณ์และวิธีทดลอง

3.1 ทดสอบสมบัติทางเคมีของวัสดุประสาน และสมบัติทางกายภาพของส่วนผสมคอนกรีต

3.1.1 วิเคราะห์หองค์ประกอบทางเคมีของส่วนผสมคอนกรีต โดยการวิเคราะห์หาสารประกอบในของแข็งที่เป็นผลึกของวัสดุด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction (XRD) รุ่น Empyrean ยี่ห้อ PANalytical และวิเคราะห์หองค์ประกอบธาตุของวัสดุด้วยเครื่อง X-Ray Fluorescence spectrometry (XRF) รุ่น Zetium ยี่ห้อ PANalytical

3.1.2 ทดสอบหาความละเอียดของวัสดุประสานจากค่าพื้นที่ผิวจำเพาะ (Specific surface area) ด้วยเครื่องทดสอบ Blaine air permeability test ตามมาตรฐาน American Society for Testing Materials (ASTM) C204 (ASTM, 2005)

3.1.3 ทดสอบการกระจายตัวของอนุภาคของวัสดุประสาน ด้วยเครื่องมือวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคแขวนลอยโดยใช้เลเซอร์ (Laser particle size analyzer, LPSA) รุ่น ANALYSETTE 22 NanoTec ยี่ห้อ FRITSCH

3.1.4 ความถ่วงจำเพาะของวัสดุประสานตามมาตรฐาน ASTM C188 (ASTM, 2001c) โดยขจัดมาตรฐานเลขอาเตอร์ลิเยร์

3.1.5 ขนาดละเอียดของมวลรวม คือวิธีการวิเคราะห์ขนาดของอนุภาคของแข็งหรือโมดูลัสความละเอียด (Fineness modulus) ตามมาตรฐาน ASTM C33-01 (ASTM, 2001a)

3.2. ทดสอบสมบัติของคอนกรีตสด

3.2.1 การไหลแผ่ (Slump flow) ASTM C1611 (ASTM, 2011) ดังภาพที่ 3 (ก) วัดเส้นผ่านศูนย์กลางของคอนกรีตหลังจากเกิดการเสียรูปใน 2 ทิศทาง เพื่อหาค่าเฉลี่ย เหน้การเปรียบเทียบที่ยอมรับได้มีค่าอยู่ระหว่าง 480 ถึง 680 มิลลิเมตร

3.2.2 การทดสอบความต้านทานการแยกตัวหรือความหนืดด้วยเครื่องทดสอบรูปตัววี (V-funnel flow test) ตามมาตรฐาน European Federation of National Associations Representing producers and applicators of specialist building products for Concrete (EFNARC) (EFNARC, 2002) ภาพที่ 3 (ข) โดยเทคอนกรีตลงในเครื่องทดสอบแล้วปล่อยทิ้งไว้ 5 นาที จากนั้นจึงทำการเปิดช่องด้านล่างเพื่อปล่อยคอนกรีตให้ไหลออกและจับเวลาจนกว่าคอนกรีตจะไหลออกหมด วัดระยะเวลาที่ใช้ตั้งแต่เริ่มปล่อยคอนกรีตจนกระทั่งเห็นแสงลอดผ่านจุดปล่อยเมื่อมองจากด้านบนในหน่วยวินาที โดยผลที่ได้คือครรชนชี้วัดความสามารถต้านทานการแยกตัวหรือความหนืด ซึ่งคอนกรีต SCC ที่มีคุณลักษณะดีจะใช้ระยะเวลาไหลผ่าน V-funnel ประมาณ 6-12 วินาที

3.2.3 การทดสอบความสามารถในการไหลผ่านสิ่งกีดขวางในแนวดิ่งด้วยชุดทดสอบ L-box ตามมาตรฐาน EFNARC (EFNARC, 2002) กำหนดให้อัตราส่วนของระยะ H2/H1 ควรมีค่าอยู่ระหว่าง 0.8 - 1.0 ดังภาพที่ 3 (ค)

3.3 ทดสอบสมบัติเชิงกลของคอนกรีตที่แข็งตัวแล้ว

การทดสอบกำลังอัด (Compressive strength test) ของคอนกรีต SCC ผสมเถ้าขี้เถ้าเทศบาลที่อายุ 7 14 และ 28 วัน ตามมาตรฐาน ASTM C39 (ASTM, 2001b) ทำการทดสอบแท่งคอนกรีตขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 10 เซนติเมตร สูง 20 เซนติเมตร จนตัวอย่างเกิดการวิบัติ แล้วจึงนำค่าแรงอัดประลัย (P)หารด้วยพื้นที่หน้าตัดของตัวอย่าง (A) เพื่อคำนวณหาค่ากำลังอัด (f'_c) ตามสมการที่ 1

$$f'_c = \frac{P}{A} \quad (1)$$



ภาพที่ 3 การทดสอบคอนกรีตสด (ก) การทดสอบการไหลแผ่ (Slump flow)

(ข) การทดสอบความต้านทานการแยกตัวด้วยเครื่องมือทดสอบรูปตัววี (V-funnel flow test)

(ค) การทดสอบความสามารถในการไหลผ่านสิ่งกีดขวางในแนวดิ่งด้วยเครื่องทดสอบ L-box

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. สมบัติทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของส่วนผสมคอนกรีต SCC

ผลการทดสอบสมบัติทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของวัสดุประสาน (ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าขยะเทศบาล) ดังตารางที่ 2 และ 3 พบว่าองค์ประกอบหลักทางเคมีของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 คือ แคลเซียมออกไซด์ (CaO) ร้อยละ 62.39 รองลงมาคือซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO₂) ร้อยละ 20.95 และอะลูมิเนียมออกไซด์ (Al₂O₃) ร้อยละ 4.24 มีค่าความถ่วงจำเพาะ 3.15 ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (d₅₀) 18.8 ไมโครเมตร (ดูภาพที่ 4) และพื้นที่ผิวจำเพาะ 3,681 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ขณะที่เถ้าขยะเทศบาลมีโพแทสเซียมออกไซด์ (K₂O) ร้อยละ 28.26 โซเดียมออกไซด์ (Na₂O) ร้อยละ 14.69 และซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO₃) ร้อยละ 13.86 เป็นองค์ประกอบหลัก มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.14 ขนาดอนุภาคเฉลี่ย (d₅₀) 18.9 ไมโครเมตร (ดูภาพที่ 4) และพื้นที่ผิวจำเพาะ 5,272 ตารางเซนติเมตรต่อกรัม ซึ่งสูงกว่าค่าของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 แสดงว่าอนุภาคของเถ้าขยะเทศบาลมีความละเอียดกว่า

สำหรับมวลรวมละเอียด (ทราย) มีค่าความถ่วงจำเพาะ 2.67 อัตราการดูดซึมน้ำร้อยละ 1.80 ความชื้นร้อยละ 1.02 โมดูลัสความละเอียด 2.72 และขนาดผละของอนุภาคอยู่ระหว่าง 0.15 - 9.5 มิลลิเมตร (ดูภาพที่ 5) มวลรวมหยาบ (หิน) มีค่าความถ่วงจำเพาะ เท่ากับ 2.76 มีอัตราการดูดซึมน้ำร้อยละ 0.7 ความชื้นร้อยละ 1.01 และค่าโมดูลัสความละเอียด 7.42 มีขนาดระหว่าง 4.75 - 25.4 มิลลิเมตร ดังตารางที่ 3 และภาพที่ 5

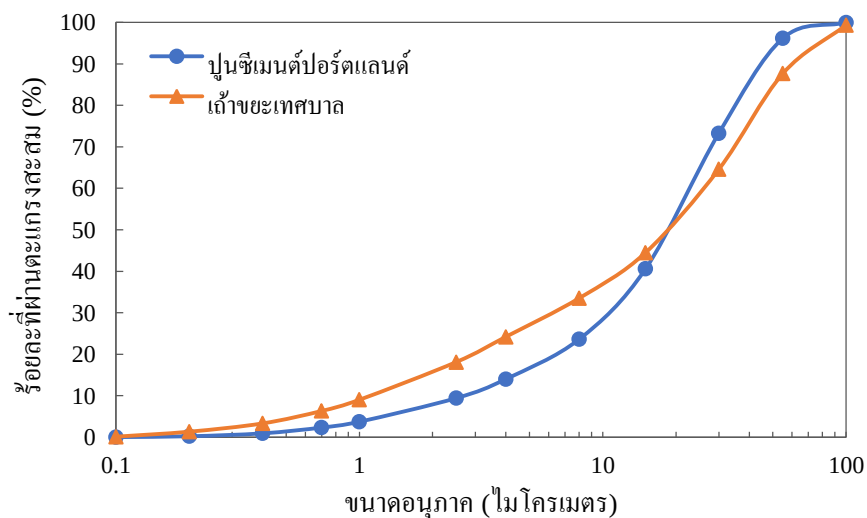
ผลการทดสอบเพื่อวิเคราะห์สมบัติเชิงโครงสร้างของวัสดุด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction (XRD) แสดงดังภาพที่ 6 พบว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 มีองค์ประกอบธาตุสอดคล้องกับงานวิจัยของ (Nguyen *et al.*, 2016) โดยมี C₃S (Alite) และ C₂S (Belite) ปริมาณสูงในช่วงมุมกวาด 32 - 35 องศา ส่วนเถ้าขยะเทศบาลที่ใช้ในงานวิจัยก็ให้ผลที่สอดคล้องกับงานวิจัยของ (Wu *et al.*, 2012) โดยพบว่ามีโซเดียมออกไซด์และโพแทสเซียมออกไซด์ในปริมาณที่สูงในช่วงมุมกวาด 28 - 32 องศา เช่นเดียวกัน

ตารางที่ 2 สมบัติทางเคมีของวัสดุประสาน

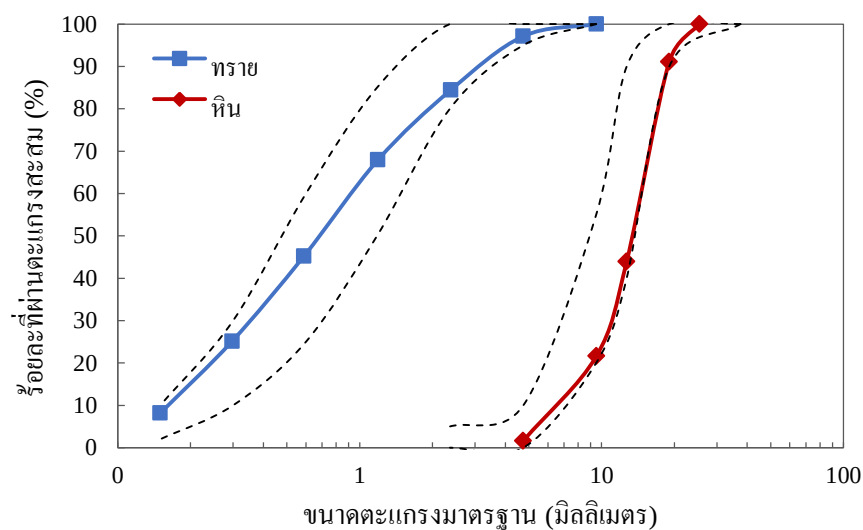
องค์ประกอบทางเคมี (ร้อยละโดยมวล)	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าขี้เถ้าเทศบาล
ซิลิกอนไดออกไซด์ (SiO_2)	20.95	0.79
อะลูมิเนียมออกไซด์ (Al_2O_3)	4.24	0.23
เฟอร์ริกออกไซด์ (Fe_2O_3)	2.92	0.31
แคลเซียมออกไซด์ (CaO)	62.39	3.62
แมกนีเซียมออกไซด์ (MgO)	2.24	0.33
โซเดียมออกไซด์ (Na_2O)	-	14.69
โพแทสเซียมออกไซด์ (K_2O)	0.86	28.26
ซัลเฟอร์ไตรออกไซด์ (SO_3)	4.43	13.86

ตารางที่ 3 สมบัติทางกายภาพของส่วนผสมคอนกรีต

สมบัติทางกายภาพ	วัสดุประสาน			
	ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1	เถ้าขี้เถ้าเทศบาล	ละเอียด (ทราย)	หยาบ (หิน)
ความถ่วงจำเพาะ	3.15	2.14	2.67	2.76
ร้อยละการดูดซึมน้ำ (%)	-	-	1.8	0.7
ร้อยละความชื้น (%)	-	-	1.02	1.01
ขนาดอนุภาคเฉลี่ย, d_{50} (มิลลิเมตร)	18.8×10^{-3}	18.8×10^{-3}	0.6	12.7
พื้นที่ผิวจำเพาะ (ตารางเซนติเมตร/กรัม)	3,681	5,272	-	-
โมดูลัสความละเอียด	-	-	2.72	7.42



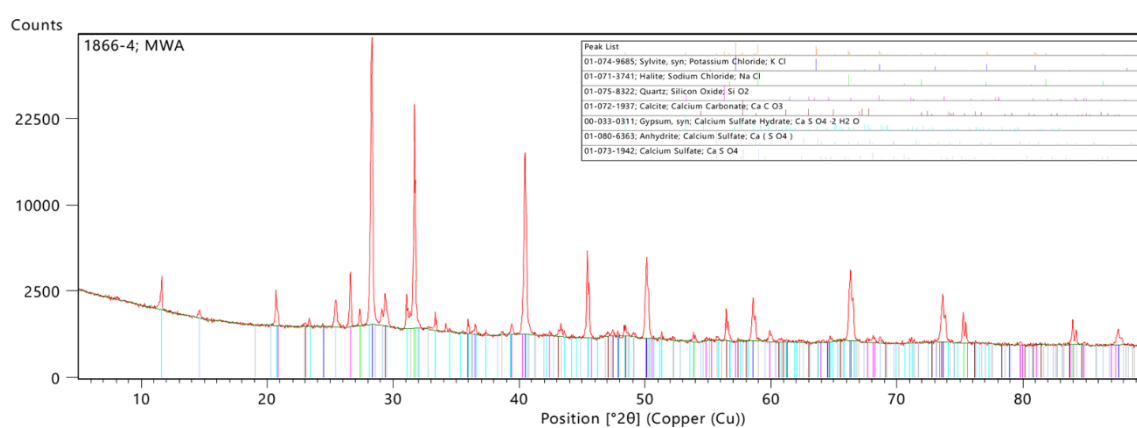
ภาพที่ 4 การกระจายตัวของอนุภาคของปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 และเถ้าขี้เถ้าเทศบาล



ภาพที่ 5 การกระจายขนาดคละของมวลรวม

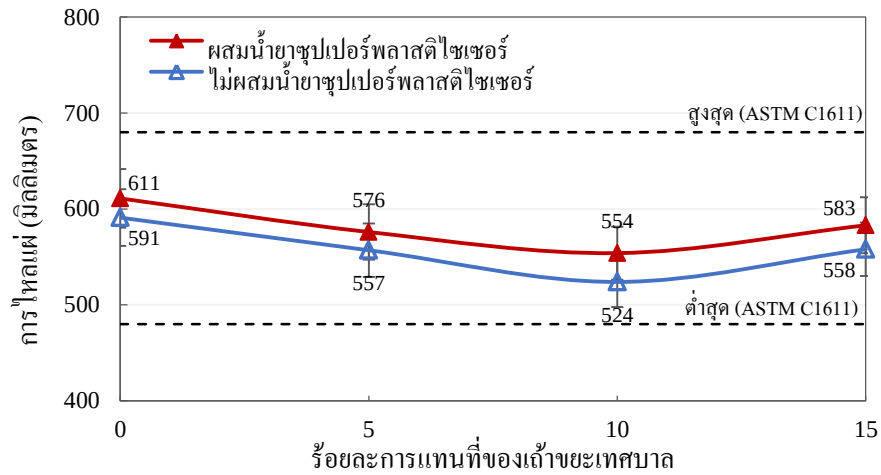


(ก) ปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ ประเภทที่ 1

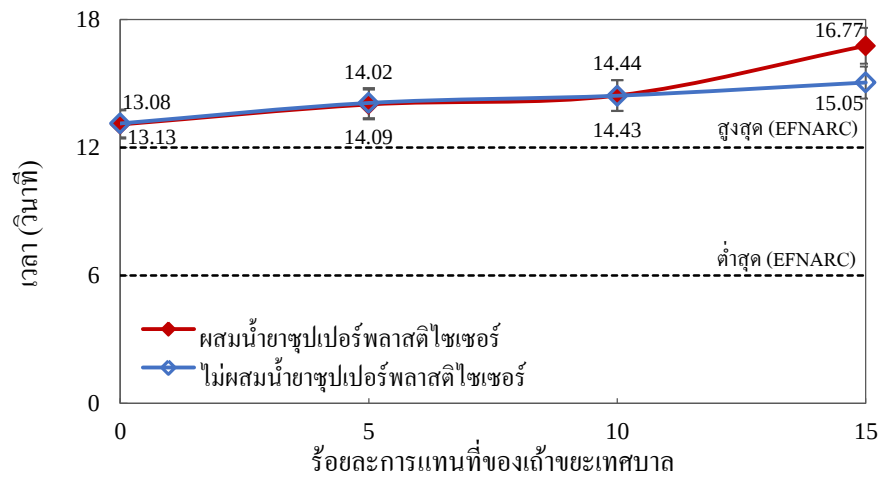


(ข) เถ้าขี้เถ้าเทศบาล

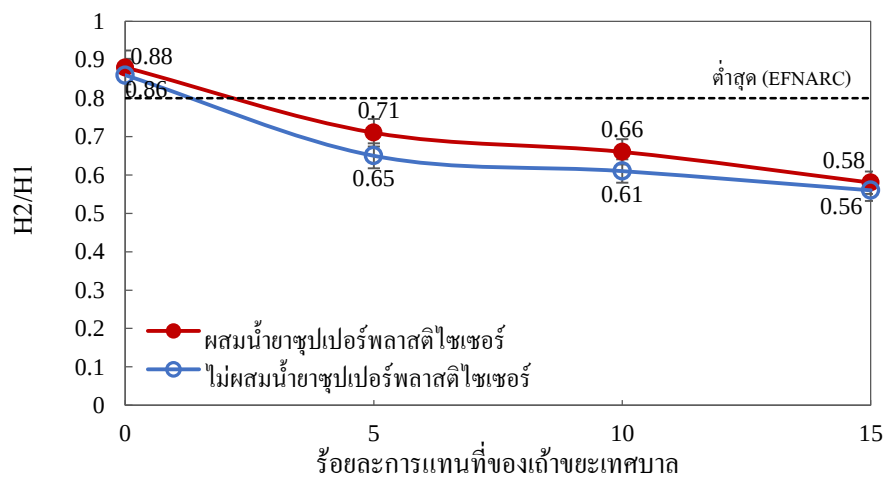
ภาพที่ 6 สารประกอบในของแข็งที่เป็นผลึกของวัสดุที่ใช้ในงานวิจัย ด้วยเครื่อง X-Ray Diffraction (XRD)



ภาพที่ 7 การไหลแผ่ Slump flow ของคอนกรีตสดผสมเถ้าขี้เเทสบาล



ภาพที่ 8 ความต้านทานการแยกตัว V-funnel ของคอนกรีตสดผสมเถ้าขี้เเทสบาล



ภาพที่ 9 การไหลผ่านสิ่งกีดขวางในแนวนอนของคอนกรีตสดผสมเถ้าขี้เเทสบาล

2. ผลการทดสอบคอนกรีตสด SCC ผสมเถ้าขยะเทศบาล

2.1 การไหลแผ่ (Slump flow test)

จากภาพที่ 7 พบว่าคอนกรีตสด SCC ผสมเถ้าขยะเทศบาลแบบที่ผสมน้ำยาซูเปอร์พลาสติกไฮเซอรามีค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วง 554-611 มิลลิเมตร และแบบไม่ผสมน้ำยาซูเปอร์พลาสติกไฮเซอรามีค่าการไหลแผ่อยู่ในช่วง 524-591 มิลลิเมตร จัดอยู่ในเกณฑ์ที่ยอมรับได้ตามมาตรฐาน ASTM C1611 (ASTM, 2011) โดยการไหลแผ่ของคอนกรีตสด SCC ทั้ง 2 แบบ มีค่าลดลงเมื่อร้อยละการแทนที่เถ้าขยะเพิ่มขึ้น เนื่องจากเถ้าขยะเทศบาลมีพื้นที่ผิวจำเพาะสูงกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 จึงส่งผลให้ความต้องการน้ำในส่วนผสมเพิ่มขึ้นและมีผลต่อเนื่องให้ระยะการไหลแผ่ลดลง ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Chindaprasirt and Jaturapitakkul (2009) โดยมีค่าต่ำสุดที่การแทนที่ร้อยละ 10 ซึ่งต่ำกว่าค่าการไหลแผ่ของอัตราส่วนควบคุม (SCC1-W0-SP และ SCC1-W0-NSP) คิดเป็นประมาณร้อยละ 6 และ 11 ตามลำดับ การไหลแผ่ของคอนกรีตสด SCC แบบผสมและไม่ผสมน้ำยาซูเปอร์พลาสติกไฮเซอร และร้อยละการแทนที่ของเถ้าขยะเทศบาลแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$)

2.2 ความต้านทานการแยกตัว (V-funnel flow test)

จากภาพที่ 8 พบว่าคอนกรีตสด SCC ผสมเถ้าขยะเทศบาลใช้เวลาในการไหลอยู่ในช่วง 13.08-16.77 วินาที ซึ่งนานกว่าเวลาตามมาตรฐาน ENFARC (ENFARC, 2002) เห็นได้ชัดว่าการใช้อัตราส่วนน้ำต่อวัสดุประสานที่ต่ำ ($W/B = 0.40$) ส่งผลให้คอนกรีตสด SCC ใช้เวลาในการไหลนานขึ้น นั่นหมายความว่ามีความหนืดเพิ่มขึ้นส่งผลให้คอนกรีตสด SCC มีแนวโน้มที่จะเกิดการแยกตัวในขณะเทเข้าแบบ นอกจากนี้การใช้อัตราส่วนน้ำต่อ

วัสดุประสานต่ำ ประกอบกับเถ้าขยะมีขนาดอนุภาคละเอียดกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 เถ้าขยะเทศบาลจึงต้องการน้ำในการหล่อลื่นอนุภาคสูงกว่าปูนซีเมนต์ อย่างไรก็ตามความต้านทานการแยกตัวของคอนกรีตสด SCC แบบผสมและไม่ผสมน้ำยาซูเปอร์พลาสติกไฮเซอรมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) แต่ร้อยละการแทนที่ของเถ้าขยะเทศบาลส่งผลต่อความแตกต่างของความต้านทานการแยกตัวอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

2.3 การไหลผ่านสิ่งกีดขวางในแนวนอน (L-box)

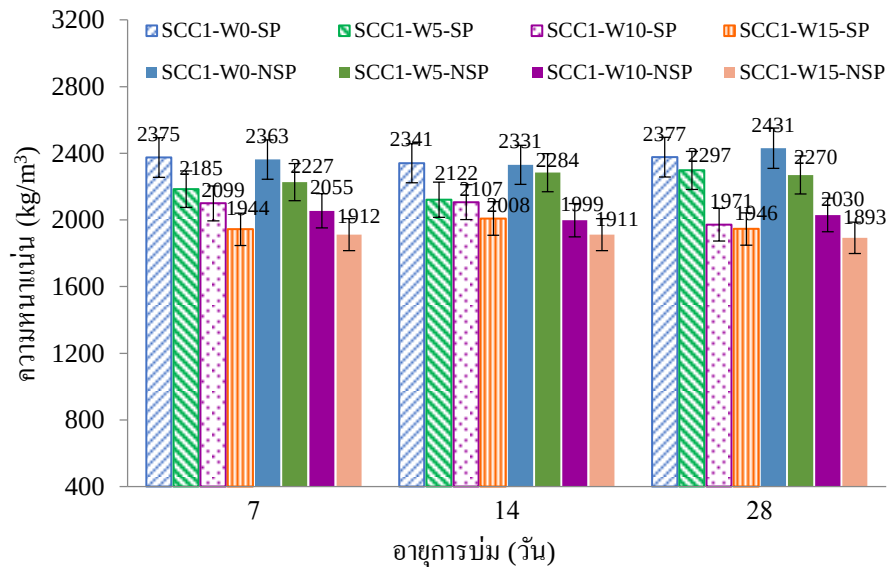
จากภาพที่ 9 พบว่าคอนกรีตสด SCC แบบที่ผสมและไม่ผสมน้ำยาซูเปอร์พลาสติกไฮเซอรมีความสามารถในการไหลผ่านสิ่งกีดขวางในแนวนอน (H_2/H_1) อยู่ในช่วง 0.56-0.88 ซึ่งต่ำกว่าเกณฑ์ของ ENFARC (ENFARC, 2002) ยกเว้นอัตราส่วนผสมควบคุม SCC1-W0-SP และ SCC1-W0-NSP และมีแนวโน้มลดลงตามการเพิ่มขึ้นของการแทนที่เถ้าขยะเทศบาล การลดลงของสัดส่วน H_2/H_1 แสดงว่าอัตราส่วนผสมค่อนข้างหนืดและมีแนวโน้มจะไหลเข้าแบบได้ไม่ดี การไหลผ่านสิ่งกีดขวางในแนวนอนของคอนกรีตสด SCC แบบผสมและไม่ผสมน้ำยาซูเปอร์พลาสติกไฮเซอรมีความแตกต่างกันอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) แต่การแทนที่ของเถ้าขยะเทศบาลส่งผลต่อความแตกต่างของการไหลผ่านสิ่งกีดขวางในแนวนอนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) เช่นเดียวกับคุณสมบัติความต้านทานการแยกตัว

3. ผลการทดสอบความหนาแน่นของคอนกรีต SCC ผสมเถ้าขยะเทศบาลที่แข็งตัวแล้ว

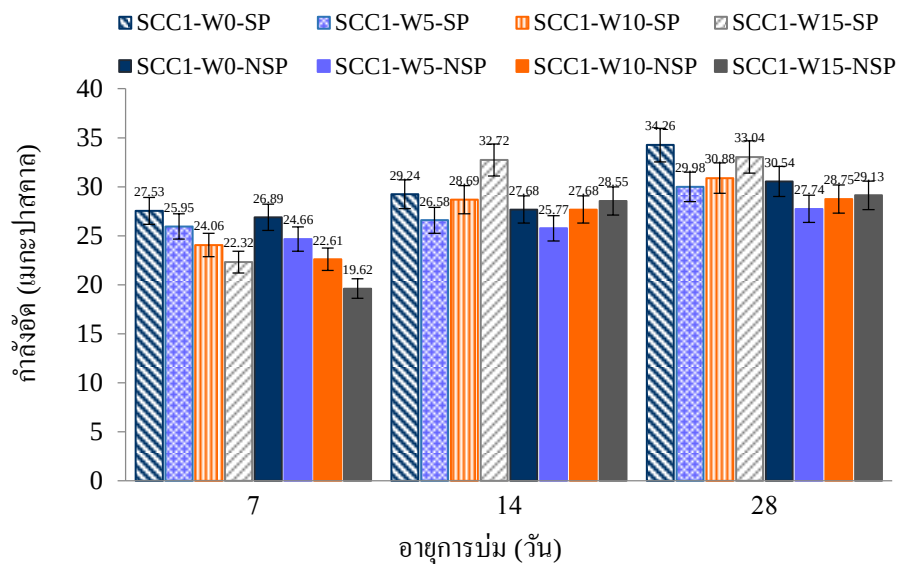
ความหนาแน่นของคอนกรีต SCC ผสมเถ้าขยะ แสดงดังภาพที่ 10 พบว่าความหนาแน่นของคอนกรีต SCC มีค่าลดลงเมื่อร้อยละการแทนที่ด้วย

เถาขยายมีปริมาณเพิ่มขึ้น ทั้งนี้เนื่องจากเถาขยายมีค่าความถ่วงจำเพาะที่น้อยกว่าปูนซีเมนต์ เมื่อนำมาใช้ทดแทนปูนซีเมนต์ในส่วนผสมของคอนกรีตจึงส่งผลให้ค่าความหนาแน่นของคอนกรีต SCC ลดน้อยลง

นอกจากนี้ยังพบว่าการใช้กับไม่ใช้น้ำยาซูเปอร์พลาสติกไฮเซอรและระยะเวลาการบ่มคอนกรีตที่ 7 14 และ 28 วัน ไม่ส่งผลกระทบต่อค่าการเปลี่ยนแปลงความหนาแน่นของคอนกรีตอย่างมีนัยสำคัญ



ภาพที่ 10 ความหนาแน่นของคอนกรีต SCC ผสมเถาขยายเทศบาลที่อายุการบ่มต่างๆ



ภาพที่ 11 กำลังต้านทานแรงอัดของคอนกรีตที่อายุการบ่ม 7 14 และ 28 วัน

4. ผลการทดสอบกำลังอัดของคอนกรีต SCC ผสมเถ้าขยะเทศบาลที่แข็งตัวแล้ว

จากภาพที่ 11 พบว่าที่ระยะเวลาการบ่ม 7 วัน คอนกรีต SCC แบบผสมและไม่ผสมน้ำยาชุบเปอร์ฟลาสติไซเซอร์มีกำลังอัดลดลงตามการเพิ่มขึ้นของร้อยละการแทนที่ของเถ้าขยะเทศบาล เมื่อพิจารณาที่อายุการบ่ม 14 วัน คอนกรีต SCC ทั้ง 2 แบบมีรูปแบบการพัฒนากำลังอัดเพิ่มขึ้นแบบแปรผันตรง กล่าวคือที่ร้อยละการแทนที่มากกำลังอัดพัฒนาได้มาก เนื่องจากเถ้าขยะเทศบาลมีลักษณะอนุภาคเป็นทรงกลมขนาดเล็กมากทำให้สามารถแทรกตามช่องว่างของมวลรวมได้ดี โดยเถ้าขยะจะทำหน้าที่วัสดุเติมแทรก (Filler material) ประกอบกับหลังจากอายุการบ่ม 7 วัน ปฏิกิริยาไฮเดรชันมีการพัฒนาอย่างต่อเนื่องส่งผลให้เกิดการยึดเกาะระหว่างอนุภาคของส่วนผสมคอนกรีตมีความแข็งแรงมากขึ้น และส่งผลดีต่อการพัฒนากำลังอัดในช่วงระยะเวลาดังกล่าว โดยอัตราส่วนผสมคอนกรีตแบบผสมน้ำยาชุบเปอร์ฟลาสติไซเซอร์ที่การแทนที่ร้อยละ 5, 10 และ 15 มีการพัฒนา กำลังอัดเพิ่มเป็น 26.58 เมกะปาสคาล 28.69 เมกะปาสคาล 32.72 เมกะปาสคาล ตามลำดับ ส่วนที่อายุการบ่ม 28 วัน การพัฒนากำลังอัดของคอนกรีต SCC เพิ่มขึ้นอย่างต่อเนื่องแบบค่อยเป็นค่อยไป โดยอัตราส่วนผสมที่การแทนที่ร้อยละ 15 มีกำลังอัดสูงสุด 33.04 เมกะปาสคาล ต่ำกว่ากำลังอัดของอัตราส่วนควบคุมประมาณร้อยละ 4 สำหรับอัตราส่วนผสมแบบไม่ผสมน้ำยาชุบเปอร์ฟลาสติไซเซอร์มีรูปแบบการพัฒนา กำลังอัดคล้ายคลึงกันแต่โดยภาพรวมมีกำลังอัดต่ำกว่าแบบผสมน้ำยาชุบเปอร์ฟลาสติไซเซอร์ แตกต่างกับผลการศึกษาของ (Puangmanee, 2004) ที่พบว่ากำลังอัดของก้อนคอนกรีตผสมเถ้าขยะจากเตาเผาขยะมูลฝอยชุมชนของจังหวัดภูเก็ตมีค่าลดลงเมื่อการแทนที่เถ้าขยะสูงขึ้น (Chusilp et al., 2017) ที่สรุปไว้ว่าเถ้าขยะเทศบาลเมื่อนำมาแทนที่ปูนซีเมนต์

ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 สูงกว่าร้อยละ 10 ทำให้กำลังอัดของคอนกรีตลดลง และการค้นพบของ (Sua-iam and Makul, 2013) ที่พบว่าคอนกรีตชนิดอัดตัวได้ที่เหมาะสมเถ้าแกลบไม่บดเมื่อปริมาณเถ้าแกลบสูงขึ้น (เกินกว่าร้อยละ 20) กำลังอัดและหน่วยน้ำหนักมีแนวโน้มลดลง ทั้งนี้อาจเป็นเพราะการวิจัยนี้ใช้ปูนซีเมนต์ในปริมาณสูงกว่าการศึกษาที่ผ่านมา เนื่องจากต้องการมุ่งศึกษาความเป็นไปได้ในการใช้งานเป็นคอนกรีตไหลอัดแน่นด้วยตัวเอง

สรุป

1. ผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีและสมบัติทางกายภาพของส่วนผสมคอนกรีต

ค่าความละเอียดของเถ้าขยะ ซึ่งเป็นเถ้าจากกระบวนการเผาขยะ มีลักษณะอนุภาครูปรางกลม และมีค่าความละเอียดมากกว่าปูนซีเมนต์ปอร์ตแลนด์ประเภทที่ 1 ซึ่งเป็นผลดีในการนำมาผสมกับปูนซีเมนต์ เพราะเถ้าขยะจะเข้าไปแทนที่ช่องว่างระหว่างอนุภาคของปูนซีเมนต์ ทำให้คอนกรีตที่มีส่วนผสมปูนซีเมนต์กับเถ้าขยะมีช่องว่างในคอนกรีตลดลง ถึงแม้ว่าเถ้าขยะเทศบาลจะมีค่าสารประกอบออกไซด์หลัก คือ โพแทสเซียมออกไซด์ ซัลเฟอร์ไดรอกไซด์ และโซเดียมออกไซด์ ก่อนข้างสูง ซึ่งปริมาณสารประกอบออกไซด์ โพแทสเซียมออกไซด์ และโซเดียมออกไซด์ (K_2O+Na_2O) หรือเรียกว่าปริมาณอัลคาไล มีปริมาณร้อยละรวมกันสูงเกือบร้อยละ 50 โดยน้ำหนัก การใช้ปูนซีเมนต์ปริมาณสูงกว่า 560 กก/ม³ ในส่วนผสมคอนกรีต SCC พบว่าสารอัลคาไลดังกล่าวในเถ้าขยะเทศบาลยังไม่ส่งผลกระทบต่อสมบัติทางกายภาพของคอนกรีตในช่วงอายุของการทดสอบแต่อย่างใด

2. ผลการวิเคราะห์สมบัติของคอนกรีตสด SCC

เมื่อเปรียบเทียบความสามารถการไหลคอนกรีตสด SCC ที่ไม่ผสมเถ้าขยะเทศบาล

(อัตราส่วนคอนกรีตควบคุม) และ ที่ผสมเถ้าขยะเทศบาล แบบผสมและไม่ผสมน้ำยาซูปเปอร์พลาสติกไฮเซอร် พบว่าอัตราส่วนคอนกรีตควบคุมมีความสามารถในการไหลที่ดีกว่า อัตราส่วนผสมของเถ้าขยะในทุกอัตราส่วน และความสามารถในการไหลจะลดลงตามการเพิ่มขึ้นของปริมาณเถ้าขยะ เนื่องจากเถ้าขยะมีค่าความละเอียดของพื้นผิวสูงกว่าปูนซีเมนต์ จึงทำให้เถ้าขยะมีความต้องการดูดซึมน้ำสูง และการผสมน้ำยาซูปเปอร์พลาสติกไฮเซอร်มีอิทธิพลต่อความสามารถในการไหลเพียงเล็กน้อย

3. ผลการวิเคราะห์กำลังอัดของคอนกรีต SCC ที่แข็งตัวแล้ว

ผลกำลังอัดของอัตราส่วนคอนกรีตควบคุมมีกำลังอัดมากกว่าอัตราส่วนที่ผสมเถ้าขยะในทุกอัตราส่วน และคอนกรีตแบบผสมน้ำยาซูปเปอร์พลาสติกไฮเซอร်มีผลกำลังอัดมากกว่าแบบที่ไม่ผสมน้ำยาซูปเปอร์พลาสติกไฮเซอร် แต่เมื่อเปรียบเทียบในกรณีที่ผสมเถ้าขยะในแต่ละอัตราส่วน พบว่า ที่ระยะเวลาการบ่มที่ 28 วัน กำลังอัดมีการพัฒนาขึ้นตามการเพิ่มขึ้นของเถ้าขยะเทศบาล เนื่องจากเถ้าขยะเทศบาลมีขนาดอนุภาคเล็กกว่าปูนซีเมนต์ ช่องว่างในคอนกรีต SCC จึงถูกแทนที่ด้วยเถ้าขยะเทศบาล การทำหน้าที่เป็นวัสดุเติมแทรกของเถ้าขยะเทศบาลจึงส่งผลถึงการรับกำลังอัด ในคอนกรีต SCC ที่ผสมเถ้าขยะในปริมาณร้อยละ 15 มีความหนาแน่นต่ำกว่าอัตราส่วนคอนกรีตควบคุมประมาณร้อยละ 25 ในขณะที่มีกำลังอัดต่ำกว่าอัตราส่วนคอนกรีตควบคุมเพียงเล็กน้อย (โดยเฉลี่ยร้อยละ 5)

กิตติกรรมประกาศ

ผู้วิจัยขอขอบคุณมหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัยที่สนับสนุนงบประมาณในการวิจัยนี้จากงบประมาณเงินรายได้ ประจำปีงบประมาณ พ.ศ. 2562

เอกสารอ้างอิง

- ASTM. 2001a. ASTM C33. Standard Specification for Concrete Aggregates. ASTM International, Philadelphia.
- ASTM. 2001b. ASTM C39. Standard Method for Compressive Strength of Cylindrical Concrete Specimens. ASTM International, Philadelphia.
- ASTM. 2001c. ASTM C188. Standard Method for Density of Hydraulic Cement. ASTM International, Philadelphia.
- ASTM. 2005. ASTM C204. Standard Method for Fineness of Portland Cement by Air Permeability Apparatus. ASTM International, Philadelphia.
- ASTM. 2011. ASTM C1611. Standard Test Method for Slump Flow of Self-Consolidating Concrete. ASTM International, Philadelphia.
- Attachaiyawuth, A., Tanaka, K., Rath, S. and Ouchi, M. 2015. Air-enhanced self-compactability of fresh concrete with effective mixing method, pp. 1069-1074. *In Proceedings of the Japan Concrete Institute*. Japan Concrete Institute, Chiba.
- Chindaprasirt, P., Rukzon, S. and Sirivivatnanon, V. 2008. Resistance to chloride penetration of blended Portland cement mortar containing palm oil fuel ash, rice husk ash and fly ash. *Construction and Building Materials* 22(5): 932-938.
- Chindaprasirt, P. and Jaturapitakkul, C. 2009. *Cement, Pozzolan and Concrete*. 2nd ed. Thai Concrete Association, Bangkok. (in Thai)

- Chusilp, N., Ngarmkham, S. and Anusiri, M. 2017. Effects of municipal waste ash on the durability and mechanical properties of concrete, pp. 91-96. *In Proceeding of The 22nd National Convention on Civil Engineering.* Suranaree University of Technology, Nakhon Ratchasima. (in Thai)
- EFNARC. 2002. **Specification and Guidelines for Self-Compacting Concrete.** EFNARC, Surrey.
- Garcia-Lodeiro, I., Carcelen-Taboada, V., Fernández-Jiménez, A. and Palomo, A. 2016. Manufacture of hybrid cements with fly ash and bottom ash from a municipal solid waste incinerator. **Construction and Building Materials** 105: 218-226.
- Kroehong, W., Sangpaen, S., Sitkanarak, P. and Wilairat, J. 2016. Mechanical properties, microstructure and thermal conductivity of concrete block containing fly ash. **KMUTT Research and Development Journal** 39(3): 407-425. (in Thai)
- Lerskittikulyotin, P. 2017. The development of interlocking block with fly ash from solid waste to reduce the environmental impact. Master Thesis (Civil Engineering), Silpakorn University. (in Thai)
- Maekawa, K. and Noguchi, T. 2008. Self-compacting concrete in Japan, pp. 72-91. *In International Symposium on Utilization of High-Strength and High-Performance Concrete.* Japan Concrete Institute, Japan
- Prestressed Concrete Engineering Association, and International Federation for Structural Concrete, Tokyo.
- Ngarmkham, S. 2016. Effects of municipal waste ash on the durability and mechanical properties of concrete. Master Thesis (Civil Engineering), Rajamangala University of Technology Srivijaya. (in Thai)
- Nguyen, H.A., Chang, T.P. and Dung, N.T. 2016. Sulfate Resistance of Low Energy SFC No-cement Mortar. **Construction and Building Materials** 102: 239-243.
- Okamura, H. and Ouchi, M. 2003. Self-Compacting Concrete. **Journal of Advanced Concrete Technology (ACT)** 1(1): 5-15.
- Okamura, H., Maekawa, K. and Ozawa, K. 1993. **High Performance Concrete.** Gihodo Publishing, Japan Society of Civil Engineers, Japan.
- Puangmanee, S. 2004. Feasibility study of using fly ash from Phuket municipal solid waste incinerator to produce hollow non-load-bearing concrete masonry units. Master Thesis (Civil Engineering), Prince of Songkla University. (in Thai)
- Sua-Iam, G. and Makul, N. 2012. The use of residual rice husk ash from thermal power plant as cement replacement material in producing self-compacting concrete. **Advanced Materials Research** 415-417(2012): 1490-1495.
- Sua-Iam, G. and Makul, N. 2013. Properties of self-compacting concrete incorporating high volume unground rice husk ash. **Research and Development Journal** 24(4): 20-27. (in Thai)

- Tradtarntip, S. 2005. Utilization of municipal solid waste incinerator fly ash as a partial aggregate replacement in cement mortars. Master Thesis (Civil Engineering), Chulalongkorn University. (in Thai)
- Wu, K., Schutter, G.D., Guo, X. and Ye, G. 2012. Experimental study on alinite ecocement clinker preparation from municipal solid waste incineration fly ash. **Materials and Structures** 45: 1145-1153.
- Zerbino, R., Giaccio, G. and Isaia, G.C. 2011. Concrete incorporating rice-husk ash without processing. **Construction and Building Materials** 25(1): 371-378.

การพัฒนาระบบติดตามการกักเก็บคาร์บอนรายเดือนในภาคการเกษตร แบบใกล้เคียงเวลาจริง

Development of a Monthly Near-Real-Time Carbon Monitoring System for Agriculture Areas

รัชดา คำจริง¹ และ ศักดิ์ดา หอมหวาน^{2*}

Ratchada Kamching¹ and Sakda Homhuan^{2*}

Received: 9 March 2020, Revised: 24 September 2020, Accepted: 9 October 2020

บทคัดย่อ

การพัฒนาระบบติดตามการกักเก็บคาร์บอนรายเดือนในภาคการเกษตรแบบใกล้เคียงเวลาจริง มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปริมาณของผลผลิตปฐมภูมิสุทธิในพื้นที่การเกษตรและพัฒนาระบบคำนวณปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือผิวดินในพื้นที่การเกษตรแบบใกล้เคียงเวลาจริงด้วยวิธีการวิเคราะห์ผลผลิตปฐมภูมิสุทธิจากข้อมูลของดาวเทียม TERRA/AQUA MODIS รายวันในปี 2560 รายละเอียดเชิงพื้นที่ 250 เมตร ในช่วงคลื่นสีแดงและอินฟราเรดใกล้ โดยใช้ข้อมูลจำนวน 8 วัน รวมทั้งสิ้น 44 ช่วงเวลา เพื่อการหาค่าเฉลี่ยรายสัปดาห์และนำเสนอในรูปแบบข้อมูลรายเดือน จากนั้นนำมาวิเคราะห์ปฐมภูมิสุทธิด้วยแบบจำลอง 3PGS ผลการศึกษาพบว่าผลผลิตปฐมภูมิสุทธิของพื้นที่เกษตรกรรมมีค่าเฉลี่ย $4.59 \text{ gC/m}^2/\text{day}$ โดยมีผลรวมเท่ากับ $800,113.4 \text{ tonC/day}$ ซึ่งผลผลิตปฐมภูมิสุทธิจากแบบจำลองมีความสัมพันธ์กับข้อมูลที่สำรวจจากภาคสนามอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 โดยมีค่าสัมประสิทธิ์การตัดสินใจเท่ากับ 0.72 และพบว่าพื้นที่สวนผลไม้มีค่าเฉลี่ยผลผลิตปฐมภูมิสุทธิต่อพื้นที่มากที่สุดคือ $5.36 \text{ gC/m}^2/\text{day}$ พื้นที่นาข้าวและพืชไร่มีผลผลิตปฐมภูมิสุทธิคิดเป็น 86% ของผลผลิตปฐมภูมิสุทธิทั้งหมดที่ผลิตได้ การศึกษานี้ นำแบบจำลองมาพัฒนาเป็นระบบคำนวณปฐมภูมิสุทธิและการกักเก็บคาร์บอนร่วมกับ Python package ชื่อ PyModis ซึ่งเครื่องมือที่ใช้สำหรับดาวโหลดข้อมูลอัตโนมัติ

¹ สาขาเทคโนโลยีสำรวจและภูมิสารสนเทศ คณะเทคโนโลยีอุตสาหกรรม มหาวิทยาลัยราชภัฏอุดรดิตถ์ 27 ถนนอินใจมี ตำบลท่าอิฐ อำเภอเมือง จังหวัดอุดรดิตถ์ 53000

¹ Department of Survey Technology and Geo-Informatics, Faculty of Industrial Technology, Uttaradit Rajabhat University, 27 Injaime Road, Thait, Mueang, Uttaradit 53000, Thailand.

² ภาควิชาภูมิศาสตร์ คณะสังคมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่ เลขที่ 239 ถนนห้วยแก้ว ตำบลสุเทพ อำเภอเมืองเชียงใหม่ จังหวัดเชียงใหม่ 50200

² Department of Geography, Faculty of Social Sciences, Chiang Mai University, 239 Huai Kaew Road, Suthep, Mueang Chiang Mai, Chiang Mai 50200, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): sakda.homhuan@cmu.ac.th

ที่พัฒนาด้วยภาษา Python การศึกษาครั้งนี้ทำให้ได้ระบบดาวโหลดข้อมูลอัตโนมัติรายวันที่สามารถคำนวณผลผลิตปฐมภูมิสุทธิและปริมาณการกักเก็บคาร์บอนได้อัตโนมัติแบบใกล้เคียงเวลาจริง โดยข้อมูลจากระบบถูกผลิตเป็นบริการข้อมูลให้กับผู้ใช้แบบ Web map service ต่อไป

คำสำคัญ: ระบบติดตามอัตราการผลิตขั้นปฐมภูมิสุทธิ, การกักเก็บคาร์บอน, ระบบใกล้เคียงเวลาจริง

ABSTRACT

The development of a near real-time agricultural monitoring system for monthly carbon sequestration in agriculture aimed to study the amount of net primary production in agricultural areas and to develop a system for above ground carbon sequestration calculating in farming area at near real-time net primary yield analysis. Daily TERRA/AQUA MODIS satellite data in 2017 with 250 m spatial resolution in the red and near-infrared wavelengths within 8 days about 44 periods were used for weekly averages net primary production calculation which were represented in monthly data format. The 3PGS model was used for analyzing a net primary production. The average and the total amount of net primary production in farmland were 4.59 gC/m²/day and 800,113.4 tonC/day, respectively. The result from the model was statistically correlated with the field survey data with $R^2 = 0.72$ at 95% confidence interval. The orchard area was the highest average net primary production which was 5.36 gC/m²/day of the total net primary production. The net primary production in rice fields and other crops was about 86% of the total net primary in the area. Python package called PyModis as well as Python-based automated data download tool were used in the model to develop and calculate a net primary production and carbon sequestration system. This study provides a system for automatic daily data downloading which is capable for near-real-time automatic calculation of net primary production and carbon sequestration. The data from the system will be produced as a web map service to the user later.

Key words: net primary production monitoring system, carbon storage, near real-time system

บทนำ

พิธีสารเกียวโต (Kyoto Protocol) ถูกใช้เป็นเครื่องมือให้เกิดความร่วมมือจากนานาประเทศในการกระตุ้นให้เกิดการลดการปลดปล่อยคาร์บอนและก๊าซเรือนกระจก ผลจากข้อตกลงนี้ก่อให้เกิดการตื่นตัวถึงการศึกษาการกักเก็บคาร์บอนของประเทศไทย โดยในปี พ.ศ. 2543 ประเทศไทยปล่อยก๊าซเรือนกระจก (ไม่รวมภาคการใช้ที่ดินและป่าไม้) คิด

เป็น 226.08 ล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่า และเพิ่มเป็น 318.66 ล้านตันคาร์บอนไดออกไซด์เทียบเท่าในปี พ.ศ. 2556 โดยสัดส่วนของการปล่อยก๊าซเรือนกระจกส่วนใหญ่มาจากภาคพลังงาน รองลงมา ได้แก่ ภาคเกษตรกรรมภาคการใช้ที่ดินและป่าไม้ ภาคกระบวนการผลิตและการใช้ผลิตภัณฑ์อุตสาหกรรม และภาคของเสียโดยเฉพาะในพื้นที่เกษตรกรรมผลการศึกษาพบว่ากิจกรรมจาก

การเพาะปลูกเป็นปัจจัยหนึ่งที่ทำให้เกิดการเปลี่ยนแปลงในการกักเก็บและการปลดปล่อยคาร์บอน (Schahczenski and Hill, 2009) คาร์บอนในพื้นที่เกษตรกรรมถูกกักเก็บไว้ในรูปของมวลชีวภาพ ขณะที่การสูญเสียการกักเก็บคาร์บอนในพื้นที่เกษตรเกิดขึ้นหลังจากการเก็บเกี่ยวเอาผลผลิตออกไป อีกทั้งมวลชีวภาพที่เหลือทิ้งทางการเกษตรที่ถูกปล่อยทิ้งให้ย่อยสลายคาร์บอนที่เคยกักเก็บเปลี่ยนมากักเก็บไว้ในดิน ขณะที่มวลชีวภาพบางส่วนนำออกจากพื้นที่ผ่านการถูกเผาไหม้

การสังเคราะห์แสงเป็นกระบวนการที่พืชใช้แสงแดด น้ำ และคาร์บอนไดออกไซด์ เปลี่ยนออกมาเป็น น้ำตาลกลูโคส น้ำ และออกซิเจน เป็นกระบวนการผลิตขั้นต้นที่เกิดจากพืชหรือการผลิตขั้นปฐมภูมิ (Primary productivity) (Kvet *et al.*, 1971) ซึ่งสามารถจำแนกออกเป็น 2 รูปแบบ คือ อัตราการผลิตขั้นปฐมภูมิสุทธิ (Net Primary Production: NPP) เป็นผลผลิตของพืชที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์แสงโดยหักส่วนที่สูญเสียไปจากกระบวนการหายใจและการผลิตขั้นปฐมภูมิทั้งหมด (Gross Primary Production: GPP) เป็นผลผลิตของพืชทั้งหมดรวมส่วนที่สูญเสียไปจากกระบวนการหายใจ ส่วนของเนื้อเยื่อที่ได้จากกระบวนการสังเคราะห์แสงนี้เรียกว่ามวลชีวภาพ (Biomass) โดยนิยามตรวจวัดในรูปของน้ำหนักแห้งโดยมีค่าเป็นน้ำหนักต่อหน่วยของพืชหรือหน่วยต่อพื้นที่

การศึกษาเกี่ยวกับการเปลี่ยนแปลงด้านมวลชีวภาพจากการเกษตรระดับแปลงปัจจุบันสามารถทำได้ง่ายเนื่องจากการใช้ประโยชน์ทางด้านเทคโนโลยีด้านการสำรวจจากระยะไกลที่มีคุณสมบัติในการบันทึกข้อมูลทั้งด้านรายละเอียดของช่วงคลื่นทั้งเชิงพื้นที่และเวลา ทำให้มีการพัฒนาแบบจำลองเพื่อประเมินปริมาณของมวลชีวภาพด้วยข้อมูลการสำรวจระยะไกลมีประสิทธิภาพมากขึ้น (Fang *et al.*, 2019;

Zhang *et al.*, 2019) ในปัจจุบันการศึกษาในต่างประเทศได้ใช้ข้อมูลภาพจากการสำรวจด้วยดาวเทียม Landsat มาจำแนกประเภทการทำการเกษตรของพืชแต่ละชนิดในพื้นที่ขนาดใหญ่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ (MacDonald *et al.*, 1975) ซึ่งประเภทของการเพาะปลูกมีความสัมพันธ์กับปริมาณของมวลชีวภาพในหลังการเก็บเกี่ยวแต่การศึกษาที่ผ่านมา ยังคงถูกแสดงให้เห็นปริมาณมวลชีวภาพเพียงช่วงเวลาเดียวเท่านั้น (Brickley *et al.*, 2006) การนำการประเมินผลผลิตปฐมภูมิสุทธิ (NPP) ด้วยแบบจำลอง 3PGS จากข้อมูลของดาวเทียมมาประมวลผลร่วมกับระบบที่สามารถประมวลผลได้แบบใกล้เคียงเวลาจริง ก่อให้เกิดองค์ความรู้ใหม่ในการพัฒนาระบบติดตามการกักเก็บและการปลดปล่อยคาร์บอนรายเดือนในภาคการเกษตรแบบใกล้เคียงเวลาจริงที่จะสามารถ ดาวโหลดข้อมูลอัตโนมัติรายวัน คำนวณ NPP จาก NDVI (Normalized difference vegetation index) ได้อัตโนมัติ และบริการข้อมูลให้กับผู้ใช้แบบ web map service (wms)

การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาปริมาณของผลผลิตปฐมภูมิสุทธิในพื้นที่การเกษตรและพัฒนาระบบคำนวณปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือผิวดินในพื้นที่การเกษตร โดยนำ PyModis (Python package ที่พัฒนาด้วยภาษา Python) มาใช้ร่วมกับแบบจำลอง 3PGS เพื่อให้สามารถดาวโหลดและคำนวณผลผลิตปฐมภูมิสุทธิในพื้นที่การเกษตรและพัฒนาระบบคำนวณปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือผิวดินได้แบบอัตโนมัติ ช่วยลดเวลาการทำงานและช่วยในการติดตามข้อมูลปริมาณและการกระจายของมวลชีวภาพและปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือผิวดินในพื้นที่การเกษตรอย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น

วิธีดำเนินการวิจัย

1. พื้นที่ศึกษา

การศึกษาครั้งนี้มีพื้นที่ศึกษาเป็นพื้นที่ทำการเกษตรที่อยู่ในแนวบันทึก h27v07 ของดาวเทียม TERRA-AQUA ครอบคลุมพื้นที่ 61 จังหวัด ครอบคลุมทุกภาคของประเทศไทย

2. วิเคราะห์ปริมาณมวลชีวภาพ

วิธีการประเมินปริมาณของคาร์บอนเหนือผิวดินได้นำแนวคิดที่มีการใช้ข้อมูลจากการสำรวจระยะไกลร่วมกับแบบจำลอง 3PGS ซึ่งแบบจำลอง 3PGS (Physiological Principles for Predicting Growth from Satellites) ถูกนำมาใช้อย่างหลากหลายทั้งเพื่อทำนายการเจริญเติบโตของพืชและคำนวณการกักเก็บคาร์บอน (Coops *et al.*, 1998; Thanyapraneeekul and Susaki, 2006; Charoenpanyanet *et al.*, 2011) โดยแบ่งการศึกษาออกเป็น 3 ขั้นตอนหลัก (ภาพที่ 1) โดยมีรายละเอียดการดำเนินงาน ดังนี้

1) วิเคราะห์ปริมาณคาร์บอน

แบบจำลองนี้สามารถใช้ประเมินอัตราการผลิตขั้นปฐมภูมิสุทธิมีหน่วยเป็นกรัมคาร์บอนต่อตารางเมตรต่อวัน ($\text{gC/m}^2/\text{day}$) ซึ่งเป็นค่าที่มีความสัมพันธ์ต่อการวัดการเจริญเติบโตของพืชพรรณ (Coops *et al.*, 1998; Thanyapraneeekul and Susaki, 2006) โดยมีวิธีการคำนวณดังจากสมการ 1

$$\text{NPP} = 0.45 \times \text{GPP} \quad (1)$$

โดยที่ GPP เป็นผลผลิตขั้นปฐมภูมิทั้งหมดมีหน่วยเป็นกรัมคาร์บอนต่อตารางเมตรต่อวัน ($\text{gC/m}^2/\text{day}$) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ 2

$$\text{GPP} = 1.8 \text{ gC/MJ} \times \text{APAR} \quad (2)$$

ค่า APAR คือรังสีที่ถูกดูดกลืนเพื่อใช้ในการสังเคราะห์แสงของพืช ค่า APAR สามารถคำนวณ

จาก FPAR และ PAR (Potitthrp, 2003 Cited Dye and Goward, 1993) โดยมีหน่วยคือ เมกะจูลต่อตารางเมตรต่อวัน ($\text{MJ/m}^2/\text{day}$) ดังนี้

$$\text{APAR} = \text{FPAR} \times \text{PAR} \quad (3)$$

ค่า PAR ในสมการ 3 ได้จากการนำข้อมูลรังสีจากดวงอาทิตย์ มาวิเคราะห์ค่า Photosynthetically active radiation (PAR) โดยมีหน่วยเป็นเมกะจูลต่อตารางเมตรต่อวัน ($\text{MJ/m}^2/\text{day}$) ซึ่งสามารถคำนวณได้จากสมการ 4 ดังนี้

$$\text{PAR} = 0.45 \times \text{Solar Radiation} \quad (4)$$

ข้อมูลรังสีจากดวงอาทิตย์ของปี 2554 ถึง 2559 จำนวนทั้งสิ้น 35 สถานี ถูกมาหาค่าเฉลี่ยทุกๆ 8 วัน และประมาณค่าเชิงพื้นที่โดยใช้วิธี IDW Interpolation เพื่อให้ได้ชั้นข้อมูลความเข้มแสงดวงอาทิตย์รายเดือน สำหรับ ค่า Fraction of the solar radiation (FPAR) ในสมการ 5 หมายถึงสัดส่วนของการแผ่รังสีในช่วงคลื่นที่พืชใช้สังเคราะห์แสงสามารถคำนวณได้จากค่า NDVI (Thanyapraneeekul and Susaki, 2006) โดยมีวิธีการวิเคราะห์ ดังนี้

$$\text{FPAR} = ((\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\min}) / (\text{NDVI}_{\max} - \text{NDVI}_{\min})) \times (\text{FPAR}_{\max} - \text{FPAR}_{\min}) + \text{FPAR}_{\min} \quad (5)$$

โดยที่ $\text{FPAR}_{\max}$ และ $\text{FPAR}_{\min}$ ในการศึกษานี้เป็นค่าคงที่มีค่าเท่ากับ 0.95 และ 0.01 ตามลำดับ และค่าดัชนีพืชพรรณ โดยนำค่าการสะท้อนในช่วงคลื่นอินฟราเรดใกล้ (NIR) หรือ NIR กับค่าการสะท้อนในช่วงคลื่นสีแดง (RED) หรือ R มาวิเคราะห์ด้วยสมการ 6 ผลลัพธ์ที่ได้มีค่าอยู่ในช่วง -1 ถึง +1 ค่าที่เข้าใกล้ +1 บ่งบอกถึงพื้นที่ที่มีพืชพรรณปกคลุมอยู่ นิยมนำมาใช้ในการวิเคราะห์การจำแนกสิ่งปกคลุมดิน

$$NDVI = (NIR - R)/(NIR+R) \quad (6)$$

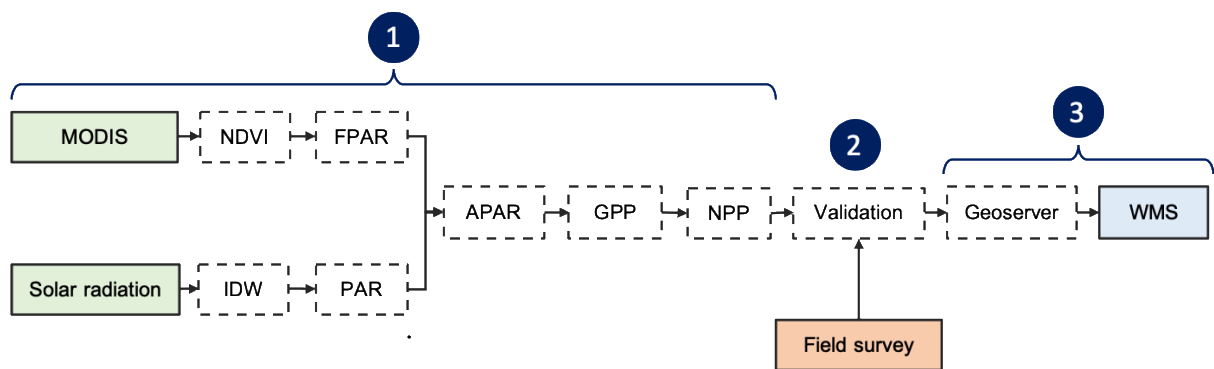
3. การสำรวจข้อมูลภาคสนาม

การสำรวจข้อมูลภาคสนามเพื่อตรวจวัดปริมาณคาร์บอนที่กักเก็บไว้ในพืชการเกษตรสำหรับนำไปใช้เปรียบเทียบความถูกต้องของวิธีวิเคราะห์ข้อมูลจากดาวเทียม ในการศึกษาเก็บข้อมูลในพื้นที่นาข้าวและพืชไร่ทั้งสิ้น 26 แปลง โดยกำหนดให้แปลงตัวอย่างมีขนาด 30×30 เมตร โดยเก็บข้อมูลบริเวณตำแหน่งกึ่งกลางแปลง จากนั้นสุ่มเก็บตัวอย่างมวลชีวภาพที่พบในพื้นที่ ขนาด 1×1 เมตร ด้วยวิธีการชั่งน้ำหนัก จำนวน 3 ครั้งต่อ 1 แปลง แล้วนำมาหาค่าเฉลี่ย

4. พัฒนาระบบสำหรับวิเคราะห์การกักเก็บคาร์บอนแบบอัตโนมัติ

การพัฒนาระบบสำหรับคำนวณผลผลิตขั้นปฐมภูมิสุทธิจากสมการที่ 1 - 6 (หมายเลข 1 ในภาพ

ที่ 1) ถูกพัฒนาเป็นชุดคำสั่งเพื่อให้ทำงานได้อัตโนมัติ โดยการประยุกต์ใช้ร่วมกับ PyModis ซึ่งเป็น Open source library ที่พัฒนาด้วยภาษา Python เพื่อทำงานกับข้อมูล MODIS (Delucchi, 2020) มีฟังก์ชันสำหรับดาวน์โหลดข้อมูลของ MODIS ฟังก์ชันสำหรับเปลี่ยนระบบพิกัด ฟังก์ชันสำหรับ Mosaic ของข้อมูล MODIS และฟังก์ชันอื่นๆ โปรแกรมของ PyModis สามารถเข้าถึงได้ที่ <http://www.pymodis.org> การศึกษานี้เลือกใช้ข้อมูล Surface reflectance ทุก 8 วัน ของ MODIS ของดาวเทียม Aqua จาก URL <https://e4ftl01.cr.usgs.gov/MOLA/> และข้อมูลของ MODIS ของดาวเทียม Terra จาก URL <https://e4ftl01.cr.usgs.gov/MOLT/> รายละเอียดของชุดคำสั่งสามารถเข้าถึงได้ที่ <https://github.com/dookda/dev-modis-download> จากนั้นพัฒนาระบบบริการข้อมูลด้วย GeoServer เพื่อให้เจ้าหน้าที่หรือผู้ที่สนใจสามารถนำข้อมูลไปใช้งานต่อไป



ภาพที่ 1 ขั้นตอนการดำเนินงาน

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1) ปริมาณและการกระจายของมวลชีวภาพและปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือผิวดินในพื้นที่การเกษตรข้อมูลจากดาวเทียม TERRA/AQUA MODIS ถูกนำมาพัฒนาเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ (MODIS Land Products) ซึ่งสามารถศึกษารายละเอียดได้ที่ (<https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/>)

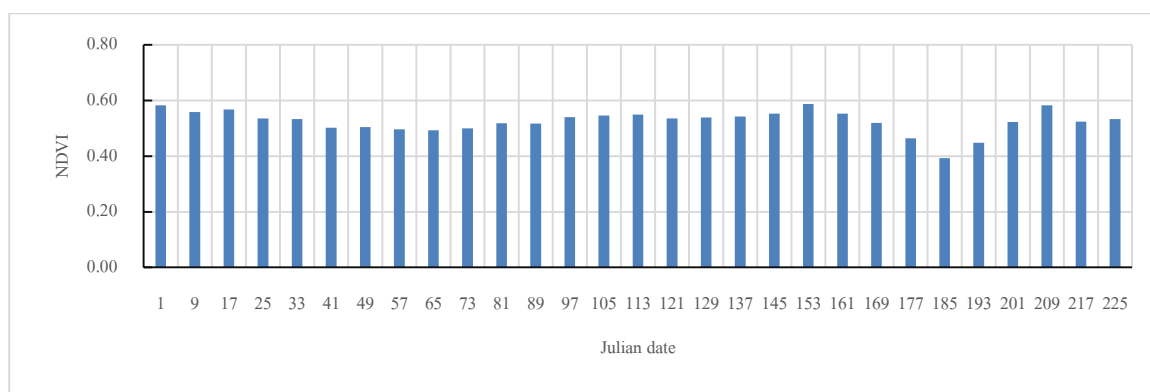
การศึกษารั้วนี้ได้นำผลิตภัณฑ์ MODIS Surface Reflectance มาใช้งาน ซึ่งข้อมูลดังกล่าวเป็นข้อมูลที่ผ่านการปรับแก้ Atmospheric correction มาแล้ว และถูกจัดทำให้เป็นข้อมูลเชิงประกอบหรือข้อมูล Composite ที่มีคาบเวลา 8 วัน (MODIS 8 day composite products) ซึ่งข้อมูลที่ได้ประกอบด้วย 7 ช่วงคลื่น ดังตาราง 3 ซึ่งข้อมูลที่ได้จากผลิตภัณฑ์ของ

MODIS Surface Reflectance ภูมิกายงานในรูปแบบของวันที่ของปี (Julian day)

ข้อมูลของ MODIS ที่ใช้ในการศึกษานี้มีทั้งหมด 7 Band ประกอบด้วย Band 1 ช่วงคลื่น 620-670 nm Band 2 ช่วงคลื่น 841-876 nm Band 3 ช่วงคลื่น 459-479 nm Band 4 ช่วงคลื่น 545-565 nm Band 5 ช่วงคลื่น 1230-1250 nm Band 6 ช่วงคลื่น 1628-1652 nm และ Band 7 ช่วงคลื่น 2105-2155 nm

หลังจากการวิเคราะห์ด้วยสมการ 6 โดยเลือกให้ข้อมูลใน Band 1 เป็น Red reflectance (Band centered 645 nm.) และ Band 2 เป็น near-infrared reflectance (Band centered 858 nm.) ผลการคำนวณพบว่า ค่า NDVI สูงพบได้บริเวณป่าไม้ทางด้านทิศ

ตะวันตกของประเทศไทย ในขณะที่ที่ปล่อยว่างจะมีค่า NDVI ต่ำ ซึ่งพบมากทางภาคตะวันออกเฉียงเหนือของประเทศ ซึ่งค่าการสะท้อนในพื้นที่การเกษตรเป็นไปในทิศทางเดียวกันกับการศึกษาที่ผ่านมา (Chompuchan and Kositsakulchai, 2005) พื้นที่ที่มีการทำการเกษตรในช่วงหลังการเก็บเกี่ยวมีค่าการสะท้อนอยู่ในช่วง 0 - 0.3 ซึ่งพบได้ทั่วไปในบริเวณพื้นที่ราบทั้งในภาคกลางและภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ขณะที่พื้นที่อื่นๆ เช่น พื้นที่เปิดโล่ง พื้นที่แหล่งน้ำ ค่า NDVI ที่วิเคราะห์มีค่าค่อนข้างต่ำ (ค่าการสะท้อนน้อยกว่า < 0.10) สำหรับค่าเฉลี่ยของดัชนีพืชพรรณในพื้นที่เกษตรตลอดทั้งปีแสดงดังภาพที่ 2

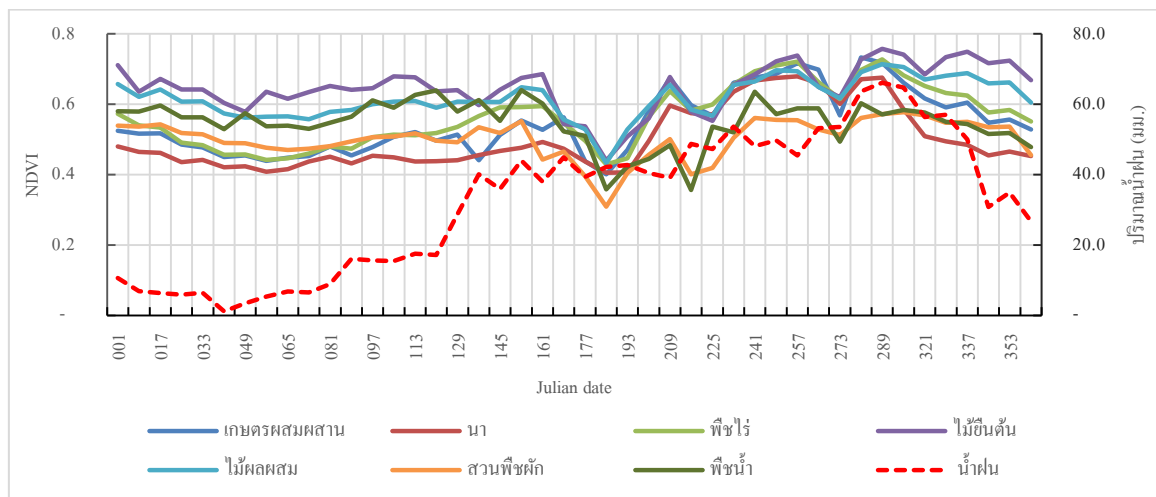


ภาพที่ 2 ค่าเฉลี่ยของดัชนีพืชพรรณในพื้นที่เกษตรตลอดทั้งปี

จากการวิเคราะห์ข้อมูลดัชนีพืชพรรณ พบการกระจายของดัชนีพืชพรรณที่ปกคลุมพื้นที่ของประเทศไทย เมื่อเปรียบเทียบกับค่าดัชนีพืชพรรณในพื้นที่การเกษตรโดยจากข้อมูลการใช้ประโยชน์ที่ดินของประเทศไทย ที่แบ่งการใช้ประโยชน์ที่ดินแบบการเกษตรออกเป็น 6 ประเภท ประกอบด้วย นาข้าว พืชไร่ สวนพืชผัก เกษตรผสมผสาน ไม้ผลผสม และไม้ยืนต้น พบว่า การใช้ประโยชน์ที่ดินการเกษตรแบบไม้ยืนต้นมีค่าดัชนีพืชพรรณสูงกว่าการใช้ประโยชน์ที่ดินแบบอื่นๆ และการทำการเกษตรแบบไม้ผลผสมมีค่าการสะท้อนรองลงมา ขณะที่พื้นที่นา

ข้าวและสวนพืชผักมีค่าการสะท้อนต่ำกว่าการทำการเกษตร (ภาพที่ 3) จากลักษณะค่าการสะท้อนนี้สามารถจัดกลุ่มของไม้ยืนต้น เช่น การทำการเกษตรแบบปลูกไม้ผล สวนยาง กับการเกษตรที่ไม่ใช่ไม้ยืนต้นได้ด้วยค่าดัชนีพืชพรรณ

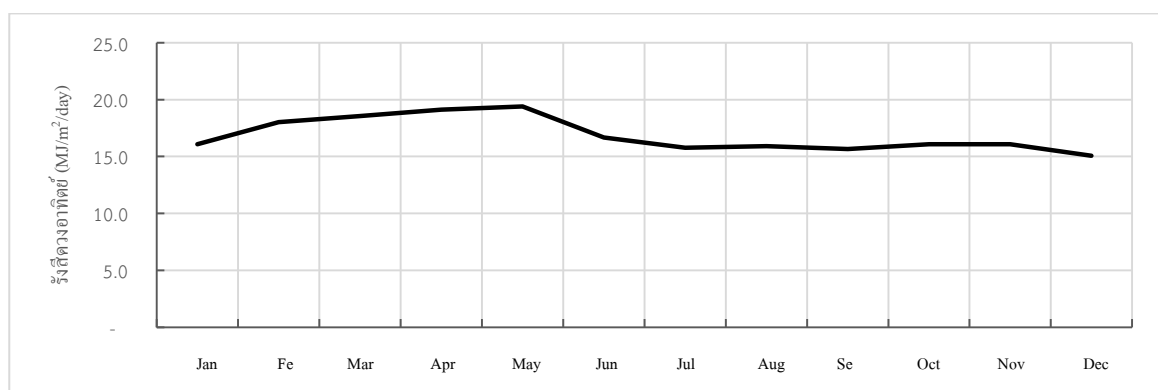
อย่างไรก็ตามข้อมูลจาก MODIS ที่นำมาใช้ในการศึกษานี้เป็นข้อมูลที่ถูกรวมเอาค่าการสะท้อน 8 วัน เข้าไว้ด้วยกันเพื่อลดค่าของข้อมูลที่ถูกรบกวนจากเมฆ แต่ยังคงมีค่าการสะท้อนของเมฆเป็นอยู่มากในช่วงฤดูฝน ระหว่างกลางเดือนพฤษภาคมถึงกลางเดือนตุลาคม



ภาพที่ 3 ค่าดัชนีพืชพรรณของการใช้ประโยชน์ที่ดินแบบต่างๆ และปริมาณน้ำฝนตลอดปี

ผลการประมาณค่าเชิงพื้นที่ของข้อมูลความเข้มของแสง พบว่า ในแต่ละเดือนจะมีค่ารังสีจากดวงอาทิตย์ไม่เท่ากัน เดือนที่มีรังสีจากดวงอาทิตย์สูงสุดได้แก่เดือนพฤษภาคม มีค่า $19.4 \text{ MJ/m}^2/\text{day}$ รองลงมาเป็นเดือนเมษายนและมีนาคม โดยมีค่า

เท่ากับ 19.1 และ $18.5 \text{ MJ/m}^2/\text{day}$ ตามลำดับ (ภาพที่ 4) เมื่อวิเคราะห์ภาพรวมของการกระจายรังสีดวงอาทิตย์พบว่าภาคตะวันออกเฉียงเหนือมีค่ารังสีดวงอาทิตย์มากกว่าภาคอื่นๆ ของประเทศ



ภาพที่ 4 ค่าเฉลี่ยรังสีจากดวงอาทิตย์แต่ละเดือน

การประเมินผลผลิตปฐมภูมิสุทธิ (NPP) ของพื้นที่การเกษตร พบว่า มีค่าเฉลี่ย NPP เท่ากับ $4.59 \text{ gC/m}^2/\text{day}$ เมื่อคำนวณทั้งหมดของภาคการเกษตรจะพบว่า NPP เท่ากับ $800,113.4 \text{ tonC/day}$ การใช้ประโยชน์ที่ดินแบบไม้ยืนต้นและไม้ผลผสมมีค่าเฉลี่ยของ NPP มากที่สุดคือ $5.36 \text{ gC/m}^2/\text{day}$ และ

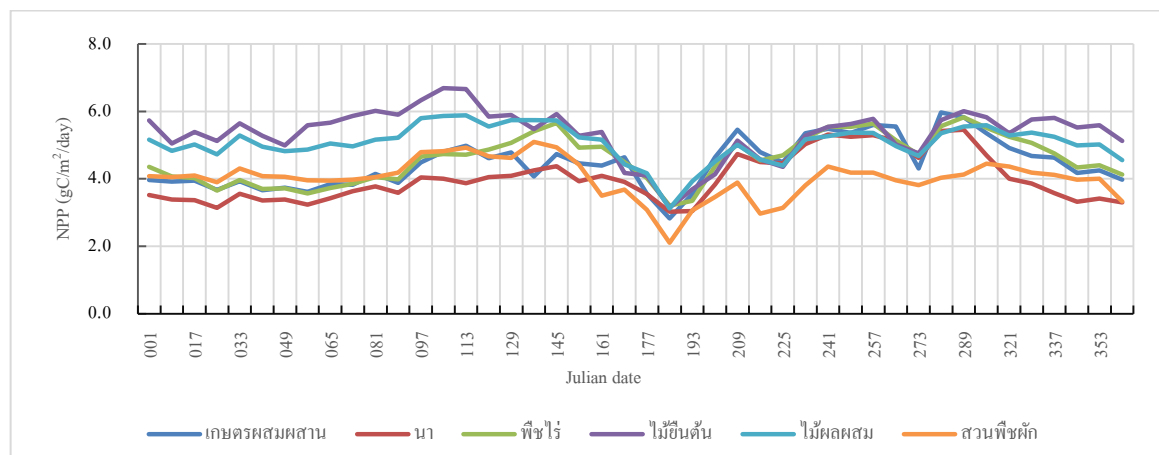
$5.06 \text{ gC/m}^2/\text{day}$ แต่เมื่อดูผลผลิตรวมทั้งประเทศแล้ว กลับพบว่าการใช้ประโยชน์ที่ดินแบบนาข้าวและพืชไร่มี NPP มากที่สุด โดยทั้งพื้นที่ทำการเกษตรแบบนาข้าวและพืชไร่รวมกันคิดเป็น 86% (ตารางที่ 1) ของผลผลิตปฐมภูมิสุทธิทั้งหมดที่ผลิตได้ โดยนาข้าวมีค่าเฉลี่ยผลผลิตปฐมภูมิสุทธิเท่ากับ 4.02

gC/m²/day มีผลรวมทั้งหมดเท่ากับ 359,404.5 tonC/day พืชไร่ มีค่าเฉลี่ยผลผลิตปฐมภูมิสุทธิเท่ากับ 4.59 gC/m²/day มีผลรวมทั้งหมดเท่ากับ 336,876.9 tonC/day

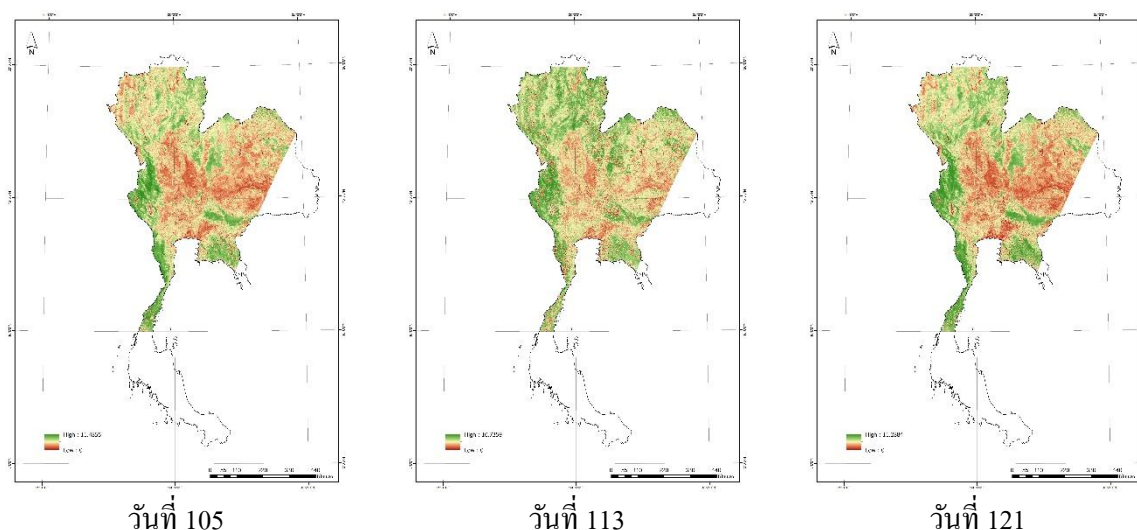
ช่วงเวลาที่มี NPP สูงสุดคือช่วงวันที่ 105 และ 113 ของปี หรือระหว่างวันที่ 15 ถึง 50 พ.ค. ของปี (ภาพที่ 5) แผนที่มีการกระจายของผลผลิตปฐมภูมิสุทธิแสดงดัง (ภาพที่ 6)

ตารางที่ 1 ผลการประเมินผลผลิตปฐมภูมิสุทธิในพื้นที่การเกษตรของประเทศไทย

การใช้ประโยชน์ที่ดิน	เนื้อที่ (Km ²)	Average NPP (gC/m ² /day)	Total NPP (tonC/day)
เกษตรผสมผสาน	252	4.47	112.7
นา	894,539	4.02	359,404.5
พืชไร่	733,692	4.59	336,876.9
ไม้ยืนต้น	75,829	5.36	40,629.9
ไม้ผลผสม	122,816	5.06	62,153.1
สวนพืชผัก	2,331	4.02	936.3
รวม	1,829,459	4.59	800,113.4



ภาพที่ 5 ผลผลิตปฐมภูมิสุทธิของแต่ละช่วงเวลา

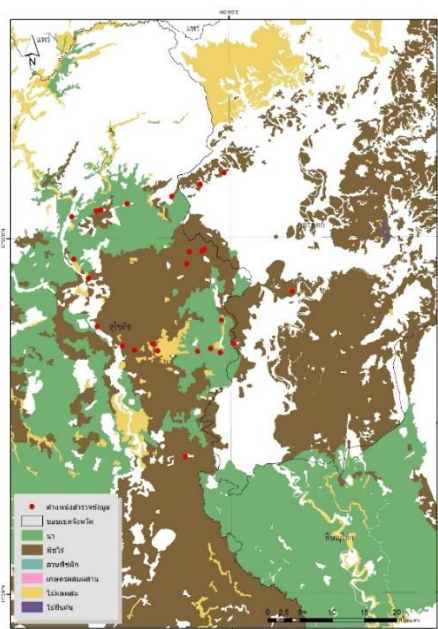


ภาพที่ 6 ผลผลิตปฐภูมิสุทธิของช่วงวันที่ 105-121 ของปี พ.ศ. 2560

2) การสำรวจข้อมูลภาคสนาม

จากการเก็บข้อมูลภาคสนามในพื้นที่การเกษตรจำนวน 26 แห่ง กระจายอยู่ในพื้นที่ทำการเกษตรในช่วงเวลาหลังการเก็บเกี่ยว (ภาพที่ 7) ผลศึกษาพบว่าปริมาณมวลชีวภาพเฉลี่ยเท่ากับ 0.81 kg/m^2 โดยมีมวลชีวภาพสูงสุดเท่ากับ 1.27 kg/m^2

และมีมวลชีวภาพต่ำสุดเท่ากับ 0.40 kg/m^2 เมื่อคิดเป็นปริมาณคาร์บอนที่กักเก็บไว้เท่ากับ 0.38 gC/m^2 (คำนวณจากร้อยละ 47 ของน้ำหนักแห้งของมวลชีวภาพ) โดยมีปริมาณคาร์บอนที่กักเก็บสูงสุดเท่ากับ 0.60 gC/m^2 และต่ำสุดเท่ากับ 0.19 gC/m^2 (ตาราง 2)



1



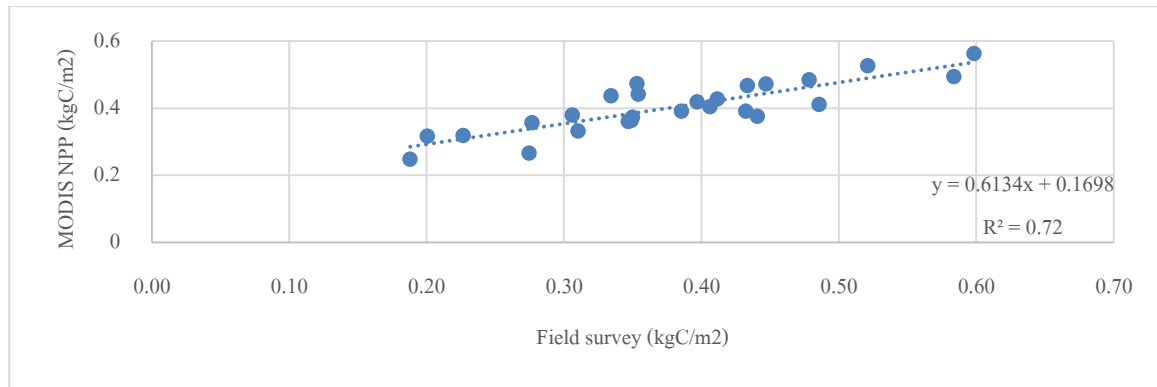
2

ภาพที่ 7 1) ตำแหน่งการเก็บข้อมูลมวลชีวภาพ 2) การเก็บข้อมูลชีวภาพในพื้นที่ขนาด 1×1 เมตร ในพื้นที่การเกษตร

ตารางที่ 2 ข้อมูลมวลชีวภาพและปริมาณการกักเก็บคาร์บอนจากการสำรวจภาคสนาม

id	x	y	elevation	Biomass (kg/m ²)	C (kgC/m ²) *
1	609021	1779516	59	0.95	0.45
2	636774	1839490	79	1.24	0.58
3	600677	1877164	71	0.74	0.35
4	643182	1795201	80	0.40	0.19
5	588099	1873212	53	0.88	0.41
6	584770	1855699	72	0.66	0.31
7	631844	1851977	83	0.43	0.20
8	651430	1850385	62	0.58	0.27
9	589966	1809482	55	0.48	0.23
10	610631	1813665	76	0.74	0.35
11	610652	1813714	82	0.92	0.43
12	651264	1791076	59	0.74	0.35
13	604132	1786500	79	0.75	0.35
14	587096	1790193	53	1.02	0.48
15	634751	1772353	53	0.94	0.44
16	625392	1749235	52	0.59	0.28
17	613880	1746612	58	0.84	0.40
18	620812	1759895	57	0.71	0.33
19	640914	1776969	54	1.27	0.60
20	583528	1798708	87	0.92	0.43
21	636190	1798656	96	1.11	0.52
22	623523	1825714	96	0.82	0.39
23	622550	1839330	80	0.65	0.31
24	656079	1837365	59	1.03	0.49
25	622086	1858850	60	0.86	0.41
26	622671	1858850	62	0.75	0.35
Average				0.81	0.38

* คัดจากร้อยละ 47 โดยน้ำหนักของน้ำหนักแห้งของมวลชีวภาพ (IPCC, 2006)



ภาพที่ 8 ความสัมพันธ์ระหว่างข้อมูลจาก 3PGS ผลผลิตปฐมภูมิสุทธิ กับข้อมูลที่สำรวจจากภาคสนาม

3) การพัฒนาระบบคำนวณปริมาณการกักเก็บคาร์บอนเหนือผิวดินในพื้นที่การเกษตร

ข้อมูลปริมาณคาร์บอนที่ได้จากการวิเคราะห์ถูกนำมาเผยแพร่ในรูปแบบของ Web map service โดยใช้ซอฟต์แวร์ GeoServer ที่ทำหน้าที่เรียกชั้นข้อมูลต่างๆ ที่อยู่ในระบบมาสร้างเป็น Web map service โดยให้บริการข้อมูลทั้งรูปแบบ bitmap เช่น PNG, JPG, TIFF และแบบ Vector เช่น Shapefile, GeoJson, GML, KML เป็นต้น เพื่อให้ผู้ใช้สามารถเรียกใช้งานแผนที่ผ่านโปรแกรมด้านระบบสารสนเทศภูมิศาสตร์ เช่น ArcGIS, QGIS, Google Earth ซึ่งผลจากการศึกษานี้ได้ถูกรวบรวมไว้ในเครื่องแม่ข่าย ผู้ใช้งานสามารถเรียกดูระบบแผนที่ออนไลน์เพื่อเรียกดูชั้นข้อมูลดัชนีพืชพรรณ รังสีดวงอาทิตย์ และผลผลิตขั้นปฐมภูมิของประเทศผ่านด้วยเว็บ browser จาก URL: <http://www.cgi.uru.ac.th/carbon>

สรุป

การนำข้อมูลจากดาวเทียมระบบ MODIS มาใช้ในการประเมินปริมาณคาร์บอนเหนือผิวดินในพื้นที่ทำการเกษตรด้วยแบบจำลอง 3PGS โดยมีพื้นที่ศึกษาเป็นแนวนันทิกข้อมูล h27v07 ของ TERRA/AQUA MODIS ซึ่งครอบคลุมพื้นที่ของประเทศไทยจำนวน 61 จังหวัด โดยมีรายละเอียดเชิงพื้นที่เท่ากับ

250 เมตร ข้อมูลที่นำไปวิเคราะห์เป็นข้อมูลค่าการสะท้อนของ MODIS ช่วงคลื่น Red (620-670 nm) และ NIR (841-876 nm) ทุก 8 วัน ในปี 2560 ซึ่งรวมทั้งสิ้น 44 ช่วงเวลา ถูกวิเคราะห์ด้วยสมการคำนวณหาปริมาณคาร์บอน

ผลการประเมินผลผลิตปฐมภูมิสุทธิ หรือ NPP ของพื้นที่การเกษตร พบว่า มีค่าเฉลี่ย NPP เท่ากับ 4.59 gC/m²/day ซึ่งใกล้เคียงกับผลการศึกษาของ Potitthep (2003) ที่ทำการประมาณค่า NPP ในพื้นที่การเกษตรของประเทศไทยโดยใช้แบบจำลองผลผลิตที่มีประสิทธิภาพ (Production Efficiency Model: PEM) มีค่าเท่ากับ 1,432 gC/m²/year หรือเท่ากับ 3.92 gC/m²/day ขณะที่การเกษตรแบบปลูกไม้ยืนต้นมี NPP ที่คำนวณได้เท่ากับ 5.36 gC/m²/day ซึ่งใกล้เคียงกับการศึกษาของ Charoenpanyanet *et al.* (2011) ที่ได้ใช้แบบจำลอง 3PGS ในการประเมินผลผลิตสุทธิขั้นปฐมภูมิของป่าไม้ต่างชนิดโดยมีค่า NPP เท่ากับ 5.11 gC/m²/day และผลการประมาณค่า NPP ที่ได้จากการศึกษานี้มีความสัมพันธ์กับข้อมูลที่สำรวจได้จากสนามอย่างมีนัยสำคัญที่ยอมรับได้ถึงแม้การใช้ข้อมูลจากการสำรวจระยะไกลสามารถนำมาประมาณผลผลิตขั้นปฐมภูมิของพืชการเกษตรได้เป็นอย่างดีแต่ข้อจำกัดของข้อมูลจากกลุ่มเมฆในช่วงฤดูฝนทำให้ไม่สามารถบันทึกข้อมูลได้ โดยเฉพาะอย่างยิ่งช่วงที่เกิดมรสุมในฤดูฝน

การติดตามปริมาณคาร์บอนเหนือผิวดินในพื้นที่เกษตรนี้ใช้ PyModis ซึ่งเป็น Open source library ที่สามารถนำมาพัฒนาโดยไม่มีค่าใช้จ่ายด้านลิขสิทธิ์ ผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า PyModis เป็น library ที่ช่วยให้ความสะดวกสำหรับการดาวโหลดข้อมูลอัตโนมัติโดยการตั้งเวลาให้ดาวโหลดในช่วงเวลาที่ต้องการได้เป็นอย่างดี ข้อมูล Surface reflectance ที่ดาวโหลดได้ถูกนำมาวิเคราะห์ด้วยแบบจำลอง 3PGS ด้วย Python script ที่พัฒนาขึ้นทำให้งานทำงานเป็นอย่างรวดเร็ว ลดเวลาการวิเคราะห์ด้วยผู้ใช้งาน และข้อมูลได้ถูกเผยแพร่ในรูปแบบแผนที่บนเครือข่ายอินเทอร์เน็ตเพื่อให้ผู้สนใจสามารถเรียกดูข้อมูลได้ผ่าน Web browser และ GIS software

วิธีการดังกล่าวทำให้ได้ข้อมูลการกักเก็บคาร์บอนรายเดือนเพื่อนำไปใช้ในการติดตามการเปลี่ยนแปลงปริมาณการกักเก็บคาร์บอนในพื้นที่ภาคเกษตร และช่วยลดเวลา ในการดาวโหลดและวิเคราะห์ข้อมูลสามารถทำให้ประเมินปริมาณการกักเก็บคาร์บอนมีความรวดเร็วและใกล้เคียงเวลาจริงมากขึ้น ซึ่งถือว่าเป็นคุณค่าและความก้าวหน้าทางวิชาการที่เกิดขึ้นจากผลงานวิจัย รวมทั้งระบบยังมีคุณค่าต่อการนำไปพัฒนาชุมชน สังคม และประเทศ ในประเด็นการส่งเสริมการลดการเผาในพื้นที่ทำการเกษตรได้ โดยสำนักงานเกษตรจังหวัดอุดรธานีได้นำข้อมูลจากระบบติดตามการกักเก็บคาร์บอนรายเดือนในภาคการเกษตรแบบใกล้เคียงเวลาจริงไปช่วยในการตัดสินใจเพื่อลงมือส่งเสริมการลดการเผาในพื้นที่ทำการเกษตร กล่าวคือจากค่า NPP ในระบบสามารถทำให้ทราบว่าพื้นที่ที่มีค่า NPP ต่ำ แสดงว่าเกษตรกรใช้วิธีการเผาแทนที่จะใช้วิธีการไถกลบในพื้นที่ทำการเกษตร วิธีการเผาจะส่งผลให้ไม่มีปริมาณชีวมวลสะสมอยู่ในพื้นที่ จากข้อมูลดังกล่าวจึงส่งผลให้สำนักงานเกษตรจังหวัดอุดรธานีสามารถที่จะลงไปยังพื้นที่ที่มีค่า NPP ต่ำ เพื่อทำการส่งเสริมการลด

การเผาพื้นที่ได้อย่างตรงเป้าหมายและส่งเสริมได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้น รวมทั้งกระบวนการวิจัยดังกล่าวยังได้ส่งเสริมและกระตุ้นให้ทีมวิจัยเกิดความคิดและค้นคว้าเพื่อต่อยอดในการพัฒนางานวิจัยเกี่ยวกับการพัฒนาระบบติดตามและเตือนภัยไฟป่าในพื้นที่วนเกษตรขึ้น โดยอาศัยหลักการวิเคราะห์ปริมาณมวลชีวภาพที่ใช้ข้อมูลจากการสำรวจระยะไกลร่วมกับแบบจำลอง 3PGS ในลักษณะเดียวกันเพื่อดูการสะสมตัวของมวลชีวภาพผสมกับจุดความร้อน (Hotspot) และนำมาประมวลผลในระบบติดตามและเตือนภัยไฟป่าในพื้นที่วนเกษตรจังหวัดอุดรธานี โดยระบบดังกล่าวได้ดำเนินการพัฒนาเสร็จสิ้นและในปัจจุบันทางสำนักงานป้องกันและบรรเทาสาธารณภัยจังหวัดอุดรธานีได้ใช้ระบบเป็นเครื่องมือในการติดตามและช่วยในการตัดสินใจในการเฝ้าระวังและจัดการไฟป่าของหน่วยงานต่างๆ ที่เกี่ยวข้องร่วมกับเกษตรกรในพื้นที่ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

สำหรับข้อเสนอแนะที่จะทำให้ระบบดังกล่าวสามารถทำงานได้อย่างมีประสิทธิภาพมากขึ้นนั้นการเก็บข้อมูลภาคสนามสำหรับใช้ตรวจสอบความถูกต้องทำได้ในพื้นที่บางส่วนของข้อมูลที่บ้านที่กได้จากข้อมูล MODIS และไม่ครอบคลุมการใช้ประโยชน์ที่ดินทุกประเภทที่ศึกษา การเพิ่มข้อมูลสำหรับตรวจสอบความถูกต้องให้ครอบคลุมทั้งพื้นที่จะทำให้ผลการศึกษาที่มีความน่าเชื่อถือมากยิ่งขึ้น ข้อมูลที่ได้จากวิเคราะห์ยังไม่ถูกนำไปเปรียบเทียบกับ MODIS Gross Primary Productivity และ Net Primary Productivity อย่างไรก็ตามข้อมูลแบบอัตโนมัติมีข้อจำกัดจากกลุ่มเมฆทำให้ข้อมูลบางช่วงต่ำกว่าความเป็นจริงโดยเฉพาะอย่างยิ่งช่วงฤดูฝนที่มีปกคลุมของเมฆ ผู้ที่สนใจนำข้อมูลไปใช้ต่อควรหลีกเลี่ยงข้อมูลช่วงระยะเวลาดังกล่าว

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบคุณสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ที่ให้การสนับสนุนงบประมาณการวิจัย รวมทั้งสำนักงานเกษตรจังหวัดอุดรธานี ที่ได้ให้ข้อเสนอแนะในการพัฒนาระบบติดตามการกักเก็บคาร์บอนรายเดือนในภาคการเกษตรแบบใกล้เวลาจริงสำหรับการนำไปใช้ประโยชน์ในการวางแผนการส่งเสริมการลดการเผาในพื้นที่ทำการเกษตรของจังหวัดอุดรธานี ผู้วิจัยหวังอย่างยิ่งว่างานวิจัยครั้งนี้จะเป็นประโยชน์ และเป็นแนวทางในการนำระบบไปขยายผลสู่การนำใช้เพื่อการวางแผนสำหรับจังหวัดอื่นๆ ต่อไป

เอกสารอ้างอิง

- Bricklemeyer, R.S., Lawrence, R.L., Miller, P.R. and Battogtokh, N. 2006. Predicting tillage practices and agricultural soil disturbance in north central Montana with Landsat imagery. **Agriculture, Ecosystems and Environment** 114(2006): 210-216.
- Charoenpanyanet, A., Hemwan, P. and Sangngam, C. 2011. **Remote sensing for estimation of net primary productivity (NPP) of different forest types**. GISTDA. Available Source: <http://gist.soc.cmu.ac.th/webboard/index.php/news/activities/Research/0050.html>, April 20, 2020. (in Thai)
- Chompuchan, C. and Kositsakulchai, C. 2005. **Study of cropping calendar of dry-season rice using NOAA/AVHRR images**. Researchgate. Available Source: https://www.researchgate.net/publication/239538228_Study_of_Cropping_Calendar_of_Dry-season_Rice_using_NOAA_AVHRR_Images_in_Thai_with_English_abstract_karsuksaptithinkarphaeaplukkhawchwngvdulaengdwypaphthaycakdawtheim_NOAA_AVHRR, April 20, 2020. (in Thai)
- Coops, N.C., Waring, R.H. and Landsberg, J.J. 1998. Assessing Forest productivity in Australia and New Zealand using a physiologically-based model driven with averaged monthly weather data and satellite – derived estimates of canopy photosynthetic capacity. **Forest Ecology and Management** 104(1-4): 113-127.
- Delucchi, L. 2020. **Welcome to pyModis**. PyModis. Available Source: <http://www.pymodis.org/>, April 20, 2020.
- Fang, L., Yang, J., Zhang, W., Zhang, W. and Yan, Q. 2019. Combining allometry and landsat-derived disturbance history to estimate tree biomass in subtropical planted forests. **Remote Sensing of Environment** 235: 111423
- IPCC. 2006. **Volume 4 Agriculture, Forestry and Other Land Use**. 2006 IPCC Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories. Available Source: <http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/>, April 20, 2020.
- Kvet, J., Ondok, J.P., Necas, J. and Jarvia, P.G. 1971. Method of growth analysis, pp. 648-752. In Sestak, Z., Catsky, J. and Jarvis, P.G., eds. **Plant Photosynthesis Production: Manual of Methods**. Junk N.V. Publishers, The Hauge, Netherlands.
- MacDonald, R.B., Hall, F.G. and Erb, R.B. 1975. The use of LANDSAT data in Large Area Crop

- Inventory Experiment (LACIE), pp. 1B-1-1B-23. **In Proceedings of the Symposium on Machine Processing of Remotely Sensed Data.** LARS, Purdues University, West Lafayette, IN.
- Potithrp, S. 2003. Estimation of net primary productivity (NPP) using remote sensing and local parameters in Thailand. Master of Science (Information Technology), Asian Institute of Technology.
- Potithrp, S. 2003. Estimation of net primary productivity (NPP) using remote sensing and local parameters in Thailand. Master of Science (Information Technology), Asian Institute of Technology. Cited Dye, D.G. and Goward, S.N. 1993. Cover Photosynthetically active radiation absorbed by global land vegetation in August 1984. **International Journal of Remote Sensing** 14(18): 3361-3364.
- Schahczenski, J. and Hill, H. 2009. **agriculture, climate change and carbon sequestration.** **ATTRA: National Sustainable.** Agriculture Information Service. Available Source: https://www.nrcs.usda.gov/Internet/FSE_DOCUMENTS/nrcs141p2_002437.pdf, February 20, 2020.
- Thanyapraneeekul, J. and Susaki, J. 2006. Estimation of forest plantation productivity using a physiologically based model driven with meteorological data and satellite-derived estimates of canopy photosynthetic capacity. **IEEE International Symposium on Geoscience and Remote Sensing** 58: 339-342.
- Zhang, R., Zhou, X., Ouyang, Z., Avitabile, V., Qi, J., Chen, J. and Giannico, V. 2019. Estimating aboveground biomass in subtropical forests of China by integrating multisource remote sensing and ground data. **Remote Sensing of Environment** 232(9): DOI:10.1016/j.rse.2019.111341.

ชนิดของดินและปริมาณการให้น้ำต่อการเจริญ ของต้นกล้าผักกาดขาวไคโตเกียว

Soil Type and Amount of Watering on the Growth of Chinese Cabbage (pai-tsai) Seedlings

กิริติกานต์ โพธิ์ทองศิริกุล นัยนา เสงส์สุก และ วรางคณา เรียนสุทธิ *

Kiratikan Phothongsirikun, Naiyana Sengsuk and Warangkha Riansut *

Received: 10 April 2020, Revised: 22 May 2020, Accepted: 29 July 2020

บทคัดย่อ

ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเจริญของผักกาดขาวไคโตเกียวขึ้นอยู่กับชนิดของดินและปริมาณการให้น้ำ โดยเกษตรกรได้พบปัญหาเกี่ยวกับอัตราการรอดที่ต่ำของผักกาดขาวไคโตเกียวในระยะเพาะกล้า ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาอิทธิพลของชนิดของดินและปริมาณการให้น้ำที่มีต่อการเจริญของผักกาดขาวไคโตเกียว ภายหลังการเพาะกล้าอายุ 28 วัน ทำการทดลองโดยมีปัจจัยในการปลูก คือ ดิน 3 ชนิด (ดินร่วน ดินทราย และดินร่วนปนทราย) และการให้น้ำ 3 ระดับ (10, 20 และ 30 มิลลิลิตรต่อวัน) เก็บข้อมูลการเจริญภายหลังการเพาะกล้า ได้แก่ ร้อยละการรอด น้ำหนักสด ความสูงของต้น และความยาวราก ผลการวิจัยพบว่า ชนิดของดินมีอิทธิพลต่อการเจริญ โดยการเพาะกล้าในดินร่วนมีความเหมาะสมสำหรับการเพาะกล้าผักกาดขาวไคโตเกียว เนื่องจากให้ค่าเฉลี่ยของร้อยละการรอด น้ำหนักสด และความยาวรากสูงที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 69.63, 0.019 กรัม และ 2.58 เซนติเมตร ตามลำดับ แต่ไม่พบอิทธิพลของปริมาณการให้น้ำ รวมถึงไม่มีอิทธิพลร่วมระหว่างชนิดของดินและปริมาณการให้น้ำที่มีต่อผลการทดลองทั้งหมด

คำสำคัญ: ผักกาดขาวไคโตเกียว, การเจริญ, ชนิดของดิน, ปริมาณการให้น้ำ

ABSTRACT

Factors related to the growth of Chinese cabbage (pai-tsai) depends on the soil type and the amount of watering. The farmers have found problems with the low survival rate of Chinese cabbage (pai-tsai) in the seedling stage. Therefore, the objective of this research was to study the influence of soil type and amount of watering supply on the growth of Chinese cabbage (pai-tsai) after 28-day seedling. The experiment was conducted with planting factors which were three types of soil (loam, sand, and sandy loam) and three levels of watering (10, 20, and 30 milliliters per day). After planting, the researchers collected survival percentage, fresh weight, plant height, and root length. The results of the research showed that soil types influenced the growth of Chinese cabbage (pai-tsai). The loam was suitable for planting the Chinese cabbage (pai-tsai). Since the loam gave the highest average survival percentage (69.63%), fresh weight (0.019 grams), and root length (2.58 centimeters). This experiment also showed that there were no influence of watering and no interaction effect between soil types and watering on all results.

Key words: Chinese cabbage (pai-tsai), growth, soil type, amount of watering

บทนำ

ผักกาดขาวไคโตเกียวมีชื่อวิทยาศาสตร์ว่า *Lactuca sativa* var. *crispa* L. ชื่อสามัญคือ Chinese cabbage (pai-tsai) อยู่ในวงศ์ Brassicaceae มีถิ่นกำเนิดอยู่ทางตอนเหนือของประเทศไทย เป็นผักในตระกูลกะหล่ำ ลักษณะคล้ายผักกาดขาวปลี แตกต่างกันตรงลักษณะใบของผักกาดขาวไคโตเกียวจะไม่ห่อเป็นหัวและมีก้านใบแคบ ผักกาดขาวไคโตเกียวมีสรรพคุณทางยา เช่น แก้อาเจียน ขับเสมหะ แก้พิษจากสุรา ช่วยย่อยอาหาร ขับปัสสาวะ ทำให้ขับถ่ายได้ง่าย ในตำรายาจีนมีการใช้รักษาโรคขาดวิตามินและแคลเซียมในเด็ก ช่วยป้องกันมะเร็งในลำไส้ มีโฟเลต (Folate) ช่วยควบคุมระบบเส้นประสาทและ DNA ของทารกในระยะครรภ์ 3 เดือนแรก มีผลต่อการสังเคราะห์สาร DNA ในร่างกาย และช่วยให้เม็ดเลือดแดงแข็งแรง มีคุณภาพดี ผักกาดขาวไคโตเกียวสามารถปลูกได้ทั้งบนดินและในน้ำ สำหรับดินที่เหมาะสมกับการปลูกคือ ดินร่วน ในดินเหนียวก็

สามารถปลูกได้ แต่ต้องทำให้ดินสามารถระบายน้ำได้ดี ส่วนวิธีการปลูกในน้ำอาจใช้ฟองน้ำช่วยในการปลูก ซึ่งเรียกว่าวิธีการปลูกแบบไฮโดรโปนิคส์ การปลูกควรให้น้ำอย่างน้อยวันละ 2 ครั้ง ไม่ควรขาดน้ำ และได้รับแสงแดดตลอดทั้งวัน (Posalak, 2016; Duangsumrit and Mingkwan, 2018)

Posalak (2016) ได้ศึกษาผลของน้ำหมักชีวภาพจากผักตบชวาและหอยเชอรี่ ต่อปริมาณสารสีที่ใช้ในการสังเคราะห์ด้วยแสงและปริมาณกรดแอสคอร์บิกในผักกาดขาวไคโตเกียวภายใต้ระบบปลูกแบบไฮโดรโปนิคส์ ผลการวิจัยพบว่า ผักกาดขาวไคโตเกียวที่ได้รับน้ำหมักชีวภาพจากหอยเชอรี่ในอัตรา 1 : 1000 มีผลทำให้น้ำหนักแห้งรวมต่อต้น พื้นที่ใบรวมต่อต้น อัตราการเจริญสัมพัทธ์ และอัตราส่วนน้ำหนักแห้งรากต่อต้นมีค่ามากที่สุด น้ำหนักชีวภาพสูตรผสมในอัตรา 1 : 500 มีผลทำให้น้ำหนักใบจำเพาะมีค่ามากที่สุด และสารละลายธาตุอาหารสูตรปกติทำให้มีความสูงมากที่สุด แต่ให้ผล

ไม่แตกต่างกันทางสถิติกับน้ำหมักชีวภาพจากหอยเชอรี่ในอัตรา 1 : 500 นอกจากนี้ น้ำหมักชีวภาพจากหอยเชอรี่ในอัตรา 1 : 500 มีผลทำให้ปริมาณคลอโรฟิลล์ ปริมาณแคโรทีนอยด์ และปริมาณเบต้าแคโรทีนในใบของผักกาดขาวไคโตเกียวกว้างที่สุด ส่วนน้ำหมักชีวภาพจากผักตบชวาในอัตรา 1 : 500 ส่งผลให้ปริมาณกรดแอสคอร์บิกในใบมีค่ามากที่สุด จากผลทดลองครั้งนี้แสดงให้เห็นได้ว่า การใช้ น้ำหมักชีวภาพจากหอยเชอรี่มีผลต่อการเจริญของผักกาดขาวไคโตเกียวกว้างที่สุด และ Duangsumrit and Mingkwan (2018) ได้ศึกษาการใช้อัตราส่วนที่เหมาะสมของปุ๋ยหมักชีวภาพจากใบยูคาลิปตัส 4 ระดับ ที่ส่งผลต่อการเจริญของผักกาดขาวไคโตเกียวกว้าง ได้แก่ การใช้ปุ๋ยและใช้ปุ๋ยหมักชีวภาพจากใบยูคาลิปตัสในอัตรา 75, 90 และ 105 มิลลิลิตรต่อน้ำ 1,000 มิลลิลิตร ผลการวิจัยพบว่า การใช้ปุ๋ยหมักชีวภาพจากใบยูคาลิปตัส 105 มิลลิลิตรต่อน้ำ 1,000 มิลลิลิตร ทำให้ผักกาดขาวมีค่าเฉลี่ยความสูง ความกว้างใบ ความยาวใบ และน้ำหนักสดมากที่สุด ในขณะที่การใช้ปุ๋ยทำให้ผักกาดขาวมีผลผลิตต่ำที่สุด จึงกล่าวได้ว่า การใช้ปุ๋ยหมักชีวภาพจากใบยูคาลิปตัสในอัตรา 105 มิลลิลิตรต่อน้ำ 1,000 มิลลิลิตร สามารถช่วยเพิ่มผลผลิตของผักกาดขาวได้เป็นอย่างดี จากผลการศึกษาข้างต้น พบว่า ปัจจัยที่เกี่ยวข้องกับการเจริญของผักกาดขาวไคโตเกียวกว้างขึ้นอยู่กับน้ำหมักชีวภาพและปริมาณของปุ๋ยหมัก นอกจากนี้ Posalak (2016) และ Duangsumrit and Mingkwan (2018) ได้สรุปในงานวิจัยตรงกันว่า ผักกาดขาวไคโตเกียวกว้างสามารถเจริญได้ทั้งบนดินและในน้ำ โดยเกษตรกรได้พบปัญหาเกี่ยวกับอัตราการรอดที่ต่ำของผักกาดขาวไคโตเกียวกว้างในระยะเพาะกล้า (25-30 วัน) ดังนั้นผู้วิจัยจึงมีแนวคิดที่จะศึกษาผลของชนิดของดินและปริมาณการให้น้ำที่มีต่อการเจริญของต้นกล้าผักกาดขาวไคโตเกียวกว้างในระยะเพาะกล้า

28 วัน เนื่องจากเป็นระยะเพาะกล้าที่เหมาะสมที่สุด โดยศึกษาอัตราการรอด ต้นกล้าผักกาดขาว ความสูงของต้น และความยาวราก ผลการศึกษาครั้งนี้จะช่วยแก้ปัญหาให้แก่เกษตรกรที่ทำการปลูกผักกาดขาวไคโตเกียวกว้าง ช่วยให้เกษตรกรทราบว่า ดินชนิดใดและการให้น้ำระดับใดที่เหมาะสมต่อการเจริญในระยะเพาะกล้าของผักกาดขาวไคโตเกียวกว้าง ซึ่งจะช่วยให้เพิ่มผลผลิตและรายได้ให้แก่เกษตรกรในอนาคตต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

ศึกษาชนิดของดินและปริมาณการให้น้ำต่อการเจริญของต้นกล้าผักกาดขาวไคโตเกียวกว้าง มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง โดยเริ่มต้นเพาะเมล็ดผักกาดขาวไคโตเกียวกว้าง พันธุ์เบกาน่า 6803 ระหว่างวันที่ 6 กันยายนถึง 3 ตุลาคม พ.ศ. 2562 รวมระยะเวลาเพาะต้นกล้า 28 วัน วางแผนการทดลองแบบ 3×3 แฟกทอเรียลชนิดสุ่มสมบูรณ์ (3×3 Factorial in completely randomized design) จำนวน 3 ซ้ำๆ ละ 15 ต้น มีปัจจัยในการปลูก คือ ปัจจัยที่ 1 ดิน 3 ชนิด ได้แก่ ดินร่วน ดินทราย และดินร่วนปนทราย ปัจจัยที่ 2 การให้น้ำ 3 ระดับ ได้แก่ 10, 20 และ 30 มิลลิลิตรต่อวัน ดังนั้นจะมีอิทธิพลรวม 9 รูปแบบ ได้แก่ ดินร่วนโดยให้น้ำ 10 มิลลิลิตรต่อวัน ดินร่วนโดยให้น้ำ 20 มิลลิลิตรต่อวัน ดินร่วนโดยให้น้ำ 30 มิลลิลิตรต่อวัน ดินทรายโดยให้น้ำ 10 มิลลิลิตรต่อวัน ดินทรายโดยให้น้ำ 20 มิลลิลิตรต่อวัน ดินทรายโดยให้น้ำ 30 มิลลิลิตรต่อวัน ดินร่วนปนทรายโดยให้น้ำ 10 มิลลิลิตรต่อวัน ดินร่วนปนทรายโดยให้น้ำ 20 มิลลิลิตรต่อวัน และดินร่วนปนทรายโดยให้น้ำ 30 มิลลิลิตรต่อวัน

1. การเตรียมเมล็ด

1.1 คัดเลือกเมล็ดผักกาดขาวไคโตเกียวกว้าง พันธุ์เบกาน่า 6803 จำนวน 405 เมล็ด ผลิตโดยบริษัท เพื่อนเกษตรกร จำกัด มีร้อยละการงอกไม่ต่ำกว่า

ร้อยละ 70 และวันหมดอายุ คือ วันที่ 1 กรกฎาคม พ.ศ. 2564

1.2 จัดเมล็ดผักกาดขาวไคโตเกียวยเป็นชุดๆ ละ 15 เมล็ด จำนวน 27 ชุด ใส่ในถุงพลาสติกขนาด 2×5 เซนติเมตร เพื่อแยกเมล็ดเป็นชุด พร้อมทั้งติดหมายเลข 1-27 ไว้ที่ถุง เพื่อใช้ในการสุ่มหน่วยทดลองให้ได้รับปัจจัยในการปลูกต่อไป

2. การเตรียมอุปกรณ์ปลูก

2.1 เตรียมถุงดำที่ใช้ปลูกขนาดกว้าง 4 นิ้ว ยาว 4 นิ้ว และสูง 8 นิ้ว จำนวน 27 ใบ

2.2 เตรียมดิน 3 ชนิดๆ ละ 9 ถุง ได้แก่ ดินร่วน ดินทราย และดินร่วนปนทราย (อัตราส่วนดินร่วน: ทราย เป็น 1 : 1 หรือน้ำหนักดินร่วนและทรายเท่ากัน คือ 100 กรัม/ถุง) บรรจุลงถุงเพาะกล้า น้ำหนัก 200 กรัม/ถุง กลี่ยดินให้ทั่วถุงจะได้ดินในแต่ละถุงมีความหนาประมาณ 4 เซนติเมตร รดน้ำให้ดินมีความชุ่มชื้น

2.3 เตรียมระดับน้ำ 3 ระดับ ได้แก่ 10, 20 และ 30 มิลลิลิตรต่อวัน รดน้ำเช้าและเย็น ครั้งละ 5, 10 และ 15 มิลลิลิตร โดยใช้หลอดฉีดยาขนาด 20 มิลลิลิตร เป็นอุปกรณ์ควบคุมระดับน้ำที่จะใช้รดเมล็ดผักกาดขาวไคโตเกียวยต่อครั้งในแต่ละวัน

2.4 ชุดปลูกจะมีจำนวน 27 ชุด ได้แก่ ดิน 3 ชนิด $\times$ การให้น้ำ 3 ระดับ $\times$ การทดลองซ้ำ 3 ครั้ง

3. วิธีการปลูกและการดูแล

3.1 สุ่มเมล็ดผักกาดขาวไคโตเกียวยที่จัดไว้เป็นชุดในถุง ชุดละ 15 เมล็ด จำนวน 27 ชุด ซึ่งมีหมายเลข 1-27 ติดไว้ที่ถุง ลงปลูกในชุดปลูกเพื่อให้

ได้รับปัจจัยในการปลูก คือ ดิน 3 ชนิด (ดินร่วน ดินทราย และดินร่วนปนทราย) และการให้น้ำ 3 ระดับ (10, 20 และ 30 มิลลิลิตรต่อวัน) อย่างสุ่มสมบูรณ์จำนวน 3 ซ้ำ (Pongpomsup, 2016)

3.2 นำชุดปลูกทั้ง 27 ชุดวางในโรงเรือนเพาะชำที่โดนแสงอาทิตย์ตลอดระยะเวลาทำการทดลอง 28 วัน คือ วันที่ 6 กันยายนถึง 3 ตุลาคม พ.ศ. 2562 และทำการดูแลรักษาลักษณะเดียวกัน โดยไม่มีการให้ปุ๋ยใดๆ เพิ่มเติม

3.3 รดน้ำ 2 ครั้ง เวลา 7.30 น. และ 17.30 น. ครั้งละ 5, 10 และ 15 มิลลิลิตร รวม 10, 20 และ 30 มิลลิลิตร ต่อวัน

4. การเก็บข้อมูล

เก็บข้อมูลการเจริญของต้นกล้าผักกาดขาวไคโตเกียวยที่อายุ 28 วัน ในวันที่ 4 ตุลาคม พ.ศ. 2562 โดยการชั่งตวงจากเมล็ดที่งอกเท่านั้น นำต้นกล้าที่ได้ไปล้างน้ำทำความสะอาดเพื่อเอาดินออก ผึ่งให้สะเด็ดน้ำ นับจำนวนต้นกล้าที่รอดจากการปลูกผักกาดขาวไคโตเกียวยทั้งหมด 15 เมล็ด/ชุดปลูก เพื่อคำนวณเป็นร้อยละการรอดดังสมการที่ (1) โดยต้นกล้าที่รอด คือ ต้นกล้าที่มีลักษณะอวบน้ำทั้งต้น ชั่งน้ำหนักสด (กรัม) ด้วยเครื่องชั่งน้ำหนัก วัดความสูงของต้น (เซนติเมตร) และความยาวราก (เซนติเมตร) ด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ (Vernier Caliper) โดยความสูงของต้นจะวัดจากลำต้นที่ต่อจากส่วนรากถึงปลายที่สูงที่สุด และความยาวรากจะวัดจากโคนต้นถึงปลายรากเส้นที่ยาวที่สุด

$$\text{ร้อยละการรอด} = \frac{\text{จำนวนต้นกล้าที่รอด}}{\text{จำนวนต้นกล้าที่ปลูก}} \times 100 \quad (1)$$

15

5. การวิเคราะห์ข้อมูล

5.1 นำข้อมูลการเจริญ ได้แก่ ร้อยละการรอด น้ำหนักสด ความสูงของต้น และความยาวราก

มาวิเคราะห์ความแปรปรวน (Analysis of variance: ANOVA) แบบแฟกทอเรียลชนิดสุ่มสมบูรณ์ที่มี 2 ปัจจัย (Riansut, 2019) โดยพิจารณาการมีนัยสำคัญ

ตารางที่ 1 ร้อยละการรอดของต้นกล้าผักกาดขาวไคโตเกียวก่อนอายุ 28 วัน ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน และผล การเปรียบเทียบพหุคูณด้วยการทดสอบพหุพิสัยของดันแคน

	ปัจจัย	ร้อยละการรอด	F-test	p-value
ชนิดของดิน	ดินร่วน	69.63 ^a ± 14.19	41.145	0.000**
	ดินทราย	25.93 ^b ± 24.82		
	ดินร่วนปนทราย	11.11 ^b ± 8.16		
การให้น้ำ	10 มิลลิลิตร/วัน	39.26 ± 30.08	3.146	0.067 ^{ns}
	20 มิลลิลิตร/วัน	41.48 ± 28.83		
	30 มิลลิลิตร/วัน	25.93 ± 32.73		
อิทธิพลร่วม	ดินร่วน, 10 มิลลิลิตร/วัน	62.22 ± 20.37	2.658	0.067 ^{ns}
	ดินร่วน, 20 มิลลิลิตร/วัน	77.78 ± 10.18		
	ดินร่วน, 30 มิลลิลิตร/วัน	68.89 ± 10.18		
	ดินทราย, 10 มิลลิลิตร/วัน	46.67 ± 30.55		
	ดินทราย, 20 มิลลิลิตร/วัน	26.67 ± 13.34		
	ดินทราย, 30 มิลลิลิตร/วัน	4.45 ± 3.85		
	ดินร่วนปนทราย, 10 มิลลิลิตร/วัน	8.89 ± 3.85		
	ดินร่วนปนทราย, 20 มิลลิลิตร/วัน	20.00 ± 6.67		
	ดินร่วนปนทราย, 30 มิลลิลิตร/วัน	4.45 ± 3.85		

** แทนการมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.01

ns แทนไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

ค่าเฉลี่ยตามแนวตั้งที่มีตัวอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.01 โดยวิธีการทดสอบพหุพิสัยของดันแคน

จากการนำความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการ วิเคราะห์ความแปรปรวนของร้อยละการรอดของ ผักกาดขาวไคโตเกียวมารวบรวมข้อสมมุติ พบว่า ความคลาดเคลื่อนของร้อยละการรอดของผักกาดขาว ไคโตเกียวก่อนปลูกด้วยดินที่แตกต่างกันทั้ง 3 ชนิด มี การแจกแจงปกติและมีความแปรปรวนเท่ากันที่ ระดับนัยสำคัญ 0.01 (ดินร่วน: S-W statistic = 0.979, p -value = 0.961, ดินทราย : S-W statistic = 0.955, p -value = 0.740, ดินร่วนปนทราย : S-W statistic = 0.978, p -value = 0.952, Levene statistic = 2.351, p -value = 0.117) ความคลาดเคลื่อนของร้อยละการรอด

ของผักกาดขาวไคโตเกียวก่อนปลูกด้วยการให้น้ำที่ แตกต่างกันทั้ง 3 ระดับ มีการแจกแจงปกติและมี ความแปรปรวนเท่ากันที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 (10 มิลลิลิตร : S-W statistic = 0.959, p -value = 0.787, 20 มิลลิลิตร : S-W statistic = 0.962, p -value = 0.815, 30 มิลลิลิตร : S-W statistic = 0.922, p -value = 0.408, Levene statistic = 2.794, p -value = 0.081) จากผล การตรวจสอบข้อสมมุติของการวิเคราะห์ความ แปรปรวน พบว่า ข้อสมมุติเป็นจริง ทำให้ผลการ วิเคราะห์ความแปรปรวนที่ได้ในตารางที่ 1 มี ความถูกต้อง น่าเชื่อถือ

2. น้ำหนักสด

ผลการศึกษาพบว่า การเพาะต้นกล้าผักกาดขาวไดโตเกียวนในดินร่วนให้ค่าเฉลี่ยของน้ำหนักสดสูงสุดที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 มีค่าเท่ากับ 0.019 กรัมต่อต้น ในขณะที่การเพาะกล้าในดินทรายและดินร่วนปนทรายให้ค่าเฉลี่ยของน้ำหนักสดไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.01 มีค่าเท่ากับ

0.010 และ 0.008 กรัมต่อต้น ตามลำดับ สำหรับการให้น้ำ พบว่า ปริมาณน้ำที่ได้รับไม่มีผลต่อค่าเฉลี่ยของน้ำหนักสดที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 แต่มีผลที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 รวมถึงไม่พบอิทธิพลร่วมระหว่างชนิดของดินและปริมาณการให้น้ำต่อน้ำหนักสด (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 2 น้ำหนักสดของต้นกล้าผักกาดขาวไดโตเกียวนที่อายุ 28 วัน (กรัมต่อต้น) ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนและผลการเปรียบเทียบพหุคูณด้วยการทดสอบพหุพิสัยของคันแคน

	ปัจจัย	น้ำหนักสด (กรัม)	F-test	p-value
ชนิดของดิน	ดินร่วน	0.019 ^a ± 0.006	17.226	0.000**
	ดินทราย	0.010 ^b ± 0.004		
	ดินร่วนปนทราย	0.008 ^b ± 0.005		
การให้น้ำ	10 มิลลิลิตร/วัน	0.012 ± 0.006	4.921	0.020*
	20 มิลลิลิตร/วัน	0.015 ± 0.008		
	30 มิลลิลิตร/วัน	0.009 ± 0.006		
อิทธิพลร่วม	ดินร่วน, 10 มิลลิลิตร/วัน	0.018 ± 0.007	0.452	0.770 ^{ns}
	ดินร่วน, 20 มิลลิลิตร/วัน	0.024 ± 0.004		
	ดินร่วน, 30 มิลลิลิตร/วัน	0.015 ± 0.003		
	ดินทราย, 10 มิลลิลิตร/วัน	0.011 ± 0.002		
	ดินทราย, 20 มิลลิลิตร/วัน	0.011 ± 0.002		
	ดินทราย, 30 มิลลิลิตร/วัน	0.007 ± 0.006		
	ดินร่วนปนทราย, 10 มิลลิลิตร/วัน	0.007 ± 0.002		
	ดินร่วนปนทราย, 20 มิลลิลิตร/วัน	0.011 ± 0.006		
	ดินร่วนปนทราย, 30 มิลลิลิตร/วัน	0.005 ± 0.004		

** แทนการมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.01

* แทนการมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.05

ns แทนไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

ค่าเฉลี่ยตามแนวตั้งที่มีตัวอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.01 โดยวิธีการทดสอบพหุพิสัยของคันแคน

จากการนำความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของน้ำหนักสดของ

ผักกาดขาวไดโตเกียวนมาตรวจสอบข้อสมมุติ พบว่าความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักสดของผักกาดขาว

ไคโตเกียวมื้อปลูกด้วยดินที่แตกต่างกันทั้ง 3 ชนิด มีการแจกแจงปกติและมีความแปรปรวนเท่ากันที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 (ดินร่วน : S-W statistic = 0.952, p -value = 0.712, ดินทราย : S-W statistic = 0.849, p -value = 0.072, ดินร่วนปนทราย : S-W statistic = 0.888, p -value = 0.191, Levene statistic = 0.485, p -value = 0.621) ความคลาดเคลื่อนของน้ำหนักรากของผักกาดขาวไคโตเกียวมื้อปลูกด้วยการให้น้ำที่แตกต่างกันทั้ง 3 ระดับ มีการแจกแจงปกติและมีความแปรปรวนเท่ากันที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 (10 มิลลิลิตร : S-W statistic = 0.930, p -value = 0.483, 20 มิลลิลิตร : S-W statistic = 0.935, p -value = 0.526, 30 มิลลิลิตร : S-W statistic = 0.831, p -value = 0.046, Levene statistic = 0.048, p -value = 0.953) จากผลการตรวจสอบข้อสมมุติของการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่า ข้อสมมุติเป็นจริง ทำให้ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ได้ในตารางที่ 2 มีความถูกต้อง น่าเชื่อถือ

3. ความสูงของต้น

ผลการศึกษาพบว่า ชนิดของดินและปริมาณการให้น้ำที่แตกต่างกัน ไม่ทำให้ค่าเฉลี่ยของความสูงของต้นผักกาดขาวไคโตเกียวมื้อปลูกแตกต่างกัน รวมถึงไม่พบอิทธิพลร่วมระหว่างชนิดของดินและปริมาณการให้น้ำต่อความสูงของต้น (ตารางที่ 3)

จากการนำความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของความสูงของต้นผักกาดขาวไคโตเกียวมื้อปลูกตรวจสอบข้อสมมุติ พบว่า ความคลาดเคลื่อนของความสูงของต้นผักกาดขาวไคโตเกียวมื้อปลูกด้วยดินที่แตกต่างกันทั้ง 3 ชนิด มีการแจกแจงปกติและมีความแปรปรวนเท่ากันที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 (ดินร่วน : S-W statistic = 0.846, p -value = 0.067, ดินทราย : S-W statistic = 0.889, p -value = 0.195, ดินร่วนปนทราย : S-W statistic = 0.826, p -value = 0.040, Levene statistic =

1.248, p -value = 0.305) ความคลาดเคลื่อนของความสูงของต้นผักกาดขาวไคโตเกียวมื้อปลูกด้วยการให้น้ำที่แตกต่างกันทั้ง 3 ระดับ มีการแจกแจงปกติและมีความแปรปรวนเท่ากันที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 (10 มิลลิลิตร : S-W statistic = 0.976, p -value = 0.938, 20 มิลลิลิตร : S-W statistic = 0.884, p -value = 0.172, 30 มิลลิลิตร : S-W statistic = 0.898, p -value = 0.240, Levene statistic = 6.687, p -value = 0.017) จากผลการตรวจสอบข้อสมมุติของการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่า ข้อสมมุติเป็นจริง ทำให้ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ได้ในตารางที่ 3 มีความถูกต้อง น่าเชื่อถือ

4. ความยาวราก

ผลการศึกษาพบว่า การเพาะต้นกล้าผักกาดขาวไคโตเกียวมื้อปลูกในดินร่วนและดินร่วนปนทราย ให้ค่าเฉลี่ยของความยาวรากสูงไม่แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 มีค่าเท่ากับ 2.58 และ 1.88 เซนติเมตร ตามลำดับ ในขณะที่การเพาะกล้าในดินทรายให้ค่าเฉลี่ยของความยาวรากน้อยที่สุดที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 มีค่าเท่ากับ 0.44 เซนติเมตร สำหรับการให้น้ำพบว่า ปริมาณน้ำที่ได้รับไม่มีผลต่อค่าเฉลี่ยของความยาวราก รวมถึงไม่พบอิทธิพลร่วมระหว่างชนิดของดินและปริมาณการให้น้ำต่อความยาวราก (ตารางที่ 4)

จากการนำความคลาดเคลื่อนที่ได้จากการวิเคราะห์ความแปรปรวนของความยาวรากของผักกาดขาวไคโตเกียวมื้อปลูกตรวจสอบข้อสมมุติ พบว่า ความคลาดเคลื่อนของความยาวรากของผักกาดขาวไคโตเกียวมื้อปลูกด้วยดินที่แตกต่างกันทั้ง 3 ชนิด มีการแจกแจงปกติและมีความแปรปรวนเท่ากันที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 (ดินร่วน : S-W statistic = 0.876, p -value = 0.143, ดินทราย : S-W statistic = 0.924, p -value = 0.429, ดินร่วนปนทราย : S-W statistic = 0.942, p -value = 0.607, Levene statistic =

1.816, p -value = 0.184) ความคลาดเคลื่อนของความยาวรากของผักกาดขาวไดโตเกียวยเมื่อปลูกด้วยการให้น้ำที่แตกต่างกันทั้ง 3 ระดับ มีการแจกแจงปกติและมีความแปรปรวนเท่ากันที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 (10 มิลลิลิตร: S-W statistic = 0.856, p -value = 0.088, 20 มิลลิลิตร : S-W statistic = 0.859, p -value = 0.092, 30

มิลลิลิตร : S-W statistic = 0.984, p -value = 0.983, Levene statistic = 2.362, p -value = 0.116) จากผลการตรวจสอบข้อสมมุติของการวิเคราะห์ความแปรปรวน พบว่า ข้อสมมุติเป็นจริง ทำให้ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนที่ได้ในตารางที่ 4 มีความถูกต้อง น่าเชื่อถือ

ตารางที่ 3 ความสูงของต้นกล้าผักกาดขาวไดโตเกียวยที่อายุ 28 วัน (เซนติเมตร) ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน และผลการเปรียบเทียบพหุคูณด้วยการทดสอบพหุพิสัยของด้นแคน

ปัจจัย		ความสูงของต้น (เซนติเมตร)	F-test	p -value
ชนิดของดิน	ดินร่วน	6.13 ± 0.73	0.410	0.670 ^{ns}
	ดินทราย	6.17 ± 2.44		
	ดินร่วนปนทราย	5.45 ± 2.08		
การให้น้ำ	10 มิลลิลิตร/วัน	6.16 ± 0.63	2.405	0.119 ^{ns}
	20 มิลลิลิตร/วัน	6.76 ± 0.61		
	30 มิลลิลิตร/วัน	4.84 ± 2.87		
อิทธิพลร่วม	ดินร่วน, 10 มิลลิลิตร/วัน	5.80 ± 0.48	0.288	0.882 ^{ns}
	ดินร่วน, 20 มิลลิลิตร/วัน	6.85 ± 0.57		
	ดินร่วน, 30 มิลลิลิตร/วัน	5.75 ± 0.68		
	ดินทราย, 10 มิลลิลิตร/วัน	6.58 ± 0.90		
	ดินทราย, 20 มิลลิลิตร/วัน	7.28 ± 0.35		
	ดินทราย, 30 มิลลิลิตร/วัน	4.67 ± 4.16		
	ดินร่วนปนทราย, 10 มิลลิลิตร/วัน	6.11 ± 0.28		
	ดินร่วนปนทราย, 20 มิลลิลิตร/วัน	6.15 ± 0.24		
	ดินร่วนปนทราย, 30 มิลลิลิตร/วัน	4.10 ± 3.61		

ns แทนไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

ตารางที่ 4 ความยาวรากของต้นกล้าผักกาดขาวไคโตเกียวกวที่อายุ 28 วัน (เซนติเมตร) ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวน และผลการเปรียบเทียบพหุคูณด้วยการทดสอบพหุพิสัยของดันแคน

	ปัจจัย	ความยาวราก (เซนติเมตร)	F-test	p-value
ชนิดของดิน	ดินร่วน	2.58 ^a ± 0.58	30.295	0.000**
	ดินทราย	0.44 ^b ± 0.24		
	ดินร่วนปนทราย	1.88 ^a ± 0.85		
การให้น้ำ	10 มิลลิลิตร/วัน	1.70 ± 1.05	2.637	0.099 ^{ns}
	20 มิลลิลิตร/วัน	1.92 ± 1.08		
	30 มิลลิลิตร/วัน	1.28 ± 1.13		
อิทธิพลรวม	ดินร่วน, 10 มิลลิลิตร/วัน	2.57 ± 0.12	0.541	0.708 ^{ns}
	ดินร่วน, 20 มิลลิลิตร/วัน	2.83 ± 0.76		
	ดินร่วน, 30 มิลลิลิตร/วัน	2.33 ± 0.76		
	ดินทราย, 10 มิลลิลิตร/วัน	0.41 ± 0.10		
	ดินทราย, 20 มิลลิลิตร/วัน	0.60 ± 0.10		
	ดินทราย, 30 มิลลิลิตร/วัน	0.32 ± 0.39		
	ดินร่วนปนทราย, 10 มิลลิลิตร/วัน	2.11 ± 0.69		
	ดินร่วนปนทราย, 20 มิลลิลิตร/วัน	2.32 ± 0.09		
	ดินร่วนปนทราย, 30 มิลลิลิตร/วัน	1.20 ± 1.15		

** แทนการมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.01

ns แทนไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

ค่าเฉลี่ยตามแนวตั้งที่มีตัวอักษรต่างกันมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับ 0.01 โดยวิธีการทดสอบพหุพิสัยของดันแคน

จากผลการศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นว่า ดินร่วนมีความเหมาะสมกับการเพาะกล้าผักกาดขาวไคโตเกียวกว เนื่องจากให้ค่าเฉลี่ยของร้อยละการรอดน้ำหนักรอด และความยาวรากสูงที่สุด สอดคล้องกับการศึกษาของ Duangsumrit and Mingkwan (2018) ที่รายงานว่าการปลูกผักกาดขาวไคโตเกียวกวที่เหมาะสมกับการปลูกผักกาดขาวไคโตเกียวกว คือ ดินร่วน อย่างไรก็ตามการเพาะกล้าผักกาดขาวไคโตเกียวกวสามารถเพาะได้ในดินเหนียว แต่ต้องทำให้ดินเหนียวสามารถระบายน้ำได้ดี สำหรับปริมาณการให้น้ำสำหรับการทดลองนี้ พบว่า

ไม่มีผลต่อร้อยละการรอด น้ำหนักรอด ความสูงของต้น และความยาวราก สอดคล้องกับการศึกษาของ Duangsumrit and Mingkwan (2018), Posalak (2016) และ Jaichuen *et al.* (n.d.) ที่รายงานว่าการปลูกผักกาดขาวไคโตเกียวกวควรรดน้ำอย่างน้อยวันละ 2 ครั้ง ไม่ควรขาดน้ำ และให้ได้รับแสงแดดตลอดทั้งวัน ซึ่งการให้น้ำที่ใช้ศึกษาครั้งนี้อาจมีปริมาณการให้ที่ใกล้เคียงกันมากเกินไป จึงทำให้ไม่เห็นความแตกต่างของระดับน้ำต่อผลการทดลอง อย่างไรก็ตามเมื่อพิจารณาการให้น้ำที่ระดับ 20 มิลลิลิตรต่อวัน

พบว่า ให้ค่าเฉลี่ยของร้อยละการรอด น้ำหนักสด ความสูงของต้น และความยาวรากสูงกว่าการให้น้ำ อีก 2 ระดับที่ศึกษา แต่เป็นการสูงกว่าอย่างไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ

สรุป

การศึกษาชนิดของดินและปริมาณการให้น้ำที่เหมาะสมต่อการเจริญในระยะเพาะกล้า 28 วัน ของผักกาดขาวไดโตเกียว ผู้วิจัยได้วางแผนการทดลองแบบ 3×3 แฟกทอเรียลชนิดสุ่มสมบูรณ์ จำนวน 3 ซ้ำ ซ้ำละ 15 ต้น ทำการทดลองที่มหาวิทยาลัยทักษิณ วิทยาเขตพัทลุง ระหว่างวันที่ 6 กันยายนถึง 3 ตุลาคม พ.ศ. 2562 โดยมีปัจจัยในการปลูก 2 ปัจจัย คือ ชนิดของดิน 3 ชนิด ได้แก่ ดินร่วน ดินทราย และดินร่วนปนทราย และการให้น้ำ 3 ระดับ ได้แก่ 10, 20 และ 30 มิลลิลิตรต่อวัน ผลการวิจัยพบว่า

1. ดินร่วนทำให้ค่าเฉลี่ยของร้อยละการรอดของผักกาดขาวไดโตเกียวสูงที่สุดที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 แต่ดินทรายและดินร่วนปนทรายให้ค่าเฉลี่ยของร้อยละการรอดไม่แตกต่างกัน โดยปริมาณการให้น้ำไม่มีผลต่อค่าเฉลี่ยของร้อยละการรอดและไม่มีอิทธิพลร่วมระหว่างชนิดของดินและปริมาณการให้น้ำต่อร้อยละการรอด

2. ดินร่วนทำให้ค่าเฉลี่ยของน้ำหนักสดของผักกาดขาวไดโตเกียวสูงที่สุดที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 แต่ดินทรายและดินร่วนปนทรายให้ค่าเฉลี่ยของน้ำหนักสดไม่แตกต่างกัน โดยปริมาณการให้น้ำไม่มีผลต่อค่าเฉลี่ยของน้ำหนักสดที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 แต่มีผลที่ระดับนัยสำคัญ 0.05 และไม่มีอิทธิพลร่วมระหว่างชนิดของดินและปริมาณการให้น้ำต่อน้ำหนักสด

3. ชนิดของดินและปริมาณการให้น้ำที่แตกต่างกัน ไม่ทำให้ค่าเฉลี่ยของความสูงของต้น ผักกาดขาวไดโตเกียวแตกต่างกัน และไม่มีอิทธิพล

ร่วมระหว่างชนิดของดินและปริมาณการให้น้ำต่อความสูงของต้น

4. ดินร่วนและดินร่วนปนทรายทำให้ค่าเฉลี่ยของความยาวรากสูงไม่แตกต่างกันที่ระดับนัยสำคัญ 0.01 แต่ดินทรายให้ค่าเฉลี่ยของความยาวรากต่ำที่สุด โดยการให้น้ำไม่มีผลต่อค่าเฉลี่ยของความยาวราก และไม่มีอิทธิพลร่วมระหว่างชนิดของดินและปริมาณการให้น้ำต่อความยาวราก

จากผลการวิจัยทั้ง 4 ข้อข้างต้น สรุปได้ว่า ดินร่วนเป็นวัสดุเพาะกล้าที่มีความเหมาะสมในการเพาะกล้าผักกาดขาวไดโตเกียวมากที่สุด เนื่องจากให้ค่าเฉลี่ยของร้อยละการรอด น้ำหนักสด และความยาวรากสูงที่สุด ซึ่งมีค่าเท่ากับร้อยละ 69.63, 0.019 กรัม และ 2.58 เซนติเมตร ตามลำดับ แต่ถ้าพิจารณาเพียงความยาวรากที่สูงที่สุด พบว่า เกษตรกรสามารถเพาะกล้าผักกาดขาวไดโตเกียวโดยใช้ดินร่วนปนทรายก็ได้ ซึ่งจะทำให้ความยาวรากต่ำกว่าการเพาะกล้าโดยใช้ดินร่วนเล็กน้อยแบบไม่มีนัยสำคัญทางสถิติ และถ้าพิจารณาเพียงความสูงของต้น พบว่า เกษตรกรสามารถเพาะกล้าผักกาดขาวไดโตเกียวโดยใช้ดินชนิดใดก็ได้ ซึ่งจะทำให้ความสูงของต้นไม่แตกต่างกันทางสถิติ สำหรับปริมาณการให้น้ำ พบว่า ไม่มีผลต่อค่าเฉลี่ยของร้อยละการรอด น้ำหนักสด ความสูงของต้น และความยาวราก รวมถึงไม่มีอิทธิพลร่วมระหว่างชนิดของดินและปริมาณการให้น้ำต่อผลการทดลองทั้งหมด

เอกสารอ้างอิง

Duangsumrit, A. and Mingkwan, A. 2018. Application of Appropriate Ratio of Bio-Compost from Eucalyptus Leaf on Growth of Tokyo Cabbage, Bekana. Bachelor's Special Issue (Department of Agriculture), Buriram Rajabhat University. (in Thai)

- Jaichuen, T., Iamjaidee, L. Janasil, S. and Phaiyklin, J. n.d. **Hydroponics**. Available Source: <https://hydroponicsgarden.weebly.com/-hydroponic.html>, September 17, 2019. (in Thai)
- Pongpornsup, V. 2016. Design of Experiment. **For Quality Magazine** 23(218): 17-19. (in Thai)
- Posalak, K. 2016. Effects of Bioextract from Water Hyacinth (*Eichhornia crassipes* (C. Mart.) Solms) and Golden Apple Snail (*Pomacea canaliculata* Lamarck) on Photosynthetic Pigment Contents and Ascorbic Acid in Chinese Cabbage (*Brassica chinensis* var. *pekinensis* Rupr.) Grown In Hydroponic Culture. Master of Science (Biology), Burapha University. (in Thai)
- Riansut, W. 2019. **Experimental Designs**. Thaksin University Book Center, Songkhla. (in Thai)

ผลของพันธุ์ข้าวโพด ชั้นเปลือกข้าวโพดและวิธีการแยกเส้นใย ต่อองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยเปลือกข้าวโพด

The Effects of Corn Varieties, Layers of Corn Husks and Fiber Extraction Methods on Chemical Compositions of Corn Husk Fibers

วัลภา แต้มทอง* สุธีลักษณ์ ไกรสุวรรณ และ ขจีจรัส ภิรมย์ธรรมศิริ

Walapa Tamthong*, Suteeluk Kraisuwan and Kajjarus Piromthamsiri

Received: 25 June 2020, Revised: 30 August 2020, Accepted: 8 December 2020

บทคัดย่อ

การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของพันธุ์ข้าวโพด ชั้นเปลือกข้าวโพดและวิธีการแยกเส้นใยต่อองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยจากเปลือกข้าวโพด โดยทดลองใช้เปลือกของฝักข้าวโพด 3 พันธุ์ ได้แก่ พันธุ์อินทรี 2 พันธุ์ไฮบริด 3 และพันธุ์เอทีเอส 12 ชั้นเปลือกข้าวโพด 2 ชั้น ได้แก่ เปลือกชั้นนอกและเปลือกชั้นใน และวิธีการแยกเส้นใย 6 วิธี ได้แก่ วิธีที่ 1 ใช้สารละลายด่างความเข้มข้น 2.5 กรัมต่อลิตร วิธีที่ 2 ใช้สารละลายด่างความเข้มข้น 5.0 กรัมต่อลิตร วิธีที่ 3 ใช้สารละลายด่างความเข้มข้น 2.5 กรัมต่อลิตร และสารละลายเอนไซม์ 0.5% วิธีที่ 4 ใช้สารละลายด่างความเข้มข้น 2.5 กรัมต่อลิตร และสารละลายเอนไซม์ 1.0% วิธีที่ 5 ใช้สารละลายด่างความเข้มข้น 5.0 กรัมต่อลิตร และสารละลายเอนไซม์ 0.5% และวิธีที่ 6 ใช้สารละลายด่างความเข้มข้น 5.0 กรัมต่อลิตร และสารละลายเอนไซม์ 1.0% จัดตั้งทดลองแบบ $3 \times 2 \times 6$ แฟกทอเรียล ในแผนการทดลองแบบบล็อกสุ่มสมบูรณ์ ผลการศึกษา พบว่า พันธุ์ข้าวโพด ชั้นเปลือกข้าวโพด วิธีการแยกเส้นใย ปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าวโพดกับชั้นเปลือกข้าวโพด พันธุ์ข้าวโพดกับวิธีการแยกเส้นใย ชั้นเปลือกข้าวโพดกับวิธีการแยกเส้นใย และพันธุ์ข้าวโพด ชั้นเปลือกข้าวโพด กับวิธีการแยกเส้นใย มีผลต่อปริมาณเซลลูโลส ปริมาณเฮมิเซลลูโลส และปริมาณลิกนินของเส้นใย มีอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

คำสำคัญ: พันธุ์ข้าวโพด, ชั้นเปลือกข้าวโพด, วิธีการแยกเส้นใย, องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยเปลือกข้าวโพด

ภาควิชาคหกรรมศาสตร์ คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ 50 ถนนงามวงศ์วาน แขวงลาดยาว เขตจตุจักร กรุงเทพมหานคร 10900
Department of Home Economics, Faculty of Agriculture, Kasetsart University, 50 Ngamwongwan Road, Ladyao, Chatuchak, Bangkok 10900, Thailand.

* ผู้เขียนที่ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): agrwpt@ku.ac.th Tel: 09 4852 3663

ABSTRACT

The objective of this research was to study the effects of corn varieties, layers of corn husks, and fiber extraction methods on chemical compositions of corn husk fibers. Three corn varieties (Insee 2, Hi-brix-3, and ATS 12), two layers of corn husks (outer and inner), and, six fiber extraction methods (Method 1 using 2.5 g/l alkaline solution, Method 2 using 5.0 g/l alkaline solution, Method 3 using 2.5 g/l alkaline and 0.5% enzyme solution, Method 4 using 2.5 g/l alkaline and 1.0% enzyme solution, Method 5 using 5.0 g/l alkaline and 0.5% enzyme solution, and Method 6 using 5.0 g/l alkaline and 1.0% enzyme solution) were utilized. The study employed $3 \times 2 \times 6$ factorial experiments in randomized complete block design. The results showed that corn varieties, layers of corn husks, fiber extraction methods, interaction between corn varieties and layers of corn husks, interaction between corn varieties and fiber extraction methods, interaction between layers of corn husks and fiber extraction methods, and interaction between corn varieties, layers of corn husks, and fiber extraction methods, had a statistically significant effect on cellulose, hemicellulose, and lignin content.

Key words: corn varieties, layers of corn husks, fiber extraction methods, chemical compositions of corn husk fibers

บทนำ

ข้าวโพดหวาน (sweet corn) เป็นสินค้าเกษตรที่ประเทศไทยมีศักยภาพในการผลิตเพื่อจำหน่ายทั้งในประเทศและต่างประเทศ เนื่องจากมีสภาพพื้นที่และสภาพแวดล้อมเหมาะสม (Boonrueang and Chankroot, 2008) ในปี 2561 ประเทศไทยมีเนื้อที่ปลูกข้าวโพดหวานทั้งสิ้น 160,556 ไร่ ผลผลิตรวม 195,496 ตัน (Information Technology and Communication Center, Department of Agricultural Extension, Ministry of Agriculture and Cooperatives, 2019) โดยพันธุ์ที่นิยมรับประทานและมีจำหน่ายทั่วไปคือ พันธุ์อินทรี 2 พันธุ์ไฮ-บริดจ์ 3 และพันธุ์เอทีเอส 12 เนื่องจากมีฝักขนาดใหญ่ ให้ผลผลิตสูง เปลือกหุ้มเมล็ดบาง มีรสหวานและกลิ่นหอมมาก (Anonymous, 2017) มีจำหน่ายทั้งแบบฝักสด แบบแปรรูป แบบกระป๋องและแบบแช่แข็ง

จากความนิยมบริโภคข้าวโพดหวาน ทำให้มีเปลือกข้าวโพดเหลือทิ้งเป็นจำนวนมาก ปัจจุบันมี

การนำเปลือกข้าวโพดไปใช้ประโยชน์หลายอย่าง เช่น ทำเชื้อเพลิงอัดแท่ง ปุ๋ยหมัก กระดาษ รวมถึงงานประดิษฐ์และหัตถกรรมต่างๆ ในขณะที่ต่างประเทศเริ่มมีการศึกษาเกี่ยวกับการนำเปลือกข้าวโพดมาแยกเป็นเส้นใยด้วยวิธีการต่าง ๆ โดยมีวัตถุประสงค์เพื่อนำเส้นใยมาใช้เป็นวัสดุประกอบ (composite material) (Huda and Yang, 2008) หรือปั่นเป็นเส้นด้าย (Reddy *et al.*, 2006) เนื่องจากเปลือกข้าวโพดมีลักษณะเป็นแผ่นยาวรี ขนาดค่อนข้างใหญ่ มีส่วนที่เป็นเส้นหนา เรียงห่างกันและคั่นด้วยส่วนที่เป็นแผ่นบาง ซึ่งส่วนที่เป็นเส้นหนาสามารถแยกเป็นเส้นใยกลุ่มเล็กๆ ได้ อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีการศึกษาถึงปัจจัยที่มีผลต่อลักษณะ องค์ประกอบทางเคมีและสมบัติด้านต่างๆ ของเส้นใยเปลือกข้าวโพด เพื่อนำผลการศึกษามาใช้ประโยชน์ในการทำผลิตภัณฑ์ที่เป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อมในอุตสาหกรรมสิ่งทอหรืออุตสาหกรรมอื่นๆ ที่เกี่ยวข้อง

ดังนั้น การศึกษาลักษณะและองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์ต่างๆ จะทำให้ได้แนวทางการพัฒนาเส้นใยที่มีคุณภาพดีและเหมาะสมสำหรับนำไปใช้ประโยชน์ด้านสิ่งทอ อีกทั้งเป็นการเพิ่มมูลค่าให้แก่วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร และช่วยลดปริมาณขยะที่ส่งผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อมด้วย นอกจากนี้ผลการวิจัยจะเป็นข้อมูลในการพัฒนาเส้นใยธรรมชาติอื่นๆ เพื่อใช้ประโยชน์ด้านสิ่งทอต่อไป การวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เฉพาะเพื่อศึกษาผลของพันธุ์ข้าวโพด ชั้นเปลือกข้าวโพดและวิธีการแยกเส้นใย ต่อลักษณะและองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยจากเปลือกข้าวโพด

วิธีดำเนินการวิจัย

การวิจัยนี้ใช้เปลือกข้าวโพด 3 พันธุ์ คือ พันธุ์อินทรี 2 พันธุ์ไฮ-บริดจ์ 3 และพันธุ์เอทีเอส 12 ชั้นเปลือกข้าวโพดแบ่งเป็น 2 ชั้น คือ เปลือกชั้นนอกและเปลือกชั้นใน และวิธีการแยกเส้นใย 6 วิธี คือ วิธีที่ 1 ใช้สารละลายด่างความเข้มข้น 2.5 กรัมต่อลิตร วิธีที่ 2 ใช้สารละลายด่างความเข้มข้น 5.0 กรัมต่อลิตร วิธีที่ 3 ใช้สารละลายด่างความเข้มข้น 2.5 กรัมต่อลิตร และสารละลายเอนไซม์ 0.5% วิธีที่ 4 ใช้สารละลายด่างความเข้มข้น 2.5 กรัมต่อลิตร และสารละลายเอนไซม์ 1.0% วิธีที่ 5 ใช้สารละลายด่างความเข้มข้น 5.0 กรัมต่อลิตร และสารละลายเอนไซม์ 0.5% และวิธีที่ 6 ใช้สารละลายด่างความเข้มข้น 5.0 กรัมต่อลิตร และสารละลายเอนไซม์ 1.0% จัดตั้งทดลองแบบ $3 \times 2 \times 6$ แฟกทอเรียล ในแผนการทดลองแบบบล็อกสุ่มสมบูรณ์ รวมทั้งสิ้น 36 สิ่งทดลอง ทำการทดลอง 3 ซ้ำ

1. วัสดุและอุปกรณ์

1.1 เปลือกของฝักข้าวโพดหวานจำนวน 3 พันธุ์ ได้แก่ พันธุ์อินทรี 2 จากศูนย์วิจัยข้าวโพดและข้าวฟ่างแห่งชาติ จังหวัดนครราชสีมา พันธุ์ไฮ-บริดจ์

3 และพันธุ์เอทีเอส 12 จากตลาดสี่มุมเมือง จังหวัดปทุมธานี

1.2 สารเคมีที่ใช้ คือ โซเดียมไฮดรอกไซด์ (sodium hydroxide; $NaOH$) ชนิดเม็ด น้ำหนักเม็ดละ 0.1 กรัม ผลิตโดย Ajax Finechem Pty Limited ประเทศออสเตรเลีย เอนไซม์เซลลูเลส (cellulase) ผลิตโดย Tokyo Chemical Industry Limited ประเทศญี่ปุ่น และกรดแอซิติก (acetic acid) ความเข้มข้น 100% ผลิตโดย Merck KGaA ประเทศเยอรมนี

1.3 เครื่องมือและอุปกรณ์ที่ใช้ คือ เครื่องชั่งน้ำหนักดิจิทัล METTLER TOLEDO รุ่น PL 403 ความละเอียด 0.001 กรัม ตู้อบลมร้อน BINDER รุ่น FD 260 และอ่างน้ำควบคุมอุณหภูมิ Memmert รุ่น WNE 29

2. วิธีการ

2.1 การเตรียมเปลือกข้าวโพด ทำโดยแยกเปลือกข้าวโพด 2 ชั้นในสุดและ 2 ชั้นนอกสุดออก แบ่งเปลือกข้าวโพดที่เหลือออกเป็น 2 กลุ่มเท่าๆ กัน กลุ่มที่อยู่ด้านในจัดเป็นเปลือกชั้นใน และกลุ่มที่อยู่ด้านนอกจัดเป็นเปลือกชั้นนอก นำเปลือกข้าวโพดตากแห้งและอบแห้งด้วยเครื่องอบลมร้อนที่อุณหภูมิ $105 \pm 2^{\circ}C$ เวลา 110 นาที แล้วผึ่งในตู้ดูดความชื้นและชั่งน้ำหนัก ตัดส่วนที่ติดกับก้านฝัก และส่วนบนของเปลือกข้าวโพดแต่ละใบออกข้างละ 1 นิ้ว

2.2 การแยกกลุ่มเส้นหนาของเปลือกข้าวโพด ทำโดยแช่เปลือกข้าวโพดในน้ำที่อุณหภูมิห้อง โดยใช้อัตราส่วนเปลือกข้าวโพดต่อน้ำเท่ากับ 1 : 50 เป็นเวลา 30 วัน นำเปลือกข้าวโพดขึ้นจากน้ำ ใช้มือสาแหรกบางที่เปื้อนอยู่ออก เอาเฉพาะส่วนที่เป็นเส้นหนามาใช้ในการทดลองต่อไป ล้างกลุ่มเส้นหนาด้วยน้ำประปา ตากแห้ง อบแห้ง ผึ่งในตู้ดูดความชื้นและชั่งน้ำหนัก

2.3 การแยกเส้นใยเปลือกข้าวโพด

2.3.1 การแยกเส้นใยด้วยสารละลายต่าง (วิธีที่ 1 และ 2) เตรียมสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 2.5 และ 5.0 กรัมต่อลิตร และใช้อัตราส่วนกลุ่มเส้นใยของเปลือกข้าวโพดต่อสารละลายเท่ากับ 1 : 100 ต้มกลุ่มเส้นใยในสารละลายที่อุณหภูมิ 100 °C ระยะเวลา 60 นาที กรองแยกเส้นใยออกจากสารละลาย แล้วล้างเส้นใยด้วยน้ำประปา จนน้ำใสไม่มีสีและมีค่า pH 6 - 7 นำเส้นใยตากแห้งและอบแห้งตามขั้นตอนในข้อ 2.1

2.3.2 การแยกเส้นใยด้วยสารละลายต่าง และสารละลายเอนไซม์ (วิธีที่ 3 4 5 และ 6) เตรียมสารละลายต่าง ต้มกลุ่มเส้นใย ทำความสะอาดเส้นใย ตากแห้งและอบแห้งเส้นใยตามขั้นตอนในข้อ 2.3.1 เตรียมสารละลายเอนไซม์โดยใช้ปริมาณเอนไซม์เซลลูเลส 0.5 และ 1.0% ของน้ำหนักเส้นใยแห้งที่ได้จากการแยกเบื้องต้นด้วยสารละลายต่าง และใช้อัตราส่วนเส้นใยต่อสารละลายเท่ากับ 1 : 30 จากนั้นแช่เส้นใยในสารละลายเอนไซม์ที่อุณหภูมิ 55 °C เวลา 60 นาที กรองแยกเส้นใยออกจากสารละลาย แล้วล้างเส้นใยด้วยน้ำประปา จนน้ำใสไม่มีสีและมีค่า pH 6 - 7 นำเส้นใยตากและอบแห้งตามขั้นตอน ในข้อ 2.1

2.4 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมีของเส้นใย ได้แก่ เซลลูโลส เฮมิเซลลูโลสและลิกนิน

ด้วยวิธี detergent method (Goering and Van Soest, 1970)

2.5 วิเคราะห์องค์ประกอบทางเคมี ได้แก่ ปริมาณเซลลูโลส ปริมาณเฮมิเซลลูโลสและปริมาณลิกนิน โดยใช้ค่าเฉลี่ย ($\bar{X}$) และส่วนเบี่ยงเบนมาตรฐาน (S.D.) วิเคราะห์ความแปรปรวนของค่าเฉลี่ยแบบจำแนกสามทาง (three - way ANOVA) และเปรียบเทียบความแตกต่างค่าเฉลี่ยเป็นรายคู่โดยใช้ Bonferroni

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

เส้นใยจากเปลือกชั้นนอกและชั้นในของฝักข้าวโพดพันธุ์อินทรี 2 พันธุ์ไฮ-บริดจ์ 3 และพันธุ์เอทีเอส 12 ที่แยกเส้นใยด้วยวิธีการต่างกัน มีลักษณะเป็นกลุ่มเส้นใย ประกอบด้วยเส้นใยเดี่ยวเรียงตัวซ้อนทับกันตามแนวยาว ยึดเกาะกันด้วยลิกนิน เพกทินและสารอื่นๆ พื้นผิวเส้นใยไม่เรียบ เส้นใยเปลือกข้าวโพดที่ได้มีองค์ประกอบทางเคมีต่างกัน จากการศึกษาผลของพันธุ์ข้าวโพด ชั้นเปลือกข้าวโพดและวิธีการแยกเส้นใย ต่อองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยเปลือกข้าวโพด ได้ผลดังต่อไปนี้

1. ผลของพันธุ์ข้าวโพด ชั้นเปลือกข้าวโพดและวิธีการแยกเส้นใยต่อปริมาณเซลลูโลสของเส้นใย

ตารางที่ 1 ค่าเฉลี่ยปริมาณเซลลูโลสของเส้นใยเปลือกข้าวโพดที่ได้จากพันธุ์ข้าวโพด ชั้นเปลือกข้าวโพดและวิธีการแยกเส้นใยที่แตกต่างกัน

ปัจจัยการทดลอง		ปริมาณเซลลูโลส (ร้อยละ)					
พันธุ์ข้าวโพด	ชั้นเปลือกข้าวโพด	วิธีการแยกเส้นใย					
		วิธีที่ 1	วิธีที่ 2	วิธีที่ 3	วิธีที่ 4	วิธีที่ 5	วิธีที่ 6
		($\bar{X} \pm S.D.$)	($\bar{X} \pm S.D.$)	($\bar{X} \pm S.D.$)	($\bar{X} \pm S.D.$)	($\bar{X} \pm S.D.$)	($\bar{X} \pm S.D.$)
อินทรี 2	ชั้นนอก	63.29	65.72	64.87	67.02	69.12	69.35
		± 0.32	± 0.86	± 0.64	± 0.71	± 0.43	± 0.40

ตารางที่ 1 (ต่อ)

ปัจจัยการทดลอง		ปริมาณเซลล์โลส (ร้อยละ)					
พันธุ์ข้าวโพด	ชั้นเปลือกข้าวโพด	วิธีการแยกเส้นใย					
		วิธีที่ 1	วิธีที่ 2	วิธีที่ 3	วิธีที่ 4	วิธีที่ 5	วิธีที่ 6
		($\bar{x} \pm S.D.$)	($\bar{x} \pm S.D.$)	($\bar{x} \pm S.D.$)	($\bar{x} \pm S.D.$)	($\bar{x} \pm S.D.$)	($\bar{x} \pm S.D.$)
ไฮ-บริดจ์ 3	ชั้นใน	65.64	71.98	73.53	69.00	71.20	67.11
		± 0.79	± 0.38	± 0.36	± 0.43	± 0.44	± 1.03
	ชั้นนอก	61.24	66.66	67.07	65.32	68.05	69.44
		± 0.82	± 0.39	± 0.09	± 0.57	± 0.37	± 0.24
	ชั้นใน	68.56	70.04	69.58	67.26	72.54	72.55
		± 0.44	± 0.38	± 0.48	± 0.59	± 0.41	± 0.57
เอทีเอส 12	ชั้นนอก	63.77	68.36	66.80	67.30	70.98	71.63
		± 0.18	± 0.10	± 0.11	± 0.73	± 0.33	± 0.26
	ชั้นใน	66.63	72.16	70.01	70.60	74.41	74.71
		± 0.10	± 0.13	± 0.68	± 0.12	± 0.17	± 0.85

จากตารางที่ 1 พบว่า ค่าเฉลี่ยปริมาณเซลล์โลสของเส้นใยเปลือกข้าวโพดอยู่ระหว่างร้อยละ 61.24 - 74.71 โดยเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์เอทีเอส 12 ชั้นใน แยกเส้นใยด้วยวิธีที่ 6 มีค่าเฉลี่ยปริมาณเซลล์โลสมากที่สุด และเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์ไฮ-บริดจ์ 3 ชั้นนอก แยกเส้นใยด้วยวิธีที่ 1 มีค่าเฉลี่ยปริมาณเซลล์โลสน้อยที่สุด

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนค่าเฉลี่ยปริมาณเซลล์โลสของเส้นใยเปลือกข้าวโพด พบว่า พันธุ์ข้าวโพด มีผลต่อปริมาณเซลล์โลสของเส้นใย ($p \leq .01$) เส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์เอทีเอส 12 พันธุ์ไฮ-บริดจ์ 3 และพันธุ์อินทรี 2 มีค่าเฉลี่ยปริมาณเซลล์โลสร้อยละ 69.78 68.19 และ 68.15 ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ Bonferroni พบว่า เส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์เอทีเอส 12 มีปริมาณเซลล์โลสมากกว่าเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์ไฮ-บริดจ์ 3 และพันธุ์อินทรี 2 ($p \leq .01$) ซึ่งเป็นผลจากสภาพแวดล้อมในการเจริญเติบโตของข้าวโพดแต่ละพันธุ์ ดังที่ Jones

et al. (2017) กล่าวว่า ปริมาณองค์ประกอบทางเคมีของเส้นใยพืชแต่ละชนิดจะแตกต่างกัน ขึ้นอยู่กับสภาพแวดล้อมในการเจริญเติบโตของพืชชนิดนั้นๆ

ชั้นเปลือกข้าวโพด มีผลต่อปริมาณเซลล์โลสของเส้นใย ($p \leq .01$) เส้นใยจากเปลือกชั้นนอก มีปริมาณเซลล์โลสน้อยกว่าเส้นใยจากเปลือกชั้นใน (ร้อยละ 67.00 และ 70.42 ตามลำดับ) ซึ่งแตกต่างกับ Yilmaz *et al.* (2016) ที่พบว่า เส้นใยจากเปลือกข้าวโพดชั้นนอกมีปริมาณเซลล์โลสมากกว่าเส้นใยจากเปลือกชั้นใน ทั้งนี้อาจเกิดจากปัจจัยการทดลองที่ต่างกัน ได้แก่ พันธุ์ข้าวโพด การแยกชั้นเปลือกข้าวโพดและวิธีการแยกเส้นใย เป็นต้น

วิธีการแยกเส้นใย มีผลต่อปริมาณเซลล์โลสของเส้นใย ($p \leq .01$) เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 1 2 3 4 5 และ 6 มีปริมาณเซลล์โลสร้อยละ 64.85 69.15 68.64 67.75 71.05 และ 70.80 ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ Bonferroni พบว่า เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 1 มีปริมาณเซลล์โลสน้อยกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีอื่นทุกวิธี

($p \leq .01$) เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 2 มีปริมาณเซลลูโลสมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 3 และ 4 ($p \leq 0.5$ และ $.01$ ตามลำดับ) แต่น้อยกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 5 และ 6 ($p \leq .01$) เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 3 มีปริมาณเซลลูโลสมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 4 แต่น้อยกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 5 และ 6 ($p \leq .01$) และเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 4 มีปริมาณเซลลูโลสน้อยกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 5 และ 6 ($p \leq .01$) จากผลการวิจัยจะเห็นว่า เส้นใยเปลือกข้าวโพดที่แยกด้วยวิธีที่ 5 และ 6 มีปริมาณเซลลูโลสมากกว่าที่แยกด้วยวิธีอื่น ทั้งนี้เพราะการใช้สารละลายด่างและสารละลายเอนไซม์ที่มีความเข้มข้นมากขึ้น จะย่อยสลายเอมิเซลลูโลส ลิกนินและเพกทินได้มากขึ้น ทำให้ปริมาณเซลลูโลสเพิ่มขึ้น สอดคล้องกับ Sari *et al.* (2017) ที่พบว่า การแยกเส้นใยด้วยสารละลายโซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 5% ทำให้ปริมาณเอมิเซลลูโลสและลิกนินลดลง ในขณะที่ปริมาณเซลลูโลสเพิ่มขึ้น

ปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าวโพดกับชั้นเปลือกข้าวโพด มีผลต่อปริมาณเซลลูโลสของเส้นใย โดยเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์อินทรี 2 พันธุ์ไฮบริด 3 และพันธุ์เอทีเอส 12 ชั้นนอก มีปริมาณเซลลูโลสน้อยกว่าเส้นใยจากเปลือกชั้นใน ($p \leq .01$)

ทั้งนี้เพราะเปลือกข้าวโพดชั้นนอกมีความแก่มากกว่าเปลือกชั้นใน จึงมีปริมาณลิกนินสะสมในเส้นใยมากกว่า ส่งผลให้มีปริมาณเซลลูโลสน้อยกว่า สอดคล้องกับการศึกษาของ Huda and Yang (2008) ที่พบว่า เมื่อปริมาณลิกนินในเส้นใยเปลือกข้าวโพดเพิ่มขึ้น จะทำให้ปริมาณเซลลูโลสในเส้นใยลดลง คือเส้นใยเปลือกข้าวโพดที่มีปริมาณลิกนินร้อยละ 5.96 6.40 และ 12.58 จะมีปริมาณเซลลูโลสร้อยละ 83.50 64.52 และ 42.31 ตามลำดับ

ปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าวโพดกับวิธีการแยกเส้นใย มีผลต่อปริมาณเซลลูโลสของเส้นใย ดังนี้

1. เส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์อินทรี 2 ที่แยกด้วยวิธีที่ 1 2 3 4 5 และ 6 มีปริมาณเซลลูโลสร้อยละ 64.46 68.86 69.20 68.01 70.16 และ 68.23 ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ Bonferroni พบว่า เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 1 มีปริมาณเซลลูโลสน้อยกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีอื่นทุกวิธี ($p \leq .01$) เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 2 มีปริมาณเซลลูโลสน้อยกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 5 ($p \leq .01$) เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 3 มีปริมาณเซลลูโลสมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 4 และ 6 ($p \leq .01$ และ $.05$ ตามลำดับ) แต่น้อยกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 5 ($p \leq .05$) เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 4 มีปริมาณเซลลูโลสน้อยกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 5 ($p \leq .01$) และเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 5 มีปริมาณเซลลูโลสมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 6 ($p \leq .01$) จากผลการวิจัยจะเห็นว่า เส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์อินทรี 2 ที่แยกด้วยวิธีที่ 5 มีปริมาณเซลลูโลสมากที่สุด

2. เส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์ไฮบริด 3 ที่แยกด้วยวิธีที่ 1 2 3 4 5 และ 6 มีปริมาณเซลลูโลสร้อยละ 64.90 68.35 68.32 66.29 70.30 และ 71.00 ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ Bonferroni พบว่า เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 1 มีปริมาณเซลลูโลสน้อยกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีอื่นทุกวิธี ($p \leq .01$) เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 2 และ 3 มีปริมาณเซลลูโลสมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 4 ($p \leq .01$) แต่น้อยกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 5 และ 6 ($p \leq .01$) และเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 4 มีปริมาณเซลลูโลสน้อยกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 5 และ 6 ($p \leq .01$) จากผลการวิจัยจะเห็นว่า เส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์ไฮบริด 3 ที่แยกด้วยวิธีที่ 5 และ 6 มีปริมาณเซลลูโลสมากกว่าที่แยกด้วยวิธีอื่น

3. เส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์เอทีเอส 12 ที่แยกด้วยวิธีที่ 1 2 3 4 5 และ 6 มีปริมาณเซลลูโลสร้อยละ 65.20 70.26 68.40 68.95 72.70 และ 73.17 ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ Bonferroni

2. เส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์ไฮ-บริดจ์ 3 ชั้นนอก ที่แยกด้วยวิธีที่ 1 มีปริมาณเซลลูโลสน้อยกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีอื่นทุกวิธี ($p \leq .01$) เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 2 มีปริมาณเซลลูโลสมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 4 ($p \leq .05$) แต่น้อยกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 5 และ 6 ($p \leq .05$ และ $.01$ ตามลำดับ) เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 3 มีปริมาณเซลลูโลสมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 4 แต่น้อยกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 6 ($p \leq .01$) เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 4 มีปริมาณเซลลูโลสน้อยกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 5 และ 6 ($p \leq .01$) และเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 5 มีปริมาณเซลลูโลสน้อยกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 6 ($p \leq .05$) สำหรับ เส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์ไฮ-บริดจ์ 3 ชั้นใน พบว่า เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 1 มีปริมาณเซลลูโลสน้อยกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 2 5 และ 6 ($p \leq .01$) แต่มากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 4 ($p \leq .05$) เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 2 และ 3 มีปริมาณเซลลูโลสมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 4 แต่น้อยกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 5 และ 6 ($p \leq .01$) และเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 4 มีปริมาณเซลลูโลสน้อยกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 5 และ 6 ($p \leq .01$) จากผลการวิจัยจะเห็นว่า เส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์ไฮ-บริดจ์ 3 ชั้นนอก ที่แยกด้วยวิธีที่ 6 มีปริมาณเซลลูโลสมากที่สุด และเส้นใยจากเปลือกชั้นใน ที่

แยกด้วยวิธีที่ 5 และ 6 มีปริมาณเซลลูโลสมากกว่าที่แยกด้วยวิธีอื่น

3. เส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์เอทีเอส 12 ชั้นนอก ที่แยกด้วยวิธีที่ 1 มีปริมาณเซลลูโลสน้อยกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีอื่นทุกวิธี ($p \leq .01$) เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 2 มีปริมาณเซลลูโลสมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 3 ($p \leq .01$) แต่น้อยกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 5 และ 6 ($p \leq .01$) และเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 3 และ 4 มีปริมาณเซลลูโลสน้อยกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 5 และ 6 ($p \leq .01$) สำหรับเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์เอทีเอส 12 ชั้นใน พบว่า เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 1 มีปริมาณเซลลูโลสน้อยกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีอื่นทุกวิธี ($p \leq .01$) เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 2 มีปริมาณเซลลูโลสมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 3 และ 4 ($p \leq .01$) แต่น้อยกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 5 และ 6 ($p \leq .01$) และเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 3 และ 4 มีปริมาณเซลลูโลสน้อยกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 5 และ 6 ($p \leq .01$) จากผลการวิจัยจะเห็นว่า เส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์เอทีเอส 12 ทั้งเปลือกชั้นนอกและชั้นใน ที่แยกด้วยวิธีที่ 5 และ 6 มีปริมาณเซลลูโลสมากกว่าที่แยกด้วยวิธีอื่น

2. ผลของพันธุ์ข้าวโพด ชั้นเปลือกข้าวโพดและวิธีการแยกเส้นใยต่อปริมาณเฮมิเซลลูโลสของเส้นใย

ตารางที่ 2 ค่าเฉลี่ยปริมาณเฮมิเซลลูโลสของเส้นใยเปลือกข้าวโพดที่ได้จากพันธุ์ข้าวโพด ชั้นเปลือกข้าวโพดและวิธีการแยกเส้นใยที่แตกต่างกัน

ปัจจัยการทดลอง		ปริมาณเฮมิเซลลูโลส (ร้อยละ)					
พันธุ์ข้าวโพด	ชั้นเปลือกข้าวโพด	วิธีการแยกเส้นใย					
		วิธีที่ 1	วิธีที่ 2	วิธีที่ 3	วิธีที่ 4	วิธีที่ 5	วิธีที่ 6
		($\bar{X} \pm S.D.$)	($\bar{X} \pm S.D.$)	($\bar{X} \pm S.D.$)	($\bar{X} \pm S.D.$)	($\bar{X} \pm S.D.$)	($\bar{X} \pm S.D.$)
อินทรี 2	ชั้นนอก	22.65	22.22	19.83	15.84	16.37	16.28
		± 1.00	± 0.53	± 0.71	± 0.29	± 0.05	± 0.45
	ชั้นใน	22.51	17.06	16.44	18.64	18.32	18.71
		± 0.74	± 0.32	± 0.62	± 0.61	± 0.59	± 0.50

ตารางที่ 2 (ต่อ)

ปัจจัยการทดลอง		ปริมาณฮีเมลูลอส (ร้อยละ)					
พันธุ์ข้าวโพด	ชั้นเปลือกข้าวโพด	วิธีการแยกเส้นใย					
		วิธีที่ 1	วิธีที่ 2	วิธีที่ 3	วิธีที่ 4	วิธีที่ 5	วิธีที่ 6
		($\bar{x} \pm S.D.$)	($\bar{x} \pm S.D.$)	($\bar{x} \pm S.D.$)	($\bar{x} \pm S.D.$)	($\bar{x} \pm S.D.$)	($\bar{x} \pm S.D.$)
ไฮ-บริดจ์ 3	ชั้นนอก	26.91	22.84	22.44	22.40	21.59	20.21
		± 0.88	± 0.39	± 0.27	± 0.35	± 0.09	± 0.43
	ชั้นใน	20.96	19.07	19.38	20.03	17.20	16.89
		± 1.23	± 0.44	± 0.81	± 0.64	± 0.29	± 0.61
เอทีเอส 12	ชั้นนอก	23.52	19.66	20.23	19.27	18.49	17.36
		± 0.49	± 0.36	± 0.97	± 0.43	± 0.16	± 0.54
	ชั้นใน	22.19	18.57	18.83	17.31	15.77	15.21
		± 0.25	± 0.38	± 0.83	± 0.35	± 0.56	± 0.67

จากตารางที่ 2 พบว่า ค่าเฉลี่ยปริมาณฮีเมลูลอสของเส้นใยเปลือกข้าวโพดอยู่ระหว่างร้อยละ 15.21 - 26.91 โดยเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์ไฮ-บริดจ์ 3 ชั้นนอก แยกด้วยวิธีที่ 1 มีค่าเฉลี่ยปริมาณฮีเมลูลอสมากที่สุด และเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์เอทีเอส 12 ชั้นใน แยกด้วยวิธีที่ 6 มีค่าเฉลี่ยปริมาณฮีเมลูลอสน้อยที่สุด

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนค่าเฉลี่ยปริมาณฮีเมลูลอสของเส้นใยเปลือกข้าวโพดพบว่า พันธุ์ข้าวโพด มีผลต่อปริมาณฮีเมลูลอสของเส้นใย ($p \leq .01$) เส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์ไฮ-บริดจ์ 3 พันธุ์เอทีเอส 12 และพันธุ์อินทรี 2 มีค่าเฉลี่ยปริมาณฮีเมลูลอสร้อยละ 20.83 18.87 และ 18.74 ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ Bonferroni พบว่า เส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์ไฮ-บริดจ์ 3 มีปริมาณฮีเมลูลอสมากกว่าเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์เอทีเอส 12 และพันธุ์อินทรี 2 ($p \leq .01$) ซึ่งเป็นผลมาจากสภาพแวดล้อมในการเจริญเติบโตของข้าวโพดแต่ละพันธุ์

ชั้นเปลือกข้าวโพด มีผลต่อปริมาณฮีเมลูลอสของเส้นใย ($p \leq .01$) เส้นใยจากเปลือกชั้นนอกมีปริมาณฮีเมลูลอสมากกว่าเส้นใยจากเปลือกชั้นใน (ร้อยละ 20.45 และ 18.50 ตามลำดับ) ($p \leq .01$) สอดคล้องกับ Yilmaz *et al.* (2016) ที่พบว่า เส้นใยจากเปลือกข้าวโพดชั้นนอกมีปริมาณฮีเมลูลอสมากกว่าเส้นใยจากเปลือกชั้นใน

วิธีการแยกเส้นใย มีผลต่อปริมาณฮีเมลูลอสของเส้นใย ($p \leq .01$) เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 1 2 3 4 5 และ 6 มีปริมาณฮีเมลูลอสร้อยละ 23.12 19.91 19.53 18.92 17.95 และ 17.44 ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ Bonferroni พบว่า เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 1 มีปริมาณฮีเมลูลอสมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีอื่นทุกวิธี ($p \leq .01$) เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 2 มีปริมาณฮีเมลูลอสมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 4 5 และ 6 ($p \leq .01$) เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 3 มีปริมาณฮีเมลูลอสมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 4 5 และ 6 ($p \leq .05$.01 และ .01 ตามลำดับ) และเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 4 มีปริมาณฮีเมลูลอสมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 5 และ 6 ($p \leq .01$) จากผลการวิจัยจะเห็นว่า

เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 5 และ 6 มีปริมาณเฮมิเซลลูโลส น้อยกว่าที่แยกด้วยวิธีอื่น เพราะการใช้สารละลายด่าง และสารละลายเอนไซม์ที่มีความเข้มข้นมากขึ้น จะย่อยสลายเฮมิเซลลูโลสมากขึ้น สอดคล้องกับ Sari *et al.* (2017) ที่พบว่า การแยกเส้นใยด้วยสารละลาย โซเดียมไฮดรอกไซด์ความเข้มข้น 5% ทำให้ปริมาณ เฮมิเซลลูโลสลดลง ในขณะที่ปริมาณเซลลูโลส เพิ่มขึ้น

ปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าวโพดกับชั้น เปลือกข้าวโพด มีผลต่อปริมาณเฮมิเซลลูโลสของเส้น ใย โดยเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์อินทรี 2 ชั้นนอกและชั้นใน มีปริมาณเฮมิเซลลูโลสไม่แตกต่างกัน ($p > .05$) ส่วนเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์ไฮ-บริดจ์ 3 และพันธุ์เอทีเอส 12 ชั้นนอก มีปริมาณเฮมิ เซลลูโลสมากกว่าเส้นใยจากเปลือกชั้นใน ($p \leq .01$)

ปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าวโพดกับวิธีการ แยกเส้นใย มีผลต่อปริมาณเฮมิเซลลูโลสของเส้น ใย ดังนี้

1. เส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์อินทรี 2 ที่ แยกด้วยวิธีที่ 1 2 3 4 5 และ 6 มีปริมาณเฮมิเซลลูโลส ร้อยละ 22.58 19.64 18.14 17.24 17.34 และ 17.50 ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ Bonferroni พบว่า เส้นใยที่ แยกด้วยวิธีที่ 1 มีปริมาณเฮมิเซลลูโลสมากกว่าเส้น ใยที่แยกด้วยวิธีอื่นทุกวิธี ($p \leq .01$) และเส้นใยที่แยก ด้วยวิธีที่ 2 มีปริมาณเฮมิเซลลูโลสมากกว่าเส้นใยที่ แยกด้วยวิธีที่ 3 4 5 และ 6 ($p \leq .01$)

2. เส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์ไฮ-บริดจ์ 3 ที่แยกด้วยวิธีที่ 1 2 3 4 5 และ 6 มีปริมาณเฮมิ เซลลูโลสร้อยละ 23.94 20.96 20.91 21.22 19.39 และ 18.55 ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ Bonferroni พบว่า เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 1 มีปริมาณเฮมิเซลลูโลส มากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีอื่นทุกวิธี ($p \leq .01$) เส้น ใยที่แยกด้วยวิธีที่ 2 3 และ 4 มีปริมาณเฮมิเซลลูโลส มากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 5 และ 6 ($p \leq .01$)

3. เส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์เอทีเอส 12 ที่แยกด้วยวิธีที่ 1 2 3 4 5 และ 6 มีปริมาณเฮมิ เซลลูโลสร้อยละ 22.85 19.12 19.53 18.29 17.13 และ 16.28 ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ Bonferroni พบว่า เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 1 มีปริมาณเฮมิเซลลูโลส มากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีอื่นทุกวิธี ($p \leq .01$) เส้น ใยที่แยกด้วยวิธีที่ 2 มีปริมาณเฮมิเซลลูโลสมากกว่า เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 5 และ 6 ($p \leq .01$) เส้นใยที่แยก ด้วยวิธีที่ 3 มีปริมาณเฮมิเซลลูโลสมากกว่าเส้นใยที่ แยกด้วยวิธีที่ 4 5 และ 6 ($p \leq .01$) และเส้นใยที่แยก ด้วยวิธีที่ 4 มีปริมาณเฮมิเซลลูโลสมากกว่าเส้นใยที่ แยกด้วยวิธีที่ 5 และ 6 ($p \leq .05$ และ $.01$ ตามลำดับ)

จากผลการวิจัยจะเห็นว่า เส้นใยจากเปลือก ข้าวโพดทั้ง 3 พันธุ์ ที่แยกด้วยวิธีที่ 1 มีปริมาณเฮมิ เซลลูโลสมากที่สุด ทั้งนี้เพราะการใช้สารละลายด่าง ที่มีระดับความเข้มข้นน้อย จะย่อยสลายเฮมิเซลลูโลส ได้น้อยกว่า

ปฏิสัมพันธ์ระหว่างชั้นเปลือกข้าวโพดกับ วิธีการแยกเส้นใย มีผลต่อปริมาณเฮมิเซลลูโลสของ เส้นใย ดังนี้

1. เส้นใยจากเปลือกชั้นนอกที่แยกด้วยวิธีที่ 1 2 3 4 5 และ 6 มีปริมาณเฮมิเซลลูโลสร้อยละ 24.36 21.58 20.83 19.17 18.81 และ 17.95 ตามลำดับ ผล การวิเคราะห์ Bonferroni พบว่า เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 1 มีปริมาณเฮมิเซลลูโลสมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธี อื่นทุกวิธี ($p \leq .01$) เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 2 และ 3 มี ปริมาณเฮมิเซลลูโลสมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 4 5 และ 6 ($p \leq .01$) และเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 4 และ 5 มีปริมาณเฮมิเซลลูโลสมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 6 ($p \leq .01$ และ $.05$ ตามลำดับ) จากผลการวิจัยจะเห็น ว่า เส้นใยจากเปลือกชั้นนอก ที่แยกด้วยวิธีที่ 6 มี ปริมาณเฮมิเซลลูโลสน้อยที่สุด แสดงว่าการใช้ สารละลายด่างและสารละลายเอนไซม์ที่มีความ เข้มข้นมากขึ้นและจะย่อยสลายเฮมิเซลลูโลสมากขึ้น

2. เส้นใยจากเปลือกชั้นในที่แยกด้วยวิธีที่ 1 2 3 4 5 และ 6 มีปริมาณเฮมิเซลลูโลสร้อยละ 21.89 18.23 18.22 18.66 17.09 และ 16.93 ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ Bonferroni พบว่า เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 1 มีปริมาณเฮมิเซลลูโลสมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีอื่นทุกวิธี ($p \leq .01$) และเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 2 3 และ 4 มีปริมาณ เฮมิเซลลูโลสมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 5 และ 6 ($p \leq .01$) จากผลการวิจัยจะเห็นว่า เส้นใยจากเปลือกชั้นใน ที่แยกด้วยวิธีที่ 5 และ 6 มีปริมาณเฮมิเซลลูโลสน้อยกว่าที่แยกด้วยวิธีอื่น แสดงว่าการใช้สารละลายต่างและสารละลายเอนไซม์ที่มีความเข้มข้นมากขึ้นและจะย่อยสลายเฮมิเซลลูโลสมากขึ้น

ปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าวโพด ชั้นเปลือกข้าวโพดกับวิธีการแยกเส้นใย มีผลต่อปริมาณเฮมิเซลลูโลสของเส้นใย ดังนี้

1. เส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์อินทรี 2 ชั้นนอก ที่แยกด้วยวิธีที่ 1 มีปริมาณเฮมิเซลลูโลสมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีอื่นเกือบทุกวิธี ($p \leq .01$) ยกเว้นวิธีที่ 2 เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 2 มีปริมาณเฮมิเซลลูโลสมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 3 4 5 และ 6 ($p \leq .01$) เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 3 มีปริมาณเฮมิเซลลูโลสมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 4 5 และ 6 อย่างมีนัยสำคัญ ($p \leq .01$) สำหรับเส้นใยจากเปลือกชั้นใน พบว่า เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 1 มีปริมาณเฮมิเซลลูโลสมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีอื่นทุกวิธี ($p \leq .01$) เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 2 มีปริมาณเฮมิเซลลูโลสมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 4 และ 6 ($p \leq .05$) และเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 3 มีปริมาณเฮมิเซลลูโลสน้อยกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 4 5 และ 6 ($p \leq .01$)

จากผลการวิจัยจะเห็นว่า การแยกเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์อินทรี 2 ชั้นนอก ด้วยสารละลายต่างและสารละลายเอนไซม์ที่มีความเข้มข้นมากขึ้น มี

แนวโน้มทำให้ปริมาณเฮมิเซลลูโลสของเส้นใยลดลง ดังจะเห็นจากการแยกเส้นใยด้วยวิธีที่ 4 5 และ 6 ทำให้มีปริมาณเฮมิเซลลูโลสน้อยกว่าที่แยกด้วยวิธีอื่น

2. เส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์ไฮ-บริดจ์ 3 ชั้นนอก ที่แยกด้วยวิธีที่ 1 มีปริมาณเฮมิเซลลูโลสมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีอื่นทุกวิธี ($p \leq .01$) และเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 2 3 และ 4 มีปริมาณเฮมิเซลลูโลสมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 6 ($p \leq .01$) สำหรับเส้นใยจากเปลือกชั้นใน พบว่า เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 1 มีปริมาณเฮมิเซลลูโลสมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 2 3 5 และ 6 ($p \leq .01$.05 .01 และ .01 ตามลำดับ) และเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 2 3 และ 4 มีปริมาณเฮมิเซลลูโลสมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 5 และ 6 ($p \leq .01$)

จากผลการวิจัยจะเห็นว่า เส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์ไฮ-บริดจ์ 3 ทั้งชั้นนอกและชั้นใน ที่แยกด้วยวิธีที่ 5 และ 6 มีปริมาณเฮมิเซลลูโลสน้อยกว่าที่แยกด้วยวิธีอื่น ทั้งนี้เพราะการใช้สารละลายต่างและสารละลายเอนไซม์ที่มีความเข้มข้นมากขึ้นจะย่อยสลายเฮมิเซลลูโลสมากขึ้น

3. เส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์เอทีเอส 12 ชั้นนอก ที่แยกด้วยวิธีที่ 1 มีปริมาณเฮมิเซลลูโลสมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีอื่นทุกวิธี ($p \leq .01$) เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 2 และ 4 มีปริมาณเฮมิเซลลูโลสมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 6 ($p \leq .01$) และเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 3 มีปริมาณเฮมิเซลลูโลสมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 5 และ 6 ($p \leq .01$) สำหรับเส้นใยจากเปลือกชั้นใน พบว่า เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 1 มีปริมาณเฮมิเซลลูโลสมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีอื่นทุกวิธี ($p \leq .01$) เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 2 มีปริมาณเฮมิเซลลูโลสมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 5 และ 6 ($p \leq .01$) เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 3 มีปริมาณเฮมิเซลลูโลสมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 4 5 และ 6 ($p \leq .05$.01 และ .01 ตามลำดับ) และเส้นใยที่แยกด้วย

วิธีที่ 4 มีปริมาณเฮมิเซลลูโลสมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 5 และ 6 ($p \leq .05$ และ $.01$ ตามลำดับ)

จากผลการวิจัยจะเห็นว่า เส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์เอทีเอส 12 ทั้งชั้นนอกและชั้นใน ที่แยกด้วย วิธีที่ 5 และ 6 มีปริมาณเฮมิเซลลูโลสน้อยกว่าที่แยกด้วยวิธีอื่น ทั้งนี้เพราะการใช้สารละลายต่างและ

สารละลายเอนไซม์ที่มีความเข้มข้นมากขึ้นจะย่อยสลายเฮมิเซลลูโลสมากขึ้น

3. ผลของพันธุ์ข้าวโพด ชั้นเปลือกข้าวโพดและวิธีการแยกเส้นใย ต่อ ปริมาณลิกนิน ของเส้นใย

ตารางที่ 3 ค่าเฉลี่ยปริมาณลิกนินของเส้นใยเปลือกข้าวโพดที่ได้จากพันธุ์ข้าวโพด ชั้นเปลือกข้าวโพดและวิธีการแยกเส้นใยที่แตกต่างกัน

ปัจจัยการทดลอง		ปริมาณลิกนิน (ร้อยละ)					
พันธุ์ข้าวโพด	ชั้นเปลือกข้าวโพด	วิธีการแยกเส้นใย					
		วิธีที่ 1 ($\bar{X} \pm S.D.$)	วิธีที่ 2 ($\bar{X} \pm S.D.$)	วิธีที่ 3 ($\bar{X} \pm S.D.$)	วิธีที่ 4 ($\bar{X} \pm S.D.$)	วิธีที่ 5 ($\bar{X} \pm S.D.$)	วิธีที่ 6 ($\bar{X} \pm S.D.$)
อินทรี 2	ชั้นนอก	4.51	2.73	4.44	4.22	2.52	2.70
		± 0.40	± 0.45	± 0.19	± 0.22	± 0.23	± 0.02
	ชั้นใน	2.37	1.46	1.21	3.25	1.68	3.76
		± 0.18	± 0.06	± 0.23	± 0.24	± 0.19	± 0.65
ไฮ-บริดจ์ 3	ชั้นนอก	2.51	1.48	2.10	2.77	1.82	1.86
		± 0.44	± 0.08	± 0.15	± 0.26	± 0.21	± 0.21
	ชั้นใน	1.23	1.32	1.39	2.48	0.97	1.18
		± 0.23	± 0.08	± 0.07	± 0.18	± 0.06	± 0.13
เอทีเอส 12	ชั้นนอก	2.94	1.94	3.50	2.72	1.88	1.59
		± 0.07	± 0.13	± 0.17	± 0.16	± 0.09	± 0.03
	ชั้นใน	1.86	0.76	2.20	2.03	1.22	1.27
		± 0.10	± 0.05	± 0.11	± 0.19	± 0.15	± 0.20

จากตารางที่ 3 พบว่า ค่าเฉลี่ยปริมาณลิกนินของเส้นใยเปลือกข้าวโพดอยู่ระหว่างร้อยละ 0.76 - 4.51 โดยเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์อินทรี 2 ชั้นนอก ที่แยกด้วยวิธีที่ 1 มีค่าเฉลี่ยปริมาณลิกนินมากที่สุด และเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์เอทีเอส 12 ชั้นใน ที่แยกด้วยวิธีที่ 2 มีค่าเฉลี่ยปริมาณลิกนินน้อยที่สุด

ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนค่าเฉลี่ยปริมาณลิกนินของเส้นใยเปลือกข้าวโพด พบว่า พันธุ์ข้าวโพด มีผลต่อปริมาณลิกนินของเส้นใย ($p \leq .01$) เส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์อินทรี 2 พันธุ์เอทีเอส 12 และพันธุ์ไฮ-บริดจ์ 3 มีค่าเฉลี่ยปริมาณเฮมิเซลลูโลสร้อยละ 2.90 1.99 และ 1.76 ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ Bonferroni พบว่า เส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์อินทรี 2 มีปริมาณลิกนินมากกว่าเส้นใย

จากเปลือกข้าวโพดพันธุ์พันธุ์เอทีเอส 12 และไฮ-บริดจ์ 3 ($p \leq .01$) และเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์เอทีเอส 12 มีปริมาณลิกนินมากกว่าเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์ ไฮ-บริดจ์ 3 ($p \leq .01$)

ชั้นเปลือกข้าวโพด มีผลต่อปริมาณลิกนินของเส้นใย ($p \leq .01$) เส้นใยจากเปลือกชั้นนอกมีปริมาณลิกนิน มากกว่าเส้นใยจากเปลือกชั้นใน (ร้อยละ 2.68 และ 1.76 ตามลำดับ) ($p \leq .01$) ทั้งนี้เพราะเปลือกชั้นนอกมีอายุมากกว่าหรือแก่กว่าเปลือกชั้นใน จึงทำให้มีปริมาณลิกนินมากกว่า ดังที่ Pornchaleampong and Ratanapanon (n.d.) กล่าวว่า ลิกนินอยู่ในผนังเซลล์พืชส่วนที่เป็นเปลือก ชัง หรือเยื่อใยของรากและลำต้น เมื่อพืชมีอายุมากขึ้นปริมาณลิกนินจะเพิ่มขึ้นด้วย

วิธีการแยกเส้นใย มีผลต่อปริมาณลิกนินของเส้นใย ($p \leq .01$) เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 1 2 3 4 5 และ 6 มีปริมาณลิกนินร้อยละ 2.57 1.62 2.47 2.91 1.68 และ 2.06 ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ Bonferromi พบว่า เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 1 มีปริมาณลิกนินมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 2 5 และ 6 ($p \leq .01$) แต่น้อยกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 4 ($p \leq .01$) เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 2 มีปริมาณลิกนินน้อยกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 3 4 และ 6 ($p \leq .01$) เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 3 มีปริมาณลิกนินน้อยกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 4 ($p \leq .01$) แต่มากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 5 และ 6 ($p \leq .01$) เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 4 มีปริมาณลิกนินมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 5 และ 6 ($p \leq .01$) และเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 5 มีปริมาณลิกนินน้อยกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 6 ($p \leq .01$) จากผลการวิจัยจะเห็นว่า การใช้สารละลายด่างความเข้มข้น 5.0 กรัมต่อลิตร มีแนวโน้มทำให้เส้นใยมีปริมาณลิกนินน้อยกว่าการใช้สารละลายด่างความเข้มข้น 2.5 กรัมต่อลิตร (ร้อยละ 1.79 และ 2.65 ตามลำดับ) แสดงว่าการใช้สารละลายด่างที่มีความ

เข้มข้นเพิ่มขึ้น จะช่วยกำจัดปริมาณลิกนินในเส้นใยได้มากขึ้น

ปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าวโพดกับชั้นเปลือกข้าวโพด มีผลต่อปริมาณลิกนินของเส้นใย โดยเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์อินทรี 2 พันธุ์ไฮ-บริดจ์ 3 และพันธุ์เอทีเอส 12 ชั้นนอก มีปริมาณลิกนินมากกว่าเส้นใยจากเปลือกชั้นใน ($p \leq .01$)

ปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์ข้าวโพดกับวิธีการแยกเส้นใย มีผลต่อปริมาณลิกนินของเส้นใย ดังนี้

1. เส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์อินทรี 2 ที่แยกด้วยวิธีที่ 1 2 3 4 5 และ 6 มีปริมาณลิกนินร้อยละ 3.44 2.10 2.83 3.74 2.10 และ 3.23 ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ Bonferromi พบว่า เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 1 มีปริมาณลิกนินมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 2 3 และ 5 ($p \leq .01$) เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 2 มีปริมาณลิกนินน้อยกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 3 4 และ 6 ($p \leq .01$) เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 3 มีปริมาณลิกนินน้อยกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 4 และ 6 ($p \leq .01$ และ .05 ตามลำดับ) แต่มากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 5 ($p \leq .01$) เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 4 มีปริมาณลิกนินมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 5 และ 6 ($p \leq .01$) และเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 5 มีปริมาณลิกนินน้อยกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 6 ($p \leq .01$)

2. เส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์ไฮ-บริดจ์ 3 ที่แยกด้วยวิธีที่ 1 2 3 4 5 และ 6 มีปริมาณลิกนินร้อยละ 1.87 1.40 1.75 2.62 1.40 และ 1.52 ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ Bonferromi พบว่า เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 1 มีปริมาณลิกนินมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 2 และ 5 ($p \leq .01$) แต่น้อยกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 4 ($p \leq .01$) เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 2 และ 3 มีปริมาณลิกนินน้อยกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 4 ($p \leq .01$) และเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 4 มีปริมาณลิกนินมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 5 และ 6 ($p \leq .01$)

2. เส้นใยจากเปลือกชั้นในที่แตกต่างกันที่แยกด้วยวิธีที่ 1 2 3 4 5 และ 6 มีปริมาณลิกนินร้อยละ 1.82 1.18 1.60 2.59 1.29 และ 2.07 ตามลำดับ ผลการวิเคราะห์ Bonferroni พบว่า เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 1 มีปริมาณลิกนินมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 2 และ 5 ($p \leq .01$) แต่่น้อยกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 4 ($p \leq .01$) เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 2 มีปริมาณ ลิกนินน้อยกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 3 4 และ 6 ($p \leq .01$) เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 3 มีปริมาณลิกนินน้อยกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 4 และ 6 ($p \leq .01$) เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 4 มี

2. เส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์ไฮ-บริดซ์ 3 ชั้นนอก ที่แยกด้วยวิธีที่ 1 มีปริมาณลิกนินมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 2 5 และ 6 ($p \leq .01$) เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 2 มีปริมาณลิกนินน้อยกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 3 และ 4 ($p \leq .05$ และ $.01$ ตามลำดับ) เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 3 มีปริมาณลิกนินน้อยกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 4 ($p \leq .01$) และเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 4 มีปริมาณลิกนินมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 5 และ 6 ($p \leq .01$) สำหรับเส้นใยจากเปลือกชั้นใน พบว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 1 2 และ 3 มีปริมาณลิกนินน้อยกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 4 ($p \leq .01$) และเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 4 มีปริมาณลิกนินมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 5 และ 6 ($p \leq .01$)

3. เส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์เอทีเอส 12 ชั้นนอก ที่แยกด้วยวิธีที่ 1 มีปริมาณลิกนินมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 2 5 และ 6 ($p \leq .01$) แต่น้อยกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 3 ($p \leq .05$) เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 2 มีปริมาณลิกนินน้อยกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 3 และ 4 ($p \leq .01$) เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 3 มีปริมาณลิกนินมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 4 5 และ 6 ($p \leq .01$) และเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 4 มีปริมาณลิกนินมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 5 และ 6 ($p \leq .01$) สำหรับเส้นใยจากเปลือกชั้นใน พบว่า เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 1 มีปริมาณลิกนินมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 2 5 และ 6 ($p \leq .01$, .05 และ .05 ตามลำดับ) เส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 2 มีปริมาณลิกนินน้อยกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 3 และ 4 ($p \leq .01$) และเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 3 และ 4 มีปริมาณลิกนินมากกว่าเส้นใยที่แยกด้วยวิธีที่ 5 และ 6 ($p \leq .01$)

สรุป

จากผลการวิจัยสรุปได้ดังนี้ 1) ผลต่อปริมาณเซลลูโลส พบว่า เปลือกข้าวโพดพันธุ์เอทีเอส 12 ให้เส้นใยที่มีปริมาณเซลลูโลสมากที่สุด เส้นใยจากเปลือกชั้นในมีปริมาณเซลลูโลสมากกว่าเส้นใยจากเปลือกชั้นนอก การแยกเส้นใยด้วยวิธีที่ 5 และ 6 ให้เส้นใยที่มีปริมาณเซลลูโลสมากกว่าการแยกเส้นใยด้วยวิธีอื่น ผลของปฏิสัมพันธ์พบว่า วิธีการแยกเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์อินทรี 2 ชั้นนอก ที่ให้เส้นใยที่มีปริมาณเซลลูโลสมากกว่าวิธีอื่น คือ วิธีที่ 5 และ 6 ส่วนวิธีการแยกเส้นใยจากเปลือกชั้นใน ที่ให้เส้นใยที่มีปริมาณเซลลูโลสมากที่สุดคือ วิธีที่ 3 วิธีการแยกเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์ไฮ-บริดจ์ 3 และพันธุ์เอทีเอส 12 ทั้งชั้นนอกและชั้นใน ที่ให้เส้นใยที่มีปริมาณเซลลูโลสมากที่สุดคือ วิธีที่ 6 2) ผลต่อปริมาณเฮมิเซลลูโลส พบว่า เปลือกข้าวโพดพันธุ์ไฮ-บริดจ์ 3 ให้เส้นใยที่มีปริมาณเฮมิเซลลูโลสมากที่สุด

เส้นใยจากเปลือกชั้นนอกมีปริมาณเฮมิเซลลูโลสมากกว่าเส้นใยจากเปลือกชั้นใน และการแยกเส้นใยด้วยวิธีที่ 1 ให้เส้นใยที่มีปริมาณเฮมิเซลลูโลสมากที่สุด ผลของปฏิสัมพันธ์พบว่า วิธีการแยกเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดทั้ง 3 พันธุ์ ทั้งชั้นนอกและชั้นใน ที่ให้เส้นใยที่มีปริมาณเฮมิเซลลูโลสมากที่สุดคือ วิธีที่ 1 และ 3) ผลต่อปริมาณลิกนิน พบว่า เปลือกข้าวโพดพันธุ์อินทรี 2 ให้เส้นใยที่มีปริมาณลิกนินมากที่สุด เส้นใยจากเปลือกชั้นนอกมีปริมาณลิกนินมากกว่าเส้นใยจากเปลือกชั้นใน และการแยกเส้นใยด้วยวิธีที่ 1 ให้เส้นใยที่มีปริมาณลิกนินมากที่สุด ผลของปฏิสัมพันธ์พบว่า วิธีการแยกเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์อินทรี 2 และพันธุ์ไฮ-บริดจ์ 3 ทั้งชั้นนอกและชั้นใน ที่ให้เส้นใยที่มีปริมาณลิกนินมากที่สุดคือ วิธีที่ 4 ส่วนวิธีการแยกเส้นใยจากเปลือกข้าวโพดพันธุ์เอทีเอส 12 ทั้งชั้นนอกและชั้นใน ที่ให้ปริมาณลิกนินมากที่สุดคือ วิธีที่ 3

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนการวิจัยภายใต้แผนงานเสริมสร้างศักยภาพและพัฒนานักวิจัยรุ่นใหม่ตามทิศทางการยุทธศาสตร์การวิจัยและนวัตกรรม ประเภทบัณฑิตศึกษา จากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ ประจำปี 2562

เอกสารอ้างอิง

- Anonymous. 2017. **Hi-Brix 3 Corn**. Technology Chaoban. Available Source: https://www.technologychaoban.com/what-news/article_28165, February 13, 2020. (in Thai)
- Boonrueang, S. and Chankroot, A. 2008. **Handbook of agricultural extensionist: corn (animal feed corn and sweet corn)**. Bureau of

- Agricultural Commodities Promotion and Management, Department of Agricultural Extension, Bangkok. (in Thai)
- Goering, H.K. and Van Soest, P.J. 1970. **Forage fiber analysis (apparatus, reagents, procedures and some applications) Agricultural Handbook No. 379.** Government printing office, Washington, D.C.
- Huda, S. and Yang, Y. 2008. Chemically extracted cornhusk fibers as reinforcement in light-weight poly (propylene) composites. **Macromolecular materials and Engineering** 293: 235-243.
- Information Technology and Communication center, Department of Agricultural Extension, Ministry of Agriculture and Cooperatives. 2019. **Sweet corn in 2018.** Available Source: <http://www.agriinfo.doe.go.th/year62/plan t/rortor/veget/16.pdf>, February 5, 2020. (in Thai)
- Jones, D., Ormondroyd, G.O., Curling, S.F., Popescu, C.M. and Popescu, M.C. 2017. Chemical compositions of natural fibres, pp. 23-58. *In* Fan, M. and Fu, F., eds. **Advanced high strength natural fibre composites in construction.** Woodhead publishing, Cambridge.
- Pornchaleampong, P. and Ratanapanon, N. n.d. **Lignin.** Available Source: <http://www.foodnetwork solution.com/wiki/word/3289/lignin-ลิกนิน> , January 17, 2020. (in Thai)
- Reddy, N., Yang, Y. and McAlister III, D.D. 2006. Processability and properties of yarns produced from cornhusk fibres and their blends with other fibres. **Indian Journal of Fibre & Tetile Research** 31: 537-542.
- Sari, N.H., Wardana, I.N.G., Irawan, Y.S. and Siswanto, E. 2017. The effect of sodium hydroxide on chemical and mechanical properties of corn husk fiber. **Oriental Journal of Chemistry** 33(6): 3037-3042.
- Yilmaz, N.D., Sulak, M., Yilmaz, K. and Kalin, F. 2016. Physical and chemical properties of water-retted fibers extracted from different locations in corn husks. **Journal of Natural Fibers** 13(4): 397-409.

ความหลากหลายและความชุกชุมของแพลงก์ตอนสัตว์ในบริเวณ แนวหญ้าทะเลและบริเวณคลองในป่าชายเลน บ้านมดตะนอย จังหวัดตรัง

Diversity and Abundance of Zooplankton in Seagrass Beds and Mangrove Canal in Banmodtanoy, Trang Province

บุญวัฒน์ ผ่องย่อง และ อิชิคา ซิวายพราหมณ์*

Bunyawat Ponyong and Itchika Sivaipram *

Received: 8 July 2020, Revised: 6 January 2021, Accepted: 8 February 2021

บทคัดย่อ

แพลงก์ตอนสัตว์เป็นตัวกลางสำคัญในการถ่ายทอดสารอาหารและพลังงานระหว่างผู้ผลิตและผู้บริโภค ระดับสูงจึงใช้บ่งชี้ความอุดมสมบูรณ์ของชายฝั่งทะเลได้ การศึกษานี้วิเคราะห์ความหลากหลายและความชุกชุมของแพลงก์ตอนสัตว์เพื่อประเมินความอุดมสมบูรณ์ของระบบนิเวศชายฝั่งบริเวณบ้านมดตะนอย จังหวัดตรัง การเก็บตัวอย่างใช้ถ่วงลากแพลงก์ตอนขนาดตา 103 ไมโครเมตร ลากในบริเวณพื้นทราย แนวหญ้าทะเลและคลองในป่าชายเลน พบแพลงก์ตอนสัตว์ 44 กลุ่ม จาก 12 ไฟลัม โดยตัวอ่อนหอยสองฝา และกาลานอยด์โคพิพอดเป็นกลุ่มเด่นทุกบริเวณ ความชุกชุมเฉลี่ยของแพลงก์ตอนสัตว์มีค่าสูงสุดบริเวณแนวหญ้าทะเล (1.35×10^6 ตัวต่อ 100 ลูกบาศก์เมตร) และต่ำสุดบริเวณคลองในป่าชายเลน (4.71×10^5 ตัวต่อ 100 ลูกบาศก์เมตร) แตกต่างจากปริมาณของแพลงก์ตอนสัตว์ซึ่งมีค่าเฉลี่ยสูงสุดบริเวณพื้นทราย (26.32 มิลลิลิตรต่อลูกบาศก์เมตร) และต่ำสุดบริเวณคลองในป่าชายเลน (0.85 มิลลิลิตรต่อลูกบาศก์เมตร) การวิเคราะห์หุ้มีติแบ่งประชาคมของแพลงก์ตอนสัตว์ออกเป็น 2 กลุ่ม คือ 1) กลุ่มที่อยู่ในบริเวณพื้นทรายและในแนวหญ้าทะเล มีตัวอ่อนหอยสองฝาเป็นกลุ่มเด่น 2) กลุ่มที่อยู่ในบริเวณคลองในป่าชายเลน มีกาลานอยด์โคพิพอด และไซโคลพอยด์โคพิพอดเป็นกลุ่มเด่น ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำเป็นปัจจัยสำคัญอธิบายดัชนีความหลากหลายและคุณภาพการกระจายของแพลงก์ตอนสัตว์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) การศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นถึงความหลากหลายของแพลงก์ตอนสัตว์บริเวณชายฝั่งบ้านมดตะนอยรวมทั้งความสำคัญของบริเวณแนวหญ้าทะเลและป่าชายเลนในการเป็นแหล่งอนุบาลและแหล่งอาหารของสัตว์ทะเล

คำสำคัญ: แพลงก์ตอนสัตว์ชั่วคราว, แหล่งอนุบาลสัตว์น้ำ, ความอุดมสมบูรณ์, ระบบนิเวศชายฝั่งทะเล

ภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ถนนพญาไท แขวงวังใหม่ เขตปทุมวัน กทม. 10330

Department of Marine Science, Faculty of Science, Chulalongkorn University, Phayathai Road, Wangmai, Patumwan, Bangkok 10330, Thailand.

* ผู้นิพนธ์ประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): Itchika.S@chula.ac.th Tel: 0 2218 5388

ABSTRACT

Zooplankton is an important link between primary producers and higher trophic levels. Thus, it can be used as a bioindicator of coastal environments. This study used zooplankton data to assess the abundance of Banmodtanoy coastal area. Zooplankton samples were collected by taking horizontal tows with a plankton net (103 μm -mesh) in 3 areas, including bare sand adjacent to sea grass beds, seagrass beds, and mangrove canal at Banmodtanoy, Trang province. The zooplankton were identified into 44 taxa from 12 phyla. Calanoid copepods and bivalve larvae were the dominant groups in this area. The highest average abundance of zooplankton was observed in seagrass beds ($1.35 \times 10^6 \text{ ind.}100 \text{ m}^{-3}$) and the lowest was found in mangrove canal ($4.71 \times 10^5 \text{ ind.}100 \text{ m}^{-3}$). In contrast, the highest biovolume of zooplankton was found in the bare sand ($26.32 \text{ mL} \cdot \text{m}^{-3}$) and the lowest biovolume was observed in the mangrove canal ($0.85 \text{ mL} \cdot \text{m}^{-3}$). The result of non-metric multidimensional scaling analysis showed that zooplankton communities were divided into 2 groups based on the area: 1) seagrass beds and bare sand were dominated by bivalve larvae, while scyphozoans, echinopluteus larvae and auricularia larvae were the characteristic group, and 2) mangrove canal was dominated by calanoid copepods and cyclopoid copepods. Dissolved oxygen was the only significant factor for Shannon Wiener index and Evenness index. This study shows high abundance of zooplankton along the coast of Banmodtanoy and emphasizes the important of seagrass beds and mangroves as a nursery and a feeding ground for marine organisms.

Key words: merozooplankton, nursery ground, abundance, coastal ecosystem

บทนำ

แพลงก์ตอนสัตว์ คือ กลุ่มของสิ่งมีชีวิตจำพวกสัตว์ที่อาศัยอยู่ในมวลน้ำดำรงชีวิตเป็นแพลงก์ตอนไม่สามารถว่ายน้ำทนกระแสน้ำได้ ซึ่งครอบคลุมตั้งแต่กลุ่มโปรโตซัวไปจนถึงสัตว์มีกระดูกสันหลังจำพวกปลา (Lalli and Parsons, 1997) โดยแพลงก์ตอนสัตว์แบ่งได้เป็น 2 กลุ่มตามลักษณะการดำรงชีวิต คือ กลุ่มที่เป็นแพลงก์ตอนตลอดชีวิตหรือแพลงก์ตอนสัตว์ถาวร (holoplankton) และกลุ่มที่เป็นแพลงก์ตอนเพียงช่วงหนึ่งของชีวิตหรือ แพลงก์ตอนสัตว์ชั่วคราว (meroplankton) (Williams and Collins, 1986; Benfield, 2013) แพลงก์ตอนสัตว์มีบทบาทสำคัญต่อสายใยอาหารในทะเล โดยเป็นตัวกลางในการถ่ายทอดสารอาหารและพลังงานจากผู้ผลิตไปสู่ผู้บริโภคใน

ระดับที่สูงขึ้น (Richardson, 2008) นอกจากนี้การเปลี่ยนแปลงขององค์ประกอบและปริมาณของแพลงก์ตอนสัตว์ยังแปรผันตามสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน (Chiba and Saino, 2003; David *et al.*, 2005; Marques *et al.*, 2007) แพลงก์ตอนสัตว์จึงถูกใช้เป็นปัจจัยหนึ่งในการบ่งชี้ความอุดมสมบูรณ์ทางด้านทรัพยากรและสภาพแวดล้อมของระบบนิเวศชายฝั่งทะเล (Ferdous and Muktadir, 2009; Pratiwi *et al.*, 2016; Parmar *et al.*, 2016)

แหล่งหญ้าทะเล ป่าชายเลน และแนวปะการังเป็นระบบนิเวศชายฝั่งทะเลที่มีขนาดใหญ่และมีความสำคัญในพื้นที่เขตร้อน โดยมีผลผลิตและความหลากหลายทางชีวภาพที่สูง (Fortes, 1988; Duarte and Chiscano, 1999) โดยเฉพาะแหล่งหญ้า

ทะเลและป่าชายเลนซึ่งเป็นที่อยู่อาศัยของสัตว์น้ำ นานาชนิด (Marine and Coastal Resources Research & Development Institute, Department of Marine and Coastal Resources, 2015) และเป็นระบบนิเวศที่มีความสำคัญต่อแหล่งกักตุนสัตว์ในการเป็นแหล่งอาหาร และแหล่งอนุบาลของตัวอ่อนสัตว์น้ำที่ดำรงชีวิตเป็นแพลงก์ตอนสัตว์ชั่วคราว ซึ่งรวมถึงตัวอ่อนของสัตว์น้ำที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ (Robertson *et al.*, 1988; Duffy, 2006; Orth *et al.*, 2006) การศึกษาที่ผ่านมาในต่างประเทศพบว่าบริเวณหญ้าทะเลและป่าชายเลนที่อยู่ติดกันมีความพิเศษในการเป็นแหล่งอนุบาลสัตว์น้ำเศรษฐกิจ เนื่องจากมีสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อการอยู่อาศัย, เป็นพื้นที่หลบภัยจากผู้ล่า, เป็นแหล่งอาหารที่มีความอุดมสมบูรณ์ และเป็นพื้นที่ที่มีการซ้อนทับของระบบนิเวศมีความหลากหลายและปริมาณตัวอ่อนสัตว์น้ำที่เป็นแพลงก์ตอนจำนวนมาก (Saenger *et al.*, 2012) อย่างไรก็ตามการศึกษาที่เปรียบเทียบองค์ประกอบแพลงก์ตอนสัตว์ในบริเวณระบบนิเวศชายฝั่งที่แตกต่างกันมีอยู่จำกัดทั้งในและต่างประเทศ โดยการศึกษาแพลงก์ตอนสัตว์ในระบบนิเวศชายฝั่งของประเทศไทยส่วนใหญ่เป็นการศึกษาในระบบนิเวศหญ้าทะเล (Nateekanjanalarp, 1990; Intharasook, 1999; Tantichaiwanit *et al.*, 2010) หรือระบบนิเวศป่าชายเลน (Chuaypanang, 1998; Satapoomin, 1999; Punnarak, 2003, Sivaipram *et al.*, 2007) ระบบใดระบบหนึ่งเท่านั้นผลการศึกษาที่ผ่านมาพบ โคพีพอด (copepod) เป็นแพลงก์ตอนสัตว์กลุ่มเด่นที่มีความหนาแน่นสูงที่สุดทั้งในระบบนิเวศหญ้าทะเล (Nateekanjanalarp, 1990; Intharasook, 1999; Tantichaiwanit *et al.*, 2010) และป่าชายเลน (Chuaypanang, 1998; Satapoomin, 1999; Punnarak, 2003, Sivaipram *et al.*, 2007) นอกจากนี้ตัวอ่อนหอยฝาเดียว (gastropod larvae) ตัวอ่อนหอยสองฝา (bivalve larvae) ตัวอ่อนระยะนอพลีซของครัสเตเชียน

(crustacean nauplii) แอมฟิพอด (amphipods) ออสตราคอด (ostracods) และตัวอ่อนกุ้ง (shrimp larvae) เป็นกลุ่มเด่นในแนวหญ้าทะเล (Nateekanjanalarp, 1990; Intharasook, 1999; Tantichaiwanit *et al.*, 2010) ส่วนตัวอ่อนของเพรียงหิน (cirripedia larvae) ตัวอ่อนหอยฝาเดียว (gastropod larvae) ตัวอ่อนหอยสองฝา (bivalve larvae) ตัวอ่อนไส้เดือนทะเล (polychaete larvae) และ ตัวอ่อนระยะนอพลีซของครัสเตเชียน (crustacean nauplii) พบเป็นกลุ่มเด่นรองจาก โคพีพอด ในบริเวณป่าชายเลน (Chuaypanang, 1998; Satapoomin, 1999; Punnarak, 2003, Sivaipram *et al.*, 2007)

ชายฝั่งทะเลบ้านมดตะนอย จังหวัดตรัง เป็นพื้นที่ที่มีความพิเศษทางระบบนิเวศทางทะเล เนื่องจากเป็นพื้นที่ที่มีทั้งระบบนิเวศแนวหญ้าทะเลและระบบนิเวศป่าชายเลนเชื่อมต่อกันผ่านทางคลองมดตะนอยและคลองลัดเจ้าไหม ชาวบ้านที่อาศัยอยู่ในชุมชนบริเวณนี้ประมาณ 90% ประกอบอาชีพประมงพื้นบ้าน (Chaithui, 2018) ดังนั้นพื้นที่บริเวณชายฝั่งทะเลบ้านมดตะนอยจึงมีความสำคัญทางด้านเศรษฐกิจต่อชุมชนในการเป็นแหล่งทรัพยากรประมงที่สำคัญ อย่างไรก็ตามพื้นที่ดังกล่าวยังขาดการศึกษาในด้านความหลากหลายและความชุกชุมของแพลงก์ตอนสัตว์ซึ่งเป็นปัจจัยหนึ่งที่สำคัญในการบ่งชี้ความอุดมสมบูรณ์และการอยู่อาศัยของสัตว์น้ำวัยอ่อน ดังนั้นการศึกษานี้จึงต้องการศึกษาความหลากหลายและความชุกชุมของแพลงก์ตอนสัตว์ในบริเวณแนวหญ้าทะเลและป่าชายเลน บ้านมดตะนอย จังหวัดตรัง เพื่อนำข้อมูลมาใช้ประเมินความอุดมสมบูรณ์ของระบบนิเวศชายฝั่งบริเวณนี้ โดยเปรียบเทียบระหว่างถิ่นที่อยู่อาศัยย่อยของบริเวณพื้นทรายที่ติดกับแนวหญ้าทะเล บริเวณแนวหญ้าทะเล และบริเวณคลองในป่าชายเลน องค์ความรู้ที่ได้จะเป็นพื้นฐานที่สำคัญที่แสดงให้เห็นความสำคัญของพื้นที่ซึ่งสามารถ

นำไปใช้ในการวางแผนอนุรักษ์และจัดการทรัพยากรชายฝั่งทะเลบริเวณนี้ได้อย่างมีประสิทธิภาพ

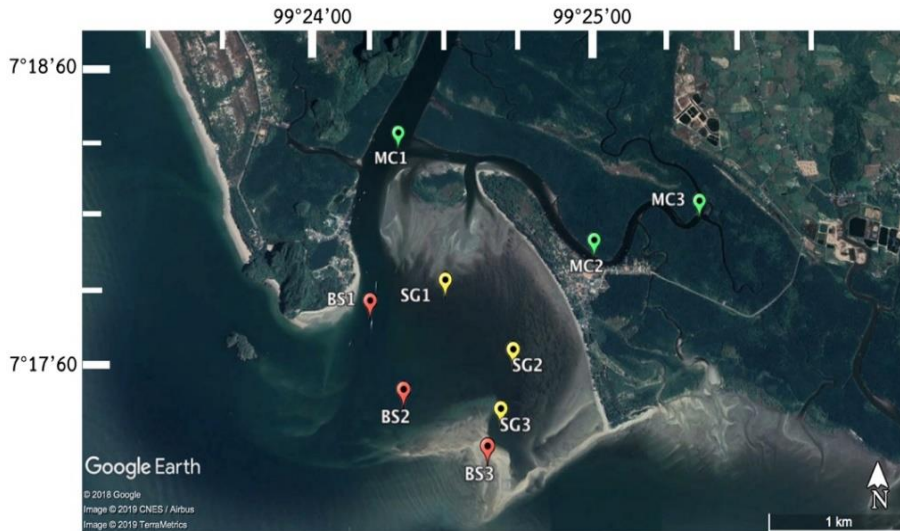
วิธีดำเนินการวิจัย

เก็บตัวอย่างแพลงก์ตอนสัตว์บริเวณชายฝั่งทะเลบ้านมดตะนอย จังหวัดตรัง ระหว่างละติจูด $07^{\circ}.17'-07^{\circ}.18'N$ และลองจิจูด $99^{\circ}.24'-99^{\circ}.25' E$ ในช่วงเวลาน้ำขึ้นสูงสุดของวันที่ 22 ธันวาคม พ.ศ. 2561 จำนวน 1 ครั้ง ซึ่งตัวอย่างจากเดือนธันวาคมสามารถเป็นตัวแทนที่ดีของพื้นที่บริเวณนี้ได้ เนื่องจากเป็นช่วงเวลาที่เคยมีรายงานการพบแพลงก์ตอนสัตว์มีความหนาแน่นสูงที่สุดและมีจำนวนกลุ่มของสัตว์น้ำวัยอ่อนสูงที่สุดในบริเวณชายฝั่งทะเล จังหวัดตรัง (Chuaipanang, 1998) พื้นที่เก็บตัวอย่างแบ่งออกเป็น 3 บริเวณ ได้แก่ บริเวณพื้นที่ทรายที่ติดกับแนวหญ้าทะเล (BS1, BS2 และ BS3), บริเวณแนวหญ้าทะเล (SG1, SG2 และ SG3) และบริเวณคลองในป่าชายเลน (MC1, MC2 และ MC3) (ภาพที่ 1)

การเก็บตัวอย่างแพลงก์ตอนสัตว์ดำเนินการในพื้นที่ศึกษาทั้งสามบริเวณๆ ละ 3 จุด โดยใช้ถุงลากแพลงก์ตอนสัตว์ขนาดตา 103 ไมโครเมตร ลากในแนวระนาบ (horizontal haul) ที่ระดับความลึกประมาณ 1 เมตร ด้วยความเร็วประมาณ 1 น็อต เป็นระยะเวลา 2 นาที รวบรวมตัวอย่างแพลงก์ตอนสัตว์ที่

ได้ไว้ในขวดพลาสติกขนาด 250 มิลลิลิตร รักษาสภาพด้วยฟอร์มาลินที่เป็นกลาง (neutral formalin) ความเข้มข้นสุดท้ายประมาณ 4% และนำตัวอย่างแพลงก์ตอนสัตว์ที่ได้มาหาปริมาตรของแพลงก์ตอนสัตว์ (biovolume) โดยการตกตะกอน (Settled-volume measurement) (Postel *et al.*, 2000) จำแนกและนับจำนวนตัวอย่างถึงระดับที่ละเอียดที่สุดเท่าที่ทำได้ภายใต้กล้องจุลทรรศน์สเตอริโอ (Nikon SMZ800N) คำนวณความชุกชุมของแพลงก์ตอนสัตว์ ดัชนีความหลากหลาย (Shannon-Wiener index) (Shannon, 1948) และดัชนีภาพการกระจาย (Evenness index) (Pielou, 1966)

นอกจากนี้ในแต่ละจุดได้ตรวจวัดปัจจัยสิ่งแวดล้อมทางกายภาพและชีวภาพ ได้แก่ ความลึกวัดโดยใช้เชือกที่ระบุความยาวทุก 50 เซนติเมตร ผูกกับลูกตุ้มถ่วงน้ำหนัก, ค่าความโปร่งแสงของน้ำวัดโดย Secchi disc, อุณหภูมิ และความเค็ม วัดโดยเครื่อง SCT meter YSI Pro 30, ปริมาณออกซิเจนละลายน้ำ วัดโดยเครื่อง Dissolved oxygen meter YSI model 55, ค่าความเป็นกรด-เบส (pH) วัดโดยเครื่อง pH meter YSI Pro 10 และเก็บตัวอย่างน้ำปริมาตร 500 มิลลิลิตร ที่ระดับความลึกครึ่งหนึ่งของความลึกจุดเก็บตัวอย่างเพื่อใช้วัดปริมาณคลอโรฟิลล์ *a* โดยวิธี Fluorometry (Arar and Collins, 1997)



ภาพที่ 1 จุดเก็บตัวอย่างในบริเวณพื้นที่ทรายที่ติดกับแนวหญ้าทะเล (BS1, BS2 และ BS3), บริเวณแนวหญ้าทะเล (SG1, SG2 และ SG3) และบริเวณคลองในป่าชายเลน (MC1, MC2 และ MC3) บ้านมดตะนอย จังหวัดตรัง (Source: Google Earth on 2nd July, 2018)

การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติแบ่งออกเป็น 3 ส่วน คือ 1) การทดสอบความแตกต่างของความหลากหลาย ดัชนีความหลากหลาย ความชุกชุม ปริมาตรของแฟลกก์ตอนสัตว์ และปัจจัยสิ่งแวดล้อม โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวนข้อมูลแบบทางเดียว (One-Way ANOVA) ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป SPSS Version 22 (Vanichbuncha, 2018) 2) การศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างความหลากหลาย ดัชนีความหลากหลาย (Shannon-Wiener index) ความชุกชุม ปริมาตรของแฟลกก์ตอนสัตว์กับปัจจัยสิ่งแวดล้อม โดยการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Pearson Correlation Coefficient) และทดสอบความสัมพันธ์ด้วย Multiple Regression Analysis โดยกำหนดให้ ความหลากหลาย ดัชนีความหลากหลาย ความชุกชุม ปริมาตรของแฟลกก์ตอนสัตว์เป็นตัวแปรตาม (Y) และปัจจัยสิ่งแวดล้อมเป็นตัวแปรอิสระ (X) (Vanichbuncha, 2018) และการจัดกลุ่มประชาคมแฟลกก์ตอนสัตว์จากจุดเก็บตัวอย่างด้วย Cluster analysis ด้วยวิธี Complete linkage พร้อมแสดงผลในรูปแบบของเดนโดแกรม และวิเคราะห์ผลด้วย Non-metric

multidimensional scaling (nMDS) ด้วยโปรแกรม PRIMER v6 (Clarke and Gorley, 2006) และแสดงผลเป็นกราฟสองมิติ

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. ปัจจัยสิ่งแวดล้อม

โดยทั่วไปปัจจัยสิ่งแวดล้อมในบริเวณชายฝั่งบ้านมดตะนอยทั้ง 3 บริเวณที่ทำการศึกษามีค่าใกล้เคียงกัน (ตารางที่ 1) ความลึกอยู่ในช่วง $2.08 \pm 0.30 - 3.83 \pm 1.74$ เมตร ความโปร่งแสงของน้ำ $1.08 \pm 0.21 - 2.38 \pm 0.70$ เมตร อุณหภูมิ $28.85 \pm 0.23 - 29.78 \pm 0.06$ องศาเซลเซียส ความเค็ม $28.80 \pm 0.21 - 29.34 \pm 0.03$ psu ความเป็นกรด-เบส $7.47 \pm 0.24 - 8.17 \pm 0.03$ และปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ $1.75 \pm 0.44 - 2.84 \pm 0.35$ ไมโครกรัมต่อลิตร มีเพียงปริมาณออกซิเจนละลายบริเวณคลองในป่าชายเลน (4.99 ± 0.59 มิลลิกรัมต่อลิตร) ที่มีค่าต่ำกว่าในบริเวณแนวหญ้าทะเล (7.27 ± 0.15 มิลลิกรัมต่อลิตร) และบริเวณพื้นที่ทราย (6.69 ± 0.26 มิลลิกรัมต่อลิตร) อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$)

ตารางที่ 1 ปัจจัยสิ่งแวดล้อม (ค่าเฉลี่ย±ความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน) บริเวณชายฝั่งบ้านมดตะนอย จังหวัดตรัง

Environment factors	Bare sand (BS)	Seagrass beds (SG)	Mangrove canal (MC)
Depth (m)	3.83 ± 1.74	2.08 ± 0.30	3.67 ± 0.67
Transparency (m)	2.38 ± 0.70	1.75 ± 0.26	1.08 ± 0.21
Temperature (°C)	29.49 ± 0.31	29.78 ± 0.06	28.85 ± 0.23
Salinity (psu)	29.13 ± 0.08	29.34 ± 0.03	28.80 ± 0.21
pH	8.12 ± 0.06	8.17 ± 0.03	7.47 ± 0.24
Dissolved oxygen (mg • L ⁻¹)	6.69 ± 0.26	7.27 ± 0.15	4.99 ± 0.59*
Chlorophyll <i>a</i> (µg • L ⁻¹)	1.75 ± 0.44	1.90 ± 0.24	2.84 ± 0.35

*ANOVA is significant $p < 0.05$

2. ความหลากหลาย ความชุกชุม และปริมาตรของแพลงก์ตอนสัตว์

การศึกษานี้พบแพลงก์ตอนสัตว์ทั้งหมด 44 กลุ่ม จาก 12 ไฟลัม ประกอบด้วยแพลงก์ตอนสัตว์ถาวร 23 กลุ่ม จาก 7 ไฟลัม และแพลงก์ตอนสัตว์ชั่วคราว 21 กลุ่ม จาก 8 ไฟลัม (ตารางที่ 2) โดยพบความหลากหลายของแพลงก์ตอนสัตว์สูงสุดบริเวณแนวหญ้าทะเล 39 กลุ่ม รองลงมาคือ บริเวณพื้นทรายและคลองในป่าชายเลน พบแพลงก์ตอนสัตว์ทั้งหมด 36 และ 35 กลุ่ม ตามลำดับ จากการวิเคราะห์ดัชนีความหลากหลายและคุณภาพการกระจายของแพลงก์ตอนสัตว์บริเวณชายฝั่งบ้านมดตะนอยทั้งสามบริเวณพบว่าไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p > 0.05$) โดยดัชนีความหลากหลายมีค่าสูงสุดในบริเวณแนวหญ้าทะเล (1.77 - 2.06) รองลงมาคือ บริเวณพื้นทราย (1.79 - 1.90) และคลองในป่าชายเลน (1.03 - 1.80) ตามลำดับ ขณะที่ค่าคุณภาพการกระจายมีค่าสูงสุดบริเวณพื้นทราย (0.52 - 0.60) รองลงมาคือบริเวณแนวหญ้าทะเล (0.55 - 0.59) และคลองในป่าชายเลน (0.33 - 0.55) ตามลำดับ

ความชุกชุมของแพลงก์ตอนสัตว์ในทั้งสามบริเวณไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทาง

สถิติ ($p > 0.05$) มี โดยมีค่าเฉลี่ยสูงสุดบริเวณแนวหญ้าทะเล ($1.35 \times 10^6 \pm 0.38 \times 10^6$ ตัวต่อปริมาตรน้ำ 100 ลูกบาศก์เมตร) รองลงมาคือ บริเวณพื้นทรายและคลองในป่าชายเลน ($8.85 \times 10^5 \pm 2.40 \times 10^5$ และ $4.71 \times 10^5 \pm 1.47 \times 10^5$ ตัวต่อปริมาตรน้ำ 100 ลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ) (ภาพที่ 2ก) สำหรับปริมาตรของแพลงก์ตอนสัตว์บริเวณพื้นทรายและแนวหญ้าทะเลมีค่าสูงกว่าบริเวณคลองในป่าชายเลนอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) โดยบริเวณพื้นทรายมีปริมาตรเฉลี่ยสูงสุดเท่ากับ 26.32 ± 14.74 มิลลิเมตรต่อลูกบาศก์เมตร รองลงมาคือบริเวณแนวหญ้าทะเลและคลองในป่าชายเลน 12.85 ± 2.36 และ 0.85 ± 0.38 มิลลิเมตรต่อลูกบาศก์เมตร ตามลำดับ (ภาพที่ 2ข) ทั้งนี้ในบริเวณพื้นทรายและแนวหญ้าทะเลมีสัดส่วนของแพลงก์ตอนสัตว์ถาวรและแพลงก์ตอนสัตว์ชั่วคราวในสัดส่วนที่ใกล้เคียงกัน (ประมาณร้อยละ 50) (ภาพที่ 3ก) และมีแพลงก์ตอนสัตว์กลุ่มเด่นคล้ายคลึงกันโดยมีตัวอ่อนหอยสองฝา คาลานอยด์ โคพีพอด และตัวอ่อนหอยฝาเดียวเป็นแพลงก์ตอนสัตว์กลุ่มเด่น (ภาพที่ 3ข) ในขณะที่คลองในป่าชายเลนมีสัดส่วนของแพลงก์ตอนสัตว์ถาวรสูงถึงร้อยละ 89 ของปริมาณแพลงก์ตอนสัตว์ทั้งหมด (ภาพที่ 3ก)

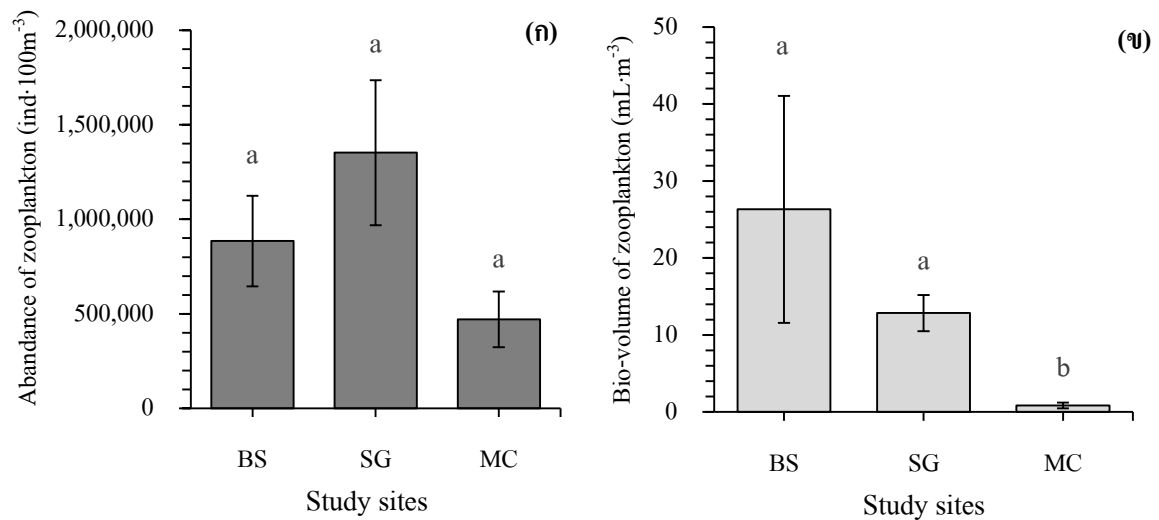
โดยกาลานอยด์โคฟีพอด ไฮโดรเมดูซาคอฟีพอด แพลงก์ตอนสัตว์กลุ่มเด่น (ภาพที่ 3ข)
และตัวอ่อนระยะนอเพเลียสของโคฟีพอดเป็น

ตารางที่ 2 แพลงก์ตอนสัตว์และความถี่ในการพบในแต่ละบริเวณที่ศึกษา (frequency of occurrence, %) ในบริเวณชายฝั่งทะเลบ้านมดตะนอย จังหวัดตรัง (* คือ กลุ่มของแพลงก์ตอนสัตว์ชั่วคราว)

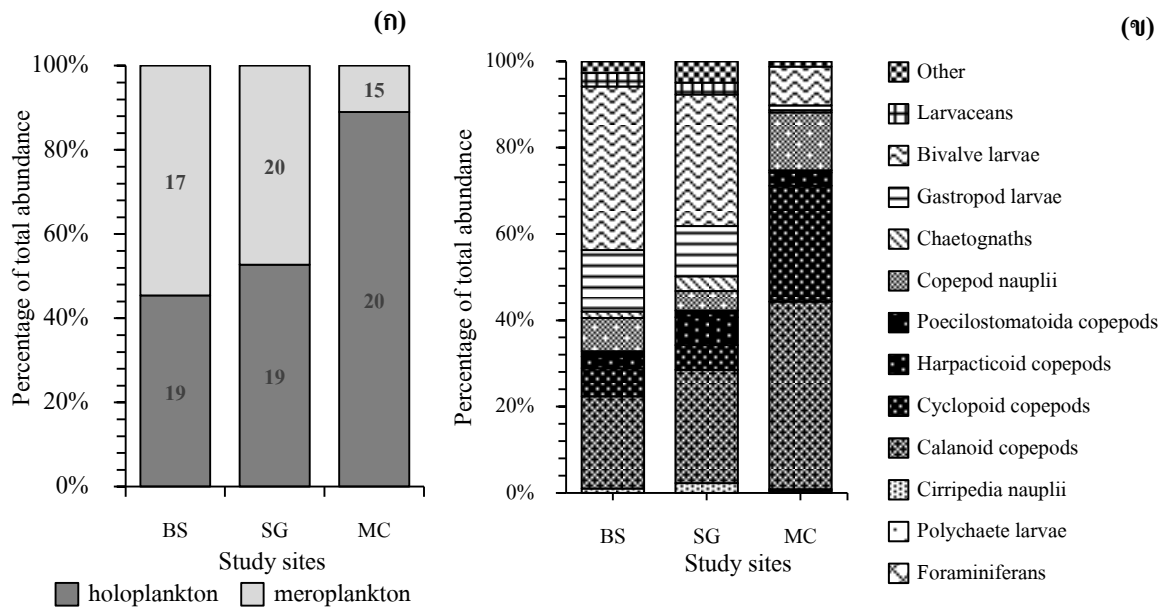
Phylum	Taxa	Bare sand	Seagrass beds	Mangrove canal
Foraminifera	Foraminiferans	100	100	100
Cnidaria	Hydromedusae	100	100	67
	Scyphozoans	33	67	0
	Polyp of cnidaria	0	0	33
Ctenophora	Ctenophores	0	0	33
Nemertea	Pilidium larvae*	100	100	0
Nematoda	Nematode*	67	100	100
Phoronida	Actinotrocha larvae*	33	67	33
Annelida	Polychaete larvae*	100	100	100
	Sea mites	33	33	100
	Cladocerans	100	67	0
	Ostracods	33	67	33
	Cirripedia nauplii*	100	100	100
	Cypris larvae*	33	100	67
	Calanoid copepods	100	100	100
	Cyclopoid copepods	100	100	100
	Poecilostomatoida copepods	100	100	100
	Harpacticoid copepods	100	100	100
	Monstrilloida copepods	0	0	67
	Copepod nauplii	100	100	100
	Isopods	67	100	100
	Amphipods	33	67	67
	Protozoa of <i>Lucifer hanseni</i>	100	100	100
	Mysis of <i>Lucifer hanseni</i>	67	100	67
	<i>Lucifer hanseni</i>	100	100	0
	Penaeid shrimp larvae*	33	100	67
	Caridean shrimp larvae*	33	100	33
	Anomuran crab larvae*	0	100	0
Mollusca	Zoea of brachyurans*	100	100	100
	Megalopa of brachyurans*	0	100	100
	Alima larvae*	0	67	0
	Chaetognaths	100	100	100
	Pteropods	100	100	33
	Gastropod larvae*	100	100	100

ตารางที่ 2 (ต่อ)

Phylum	Taxa	Bare sand	Seagrass beds	Mangrove canal
Echinodermata	Bivalve larvae*	100	100	100
	Cephalopod larvae*	0	33	0
	Ophiopluteus larvae*	100	100	33
	Bipinnaria larvae*	100	100	33
	Echinopluteus larvae*	33	0	0
	Auricularia larvae*	33	67	0
Chordata	Larvaceans	100	100	100
	Salps	0	0	33
	Fish eggs*	100	100	33
	Fish larvae*	100	100	100



ภาพที่ 2 (ก) ความชุกชุมเฉลี่ย และ (ข) ปริมาตรของแพลงก์ตอนสัตว์บริเวณชายฝั่งบ้านมดตะนอย จังหวัดตรัง (แถบแสดงความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน, S.E.) * ตัวอักษรที่เหมือนกันบนกราฟแสดงว่าค่าที่ได้ไม่มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

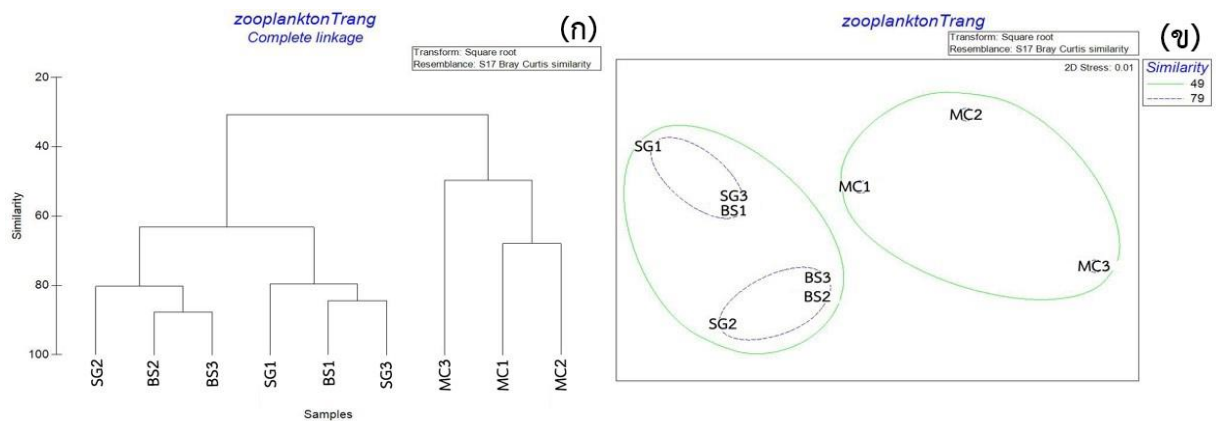


ภาพที่ 3 (ก) จำนวนกลุ่มและสัดส่วนความชุกชุม (ร้อยละ) ระหว่างแพลงก์ตอนสัตว์ถาวรและแพลงก์ตอนชั่วคราว (ตัวเลขบนกราฟแสดงจำนวนกลุ่มของแพลงก์ตอนสัตว์) (ข) ความชุกชุมเป็นร้อยละของแพลงก์ตอนสัตว์กลุ่มเด่นและแพลงก์ตอนสัตว์กลุ่มอื่นๆ ที่พบบริเวณชายฝั่งบ้านมดตะนอย จังหวัดตรัง

3. โครงสร้างประชาคมแพลงก์ตอนสัตว์

ลักษณะโครงสร้างประชาคมแพลงก์ตอนสัตว์จากการวิเคราะห์ด้วย Cluster analysis และ nMDS ในการศึกษาครั้งนี้มีความสอดคล้องกันโดยสามารถแบ่งประชาคมแพลงก์ตอนสัตว์ออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ (รูปที่ 4) คือ 1) กลุ่มที่อยู่บริเวณพื้นทรายและแนวหญ้าทะเล โดยกลุ่มนี้ยังสามารถแบ่งได้เป็น 2 กลุ่มย่อย คือ กลุ่มที่ I-1 ประกอบด้วยแพลงก์ตอนสัตว์จากบริเวณพื้นทราย 2 จุดเก็บตัวอย่าง (BS2 และ BS3) และจากบริเวณแนวหญ้าทะเล 1 จุดเก็บตัวอย่าง (SG2) กลุ่มนี้มีระดับความคล้ายคลึงร้อยละ 83.15 โดยแพลงก์ตอนสัตว์กลุ่มเด่นเรียงลำดับตามความชุกชุมจากมากไปน้อย ได้แก่ ตัวอ่อนหอยสองฝา ตัวอ่อนหอยฝาเดียว กาลานอยด์โคพิพอด ตัวอ่อนระยะนอเพลีสของโคพิพอด และลาวาเซียน ตามลำดับ และกลุ่มที่ I-2 ประกอบด้วยแพลงก์ตอนสัตว์จากบริเวณแนวหญ้าทะเล 2 จุดเก็บตัวอย่าง (SG1 และ SG3) และจากบริเวณพื้นทราย 1 จุดเก็บตัวอย่าง

(BS1) กลุ่มนี้มีระดับความคล้ายคลึงร้อยละ 82.60 โดยแพลงก์ตอนสัตว์กลุ่มเด่นเรียงลำดับตามความชุกชุมจากมากไปน้อย ได้แก่ กาลานอยด์โคพิพอด ตัวอ่อนหอยสองฝา ไชโคลพอยด์โคพิพอด ฮาร์แพคติกอยด์โคพิพอด และ ตัวอ่อนหอยฝาเดียวตามลำดับ ซึ่งในกลุ่มแรกนี้ยังพบแมงกะพรุน (scyphozoans) ตัวอ่อนเม่นทะเล (echinopluteus larvae) และ ตัวอ่อนปลิงทะเล (auricularia larvae) เป็นแพลงก์ตอนสัตว์ที่พบเฉพาะในกลุ่มนี้ 2) กลุ่มที่อยู่บริเวณคลองในป่าชายเลน ประกอบด้วยแพลงก์ตอนสัตว์จากจุดเก็บตัวอย่างทั้ง 3 จุดบริเวณคลองในป่าชายเลน (MC1, MC2 และ MC3) กลุ่มนี้มีระดับความคล้ายคลึงร้อยละ 58.05 โดยแพลงก์ตอนสัตว์กลุ่มเด่นเรียงลำดับตามความชุกชุมจากมากไปน้อย ได้แก่ กาลานอยด์โคพิพอด ไชโคลพอยด์โคพิพอด ตัวอ่อนระยะนอเพลีสของโคพิพอด ตัวอ่อนหอยสองฝา และฮาร์แพคติกอยด์โคพิพอด ตามลำดับ



ภาพที่ 4 การจัดกลุ่มประชาคมแพลงก์ตอนสัตว์บริเวณชายฝั่งบ้านมดตะนอย จังหวัดตรัง จากการวิเคราะห์ด้วย Cluster analysis (ก) และ Non-metric multidimensional scaling analysis (ข)

4. ความสัมพันธ์ระหว่างความหลากหลาย ดัชนีความหลากหลาย ความชุกชุม และปริมาตรของแพลงก์ตอนสัตว์กับปัจจัยสิ่งแวดล้อม

จากการศึกษาความสัมพันธ์โดยการหาค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Pearson Correlation Coefficient) ระหว่างความหลากหลาย ความชุกชุม ดัชนีความหลากหลาย คุณภาพการกระจาย และปริมาตรของแพลงก์ตอนสัตว์กับปัจจัยสิ่งแวดล้อม พบว่าความหลากหลายและความชุกชุมของแพลงก์ตอนสัตว์ไม่มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับปัจจัยสิ่งแวดล้อม ขณะที่ดัชนีความหลากหลายและคุณภาพการกระจายของแพลงก์ตอนสัตว์มีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ

($p < 0.01$) กับอุณหภูมิ ความเค็ม ปริมาณออกซิเจนละลาย และความเป็นกรด-เบส สำหรับปริมาตรของแพลงก์ตอนสัตว์พบว่ามีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) กับความโปร่งแสงของน้ำและปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ (ตารางที่ 3) แต่เมื่อวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (Multiple regression analysis) พบว่าปริมาณออกซิเจนละลายเป็นปัจจัยเดียวที่มีผลต่อการเพิ่มขึ้นของดัชนีความหลากหลายและคุณภาพการกระจายของแพลงก์ตอนสัตว์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ขณะที่ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ เป็นปัจจัยเดียวที่มีผลเชิงลบต่อปริมาตรของแพลงก์ตอนสัตว์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) (ตารางที่ 4)

ตารางที่ 3 ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ (Pearson Correlation Coefficient) ระหว่างจำนวนชนิด/กลุ่ม (number of taxa) ความชุกชุม (abundance of zooplankton) ดัชนีความหลากหลาย (Shannon-Wiener index) คุณภาพการกระจาย (evenness index) และ มวลชีวภาพของแพลงก์ตอนสัตว์ (biovolume of zooplankton) กับปัจจัยสิ่งแวดล้อมบริเวณชายฝั่งบ้านมดตะนอย จังหวัดตรัง

Environment factors	Number of taxa	Abundance of zooplankton	Shannon-Wiener index	Evenness index	Biovolume of zooplankton
depth	0.071	-0.230	-0.335	-0.392	0.587
transparency	0.321	0.256	0.411	0.394	0.725*
temperature	0.427	0.446	0.850**	0.852**	0.140
salinity	0.501	0.534	0.902**	0.892**	0.153
dissolved oxygen	0.556	0.551	0.925**	0.904**	0.342
pH	0.498	0.555	0.958**	0.961**	0.373
chlorophyll <i>a</i>	-0.326	-0.217	-0.207	-0.156	-0.683*

* $p < 0.05$, ** $p < 0.01$

ตารางที่ 4 สมการแสดงความสัมพันธ์ระหว่างดัชนีความหลากหลาย (Shannon-Wiener index) คุณภาพการกระจาย (Evenness index) และมวลชีวภาพของแพลงก์ตอนสัตว์ (Bio-volume of zooplankton) กับปัจจัยสิ่งแวดล้อมในบริเวณชายฝั่งบ้านมดตะนอย จังหวัดตรัง (แสดงเฉพาะผลการวิเคราะห์การถดถอยพหุคูณ (Multiple regression analysis) ที่มีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$))

Multiple regression model		R ²
Shannon-Wiener index	= -0.043 + 0.925 (dissolved oxygen)	0.835
Evenness index	= 0.046 + 0.904 (dissolved oxygen)	0.791
Bio-volume of zooplankton	= 47.47 - 0.683 (chlorophyll <i>a</i>)	0.390

การศึกษาครั้งนี้แสดงให้เห็นความอุดมสมบูรณ์ของบริเวณชายฝั่งบ้านมดตะนอย ซึ่งตามเกณฑ์และตัวชี้วัดความอุดมสมบูรณ์ของทรัพยากรชายฝั่งโดยใช้แพลงก์ตอนสัตว์บ่งชี้ว่าบริเวณนี้มีความอุดมสมบูรณ์ระดับปานกลาง (Department of Marine and Coastal Resources, 2008; Paphavasit *et al.*, 2014) บริเวณชายฝั่งบ้านมดตะนอยมีความสำคัญในการเป็นแหล่งอนุบาลของตัวอ่อนสัตว์น้ำโดยเฉพาะในบริเวณหน้าทะเลดังที่พบแพลงก์ตอนสัตว์ชั่วคราวซึ่งประกอบด้วยตัวอ่อนสัตว์น้ำต่างๆ มีสัดส่วนสูง (ประมาณร้อยละ 50) ใกล้เคียงกับแพลงก์ตอนสัตว์

ถาวร ในขณะที่การศึกษาที่คล้ายกันในพื้นที่หน้าทะเลบริเวณอื่น เช่น บริเวณชายฝั่งเขตร้อนของประเทศออสเตรเลียพบแพลงก์ตอนชั่วคราวเพียงร้อยละ 20 (Robertson *et al.*, 1988) ตัวอ่อนของสัตว์น้ำที่พบในครั้งนี้มีหลายกลุ่ม ได้แก่ กุ้ง กุ้ง ปู ปลา หอยฝาเดียว เม่นทะเล ปลิงทะเล ดาวทะเล และโดยเฉพาะอย่างยิ่งกลุ่มของตัวอ่อนหอยสองฝาพบมีความชุกชุมสูงในบริเวณพื้นทรายและบริเวณแนวหน้าทะเล ซึ่งตัวอ่อนหอยสองฝาที่พบอาจเป็นตัวอ่อนของหอยสองฝาที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจในพื้นที่บ้านมดตะนอย เช่น หอยนางรม และหอยเสียบ (Chuaypanang, 1998)

นอกจากนี้ยังพบตัวอ่อนของหมึกซึ่งไม่เคยมีรายงานในการศึกษาบริเวณใกล้เคียง (Chuaypanang, 1998; Punnarak, 2003) บริเวณชายฝั่งบ้านมดตะนอยทั้งบริเวณพื้นทรายแนวหญ้าทะเลและคลองในป่าชายเลนจัดว่าเป็นแหล่งหาอาหารที่สำคัญของทรัพยากรประมงในบริเวณนี้และพื้นที่ใกล้เคียงเนื่องจากมีแพลงก์ตอนสัตว์กลุ่มกาลานอยด์โคพีพอด และไฮโดรพอดโคพีพอดหนาแน่นสูง ซึ่งแพลงก์ตอนสัตว์กลุ่มนี้มีเป็นอาหารสำคัญของปลาและสัตว์น้ำหลายชนิด (Ajibove *et al.*, 2011; Horinouchi *et al.*, 2012)

ความชุกชุมของแพลงก์ตอนสัตว์จากการศึกษาครั้งนี้มีค่าอยู่ในช่วงที่พบได้ในระบบนิเวศชายฝั่งทะเลของไทย (Chuaypanang, 1998; Punnarak, 2003; Sivaipram *et al.*, 2007; Tantichaiwanit *et al.*, 2010) และประเทศออสเตรเลีย (Robertson *et al.*, 1988) สำหรับกลุ่มของแพลงก์ตอนสัตว์ที่พบในการศึกษาครั้งนี้เป็นกลุ่มของแพลงก์ตอนสัตว์ที่สามารถพบได้ทั่วไปในระบบนิเวศชายฝั่งเขตร้อนเช่นเดียวกับการศึกษาในอดีต ทั้งในบริเวณแนวหญ้าทะเล (Nateekanjanalarp, 1990; Intharasook, 1999; Tantichaiwanit *et al.*, 2010) และป่าชายเลน (Chuaypanang, 1998; Satapoomin, 1999; Paphavasit *et al.*, 2003; Sivaipram *et al.*, 2007) โดยการศึกษาครั้งนี้พบความหลากหลายและความชุกชุมเฉลี่ยของแพลงก์ตอนสัตว์สูงสุดบริเวณแนวหญ้าทะเลซึ่งมีปริมาณออกซิเจนละลายสูง ซึ่งสัตว์และพืชบริเวณน้ำกร่อยจะเจริญเติบโตได้ดีเมื่อปริมาณออกซิเจนละลายมีค่ามากกว่า 5 มิลลิกรัมต่อลิตร (Batiuk *et al.*, 2009) ปริมาณออกซิเจนละลายเป็นปัจจัยสิ่งแวดล้อมเพียงอย่างเดียวในการศึกษานี้ที่แตกต่างกันระหว่างพื้นที่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p < 0.05$) ปริมาณออกซิเจนละลายในบริเวณแนวหญ้าทะเลสูงกว่าบริเวณอื่นเนื่องจากมีปริมาณออกซิเจนปลดปล่อยออกมาจากกระบวนการ

สังเคราะห์แสงของหญ้าทะเล (Duarte and Chiscano, 1999) ถึงแม้ว่าในบริเวณป่าชายเลนที่ศึกษาในครั้งนี้มีออกซิเจนละลาย (4.99 มิลลิกรัมต่อลิตร) ต่ำกว่าอีกสองบริเวณแต่ก็ยังจัดว่าอยู่ในเกณฑ์มาตรฐานคุณภาพน้ำทะเล (Pollution Control Department, 2020) สำหรับปริมาณของแพลงก์ตอนสัตว์ที่ได้จากการศึกษาครั้งนี้มีรูปแบบที่แตกต่างจากความชุกชุมเฉลี่ยของแพลงก์ตอนสัตว์ โดยบริเวณพื้นทรายมีปริมาณของแพลงก์ตอนสัตว์สูงสุด เนื่องจากบริเวณนี้มีความชุกชุมของแพลงก์ตอนสัตว์โดยรวมค่อนข้างสูงและมีแมงกะพรุน (scyphozoans และ hydromedusae) ชุกชุมกว่าอีกสองบริเวณ ทำให้ปริมาณของแพลงก์ตอนสัตว์บริเวณพื้นทรายสูงกว่าบริเวณแนวหญ้าทะเลและคลองในป่าชายเลน

ประชาคมแพลงก์ตอนสัตว์ในบริเวณนี้แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มอย่างชัดเจน คือ กลุ่มที่อยู่บริเวณนอกและในแนวหญ้าทะเล และกลุ่มที่อยู่บริเวณคลองในป่าชายเลน ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาของ Robertson *et al.* (1988) ที่เปรียบเทียบประชาคมแพลงก์ตอนสัตว์ในระบบนิเวศหญ้าทะเลที่อยู่ติดกับป่าชายเลนเช่นกัน และพบว่าประชาคมแพลงก์ตอนสัตว์ในสองบริเวณดังกล่าวมีความแตกต่างกันเนื่องมาจากองค์ประกอบของแพลงก์ตอนสัตว์ชั่วคราวที่แตกต่างกันของสองบริเวณ การศึกษาครั้งนี้ยังพบตัวอ่อนเม่นทะเล (echinopluteus larvae) และตัวอ่อนปลิงทะเล (auricularia larvae) เป็นแพลงก์ตอนสัตว์ที่พบเฉพาะบริเวณนอกและในแนวหญ้าทะเลสอดคล้องกับการศึกษาของ Mukai *et al.* (1989) ซึ่งพบว่ากลุ่มของเม่นทะเลและปลิงทะเลสามารถพบได้ทั่วไปในบริเวณแนวหญ้าทะเลและพื้นที่ที่มีปริมาณออกซิเจนละลายสูง (Mukai *et al.*, 1989) ปริมาณออกซิเจนละลายมีความสำคัญต่อแพลงก์ตอนสัตว์ในกระบวนการหายใจแบบใช้ออกซิเจน (Conover and Corner, 1968) ซึ่งผลการศึกษานี้พบว่าปริมาณ

ออกซิเจนละลายเป็นปัจจัยเดียวที่สามารถใช้อธิบายการเพิ่มขึ้นของดัชนีความหลากหลายและคุณภาพการกระจายของแพลงก์ตอนสัตว์ในบริเวณนี้ได้อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ สำหรับความสัมพันธ์ในเชิงลบระหว่างปริมาณของแพลงก์ตอนสัตว์กับปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ นั้นเนื่องจากในบริเวณพื้นทรายมีแมงกระพรุนซึ่งมีขนาดใหญ่กว่าแพลงก์ตอนสัตว์ชนิดอื่นอยู่หนาแน่นในขณะที่ปริมาณคลอโรฟิลล์ เอ บริเวณนี้มีค่าต่ำกว่าอีกสองบริเวณ

สรุป

ความหลากหลายและความชุกชุมของแพลงก์ตอนสัตว์ที่พบในการศึกษานี้แสดงให้เห็นถึงความอุดมสมบูรณ์และความสำคัญของพื้นที่ชายฝั่งบ้านมดตะนอย จังหวัดตรังในการเป็นแหล่งอนุบาลสัตว์น้ำและแหล่งอาหารของทรัพยากรประมงในบริเวณนี้ โดยประชาคมแพลงก์ตอนสัตว์แบ่งออกเป็น 2 กลุ่มใหญ่ คือ 1) กลุ่มที่อยู่ในบริเวณพื้นทรายติดกับแนวหญ้าทะเลและในแนวหญ้าทะเล มีตัวอ่อนหอยสองฝาเป็นแพลงก์ตอนสัตว์กลุ่มเด่น และพบแมงกระพรุน ตัวอ่อนเม่นทะเลและตัวอ่อนปลิงทะเลเป็นแพลงก์ตอนสัตว์ที่พบเฉพาะในบริเวณนี้ 2) กลุ่มที่อยู่บริเวณคลองในป่าชายเลน มีคาลานอยด์โคพีพอดเป็นแพลงก์ตอนสัตว์กลุ่มเด่น ปริมาณออกซิเจนละลายเป็นปัจจัยสำคัญที่มีผลต่อความหลากหลายของแพลงก์ตอนสัตว์ในบริเวณนี้ ข้อมูลที่ได้จะสามารถใช้ประกอบการวางแผนอนุรักษ์และจัดการทรัพยากรในบริเวณชายฝั่งให้มีประสิทธิภาพยิ่งขึ้น อย่างไรก็ตามการศึกษานในอนาคตควรเพิ่มจำนวนความถี่ในการเก็บตัวอย่างในรอบปีเพื่อช่วยให้เข้าใจลักษณะประชาคมแพลงก์ตอนสัตว์ในพื้นที่ได้ดียิ่งขึ้น

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับทุนอุดหนุนจากโครงการการเรียนการสอนเพื่อเสริมประสบการณ์ ประจำปีการศึกษา 2561 คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย ขอขอบคุณภาควิชาวิทยาศาสตร์ทางทะเล คณะวิทยาศาสตร์ จุฬาลงกรณ์มหาวิทยาลัย สำหรับการอนุเคราะห์สถานที่และเครื่องมือสำหรับการศึกษาวิจัย และขอขอบคุณนางสาววันสิริ มีมานะ, นางสาวเอมิกา อาษาเอื้อ, นายมนัสวิน ค้วงนอก และชุมชนบ้านมดตะนอย จังหวัดตรัง สำหรับความช่วยเหลือในการเก็บตัวอย่าง

เอกสารอ้างอิง

- Ajibove, O.O., Yakubu, A.F., Adams, T.E., Olai, E.D. and Nwogu, N.A. 2011. A review of the use of copepods in marine fish larviculture. **Reviews in Fish Biology and Fisheries** 21: 225-246.
- Arar, E.J. and Collins, G.B. 1997. **Methods 445.0 In Vitro Determination of Chlorophyll a and Pheophytin a in Marine and Freshwater Algae by Fluorescence**. National Exposure Research Laboratory Office of Research and Development, Ohio.
- Batiuk, R.A., Breitburg, D.L., Diaz, R.J., Cronin, T.M., Secor, D.H. and Thursby, G. 2009. Derivation of habitat-specific dissolved oxygen criteria for Chesapeake Bay and its tidal tributaries. **Journal of Experimental Marine Biology and Ecology** 381: 204-215.
- Benfield, M.C. 2013. Estuarine zooplankton, pp. 285-302. *In* Day, J.W., Crump, B.C., Kemp,

- W.M. and Yanez-Arancibia, A., eds. **Estuarine Ecology 2nd ed.** John Wiley & Sons, New Jersey.
- Chaithui, P. 2018. Villager, Village No. 3, Ko Libong Sub-district, Kantang District, Trang. Personal communication, December 22, 2018.
- Chiba, S. and Saino, T. 2003. Variation in mesozooplankton community structure in the Japan/East Sea (1991-1999) with possible influence of ENSO scale climatic variability. **Progress Oceanography** 57: 317-339.
- Chuaypanang, S. 1998. Zooplankton in mangrove forest at Sikao district, Trang province. Master of Science (Marine Science), Chulalongkorn University. (in Thai)
- Clarke, K.R. and Gorley, R.N. 2006. **PRIMER v6: User Manual/Tutorial, PRIMER-E.** Plymouth, UK.
- Conover, R.J. and Corner, E.D.S. 1968. Respiration and nitrogen excretion by some marine zooplankton in relation to their life cycles. **Journal of the Marine biological Association of the United Kingdom** 48: 49-75.
- David, V., Sautour, B., Chardy, P. and Leconte, M. 2005. Long-term changes of the zooplankton variability in a turbid environment: the Gironde estuary (France). **Estuarine, Coastal and Shelf Science** 64: 171-184.
- Duarte, C.M. and Chiscano, C.L. 1999. Seagrass biomass and production: a reassessment. **Aquatic Botany** 65: 159-174.
- Duffy, J.E. 2006. Biodiversity and the functioning of seagrass ecosystems. **Marine Ecology Progress Series** 311: 233-250.
- Ferdous, Z. and Muktadir, A.K.M. 2009. A review: Potentiality of zooplankton as bioindicator. **American Journal of Applied Sciences** 6(10): 1815-1819.
- Fortes, M.D. 1988. Mangrove and seagrass beds of East Asia: habitats under stress. **Ambio: A Journal of the Human Environmental** 17: 207-213.
- Horinouchi, M., Tongnunui, P., Furumitsu, K., Nakamura, Y., Kanou, K., Yamaguchi, A., Okamoto, K. and Sano, M. 2012. Food habits of small fishes in seagrass habitats in Trang, southern Thailand. **Fisheries Science** 78: 577-587.
- Intharasook, K. 1999. Seasonal distribution and diversity of marine fauna in seagrass beds at Pattani Bay. Master of Science (Marine Science), Chulalongkorn University. (in Thai)
- Lalli, C.M. and Parsons, T.R. 1997. Zooplankton, pp. 74-111. *In* Lalli, C.M. and Parsons, T.R., eds. **Biological Oceanography an Introduction.** 2nd ed. Elsevier Butterworth-Heinemann, China.
- Marine and Coastal Resources Research & Development Institute, Department of Marine and Coastal Resources. 2015. **The report of survey and assessment of the status and potential of marine and coastal resources: coral and seagrass, 2015.** The Agriculture Co-

- operative Federation of Thailand LTD., Nonthaburi. (in Thai)
- Marques, S.C., Pardal, M.A., Pereira, M.J., Goncalves, F., Marques, J.C. and Azeiteiro, U.M. 2007. Zooplankton distribution and dynamics in a temperate shallow estuary. **Hydrobiologia** 587: 213-223.
- Mukai, H., Koike, I., Nishihira, M. and Nojima, S. 1989. Oxygen consumption and ammonium excretion of mega-sized benthic invertebrates in a tropical seagrass bed. **Journal of Experimental Marine Biology and Ecology** 134: 101-115.
- Nateekanjanalarp, S. 1990. Seagrass communities at Koh Samui, Surat Thani province. Master of Science (Marine Science), Chulalongkorn University. (in Thai)
- Orth, R.J., Carruthers, T.J.B., Dennison, W.C., Duarte, C.M., Fourqurean, J.W., Heck, K.L.Jr., Hughes, A.R., Kendrick, G.A., Kenworthy, W.J., Olyarnik, S., Short, F.T., Waycott, M. and Williams, S.L. 2006. A Global Crisis for Seagrass Ecosystems. **BioScience** 56(12): 987-996.
- Paphavasit, N., Aksornkoae, S., Suwannodom, S., Termwichakorn, A., Tangjaitrong, S., Siriboon, S., Piumsomboon, A., Tongnunui, P. and Promthong, I. 2003. **Rapid Assessment Methodology as a Tool for Integrated Coastal Zone Management in Thailand: Mangrove Ecosystem**. Prasukchai Printing Limited part, Bangkok. (in Thai)
- Paphavasit, N., Sivaipram, I., Udomwongyont, N., Jaiperm, J., Mookui, P. and Mahasawat, N. 2014. **Success in planting and restoring mangrove forests: Assessment and indicators**. Prasukchai Printing LTD., Bangkok. (in Thai)
- Parmar, T.K., Rawtani, D. and Agrawal, Y.K. 2016. Bioindicators: the natural indicator of environmental pollution. **Frontiers in Life Science** 9(2): 110-118.
- Pielou, E.C. 1966. The Measurement of Diversity in Different Types of Biological Collections. **Journal of Theoretical Biology** 13: 131-144.
- Pollution Control Department. 2020. **Marine Water Quality Standard**. Pollution Control Department. Available Source: http://www.pcd.go.th/info_serv/reg_std_water02.html, June 2, 2020. (in Thai)
- Postel, L., Fock, H. and Hagen, W. 2000. Biomass and abundance, pp. 83-192. In Harris, R., Wiebe, P., Leng J., Skjoldal, H.R. and Huntley, M., eds. **ICES Zooplankton Methodology Manual**. Academic Press, San Diego.
- Pratiwi, N.T.M., Ardhitto, Wulandari, D.Y. and Iswantari, A. 2016. Horizontal distribution of zooplankton in Tangerang Coastal Water, Indonesia, Procedia. **Environmental Science** 33: 470-477.
- Punnarak, P. 2003. Biodiversity of zooplankton in coastal area of Klong Pak-Meng, Trang province. Master of Science (Marine Science), Chulalongkorn University. (in Thai)
- Richardson, A.J. 2008. In hot water: zooplankton and climate change. **ICES Journal of Marine Science** 65: 279-295.

- Robertson, A.I., Dixon, P. and Daniel, P.A. 1988. Zooplankton dynamics in mangrove and other nearshore habitats in tropical Australia. **Marine Ecology Progress Series** 43: 139-150.
- Saenger, P., Gartside, D. and Funge-Smith, S. 2012. **A review of mangrove and seagrass ecosystems and their linkage to fisheries and fisheries management.** FAO Regional Office for Asia and the Pacific, Bangkok.
- Satapoomin, S. 1999. Zooplankton community in Kapur mangrove canal, Ranong province. **Phuket Marine Biological Center Research Bulletin** 62: 33-56.
- Shannon, C.E. 1948. A Mathematical Theory of Communication. **The Bell System Technical Journal** 27(3): 379-423.
- Sivaipram, I., Punnnarak, P., Piumsomboon, A., Paphavasit, N. and Wongchinvit, S. 2007. Zooplankton community in mangrove estuarine, Pranburi, Prachuap Khiri Khan. **Journal Science Research (Section T)** 6(1): 253-264. (in Thai)
- Tantichaiwanit, W., Gajasen, N., Piumsombon, A. and Kunsook, C. 2010. Zooplankton dynamics and appropriate management approach for blue swimming crab in Kung Krabaen Bay, Thailand, pp. 106-116. *In* Hoanh, C.T., Szuster, B.W., Suan-Pheng, K., Ismail, A.M. and Noble, A.D., eds. **Tropical Deltas and Coastal zones: Food Production, Communities and Environment at the Land–Water Interface.** CABI North American Office, USA.
- Vanichbuncha, K. 2018. **Statistics for Research.** Samlada, Bangkok. (in Thai)
- Williams, R. and Collins, N.R. 1986. Seasonal composition of meroplankton and holoplankton in the Bristol Channel. **Marine Biology** 92: 93-101.

ผลของการใช้วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร: น้ำหมักมูลไส้เดือนดินต่อการเจริญเติบโตของผักสลัดพันธุ์กรีนโอ๊ค

Effects of Planting Material with Agricultural Residues and Vermicomposting Tea on Growth of Green Oak (*Lactuca sativa* var. *crispa* L.)

สามารถ ใจเตี้ย* และ สุรศักดิ์ นุ่มมีศรี

Samart Jaitae* and Surasak Nummisri

Received: 28 July 2020, Revised: 26 October 2021, Accepted: 20 December 2020

บทคัดย่อ

การศึกษานี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของวัสดุปลูกจากวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร: น้ำหมักมูลไส้เดือนดิน และทดสอบความเหมาะสมต่อการใช้เป็นวัสดุปลูกในการปลูกผักสลัดพันธุ์กรีนโอ๊ค วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) จำนวน 7 สิ่งการทดลอง 4 ซ้ำ ประกอบด้วย สิ่งทดลองที่ 1 ดินร่วน: ฟางข้าว: มูลไก่: ขุยมะพร้าว (1:1:1:1) สิ่งทดลองที่ 2 ดินร่วน: เศษดินข้าวโพด: มูลไก่: ขุยมะพร้าว (1:1:1:1) สิ่งทดลองที่ 3 ดินร่วน: เศษดินถั่วเหลือง: มูลไก่: ขุยมะพร้าว (1:1:1:1) สิ่งทดลองที่ 4 ดินร่วน: ฟางข้าว: เศษดินข้าวโพด: มูลไก่: ขุยมะพร้าว (1:1:1:1) สิ่งทดลองที่ 5 ดินร่วน: ฟางข้าว: เศษดินถั่วเหลือง: มูลไก่: ขุยมะพร้าว (1:1:1:1) สิ่งทดลองที่ 6 ดินร่วน: เศษดินข้าวโพด: เศษดินถั่วเหลือง: มูลไก่: ขุยมะพร้าว (1:1:1:1) และสิ่งทดลองที่ 7 ดินร่วน: ฟางข้าว: เศษดินข้าวโพด: เศษดินถั่วเหลือง: มูลไก่: ขุยมะพร้าว ผลการศึกษาพบว่า เมื่อหมักวัสดุปลูกครบ 30 วัน วัสดุปลูกทั้ง 7 สิ่งทดลองมีค่าความเป็นกรด - ด่าง ระหว่าง 8.02 - 8.34 ค่าการนำไฟฟ้าระหว่าง 5.92 - 6.37 dS/m ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด และปริมาณโพแทสเซียมทั้งหมด ระหว่าง 0.36 - 0.59 เปอร์เซ็นต์ 0.55 - 1.06 เปอร์เซ็นต์ และ 0.83 - 1.38 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ เมื่อนำวัสดุปลูกร่วมกับน้ำหมักมูลไส้เดือนดินไปทดสอบการเจริญเติบโตของผักสลัดพันธุ์กรีนโอ๊ค พบว่า การเจริญเติบโตของผักสลัดพันธุ์กรีนโอ๊คมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยสิ่งทดลองที่ 3 (วัสดุปลูกผสม: วัสดุปลูกทางการค้า) มีค่าเฉลี่ยความสูงของต้น ความกว้างทรงพุ่ม และน้ำหนักต้นสดสูงสุด ส่วนสิ่งทดลองที่ 2

ศูนย์ความเป็นเลิศด้านวิศวกรรมสาธารณสุขศาสตร์และสิ่งแวดล้อมชุมชน คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ อำเภอเมือง จังหวัดเชียงใหม่ 50300

Center of Excellence in Public Health Innovation and Community Environment, Faculty of Science and Technology, Chiang Mai Rajabhat University, Maung, Chiang Mai 50300, Thailand.

* ผู้รับผิดชอบประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): samart_jai@cmru.ac.th

(วัสดุปลูก) มีจำนวนใบสูงสุด

คำสำคัญ: วัสดุปลูก, วัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตร, น้ำหมักมูลไส้เดือนดิน

ABSTRACT

The objectives of this research were to examine the chemical properties of the growing media and the effect of growing media on growth of *lactuca sativa*. The experimental design was performed with 4 replications and 7 treatments in Completely Randomized Design (CRD). The treatments were 1) loam: rice straw: chicken manure: coconut coir (1:1:1:1) 2) loam: corn cob: chicken manure: coconut coir (1:1:1:1) 3) loam: soybean residue : chicken manure: coconut coir 4) loam: rice straw: corn cob: chicken manure: coconut coir (1:1:1:1) 5) loam: rice straw: soybean residue: chicken manure: coconut coir (1:1:1:1) 6) loam: corn cob: soybean residue: chicken manure: coconut coir (1:1:1:1) and 7) loam: rice straw: corn cob: soy bean residue: chicken manure: coconut coir (1:1:1:1). At the end stage, the pH was 8.02 - 8.34. The EC was ranged between 5.92 - 6.37 dS/m. Total N, total P and total K were ranged between 0.36 - 0.59 %, 0.55 - 1.06 % and 0.83 - 1.38 %, respectively. When planting materials and vermicomposting tea are tested against the growth of green oak salad, it is found that the height, leaf number, canopy and weights of tree are different. Treatment 3 (planting material: commercial planting material) has maximum height, copony and weights. Treatment 2 (planting material) has the highest number of leaves.

Key words: planting material, agricultural residue, vermicompost tea

บทนำ

ประเทศที่มีการส่งออกสินค้าการเกษตรจะมีปริมาณเศษวัสดุเหลือใช้ทางที่เพิ่มขึ้นตามความต้องการอาหารของประชากรทั่วโลก มีรายงานว่าประเทศอินเดียมีปริมาณเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรมีปริมาณถึง 500 ล้านตันต่อปี บังคลาเทศ 72 ล้านตันต่อปี และอินโดนีเซีย 55 ล้านตันต่อปี (Bhuvaneshwari *et al.*, 2019) ทั้งนี้การจัดการวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรส่วนใหญ่เกษตรกรจะเผาในพื้นที่เพาะปลูก บางส่วนต้องการที่จะใช้ประโยชน์แต่คิดว่าการผลิตปุ๋ยหมักหรือนำไปใช้โดยตรงมีกระบวนการที่ยุ่งยากและใช้เวลานาน อีกทั้งยังขาด

การสนับสนุนทั้งการให้ความรู้และการช่วยเหลือด้านต่างๆ (Jaitae, 2013) โดยทั่วไปวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรจะมีปริมาณธาตุอาหารพืชที่เพียงพอต่อการเจริญเติบโตของพืช มีรายงานการศึกษาพบว่าการใช้กากตะกอนปาล์มมีผลต่อค่า pH ของดิน ปริมาณอินทรีย์วัตถุในดิน ปริมาณธาตุฟอสฟอรัส และปริมาณโพแทสเซียมที่เป็นประโยชน์เพิ่มขึ้น (Ratneetoo and Wongkrachang, 2018) การนำวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมาพัฒนาเป็นวัสดุปลูกพืชจึงเป็นการใช้ประโยชน์และสร้างมูลค่าเพิ่มที่มีการลงทุนไม่มากนัก วัตถุดิบสามารถหาได้โดยง่ายในพื้นที่ กระบวนการนี้ยังเป็นการลดต้นทุนการผลิตใน

ระบบเกษตรที่ส่วนใหญ่มีต้นทุนสูง และยังเป็นการสร้างอาชีพเสริมให้กับเกษตรกรได้ (Barrett *et al.*, 2016) ทั้งนี้อินทรีย์วัตถุที่นำมาผสมมักจะเป็นอินทรีย์วัตถุในชุมชนที่หาได้ง่าย โดยการใช้วัสดุปลูกพืชในสัดส่วนประมาณร้อยละ 10 มีความสำคัญอย่างยิ่งต่อการเจริญเติบโตของพืชในระยะเริ่มต้นการปลูก มีรายงานการศึกษา พบว่า วัสดุปลูกที่มีส่วนผสมของดิน ปุ๋ยหมัก และขุยมะพร้าวอัตราส่วน 2:1:1 และวัสดุปลูกที่มีส่วนผสมของดิน ปุ๋ยหมัก แกลบดำ และขุยมะพร้าวอัตราส่วน 2:1:1:1 ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของต้นกล้ามะเขือเทศเพิ่มขึ้น ร้อยละ 93.33 และ 90.86 ตามลำดับ วัสดุปลูกที่ดีเมื่อนำมาใช้ควรมีอัตราส่วนของน้ำและอากาศ ประมาณ 50:50 ไม่มีการอัดตัวหรือยุบตัวเมื่อเปียกน้ำหรือเมื่อใช้ไปนานๆ รากพืชสามารถแพร่กระจายได้สะดวกทั่วทุกส่วนของวัสดุปลูก แต่วัสดุปลูกพืชส่วนใหญ่ที่วางขายทั่วไปจะมีราคาแพงและจะมีส่วนผสมที่ไม่สามารถอุ้มน้ำได้นานและมีปริมาณธาตุอาหารพืชจำนวนน้อย บางผลิตภัณฑ์มีการปนเปื้อนของสารพิษจึงไม่เหมาะสมต่อการนำมาใช้ในการปลูกพืชเพื่อการบริโภคที่ปลอดภัยต่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม (Wawan *et al.*, 2018) ส่วนน้ำหมักมูลไส้เดือนดินเป็นของเหลวที่ได้จากการย่อยสลายของไส้เดือนดินในกระบวนการผลิตปุ๋ยหมักจากอินทรีย์วัตถุ (Jaitae, 2015) ทั้งนี้มีรายงานการศึกษา พบว่า น้ำหมักมูลไส้เดือนดินที่ระยะเวลาจัดเก็บ 3 เดือน มีปริมาณไนโตรเจน ร้อยละ 0.0154 ปริมาณฟอสฟอรัส ร้อยละ 0.00180 โพแทสเซียม ร้อยละ 0.24 แคลเซียม ร้อยละ 0.44 และแมกนีเซียม ร้อยละ 0.015 ตามลำดับ ทั้งนี้ปริมาณธาตุอาหารพืชจะผันแปรตามระยะเวลาการเก็บรักษา (Khattiyaphutthimet and Boonthai, 2018) น้ำหมักมูลไส้เดือนดินยังมีจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์เมื่อนำมาใช้ในการผลิตพืชจะมีผลต่อการเพิ่มกิจกรรมของจุลินทรีย์ในวัสดุปลูกพืช รวมถึง

ส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของปริมาณแคโรทีนอยด์ในเนื้อเยื่อพืช มีรายงาน พบว่า การใช้ น้ำหมักมูลไส้เดือนดิน: ปุ๋ยขาวและปุ๋ยฟอสฟอรัสสามารถปรับกรดในดิน และเพิ่มการละลายของธาตุอาหารพืชในดิน (Bekele *et al.*, 2018) น้ำหมักจากไส้เดือนดินส่งผลต่อการรอดตายของต้นกล้าผักปวยเล้งร้อยละ 40 หลังจากย้ายปลูกในระบบไฮโดรโปนิกส์ 21 วัน (Chanwichit, 2019) จากสภาพปัญหาและรายงานการศึกษาดังกล่าวข้างต้นจะเห็นได้ว่าเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรมีศักยภาพในการนำมาใช้เป็นวัสดุปลูกพืชได้และเมื่อนำน้ำหมักมูลไส้เดือนดินมาเป็นส่วนผสมจะช่วยให้อายุของวัสดุปลูกมีคุณภาพในการเพิ่มผลผลิตพืชเพิ่มขึ้น ผลการศึกษานี้ยังจะนำไปสู่การพัฒนาผลิตภัณฑ์ที่สามารถขยายการผลิตเพื่อการค้าสู่การใช้ประโยชน์ในการผลิตพืชผักในระบบการเกษตรเพื่อสุขภาพและสิ่งแวดล้อม รวมถึงเป็นทางเลือกในการใช้ประโยชน์จากสิ่งเหลือใช้ชุมชนอันเป็นทางเลือกในการจัดการวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่สอดคล้องกับบริบทของชุมชนและความต้องการของเกษตรกร ดังนั้นการศึกษาในครั้งนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของวัสดุปลูกที่ผลิตจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร และทดสอบผลของวัสดุปลูกร่วมกับน้ำหมักมูลไส้เดือนดินต่อการเจริญเติบโตของผักสลัดพันธุ์กรีนโอ๊ค อันจะนำไปสู่การใช้ประโยชน์วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรอย่างเต็มศักยภาพ รวมถึงการสร้างแนวทางสู่ระบบเกษตรที่ปลอดภัยอย่างแท้จริงต่อไป

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมวัสดุปลูกและวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของวัสดุปลูก

1.1 การเตรียมวัสดุผสมสำหรับการทดลอง ได้แก่ ดินร่วน ฟางข้าว เศษต้นข้าวโพด เศษต้นถั่วเหลือง มูลไก่ และขุยมะพร้าว ทำการสับวัสดุเหลือ

ทิ้งให้ได้ขนาดประมาณ 1 นิ้ว แล้วนำส่วนผสมตามอัตราส่วนในแต่ละกรรมวิธีคลุกเคล้าให้เข้ากันหมัก: ดินร่วนปนทรายในภาชนะพลาสติกขนาดความกว้าง 30 เซนติเมตร เป็นระยะเวลา 30 วัน ในสภาพมีออกซิเจน โดยพ่นน้ำหมักมูลไส้เดือนดินทางการค้า (100 %) ปริมาณ 100 มิลลิลิตร / ซ้ำ ทุก 5 วัน

1.2 วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) มี 7 สิ่งทดลอง สิ่งทดลองละ 4 ซ้ำ ดังนี้

สิ่งทดลองที่ 1 ดินร่วน:ฟางข้าว:มูลไก่:ขุยมะพร้าว (อัตราส่วน 1:1:1:1 โดยปริมาตร)

สิ่งทดลองที่ 2 ดินร่วน:เศษต้นข้าวโพด:มูลไก่:ขุยมะพร้าว (อัตราส่วน 1:1:1:1 โดยปริมาตร)

สิ่งทดลองที่ 3 ดินร่วน:เศษต้นถั่วเหลือง:มูลไก่:ขุยมะพร้าว (อัตราส่วน 1:1:1:1 โดยปริมาตร)

สิ่งทดลองที่ 4 ดินร่วน:ฟางข้าว:เศษต้นข้าวโพด:มูลไก่:ขุยมะพร้าว (อัตราส่วน 1:1:1:1:1 โดยปริมาตร)

สิ่งทดลองที่ 5 ดินร่วน:ฟางข้าว:เศษต้นถั่วเหลือง:มูลไก่:ขุยมะพร้าว (อัตราส่วน 1:1:1:1:1 โดยปริมาตร)

สิ่งทดลองที่ 6 ดินร่วน:เศษต้นข้าวโพด:เศษต้นถั่วเหลือง:มูลไก่:ขุยมะพร้าว (อัตราส่วน 1:1:1:1:1 โดย ปริมาตร)

สิ่งทดลองที่ 7 ดินร่วน:ฟางข้าว:เศษต้นข้าวโพด:เศษต้นถั่วเหลือง:มูลไก่:ขุยมะพร้าว (อัตราส่วน 1:1:1:1:1:1 โดยปริมาตร)

1.3 การวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมี ทำการสุ่มวัสดุปลูกแต่ละสิ่งทดลอง นำส่งตรวจวิเคราะห์ ณ ห้องปฏิบัติการทางเคมี ภาควิชาเคมี คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่ โดยทำการตรวจวิเคราะห์ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ค่าการนำไฟฟ้า ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด

ปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด และปริมาณโปรแทสเซียมทั้งหมด

2. ผลของวัสดุปลูกต่อการเจริญเติบโตของผักสลัดกรีนโอ๊ค

2.1 การเตรียมวัสดุปลูก ทำการเลือกวัสดุปลูกที่มีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดสูงสุดจากการทดลองในข้อที่ 1 ซึ่งพบว่า สิ่งทดลองที่ 7 ดินร่วน:ฟางข้าว:เศษต้นข้าวโพด:เศษต้นถั่วเหลือง:มูลไก่:ขุยมะพร้าว (อัตราส่วน 1:1:1:1:1 โดยปริมาตร) มีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดสูงสุด วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ (Completely Randomized Design, CRD) มี 3 สิ่งทดลอง สิ่งทดลองละ 4 ซ้ำ ดังนี้

ชุดควบคุม ดินร่วน

สิ่งทดลองที่ 1 วัสดุปลูก (สิ่งทดลองที่ 7 จากการทดลองที่ 1)

สิ่งทดลองที่ 2 วัสดุปลูก:แกลบหมัก (อัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร)

สิ่งทดลองที่ 3 วัสดุปลูก:วัสดุปลูกทางการค้า (อัตราส่วน 1:1 โดยปริมาตร)

โดยนำวัสดุปลูกบรรจุลงในกระถางขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 10 นิ้ว โดยให้วัสดุปลูกห่างจากปากกระถาง 2.5 เซนติเมตร จัดวางกระถางปลูกตามแบบการทดลองที่สุ่มได้ โดยวางกระถางให้ระยะห่าง 30 × 30 เซนติเมตร

2.2 การเตรียมต้นกล้า ทำการเพาะกล้าผักสลัดในถาดเพาะเมล็ดบรรจุพีทมอส (peat moss) เพาะเมล็ดใน ถาดเพาะหลุมละ 2 เมล็ด หลังจากนั้นรดน้ำให้ชุ่มทุกวัน วันละ 1 ครั้ง หลังจากเมล็ดงอก เลือกต้นที่สมบูรณ์ ถอนให้เหลือ 1 ต้นต่อหลุม การย้ายปลูกลำต้นกล้าที่มีอายุ 15 วัน หลังออกปลูกลงในกระถางที่บรรจุวัสดุปลูกทั้ง 3 ชนิด โดยปลูก 1 ต้น/กระถาง หลังจากนั้นรดน้ำให้ชุ่ม ให้น้ำวันละ 2 ครั้ง (เช้า-เย็น) ในแต่ละครั้งให้น้ำปริมาตร 100 มิลลิลิตร

2.3 การเก็บข้อมูลการเจริญเติบโตของผักสลัด โดยวัดความสูงต้น จำนวนใบ ความกว้างทรงพุ่ม และน้ำหนักสดเมื่ออายุครบ 45 วัน

2.4 การวิเคราะห์ข้อมูล วิเคราะห์หาค่าความแปรปรวน (Analysis of Variance) และ เปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยในแต่ละกรรมวิธี โดยวิธี Duncan's new multiple range test (DMRT)

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

ส่วนที่ 1 การเตรียมวัสดุปลูกและการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของวัสดุปลูก พบว่า วัสดุปลูกทั้ง 7 สิ่งทดลองมีค่า pH เป็นด่างอ่อน โดยอยู่ในช่วงระหว่าง 8.02 - 8.34 เป็นไปตามค่ามาตรฐานที่กรมวิชาการกำหนดไว้ที่ 5.5 - 8.5

(Department of Agriculture, 2005) ค่าการนำไฟฟ้าอยู่ในช่วงระหว่าง 5.92 - 6.37 dS/m เป็นไปตามค่ามาตรฐานที่กรมวิชาการกำหนดไว้ไม่เกิน 10 dS/m (Department of Agriculture, 2005) ปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดอยู่ในช่วงระหว่าง 0.36 - 0.59 เปอร์เซ็นต์ น้อยกว่า ค่ามาตรฐานที่กรมวิชาการกำหนดไว้ไม่น้อยกว่า 1 เปอร์เซ็นต์ ส่วนปริมาณฟอสฟอรัสทั้งหมด และปริมาณโปแตสเซียมทั้งหมดเกินค่ามาตรฐานที่กรมวิชาการกำหนดไว้ที่ไม่น้อยกว่า 0.5 เปอร์เซ็นต์ (Department of Agriculture, 2005) โดยวัสดุปลูกมีค่าอยู่ในช่วง 0.55 - 1.06 เปอร์เซ็นต์ และ 0.83 - 1.38 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ แสดงดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 คุณสมบัติทางเคมีของวัสดุปลูก

วัสดุปลูก	คุณสมบัติทางเคมี				
	pH	EC (dS/m)	Total N (%)	Total P (%)	Total K (%)
สิ่งทดลองที่ 1	8.20	6.37a	0.37b	0.55c	0.83e
สิ่งทดลองที่ 2	8.29	6.28a	0.53a	0.82b	1.24b
สิ่งทดลองที่ 3	8.06	6.09b	0.36b	0.67d	1.16c
สิ่งทดลองที่ 4	8.02	6.03b	0.42b	0.63d	0.97d
สิ่งทดลองที่ 5	8.06	6.04b	0.40b	0.66d	1.26b
สิ่งทดลองที่ 6	8.19	5.94b	0.40b	0.72c	1.36a
สิ่งทดลองที่ 7	8.34	5.92b	0.59a	1.06a	1.38a
F test	ns	**	**	**	**
C.V. (%)	13.72	2.98	19.30	22.04	16.24

ns = ไม่มีความแตกต่างกันทางสถิติ

** = significant at $p < 0.01$

Means within each column followed by the same letters are not significantly different at $p \geq 0.01$ by DMRT.

เมื่อนำวัสดุปลูกมาวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีเทียบกับค่าตามมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์กรมวิชาการ (Department of Agriculture, 2005) พบว่า

คุณสมบัติทางเคมีที่ทำการวิเคราะห์เป็นไปตามมาตรฐานที่กำหนดยกเว้นปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดทั้งนี้สิ่งทดลองที่ 7 ที่มีการผสมวัสดุหลายชนิด

ร่วมกันมีปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัสทั้งหมด และโพแทสเซียมทั้งหมดสูงสุดเมื่อเทียบกับสิ่งทดลองอื่น สอดคล้องกับการทดลองของ Tuyham *et al.* (2013) ที่ได้วิเคราะห์ดินผสมพร้อมปลูกที่มีส่วนผสมของดินร่วนปนทราย ใบไม้หมัก กาบมะพร้าวสับ แกลบเผา และปุ๋ยคอก พบว่า ปริมาณไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียมทั้งหมดอยู่ในช่วงระหว่าง 0.047 - 0.549 เปอร์เซ็นต์ 0.041 - 0.247 เปอร์เซ็นต์ และ 0.212 - 1.432 เปอร์เซ็นต์ ตามลำดับ ทั้งนี้อาจเป็นไปได้ว่าเศษวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรที่นำมาใช้มีปริมาณไนโตรเจนทั้งหมดน้อย ทั้งนี้เศษดินข้าวโพดมีปริมาณไนโตรเจนเพียง 0.53 เปอร์เซ็นต์ ฟางข้าว 0.55 เปอร์เซ็นต์ (Land Development Department, 2019) นอกจากนี้ อินทรีย์วัตถุที่ใช้เวลาในการย่อยสลายสั้นจะมีสารอินทรีย์จำนวนมาก และหลากหลาย อาจทำให้เกิดการขาดไนโตรเจนชั่วคราว และอาจจบรวมถึงระยะเวลาในการหมักและอัตราส่วนของวัสดุในส่วนของคุณภาพฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมทั้งหมดที่เกินค่ามาตรฐานทุกสิ่งทดลอง อาจเป็นไปได้ว่าการหมัก:มูลไก่ซึ่งมีปริมาณฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ในปริมาณสูง (Hanc *et al.*, 2008) และการตัดย่อยวัสดุก่อนทำการหมักซึ่งมีผลต่อการย่อยสลายของจุลินทรีย์ทำให้ได้ปริมาณธาตุอาหารที่เพิ่มขึ้น ซึ่งอินทรีย์วัตถุที่นำมาใช้จะให้ปริมาณธาตุอาหารที่แตกต่างกัน (Suntarak, 2010) ในส่วนของน้ำหมักมูลไส้เดือนดินซึ่งมีธาตุอาหารพืชทั้งธาตุอาหารหลักและธาตุอาหารรองที่ส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืช เมื่อนำมาพ่นในวัสดุปลูกพืชจะช่วยเพิ่มปริมาณธาตุอาหารพืชในวัสดุปลูก และยังช่วยควบคุมความชื้นในกระบวนการหมักวัสดุปลูก น้ำหมักมูลไส้เดือนดินยังมีสารควบคุมการเจริญเติบโตของพืช

และมีจุลินทรีย์ที่เป็นประโยชน์ ทั้งนี้อัตราส่วนของสารละลายธาตุอาหารสูตรพระนครและน้ำหมักมูลไส้เดือนดินที่แตกต่างกันส่งผลต่อปริมาณธาตุอาหารที่เป็นประโยชน์ต่อพืช (Siringam and Boonmee, 2019) แต่อย่างไรก็ตาม การใช้น้ำหมักมูลไส้เดือนดินซึ่งเป็นน้ำหมักชีวภาพอาจต้องพิจารณาระยะเวลาในการกักเก็บที่จะส่งผลต่อปริมาณธาตุอาหาร ทั้งนี้การใช้น้ำหมักมูลไส้เดือนดินเพียงอย่างเดียวอาจจะไม่สามารถเพิ่มผลผลิตผักได้ สอดคล้องกับรายงานการศึกษาที่พบว่า บรอกโคลีที่ปลูกโดยใส่มูลโค และมูลโค:น้ำหมักชีวภาพมีอัตราการเจริญเติบโตดีกว่าบรอกโคลีที่ปลูกโดยใส่น้ำหมักชีวภาพเพียงอย่างเดียว (Nooprom *et al.*, 2017)

ส่วนที่ 2 การทดสอบวัสดุปลูกต่อการเจริญเติบโตของผักสลัดพันธุ์กรีนโอ๊ค ทั้งนี้ได้คัดเลือกสิ่งทดลองที่ 7 จากการทดลองที่ 1 มาทดสอบพบว่า การเจริญเติบโตของผักสลัดที่ปลูกในวัสดุปลูกแต่ละสิ่งทดลองมีความแตกต่างกันทางสถิติ สิ่งทดลองที่ 3 (วัสดุปลูก:วัสดุปลูกทางการค้า) มีความสูงเฉลี่ยสูงสุด 17.42 เซนติเมตร รองลงมาถึงทดลองที่ 1 (วัสดุปลูก) มีความสูงเฉลี่ย 16.35 เซนติเมตร จำนวนใบ สิ่งทดลองที่ 1 มีจำนวนใบเฉลี่ยสูงสุด 21.27 ใบ รองลงมาถึงทดลองที่ 3 มีจำนวนใบเฉลี่ย 11.09 ใบ สิ่งทดลองที่ 1 มีความกว้างทรงพุ่มเฉลี่ยสูงสุด 18.64 เซนติเมตร รองลงมาถึงทดลองที่ 3 มีความกว้างทรงพุ่มเฉลี่ย 17.28 เซนติเมตร และสิ่งทดลองที่ 3 มีน้ำหนักต้นสดเฉลี่ยสูงสุด 213.06 กรัม รองลงมาถึงทดลองที่ 2 (วัสดุปลูก:แกลบหมัก) มีน้ำหนักต้นสดเฉลี่ย 187.34 กรัม แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 จำนวนใบ ความสูงต้น และความกว้างทรงพุ่มผักสลัดพันธุ์กรีนโอ๊คเมื่ออายุครบ 45 วัน

สิ่งทดลอง	ความสูง (ซม.)	จำนวนใบ (ใบ)	ความกว้างทรงพุ่ม (ซม.)	น้ำหนักสด (กรัม/ต้น)
ชุดควบคุม	11.08c	9.04c	9.00d	43.02d
สิ่งทดลองที่ 1	16.35b	21.27a	18.64a	149.53c
สิ่งทดลองที่ 2	15.30b	11.07b	12.35c	187.34b
สิ่งทดลองที่ 3	17.42a	11.09b	17.28b	213.06a
F test	**	**	**	**
C.V. (%)	8.46	14.32	9.21	27.22

** = significant at $p < 0.01$ Means within each column followed by the same letters are not significantly different at $p \geq 0.5$ by DMRT.

ส่วนวัสดุปลูก (สิ่งทดลองที่ 7 จากการทดลองที่ 1) เมื่อนำมาทดสอบต่อการเจริญเติบโตของผักสลัดพันธุ์กรีนโอ๊ค พบว่าการเจริญเติบโตของผักสลัดพันธุ์กรีนโอ๊คมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยสิ่งทดลองที่ 3 (วัสดุปลูกผสม: วัสดุปลูกทางการค้า) มีความสูงของต้น ความกว้างของทรงพุ่ม และน้ำหนักต้นสด ส่วนสิ่งทดลองที่ 1 (วัสดุปลูก) มีจำนวนใบสูงสุด อาจเป็นไปได้ว่าการผสมวัสดุอินทรีย์ที่หลากหลายในวัสดุปลูกส่งผลต่อการปลดปล่อยปริมาณธาตุอาหาร และลักษณะทางกายภาพที่เหมาะสมต่อการเจริญเติบโตของพืช ซึ่งวัสดุปลูก (สิ่งทดลองที่ 1) จะมีความร่วนซุย น้ำหนักเบา และระบายน้ำได้ดี เช่นเดียวกับการเจริญเติบโตและผลผลิตของผักสลัดที่ปลูกด้วยดินผสมเส้นใยผลปาล์มน้ำมัน อัตราส่วน 1:2 มีความสูงต้น ความกว้างทรงพุ่ม จำนวนใบ และน้ำหนักต้นสูงสุด ซึ่งมีความคุณภาพดีกว่าดินผสมที่มีจำหน่ายในท้องตลาด (Wongkrachang and Ratneetoo, 2018) และคะน้ำที่ปลูกในวัสดุปลูกที่มีส่วนผสมของใบไม้หมัก กาบมะพร้าวสับ แกลบเผา และปุ๋ยคอกมีผลต่อการเจริญเติบโตและผลผลิต ได้แก่ ความสูง จำนวนใบ ความกว้างใบ น้ำหนักต้นสด และน้ำหนักต้นแห้งของผักคะน้ำสูงกว่าการปลูกในวัสดุปลูกชนิดอื่น

(Tuyharn *et al.*, 2013) นอกจากนี้ยังเป็นไปได้ว่าการหมักวัสดุอินทรีย์ที่นำมาทำวัสดุปลูกซึ่งเป็นวัสดุที่ย่อยสลายยาก มีค่า C/N ratio สูง กระบวนการหมักจะส่งผลต่อการลดลงของค่า C/N ratio ในวัสดุอินทรีย์เหล่านี้ทำให้ต้นพืชสามารถใช้ประโยชน์ธาตุไนโตรเจนได้สูงขึ้นโดยเฉพาะผักที่รับประทานใบ (Wongkrachang and Ratneetoo, 2018) ในวัสดุปลูกยังมีธาตุฟอสฟอรัสและโพแทสเซียมสูงซึ่งธาตุทั้งสองชนิดช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชเช่นเดียวกัน ทั้งนี้ผักสลัดพันธุ์กรีนโอ๊คส่วนใหญ่ผู้บริโภคจะรับประทานส่วนใบทั้งนี้การปลูกควรจะเน้นจำนวนใบที่มีขนาดใหญ่ซึ่งเป็นที่น่าสังเกตว่าสิ่งทดลองที่ 1 (วัสดุปลูก) มีแนวโน้มในการเพิ่มจำนวนใบผักสลัดพันธุ์กรีนโอ๊คได้

อย่างไรก็ตามวัสดุปลูกแต่ละประเภทมีความเหมาะสมต่อชนิดของพืชที่แตกต่างกันก่อนใช้ต้องศึกษาข้อมูลอย่างรอบด้านเพื่อประสิทธิภาพและผลผลิตพืชที่ปลูก ทั้งนี้การนำผลการวิเคราะห์คุณสมบัติทางเคมีของวัสดุปลูกที่ผลิตจากเศษวัสดุเหลือทิ้งทางการเกษตรไปใช้ประโยชน์ในการสร้างความรู้หรือส่งเสริมให้กับประชาชนจะส่งผลต่อความเชื่อมั่นของผลิตภัณฑ์ และวัสดุปลูกไม่ควรเก็บไว้ในสถานที่แดดส่องถึง ควรเก็บไว้ในถังหรือที่ร่ม

เมื่อนำมาใช้ควรทำให้แห้งจะทำให้มีน้ำหนักเบา
เก็บความชื้นและระบายน้ำได้อย่างมีประสิทธิภาพ

สรุป

คุณสมบัติทางเคมีและผลของวัสดุปลูก
แสดงให้เห็นว่าวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรในพื้นที่มี
ศักยภาพในการนำมาใช้เพื่อการผลิตเป็นวัสดุปลูกพืช
ได้ อย่างไรก็ตามการแสวงหาวัตถุดิบเพื่อนำมาผลิต
วัสดุปลูกพืชเชิงการค้าจำเป็นต้องมีปริมาณเพียงพอ
กระบวนการผลิตต้องมีขั้นตอนที่ไม่ซับซ้อน ยุ่งยาก
ในส่วนของการใช้เพื่อการปลูกพืชควรเลือกพืชที่ใช้
เวลาการปลูกสั้น และเป็นพืชที่รับประทานส่วนใบ
และต้น ทั้งนี้วัสดุปลูกที่พัฒนาจากเศษวัสดุเหลือใช้
ทางการเกษตร (ดินร่วน:ฟางข้าว:เศษดินข้าวโพด:
เศษดินถั่วเหลือง:มูลไก่:ขุยมะพร้าว (อัตราส่วน
1:1:1:1:1 โดยปริมาตร) มีความเหมาะสมต่อการ
นำมาใช้เป็นวัสดุปลูกผักสลัดพันธุ์กรีนโอ๊คได้

ข้อเสนอแนะ

1. ข้อเสนอแนะในการนำผลการวิจัยไปใช้

1.1 วัสดุปลูกแต่ละประเภทมีความ
เหมาะสมต่อชนิดของพืชที่แตกต่างกัน ก่อนใช้ต้อง
ศึกษาข้อมูลอย่างรอบด้านเพื่อประสิทธิภาพและ
ผลผลิตพืชที่ปลูก

1.2 วัสดุปลูกไม่ควรเก็บไว้ในสถานที่แดด
ส่องถึง ควรเก็บไว้ในถังหรือที่ร่มเมื่อนำมาใช้ควร
ทำให้แห้งจะทำให้มีน้ำหนักเบา เก็บความชื้นและ
ระบายน้ำได้ดี

2. ข้อเสนอแนะในการทำวิจัยครั้งต่อไป

2.1 ควรศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพของ
วัสดุปลูกจากวัสดุอินทรีย์ชนิดอื่นโดยเฉพาะเศษวัสดุ
เหลือทิ้งทางการเกษตรกลุ่มพืชไร่และพืชสวน

2.2 ศึกษาความเหมาะสมของวิธีการหมัก
วัสดุปลูกที่อาจนำไปหมักใส่เดือนดินมาเป็น

ส่วนผสม และทำการเปรียบเทียบแต่ละวิธีการกับการ
ปลูกผักเชิงการค้า

กิตติกรรมประกาศ

การศึกษานี้ได้รับงบประมาณสนับสนุนจาก
กองทุนวิจัยมหาวิทยาลัยราชภัฏเชียงใหม่
ปีงบประมาณ พ.ศ. 2560

เอกสารอ้างอิง

- Barrett, G.E., Alexander, P.D., Robinson, J.S. and
Bragg, N.C. 2016. Achieving Environmentally
Sustainable Growing Media for Soilless Plant
Cultivation Systems. **Scientia Horticulturae**
212: 20-234.
- Bekele, A., Kibret, K., Bedadi, B., Yli-Halla, M.J.
and Balemi, T. 2018. Effects of lime,
Vermicompost, and Chemical P Fertilizer
on Selected Properties of Acid soils at
Ebantu District, Western Highlands of
Ethiopia. **African Journal of Agricultural
Research** 13(10): 477-489.
- Bhuvaneshwari, S., Hettiarachchi, H. and Meegoda.
J.N. 2019. Crop Residue Burning in India:
Policy Challenges and Potential Solutions.
**International Journal of Environmental
Research and Public Health** 16(5): 1-19.
- Chanwichit, P. 2019. The Effects of Bio - extract and
Chemical Fertilizer on Growth and Yield
of spinach (*Spinacia oleracea* L.) under a
Hydroponic Growing System. **Naresuan
Phayao Journal** 12(3): 51-54. (in Thai)
- Department of Agriculture. 2005. **Organic Fertilizers
Standards**. Available Source: www.agriin

- fo.doae.go.th/year52/knowledge/km_13-01-52.doc, January 29, 2021. (in Thai)
- Hanč, A., Tlustoš, P., Száková, J. and Balík, J. 2008. The Influence of Organic Fertilizers Application on Phosphorus and Potassium Bioavailability. **Plant Soil Environment** 54(6): 247-254.
- Jaitae, S. 2013. Development of Healthy Home Garden Vegetable Production at Saluang-Keelek Community, Maerim district, Chiang Mai Province. **Rajabhat Chang Mai Research Journal** 14(2): 15-22. (in Thai)
- Khattiyaphutthimet, K. and Boonthai, IWAI, C. 2018. Effect of Storage Time on The Quality of Vermicompost Tea. **Khon Kaen Agriculture Journal** 46(Suppl 1): 1188-1192. (in Thai)
- Land Development Department. 2019. **Soil Management Data**. Available Source: http://www.ddd.go.th/Web_Soil/Page_02.htm, September 6, 2019. (in Thai)
- Nooprom, K., Chumthong, A., Mansuriwong, P. and Thongnui, F. 2017. Effect of Cattle Manure and Bioextract on Growth and Yield of Broccoli. **Journal of Science and Technology** 25(4): 627-638. (in Thai)
- Ratneetoo, R. and Wongkrachang, S. 2018. Effects of Organic Agriculture Wastes for Soil Improvement on Growth and Yield of Hom Kradungnga Rice (Southern Local Rice Varieties). **Khon Kaen Agriculture Journal** 46 (Suppl 1): 463-467. (in Thai)
- Siringam, T. and Boonmee, N. 2019. Influence of Nutrient Solution and Liquid Vermicomposts Ratio on Growth of Lettuce var. green oak (*Lactuca casativa* L.) Cultivated in Hydroponics System. **Thai Journal of Science and Technology** 8(1): 77-84. (in Thai)
- Suntarak, S. 2010. Quantitative Analysis of Macronutrients in The Mixed of Food Scraps and Agricultural Waste Compost, pp. 173 -180. *In Proceeding of 48th Kasetsart University Annual Conference: Natural Resources and Environment*. Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)
- Tuyham, S., Praiwan, K., Jantasri, R. and Pimratch, S. 2013. Study of The Suitable Soil-based Growing Media for Chinese Kale (*Brassica alboglabra*). **Pawarun Agriculture Journal** 10(2): 117-124. (in Thai)
- Wawan, S., Sumadi, A.N. and Jajang, S.H. 2018. Growing Media Compositions and Watering Intervals on Seed Production of Potatoes G2 Grown at Medium Altitude. **Asian Journal of Crop Science** 10(4):190-197.
- Wongkrachang, S. and Ratneetoo, B. 2018. Effects of Media Mixed with Local Residues in Narathiwat Province for *Lactuca sativa* var. *crispa* L. Growth. **Khon Kaen Agriculture Journal** 46(Suppl 1): 1156-1160. (in Thai)

การออกแบบและสร้างเครื่องแกะเมล็ดบัวหลวงสด

Design and Fabrication of Fresh Lotus Seed Dehusking Machine

มานพ แยมแพง¹ และ พิมพพรรณ ปรี่องาม^{2*}

Manop Yamfang¹ and Pimphan Pruengam^{2*}

Received: 20 February 2020, Revised: 18 October 2020, Accepted: 4 November 2020

บทคัดย่อ

เครื่องแกะเมล็ดบัวหลวงออกจากเปลือกได้ออกแบบเพื่อให้งานต่อเนื่องจากเครื่องแยกเมล็ดบัวหลวงจากฝักบัว ประกอบด้วยโครงซึ่งทำด้วยเหล็กฉาก และแบ่งการทำงานเป็นสองส่วน คือ ชุดกะพ้อลำเลียง และชุดใบมีดกรีด พิจารณาความเร็วรอบชุดกะพ้อลำเลียงและความเร็วรอบสายพานของชุดใบมีดกรีดที่เหมาะสม และออกแบบชุดใบมีดกรีดให้สามารถกรีดได้รอบเมล็ดบัว เพื่อเพิ่มเปอร์เซ็นต์เมล็ดดีที่แกะได้ โดยมีรางใบมีด 5 ราง แต่ละรางมีใบมีดกรีด 3 ใบ โดยที่ใบมีดสูงขึ้นมาจากพื้นราง 2 มม. ตัวกะพ้อทำหน้าที่ลำเลียงเมล็ดบัวจากเครื่องแยกเมล็ดบัวไปยังชุดใบมีดกรีดเมล็ดบัวในเครื่องแกะเมล็ดบัว เมล็ดจะไหลเข้าสู่ชุดใบมีดกรีด ซึ่งประกอบด้วยรางที่มีใบมีดติดอยู่ที่ท้องรางโดยมีสายพานเป็นตัวพาเมล็ดและกดเมล็ดให้ถูกใบมีดกรีดเมล็ดที่ถูกกรีดจะไหลลงสู่ช่องทางออก การทดลองกำหนดความเร็วกะพ้อลำเลียง 3 ระดับ คือ 4.8, 5.8 และ 7.2 เมตร/วินาที และความเร็วชุดใบมีดกรีด 3 ระดับ คือ 1.3, 1.6 และ 1.9 เมตร/วินาที พบว่า ความเร็วกะพ้อลำเลียง และความเร็วชุดใบมีดกรีด ที่เหมาะสมในการทำงานคือ 5.8 เมตร/วินาที และ 1.6 เมตร/วินาที มีเปอร์เซ็นต์เมล็ดดีที่กรีดได้สูงสุด 87% และมีอัตราทำงาน 5.55 กก./ชม. เมื่อวิเคราะห์เชิงเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม พบว่า ใน 1 ปี ใช้เครื่องแกะเมล็ดบัวหลังทำงาน 640 ชม. มีค่าใช้จ่ายเฉลี่ยของเครื่อง 27,359 บาท/ปี ถ้ารับจ้างแกะเมล็ดราคา 25 บาท/กก.ของเมล็ดบัว จะมีระยะเวลากินทุนเท่ากับ 2.5 เดือน จุดคุ้มทุนเมื่อพิจารณาจากน้ำหนักเมล็ดบัวประมาณ 0.1 ตัน/ปี

คำสำคัญ: ชุดลำเลียง, ใบมีดกรีด, เมล็ดบัว, สายพาน, เปอร์เซ็นต์เมล็ดดี

¹ ภาควิชาวิศวกรรมเครื่องกล คณะวิศวกรรมศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลธัญบุรี จังหวัดปทุมธานี 12110

¹ Department of Mechanical Engineering, Faculty of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi, Pathum Thani 12110, Thailand.

² ภาควิชาวิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จังหวัดนครปฐม 73140

² Department of Agricultural Engineering, Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University, Kamphaengsaen Campus, Nakhon Pathom 73140, Thailand.

* ผู้รับผิดชอบประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): fengpppn@ku.ac.th

ABSTRACT

Lotus Seed Dehusking Machine was designed in order to continue working after the lotus seed separating machine. The machine consists of an angle steel frame with two main mechanisms- bucket conveyor unit, and blading unit. The optimum speeds of the bucket conveyor unit and the blading unit were considered. The blading unit which allows the blade to cut around the lotus seed to increase the percentage of dehusked seeds was designed. The blading unit consists of 5 tracks. Each track has 3 slitting blades with 2 mm. above the track. Bucket conveyor will feed lotus seeds from the Lotus Seed Separating Machine to the blading unit in Lotus Seed Dehusking Machine. After that the lotus seed will flow into blading unit, which has blades installed in the center of the tracks. The belt will convey and press the lotus seed to be cut. The husk of lotus seed will be cut and the lotus seed will be dropped into the outlet. In the experiment, the bucket conveyor speed was set at 4.8, 5.8 and 7.2 m/s and the speed of blading unit was set at 1.3, 1.6 and 1.9 m/s. respectively. The result revealed that the optimum speed of the bucket conveyor unit of 5.8 m/s and the blading unit speed of 1.6 m/s resulted in the highest percentage of dehusked seeds at 87 and working capacity was 5.55 kg/h. An engineering economic analysis showed that it cost 27,359 baht at 640 working hours per year. If the dehusking wage is 25 baht/kg, the payback period will be 2.5 months and the break-even point of the machine considered from the dehusked lotus seed weight will be 0.1 ton/year.

Key words: conveyor unit, slitting blades, lotus seed, belt, percentage of dehusked seeds

บทนำ

เมล็ดบัว (Seeds of Lotus) นอกจากรับประทานสด ยังนิยมผลิตเมล็ดบัวแห้งโดยใช้เมล็ดที่แก่จัด เพื่อแปรรูปเป็นอาหารต่างๆ เมล็ดบัวสดแกะออกจากฝักแล้วราคากิโลกรัมละ 120-140 บาท (Lnwshop, 2017) ในขณะที่เมล็ดบัวแห้งแกะเปลือกแล้วราคาสูงถึง กิโลกรัมละ 300-600 บาท ในปัจจุบันเกษตรกรจะทำการแกะเปลือกเมล็ดบัวด้วยมีด โดยแกะได้ครั้งละเมล็ด (Sangsawang, 2017) เป็นขั้นตอนที่ใช้เวลานานและลำบากเนื่องจากเมล็ดบัวแก่จะแห้งทำให้แข็งและเหนียวมาก

Ingpomsin and Pathaveerat (1984) ได้ออกแบบเครื่องกะเทาะเปลือกเมล็ดบัวถูกออกแบบโดยให้แรงกระทำกับเมล็ดบัวครั้งละ 1 เมล็ด เมล็ดบัวจะถูก

บรรจุอยู่ในช่องว่างของจานบรรจุเมล็ดทางด้าน ขอบตามความยาวของเมล็ด เมล็ดตกลงสู่ช่องด้วยน้ำหนักของตัวเอง อุปกรณ์กระแทกเปลี่ยนทิศทางการเคลื่อนที่ของมือหมุน ซึ่งจับจานบรรจุเมล็ดบัวเป็นการเคลื่อนที่เชิงเส้นและกระแทกให้เมล็ดบัวแตกจากการทดลองเปอร์เซ็นต์การตกของเมล็ดลงในช่องบรรจุเมล็ดเฉลี่ย 87.62 % ที่ความเร็วรอบ 39.42 รอบ/นาที ลักษณะของเมล็ดบัวเมื่อผ่านเครื่องกะเทาะแล้วทำให้แตกเฉพาะเปลือกนอก (แตกดี) เฉลี่ย 81.89% ที่ความชื้น 2.65 % (w.b.) และแรงที่ใช้ในการหมุน 3 กิโลกรัม ซึ่งในงานวิจัยนี้ แม้จะได้เมล็ดที่เปลือกนอกแตกดีในปริมาณที่สูง แต่ยังคงทำงานได้ครั้งละ 1 เมล็ด เช่นเดียวกับแรงงาน ประมาณ 30 ปีต่อมา Sangsawang (2017) ได้ออกแบบและพัฒนาเครื่อง

กะเทาะเมล็ดบัวหลวงแห้ง โดยจะป้อนเมล็ดบัวทางด้านบนของเครื่อง แล้วถูกลำเลียงเข้าไปกะเทาะเมล็ด จากนั้นเมล็ดบัวที่กะเทาะเปลือกแล้วจะร่วงออกจากชุดกะเทาะลงทางด้านล่างของเครื่อง ที่ความเร็วของลูกกะเทาะ 300 รอบ/นาที มีความสามารถในการทำงาน 3.18 กก./ชม. และเปอร์เซ็นต์การกะเทาะ 81%

ถึงแม้จะมีการพัฒนาให้มีความสามารถในการทำงานที่สูงขึ้น แต่เมื่อพิจารณาในส่วนของการเก็บเกี่ยวแล้ว พบว่า หากปล่อยให้เมล็ดบัวแห้งอยู่ในฝัก ระหว่างเก็บเกี่ยวหรือเมื่อถูกลมพัดแรงๆ จะมีการสูญเสียเมล็ดบัว เพราะเมล็ดร่วงจากฝักได้ง่าย จากรายงานผลการศึกษานักวิจัยหลายคนได้มีการสร้างเครื่องแกะเมล็ดบัวหลวงสด โดยที่วิธีการเลียนแบบการแกะด้วยแรงงานคนคือใช้มีดกรีดโดยรอบเมล็ดบัว จากงานวิจัยของ Srisutto *et al.* (2009) ได้ออกแบบและพัฒนาเครื่องแกะเมล็ดบัวหลวง การทำงานของเครื่อง ประกอบด้วย ชุดใบมีดกรีด ชุดสายพานลำเลียง ระบบส่งกำลัง และใช้มอเตอร์ไฟฟ้า เมื่อป้อนเมล็ดบัวลงในช่องป้อนสายพานลำเลียงจะลำเลียงเมล็ดบัวหมุนผ่านชุดใบมีดและร่วงสู่ช่องทางออก จากการทดลอง พบว่าเครื่องแกะเมล็ดบัวสามารถทำงานได้ดีที่สุดที่ความเร็วของสายพานลำเลียง 240 เมตร/นาที มีความสามารถในการทำงาน 4.7 กิโลกรัม/ชั่วโมง เปอร์เซ็นต์ในการแกะเมล็ดบัว 71.4 % เปอร์เซ็นต์ความเสียหายของเมล็ดบัว 3.9%

ต่อมา Lungkapin *et al.* (2017) ได้ศึกษาและทดสอบเครื่องแกะเมล็ดบัวหลวง ประกอบด้วย ชุดใบมีดกรีด กลไก Scotch Yoke ระบบส่งกำลัง และใช้มอเตอร์ไฟฟ้า การเคลื่อนที่ของกลไก Scotch Yoke ช่วยลำเลียงเมล็ดบัวเข้าไปในชุดกรีด โดยการกรีดตามแนวเส้นรอบวง จากการทดสอบ พบว่า ความเร็วของชุดใบมีดกรีด 7.5 เมตร/วินาที มีความสามารถในการ

การทำงาน 2 กิโลกรัม/ชั่วโมง เปอร์เซ็นต์ในการแกะเมล็ดบัว 79.8 % ไม่มีเปอร์เซ็นต์ความเสียหาย แม้ว่าจะลดเปอร์เซ็นต์ความเสียหายของเมล็ดบัวได้ แต่กลับมีความสามารถในการทำงานลดลง ซึ่งจากงานวิจัยที่ผ่านมาพบว่าการใช้เทคโนโลยีเครื่องจักรเข้ามาช่วยในกระบวนการผลิตระดับชุมชน เนื่องจากต้องการเพิ่มประสิทธิภาพในกระบวนการผลิตและทดแทนแรงงานคน เช่น การผ่าผลหมาก เพื่อทำหมากแห้งเพื่อส่งขายในประเทศและต่างประเทศทำให้มีการพัฒนาอย่างต่อเนื่อง (Suchadpong and Muangkaew, 2008; Siphuengthong and Ploykrajang, 2009; Yamfang *et al.*, 2017) จนสามารถทำงานได้ตามที่ชุมชนต้องการ

เครื่องแกะเมล็ดบัวหลวงสดในงานวิจัยนี้ได้ออกแบบเพื่อให้ทำงานต่อเนื่องจากเครื่องแยกเมล็ดบัวหลวงจากฝักบัว (Pruengam and Manthamkam, 2018) ซึ่งได้ผลการทดลองเป็นที่น่าพอใจสามารถแยกเมล็ดบัวออกจากฝักได้สูงถึง 61 % โดยที่เมล็ดบัวที่ผ่านการแยกด้วยเครื่องไม่ปรากฏความเสียหายและมีอัตราการทำงานสูงกว่าแรงงานถึง 8 เท่า จึงได้พัฒนาในส่วนแกะเปลือกเพื่อให้เครื่องทำงานได้อย่างต่อเนื่องและแกะเมล็ดบัวได้แล้วเสร็จ ดังนั้นวัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้ เพื่อออกแบบพัฒนาและทดสอบการทำงานของเครื่องแกะเมล็ดบัวสด โดยศึกษาความเร็วชุดกะพ้อลำเลียงและความเร็วสายพานของชุดใบมีดกรีดที่เหมาะสม และออกแบบชุดใบมีดกรีดให้สามารถกรีดได้รอบเมล็ดบัว เพื่อเพิ่มเปอร์เซ็นต์เมล็ดดีที่แกะได้

การนำเครื่องแกะเปลือกเมล็ดบัวหลวงมาใช้สำหรับแปรรูปเป็นเมล็ดบัวแห้ง จึงเป็นวิธีที่สามารถทำรายได้ให้เกษตรกรเพิ่มขึ้น เพราะนอกจากลดการใช้แรงงานลงยังทำให้ได้จำนวนเมล็ดดีที่แกะเปลือกได้ต่อชั่วโมงที่เพิ่มขึ้น บัวที่ให้เมล็ดมีหลายพันธุ์ เช่น บัวหลวงพันธุ์ดอกสีชมพู (East Indian Lotus) และ

บัวหลวงพันธุ์ดอกสีขาว (Hindu lotus) และส่วนมากบัวหลวงพันธุ์ดอกสีชมพู เป็นพันธุ์ที่นิยมใช้เมล็ดเป็นอาหาร (Suwanro and Noramas, 1992) ดังนั้นในงานวิจัยนี้จึงเลือกบัวสีชมพูเป็นตัวแทนบัวเมล็ดบัวที่ใช้ในการทดลอง

วิธีดำเนินการวิจัย

แบ่งการดำเนินงานออกเป็นหลายส่วนตามลำดับดังนี้คือ

1. การศึกษาสมบัติทางกายภาพของเมล็ดบัวหลวง
2. การออกแบบและสร้างเครื่องแกะเมล็ดบัวหลวง
3. การทดสอบเครื่องแกะเมล็ดบัวหลวง

ความหนาของเปลือกเมล็ดบัว = $\frac{\phi_1 - \phi_2}{2}$

(1)



ภาพที่ 1 การวัดความหนาเปลือกเมล็ดบัว

ในงานวิจัยนี้ไม่วัดความหนาจากเปลือกโดยตรง เนื่องจากเมล็ดบัวด้านใน (ส่วนที่เป็นสีขาว) ไม่ได้อยู่ชิดกับเปลือกสีเขียวด้านนอกเพราะมีช่องว่างระหว่างเปลือกอยู่ เมื่อหากเราวัดความหนาเปลือกโดยวิธีนี้จะรวมช่องว่างระหว่างเปลือกด้วย เมื่อนำค่าที่ได้ไปกำหนดความสูงของใบมีด จะทำให้ใบมีดสามารถกรีดเปลือกเมล็ดบัวได้ลึกขึ้นโดยไม่ทำให้เมล็ดด้านในเสียหาย และสามารถกรีดเปลือกให้ขาดได้โดยรอบ

2. การออกแบบและสร้างเครื่องแกะเมล็ดบัวหลวง

2.1 หลักการออกแบบ

4. การประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

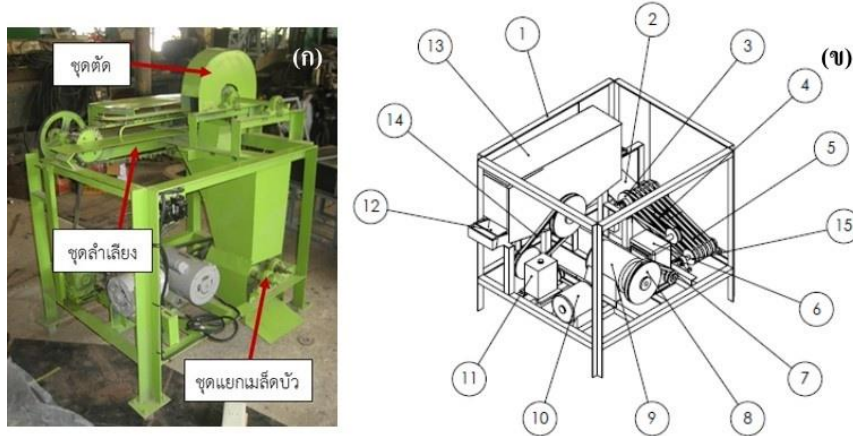
1. การศึกษาสมบัติทางกายภาพของเมล็ดบัวหลวง

นำเมล็ดบัวหลวงที่แก่จัด (อายุประมาณ 3-4 เดือน) จำนวน 100 เมล็ด มาชั่งน้ำหนักเฉลี่ยต่อเมล็ดบัว แล้ววัดเส้นผ่าศูนย์กลางของเมล็ดบัว (ϕ_1) และความยาวเฉลี่ยของเมล็ดบัว (L) ด้วยเวอร์เนียคาลิเปอร์ เพื่อใช้กำหนดระยะกระหว่งสายพานและร่องใบมีด จากนั้นแกะเมล็ดบัวออกมาจากเปลือก วัดเส้นผ่าศูนย์กลางของแต่ละเมล็ด (ϕ_2) คำนวณหาความหนาของเปลือกดังสมการ (1) และทำการทดลอง 3 ซ้ำ ค่าที่ได้ใช้กำหนดความสูงของใบมีดกรีดเมล็ดบัวหลวง ดังแสดงในภาพที่ 1

เครื่องแกะเมล็ดบัวหลวง เป็นเครื่องที่ทำงานต่อจากเครื่องแยกเมล็ดบัวหลวงจากฝักบัว (Pruengam and Manthamkam, 2018) การทำงานจะเริ่มจากชุดลำเลียง ซึ่งมีโซ่ทำหน้าที่ลำเลียงฝักบัวไปยังชุดตัดแล้วตัดฐานฝักและก้านบัวด้วยใบมีดสีเหลือง เพื่อให้ได้ฝักบัวเฉพาะส่วนที่มีเมล็ดอยู่ จากนั้นจะถูกส่งต่อเข้าที่ชุดแยกเมล็ดบัวซึ่งทำจากแปรงลวดกลมสวมอยู่ในเพลลา และหมุนสวนทางกันในทิศทางลง เพื่อแยกเมล็ดบัวให้หลุดออกจากฝักเมล็ดบัวที่แยกแล้วจะหล่นลงด้านล่างของตัวเครื่อง ดังนั้นในการออกแบบเครื่องแกะเมล็ดบัวหลวงจึง

เริ่มจาก ชุดกะพ้อลำเลียง ประกอบด้วยโซ่ปิกที่ติดด้วยตัวกะพ้อทำหน้าที่ลำเลียงเมล็ดบัวจากเครื่องแยกเมล็ดบัวไปยังชุดโอบมีดกรีดเมล็ดบัวในเครื่องแกะเมล็ดบัว เมล็ดจะไหลลงสู่ชุดโอบมีดกรีด ซึ่งประกอบ

ด้วยรางที่มีโอบมีดติดอยู่ที่ท้องรางโดยมีสายพานเป็นตัวพาเมล็ดและกดเมล็ดให้ถูกโอบมีดกรีดเมล็ดที่ถูกกรีดจะไหลลงสู่ช่องทางออก ดังแสดงในภาพที่ 2



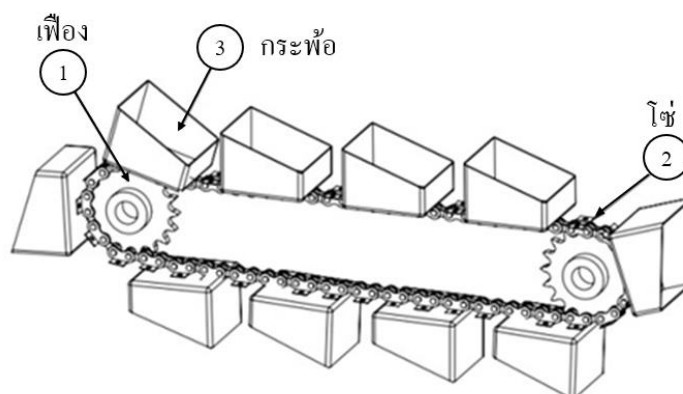
ภาพที่ 2 (ก) เครื่องแยกเมล็ดบัวหลวงจากฝักบัว (Pruengam and Manthamkarn, 2018)

(ข) เครื่องแกะเมล็ดบัว

2.2 การออกแบบชุดกะพ้อลำเลียง

ชุดกะพ้อลำเลียงประกอบด้วยโซ่ปิกเบอร์ 40 ยาว 1.2 เมตร ใช้เฟืองในการเคลื่อนโซ่ลำเลียงขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 80 มม. จำนวน 18 ฟันติดตั้งทำมุมเอียง 20 องศา ที่ติดกับกะพ้อขนาด 60 มม. × 40 มม. × 65 มม. เพื่อลำเลียงเมล็ดบัวเข้าสู่ชุดกรีด

เมล็ด ดังแสดงในภาพที่ 3 โดยใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 186.42 วัตต์ เป็นต้นกำลังขับเคลื่อน ลดความเร็วรอบผ่านเกียร์ทดรอบ มีอัตราทดรอบ 1:10 ทำหน้าที่ลำเลียงเมล็ดบัวที่ผู้ปฏิบัติงานป้อนเข้าสู่ชุดกะพ้อลำเลียงและชุดกรีดเมล็ดในลำดับต่อไป



ภาพที่ 3 กะพ้อลำเลียง

การคำนวณหาขนาดมอเตอร์ของชุดกะป้อลำเลียง

$$P = \frac{2\pi Tn}{60} \quad (2)$$

$$T = F \times r \quad (3)$$

เมื่อ P คือ กำลัง (วัตต์)

T คือ Torque (นิวตันเมตร)

n คือ ความเร็วรอบ (รอบ/นาที)

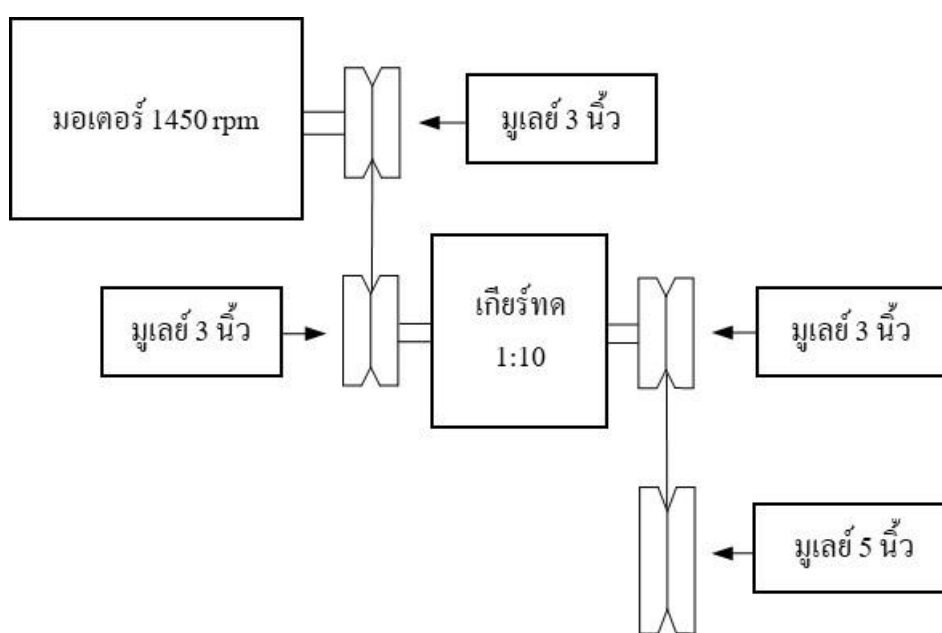
F คือ แรง (นิวตัน)

r คือ รัศมี (เมตร)

จากการทดสอบแรงที่ใช้ทำให้ชุดกะป้อเกิดการเคลื่อนที่โดยใช้เครื่องวัดแรงดึงระบบดิจิทัลได้แรง 310 N ซึ่งเส้นผ่านศูนย์กลางของชุดขับเคลื่อนมีขนาด 80 มิลลิเมตร

$$\begin{aligned} T &= F \times r \\ &= 310 \times 0.04 \\ &= 12.4 \text{ นิวตันเมตร} \end{aligned}$$

คำนวณหาความเร็วรอบมอเตอร์



ภาพที่ 4 ระบบส่งกำลังของชุดกะป้อ

$$n = \frac{1450}{i_{a1} \times i_{a2}} \quad (4)$$

โดยที่ i_{a1} คือ อัตราการทดของเกียร์ทดคือ 1 :

10

i_{a2} คือ อัตราการทดมูเลย์คือ 3 : 5 นิ้ว

$$\begin{aligned} n &= \frac{1450}{\left(\frac{10}{1}\right) \times \left(\frac{5}{3}\right)} \\ &= 87 \text{ รอบ/นาที} \end{aligned}$$

จากสมการ (2)

$$P = \frac{2\pi Tn}{60}$$

$$= \frac{2\pi(12.4)(87)}{60}$$

$$= 113 \text{ วัตต์}$$

ซึ่งกำลังที่ได้เป็นกำลังทางกล ในงานวิจัยเลือกใช้มอเตอร์เป็นต้นกำลัง สมมติให้มอเตอร์มีประสิทธิภาพ 80% จะได้กำลังทางไฟฟ้าดังนี้

$$80\% \text{ ของกำลังไฟฟ้า} = \text{กำลังทางกลที่}$$

$$\text{กำหนดได้}$$

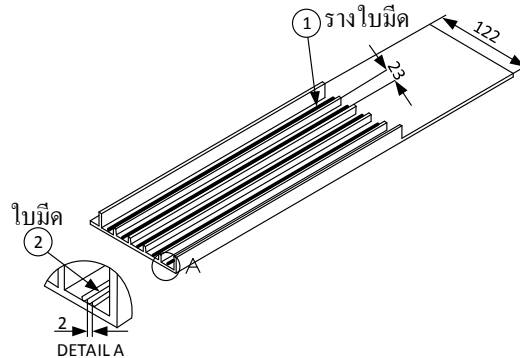
$$\text{ซึ่งจะต้องใช้กำลังทางไฟฟ้า} = (113/0.8)$$

$$= 141.2 \text{ วัตต์}$$

$$= 0.19 \text{ แรงม้า}$$

ดังนั้นจึงเลือกใช้มอเตอร์ขนาด 1/4 แรงม้า หรือ 186.42 วัตต์

2.3 การออกแบบชุดไบริดกริดเมลต์



ภาพที่ 5 ชุดไบริดกริด

2.4 ลักษณะการทำงานของเครื่อง

ผู้ปฏิบัติงานป้อนเมลต์บั่วเข้าสู่ช่องทางเข้าชุดกะป้อลำเลียง เมลต์จะถูกกะป้อลำเลียงเข้าสู่ชุดไบริดกริด ชุดไบริดกริดจะทำการกริดรอบเมลต์โดย

ปริมาณอัตราการผลิตที่ต้องการประมาณ 5-10 กก./ชม. ดังนั้นจึงออกแบบชุดไบริดประกอบด้วย 5 รางในแต่ละรางจะประกอบไปด้วย ไบริดจำนวน 3 ไบริ และแต่ละไบริห่างกัน 2 มม. เพื่อรองรับเมลต์เล็กที่ไม่ได้กลิ้งเข้ามาอยู่กลางรางที่อาจเบี่ยงซ้ายหรือขวา และเพิ่มเปอร์เซ็นต์การกริดเมลต์ดี ไบริดในแต่ละรางจะสูงมาจากพื้นราง 2 มม. ซึ่งเป็นความหนาของเปลือกเมลต์บั่ว โดยในแต่ละรางจะกว้าง 23 มม. มาจากความยาวที่ยาวที่สุดของเมลต์บั่ว กำหนดให้รางเอียงทำมุม 20 องศา ดังแสดงในภาพที่ 5 ด้านบน รางมีสายพานไทม์มิ่ง (Timing Belt) ชนิดร่อง B จำนวน 5 เส้น แต่ละเส้นคล้องอยู่กับล้อสายพานที่ทำจากไม้ขนาด 3 นิ้ว ใช้มอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 599.27 วัตต์ เป็นต้นกำลัง ลดความเร็วรอบด้วย เกียร์ทดรอบขนาด 1:60 สายพานจะทำหน้าที่พาและกดเมลต์บั่วให้ถูกไบริดกริดรอบเมลต์และไหลลงสู่ช่องทางออก

จะมีสายพานเป็นตัวพาเมลต์ให้กลิ้งผ่านไบริดและไหลออกช่องทางออกที่มีภาชนะรองรับไว้ เมื่อประกอบส่วนต่างๆสมบูรณ์แล้ว ดังแสดงในภาพที่ 6

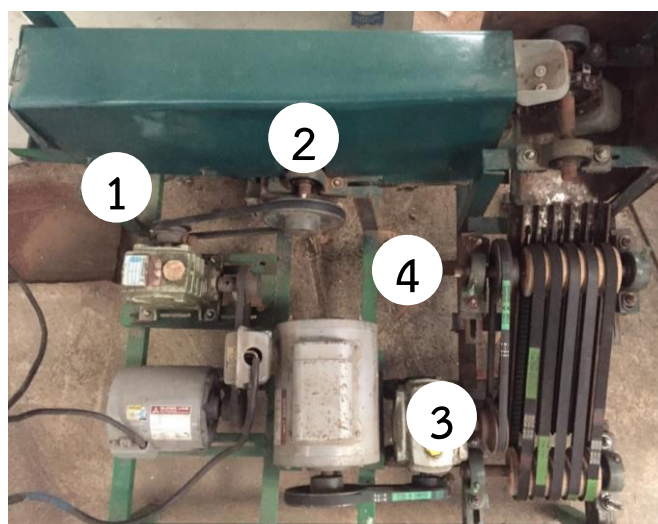


ภาพที่ 6 เครื่องแกะเมล็ดบัว

3. การทดสอบเครื่องแกะเมล็ดบัวหลวง

นำเมล็ดบัวไปชั่งน้ำหนักก่อนทดลอง แต่ละการทดลองใช้เมล็ดบัว 50 เมล็ด ป้อนเมล็ดบัวเข้าสู่ชุดกะพ้อลำเลียงของเครื่องแกะเปลือกเมล็ด ทำงานโดยได้รับกำลังจากมอเตอร์ไฟฟ้าขนาด 1/4 แรงม้า ความเร็วรอบ 1,450 รอบ/นาที เปลี่ยนขนาดล้อสายพาน ตำแหน่งที่ (1) และ (2) ดังแสดงในภาพที่ 5 เพื่อให้ได้ความเร็วรอบของชุดกะพ้อลำเลียงที่

แตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 4.8, 5.8 และ 7.2 เมตร/วินาที เปลี่ยนขนาดล้อสายพาน ตำแหน่งที่ (3) และ (4) ดังแสดงในภาพที่ 7 เพื่อให้ได้ความเร็วรอบของชุดใบมีดกรีดที่แตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 1.3, 1.6 และ 1.9 เมตร/วินาที ซึ่งการทำงานระหว่างชุดกะพ้อและชุดใบมีดกรีดจะมีความสัมพันธ์กันเป็นผลให้ได้สมรรถนะของเครื่องสูงสุด



ภาพที่ 7 ล้อสายพานของชุดกะพ้อและชุดใบมีดกรีด

เริ่มจับเวลาที่ป้อนเมล็ดบัวจากเมล็ดแรกที่เข้าสู่ชุดกะป๋องจนถึงเมล็ดสุดท้ายที่เข้าสู่ชุดกะป๋อง เพื่อ

หาอัตราการป้อน ดังสมการที่ (5)

อัตราการป้อน = น้ำหนักเมล็ดรวมทั้งหมด / เวลา

(5)

เริ่มจับเวลาที่เมล็ดบัวจากเมล็ดแรกที่เข้าสู่ชุดไบมิดกริดจนถึงเมล็ดสุดท้ายที่ออกจากชุดไบมิด

กริด เพื่อหาอัตราการทำงาน ซึ่งอัตราการทำงานนี้ก็คือ อัตราการกริดเปลือกเมล็ดบัว ดังสมการที่ (6)

อัตราการทำงาน = น้ำหนักเมล็ดดี / เวลา

(6)

เมล็ดบัวจะร่วงลงสู่ทางออก นับจำนวนเมล็ดบัวที่ผ่านการกริด โดยแยกเป็นเมล็ดดี เมล็ดเสีย และเมล็ดที่ไม่ถูกกริด และชั่งน้ำหนัก ในงานวิจัยนี้เมล็ดดี คือ เมล็ดที่กริดเปลือกแล้วไม่มีรอยบาดหรือสร้างความเสียหายให้กับเนื้อของเมล็ดบัว เมล็ดเสีย คือ เมล็ดที่กริดออกมาแล้วเนื้อของเมล็ดบัวมีความ

เสียหาย เช่น ถูกไบมิดกริดจนเมล็ดบัวขาดออกจากกัน บาดแห้ว หรือถูกสายพานกดจนเมล็ดและเมล็ดที่ไม่ถูกกริด คือ เมล็ดที่ลอดผ่านชุดไบมิดกริดโดยไม่ถูกกริดหรือไม่มีรอยการโดนกริด ดังแสดงในภาพที่ 8



ภาพที่ 8 ตัวอย่างเมล็ดดี เมล็ดเสีย และเมล็ดที่ไม่ถูกกริด

จากนั้นนำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์เมล็ดดีที่กริดได้ เปอร์เซ็นต์เมล็ดเสีย และเปอร์เซ็นต์เมล็ดที่ไม่ถูกกริด ดังสมการที่ (7), (8) และ (9) โดยแต่ละ

เงื่อนไขทำการทดลองซ้ำ 6 ครั้ง และนำข้อมูลที่ได้มาวิเคราะห์ค่าทางสถิติ

เปอร์เซ็นต์เมล็ดดีที่กริดได้ = (จำนวนเมล็ดดี / จำนวนเมล็ดทั้งหมด) $\times$ 100

(7)

เปอร์เซ็นต์เมล็ดเสีย = (จำนวนเมล็ดเสีย / จำนวนเมล็ดทั้งหมด) $\times$ 100

(8)

เปอร์เซ็นต์เมล็ดไม่ถูกกริด = (จำนวนเมล็ดที่ไม่ถูกกริด / จำนวนเมล็ดทั้งหมด) $\times$ 100

(9)

จากนั้นนำผลการทดลองมาวิเคราะห์ความแปรปรวนผลของระดับความเร็วรอบชุดกะพ้อลำเลียงและชุดใบมีดกรีด เปอร์เซ็นต์เมล็ดที่กรีดได้ เปอร์เซ็นต์เมล็ดเสีย และเปอร์เซ็นต์เมล็ดที่ไม่ถูกกรีด

แล้วเปรียบเทียบความแตกต่างระหว่างค่าเฉลี่ยของแต่ละวิธีใช้การทดสอบแบบ Duncan's multiple range test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95% ($p \leq 0.05$)

4. การประเมินผลทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

4.1 การประเมินค่าใช้จ่ายในการดำเนินงาน

$$\text{ค่าเสื่อมราคาเครื่องแบบเส้นตรง (บาท/ปี)} = (P-L) / N \quad (10)$$

โดย P = ราคาเครื่องแกะเมล็ดบัว (=13,500 บาท)

L = ราคาซากเครื่อง (= 0.1× P บาท)

N = อายุการใช้งาน (= 10 ปี)

$$\text{ค่าดอกเบี้ยในการลงทุน (บาท/ปี)} = ((P+L) / 2) \times (i / 100) \quad (11)$$

โดย i = อัตราดอกเบี้ยต่อปี (7.5 %)

$$FC \text{ ต้นทุนคงที่รวม (บาท/ปี)} = \text{ค่าเสื่อมราคาเครื่อง} + \text{ค่าดอกเบี้ยในการลงทุน} \quad (12)$$

$$\text{ค่าบำรุงรักษา (บาท/ปี)} = \text{ราคาเครื่อง} \times \text{ค่าซ่อมแซม} \quad (13)$$

โดย อายุการใช้งานของเครื่องจักรกลเกษตรหลังการเก็บเกี่ยว 10 ปี และมีค่าซ่อมแซมประมาณ 100% ของราคาเครื่อง

$$\text{ค่าจ้างแรงงาน (บาท/ปี)} = \text{อัตราค่าจ้าง} \times \text{วันทำงาน} \quad (14)$$

โดย อัตราค่าจ้างแรงงานวันละ 310 บาท (ค่าแรงขั้นต่ำครบถ้วน 1 มกราคม 2560 กระทรวงแรงงาน)

ใน 1 ปี สามารถเก็บเกี่ยวเมล็ดบัวได้ 3-4 เดือน (Suwanro and Noramas, 1992) หยุดเสาร์-อาทิตย์ ดังนั้นทำงาน 60-80 วัน

$$\text{ค่าไฟฟ้า (บาท/ปี)} = \text{จำนวนหน่วยไฟฟ้า} \times \text{ค่าหน่วยไฟฟ้า} \times \text{วันทำงาน} \quad (15)$$

$$\text{จำนวนหน่วยไฟฟ้า (Unit day}^{-1}\text{)} = \text{ความสิ้นเปลืองไฟฟ้า} \times \text{ชั่วโมงทำงาน} \quad (16)$$

โดย ค่าหน่วยไฟฟ้า 3 บาท/หน่วย วัดความสิ้นเปลืองไฟฟ้า 0.225 kW และใน 1 วัน ทำงาน 8 ชั่วโมง

$$VC \text{ ต้นทุนผันแปรรวม (บาท/ปี)} = \text{ค่าบำรุงรักษา} + \text{ค่าจ้างแรงงาน} + \text{ค่าไฟฟ้า} \quad (17)$$

$$AC \text{ ต้นทุนรวมทั้งหมด (บาท/ปี)} = FC + VC \quad (18)$$

$$\text{ต้นทุนการแกะเม็ล็ดบัวด้วยเครื่อง (บาท/ กก. ของเม็ล็ดบัว)} = AC / (\text{ชั่วโมงทำงาน} \times \text{อัตราการแยกเม็ล็ด}) \quad (19)$$

4.2 จุดคุ้มทุน (Break Even Point)

$$BEP \text{ จุดคุ้มทุน (ตัน/ปี)} = FC / (p - VC) \quad (20)$$

โดย p = ค่ารับจ้างเครื่องแกะเม็ล็ดบัว (บาท/ กก.) พิจารณาในช่วงเท่ากับ 11-50 บาท/กก. ของเม็ล็ดบัว

4.3 ระยะเวลาคืนทุน (Payback Period)

$$PBP = CF_0 / YCF \quad (21)$$

$$YCF = R - AC \quad (22)$$

โดย CF_0 = ค่าใช้จ่ายทั้งหมดในการสร้างเครื่องแกะเม็ล็ดบัว (บาท)

YCF = กำไร (บาท/ปี)

R = รายได้ (บาท/ปี)

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. สมบัติทางกายภาพของเม็ล็ดบัวหลวง

จากผลการทดลองวัดสมบัติทางกายภาพของเม็ล็ดบัว ด้วยการวัดขนาด และชั่งน้ำหนัก มีรายละเอียดดังนี้ เม็ล็ดบัวหลวงมีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 14.88 ± 0.03 มม. ความยาวเฉลี่ย 20.36 ± 0.10 มม. น้ำหนักเฉลี่ย 110.34 ± 4.78 กรัม และความหนาของเปลือกเฉลี่ย 2.58 ± 0.11 มม. ผลที่ได้ใช้ในการออกแบบเครื่องแกะเม็ล็ดบัว โดยที่ใช้ความยาวเฉลี่ยของเม็ล็ดบัวกำหนดความกว้างของรางใบมีด และความสูงของใบมีดที่จะไม่ทำให้เม็ล็ดเสียหายได้กำหนดจากความหนาเปลือกของเม็ล็ดบัว

2. การทดสอบเครื่องแกะเปลือกเม็ล็ดบัวหลวง

จากผลการทดลองแกะเปลือกเม็ล็ดบัวด้วยเครื่องความเร็วรอบชุดกะป้อลำเลียง 4.8, 5.8 และ 7.2 เมตร/วินาที และใช้ความเร็วรอบชุดใบมีดกรีดที่

แตกต่างกัน 3 ระดับ คือ 1.3, 1.6 และ 1.9 เมตร/วินาที ผลของความเร็วรอบชุดกะป้อลำเลียงและความเร็วรอบชุดใบมีดกรีดที่มีผลต่อการทดลอง มีรายละเอียดดังนี้

จากการทดสอบทำการวัดอัตราการป้อนโดยการป้อนเม็ล็ดบัวเข้าเครื่องแกะเม็ล็ดที่ความเร็วรอบ 1.3, 1.6 และ 1.9 เมตร/วินาที พบว่า มีอัตราการป้อนอยู่ในช่วง 11.15-11.46 กก./ชม. เนื่องจากน้ำหนักของเม็ล็ดบัวที่ใช้ในแต่ละการทดลองมีค่าใกล้เคียงกัน และระยะเวลาที่ใช้ป้อนในแต่ละความเร็วรอบก็ยังมีค่าใกล้เคียงกันประมาณ 35 วินาที ส่งผลให้อัตราการป้อนในแต่ละความเร็วรอบกะป้อลำเลียงต่างๆ ไม่แตกต่างกันทางสถิติ ในช่วงอัตราการป้อนที่กำหนดนี้ไม่ทำให้เม็ล็ดบัวสั่นทางเข้าสู่ชุดใบมีดกรีดระหว่างทำการทดลอง

จากการทดสอบทำการวัดอัตราการทำงานในช่วงที่เมล็ดบัวเข้าสู่ชุดใบมีดกรีดด้วยความเร็วรอบต่างๆ ดังแสดงในตารางที่ 1 พบว่า ที่ความเร็วรอบชุดกะป้อลำเลียง 7.2 เมตร/วินาที และ ความเร็วรอบชุดใบมีดกรีด 1.9 เมตร/วินาทีมีอัตราการทำงานสูงสุด

คือ 8.27 ± 0.24 กก./ชม. ซึ่งมากกว่า 2 เท่า ของการทดลองซึ่งมีอัตราการทำงานต่ำสุด (ความเร็วรอบชุดกะป้อลำเลียง 4.8 เมตร/วินาที และ ความเร็วรอบชุดใบมีดกรีด 1.3 เมตร/วินาที)

ตารางที่ 1 อัตราการทำงาน

การทดลองที่	ความเร็วกะป้อลำเลียง (เมตร/วินาที)	ความเร็วชุดใบมีดกรีด (เมตร/วินาที)	อัตราการทำงาน (กก./ชม.)
1	4.8	1.3	3.66 ± 0.21^A
2		1.6	5.31 ± 0.2^B
3		1.9	7.53 ± 0.4^D
4	5.8	1.3	3.59 ± 0.26^A
5		1.6	5.55 ± 0.28^B
6		1.9	7.78 ± 0.24^D
7	7.2	1.3	3.5 ± 0.25^A
8		1.6	5.89 ± 0.37^C
9		1.9	8.27 ± 0.24^E

หมายเหตุ อักษรที่ต่างกัน หมายถึง ความแตกต่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

ในการออกแบบเครื่องแกะเมล็ดบัวนั้นพิจารณาจากเปอร์เซ็นต์เมล็ดดีที่กรีดได้เป็นสำคัญพบว่า การทดลองที่ 2 และ 5 มีเปอร์เซ็นต์เมล็ดดีที่กรีดได้สูงสุดถึง 87% ซึ่งมากกว่างานวิจัยของ Srisutto *et al.* (2009) ที่มีเปอร์เซ็นต์ในการแกะเมล็ดบัว 71.4 % และสูงกว่าการกะเทาะเมล็ดบัวแห้งของ Ingpornsin and Pathaveerat (1984) และ Sangsawang (2017) ซึ่งได้ทำการทดลองกะเทาะเมล็ดบัวแห้งพบว่า ได้เมล็ดดี 81.89% และ 81% ตามลำดับ นอกจากนี้แล้วการทดลองที่ 2 และ 5 ยังมีอัตราการทำงานสูงกว่า Srisutto *et al.* (2009) ถึงแม้ว่าจำนวนชุดกรีดของงานวิจัยนี้จะมีมากกว่างานวิจัยของ Srisutto *et al.* (2009) 4 ชุด แต่อัตราการทำงานสูงกว่าเพียง 1.1-1.2 เท่า ทั้งนี้เนื่องจากเมื่อกะป้อลำเลียง

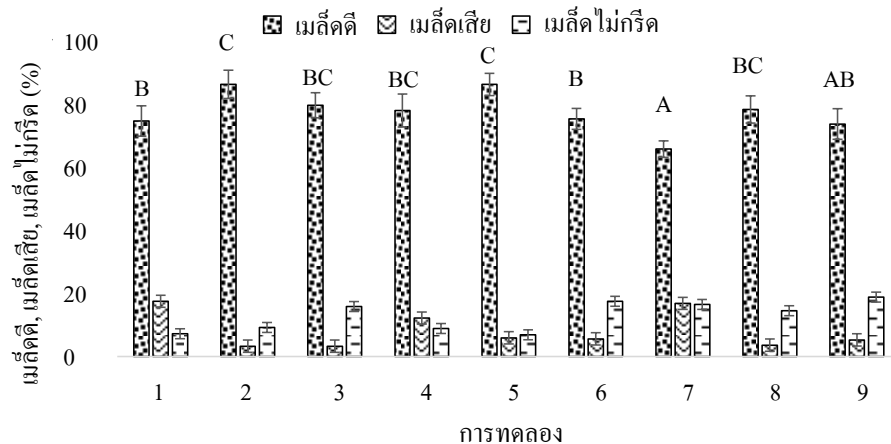
เมล็ดบัวมาแล้วจะปล่อยตกบริเวณเหนือรางร่องใบมีดก่อนจะค่อยๆ ทอยกลิ้งเข้าสู่รางร่องใบมีดกรีดเมล็ดบัวจึงไม่ได้เข้าสู่ชุดใบมีดกรีดทั้งหมดได้ทันทีแล้วสายพานจะทำหน้าที่กีดและพาเมล็ดบัวเข้ารางในกรณีที่เมล็ดบัวไม่เข้ากึ่งกลางราง จะทำให้เมล็ดบัวถูกบีบติดเข้ากับด้านข้างทำให้ใช้เวลาในรางมากขึ้น

การทดลองที่ 1 4 และ 7 ซึ่งเป็นการทดลองที่ใช้ความเร็วชุดใบมีดกรีด 1.3 เมตร/วินาทีนั้นมีเปอร์เซ็นต์เมล็ดเสียมากที่สุด ประมาณ 12-17% เนื่องจากความเร็วรอบที่สายพานเคลื่อนที่ในรางใบมีดช้าที่สุด ทำให้เมล็ดบัวที่กลิ้งผ่านรางใบมีดถูกสายพานกดจนเสียหาย ในขณะที่ความเร็วชุดใบมีดกรีด 1.6 และ 1.9 เมตร/วินาทีมีเปอร์เซ็นต์เมล็ดเสีย

ใกล้เคียงกัน และน้อยกว่าที่ความเร็วชุดใบมีดกรีด 1.3 เมตร/วินาทีประมาณ 3-4 เท่า

การทดลองที่ 3 6 และ 9 ซึ่งเป็นการทดลองที่ใช้ความเร็วชุดใบมีดกรีด 1.9 เมตร/วินาทีนั้นมีเปอร์เซ็นต์เมล็ดที่ไม่ถูกกรีดมากที่สุด ประมาณ 16-19% เนื่องจากความเร็วรอบที่สายพานเคลื่อนที่ใน

รางใบมีดเร็วที่สุด ทำให้เมล็ดข้าวผ่านใบมีดอย่างรวดเร็วถูกใบมีดกรีดเพียงเล็กน้อยหรือไม่มีรอยกรีดเลย ซึ่งก็สอดคล้องกับการทดลองที่ 7 และ 8 ซึ่งเป็นการทดลองที่มีอัตราการป้อนสูงสุด (ความเร็วกะพ้อ 7.2 เมตร/วินาที) ก็มีเปอร์เซ็นต์เมล็ดที่ไม่ถูกกรีดสูงรองลงมาเช่นกัน ดังแสดงในภาพที่ 9



ภาพที่ 9 เปอร์เซนต์เมล็ดดี เมล็ดเสีย และเมล็ดที่ไม่ถูกกรีด

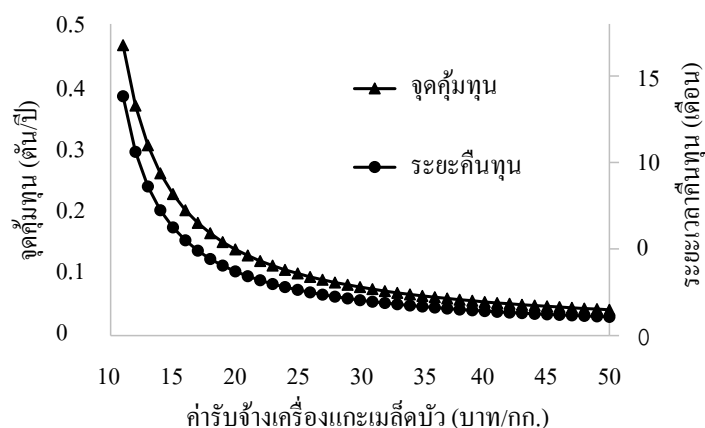
หมายเหตุ อักษรที่ต่างกัน หมายถึง ความแตกต่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p \leq 0.05$)

3. ผลการวิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม

หลังจากได้ทดสอบการทำงานของเครื่องแกะเมล็ดข้าวออกจากฝักแล้ว ในขั้นตอนต่อไป ได้ทำการวิเคราะห์ผลทางด้านเศรษฐศาสตร์วิศวกรรม กำหนดให้ต้นทุนในการสร้างต้นแบบมีราคา 13,500 บาท อายุการใช้งานของเครื่อง พิจารณาที่ 10 ปี ค่าเสื่อมราคาของเครื่องแยกเมล็ดข้าว 1,215 บาท/ปี อัตราดอกเบี้ยเท่ากับ 7.5 % คิดเป็นค่าใช้จ่ายคงที่ (FC) เท่ากับ 1,771.875 บาท/ปี จากการทดสอบโดยใช้แรงงานปฏิบัติงาน 1 คน พิจารณาการทำงานที่ความเร็วกะพ้อเฉลี่ย 87 เมตร/วินาที และความเร็วชุดใบมีดกรีด 30 เมตร/วินาที อัตราการทำงาน 5.55 กก./ชม. และมีเปอร์เซ็นต์เมล็ดดีที่กรีดได้ 87 % มีความสิ้นเปลืองพลังงานต่อชั่วโมงเฉลี่ย 0.225

กิโลวัตต์ โดยพิจารณาใช้เครื่องทำงานวันละ 8 ชม. ปีละ 80 วัน อัตราการรับจ้างพิจารณาจากค่าแรงขั้นต่ำเท่ากับ 310 บาท/วัน หรือเท่ากับ 24,800 บาท/ปี และค่าไฟฟ้า 432 บาท/ปี คิดเป็นค่าใช้จ่ายผันแปร (VC) 38,732 บาท/ปี ดังนั้นต้นทุนรวมของเครื่องทั้งหมด (AC) 40,503.875 บาท/ปี เมื่อพิจารณาจุดคุ้มทุน พบว่าค่าใช้จ่ายผันแปรต่อหน่วยเท่ากับ 10.9 บาท/กก. ของเมล็ดข้าว กำหนดให้ค่ารับจ้างเครื่องแกะเมล็ดข้าวเท่ากับ 11-50 บาท/กก. จะได้จุดคุ้มทุนและระยะเวลาคืนทุน ดังแสดงในภาพที่ 10

ผลการวิเคราะห์พบว่า ถ้าคิดค่ารับจ้าง 25 บาท/กก. ของเมล็ดข้าว จะมีระยะเวลาคืนทุนเท่ากับ 2.5 เดือน จุดคุ้มทุนในหนึ่งปี เมื่อพิจารณาจากน้ำหนักเมล็ดข้าวประมาณ 0.1 ตัน/ปี



ภาพที่ 10 จุดกลุ่มทุนและระยะเวลาคืนทุนของเครื่องแกะเมล็ดบัว

สรุป

จากการทดสอบทางกายภาพ พบว่า เมล็ดบัว มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางเฉลี่ย 14.88 ± 0.03 มม. ความยาวเฉลี่ย 20.36 ± 0.10 มม. น้ำหนักเฉลี่ย 110.34 ± 4.78 กรัม และความหนาของเปลือกเฉลี่ย 2.58 ± 0.11 มม. โดยที่จากการทดสอบหาความสามารถในการทำงานของเครื่องแกะเมล็ดบัวหลวง พบว่า การทดลองที่ 2 และ 5 มีเปอร์เซ็นต์เมล็ดดีที่กรีดได้สูงสุดใกล้เคียงกัน แต่การทดลองที่ 5 มีอัตราการทำงานสูงกว่าการทดลองที่ 2 และถึงแม้การทดลองที่ 9 จะมีอัตราการทำงานสูงสุด 8.27 กก./ชม. แต่ก็มีเปอร์เซ็นต์เมล็ดดีที่กรีดได้เพียง 74.3% ดังนั้นจึงสรุปได้ว่า การทดลองที่ 5 ความเร็วกะป้อลำเลียง และความเร็วชุดใบมีดกรีดที่เหมาะสมในการทำงานคือ 5.8 เมตร/วินาที และ 1.6 เมตร/วินาที ตามลำดับ

กิตติกรรมประกาศ

งานวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนจากทุนอุดหนุนวิจัย คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ปีการศึกษา 2561 รหัสโครงการ วศ.กพส. 10/2561

เอกสารอ้างอิง

- Ingpornsini, S. and Pathaveerat, S. 1984. A mechanical cracker for lotus seed. Bachelor Thesis of Engineering, Kasetsart University. (in Thai)
- Lnwshop. 2017. **Fresh lotus seed**. Available Source: <http://lotuseverything.lnwshop.com/product/6/เมล็ดบัวสด>, September 15, 2017. (in Thai)
- Lungkapi, J., Parnsakorn, S., Kalsirisilp, R., Phorod, M. and Kod Phomsri, N. 2017. Study and testing of a lotus seed peeling machine. **Journal of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi** 15(1): 35-42. (in Thai)
- Pruengam, P. and Manthamkarn, V. 2018. Design of lotus seed separating machine from its pod. **Thai Society of Agricultural Engineering Journal** 24(2): 8-16. (in Thai)
- Sangsawang, S. 2017. Design and development of a dried lotus seed sheller. Master Thesis of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi. (in Thai)

- Siphuengthong, M. and Ploykrajang, A. 2009. Design and development of a betel nut splitter. Bachelor Thesis of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi. (in Thai)
- Srisutto, P., Pimparian, P., Apmaka, T. and Lungkapin, J. 2009. Design and development of a lotus seed sheller. Bachelor Thesis of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi. (in Thai)
- Suchadpong, N. and Muangkaew, P. 2008. Design and fabrication of a betel nut splitter. Bachelor Thesis of Engineering, Rajamangala University of Technology Thanyaburi. (in Thai)
- Suwanro, T. and Noramas, P. 1992. **Lotus cultivation**. 2nd ed. Extension and Training Office of Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)
- Yamfang, M., Boonwan, Ch., Preamjai, N., Sukchana, T. and Kuptasa, M. 2017. Development of the fresh betel nut splitter with a semi-automatic operation for the betel nut processing. **Area Based Development Research Journal** 9(6): 420-429. (in Thai)

ผลของน้ำหมักชีวภาพจากเศษปลาเหลือทิ้งด้วยเชื้อ *Lactobacillus casei* ต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของผักกวางตุ้งฮ่องเต้

Effect of Fermented Bio-Extract from Fish Residues by *Lactobacillus casei* on Growth and Yield of *Brassica campestris* var. *chinensis*

ฉานิกา แซ่แง ชุกกลิ่น^{1*}, เอนก สาวะอินทร์¹ และ สุนัย เคลือหลี²

Chanika Saenge Chooklin^{1*}, Aneak Sawain¹ and Sudanai Krualee²

Received: 20 April 2020, Revised: 11 July 2020, Accepted: 9 October 2020

บทคัดย่อ

งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาประสิทธิภาพของน้ำหมักชีวภาพจากเศษปลาเหลือทิ้งด้วยเชื้อ *Lactobacillus casei* ต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของผักกวางตุ้งฮ่องเต้ ที่ระดับความเข้มข้น 1 : 500 นำไปใช้ความถี่ 3 ครั้งต่อสัปดาห์ โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ในบล็อก (Randomized Complete Block Design; RCBD) ประกอบด้วย 6 ชุดการทดลองๆ ละ 3 ซ้ำ ดังนี้ (1) น้ำหมักชีวภาพสูตรที่ 1 (เศษปลา 3 กิโลกรัม + กากน้ำตาล 250 มิลลิลิตร + น้ำเปล่า 10 ลิตร + สารเร่งซูเปอร์ พด.2 25 กรัม) (2) น้ำหมักชีวภาพสูตรที่ 2 (เศษปลา 3 กิโลกรัม + กากน้ำตาล 250 มิลลิลิตร + น้ำเปล่า 10 ลิตร + เชื้อ *Lactobacillus casei* 25 มิลลิลิตร) (3) น้ำหมักชีวภาพสูตรที่ 3 (เศษปลา 3 กิโลกรัม + กากน้ำตาล 125 มิลลิลิตร + น้ำเปล่า 10 ลิตร + สารเร่งซูเปอร์ พด.2 25 กรัม) (4) น้ำหมักชีวภาพสูตรที่ 4 (เศษปลา 3 กิโลกรัม + กากน้ำตาล 125 มิลลิลิตร + น้ำเปล่า 10 ลิตร + เชื้อ *Lactobacillus casei* 25 มิลลิลิตร) (5) ปุ๋ยเคมีสูตร 46-0-0 และ (6) ชุดควบคุม พบว่าน้ำหมักชีวภาพจากเศษปลาเหลือทิ้งสูตรที่ 2 ให้ค่าเฉลี่ยจำนวนใบ ความสูงของต้น และน้ำหนักสดมากที่สุด (12 ใบต่อต้น, 37.34 เซนติเมตร และ 111.43 กรัม ตามลำดับ) เมื่อทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยสถิติ ANOVA พบว่าน้ำหมักชีวภาพทั้ง 4 สูตร มีผลต่อจำนวนใบ ความสูงของต้น และน้ำหนักสด ของผักกวางตุ้งฮ่องเต้ที่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95 ($p < 0.05$) จากผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมี พบว่าน้ำหมักชีวภาพจากเศษปลาเหลือทิ้งทั้ง 4 สูตร มีค่าความเป็นกรด-ด่าง และธาตุอาหารหลัก ได้แก่ ไนโตรเจน, ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน เหมาะสำหรับการนำไปใช้กับผักกวางตุ้งฮ่องเต้ เพื่อเป็นการลดการใช้สารเคมีและลดต้นทุนในการผลิต

¹ คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยีการประมง มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย อำเภอสิเกา จังหวัดตรัง 92150

¹ Faculty of Science and Fisheries Technology, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Sikao, Trang 92150, Thailand.

² คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย อำเภอทุ่งใหญ่ จังหวัดนครศรีธรรมราช 80240

² Faculty of Agriculture, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Tungyai, Nakonsrithammarat 80240, Thailand.

* ผู้รับผิดชอบประสานงาน ไปรษณีย์อิเล็กทรอนิกส์ (Corresponding author, e-mail): chanika.sae@gmail.com

คำสำคัญ: น้ำหมักชีวภาพ, เศษปลาเหลือทิ้ง, กวางตุ้งฮ่องเต้

ABSTRACT

The aim of this research was to study the efficiency of fermented bio-extract from fish residues by *Lactobacillus casei* on growth and yield of *Brassica campestris* var. *chinensis*. The concentration of fermented bio-extract was 1 : 500 (bio-extract : water, v/v) applied frequency three times per week. Experimental design used Randomized Complete Block Design; RCBD including 6 experiments, with three repetitions per experiment. Experiment comprises of treatments as fermented bio-extract include (1) formula 1 (fish residue 3 kg + molasses 250 ml + water 10 l + Microbial Activator Super LDD 2 25 mL), (2) formula 2 (fish residue 3 kg + molasses 250 ml + water 10 l + *Lactobacillus casei* 25 mL), (3) formula 3 (fish residue 3 kg + molasses 125 ml + water 10 l + Microbial Activator Super LDD 2 25 mL), (4) formula 4 (fish residue 3 kg + molasses 125 ml + water 10 l + *Lactobacillus casei* 25 mL) (5) chemical fertilizer formula 46-0-0 and (6) control The results found that using fermented bio-extract formula 2 gave the highest number of leaves, leave length and fresh weight (12 leaves/plant, 37.34 cm and 111.43 g respectively). The means of variance (ANOVA) analysis showed that the growth of *Brassica campestris* var. *chinensis* was significantly affected by all of 4 fermented bio-extracts at a 95% confidence level ($p < 0.05$). The chemical analysis including pH, electrical conductivity (EC), Nitrogen, Phosphorus and Potassium obtained from all formulas of fermented bio-extract of fish residues by *Lactobacillus casei* were pass standards and suitable for use with *Brassica campestris* var. *chinensis* to reduce using chemicals and production costs.

Key words: bioextract, fish residues, *Brassica campestris* var. *chinensis*

บทนำ

เศษปลาเหลือทิ้งจากกิจกรรมการประมงก่อให้เกิดปัญหาด้านสิ่งแวดล้อม เนื่องจากเมื่อทิ้งไว้นานจะเน่าเสีย ส่งกลิ่นเหม็น และเป็นแหล่งเพาะพันธุ์ของพาหะนำโรคติดต่อต่างๆ เช่น โรคท้องร่วง โรคตาแดง ซึ่งก่อให้เกิดอันตรายต่อสุขภาพ น้ำเสียจากขยะเหล่านี้เมื่อไหลลงสู่แหล่งน้ำจะทำให้เกิดภาวะมลพิษทางน้ำ และทำให้ดินเสื่อมสภาพ (Khaliq *et al.*, 2006) ในขณะเดียวกันเศษปลาเหลือทิ้งเหล่านี้กลับมีคุณค่าทางสารอาหาร ซึ่งสามารถนำมาสกัดเป็นผลิตภัณฑ์มูลค่าสูง เช่น สารสกัด

ชีวภาพ แต่ด้วยการผลิต ผลิตภัณฑ์เหล่านี้มีต้นทุนและการใช้เทคโนโลยีระดับสูง ซึ่งการนำมาทำน้ำหมักชีวภาพจากเศษปลาเหลือทิ้งก็เป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่สามารถนำเศษปลาไปใช้ประโยชน์โดยใช้การลงทุนที่ต่ำและเนื่องจากปลาเป็นสัตว์ที่อุดมไปด้วยกรดอะมิโนชนิดต่างๆ (Ghaly *et al.*, 2013) จึงมีโปรตีนสูงกว่าพืชสีเขียวหรือผลไม้ และถูกย่อยสลายได้อย่างรวดเร็ว จึงเป็นแหล่งไนโตรเจนที่สำคัญ ดังนั้นเมื่อนำปลาผ่านกระบวนการหมัก จะได้น้ำหมักที่มีธาตุอาหารพืชโดยเฉพาะธาตุไนโตรเจนในปริมาณมาก (Sarakhm *et al.*, 2017; Shi *et al.*, 2018)

ซึ่งพืชสามารถดูดไปใช้ได้โดยตรง และน้ำหมักที่ได้จะช่วยกระตุ้นการทำงานของจุลินทรีย์ในดินได้ เช่นเดียวกับการเพิ่มปุ๋ยยูเรียลงไปในดิน ทำให้จุลินทรีย์ในดินเกิดกิจกรรมเพิ่มขึ้น ส่งผลให้ดินมีความอุดมสมบูรณ์มากยิ่งขึ้น (Kamla *et al.*, 2007) นอกจากนี้ น้ำหมักจากเศษปลาเป็นผลิตภัณฑ์ที่นำของเหลือใช้จากครัวเรือนและชุมชนมาผลิตเป็นปุ๋ย จึงสามารถช่วยลดปริมาณของเสียไม่ให้มีผลกระทบต่อสิ่งแวดล้อม และส่งผลให้เกษตรกรลดต้นทุนการผลิต ทดแทนการนำเข้าปุ๋ยปลาจากต่างประเทศ และช่วยให้มีการพัฒนาเทคโนโลยีการผลิตเป็นของตัวเองโดยการนำวัสดุเหลือใช้ในท้องถิ่น เพื่อนำไปใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดทางด้านการเกษตร และยังเป็น การลดปริมาณขยะด้วยวิธีธรรมชาติ (Shi *et al.*, 2018)

น้ำหมักจากปลาประกอบด้วยโปรตีน (กรดอะมิโนชนิดต่างๆ ได้แก่ ไอโซลิวซีน (Isoleucine), ลิวซีน (Leucine), วาลีน (Valine), ไกลซีน (Glycine), เมทไธโอนีน (Methionine) และ ฟีนิลอะลานีน (Phenylalanine) เป็นต้น) (Ghaly *et al.*, 2013) คาร์โบไฮเดรต ไขมัน และเกลือแร่ชนิดต่างๆ ซึ่งเป็นแหล่งสารอาหารที่สำคัญของจุลินทรีย์ (Shi *et al.*, 2018) ดังนั้นการใส่น้ำหมักจากปลาลงในดินจะส่งเสริมให้จุลินทรีย์มีการเจริญเติบโตและเกิดกิจกรรมในดินเพิ่มขึ้น ส่งผลให้เกิดการย่อยสลายเศษซากพืชซากสัตว์ได้เร็วขึ้น และยังมีการปลดปล่อยธาตุอาหารที่มีประโยชน์แก่พืชมากขึ้นด้วย (Kamla *et al.*, 2007; Pascual *et al.*, 2013) น้ำหมักจากปลายังมีปริมาณธาตุอาหารที่จำเป็นต่อพืชหลายชนิด เช่น ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม แคลเซียม แมกนีเซียม กำมะถัน สังกะสี และทองแดง ซึ่งกล่าวโดยรวมจะมีธาตุอาหารพืชเกือบทุกธาตุ (Khanarat and Tangkananurak, 2019; Ghaly *et al.*, 2013) ดังนั้นในกรณีที่นำน้ำหมักจากปลาใส่ให้กับต้นพืชจะ

ทำให้ต้นพืชได้รับธาตุอาหารที่หลากหลาย แต่อาจได้รับในปริมาณที่มีความเข้มข้นต่ำกว่าการได้รับจากปุ๋ยเคมี ดังนั้นในกรณีที่พืชต้องการธาตุอาหารบางธาตุในปริมาณมากเป็นกรณีพิเศษอาจจำเป็นต้องเสริมด้วยปุ๋ยเคมี โดยสามารถเสริมในบางระยะของการเจริญเติบโต จะทำให้พืชสามารถเจริญเติบโตได้อย่างสมบูรณ์

น้ำหมักชีวภาพเป็นของเหลวที่ได้จากการหมักพืชหรือสัตว์กับน้ำตาลหรือกากน้ำตาล จะมีจุลินทรีย์ธรรมชาติที่เกิดขึ้นหลายชนิด รวมทั้งธาตุอาหารพืช ฮอร์โมนพืช สารประกอบที่สกัดได้จากเซลล์พืช เซลล์สัตว์หลายชนิด คาร์โบไฮเดรต โปรตีน กรดอะมิโน และเอนไซม์ (Ghaly *et al.*, 2013; Shi *et al.*, 2018) น้ำหมักชีวภาพยังมีการเติมจุลินทรีย์ในกลุ่ม *Lactobacillus* spp. ซึ่งจัดอยู่ในกลุ่มแบคทีเรียผลิตกรดแลคติก (lactic acid bacteria) ที่สามารถหมักน้ำตาลกลูโคส (glucose) และแล็กโทส (lactose) ให้เกิดกรดแลคติกซึ่งเป็นกรดอินทรีย์ที่สำคัญในการเจริญเติบโตของพืชและสิ่งมีชีวิต โดยเฉพาะปลาจะเป็นแหล่งอาหารสำหรับการเจริญเติบโตและกิจกรรมของจุลินทรีย์ในการหมัก (Shi *et al.*, 2018) ในปัจจุบันน้ำหมักชีวภาพได้รับความสนใจในวงการเกษตรของไทยเป็นอย่างมาก มีการนำน้ำหมักชีวภาพมาใช้ประโยชน์เพื่อส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช โดยการรดหรือฉีดพ่นให้กับพืช ทำให้พืชมีการเจริญเติบโตดีขึ้น และมีอายุการเก็บเกี่ยวยาวนานขึ้น (Khanarat and Tangkananurak, 2019; Nilwong, 2013) น้ำหมักชีวภาพเป็นเทคโนโลยีที่เกษตรกรสามารถผลิตเองได้ และเป็นการนำเอาวัสดุเหลือใช้มาทำให้เกิดประโยชน์ มีคุณค่า ลดต้นทุนการผลิต และยังสามารถนำมาใช้ในเกษตรแบบอินทรีย์ได้อีกด้วย (Moonrat, 2010) ดังนั้นผู้วิจัยจึงเล็งเห็นประโยชน์จากการนำเอาเศษปลาเหลือทิ้งมาผลิตน้ำหมักชีวภาพซึ่งนำมาหมักร่วมกับเชื้อ

Lactobacillus casei ที่มีอยู่ในนมเปรี้ยว ซึ่งจะเป็นตัวที่ช่วยเร่งกระบวนการย่อยสลายให้ดียิ่งขึ้น โดยน้ำหมักชีวภาพที่ผลิตได้นั้นเป็นการลดปริมาณขยะ และลดปัญหาสิ่งแวดล้อม และสนใจศึกษาประสิทธิภาพของน้ำหมักชีวภาพที่มีผลต่อการเจริญเติบโตของผักกวางตุ้งฮ่องเต้ ซึ่งเป็นผักที่เจริญเติบโตง่าย และคนทั่วไปนิยมรับประทานเพื่อสุขภาพเนื่องจากมีวิตามินซีและเส้นใยอาหารสูง และยังมีสารต้านอนุมูลอิสระ (Harbaum *et al.*, 2007; Memon *et al.*, 2009; Pascual *et al.*, 2013)

วิธีดำเนินการวิจัย

1. การเตรียมน้ำหมักชีวภาพจากเศษปลาเหลือทิ้ง

วัตถุดิบที่ใช้ในการผลิตน้ำหมักชีวภาพ คือ เศษปลาเหลือทิ้งจากชาวประมงที่ประกอบด้วยหัว

ไส้ พุง ก้าง รวมทั้งทุกส่วนที่ทิ้งของปลาจากชุมชนชาวประมง สารให้ความหวาน (กากน้ำตาล) และหัวเชื้อ *Lactobacillus casei* โดยหัวเชื้อจุลินทรีย์จากนมเปรี้ยวทางการค้า ทำการเตรียมน้ำหมักชีวภาพจากเศษปลาเหลือทิ้ง โดยการหมักน้ำหมักชีวภาพเศษปลาเหลือทิ้งจำนวน 4 สูตร แต่ละสูตรจะหมักจำนวน 3 ถึง (3 ชั่วโมง) ทำการผลิตน้ำหมักชีวภาพจากเศษปลาตามคำแนะนำของกรมพัฒนาที่ดิน (Land Development Department, 2020) โดยใช้อัตราส่วนของเศษปลาสดต่อกากน้ำตาล อัตราส่วน 1 ต่อ 1 และหัวเชื้อ *Lactobacillus casei* เพื่อช่วยในการย่อยสลาย โดยนำเศษปลามาสับเป็นชิ้นเล็กๆ บรรจุลงในถังหมักน้ำหมักชีวภาพ คลุกเคล้ากับกากน้ำตาลให้เข้ากัน ใช้ระยะเวลาในการหมัก 30 วัน ดังตารางที่ 1

ตารางที่ 1 สูตรน้ำหมักชีวภาพจากเศษปลาเหลือทิ้ง

สูตรน้ำหมักชีวภาพ	เศษปลาเหลือทิ้ง (กิโลกรัม)	กากน้ำตาล (มิลลิลิตร)	น้ำเปล่า (ลิตร)	สารเร่งซูเปอร์พด.2 (กรัม)	หัวเชื้อ <i>Lactobacillus casei</i> (มิลลิลิตร)
สูตรที่ 1	3	250	10	25	-
สูตรที่ 2	3	250	10	-	25
สูตรที่ 3	3	125	10	25	-
สูตรที่ 4	3	125	10	-	25

หมายเหตุ หัวเชื้อ *Lactobacillus casei* ปริมาณ 25 มิลลิลิตรมีจำนวนเชื้อ 2.5 พันล้านตัว

หลังจากทำการหมักจนการหมักสมบูรณ์ ทำการวิเคราะห์ค่าความเป็นกรด-ด่าง (pH) ด้วยเครื่อง pH-meter วัดค่าการนำไฟฟ้า (EC) ด้วยเครื่อง Conductivity-meter และวัดปริมาณธาตุอาหารไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม (N, P และ K) ของน้ำหมักชีวภาพหลังหมักโดยวิธี Micro Kjeldahl, Bray II และ Atomic Absorption ตามลำดับ (Bray and Kurtz, 1945)

2. การทดสอบประสิทธิภาพของน้ำหมักชีวภาพต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของผักกวางตุ้งในแปลงทดลอง

โดยวางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ในบล็อก (RCBD) ประกอบด้วย 5 สิ่งทดลองๆ ละ 3 ซ้ำ

2.1) การเตรียมดิน โดยไถดะ 1 ครั้ง พลิกหน้าดิน และตากดินทิ้งไว้ 7 วัน ยกแปลงขนาดกว้าง 1 เมตร ยาว 5 เมตร ระยะห่างระหว่างแปลง 0.5 เมตร

โดยดินที่ทำการทดลองเป็นดินร่วนปนทราย มีค่าความเป็นกรด-ด่าง 5.5 และมีความอุดมสมบูรณ์ต่ำ

2.2) การปลูก ทำการเพาะเมล็ดผักกวางตุ้งฮ่องเต้ในถาดหลุม เมื่อต้นกล้ามีอายุ 14 วัน ทำการย้ายปลูกลงแปลง ระยะห่างระหว่างหลุม 20 เซนติเมตร ระหว่างแถว 20 เซนติเมตร เว้นหัวแปลงข้างละ 50 เซนติเมตร

2.3) การให้น้ำและการดูแลรักษา ตามอัตราที่แนะนำสำหรับการปลูกผักกวางตุ้งฮ่องเต้ มีดังนี้

1. ใส่ปุ๋ยคอกกรองพื้นทุกแปลงทดลอง โดยคลุกเคล้าให้ทั่วทั้งแปลง

2. ใส่ปุ๋ยเคมีสูตร 15-15-15 ทุกแปลงทดลอง หลังจากย้ายปลูก 15 วัน เพื่อเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน โดยจะใส่เพียงครั้งเดียว

2.4) ทำการทดลองโดยนำน้ำหมักชีวภาพที่ผลิตได้ทั้ง 4 สูตร, ปุ๋ยเคมี สูตร 46-0-0 และชุดควบคุม (น้ำเปล่า) มาทำการรดต้นกล้าของผักกวางตุ้งฮ่องเต้ที่เตรียม สำหรับน้ำหมักชีวภาพจากเศษปลาเหลือทิ้งทั้ง 4 สูตรทำการเจือจางก่อนนำไปรด อัตราส่วน 1 : 500 (น้ำหมักชีวภาพ: น้ำสะอาด) ตามคำแนะนำของกรมพัฒนาที่ดิน (Land Development Department, 2020) ปริมาณ 20 ลิตรต่อแปลงย่อย โดยเริ่มรดตั้งแต่ต้นกล้าอายุได้ 7 วัน ความถี่ 3 ครั้งต่อสัปดาห์ สำหรับการเตรียมปุ๋ยเคมีสูตร 46-0-0 จะทำการละลายน้ำแล้วรดให้ทั่วแปลง

2.5) การบันทึกข้อมูล โดยสุ่มเก็บต้นผักกวางตุ้ง 10 ต้นต่อแปลงย่อย ทำการบันทึกอายุการ

เก็บเกี่ยว โดยเลือกต้นที่มีขนาดใบ และต้น ตามต้องการ จำนวนต้นรอดตาย จำนวนใบ ความสูงจากโคนต้นไปจนถึงปลายใบ และน้ำหนักสด

2.6) การวิเคราะห์ข้อมูล นำข้อมูลไปวิเคราะห์ทางสถิติ ด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป (SAS) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี DMRT (Duncan's Multiple Range Test)

3. การวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

ใช้โปรแกรมสำเร็จรูป R (<https://cran.rproject.org/bin/windows/base/>) SPSS version 3.5.0 ในการวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยวิธีการวิเคราะห์ความแปรปรวนทางเดียว (One-Way ANOVA) พร้อมทั้งคำนวณค่าความถี่ ร้อยละ และค่าเฉลี่ย โดยวิเคราะห์ความสัมพันธ์ ระดับความเชื่อมั่นร้อยละ 95

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

1. คุณสมบัติทางเคมีของน้ำหมักชีวภาพจากเศษปลาเหลือทิ้ง

ผลการวิเคราะห์สมบัติทางเคมีของน้ำหมักชีวภาพจากเศษปลาเหลือทิ้ง ได้แก่ ค่าความเป็นกรด-ด่าง ค่าการนำไฟฟ้า ปริมาณโซเดียม (%) ไนโตรเจนทั้งหมด (%), ฟอสฟอรัสทั้งหมด (%) และโพแทสเซียมทั้งหมด (%), ปริมาณอินทรีย์วัตถุ (%) แสดงดังตารางที่ 2

ตารางที่ 2 คุณสมบัติทางเคมีและปริมาณธาตุอาหารของน้ำหมักชีวภาพ

สูตรน้ำหมัก	pH	EC (ds/m)	Total N (%)	Total P (%)	Total K (%)	OM (%)	Na (%)
สูตร 1	4.62±0.02	11.15±0.02	2.01±0.01	1.15±0.01	1.87±0.02	19.58±0.12	2.14±0.01
สูตร 2	4.58±0.01	10.25±0.01	2.25±0.02	1.74±0.03	2.04±0.14	20.54±0.01	1.95±0.02
สูตร 3	4.61±0.02	10.52±0.02	2.15±0.01	1.65±0.14	1.95±0.24	17.14±0.02	1.87±0.15

ตารางที่ 2 (ต่อ)

สูตรน้ำหมัก	pH	EC (ds/m)	Total N (%)	Total P (%)	Total K (%)	OM (%)	Na (%)
สูตร 4	4.55±0.01	11.54±0.03	2.22±0.25	1.72±0.15	1.88±0.11	18.26±0.03	2.79±0.14
ค่ามาตรฐาน*	4.5-8.5	< 10	>0.50	>0.5	>0.5	>10	<1

* Land Development Department (2020)

การตรวจวิเคราะห์คุณสมบัติต่างๆ ตามมาตรฐานปุ๋ยอินทรีย์ชนิดเหลวของ Land Development Department (2020) ของน้ำหมักชีวภาพทั้ง 4 สูตร พบว่ามีค่าพารามิเตอร์ส่วนใหญ่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน ยกเว้น ค่า EC ที่ ไม่ผ่านเกณฑ์ (ตารางที่ 2) โดยทุกสูตรมีค่า EC สูงเกินกว่าค่ามาตรฐาน ซึ่งอาจเป็นผลมาจากการที่วัตถุดิบเป็นปลาทะเลจึงมีความเค็มสูง สูตรที่มีค่า EC สูงที่สุด คือ สูตรที่ 4 รองลงมา คือ สูตรที่ 1, 3 และ 2 ซึ่งมีค่าเท่ากับ 11.54, 11.15, 10.52, และ 10.25 dS/m ตามลำดับ เมื่อพิจารณาค่าพารามิเตอร์ที่เกี่ยวข้องกับ EC จะเห็นว่าค่า EC แปรผันตรงกับปริมาณ Na ที่ตรวจพบในน้ำหมักชีวภาพ กล่าวคือ ทุกสูตรมีปริมาณ Na สูงเกินมาตรฐาน และสูตรที่ 4 ที่มีค่า EC สูงที่สุด ก็มีปริมาณ Na สูงสุดเช่นกัน นั่นเป็นเพราะค่า EC คือ ค่าความสามารถในการส่งผ่านกระแสไฟฟ้าของน้ำ ซึ่งเกิดจากสารประกอบอนินทรีย์ที่ละลายอยู่ในน้ำ เช่น ไอออนลบของคลอไรด์ ในเตรต ซัลเฟต และฟอสเฟต หรือไอออนบวกของ โซเดียม แมกนีเซียม เหล็ก และอะลูมิเนียม (Metropolitan Waterworks Authority, 2018) ซึ่งสอดคล้องกับการศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของน้ำหมักชีวภาพจากของเหลือทิ้งจากโรงงานปลาป่น ที่ใช้กากน้ำตาลเป็นแหล่งคาร์บอน และใช้หัวเชื้อ *Lactococcus lactis* ในการหมักของ Khanarat and Tangkananurak (2019) ที่พบว่าค่า EC ไม่ผ่านเกณฑ์ (20.49-22.45 dS/m) โดยมีค่าสูงเกินกว่าค่ามาตรฐาน 1.05-1.24 เท่า ซึ่งได้รายงานว่าเป็นผลมาจากการที่วัตถุดิบเป็นปลาทะเล

จึงส่งผลให้น้ำหมักชีวภาพมีความเค็มสูง และค่า EC แปรผันตรงกับปริมาณ Na ที่ตรวจวัดได้ในน้ำหมักชีวภาพ ซึ่งปริมาณ Na ในน้ำหมักชีวภาพที่ได้จากการศึกษา (3.25-3.75 %) มีค่าสูงเกินค่ามาตรฐาน 2.25-2.75 เท่า นอกจากนี้ Aroonrungsikul *et al.* (2007) ได้รายงานว่าการเพิ่มขึ้นของค่า EC ในน้ำหมักชีวภาพเมื่อใช้ระยะเวลาในการหมักนานขึ้น เกิดจากการแตกตัวของประจุไฟฟ้าโดยเฉพาะธาตุ โซเดียม และคลอรีน ของสารประกอบทางชีวภาพ และทางเคมีที่เกิดขึ้นระหว่างกระบวนการหมักที่ละลายอยู่ในน้ำหมักชีวภาพ และสอดคล้องกับการศึกษาของ Moonrat (2010) ที่รายงานว่าน้ำหมักชีวภาพเมื่อหมักนานขึ้นจะมีปริมาณไอออนของเกลือต่างๆ เพิ่มขึ้น และจะส่งผลให้ค่า EC เพิ่มขึ้น นอกจากนี้ Noisopa *et al.* (2010) ได้ศึกษาคุณสมบัติทางเคมีของน้ำหมักชีวภาพจากค่น้ำและถั่วเหลือง พบว่าปริมาณสารประกอบอนินทรีย์ในน้ำหมักชีวภาพ ได้แก่ กรดอินทรีย์ วิตามิน เอนไซม์ ฮอร์โมน และแร่ธาตุ เป็นสาเหตุหนึ่งที่ส่งผลให้น้ำหมักชีวภาพมีค่า EC สูง (13.52-26.60 dS/m) โดยน้ำหมักชีวภาพที่มีสารประกอบอนินทรีย์สูงจะส่งผลให้มีค่า EC สูงไปด้วย ซึ่งจากการศึกษานี้พบว่าปริมาณสารอินทรีย์รวมที่ตรวจวัดได้มีปริมาณสูง (17.14-20.54%) นอกจากนี้ น้ำหมักชีวภาพที่ได้ทุกสูตรมีค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่ผ่านเกณฑ์มาตรฐาน (4.55-4.62) โดยน้ำหมักชีวภาพทั้ง 4 สูตร มีสภาพเป็นกรดเนื่องจากคาร์โบไฮเดรตจากเศษปลาในน้ำหมักชีวภาพจะถูกจุลินทรีย์ย่อย

สลายได้เป็นกรดอินทรีย์หลายชนิด เช่น กรดแอซิก (acetic acid) และกรดแลคติก (lactic acid) ดังนั้นจึงส่งผลให้น้ำหมักชีวภาพมีค่าความเป็นกรด-ด่าง ที่เป็นกรด (Noisopa *et al.*, 2010; Shi *et al.*, 2018; Phibunwatthanawong and Riddech, 2019)

เมื่อพิจารณาธาตุอาหารหลัก ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม (N-P-K) ของน้ำหมักชีวภาพที่ผลิตได้ พบว่าสูตรที่มีการเติมหัวเชื้อ *L. casei* น้ำหมักชีวภาพให้ธาตุอาหาร N-P-K สูงกว่าสูตรที่ไม่เติม และสิ่งที่สังเกตได้อีกประการหนึ่ง คือ สูตรที่เติมหัวเชื้อมีกลิ่นไม่พึงประสงค์ระหว่างการหมักน้อยกว่าสูตรที่ไม่ได้เติมหัวเชื้อ ซึ่ง McDonald *et al.* (1991) กล่าวว่ากรดแลคติกภายใต้สภาพไร้ออกซิเจนทำให้ค่าความเป็นกรด-ด่าง ในพืชหมักลดลง มีผลทำให้จุลินทรีย์กลุ่มที่ไม่ต้องการลดจำนวนลง เนื่องจากไม่สามารถเจริญเติบโตในสภาวะที่มีความเป็นกรดได้ ถ้าปริมาณกรดแลคติกที่จุลินทรีย์ผลิตได้มีมาก แบคทีเรียผลิตกรดแลคติกเองก็จะหยุดการเจริญเติบโตด้วยเช่นกัน ทำให้พืชหมักเข้าสู่สภาวะคงที่ แบคทีเรียหยุดการใช้สารอาหาร ทำให้เหลือปริมาณสารอาหารในพืชหมักมากขึ้น ลดการสูญเสียโปรตีน ในรูปของแอมโมเนียในโตรเจน ($\text{NH}_3\text{-N}$) สำหรับน้ำหมักชีวภาพสูตรที่ 2 พบว่ามีปริมาณธาตุอาหารหลักมากที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหมักชีวภาพสูตรอื่นๆ ซึ่งบ่งชี้ว่าปริมาณของธาตุอาหารหลักที่มีความสำคัญต่อการสังเคราะห์โปรตีน กรดนิวคลีอิก และสังเคราะห์แสงของพืชค่อนข้างสูง สอดคล้องกับรายงานของ Department of Agriculture (2014) พบว่าปริมาณไนโตรเจนทั้งหมด (Total nitrogen) ที่พบ ในน้ำหมักชีวภาพจากปลาอยู่ระหว่าง 0.03-1.66% ค่าฟอสฟอรัสที่เป็นประโยชน์ (available phosphorus) อยู่ระหว่าง 0-0.4% และค่าโพแทสเซียมที่แลกเปลี่ยนได้ (exchangeable potassium) อยู่ระหว่าง 0.05-3.53% และ Landrot *et al.* (2020) ได้

กล่าวถึงผลการวิเคราะห์ธาตุอาหารหลัก ได้แก่ ไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม ในปุ๋ยน้ำหมักชีวภาพแต่ละชนิดจะมีความแตกต่างกันขึ้นกับวัตถุดิบที่นำมาใช้ในการหมัก ส่วนใหญ่พบว่าปริมาณธาตุอาหารหลักน้อยมากไม่เพียงพอต่อความต้องการของพืช (โดยทั่วไปพืชต้องการไนโตรเจน ฟอสฟอรัส และโพแทสเซียม เท่ากับ 1.5, 0.2 และ 1.0% ตามลำดับ) จึงควรมีการใช้ปุ๋ยเคมีร่วมกับปุ๋ยอินทรีย์ชนิดอื่นด้วย เช่นเดียวกับงานวิจัยของ Panuchanyawong and Wongduangsai (2015) ได้เปรียบเทียบปริมาณธาตุไนโตรเจน ฟอสฟอรัส โพแทสเซียม และค่าความเป็นกรด-ด่างที่มีอยู่ในน้ำหมักชีวภาพจากเครื่องในปลานิล น้ำหมักชีวภาพจากสับปะรด และน้ำหมักชีวภาพจุลินทรีย์ และเปรียบเทียบการเจริญเติบโตของต้นผักบุ้ง โดยใช้ น้ำหมักชีวภาพจากเครื่องในปลานิลกับน้ำหมักชีวภาพจากสับปะรด และน้ำหมักชีวภาพจุลินทรีย์ และไม่ใส่น้ำหมักชีวภาพ พบว่าน้ำหมักชีวภาพจากเครื่องในปลานิลและผักบุ้งที่ปลูกโดยใส่น้ำหมักชีวภาพจากเครื่องในปลานิลมีการเจริญเติบโตดีที่สุดโดยมีค่าเฉลี่ยความสูงของต้นผักบุ้งสูงสุด ส่วนปริมาณสารอินทรีย์ (OM) ในน้ำหมักชีวภาพสูตรที่ 2 ที่มีการเติมกากน้ำตาลปริมาณ 250 มิลลิลิตร และหัวเชื้อ *L. casei* พบว่ามีสารอินทรีย์สูงสุด (20.54%) เมื่อเปรียบเทียบกับสูตรอื่นๆ ที่เติมกากน้ำตาลในปริมาณที่น้อยกว่า (150 มิลลิลิตร) และไม่เติมหัวเชื้อ *L. casei* โดยปริมาณสารอินทรีย์ที่สลายตัวแล้วบางส่วน หรือที่ย่อยสลายตัวสมบูรณ์แล้วจะกลายเป็นฮิวมัส ที่มีประโยชน์มากต่อการเจริญเติบโตของพืช ในฐานะเป็นแหล่งธาตุอาหารของพืชซึ่งปริมาณสารอินทรีย์จะมีความสำคัญมากในการเพิ่มศักยภาพการผลิตพืชของดินโดยช่วยปรับปรุงคุณสมบัติของดินทุกด้านทั้งทางกายภาพ เคมีและชีวภาพจึงส่งผลต่อการเจริญเติบโตของพืช มีการศึกษาที่ชี้ให้เห็นว่าปริมาณ

คาร์บอนอินทรีย์ในน้ำหมักชีวภาพจะลดลงในขณะที่ทำการหมัก เนื่องจากในระหว่างการหมักจุลินทรีย์จะใช้คาร์บอนอินทรีย์เป็นแหล่งพลังงานในการย่อยสลายสารอาหารตั้งต้นและได้เป็นสารประกอบอินทรีย์มากขึ้น เช่น กรดอะมิโน ฮอร์โมน และเอนไซม์ (Pascual *et al.*, 2013; Phibunwatthanawong and Riddech, 2019) ดังนั้นการเติมจุลินทรีย์และกากน้ำตาลจะช่วยกระตุ้นกระบวนการย่อยสลายในการหมักน้ำหมักชีวภาพ

2. ผลของน้ำหมักชีวภาพจากเศษปลาเหลือทิ้งต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของผักกวางตุ้งฮ่องเต้

จากการศึกษาผลของน้ำหมักชีวภาพจากเศษปลาเหลือทิ้งต่อการเจริญเติบโตและผลผลิตของผักกวางตุ้งฮ่องเต้ พบว่าอายุการเก็บเกี่ยวผลผลิตของผักกวางตุ้งในแต่ละชุดการทดลองไม่มีความแตกต่างทางสถิติ อยู่ในช่วง 32.64-35.54 วัน ดังแสดงในตารางที่ 3

ตารางที่ 3 ระยะเวลาในการเก็บเกี่ยวและอัตราการรอดของผักกวางตุ้งฮ่องเต้

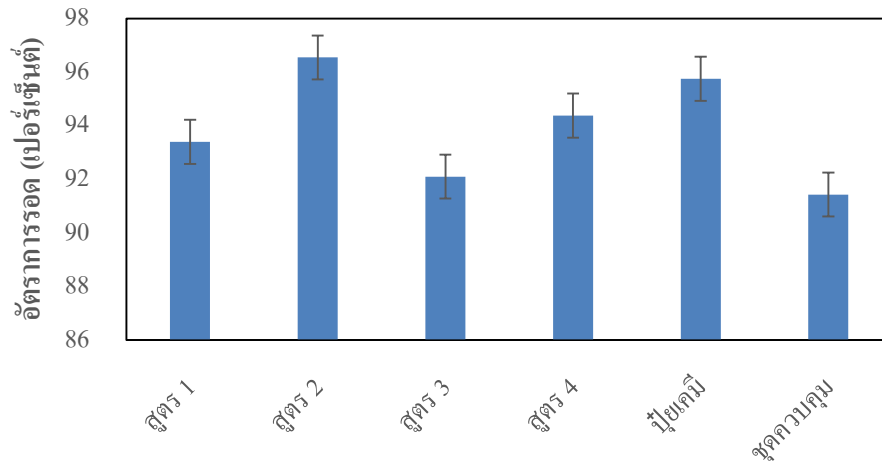
สูตรน้ำหมัก	ระยะเก็บเกี่ยว (วัน) $\pm$ SD	อัตราการรอด (%) $\pm$ SD
สูตร 1	34.51 $\pm$ 3.52	93.40 $\pm$ 0.75
สูตร 2	35.24 $\pm$ 3.25	96.55 $\pm$ 1.04
สูตร 3	34.25 $\pm$ 4.26	92.10 $\pm$ 1.69
สูตร 4	33.42 $\pm$ 4.14	94.38 $\pm$ 0.80
ปุ๋ยเคมี	32.64 $\pm$ 4.52	95.75 $\pm$ 1.54
ชุดควบคุม	35.54 $\pm$ 4.04	91.43 $\pm$ 1.02
F-test	ns	ns
C.V. (%)	12.56	5.52

ns = means in the same column are not statistical significantly different

หมายเหตุ ชุดควบคุม คือ การใช้ น้ำเปล่า ในการรด

สำหรับช่วงของการเก็บเกี่ยวที่ปกติของผักกวางตุ้งซึ่งเป็นผักที่มีอายุสั้น อายุการเก็บเกี่ยวประมาณ 30-35 วัน (Moonrat, 2010) ทั้งนี้ในการเก็บเกี่ยวพืชผักสวนครัวควรทำเมื่ออายุแก่พอเหมาะสมอยู่กับชนิดของพืช เพื่อให้ได้ผลผลิตที่มีคุณค่าทางอาหาร รสชาติ สี สัน ความสุกดีที่สุด เมื่อถึงผู้บริโภค

สำหรับผักกวางตุ้งสิ่งที่ใช้พิจารณาช่วงที่เหมาะสมเพื่อเก็บเกี่ยวผลผลิต คือ พิจารณาขนาดของใบหรือต้นให้ได้ขนาดตามที่ต้องการ ทุกสิ่งการทดลองมีการรอดตายสูงกว่า 90% และไม่มีความแตกต่างกันสถิติ (ภาพที่ 1)



ภาพที่ 1 อัตราการรอดของผักกวางตุ้งฮ่องเต้ที่รดด้วยน้ำหมักชีวภาพสูตรต่างๆ

สำหรับผลของการเจริญเติบโตของผักกวางตุ้งในการใช้น้ำหมักชีวภาพสูตรต่างๆ ในการทดลองสำหรับจำนวนใบหลังการเก็บเกี่ยว พบว่าการใช้น้ำหมักชีวภาพจากเศษปลาเหลือทิ้งสูตรที่ 2 และสูตรที่ 4 มีจำนวนใบมากที่สุด มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 12.00 ใบต่อต้น รองลงมา คือ สูตรที่ 3 และ สูตรปุ๋ยเคมี มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 11.00 ใบต่อต้น และชุดควบคุมมีจำนวนใบน้อยที่สุด (8.33 ใบต่อต้น) ความสูงของผักกวางตุ้งหลังการเก็บเกี่ยวพบว่าการใช้น้ำหมักชีวภาพจากเศษปลาเหลือทิ้งสูตรที่ 2 ให้ความสูงมาก

ที่สุด มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 37.34 เซนติเมตรต่อต้น ซึ่งไม่มีความแตกต่างทางสถิติกับการใช้ปุ๋ยเคมี (46-0-0) (37.31 เซนติเมตรต่อต้น) และชุดควบคุมมีความสูงเฉลี่ยน้อยที่สุดเท่ากับ 32.95 เซนติเมตรต่อต้น และน้ำหนักสดหลังการเก็บเกี่ยวของผักกวางตุ้ง พบว่าการใช้น้ำหมักชีวภาพจากเศษปลาเหลือทิ้งสูตรที่ 2 มีน้ำหนักสดสูงที่สุด มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 111.43 กรัม ซึ่งไม่มีความแตกต่างทางสถิติกับการใช้ปุ๋ยเคมี (46-0-0) (110.69 กรัม) และชุดควบคุมให้น้ำหนักสดน้อยที่สุด มีค่าเฉลี่ยเท่ากับ 93.88 กรัม ดังแสดงในตารางที่ 4

ตารางที่ 4 จำนวนใบ ความสูงของลำต้น น้ำหนักสดของผักกวางตุ้งฮ่องเต้

สูตรน้ำหมัก	จำนวนใบ (ใบต่อต้น) ± SD	ความสูงของลำต้น (เซนติเมตร) ± SD	น้ำหนักสด (กรัม) ± SD
สูตร 1	10.33 ± 1.53 ^b	35.01 ± 0.82 ^c	94.90 ± 1.53 ^c
สูตร 2	12.00 ± 1.00 ^a	37.34 ± 1.11 ^a	111.43 ± 0.89 ^a
สูตร 3	11.00 ± 1.00 ^a	35.11 ± 0.21 ^c	99.36 ± 0.95 ^b
สูตร 4	12.00 ± 1.00 ^a	36.24 ± 1.73 ^b	104.43 ± 3.72 ^b
ปุ๋ยเคมี	11.00 ± 1.00 ^a	37.31 ± 1.06 ^a	115.61 ± 2.99 ^a
ชุดควบคุม	8.33 ± 0.57 ^c	32.95 ± 0.34 ^d	93.88 ± 1.59 ^c
F-test	*	*	*
C.V. (%)	11.75	8.75	25.48

* Means followed by the same letter are not significantly different by Duncan's Multiple Range Test at $p < 0.05$

หมายเหตุ ชุดควบคุม คือ การใช้ น้ำเปล่า ในการรด

จากการศึกษาของ Suwankeree (2003) ที่ได้ทดสอบประสิทธิภาพน้ำหมักชีวภาพสูตรต่างๆ ต่อการเจริญเติบโตของผักกาดกวางตุ้ง พบว่าการใช้น้ำหมักชีวภาพสูตรน้ำสกัดค่น้ำให้น้ำหนักสดผักกาดกวางตุ้งสูงสุดเท่ากับ 2,152 กิโลกรัมต่อไร่ รองลงมา คือ น้ำหมักชีวภาพสูตรหอยเชอรี่ 1,920 กิโลกรัมต่อไร่ และปุ๋ยเคมี (46-0-0) (1,872 กิโลกรัมต่อไร่) การทดลองใช้น้ำหมักชีวภาพกับพืชได้ผลแตกต่างกันไปขึ้นอยู่กับชนิดของน้ำหมักชีวภาพ ความเข้มข้นของน้ำหมักชีวภาพ ความถี่ที่ให้ และชนิดของพืชทดลอง (Noisopa *et al.*, 2010; Shi *et al.*, 2018; Phibunwatthanawong and Riddech, 2019) จากการศึกษาครั้งนี้ใช้น้ำหมักชีวภาพจากเศษปลาเหลือทิ้งที่มีสูตรแตกต่างกัน (ตารางที่ 1 และ 2) โดยความเข้มข้นของน้ำหมักชีวภาพจากเศษปลาเหลือทิ้งต่อน้ำ ในอัตราส่วน 1 : 500 และความถี่ในการใช้ 3 ครั้งต่อสัปดาห์ ส่งเสริมให้ผักกวางตุ้งเจริญเติบโตและให้ผลผลิตเทียบเท่าหรือมากกว่าการใช้ปุ๋ยเคมี (ตารางที่ 3 และ 4) ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Thawarotit *et al.* (2012) ที่พบว่าการใช้น้ำหมักชีวภาพจากพืชต่อน้ำในอัตราส่วน 1 : 500 ความถี่ 3 วันต่อครั้ง ทำให้ผลผลิตของผักกวางตุ้งดีที่สุด เช่นเดียวกับการศึกษาของ Moonrat (2010) ที่พบว่าผักกวางตุ้งฮ่องเต้ที่ได้รับความเข้มข้นของน้ำหมักชีวภาพเศษปลาที่ระดับ 1:500 มีจำนวนใบมากที่สุดและมีน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งของลำต้นผักกวางตุ้งฮ่องเต้สูงสุด

ในขณะที่ Pruksa (2007) พบว่าการใช้น้ำหมักชีวภาพจากปลาและหอยเชอรี่ต่อน้ำ ในอัตราส่วน 1 : 200 ใช้ความถี่ 7 วันต่อครั้ง จะให้ผลผลิตในนาอินทรีย์ให้ผลดีที่สุด ทั้งนี้เนื่องจากน้ำหมักชีวภาพประกอบด้วยแร่ธาตุอาหารหลักและรองที่เป็นประโยชน์ได้แก่ โปรตีน คาร์โบไฮเดรต และไขมัน ที่เป็นองค์ประกอบของสารอินทรีย์แต่ละชนิด

เช่น ผัก ผลไม้ เนื้อสัตว์ จะประกอบด้วยอัตราส่วนที่แตกต่างกัน เมื่อนำไปใช้ในรูปแบบของสารพ่นให้กับพืชลักษณะเดียวกับการให้ปุ๋ยทางใบกับพืช ซึ่งองค์ประกอบของน้ำหมักชีวภาพจากพืชและสัตว์แต่ละชนิดมีความแตกต่างกันต่อความต้องการของพืชแต่ละชนิด ในการนำไปใช้เพื่อการเติบโตของพืชแต่ละชนิด (Noisopa *et al.*, 2010) เช่นเดียวกับการศึกษาของ Noisopa *et al.* (2010) ที่พบว่าน้ำหมักชีวภาพจากถั่วเหลืองที่ระดับ 1:100 จะให้ผลผลิตของกะน้าสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับน้ำหมักชีวภาพที่ระดับอื่นๆ เมื่อทำการปลูก 35 วัน โดยมีความสูงของใบเฉลี่ย 20.02 เซนติเมตร น้ำหนักสดรวม 32.73 กรัม

จากงานวิจัยดังกล่าวจะเห็นได้ว่าน้ำหมักชีวภาพจากเศษปลาเหลือทิ้งสูตรที่ 2 (เศษปลา 3 กิโลกรัม + กากน้ำตาล 250 มิลลิลิตร + น้ำเปล่า 10 ลิตร + เชื้อ *Lactobacillus casei* 25 มิลลิลิตร), สูตรที่ 4 (เศษปลา 3 กิโลกรัม + กากน้ำตาล 125 มิลลิลิตร + น้ำเปล่า 10 ลิตร + เชื้อ *Lactobacillus casei* 25 มิลลิลิตร) และสูตรที่ 6 (ชุดควบคุม) มีแนวโน้มส่งเสริมการเจริญเติบโตและให้ผลผลิตของผักกวางตุ้งได้ดีไม่แตกต่างกับการใช้ปุ๋ยเคมี ทั้งนี้เนื่องจากสูตรดังกล่าวมีเชื้อแบคทีเรีย *Lactobacillus casei* เป็นส่วนประกอบ (ตารางที่ 1) ซึ่งเชื้อแบคทีเรียดังกล่าวมีคุณสมบัติในการย่อยสลายธาตุฟอสฟอรัสได้เป็นอย่างดี และเชื้อแบคทีเรียดังกล่าวสามารถควบคุมเชื้อราโรคพืชในดินได้อีกด้วย (Dauda *et al.*, 2008; Shi *et al.*, 2018) นอกจากนี้ น้ำหมักชีวภาพเกิดจากการย่อยสลายสารอินทรีย์ที่มีธาตุอาหารของพืชต่างๆ ที่พืชสามารถนำไปใช้ได้ทันที รวมทั้งกรดอะมิโนและกรดอินทรีย์ซึ่งจะเปลี่ยนไปเป็นโปรตีนและน้ำตาลให้พืชนำไปใช้โดยไม่ต้องสูญเสียพลังงานในการสร้างอาหาร พืชจึงนำพลังงานที่เหลือไปใช้ในการเจริญเติบโตด้านอื่นๆ ส่วนเมื่อดินจะถูกสารในน้ำหมักชีวภาพดึงมาหุ้มรอบตัวจึงเปลี่ยนเมื่อดินที่แข็งและอัดตัวกันแน่นเป็น

เมื่อดินใหญ่ขึ้น ทำให้ดินร่วนซุย สามารถระบายน้ำได้ และถ่ายเทอากาศได้ดี (Landrot *et al.*, 2020) มีการศึกษาที่ชี้ให้เห็นว่าการเติมจุลินทรีย์และกากน้ำตาลในน้ำหมักชีวภาพจะช่วยกระตุ้นกระบวนการย่อยสลายในการหมัก โดยในระหว่างการหมักจุลินทรีย์จะใช้คาร์บอนอินทรีย์เป็นแหล่งพลังงานในการย่อยสลายสารอาหารตั้งต้นและได้เป็นสารประกอบอินทรีย์ เช่น กรดอะมิโน ฮอร์โมน และเอนไซม์ ซึ่งปริมาณคาร์บอนอินทรีย์จะลดลงเมื่อกระบวนการหมักเสร็จสมบูรณ์ (Pascual *et al.*, 2013; Phibunwatthanawong and Riddech, 2019) จากการทดลองครั้งนี้พบว่าการใช้ น้ำหมักชีวภาพจากเศษปลาเหลือทิ้งสูตรที่ 2 ส่งผลให้ผักกวางตุ้งเจริญเติบโตและให้ผลผลิตสูงสุด และไม่แตกต่างจากการใช้ปุ๋ยเคมี (ตารางที่ 3 และ 4) แสดงให้เห็นว่าการใช้เศษปลาเหลือทิ้งเป็นวัสดุในการหมักซึ่งเหมาะสมสำหรับเป็นแหล่งพลังงานช่วยให้จุลินทรีย์เจริญเติบโตได้ดี (Ghaly *et al.*, 2013; Shi *et al.*, 2018) ดังนั้นการนำเศษปลาเหลือทิ้งซึ่งเป็นวัสดุเหลือใช้มาใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุดโดยนำมาเป็นวัตถุดิบในการผลิตน้ำหมักชีวภาพเพื่อส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช ลดการใช้สารเคมี และช่วยรักษาสภาพแวดล้อมได้ (Shi *et al.*, 2018)

สรุป

น้ำหมักชีวภาพจากเศษปลาเหลือทิ้งสูตรที่ 2 (เศษปลา 3 กิโลกรัม + กากน้ำตาล 250 มิลลิลิตร + น้ำเปล่า 10 ลิตร + เชื้อ *Lactobacillus casei*, 25 มิลลิลิตร) สามารถผลิตได้ง่าย และใช้น้ำหมักชีวภาพจากเศษปลาเหลือทิ้งต่อน้ำในอัตราส่วน 1 : 500 รดผัก 3 ครั้งต่อสัปดาห์ พบว่า จำนวนใบ ความสูงของต้น และน้ำหนักสดมากที่สุด (12 ใบต่อต้น, 37.34 เซนติเมตร และ 111.43 กรัม ตามลำดับ) ซึ่งน้ำหมักชีวภาพทั้ง 4 สูตร มีผลต่อจำนวนใบ ความสูงของต้น และน้ำหนักสด ของผักกวางตุ้งฮ่องเต้ที่แตกต่างกัน

อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ น้ำหมักชีวภาพที่ผลิตได้ช่วยส่งเสริมการเจริญเติบโตและผลผลิตของผักกวางตุ้งได้ โดยในการผลิตจะมีต้นทุนในส่วนของการกากน้ำตาลโดยใช้ในปริมาณน้อยเมื่อเทียบกับผลประโยชน์ที่จะได้รับทั้งด้านการเจริญเติบโตของพืช ผลกระทบต่อสุขภาพที่เกษตรกรจะได้รับหากใช้สารทางเคมี จึงเป็นอีกทางเลือกหนึ่งที่จะนำไปใช้ในการปฏิบัติทางการเกษตรที่ดี (Good Agricultural Practices: GAP) ได้อาหารที่ปลอดภัยในการบริโภค ช่วยเพิ่มความอุดมสมบูรณ์ของดิน สามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระบบการพัฒนาเกษตรที่ยั่งยืน รวมทั้งเป็นเป็นประโยชน์แก่หน่วยงานราชการที่เกี่ยวข้องกับการส่งเสริมทางการเกษตรแก่เกษตรกรต่อไป

กิตติกรรมประกาศ

ขอขอบพระคุณ มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตตรัง ที่ให้การสนับสนุนทุนในการวิจัย ทั้งอุปกรณ์ เครื่องมือ และสถานที่ในการดำเนินการวิจัย

เอกสารอ้างอิง

- Aroonrungsikul, C., Rattanakreetakul, C. and Korpraditskul, R. 2007. Water quality Bio-fermentation and composition, pp. 481-488. *In The academic conference of Kasetsart University The 42nd (Division of Agricultural Extension and Communication Arts Branch).* Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)
- Bray, R.H. and Kurtz, L.T. 1945. Determination of total, organic and available forms of phosphorus in soils. *Soil Science* 59: 39-45.

- Dauda, S.N., Ajayi, F.A. and Ndor, E. 2008. Growth and yield of water melon (*Citrullus lanatus*) as affected by poultry manure application. **Journal of agriculture and social science** 4: 121-124.
- Department of Agriculture. 2014. **Biological extract**. Available Source: <http://www.organicthailand.com/article-th-5430>, April 15, 2020. (in Thai)
- 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.
- Harbaum, B., Hubermann, E.M., Wolff, C., Herges, R., Zhu, Z. and Schwarz, K. 2007. Identification of Flavonoids and Hydroxycinnamic Acids in Pak Choi Varieties (*Brassica campestris* L. ssp. *chinensis* var. *communis*) by HPLC-ESI-MSⁿ and NMR and Their Quantification by HPLC-DAD. **Journal of Agricultural and Food Chemistry** 55: 8251-8260.
- Kamla, N., Limpinuntana, V., Ruaysoongnern, S. and Bell, R.W. 2007. Role of microorganisms, soluble N and C compounds in fermented bio-extract on microbial biomass C, N and cowpea growth. **Khon Kaen Agricultural Journal** 35(4): 477-486. (in Thai)
- Khanarat, A. and Tangkananurak, K. 2019. The effect of bio-fermented water from fish meal industrial waste on growth and yield of lettuce and marigold. **Thai Journal of Science and Technology** 1: 43-53. (in Thai)
- Khaliq, A., Abbasi, M.K. and Hussain, T. 2006. Effects of integrated use of organic and inorganic nutrient sources with effective microorganisms (EM) on seed cotton yield in Pakistan. **Bioresource Technology** 97: 967-972.
- Land Development Department. 2020. **Use of biotechnology products, department of land development for promotion using organic materials to reduce the use of chemicals. Ministry of Agriculture and Cooperatives**. Available Source: https://www.ddd.go.th/e-Book/Book_1.html.pdf, August 31, 2020. (in Thai)
- Landrot, S., Armartmontree, C., Khongkaew, C. and Jutamane, K. 2020. Leonardite-based Organic Fertilizer Production Complying with the Organic Fertilizer Standard of the Department of Agriculture. **King Mongkut's Agricultural Journal** 38 (1): 93-103. (in Thai)
- McDonald, P., Henderson, A.R. and Heron, S.J.E. 1991. **The Biochemistry of Silage**. 2nd Ed. Chalcombe Publications, Marlow, England.
- Memon, S.A., Hou, X., Wang, L. and Li, Y. 2009. Promotive effect of 5-aminolevulinic acid on chlorophyll, antioxidative enzymes and photosynthesis of Pakchoi (*Brassica campestris* ssp. *chinensis* var. *communis* Tsen et Lee). **Acta Physiol Plant** 31: 51-57.
- Metropolitan Waterworks Authority. 2018. **electricity conductivity**. Available Source: https://www.mwa.co.th/ewt_news.php?nid=13321, April 20, 2020.

- Moonrat, W. 2010. The efficiency of biofertilizer from fish waste using yeast waste water instead of molasses. sugar on the growth of spinach Emperor Deer Kung vegetables and Chinese vegetable chevrons. Master Thesis of Plant Science, Faculty of Science and Technology, Thammasat University. (in Thai)
- Nilwong, W. 2013. **Research Report on The quality of earthworm fertilizer and agricultural utilization.** Office of Research and Promotion Academic agriculture, Maejo University. (in Thai)
- Noisopa, C., Prapagdee, B., Navanugraha, C. and Hutacharoen, R. 2010. Effects of bio-extracts on the growth of chinese kale. **Kasetsart Journal (Natural Science)** 44: 808-815. (in Thai)
- Panuchanyawong, K. and Wongduangsai, N. 2015. **Research Report on Biofertilizer from Nile Tilapia: Effect of Global Warming Environmental Ecology and Health.** Thai Environmental Institute. (in Thai)
- Pascual, P.R.L., Jarwar, A.D. and Nitural, P.S. 2013. Fertilizer, fermented activators, and EM utilization in pechay (*Brassica Pekinensis* L.) production. **Pakistan journal of agriculture, agricultural engineering and veterinary sciences** 29(1): 56-69.
- Phibunwatthanawong, T. and Riddech, N. 2019. Liquid organic fertilizer production for growing vegetables under hydroponic condition. **International Journal of Recycling of Organic Waste in Agriculture** 8: 369-380.
- Pruksa, P. 2007. **Liquid fertilizer and bio-extracted water.** Neon Book Media, Bangkok. (in Thai)
- Sarakham, T., Anoree, S., Sriparang, P. and Nabhadalung, N. 2017. Utilization of fermented bioextract to accelerate growth of cassava cutting. **International Journal of Agricultural Technology** 13(7.3): 2409-2414.
- 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.
- Suwankeree, S., Pongmanee, J., Potajarean, J. and Rodkaw, S. 2003. **Research Report on Effect of bio extraction water on the production of Cantonese Turnip.** Research Center for Agricultural Productivity, Faculty of Agriculture, Chiang Mai University. (in Thai)
- Thawarorit, W., Phangsuban, S., Thongchai, A. and Rakkhaphan, L. 2012. Microbial types from bio-fermented water and the frequency of using bio-fermented water with Cantonese vegetables. **Science and Technology** 16(1): 90-98.

ความงอก ความแข็งแรง และการเจริญเติบโตของต้นกล้าถั่วเหลือง หลังการเคลือบและพอกเมล็ดพันธุ์ร่วมกับ *Bacillus subtilis* Germination, Vigor and Seedling Growth of Soybean after Seed Coating and Pelleting with *Bacillus subtilis*

จักรพงษ์ กางโสภา* เพชรรัตน์ จีเพชร และ สุรีมาศ จันทะอินทร์

Jakkrapong Kangsopa*, Phetcarat Jeepheth and Sureemard Chantain

Received: 16 May 2020, Revised: 8 October 2020, Accepted: 4 November 2020

บทคัดย่อ

ถั่วเหลืองเป็นพืชที่มีความสำคัญทางด้านการเศรษฐกิจของประเทศไทย แต่เมล็ดพันธุ์สำหรับใช้เพาะปลูกยังคงไม่ได้คุณภาพและมาตรฐาน ทำให้ต้นกล้าหลังการเพาะปลูกงอกไม่สม่ำเสมอและอ่อนแอ จึงทำให้ง่ายต่อการเข้าทำลายของโรคและแมลง งานทดลองนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาผลของการเคลือบและการพอกเมล็ดพันธุ์ร่วมกับ *B. subtilis* ต่อความงอก ความแข็งแรง และการเจริญเติบโตของต้นกล้าถั่วเหลือง ดำเนินการทดลองที่ห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีเมล็ดพันธุ์ สาขาวิชาพืชไร่ คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ วางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized Design (CRD) โดยมีผลการทดลองดังนี้ การเคลือบเมล็ดด้วย *B. subtilis* อัตรา 0.5 มิลลิลิตร มีการงอกรากสูงที่สุดคือ 99% อีกทั้งมีความเร็วในการงอกรากและความเร็วในการงอกสูงมากกว่าและแตกต่างกันในทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับเมล็ดเปล่า ส่วนการเคลือบเมล็ดด้วย *B. subtilis* ทุกวิธีการ และการเคลือบเมล็ดเพียงอย่างเดียวมีความงอกดีที่สุด อีกทั้งการเคลือบเมล็ดด้วย *B. subtilis* อัตรา 0.5 มิลลิลิตร ยังคงมีความยาวต้น ความยาวราก และผลรวมต้นกล้าดีมากว่าและแตกต่างในทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับเมล็ดเปล่าที่ตรวจสอบในสภาพห้องปฏิบัติการ ส่วนการตรวจสอบในสภาพเรือนทดลองพบว่า การเคลือบเมล็ดเพียงอย่างเดียว การพอกเมล็ดเพียงอย่างเดียว และการเคลือบเมล็ดร่วมกับ *B. subtilis* ทุกอัตรา มีความงอกดีที่สุด ดังนั้นการเคลือบเมล็ดด้วย *B. subtilis* อัตรา 0.5 มิลลิลิตร เป็นวิธีการและอัตราแนะนำที่เหมาะสมสำหรับนำไปใช้ยกระดับคุณภาพเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองมากที่สุด

คำสำคัญ: คุณภาพเมล็ดพันธุ์, การยกระดับคุณภาพเมล็ดพันธุ์, จุลินทรีย์ส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช

ABSTRACT

Soybeans are an important economic crop in Thailand. However, the soybean seeds used for growing soybeans lack quality and standards. This results in inconsistent and weak seedlings after cultivation, which can be easily destroyed by diseases and pesticides. This current experiment aims to study the effect of seed coating and seed pelleting using *Bacillus subtilis* on the germination, vigor, and growth of soybean seedlings. The experiment was conducted at the Seed Technology Laboratory, Agronomy Major, Faculty of Agricultural Production, Maejo University. An experimental design was done in a completely randomized design (CRD). The results of the experiment were as follows. Seeds coated with 0.5 milliliters of *B. subtilis* had the highest rate of radicle emergence at 99 %. Moreover, the speed of radicle emergence and speed of germination were statistically significantly higher compared to untreated seeds. On the other hand, all seeds coated with the *B. subtilis* and normal coated treatments gave the best germination rate. In addition, seeds coated with 0.5 milliliters of *B. subtilis* still had higher shoot length, root length, and total seedling quality when compared with untreated seeds under laboratory conditions. Under greenhouse conditions, compared to seed coating and pelleting, seed coating in combination with *B. subtilis* gave the best germination. Therefore, seed coating with 0.5 milliliters of *B. subtilis* is the most suitable method and recommended rate for soybean seed enhancement.

Key words: seed quality, seed enhancement, microorganisms

บทนำ

ถั่วเหลืองเป็นพืชที่มีความสำคัญทางด้านการเศรษฐกิจของประเทศไทย เพราะมีความต้องการใช้ในประเทศสูง และนำมาใช้ประโยชน์ได้กว้างขวาง ทั้งการบริโภค และการแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่างๆ หลายรูปแบบ เช่น น้านม ถั่วเหลือง เต้าหู้ เต้าเจี้ยว เป็นต้น อย่างไรก็ตาม ถั่วเหลืองยังเป็นพืชที่ผลิตได้ไม่เพียงพอต่อการใช้ภายในประเทศ ซึ่งจากรายงานของ Department of Internal Trade (2020) พบว่า มีการนำเข้าเมล็ดถั่วเหลืองช่วงเดือนมกราคม-พฤษภาคม 2553 สูงขึ้นร้อยละ 12.37 โดยนำเข้าจากบราซิล 56% สหรัฐฯ 42% และแคนาดา 1% ส่วนการผลิตภายในประเทศมีการคาดการณ์ว่าผลผลิตถั่วเหลืองฤดูฝนจะออกสู่ตลาดประมาณ 18,889 ตันหรือคิดเป็นร้อยละ 49 ของปริมาณผลผลิตปี 2563/2564

หนึ่งในถั่วเหลืองที่มีปริมาณการเพาะปลูกมากคือ ถั่วเหลืองพันธุ์ สจ. 5 ซึ่งให้ผลผลิตเฉลี่ย 300-320 กก./ไร่ สามารถทนทานต่อโรคราสนิมและโรคแอนแทรกซ์ โนส แต่ยังคงอยู่ในระดับที่ไม่น่าพอใจ (Keereetawee et al. 1987) อีกทั้งปัญหาด้านการเก็บเกี่ยวที่ล่าช้า ทำให้ผลผลิตและคุณภาพของถั่วเหลืองลดลง เนื่องจากมีโอกาสได้รับความเสียหายจากสภาพแวดล้อมที่ไม่เหมาะสม โดยเฉพาะฝน ความชื้นอากาศ และอุณหภูมิสูง เป็นต้น จึงอาจส่งผลกระทบต่อการเสื่อมคุณภาพของเมล็ดพันธุ์ไว้ขึ้น เมื่อนำไปใช้เพาะปลูกในฤดูกาลต่อไปจะทำให้ต้นกล้างอกไม่สม่ำเสมอ และอ่อนแอ และง่ายต่อการเข้าทำลายของโรคและแมลงที่สำคัญ เช่น โรคราสนิม โรคใบจุดนูน และโรคน้ำค้ำ เป็นต้น (Pa-oblek, 2015)

ดังนั้นเกษตรกรผู้ปลูกถั่วเหลืองส่วนใหญ่ใช้สารเคมีเพื่อควบคุมการเกิดโรคกันอย่างมากมาย เนื่องจากสามารถควบคุมโรคได้อย่างรวดเร็วและใช้งานได้ง่าย แต่การใช้สารเคมีควบคุมโรคเป็นระยะเวลานานและมากเกินไปจนอาจส่งผลกระทบต่อสภาพแวดล้อมและสุขภาพของผู้ใช้ อีกทั้งปัญหาการเสื่อมคุณภาพเมล็ดพันธุ์อย่างรวดเร็วจากการปฏิบัติหลังการเก็บเกี่ยวที่ไม่เหมาะสม ทำให้เมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองสูญเสียความงอกและความแข็งแรงก่อนถึงเวลาการเพาะปลูกได้ ดังนั้นแนวทางหนึ่งในการควบคุมคุณภาพเมล็ดพันธุ์ให้มีประสิทธิภาพสูงสุดก่อนการเพาะปลูกคือ การยกระดับคุณภาพเมล็ดพันธุ์ร่วมกับจุลินทรีย์ที่ส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช (plant growth-promoting microorganisms) เพื่อลดหรือทดแทนการใช้สารเคมีที่มากเกินไปในระบบการปลูกพืช อีกทั้งลดต้นทุนการผลิตและเป็นมิตรกับสิ่งแวดล้อม (Kesan, 2007) จากประเด็นปัญหาดังกล่าวทำให้การเตรียมความพร้อมเมล็ดพันธุ์ผ่านการแก้ปัญหาทางเทคโนโลยีเมล็ดพันธุ์ถูกนำมาปฏิบัติมากขึ้นในปัจจุบัน โดยเฉพาะการประยุกต์ใช้เทคโนโลยีการเคลือบเมล็ดและพอกเมล็ดพันธุ์ร่วมกับจุลินทรีย์ที่ส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช ซึ่งการเคลือบเมล็ดเป็นวิธีการนำพาสารสะสมที่มีลักษณะบางเบาจำพวกพอลิเมอร์ (Thin polymer) มาฉาบยึดเกาะให้สม่ำเสมอไปรอบๆ ผิวของเมล็ดพันธุ์ (Siri, 2015; Pedrini *et al.*, 2017; Kangsopa, 2019)

ส่วนการพอกเมล็ดพันธุ์เป็นการห่อหุ้มเมล็ดด้วยวัสดุพอกชนิดต่าง ๆ ทำให้เมล็ดที่ถูกพอกมีขนาดรูปร่างและน้ำหนักของเมล็ดเปลี่ยนแปลงไปจากเดิมและมีวัสดุประสาน หรือสารเชื่อมยึด ทำหน้าที่หลักช่วยให้วัสดุพอกและเมล็ดพันธุ์ยึดเกาะกันอย่างแน่นหนาโดยสารพอกไม่แตก หรือหลุดร่วงออกจากกัน (Taylor *et al.*, 1998) ดังนั้นสารเคลือบเมล็ดและสาร

พอกเมล็ดพันธุ์จึงเป็นสื่อกลางสำคัญในการนำพาสารจุลินทรีย์ที่ต้องการให้ติดไปกับเมล็ดพันธุ์ได้ ทำให้การเตรียมความพร้อมเมล็ดพันธุ์ด้วยการเคลือบและพอกเมล็ดร่วมกับจุลินทรีย์ส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชก่อนนำไปใช้เพาะปลูก จึงเป็นวิธีที่สามารถใช้เมล็ดพันธุ์ให้เกิดประสิทธิภาพสูงที่สุด (Siri, 2015) นอกจากนี้ การเลือกใช้ Carboxymethyl cellulose (CMC) ที่ระดับความเข้มข้นต่ำจะเหมาะสมต่อการเป็นสารเคลือบ และเมื่อใช้ที่ระดับความเข้มข้นสูง CMC จะเหมาะนำไปใช้เป็นวัสดุประสานสำหรับพอกร่วมกับเมล็ดพันธุ์ โดย CMC เป็นอนุพันธ์เซลลูโลสที่สกัดได้จากพืช มีโครงสร้างเป็นร่างแห จึงง่ายต่อการขึ้นรูปก้อนพอก และก้อนพอกมีการยึดเกาะกันอย่างแน่นหนา (Siri, 2015) อีกทั้งจาก CMC เป็นสารสกัดที่ได้จากพืชจึงถูกนำมาใช้เพื่อเป็นตัวกลางนำพาจุลินทรีย์ให้ติดไปกับเมล็ดพันธุ์ได้ดีกว่าพอลิเมอร์กลุ่มสังเคราะห์ (Accinelli *et al.*, 2018; Rocha *et al.*, 2019) ส่วนการเลือกใช้ calcium sulfate เป็นวัสดุพอก ซึ่งมีอนุภาคขนาด 79 ไมครอน (Chindaprasit *et al.*, 2011) ทำให้ง่ายต่อการขึ้นรูปก้อนพอกเมล็ด และทำให้ก้อนพอกมีความแข็งแรงสูง (Punsukumtana, 2009) จึงนิยมถูกนำมาใช้เป็นวัสดุห่อหุ้มเมล็ดให้มีขนาดใหญ่ขึ้น โดยมีความเป็นพิษและเกิดผลกระทบต่อกระบวนการงอกของเมล็ดพันธุ์อย่างไรก็ตาม วิธีการเคลือบและพอกเมล็ดพันธุ์มีผลต่อความงอกและการเจริญเติบโตของต้นกล้าพืชที่แตกต่างกัน จึงทำให้การเลือกวิธีการที่เหมาะสมต่อการยกระดับคุณภาพเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองมีความสำคัญต่อการเป็นตัวกลางนำพาสารออกฤทธิ์ให้ติดไปกับเมล็ดพันธุ์

ส่วนข้อดีของวิธีการเคลือบเมล็ดและพอกเมล็ด คือ สามารถเพิ่มจุลินทรีย์ที่ส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชให้ติดไปกับเมล็ดได้ โดยเฉพาะการใช้ *Bacillus subtilis* ซึ่งเป็นจุลินทรีย์ที่พบได้

ทั่วไปในธรรมชาติ สามารถสร้างเอนโดสปอร์ซึ่งเป็นโครงสร้างที่ทนต่อสภาพแวดล้อม ทั้งสารเคมี รังสีและความร้อนได้ดีกว่าเซลล์ปกติ (Klopper *et al.*, 2004; Thomma and Sirithorn, 2012) จึงมีความเหมาะสมต่อการนำมาประยุกต์ใช้ร่วมกับวิธีการเคลือบและพอกร่วมกับเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลือง อีกทั้ง *B. subtilis* มีคุณสมบัติสามารถผลิตฮอร์โมนพืช หรือสนับสนุนให้พืชอาหาร และการดูดซึมจากดินผ่านกลไกต่างๆ มากขึ้น ยกตัวอย่างเช่น การตรึงไนโตรเจนในบรรยากาศ (Lakshminarayana *et al.*, 1992) การกระตุ้นการละลายของฟอสเฟตที่ไม่ละลายน้ำ (Kundu and Gaur, 1980) การสังเคราะห์สารประกอบธาตุเหล็ก (Glick *et al.*, 2007) การผลิตกรดอินทรีย์กรดอะมิโน (IAA) ซึ่งช่วยเพิ่มการเจริญของรากและลำต้น (Oteino *et al.*, 2015) จึงมีผลต่อการส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชเพิ่มมากขึ้น จากการรายงานของ Junges *et al.* (2013) พบว่าการเคลือบเมล็ดด้วย *B. subtilis* ทำให้เมล็ดพันธุ์ข้าวโพดมีความงอกเพิ่มขึ้น และ Tu *et al.* (2016) พบว่าการเคลือบเมล็ดด้วย *B. subtilis* SL-13 สามารถยกระดับความงอกของเมล็ดพันธุ์ฝ้ายเพิ่มขึ้น 28.74% จากเดิม อย่างไรก็ตาม ปัจจุบันประเทศไทยยังคงขาดเอกสารงานวิจัยเกี่ยวกับการประยุกต์ใช้วิธีการเคลือบเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองร่วมกับจุลินทรีย์ส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืช

ดังนั้น คุณภาพเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองมีการตอบสนองต่อวิธีการยกระดับคุณภาพเมล็ดพันธุ์ที่แตกต่างกัน งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาการเปลี่ยนแปลงของความงอก ความแข็งแรง และการเจริญเติบโตของต้นกล้าถั่วเหลือง หลังการเคลือบและการพอกเมล็ดร่วมกับ *B. subtilis* ที่อัตราแตกต่างกัน ผลที่ได้จากการศึกษาในครั้งนี้จะเป็นอีกหนึ่ง

ทางเลือกเพื่อยกระดับคุณภาพเมล็ดพันธุ์และการเพาะปลูกถั่วเหลืองให้มีผลผลิตและคุณภาพเพิ่มขึ้น

วิธีดำเนินการวิจัย

งานวิจัยนี้ได้รับความอนุเคราะห์เมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองพันธุ์ สจ. 5 จากศูนย์วิจัยและพัฒนาเมล็ดพันธุ์พืชเชียงใหม่ กองวิจัยพัฒนาเมล็ดพันธุ์พืช กรมวิชาการเกษตร โดยได้ดำเนินการทดลอง ณ ห้องปฏิบัติการเทคโนโลยีเมล็ดพันธุ์ สาขาวิชาพืชไร่ คณะผลิตกรรมการเกษตร มหาวิทยาลัยแม่โจ้ ระหว่างเดือน สิงหาคม 2562 - กุมภาพันธ์ 2563 ซึ่งมีขั้นตอนการดำเนินการทดลองดังต่อไปนี้

1. การเคลือบและการพอกเมล็ดพันธุ์ร่วมกับ

Bacillus subtilis

การทดลองนี้วางแผนการทดลองแบบ Completely Randomized design (CRD) ประกอบด้วย 9 คำรับทดลอง (ตารางที่ 1) จำนวน 4 ซ้ำ ทำโดยเตรียมสารเคลือบเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองโดยใช้ Carboxymethyl cellulose (CMC) อัตรา 0.1% โดยน้ำหนักเป็นสารเคลือบ ส่วนการพอกเมล็ดพันธุ์ใช้ CMC อัตรา 0.5% โดยน้ำหนักเป็นวัสดุประสาน และใช้ Calcium sulfate อัตรา 50 กรัม/เมล็ดพันธุ์ถั่วเหลือง 45 กรัม จากนั้นนำสูตรสารเคลือบและสูตรสารพอกมาปฏิบัติต่อเมล็ดพันธุ์ร่วมกับ *Bacillus subtilis* MBI 600 (Integral®, BASF) (ความเข้มข้นของจำนวนเชื้อ 2.2×10^{10} สปอร์/มิลลิลิตร) ตามตารางที่ 1 หลังจากการเคลือบและการพอกเมล็ดพันธุ์แล้วนำไปลดความชื้นของเมล็ดพันธุ์ในสภาพอุณหภูมิห้องเป็นเวลา 48 ชั่วโมง จากนั้นนำไปตรวจสอบคุณภาพเมล็ดพันธุ์ในลักษณะต่างๆ

ตารางที่ 1 แสดงสูตรการเคลือบและการพอกเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองร่วมกับ *Bacillus subtilis* ในอัตราที่แตกต่างกัน

สารออกฤทธิ์	สูตรการเคลือบและการพอกเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลือง								
	Coating		Pelleting	Coating			Pelleting		
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
¹ CMC (กรัม)	-	0.1	0.5	0.1%	0.1	0.1	0.5	0.5	0.5
<i>Bacillus subtilis</i> (มิลลิลิตร)	-	-	-	0.5	1.0	2.0	0.5	1.0	2.0
น้ำ (มิลลิลิตร)	-	99.9	99.5	99.4	98.9	97.9	99.4	98.9	97.9

¹ CMC: Carboxymethyl cellulose

2. การตรวจสอบคุณภาพเมล็ดพันธุ์

2.1 การตรวจสอบความงอกในสภาพห้องปฏิบัติการ ทำโดยสุ่มเมล็ดพันธุ์ทุกวิธีการจำนวน 4 ซ้ำๆ ละ 50 เมล็ด มาทดสอบความงอกโดยวิธี Between paper (BP) จากนั้นนำไปไว้ในตู้เพาะความงอกอุณหภูมิสถับ (8 ชั่วโมง 30°C และ 16 ชั่วโมง 25°C) แล้วตรวจนับความงอกหลังการเพาะครั้งแรกที่ 5 วัน (First count) และ 8 วันหลังเพาะ (Final count) โดยนำมาประเมินผลการตรวจสอบความงอกตามวิธีของ ISTA (2019)

2.2 การตรวจสอบความงอกในสภาพเรือนทดลอง สุ่มเมล็ดพันธุ์ทุกวิธีการจำนวน 4 ซ้ำๆ ละ 50

เมล็ด มาทดสอบความงอกในถาดหลุม ซึ่งใช้พีทมอส (Peatmoss) เป็นวัสดุเพาะต้นกล้า แล้วประเมินผลการงอกที่ 5-8 วัน เช่นเดียวกันกับวิธีการตรวจสอบในสภาพห้องปฏิบัติการ

2.3 การตรวจสอบความเร็วในการงอกในสภาพห้องปฏิบัติการและสภาพเรือนทดลอง ทำโดยสุ่มเมล็ดพันธุ์ทุกวิธีการจำนวน 4 ซ้ำๆ ละ 50 เมล็ด แล้วนำไปเพาะทดสอบความงอก จากนั้นนับจำนวนเมล็ดที่งอกเป็นต้นกล้าปกติ ประเมินนับทุกวัน ตั้งแต่เริ่มนับครั้งแรก (First count) จนถึงวันสุดท้าย (Final count) แล้วนำผลการนับมาคำนวณหาความเร็วในการงอกตามสูตร

$$\text{ความเร็วในการงอก (ต้น/วัน)} = \frac{\text{ผลรวมของ [จำนวนต้นกล้าปกติที่งอกในแต่ละวัน]}}{\text{จำนวนวันหลังเพาะ}}$$

2.4 การตรวจสอบการงอกของรากและความเร็วในการงอกรากในสภาพห้องปฏิบัติการ โดยสุ่มประเมินการงอกรากจากการเพาะทดสอบในวันที่ 1 และ 4 วันหลังเพาะ ในแต่ละกรรมวิธีทำ 4 ซ้ำ โดยจะเริ่มตรวจนับเมื่อเมล็ดมีการงอกของรากที่ความยาว

2 มิลลิเมตร จากนั้นนำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การงอกราก ส่วนการตรวจสอบความเร็วในการงอกรากให้ประเมินนับทุกวัน ในวันที่ 1 ถึงวันที่ 4 หลังเพาะ จากนั้นนำมาคำนวณหาความเร็วในการงอกรากของต้นกล้าถั่วเหลือง

$$\text{ความเร็วในการงอกราก (ราก/วัน)} = \frac{\text{ผลรวมของ [จำนวนรากที่งอกในแต่ละวัน]}}{\text{จำนวนวันหลังเพาะ}}$$

2.5 การตรวจสอบการโผล่พื้นดินและความเร็วในการโผล่พื้นดินในสภาพเรือนทดลอง สุ่มประเมินการงอกของ Cotyledon ของต้นกล้าถั่วเหลืองที่โผล่พื้นดินขึ้นมาจากหลุมเพาะต้นกล้าในวันที่ 1 และ 4 วันหลังเพาะ ในแต่ละกรรมวิธี ทำ 4 ซ้ำ จากนั้นนำไปคำนวณหาเปอร์เซ็นต์การโผล่พื้นดินของต้นกล้าถั่วเหลือง ส่วนการตรวจสอบความเร็วในการโผล่พื้นดิน ดำเนินการสุ่มตรวจนับการงอกของ Cotyledon ของต้นกล้าถั่วเหลืองที่โผล่พื้นดินขึ้นมาทุกวันตั้งแต่วันที่ 1 ถึงวันที่ 4 หลังการเพาะ จากนั้นนำมาคำนวณหาความเร็วในการโผล่พื้นดินของต้นกล้าถั่วเหลือง

2.6 การตรวจสอบความยาวต้นและความยาวรากในสภาพห้องปฏิบัติการและสภาพเรือนทดลอง โดยสุ่มต้นกล้าปกติที่อายุ 8 วันหลังเพาะ ทำ 4 ซ้ำ ซ้ำละ 10 ต้น โดยในสภาพห้องปฏิบัติการ ทำการตรวจวัดความยาวต้น โดยวัดตั้งแต่ส่วนรอยต่อของต้นกับรากไปจนถึงปลายสุดใบจริง (Foliage leaf) ส่วนความยาวราก วัดจากบริเวณปลายรากจนถึงบริเวณข้อต่อระหว่างส่วนรากและลำต้นของต้นกล้า (Baki and Anderson, 1973) และการประเมินความยาวต้นกล้าทั้งหมด ตรวจวัดตั้งแต่ปลายรากไปจนถึงปลายสุดใบจริง ส่วนการตรวจสอบความยาวต้นในสภาพเรือนทดลอง วัดจากบริเวณข้อต่อต้นและรากไปจนถึงปลายสุดใบจริง (foliage leaf) ใช้หน่วยเป็นมิลลิเมตร

2.7 การประเมินน้ำหนักสดและน้ำหนักแห้งลำต้นในสภาพห้องปฏิบัติการและในสภาพเรือนทดลอง โดยในสภาพห้องปฏิบัติการนำความยาวต้นกล้าทั้งหมดที่ได้จากการตรวจสอบในข้อที่ 2.6 มาประเมินหาน้ำหนักแห้ง โดยนำไปอบแห้งที่อุณหภูมิ 72 องศาเซลเซียส นาน 72 ชั่วโมง แล้วนำมาชั่งน้ำหนักประเมินผล ส่วนในสภาพเรือนทดลองนำลำต้นของต้นกล้าถั่วเหลืองมาชั่งประเมินหาน้ำหนักสด มีหน่วยเป็นมิลลิกรัม จากนั้นนำลำต้นของต้นกล้าไปประเมินหา

น้ำหนักแห้งลำต้น โดยนำไปอบด้วยอุณหภูมิและระยะเวลาเดียวกันกับการตรวจสอบในสภาพห้องปฏิบัติการ

2.8 การวิเคราะห์ข้อมูล ทำการวิเคราะห์ข้อมูลคุณภาพเมล็ดพันธุ์ตามลักษณะต่างๆ แปลงข้อมูลเปอร์เซ็นต์ความงอกของเมล็ดเพื่อวิเคราะห์ทางสถิติโดยใช้วิธี Arcsine transformation และเมื่อข้อมูลมีค่าเป็น 0 มีการแปลงค่าโดยวิธี Square root $\sqrt{x+0.5}$ และเปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's Multiple Range Test (DMRT) วิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติด้วยโปรแกรมสำเร็จรูป

ผลการวิจัยและวิจารณ์ผล

จากการเคลือบและการพอกเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองรวม *B. subtilis* ในอัตราที่แตกต่างกัน แล้วนำมาเพาะตรวจสอบคุณภาพเมล็ดพันธุ์ในลักษณะต่างๆ ในสภาพห้องปฏิบัติการและสภาพเรือนทดลอง จึงมีผลการทดลองดังนี้

1. การเปลี่ยนแปลงคุณภาพเมล็ดพันธุ์หลังการเคลือบและพอกเมล็ดร่วมกับ *Bacillus subtilis* ในสภาพห้องปฏิบัติการ

จากการพิจารณาตรวจสอบคุณภาพเมล็ดพันธุ์หลังเพาะทดสอบในสภาพห้องปฏิบัติการพบว่า การเคลือบเมล็ดด้วย *B. subtilis* อัตรา 0.5 มิลลิลิตร มีการงอกรากของต้นกล้าดีที่สุดคือ 99 เปอร์เซ็นต์ ส่วนความเร็วในการงอกรากพบว่า เมล็ดที่ผ่านการเคลือบด้วย *B. subtilis* อัตรา 0.5 มิลลิลิตร มีความเร็วในการงอกรากดีมากและแตกต่างกับเมล็ดเปล่าและวิธีการอื่นๆ แต่ไม่พบความแตกต่างกับการเคลือบเมล็ดด้วย *B. subtilis* อัตรา 1.0 มิลลิลิตร และเมื่อตรวจสอบความงอกพบว่า การเคลือบเมล็ดทุกวิธีการทำให้มีความงอกของเมล็ดถั่วเหลืองดีที่สุดและแตกต่างในทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่นๆ ส่วนความเร็วในการงอกยังคงพบว่า การเคลือบเมล็ด

ด้วย *B. subtilis* อัตรา 0.5 มิลลิลิตร มีความเร็วในการงอกมากกว่าและแตกต่างในทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่นๆ แต่ไม่พบความแตกต่างกับการเคลือบเมล็ดด้วยสารเคลือบเพียงอย่างเดียว (ตารางที่ 2)

ตารางที่ 2 การงอกราก ความเร็วในการงอกราก ความงอก และความเร็วในการงอกของเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลือง หลังผ่านการเคลือบและพอกเมล็ดร่วมกับ *B. subtilis* ในอัตราที่แตกต่างกัน เมื่อตรวจสอบในสภาพห้องปฏิบัติการ

กรรมวิธี ¹	สภาพห้องปฏิบัติการ			
	การงอกราก (%) ²	ความเร็วในการงอกราก (ราก/วัน)	ความงอก (%)	ความเร็วในการงอก (ต้น/วัน)
T1	87 c ³	40.78 c	71 bc	15.96 c
T2	97 b	45.50 ab	87 a	18.12 ab
T3	83 cd	36.56 d	76 b	14.18 d
T4	99 a	46.67 a	93 a	18.84 a
T5	96 b	44.22 ab	86 a	17.56 b
T6	95 b	42.67 bc	86 a	16.60 c
T7	62 e	24.61 f	55 d	9.77 f
T8	76 d	30.44 e	63 cd	12.29 e
T9	68 e	25.33 f	59 d	9.87 f
<i>F</i> -test	**	**	**	**
CV.(%)	5.19	5.11	7.53	4.19

** : มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ $p \leq 0.01$

¹ T1 = เมล็ดเปล่า, T2 = การเคลือบเมล็ดด้วย CMC, T3 = การพอกเมล็ดด้วย Calcium sulfate, T4 = การเคลือบเมล็ดด้วย *B. subtilis* 0.5 มิลลิลิตร, T5 = การเคลือบเมล็ดด้วย *B. subtilis* 1.0 มิลลิลิตร, T6 = การเคลือบเมล็ดด้วย *B. subtilis* 2.0 มิลลิลิตร, T7 = การพอกเมล็ดด้วย *B. subtilis* 0.5 มิลลิลิตร, T8 = การพอกเมล็ดด้วย *B. subtilis* 1.0 มิลลิลิตร, T9 = การพอกเมล็ดด้วย *B. subtilis* 2.0 มิลลิลิตร

² อักษรต่างกันในกลุ่มเดียวกันมีความแตกต่างกันทางสถิติ เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี DMRT ที่ $p \leq 0.05$

³ แปลงข้อมูลการงอกรากและความงอกโดยวิธี arcsin ก่อนนำมาวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ

2. การเปลี่ยนแปลงคุณภาพเมล็ดพันธุ์หลังการเคลือบและพอกเมล็ดร่วมกับ *Bacillus subtilis* ในสภาพเรือนทดลอง

เมื่อตรวจสอบคุณภาพเมล็ดพันธุ์หลังเพาะทดสอบในสภาพเรือนทดลองพบว่า การเคลือบเมล็ดเพียงอย่างเดียว และการเคลือบเมล็ดด้วย *B. subtilis*

อัตรา 0.5 มิลลิลิตร ไม่ทำให้การโผล่พื้นดิน และความเร็วในการโผล่พื้นดินมีความแตกต่างในทางสถิติกับเมล็ดเปล่า แต่มีความแตกต่างกับวิธีการอื่นๆ ส่วนการตรวจสอบความงอกพบว่า การเคลือบเมล็ดทุกวิธีการและการพอกเมล็ดด้วย Calcium sulfate เพียงอย่างเดียวมีความงอกดีที่สุดและแตกต่างในทาง

สถิติเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่นๆ และเมื่อตรวจสอบความเร็วในการงอกพบว่า การพอกเมล็ดด้วย Calcium sulfate เพียงอย่างเดียว และการเคลือบ

เมล็ดด้วย *B. subtilis* ทุกวิธีการมีความเร็วในการงอกดีที่สุดและแตกต่างในทางสถิติกับกรรมวิธีการทดลองอื่นๆ (ตารางที่ 3)

ตารางที่ 3 การโผล่พื้นดิน ความเร็วในการโผล่พื้นดิน ความงอก และความเร็วในการงอกของเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลือง หลังผ่านการเคลือบและพอกเมล็ดร่วมกับ *B. subtilis* ในอัตราที่แตกต่างกัน เมื่อตรวจสอบในสภาพเรือนทดลอง

กรรมวิธี ¹	สภาพเรือนทดลอง			
	การโผล่พื้นดิน (%) ²	ความเร็วในการโผล่พื้นดิน (ต้น/วัน)	ความงอก (%)	ความเร็วในการงอก (ต้น/วัน)
T1	37 a ³	10.28 a	59 b	10.72 b
T2	35 ab	9.33 ab	75 a	12.73 c
T3	13 d	3.78 c	73 a	12.67 a
T4	29 abc	8.50 ab	83 a	13.82 a
T5	27 bc	7.44 b	75 a	12.68 a
T6	25 c	7.22 b	79 a	13.14 a
T7	6 e	1.61 c	33 c	5.64 c
T8	9 de	2.28 c	22 d	3.53 d
T9	12 d	3.56 c	18 d	3.05 d
<i>F</i> -test	**	**	**	**
CV.(%)	13.07	24.07	9.19	11.07

** : มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ $p \leq 0.01$

¹ T1 = เมล็ดเปล่า, T2 = การเคลือบเมล็ดด้วย CMC, T3 = การพอกเมล็ดด้วย Calcium sulfate, T4 = การเคลือบเมล็ดด้วย *B. subtilis* 0.5 มิลลิลิตร, T5 = การเคลือบเมล็ดด้วย *B. subtilis* 1.0 มิลลิลิตร, T6 = การเคลือบเมล็ดด้วย *B. subtilis* 2.0 มิลลิลิตร, T7 = การพอกเมล็ดด้วย *B. subtilis* 0.5 มิลลิลิตร, T8 = การพอกเมล็ดด้วย *B. subtilis* 1.0 มิลลิลิตร, T9 = การพอกเมล็ดด้วย *B. subtilis* 2.0 มิลลิลิตร

² อักษรต่างกันในกลุ่มเดียวกันมีความแตกต่างกันทางสถิติ เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี DMRT ที่ $p \leq 0.05$

³ แปลงข้อมูลการโผล่พื้นดินและความงอก ก่อนนำมาวิเคราะห์ข้อมูลทางสถิติ โดยวิธี arcsin

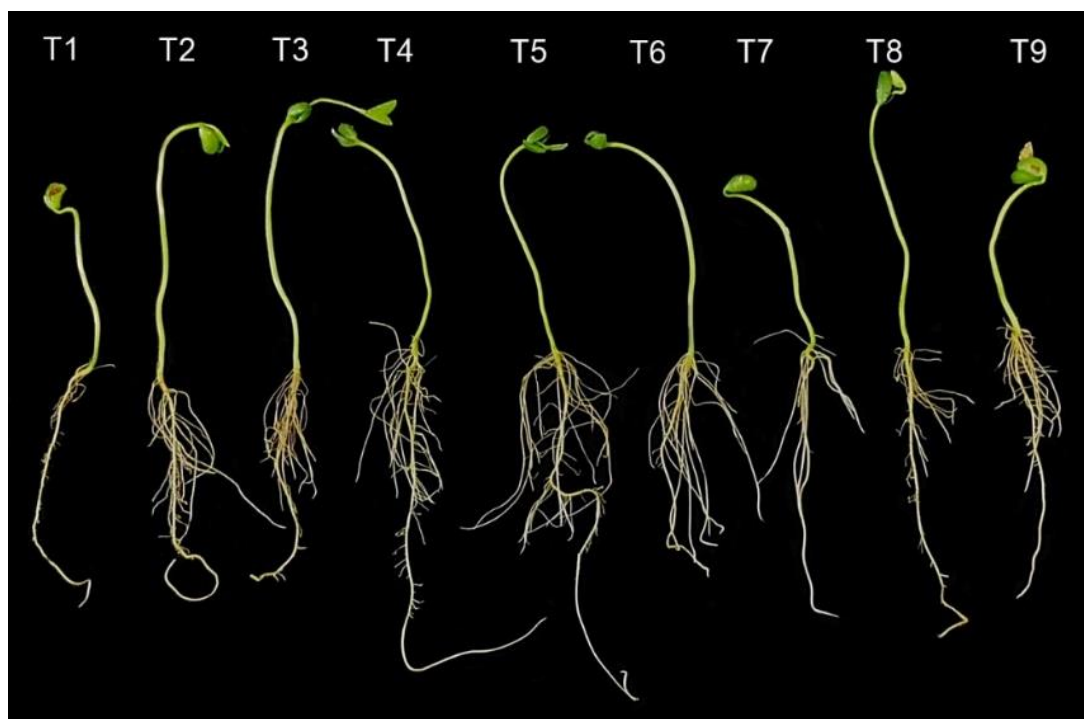
3. การเปลี่ยนแปลงการเจริญเติบโตของต้นกล้าถั่วเหลือง หลังการเคลือบและพอกเมล็ดร่วมกับ *Bacillus subtilis* ในสภาพห้องปฏิบัติการ

จากการตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงการเจริญเติบโตของต้นกล้าถั่วเหลืองหลังเพาะทดสอบ

ในสภาพห้องปฏิบัติการพบว่า การเคลือบเมล็ดเพียงอย่างเดียว (T2) การพอกเมล็ดด้วย Calcium sulfate เพียงอย่างเดียว (T3) และการเคลือบเมล็ดด้วย *B. subtilis* อัตรา 0.5 (T4) และ 1.0 มิลลิลิตร (T5) มีความยาวลำต้นสูงที่สุดและแตกต่างในทางสถิติเมื่อ

เปรียบเทียบกับวิธีการอื่นๆ ส่วนการตรวจสอบความยาวรากพบว่า การพอกเมล็ดด้วย Calcium sulfate เพียงอย่างเดียว (T3) และการเคลือบเมล็ดด้วย *B. subtilis* อัตรา 0.5 (T4) และ 1.0 มิลลิลิตร (T5) มีความยาวรากดีที่สุดและแตกต่างกับวิธีการอื่นๆ แต่ไม่พบความแตกต่างในทางสถิติกับการเคลือบเมล็ดเพียงอย่างเดียว และการเคลือบเมล็ดด้วย *B. subtilis* อัตรา 2.0 มิลลิลิตร (T6) และเมื่อพิจารณาผลรวมต้นกล้าถั่วเหลืองพบว่า การเคลือบเมล็ดด้วย *B. subtilis* อัตรา 0.5 (T4) และ 1.0 มิลลิลิตร (T5) มีผลรวมต้นกล้าสูง

มากกว่าและแตกต่างในทางสถิติกับวิธีการอื่น จากนั้นพิจารณาตรวจสอบน้ำหนักแห้งต้นกล้าพบว่า การเคลือบเมล็ดด้วย *B. subtilis* อัตรา 0.5 มิลลิลิตร (T4) และการพอกเมล็ดด้วย *B. subtilis* อัตรา 1.0 (T8) และ 2.0 มิลลิลิตร (T9) มีน้ำหนักแห้งต้นกล้าสูงที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่นๆ (ตารางที่ 4) และจากการพิจารณา ภาพที่ 1 แสดงให้เห็นว่า การเคลือบและการพอกเมล็ดทุกวิธีการทำให้ต้นกล้าถั่วเหลืองมีการเปลี่ยนแปลงของรากและลำต้นดีมากว่าเมล็ดพันธุ์ที่ไม่ได้ผ่านการเคลือบและพอกเมล็ด



ภาพที่ 1 แสดงต้นกล้าของถั่วเหลืองหลังผ่านการเคลือบและการพอกเมล็ดร่วมกับ *B. subtilis* ในอัตราที่ต่างกัน หลังผ่านการเพาะทดสอบ 8 วัน เมื่อตรวจสอบในสภาพห้องปฏิบัติการ, T1 = เมล็ดเปล่า, T2 = การเคลือบเมล็ดด้วย CMC, T3 = การพอกเมล็ดด้วย Calcium sulfate, T4 = การเคลือบเมล็ดด้วย *B. subtilis* 0.5 มิลลิลิตร, T5 = การเคลือบเมล็ดด้วย *B. subtilis* 1.0 มิลลิลิตร, T6 = การเคลือบเมล็ดด้วย *B. subtilis* 2.0 มิลลิลิตร, T7 = การพอกเมล็ดด้วย *B. subtilis* 0.5 มิลลิลิตร, T8 = การพอกเมล็ดด้วย *B. subtilis* 1.0 มิลลิลิตร, T9 = การพอกเมล็ดด้วย *B. subtilis* 2.0 มิลลิลิตร; กำลังขยาย 10X.

ตารางที่ 4 ความยาวต้น ความยาวราก ผลรวมต้นกล้า และน้ำหนักแห้งต้นกล้าของถั่วเหลือง หลังผ่านการเคลือบ และพอกเมล็ดร่วมกับ *B. subtilis* ในอัตราที่แตกต่างกัน เมื่อตรวจสอบในสภาพห้องปฏิบัติการ

กรรมวิธี ¹	สภาพห้องปฏิบัติการ			
	ความยาวต้น (มิลลิเมตร)	ความยาวราก (มิลลิเมตร)	ผลรวมต้นกล้า (มิลลิเมตร)	น้ำหนักแห้งต้นกล้า (มิลลิกรัม)
T1	123.30 b ²	127.50 c	250.80 de	1040 c
T2	139.20 a	152.33 ab	291.53 b	1053 c
T3	140.97 a	161.60 a	302.57 ab	1093 bc
T4	145.90 a	167.33 a	313.23 a	1253 a
T5	147.23 a	165.93 a	313.17 a	1113 bc
T6	118.07 bc	152.40 ab	270.47 c	1163 ab
T7	121.67 b	130.83 c	252.50 c-e	1200 ab
T8	122.40 b	140.47 bc	262.87 cd	1250 a
T9	107.07 c	129.20 c	236.27 e	1230 a
<i>F</i> -test	**	**	**	**
CV.(%)	13.07	24.07	9.19	11.07

** : มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ $p \leq 0.01$

¹ T1 = เมล็ดเปล่า, T2 = การเคลือบเมล็ดด้วย CMC, T3 = การพอกเมล็ดด้วย Calcium sulfate, T4 = การเคลือบเมล็ดด้วย *B. subtilis* 0.5 มิลลิลิตร, T5 = การเคลือบเมล็ดด้วย *B. subtilis* 1.0 มิลลิลิตร, T6 = การเคลือบเมล็ดด้วย *B. subtilis* 2.0 มิลลิลิตร, T7 = การพอกเมล็ดด้วย *B. subtilis* 0.5 มิลลิลิตร, T8 = การพอกเมล็ดด้วย *B. subtilis* 1.0 มิลลิลิตร, T9 = การพอกเมล็ดด้วย *B. subtilis* 2.0 มิลลิลิตร

² อักษรต่างกันในกลุ่มเดียวกันมีความแตกต่างกันทางสถิติ เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี DMRT ที่ $p \leq 0.05$

4. การเปลี่ยนแปลงการเจริญเติบโตของต้นกล้าถั่วเหลือง หลังการเคลือบและพอกเมล็ดร่วมกับ *Bacillus subtilis* ในสภาพเรือนทดลอง

เมื่อตรวจสอบการเปลี่ยนแปลงการเจริญเติบโตของต้นกล้าถั่วเหลืองหลังเพาะทดสอบในสภาพเรือนทดลองพบว่า การเคลือบเมล็ดทุก

วิธีการมีความยาวลำต้น และน้ำหนักสดลำต้นดีที่สุด
วิธีการอื่นๆ ส่วนการตรวจสอบน้ำหนักแห้งลำต้นพบว่า การเคลือบเมล็ดด้วย *B. subtilis* อัตรา 0.5 มิลลิลิตร ดีมากกว่าการพอกเมล็ดร่วมกับ *B. subtilis* ทุกวิธีการ (ตารางที่ 5)

ตารางที่ 5 ความยาวต้น น้ำหนักสดต้น และน้ำหนักแห้งต้นของถั่วเหลือง หลังผ่านการเคลือบและพอกเมล็ดร่วมกับ *B. subtilis* ในอัตราที่แตกต่างกัน เมื่อตรวจสอบในสภาพเรือนทดลอง

กรรมวิธี ¹	สภาพเรือนทดลอง		
	ความยาวต้น (มิลลิเมตร)	น้ำหนักสดต้น (มิลลิเมตร)	น้ำหนักแห้งต้น (มิลลิเมตร)
T1	62.57 ab ²	7223 ab	878 a-d
T2	66.80 a	7443 a	930 ab
T3	55.97 b	6250 b	963 ab
T4	66.90 a	7410 a	977 a
T5	65.97 a	7303 a	930 ab
T6	65.90 a	7470 a	910 a-c
T7	40.13 c	4527 c	783 cd
T8	44.47 c	4603 c	824 b-d
T9	38.50 c	4240 c	757 d
<i>F</i> -test	**	**	**
CV.(%)	8.89	10.91	9.81

** : มีความแตกต่างกันทางสถิติที่ $p \leq 0.01$

¹ T1 = เมล็ดเปล่า, T2 = การเคลือบเมล็ดด้วย CMC, T3 = การพอกเมล็ดด้วย Calcium sulfate, T4 = การเคลือบเมล็ดด้วย *B. subtilis* 0.5 มิลลิลิตร, T5 = การเคลือบเมล็ดด้วย *B. subtilis* 1.0 มิลลิลิตร, T6 = การเคลือบเมล็ดด้วย *B. subtilis* 2.0 มิลลิลิตร, T7 = การพอกเมล็ดด้วย *B. subtilis* 0.5 มิลลิลิตร, T8 = การพอกเมล็ดด้วย *B. subtilis* 1.0 มิลลิลิตร, T9 = การพอกเมล็ดด้วย *B. subtilis* 2.0 มิลลิลิตร

² อักษรต่างกันในกลุ่มเดียวกันมีความแตกต่างกันทางสถิติ เปรียบเทียบค่าเฉลี่ยโดยวิธี DMRT ที่ $p \leq 0.05$

Bacillus เป็นหนึ่งในสกุลของแบคทีเรียที่มีการศึกษามากที่สุด เนื่องจากมีประสิทธิภาพส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชในพืชที่มีความสำคัญทางเศรษฐกิจ (Widnyana and Javandira, 2016) จึงนำมาเป็นสารออกฤทธิ์ทางชีวภาพร่วมกับเทคโนโลยีการเคลือบและการพอกเมล็ดพันธุ์ โดยมีผลการทดลองหลังการตรวจสอบคุณภาพเมล็ดพันธุ์ที่แตกต่างกันจึงสามารถวิจารณ์ผลได้ดังนี้

จากผลการทดลองในสภาพห้องปฏิบัติการ และสภาพเรือนทดลองแสดงให้เห็นอย่างชัดเจนว่าวิธีการพอกเมล็ดด้วย Calcium sulfate ร่วมกับ *B.*

subtilis ไม่มีความเหมาะสมต่อการนำมาใช้เป็นวิธีการยกระดับคุณภาพเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลือง ทั้งนี้เมื่อตรวจสอบในสภาพห้องปฏิบัติการ การเคลือบเมล็ดร่วมกับ *B. subtilis* มีการเปลี่ยนแปลงของการงอก และความงอกดีมากกว่าเมล็ดเปล่า และวิธีการพอกเมล็ดอย่างชัดเจน โดยเฉพาะการเคลือบเมล็ดด้วย *B. subtilis* อัตรา 0.5 มิลลิลิตร (T4) ทั้งนี้การใช้ Carboxymethyl cellulose (CMC) เป็นสารเคลือบ ซึ่ง CMC เป็นอนุพันธ์เซลลูโลสที่สกัดจากธรรมชาติ เป็นสารเคลือบเมื่ออยู่ในรูปเป็นแผ่นฟิล์มจะมีความแข็งแรง และยึดเกาะกันแน่นหนา แต่สามารถละลาย

น้ำได้ง่าย (Khorasani and Shojaosadati, 2017; Kangsopa, 2020) จึงทำให้ CMC มีบทบาทสำคัญเป็นตัวกลางนำพา *B. subtilis* ให้ติดไปกับเมล็ด (Ashraf and Foolad, 2005) ทำให้เมล็ดถั่วเหลืองถูกห่อหุ้มด้วยสารเคลือบที่มี *B. subtilis* อย่างบางเบาดิจอยู่รอบๆ เมล็ด ซึ่งแตกต่างจากวิธีการพอกเมล็ด ที่มีผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า มีผลขัดขวางต่อการงอก และการเจริญเติบโตของต้นกล้าถั่วเหลืองอย่างชัดเจน โดยการพอกเมล็ดเป็นวิธีการห่อหุ้มเมล็ดด้วยสารพอกเมล็ดจนทำให้เมล็ดมีขนาดและรูปร่างเปลี่ยนแปลงไป (Taylor *et al.*, 1998) ซึ่งในการทดลองนี้ใช้ Calcium sulfate เป็นวัสดุพอก และใช้ CMC เป็นวัสดุประสาน เมื่อนำไปห่อหุ้มเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองผ่านวิธีการพอกเมล็ด จะทำให้เมล็ดพอกมีขนาดใหญ่ขึ้นและมีความแข็งแรงมากกว่าวิธีการเคลือบเมล็ด โดยเฉพาะ CMC เป็นอนุพันธ์ของเซลลูโลสชนิดหนึ่ง โดยโมเลกุลของเซลลูโลสประกอบด้วยหน่วยย่อยของ D-anhydroglucopyranose มาเชื่อมต่อกันเป็นสายยาวแบบเชิงเส้น (linear polymer) ด้วยพันธะ β -14 glucosidic ทำให้มีโครงสร้างเป็นร่างแห (Rowe *et al.*, 2009) จึงอาจทำให้วิธีการพอกเมล็ดมีผลขัดขวางต่อการซึมผ่านของออกซิเจน และความชื้น โดยสารพอกจะไปอุดตันรูไมโครไพล์ (Micropyle) ที่เป็นตำแหน่งการดูดซึมน้ำของถั่วเหลืองที่ไวที่สุด (Chanprasert, 2010) นอกจากนี้ Calcium sulfate ที่ห่อหุ้มเมล็ดยังทำให้เมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองได้รับความชื้นมากเกินไปจนความต้องการต่อการงอกของเมล็ด จึงทำให้เมล็ดดูดซึมน้ำออกซิเจนได้น้อย ไม่เพียงพอต่อกระบวนการงอกของเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลือง และเป็นหนึ่งในสาเหตุที่ทำให้เซลล์เมมเบรนของเมล็ดสูญเสียสภาพ (Chanprasert, 2010) ซึ่งสังเกตได้จากการประเมินคุณภาพเมล็ดพันธุ์จะพบว่าวิธีการพอกเมล็ดจะพบลักษณะของเมล็ดเน่ามากกว่าวิธีการเคลือบเมล็ด อีกทั้งเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองเป็นพืช

น้ำมัน วิธีการพอกเมล็ดอาจมีผลต่อการสะสมความชื้นเกินความจำเป็น จึงเกิดการเพิ่มขึ้นของกรดไขมันอิสระที่เป็นพิษต่อเซลล์ มีส่วนในการสร้างความเสียหายต่อเยื่อหุ้มเซลล์ และทำให้โครงสร้างไมโทคอนเดรียผิดปกติได้ในช่วงระยะการเก็บสะสมความชื้นของเมล็ด (Priestley, 1986; Chanprasert, 2010) เมื่อพิจารณาการเคลือบเมล็ดด้วย *B. subtilis* อัตรา 0.5 มิลลิลิตร (T4) มีผลทำให้เมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองมีความงอก ความเร็วในการงอก และความสูงของต้นกล้าดีทั้งในสภาพห้องปฏิบัติการและสภาพเรือนทดลองมากกว่าวิธีการอื่นๆ ทั้งนี้เนื่องจาก *B. subtilis* สามารถผลิต 1-aminocyclopropane-1-carboxylate (ACC) deaminase เพื่อควบคุมระดับเอทิลีน โดยจะเกิดการเผาผลาญ ACC แล้วเปลี่ยนไปเป็น α -ketobutyric และแอมโมเนียที่มีผลต่อการส่งเสริมการงอกของเมล็ด (Arshad *et al.*, 2007; Glick *et al.*, 2007) สอดคล้องกับ Junges *et al.* (2013) พบว่าการเคลือบเมล็ดด้วย *B. subtilis* ทำให้เมล็ดพันธุ์ข้าวโพดมีความงอกดีมากขึ้นจากเดิม ส่วน Martínez *et al.* (2013) รายงานว่า การแช่เมล็ดพันธุ์มะเขือเทศด้วย *Bacillus* สามารถเพิ่มเปอร์เซ็นต์การงอกขึ้น 5-6% จากเดิม ต่อมา Tu *et al.* (2016) รายงานเพิ่มเติมว่า การเคลือบเมล็ดด้วย *B. subtilis* SL-13 สามารถยกระดับความงอกของเมล็ดพันธุ์ฝ้ายเพิ่มขึ้น 28.74%

เมื่อพิจารณาการพอกเมล็ดร่วมกับ *B. subtilis* อัตรา 1.0 (T8) และ 2.0 มิลลิลิตร (T9) แสดงให้เห็นชัดเจนว่า มีการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักแห้งต้นกล้าสูงเพิ่มขึ้นจากเดิม ทั้งนี้การพอกเมล็ดเป็นการห่อหุ้มเมล็ดด้วยวัสดุพอกรอบๆ เมล็ดด้วย Calcium sulfate จึงทำให้เมล็ดพอกมีพื้นที่สำหรับให้ *B. subtilis* ติดไปกับเมล็ดถั่วเหลืองได้ในปริมาณที่มากกว่าวิธีการเคลือบเมล็ด จึงทำให้ปริมาณของ *B. subtilis* ติดไปกับเมล็ดได้มากกว่าการเคลือบเมล็ดพันธุ์ ดังนั้นจากผล

การทดลองจึงแสดงให้เห็นว่า ปริมาณของ *B. subtilis* ที่ติดไปกับเมล็ดที่ผ่านการพอกในปริมาณมากกว่า วิธีการเคลือบเมล็ด ไม่มีผลกระทบต่อคุณภาพเมล็ดพันธุ์ นอกจากนี้ *B. subtilis* ที่ติดไปกับเมล็ดในปริมาณมากมีโอกาสรอดชีวิตติดอยู่กับเมล็ดได้ยาวนานมากยิ่งขึ้น จึงทำให้ *B. subtilis* ที่ติดไปกับเมล็ดสามารถออกฤทธิ์ส่งเสริมการเจริญเติบโตของต้นกล้าได้เพิ่มมากขึ้นจากเดิม โดย *B. subtilis* ยังมีบทบาทสำคัญสามารถสังเคราะห์ Phytohormone ในกลุ่ม ออกซิน จิบเบอเรลลิน และ ไซโตไคนิน ที่มีบทบาทต่อการกระตุ้นการงอก ราก รวมทั้งส่งเสริมพัฒนาการการเจริญเติบโตของต้นกล้า (Glick, 2012) ได้ดีมากกว่าเมล็ดเปล่า โดยเฉพาะ Indole-3-acetic acid (IAA) ซึ่งมีบทบาททำให้เกิดการเจริญเติบโตของพืชเพิ่มขึ้น โดยการเพิ่มการแบ่งเซลล์ของลำต้นของต้นกล้าให้ยืดขยายเซลล์เพิ่มสูงขึ้นจากเดิม (Zaidi *et al.*, 2006) นอกจากนี้ IAA ยังทำหน้าที่กระตุ้นการเจริญที่ปลายรากพืชทำให้มีพื้นที่ผิวสัมผัสเพิ่มขึ้น และเพิ่มความสามารถในการลำเลียงธาตุอาหาร (Yang *et al.*, 2009) จึงทำให้เมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองที่ผ่านการพอกเมล็ดร่วมกับ *B. subtilis* มีการเปลี่ยนแปลงของน้ำหนักแห้งต้นกล้าดีเพิ่มสูงขึ้นจากเดิม นอกจากนี้พบรายงานการทำหน้าที่ส่งเสริมการเจริญเติบโตของพืชโดยการตรึงไนโตรเจนใน *Bacillus* OSU-142 ซึ่งสามารถเพิ่มผลผลิตของข้าวสาลี ชูกำปิต และฝักขามได้เพิ่มมากขึ้น (Cakmakci *et al.*, 2007) และพบรายงานการเพิ่มขึ้นของความยาวต้น และความยาวรากของต้นกล้าฝักกาดหอม หลังการพอกเมล็ดพันธุ์ร่วมกับ *B. subtilis* CC-pg104 (Rekha *et al.*, 2007) นอกจากนี้ เมื่อเมล็ดมะเขือเทศได้รับการคลุกด้วย *B. subtilis* (EPC016) พบว่า การเจริญเติบโตของต้นกล้าเพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญเมื่อเทียบกับเมล็ดที่ไม่ได้ผ่านการคลุก (Ramayabharathi *et al.*, 2013) ดังนั้นจากผลการทดลองจึงแสดงให้เห็นว่าการเคลือบเมล็ดเป็น

วิธีการนำพา *B. subtilis* ให้ติดไปกับเมล็ดพันธุ์ดีมากกว่าวิธีการพอกเมล็ดพันธุ์ อีกทั้งยังสามารถส่งเสริมการงอกและการเจริญเติบโตของต้นกล้าถั่วเหลืองได้ดีมากขึ้นจากเดิม

ดังนั้นจากผลการทดลองแสดงให้เห็นว่า วิธีการเคลือบเมล็ดพันธุ์ร่วมกับ *B. subtilis* จึงเป็นวิธีการที่เหมาะสมต่อการยกระดับคุณภาพเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองมากกว่าวิธีการพอกเมล็ดพันธุ์

สรุป

จากผลของการเคลือบและพอกเมล็ดพันธุ์ถั่วเหลืองร่วมกับ *B. subtilis* ในอัตราที่แตกต่างกัน แล้วนำมาเพาะตรวจสอบคุณภาพในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันสามารถสรุปได้ว่า การเคลือบเมล็ดด้วย *B. subtilis* อัตรา 0.5 มิลลิลิตร มีการงอกรากดีที่สุดคือ 99% ส่วนการเคลือบเมล็ดด้วย *B. subtilis* ทุกวิธีการและการเคลือบเมล็ดเพียงอย่างเดียวมีความงอกดีที่สุดและแตกต่างในทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่นๆ ส่วนการเคลือบเมล็ดด้วย *B. subtilis* อัตรา 0.5 มิลลิลิตร มีความยาวต้น ความยาวราก และผลรวมต้นกล้าดีมากกว่าและแตกต่างในทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับเมล็ดเปล่าเมื่อตรวจสอบในสภาพห้องปฏิบัติการ ส่วนการตรวจสอบในสภาพเรือนทดลองพบว่า การเคลือบเมล็ดเพียงอย่างเดียว การพอกเมล็ดเพียงอย่างเดียว และการเคลือบเมล็ดทุกวิธีการ และการพอกเมล็ดเพียงอย่างเดียวมีความงอกมากกว่าและแตกต่างในทางสถิติเมื่อเปรียบเทียบกับวิธีการอื่นๆ ส่วนการเคลือบเมล็ดด้วย CMC, *B. subtilis* ที่อัตรา 0.5, 1.0 และ 2.0 มิลลิลิตร มีความยาวต้นและน้ำหนักสดต้นสูงมากกว่าวิธีการพอกเมล็ดทุกวิธีการแต่ไม่พบความแตกต่างในทางสถิติกับเมล็ดเปล่า

เอกสารอ้างอิง

- Accinelli, C., Abbas, H.K., Little, N.S., Kotowicz, J.K. and Shier, W.T. 2018. Biological control of aflatoxin production in corn using non-aflatoxigenic *Aspergillus flavus* administered as a bioplastic-based seed coating. **Crop Protection** 107(2018): 87-92.
- Arshad, M., Saleem, M. and Hussain, S. 2007. Perspectives of bacterial ACC deaminase in phytoremediation. **Trends in Biotechnology** 25(8): 356-362.
- Ashraf, M. and Foolad, M.R. 2005. Pre-sowing seed treatment-a shotgun approach to improve germination, plant growth, and crop yield under saline and non-saline conditions. **Advances in Agronomy** 88(2005): 223-271.
- Baki, A. and Anderson, J.D. 1973. Vigor determination in soybean seed by multiple criteria. **Crop Science** 13(6): 630- 633.
- Cakmakci, R., Erat, M., Erdogan, U. and Donmez, M.F. 2007. The influence of plant growth-promoting rhizobacteria on growth and enzyme activities in wheat and spinach plants. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science** 170(2): 288-295.
- Chanprasert, W. 2010. **Seed Physiology**. Department of Agronomy, Faculty of Agriculture, Kasetsart University, Bangkok. (in Thai)
- Chindaprasirt, P., Boonserm, K., Chairuangsi, T., Vichit-Vadakan, W., Eaimsin, T., Sato, T. and Pimraksa, K. 2011. Plaster material from waste calcium sulfate containing chemicals, organic fibers and inorganic additive. **Construction and Building Materials** 25: 3193-3203.
- Department of Internal Trad. 2020. **Situation of the Soybean Seed**. Available Source: <https://bit.ly/3pOcLkU>, October 28, 2021. (in Thai)
- Glick, B.R. 2012. Plant growth-promoting bacteria: mechanisms and applications. **Scientifica** 2012(5): 1-15. Article ID 963401.
- Glick, B.R., Cheng, Z., Czarny, J. and Duan, J. 2007. Promotion of plant growth by ACC deaminase-producing soil bacteria. **European Journal of Plant Pathology** 119(3): 329-339.
- ISTA. 2019. **International Rules for Seed Testing, Edition 2019**. International Seed Testing Association, Bassersdorf.
- Junges, E., Toebe, M., Feliciano dos Santos, R., Finger, G. and Muniz, M.F.B. 2013. Effect of priming and seed-coating when associated with *Bacillus subtilis* in maize seeds. **Revista Ciência Agronômica** 44(3): 520-526.
- Kangsopa, J. 2019. Seed Coating. **Journal of Agricultural Production** 1(2): 63-76. (in Thai)
- Kangsopa, J. 2020. Binder material for seed pelleting. **Khon Kaen Agriculture Journal** 48(1): 119-130. (in Thai).
- Keereetawee, R., Kaewmeechai, S., Chotiarnwong, A., Gong-in, S., Phothaen, N. and Kajonmalee, V. 1987. Soybean varietal improvement for rust resistance, pp. 49-58. *In Seminar Report: the 2nd Soybean Research*. Pitsanulok. (in Thai)

- Kesan, J.P. 2007. **Agricultural Biotechnology and Intellectual Property: Seeds of Change.** CAB International, Wallingford, UK.
- Khorasani, A.C. and Shojaosadati, S.A. 2017. Starch- and carboxymethylcellulose-coated bacterial nanocellulose-pectin bionanocomposite as novel protective prebiotic matrices. **Food Hydrocolloids** 63(2017): 273-285.
- Kloepper, J.W., Ryu, C.M. and Zhang, S. 2004. Induced systemic resistance and promotion of plant growth by *Bacillus* spp. **The American Phytopathological Society** 94(11): 1259-1266.
- Kundu, B.S. and Gaur, A.C. 1980. Establishment of nitrogen-fixing and phosphate-solubilizing bacteria in rhizosphere and their effect on yield and nutrient uptake of wheat crop. **Plant and Soil** 57(1980): 223-230.
- Lakshminarayana, K., Narula, N., Hooda, I.S. and Faroda, A.S. 1992. Nitrogen economy in wheat (*Triticum aestivum*) through use of *Azotobacter chroococcum*. **Indian Journal of Agricultural Sciences** 62(1): 75-76.
- Martínez, L.L., Peniche, R.M., Iturriaga, M.H. and Arvizu-Medrano, S.M. 2013. Characterization of rhizobacteria isolated from tomato and their effect on tomato and bell pepper growth. **Revista Fitotecnia Mexicana** 36(1): 63-69.
- Oteino, N., Lally, R.D., Kiwanuka, S., Lloyd, A., Ryan, D., Germaine, K.J. and Dowling, D.N. 2015. Plant growth promotion induced by phosphate solubilizing endophytic *Pseudomonas* isolates. **Frontier in Microbiology** 6(2015): 745.
- Pa-oblek, S. 2015. **Research and Development on Soybean.** Department of Agricultural, Bangkok. (in Thai)
- Pedrini, S., Merritt, D.J., Stevens, J. and Dixon, K. 2017. Seed Coating: Science or Marketing Spin?. **Trends in Plant Science** 22(2): 106-116.
- Priestley, D.A. 1986. **Seed Aging: Implications for Seed Storage and Persistence in the Soil.** Comstock Publishing Associates, London.
- Punsukumtana, L. 2009. Reuse Plaster. **Ceramics Journal** 3(3): 34-35. (in Thai)
- Ramyabharathi, S., Meena, B. and Raguchander, T. 2013. Induction of defense enzymes and proteins in tomato plants by *Bacillus subtilis* EPCO16 against *Fusarium oxysporum* f. sp. *Lycopersici*. **Madras Agricultural Journal** 100(Special Issue): 126-130.
- Rekha, P.D., Lai, W., Arun, A.B. and Young, C.C. 2007. Effect of free and encapsulated *Pseudomonas putida* CC-FR2-4 and *Bacillus subtilis* CC-pg104 on plant growth under gnotobiotic conditions. **Bioresource Technology** 98(2): 447-451.
- Rocha, I., Ma, Y., Carvalho, M.F., Magalhães, C., Janoušková, M. and Vosátka, M. 2019. Seed coating with inocula of *arbuscular mycorrhizal* fungi and plant growth promoting rhizobacteria for nutritional enhancement of maize under different fertilization regimes. **Archives of Agronomy and Soil Science** 65(1): 31-43.
- Rowe, R.C., Sheskey, P.J. and Quinn, M.E. 2009. **Handbook of Pharmaceutical Excipients.** 6th ed. Pharmaceutical Press, London.

- Siri, B. 2015. **Seed Conditioning and Seed Enhancements**. Klungnanawitthaya Priting, Khon Kaen. (in Thai).
- Taylor, A.G., Allen, P.S., Bennett, M.A., Bradford, K.J., Burris, J.S. and Misra, M.K. 1998. Seed enhancements. **Seed Science Research** 8(2): 245-256.
- Thomma, K. and Sirithorn, P. 2012. Effect of antagonistic bacterium *Bacillus subtilis* B006 as seed coating for control of *Botryosphaeria rhodina*, cause of gummosis disease. **Khon Kaen Agriculture Journal** 40(1): 53-60. (in Thai)
- Tu, L., He, Y.H., Shan, C.H. and Wu, Z.S. 2016. Preparation of microencapsulated *Bacillus subtilis* SL-13 seed coating agents and their effects on the growth of cotton seedlings. **BioMed Research International** 2016: 1-7. DOI: 10.1155/2016/3251357
- Widnyana, K.I. and Javandira, C. 2016. Activities *Pseudomonas* spp. and *Bacillus* sp. to stimulate germination and seedling growth of tomato plants. **Agriculture and Agricultural Science Procedia** 9(2016): 419-423.
- Yang, O., Li, C., Li, H., Li, Y. and Yu, N. 2009. Degradation of synthetic reactive azo dyes and treatment of textile wastewater by a fungi consortium reactor. **Biochemical Engineering Journal** 43(3): 225-230.
- Zaidi, S., Usmani, S., Singh, B.R. and Musarrat, J. 2006. Significance of *Bacillus subtilis* strain SJ 101 as a bioinoculant for concurrent plant growth promotion and nickel accumulation in *Brassica juncea*. **Chemosphere** 64(6): 991-997.