



วารสาร วิชาการเกษตร THAI AGRICULTURAL RESEARCH JOURNAL

ปีที่ 43 ฉบับที่ 3

กันยายน - ธันวาคม 2568

ISSN : 3027-7264 (Print) ISSN : 3027-7272 (Online)

สารบัญ

บทบรรณาธิการ	229
สุภรดา สุคนธาภิรมย์ ณ พัทลุง ผลงานวิจัย	
● การประเมินค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ของผลแดงโมพันธุ์ซอนญา ด้วยเทคนิคภาพสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้	230
เพชร สีสรรวง อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล อาทิตย์ พวงสมบัติ อมรเดช พุทธิพิพัฒน์ขจร แก้วกานต์ พวงสมบัติ	
● การออกแบบและพัฒนาเครื่องกำจัดวัชพืชแบบไม่ใช้สารเคมีต่อท้ายรถแทรกเตอร์	241
พงศ์พันธุ์ ปันมยุรา ประเทือง อุษาบริสุทธิ์ วัชรชาญ สุขเจริญวิภารัตน์ ชัยยะ จันทรา วันรัฐ อับดุลลาగాซิม	
● ความไวของเชื้อรา <i>Exserohilum turcicum</i> ต่อสารคาร์เบนดาซิมและประสิทธิภาพของ สารกำจัดเชื้อราในการควบคุมโรคใบไหม้แผลใหญ่ข้าวโพดในประเทศไทย	252
ธาดา นาคเงิน กิตติธัช ตราชู ศุภฤกษ์ ลี้มดลธรรม วีระณีย์ ทองศรี ธิดา เดชฮาบ ปัฐวิภา สงกุมาร	
● ความหลากหลายและสัณฐานวิทยาของพืชสกุล <i>Portulaca</i> L. (Portulacaceae)	265
กาญจนา พฤษพันธ์ ศิริพร ชิงสนธิพร ธัญชนก ศรีเมือง	
● การวิเคราะห์เสถียรภาพและศักยภาพแบบหลายสภาพแวดล้อมของสายพันธุ์ก้าวน้ำ มันสำปะหลังชุดลูกผสมปี 2561 ด้วย GGE Biplot	280
รุ่งรวี บุญทัง สุวลักษณ์ คັນสนีย์ นราชัย โพธิ์สาร ภาณุวัฒน์ มุลจันทะ ศิริลักษณ์ ล้านแก้ว สายชล แสงแก้ว นภา บุญสังข์ ฉัตรชีวิน ดาวใหญ่ จุฑามาศ เครื่องพาที	
● การประเมินผลผลิตและเนื้อสัมผัสของมันสำปะหลังบริโภคลูกผสมปี 2560	292
กุสุมา รอดแผ้วพาล กาญจนา กิระศักดิ์ ทนุธรรม บุญฉิม ศยามล แก้วบรรจง ฉัตรชีวิน ดาวใหญ่ ทิพย์ดรุณี สิทธินาม เฌอรัชต์พัชร เขียววิชัย ชฎาพร อินเปลี่ยน สุวลักษณ์ คັນสนีย์ ธนาวัต คำชู	
● การวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบค่าดัชนีการเกิดโรคและพื้นที่ได้กราฟพัฒนาการเกิดโรค เพื่อจำแนกระดับความรุนแรงของโรคใบไหม้แผลใหญ่	305
ธีรภูมิ วงศ์วรรณ์ เขาวนาถ พุทธิเทพ สุวรา วุฒิอำพล ภาณุวัฒน์ ศิลปศักดิ์ขจร	
● การชักนำสารและกลไกที่เกี่ยวข้องกับความต้านทานต่อศัตรูพืชในยาสูบ ด้วยสารสกัดสคอปอลเตินจากผลยอบ้าน	316
เขมมิการ์ โชมพัตร เขาวภา สุขพรมมา ปรียากร ฤทธิสุนทร ฐิติกร พรหมบรรจง วิมลวรรณ วัฒนวิจิตร	
● การผลิตฟิล์มชีวภาพจากสตาร์ชมันสำปะหลังโดยใช้ลิกนินและนาโนเซลลูโลส จากเปลือกทุเรียนเป็นสารเติมแต่ง	329
กนกศักดิ์ ลอยเลิศ ประยูร เอ็นมาก นภัสสร เลียบวัน สุกัญญา นิตยนต์ ศิวัช พลายเสน	

วารสารวิชาการเกษตร

เจ้าของ : กรมวิชาการเกษตร
สำนักงาน : กรมวิชาการเกษตร จตุจักร กรุงเทพฯ 10900
วัตถุประสงค์ : เพื่อเป็นสื่อกลางในการเผยแพร่ความรู้ผลงานวิจัย และนวัตกรรมวิชาการเกษตรด้านพืช

ที่ปรึกษา

อธิบดีกรมวิชาการเกษตร รองอธิบดีกรมวิชาการเกษตร
ผู้เชี่ยวชาญกรมวิชาการเกษตร เลขาธิการกรม ผู้อำนวยการสถาบันวิจัย ผู้อำนวยการกอง
ผู้อำนวยการสำนัก ผู้อำนวยการสำนักวิจัยและพัฒนาการเกษตร เขตที่ 1-8
ดร.อมรา ชินภูติ

บรรณาธิการ

ดร.สุภรดา สุคนธาภิรมย์ ณ พัทลุง กรมวิชาการเกษตร

ผู้ช่วยบรรณาธิการ

วลัยพร ศะศิประภา ข้าราชการเกษียณอายุ
ดร.กาญจนา พฤษพันธ์ สำนักคุ้มครองพันธุ์พืช กรมวิชาการเกษตร
ดร.สายน้ำ อุดพวย กองวิจัยพัฒนาปัจจัยการผลิตทางการเกษตร กรมวิชาการเกษตร

กองบรรณาธิการ

ภายในหน่วยงาน

อำนวยการ อรรถสิทธิ์ อรรถสิทธิ์ สถาบันวิจัยพืชสวน กรมวิชาการเกษตร
ดร.ศุภกาญจน์ ล้วนมณี กองวิจัยพัฒนาปัจจัยการผลิตทางการเกษตร กรมวิชาการเกษตร
ศุภมาศ กลิ่นขจร กองวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร กรมวิชาการเกษตร
ดร.พัชรวิพรรณ จงจิตเมตต์ สำนักวิจัยพัฒนาการอารักขาพืช กรมวิชาการเกษตร
ดร.จิราพร แก่นทรัพย์ สำนักวิจัยพัฒนาเทคโนโลยีชีวภาพ กรมวิชาการเกษตร

ภายนอกหน่วยงาน

ดร.สิญชัย ตันตยาภรณ์ สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ (มกอช)
ดร.พรพิมล อธิปัญญาคม ข้าราชการเกษียณอายุ
สุภาชิต เสงี่ยมพงศ์ ข้าราชการเกษียณอายุ
ดร.จรัญ ดิษฐไชยวงศ์ ข้าราชการเกษียณอายุ
วิษณีย์ ออมทรัพย์สิน ข้าราชการเกษียณอายุ
รศ.ดร.คำรณวิทย์ ทิพย์มณี คณะเทคโนโลยีการเกษตร สถาบันเทคโนโลยีพระจอมเกล้าเจ้าคุณทหารลาดกระบัง
รศ.ดร. สนธิชัย จันทน์เปรม คณะเกษตร กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
ผศ.ดร.รุ่งอรุณ ทิศกระโทก คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์
รศ.ดร.พฤษภา หล้าวงษา คณะเกษตรศาสตร์ มหาวิทยาลัยขอนแก่น
รศ.ดร.นพพล อรุณรัตน์ คณะสิ่งแวดล้อมและทรัพยากรศาสตร์ มหาวิทยาลัยมหิดล
ผศ.ดร.บุญสม บุษบรรณณ์ คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยเชียงใหม่
ผศ.ดร.พรชัย ทาระโคตร คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยธรรมศาสตร์
ดร.วันพร เข็มมุกด์ สำนักวิจัยและพัฒนาอารักขาข้าว กรมการข้าว
พัชรินทร์ ศรีวารินทร์ การยางแห่งประเทศไทย

ผู้จัดการ

ผู้อำนวยการกลุ่มระบบวิจัย กองแผนงานและวิชาการ กรมวิชาการเกษตร

ผู้ช่วยผู้จัดการ

ดนยา คล้ายมาลา กองแผนงานและวิชาการ กรมวิชาการเกษตร



วารสาร วิชาการเกษตร

THAI AGRICULTURAL RESEARCH JOURNAL ISSN : 3027-7264

ปีที่ 43 ฉบับที่ 3

กันยายน - ธันวาคม 2568



วารสารวิชาการเกษตร ตีพิมพ์เผยแพร่ความรู้ผลงานวิจัย และนวัตกรรมวิชาการเกษตรด้านพืช มีกำหนดออกปีละ 3 ฉบับ ฉบับที่ 1 ตั้งแต่เดือนมกราคม-เมษายน ฉบับที่ 2 เดือนพฤษภาคม-สิงหาคม ฉบับที่ 3 เดือนกันยายน-ธันวาคม ของทุกปี โดยผลงานวิจัยทุกเรื่องที่ได้รับการตีพิมพ์ในวารสารวิชาการเกษตร ได้ผ่านการพิจารณาแบบ double blind system จากผู้ทรงคุณวุฒิทั้งภายในและภายนอกหน่วยงานอย่างน้อย 2 ท่าน วารสารมีระบบการจัดการวารสารแบบออนไลน์ โดยไม่มีค่าธรรมเนียมการตีพิมพ์ และทำการจัดพิมพ์ เผยแพร่แก่ห้องสมุดของหน่วยงานราชการ รวมทั้งองค์การต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง

บทบรรณาธิการ

วารสารวิชาการเกษตรฉบับนี้ เป็นปีที่ 43 ฉบับที่ 3 ประจำเดือน กันยายน - ธันวาคม 2568 มีเนื้อหา ความก้าวหน้างานวิจัยด้านการเกษตร และเป็นแหล่งเผยแพร่ข้อมูลการเกษตรสำหรับผู้สนใจ ทางวารสารได้คำนึง มาตรฐานและคุณภาพของบทความวิจัยที่ตีพิมพ์ โดยบทความทุกเรื่องได้ผ่านการประเมินและพิจารณาแก้ไข (peer review) จากผู้ทรงคุณวุฒิที่มีความเชี่ยวชาญในสาขาที่เกี่ยวข้องอย่างน้อย 2 ท่าน

ข้อมูลและความรู้จากบทความในวารสารสามารถนำไปประยุกต์ปรับใช้ในการพัฒนาการเกษตร โดยใน ฉบับนี้มี 9 บทความ เกี่ยวข้องกับการพัฒนาพันธุ์มันสำปะหลัง 2 เรื่อง คือ การวิเคราะห์เสถียรภาพและศักยภาพ ของสายพันธุ์ก้าน้ำมันสำปะหลังชุดลูกผสมในหลายสภาพแวดล้อม และการประเมินผลผลิตและเนื้อสัมผัสของ มันสำปะหลังบริโภคนึ่งสุก 1 เรื่อง คือ เครื่องกำจัดวัชพืชแบบใช้เปลวไฟและน้ำร้อน ด้านอารักขาพืช 3 เรื่อง คือ ความไวของเชื้อรา *Exserohilum turcicum* ต่อสารคาร์เบนดาซิมและประสิทธิภาพของสารกำจัดเชื้อราในการ ควบคุมโรคใบไหม้แผลใหญ่ในข้าวโพด การพัฒนาเทคนิคการจำแนกระดับความรุนแรงของโรคใบไหม้แผลใหญ่ใน ข้าวโพด และการชักนำต้นยาสูบให้ต้านทานต่อศัตรูพืชด้วยสารสกัดสคอพอเลตินจากผลยอบ้าน บทความด้านการ เก็บเกี่ยวผลผลิตเกษตร โดยนำเทคนิคภาพสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ประเมินค่าปริมาณของแข็งที่ละลาย ได้ของผลแตงโม บทความด้านการใช้ประโยชน์จากเปลือกทุเรียนในการผลิตฟิล์มชีวภาพ และสุดท้ายเป็นบทความ เกี่ยวกับความหลากหลายและสัณฐานวิทยาของพืชสกุล *Portulaca* L.

ทางวารสารหวังเป็นอย่างยิ่งว่า ท่านผู้อ่านจะได้รับประโยชน์จากการค้นคว้าหาความรู้จากบทความต่าง ๆ ในวารสารวิชาการเกษตรฉบับนี้ ท้ายสุดนี้ขอขอบคุณผู้เขียนบทความที่ส่งบทความวิจัยเพื่อตีพิมพ์เผยแพร่ใน วารสาร ผู้ทรงคุณวุฒิที่กรุณากลับกรองคุณภาพบทความ ทำให้บทความมีความสมบูรณ์ และกองบรรณาธิการ ทุกท่านที่ได้กรุณาสละเวลาให้ข้อเสนอแนะอันเป็นประโยชน์ ความร่วมมือและช่วยเหลือจากทุกฝ่ายมีส่วนอย่างมาก ในการปรับปรุงบทความที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการเกษตรให้มีความสมบูรณ์ยิ่งขึ้น



(ดร. สุภรดา สุคนธาภิรมย์ ณ พัทลุง)

บรรณาธิการวารสารวิชาการเกษตร

การประเมินค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้ของผลแตงโมพันธุ์ซอนย่า
ด้วยเทคนิคภาพสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้

Evaluation of Total Soluble Solid in Sonya Watermelon Fruits Using
Near Infrared Spectroscopy Hyperspectral Imaging Technique

เพชร สืบสรวง^{1/} อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล^{1/} อาทิตย์ พวงสมบัติ^{1/} อมรเดช พุทธิพิพัฒน์ขจร^{1/} แก้วกานต์ พวงสมบัติ^{1/*}
Pachara Subsueg^{1/} Anupun Terdwongworakul^{1/} Arthit Phuangsoambut^{1/}
Amorndej Puttipatkaorn^{1/} Kaewkarn Phuangsoambut^{1/*}

Received 30 Apr. 2025/Revised 8 Jul. 2025/Accepted 8 Jul. 2025

ABSTRACT

Near-infrared hyperspectral imaging (NIR-HSI) is a rapid accurate, and non-destructive technique for analyzing the composition and internal quality of agricultural products. This study aimed to develop a method for assessing the internal quality of the 'Sonya' watermelon cultivar using NIR-HSI by constructing a predictive model for total soluble solids (TSS) content based on 100 watermelon samples. The reflectance spectra were measured in the wavelength range of 900–1700 nm. The obtained data were in the form of hypercube spectral data, and an equation was created to predict the total soluble solids content using the partial least squares regression technique. The best prediction equation had a correlation coefficient of 0.977, a root mean square error of 0.231 °Bx and a bias of 0.047, indicating that it was effective for quality assessment. Additionally, the absorbance values from each pixel of the hypercube data were used to create a map showing the distribution of TSS in the watermelon samples. The findings of this study demonstrate that NIR-HSI can effectively predict TSS content and visualize its spatial distribution within whole watermelons, highlighting its potential application in future automated systems for watermelon quality grading.

Keywords: total soluble solid; watermelon fruits; near infrared spectroscopy; hyperspectral imaging technique; near infrared spectroscopy

^{1/} คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จ.นครปฐม 73140

^{1/} Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University, Kamphaeng Saen Campus, Nakhon Pathom 73140, Thailand

* Corresponding author: fengkkb@ku.ac.th

บทคัดย่อ

เทคนิคภาพสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (near-infrared hyperspectral imaging, NIR-HSI) เป็นเทคนิคการตรวจสอบองค์ประกอบและคุณภาพภายในของผลิตภัณฑ์เกษตรแบบไม่ทำลายตัวอย่างที่รวดเร็วและแม่นยำ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อพัฒนาการประเมินคุณภาพภายในของแตงโมพันธุ์ซอนญาโดยใช้เทคนิค NIR-HSI พัฒนาแบบจำลองในการทำนายปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (total soluble solids, TSS) จากตัวอย่างแตงโม 100 ผล วัดสเปกตรัมการสะท้อนกลับของแสงในช่วงความยาวคลื่น 900–1,700 nm ข้อมูลที่ได้อยู่ในรูปแบบสเปกตรัมข้อมูลสามมิติ นำมาสร้างสมการทำนายค่าปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ด้วยเทคนิค partial least squares regression พบว่า สมการทำนายที่ดีที่สุดมีค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ 0.977 ค่ารากที่สองของความคลาดเคลื่อนเฉลี่ย 0.231°Bx และค่า bias ที่ 0.047 ซึ่งบ่งบอกถึงสมการทำนายมีประสิทธิภาพสำหรับการประเมินคุณภาพได้ และสามารถนำค่าการดูคลื่นแสงของแต่ละพิกเซลจากข้อมูล hypercube มาแสดงแผนภาพการกระจายตัวของค่า TSS ของผลแตงโม ผลการศึกษายังแสดงให้เห็นความเป็นไปได้ของการใช้เทคนิค NIR-HSI เพื่อทำนายค่า TSS และแสดงภาพการกระจายตัวของค่า TSS ของทั้งผลแตงโม จึงสามารถนำไปประยุกต์ใช้ในระบบคัดแยกคุณภาพแตงโมในระดับอุตสาหกรรมในอนาคต

คำสำคัญ: ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้; แตงโม; เทคนิคภาพสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้; สเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้

บทนำ

แตงโมเป็นหนึ่งในสินค้าที่สร้างรายได้เข้าสู่ประเทศเป็นอย่างมาก เป็นพืชที่ปลูกง่าย สามารถปลูกได้ตลอดปี ในการเก็บเกี่ยวผลผลิตแตงโมเพื่อ

จำหน่ายเกษตรกรและผู้ประกอบการทั้งในประเทศและต่างประเทศมักประสบปัญหาการคัดเลือกผลแตงโมที่มีคุณภาพตามมาตรฐานสินค้าเกษตร ผลแตงโมมีปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้ทั้งหมด (total soluble solids, TSS) ต่ำกว่า 9°Bx หรือผลมีความผิดปกติด้านรูปทรง ผลมีรอยขีด และมีเนื้อข้างภายใน เป็นต้น (สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ, 2555) ซึ่งอาจเกิดจากหลายสาเหตุ เช่น พันธุ์ พื้นที่เพาะปลูกไม่เหมาะสม และมีแมลงศัตรูพืชรบกวน รวมถึงปัญหาที่เกิดขึ้นระหว่างการขนส่ง เป็นต้น ดังนั้นแนวทางในการแก้ปัญหานี้ควรต้องมีการหาวิธีการตรวจสอบและคัดผลแตงโมให้ได้คุณภาพดี มีความหวาน ที่ตามกำหนด และเนื้อไม่ขี้

ปัจจุบันมีวิธีการตรวจสอบคุณภาพผลแตงโมโดยการสุ่มผลแตงโมในแต่ละรอบของการเก็บเกี่ยวมาเคาะเพื่อตรวจสอบความขี้ (Simón-Portillo et al., 2023) การเคาะเพื่อตรวจสอบไส้ลมในแตงโม และผ่าผลเพื่อตรวจสอบความหวาน TSS หรือค่าบริกซ์ ($^{\circ}\text{Bx}$) ซึ่งหมายถึงปริมาณของของแข็งที่ละลายได้ในน้ำทั้งหมดที่ใช้บ่งชี้ความเข้มข้นของอาหารเหลว เช่น น้ำเชื่อม น้ำผลไม้เข้มข้น ในการวิเคราะห์หา TSS ทำได้โดยใช้น้ำแตงโมที่กรองแล้ววัดด้วยเครื่องรีแฟกโต (Torge et al., 1994; Chiatrakul et al., 2022) ซึ่งวิธีนี้ค่อนข้างยุ่งยากในเรื่องการเตรียมตัวอย่าง และเป็นการทดสอบแบบทำลายตัวอย่าง ทั้งยังต้องอาศัยความชำนาญของผู้ปฏิบัติงาน ดังนั้นเพื่อเป็นการลดขั้นตอนและระยะเวลาในการวัดคุณภาพผลแตงโมในห้องปฏิบัติการ จึงมีการนำเทคนิคสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ (near-infrared spectroscopy, NIRS) เข้ามาใช้ในการตรวจวัดคุณภาพของผลผลิตทางการเกษตรโดยไม่ทำลายตัวอย่าง เทคนิคนี้มีความรวดเร็ว และแม่นยำ เนื่องจากเทคนิค NIRS อาศัยหลักการวัดสเปกตรัมการดูดกลืนแสงของสารประกอบอินทรีย์ที่มีพันธะ

C-H O-H หรือ N-H ซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักในผลผลิตเกษตรและอาหาร เทคนิคนี้เป็นวิธีการที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในการนำมาตรวจสอบคุณภาพภายในผลผลิตเกษตร (Workman and Weyer, 2012)

Vega-Castellote et al. (2022) ใช้เครื่อง NIR แบบ linear variable filters (LVF) ซึ่งเป็นแบบพกพาในการตรวจสอบความสุกของแตงโมแบบไม่ทำลายตัวอย่าง พบว่า ทำนายความหวานได้แม่นยำ โดยเฉพาะในแตงโมเปลือกเขียวเข้ม สามารถจำแนกความสุกได้ถูกต้องถึง 82.2% แสดงว่าเทคโนโลยีนี้สามารถใช้ช่วยตัดสินใจเก็บเกี่ยวแตงโมในไรได้จริง Vega-Castellote et al. (2023) ใช้เครื่อง NIR ตรวจสอบความสุกแตงโมแบบไม่ทำลายตัวอย่าง พบว่า แสงสามารถทะลุได้ลึกสุด 11 มม. และทำนายค่าความหวานได้แม่นยำ ($R^2 = 0.81$) Tian et al. (2007) พัฒนาวิธีวัดปริมาณของแข็งที่ละลายได้ในแตงโมแบบไม่ทำลายตัวอย่างด้วยเทคนิค Vis/NIR diffuse transmittance (350–1,000 nm) วิเคราะห์สเปกตรัมด้วย PLS และ PCR พบว่า PLS กับสเปกตรัมอนุพันธ์ลำดับแรกให้ผลแม่นยำสูง ($r=0.918-0.954$ RMSEP=0.58–0.65 °Bx) วิธีนี้เหมาะสำหรับผลไม้เปลือกหนาและรูปทรงไม่สม่ำเสมอ อย่างไรก็ตาม การใช้เทคนิค NIRS ดังกล่าวข้างต้นยังมีข้อจำกัด เนื่องจากเป็นเพียงการตรวจสอบ TSS สามารถทำการวัดค่าได้ครั้งละ 1 ตำแหน่ง ได้ค่าสเปกตรัมออกมาเพียงค่าเดียว จึงมีการพัฒนาและประยุกต์ใช้เทคนิคภาพสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ หรือภาพถ่ายไฮเปอร์สเปกตรัม (hyperspectral imaging: HSI) ซึ่งเป็นเทคนิคที่รวมการถ่ายภาพกับการวิเคราะห์สเปกตรัมในหลายช่วงความยาวคลื่นพร้อมกัน ทำให้สามารถตรวจสอบคุณภาพภายในของวัตถุได้แบบไม่ทำลาย โดยได้ข้อมูลทั้งด้านตำแหน่งภาพและองค์ประกอบทางเคมีในรูปแบบสามมิติ (hypercube) ซึ่งช่วยเพิ่มความแม่นยำในการ

วิเคราะห์มากกว่าการถ่ายภาพทั่วไปหรือสเปกตรัมเพียงอย่างเดียว (Manley, 2014) จากข้อได้เปรียบนี้ไม่เพียงแต่ NIR-HSI สามารถทำนายค่าต่าง ๆ ที่เกี่ยวข้อง กับคุณภาพได้ครอบคลุมพื้นที่ของตัวอย่างเท่านั้น ยังแสดงภาพของการกระจายตัวของค่าองค์ประกอบของตัวอย่างได้ด้วยการทำแผนที่ (mapping) ช่วยให้เห็นตรวจสอบประเมินตัวอย่างที่มีความต่างกัน และมีปริมาณมากได้ในเวลาเดียวกัน

ในอดีตมีงานวิจัยที่ประยุกต์ที่ใช้ NIR-HSI กับผลผลิตทางการเกษตร เช่น การวิเคราะห์การกระจายตัวของ TSS ในผลกีวี ซึ่ง Martinsen and Schaare (1998) พบว่า ตัวอย่างกีวีที่มี TSS ในอยู่ในช่วง 4.7–14.1°Bx มีค่า SEP 1.2°Bx นอกจากนี้ Rungpichayapichet et al. (2017) ทำการวัดคุณสมบัติภายในของผลมะม่วง ได้แก่ ความแน่นเนื้อ TSS และปริมาณกรดที่ไตเตรทได้ พบว่า มีค่า R^2 0.81 0.50 และ 0.81 ตามลำดับ ค่า RMSE 2.83 นิวตัน 2.0 และ 0.24% ตามลำดับ แผนภาพการกระจายตัวแสดงให้เห็นถึงปริมาณ TSS มีค่ามากที่ตำแหน่งขั้วของผลมะม่วง นอกจากนี้ Bonifazi et al. (2022) ได้ใช้เทคนิค SWIR-HSI เพื่อวิเคราะห์จำแนกเมล็ดแตงโมที่งอกและไม่งอกแบบไม่ทำลายตัวอย่างด้วยโมเดล PLS-DA ได้ความแม่นยำในการจำแนกสูง (accuracy 96.4% sensitivity 0.72 specificity 0.98) แสดงว่าเทคนิคดังกล่าวสามารถนำมาใช้คัดแยกเมล็ดก่อนเพาะได้อย่างมีประสิทธิภาพ ต่อมา Qi et al. (2024) ได้ใช้เทคโนโลยีภาพถ่ายไฮเปอร์สเปกตรัมร่วมกับโมเดล deep learning ได้แก่ LeNet GoogLeNet และ ResNet เพื่อจำแนกเมล็ดพันธุ์แตงโม 10 พันธุ์แบบไม่ทำลาย และเพิ่มประสิทธิภาพด้วยการรวมผลผ่านกลไกการให้คะแนน (scoring mechanism) ซึ่งช่วยลดข้อผิดพลาดของแต่ละโมเดลย่อย ซึ่งพบว่า โมเดลแบบรวม deep learning ทั้ง 3 รูปแบบร่วมกันให้ความแม่นยำสูงสุดถึง 87.9%

แสดงให้เห็นว่าเทคนิคนี้มีความเหมาะสมและแม่นยำในการคัดแยกเมล็ดพันธุ์แดงโม

จากข้อมูลข้างต้นชี้ว่าเทคนิค NIR-HSI สามารถนำมาใช้ในการประเมินและทำนายค่าองค์ประกอบ และตรวจสอบความเสียหายของผลผลิตทางการเกษตรได้ และการใช้เทคนิค NIR-HSI ในการสร้างแผนภาพการกระจายตัวของค่า TSS ของตัวอย่างแดงโมที่ไม่ผ่านการทำลายตัวอย่างมีความเป็นไปได้ที่จะสามารถนำมาประยุกต์ใช้กับการตรวจสอบคุณภาพแบบรวดเร็วของผลแดงโม ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงศึกษาการประยุกต์ใช้เทคนิค NIR-HSI ในการทำนายค่า TSS ของผลแดงโมพันธุ์ขอนแก่น และสร้างแผนภาพการกระจายตัว เพื่อสามารถนำไปใช้เป็นตัวชี้ในการจัดเกรดผลผลิต และตัดสินความเหมาะสมในการเก็บเกี่ยวแดงโมพันธุ์ขอนแก่นในอนาคต

อุปกรณ์และวิธีการ

1. การเตรียมตัวอย่าง

สุ่มตัวอย่างผลแดงโมพันธุ์ขอนแก่นอายุ 70–85 วัน นับหลังจากวันที่เมล็ดงอกซึ่งเป็นระยะเก็บเกี่ยว (ธวัช, 2520) เนื่องจากในการสร้างสมการจำเป็นต้องให้มีความหลากหลายของตัวอย่างเพื่อให้สมการทำนายที่ได้ครอบคลุมกับตัวอย่างที่นำมาทดสอบมากที่สุด จึงมีช่วงการเก็บเกี่ยวที่กว้างประมาณ 15 วัน โดยสุ่มตัวอย่างผลแดงโมพันธุ์ขอนแก่นจาก อ.อุ้มทอง จ.สุพรรณบุรี 100 ผล น้ำหนัก 3-4 กก. นำตัวอย่างไปยังห้องปฏิบัติการภาควิชาวิศวกรรมเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน ทำการวัดคุณสมบัติทางกายภาพก่อนทำการวัดค่าการดูดกลืนแสงด้วยเทคนิค NIR-HSI

2. การวัดค่าสเปกตรัมและข้อมูลภาพถ่าย

ทำการวัดสเปกตรัมด้วยเครื่อง NIR hyperspectral imaging (VLNIR-CL-100-N17E, SPECIM SisuCHEMA,

Spectral Imaging Ltd., Oulu, Finland) มีช่วงบันทึกภาพ 320x256 พิกเซล และมีช่วงการวัดค่าที่ความยาวคลื่น 900-1,700 nm ความละเอียด (resolution) 3.2 nm มีชุดหลอดไฟทั้งสเตนฮาโลเจน (tungsten-halogen light sources) 20 W (DECOSTAR, Carrollton, GA, US.) 3 หลอดด้านหัว และอีก 3 หลอดด้านท้าย ทำมุม 45° กับตัวอย่างในแนวระดับ กล้องถ่ายภาพ CCD มีขนาด 320x256 พิกเซล (Xeva 992, Xenics Infrared Solution Ltd., Oulu, Finland) ก่อนการวัดตัวอย่างทุกครั้งต้องมีการวัดค่าอ้างอิงก่อนโดยการวัดค่า dark (0% reflectance) และ white (99.9% reflectance) ซึ่งการวัดค่าอ้างอิง dark ทำโดยการปิดชัตเตอร์เลนส์กล้อง CCD และการวัดค่าอ้างอิง white ทำโดยใช้แท่งสเปกตรานอน (spectranal) สีขาวที่มีขนาด 2.5x20x0.98 ซม. และชุดโปรแกรมควบคุมการทำงาน Specim's LUMO Software Suite (Spectral Imaging Ltd., Oulu, Finland) นำตัวอย่างแดงโมวางบนแท่นหมุนซึ่งวางอยู่บนแพลตฟอร์ม (translational moving platform) และเคลื่อนที่ผ่านเซนเซอร์รับแสง (Figure 1) ด้วยความเร็ว 10 mm/s เมื่อแดงโมเคลื่อนผ่านใต้กล้องอุปกรณ์จะหยุดใต้กล้อง และทำการหมุนแดงโมพร้อมกับบันทึกภาพจนครบหนึ่งรอบเพื่อให้ได้ข้อมูลครบรอบของผลแดงโม ข้อมูลความยาวคลื่น (spectral) และข้อมูลตำแหน่ง (spatial) ได้รับการรวบรวมและบันทึกอยู่ในรูปแบบของข้อมูล 3 มิติ โดยข้อมูลของตำแหน่งอยู่ในรูปของแกน x (ขนาด 320 พิกเซล) และแกน y ตามความยาวของวัตถุที่เคลื่อนที่ผ่านใต้เซนเซอร์รับภาพในแต่ละพิกเซลจะมีข้อมูลสเปกตรัม (แกน z) รวมทั้งสิ้น 256 ช่วงคลื่น ข้อมูลสเปกตรัมของค่าการดูดกลืนแสงในทุกตำแหน่งของพื้นผิวแดงโมนำมาเฉลี่ยก่อนทำการปรับแต่งข้อมูล และวิเคราะห์ผลเพื่อสร้างสมการทำนายค่า TSS

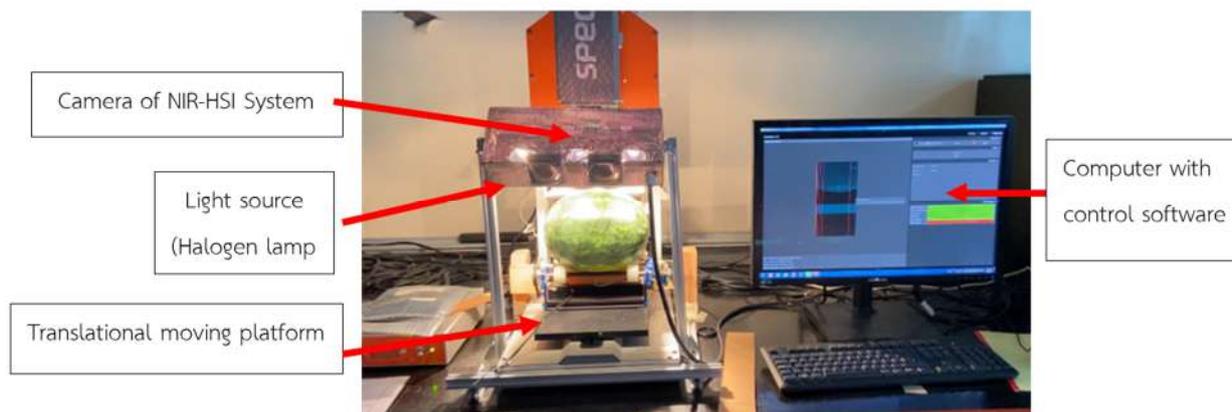


Figure 1 The operation of the watermelon rotation apparatus during measurement with the NIR-HSI device

3. การวิเคราะห์ปริมาณของแข็งที่ละลายน้ำได้

หลังจากการวัดค่าการดูดกลืนแสงตัวอย่าง แดงโมด้วยเทคนิค NIR-HSI แล้ว นำตัวอย่างแดงโม ไปวิเคราะห์หาค่า TSS จากน้ำคั้นของแดงโมทั้งผล โดยทำการวัดค่า 3 ซ้ำ การตรวจสอบหา TSS โดยใช้เครื่อง digital refractometer (Atago PAL-1 Brix Refractometer, Japan) ย่านการวัดในช่วง 0.0 ถึง 53.0%

4. การวิเคราะห์ข้อมูลและการสร้างสมการเทียบมาตรฐาน

ค่าสเปกตรัมของการดูดกลืนแสงที่ได้จากเทคนิค NIR-HSI เฉพาะในส่วนพื้นผิวของแดงโม ถูกนำมาคำนวณหาค่าเฉลี่ยของบริเวณที่เลือกใช้เป็นตัวแทน โดยใช้โปรแกรม Evince (Prediktera, Ume, Sweden) เพื่อเป็นข้อมูลสำหรับวิเคราะห์และสร้างสมการทำนายค่าคุณภาพของแดงโมด้วยเทคนิค partial least squares regression (PLSR) โดยใช้โปรแกรม The Unscrambler 9.8 (Camo, Oslo, Norway)

จากข้อมูลแดงโม 100 ผล นำมาพัฒนาสมการทำนาย TSS แบ่งเป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่ม calibration 67 ตัวอย่าง และกลุ่ม validation 33 ตัวอย่าง ซึ่งมี TSS อยู่ในช่วง 6.21–12.00°Bx (Table 1) คัดเลือกตัวอย่างให้ครอบคลุมค่าต่ำสุดและสูงสุดของตัวแปร

ทั้งหมด และตัดช่วงสเปกตรัมที่อาจเกิดสัญญาณรบกวนออก เพื่อเพิ่มประสิทธิภาพในการทำนาย เลือกใช้ช่วงความยาวคลื่น 900–1,700 nm ก่อนการสร้างสมการ มีการตรวจสอบค่าผิดปกติ (outliers) ของข้อมูล TSS โดยใช้วิธี Z-score ซึ่งพิจารณาจากเกณฑ์ $|Z| > 3$ ข้อมูลที่ไม่ใช่ outlier เท่านั้นที่นำมาใช้ในการสร้างสมการ เพื่อเพิ่มความแม่นยำและความน่าเชื่อถือของโมเดล ได้ทำการปรับแต่งเส้นสเปกตรัมเพื่อลดสัญญาณรบกวน (noise) ด้วยวิธีการทางคณิตศาสตร์ ได้แก่ วิธี smoothing แบบ Savitzky-Golay (Smt) first derivative (1D) second derivative (2D) แบบ Savitzky-Golay standard normal variate (SNV) และการรวมเทคนิคปรับแต่งสเปกตรัมผสมตั้งแต่สองเทคนิคขึ้นไป เพื่อเพิ่มความชัดเจนของพีคการดูดกลืนแสง

จากนั้นนำข้อมูลที่ผ่านการปรับแต่งสเปกตรัมไปพัฒนาเป็นสมการทำนายด้วยเทคนิค PLSR ประเมินโดยวิธี cross-validation โดยประเมินประสิทธิภาพความแม่นยำของสมการด้วยค่าทางสถิติ ได้แก่ ค่าสัมประสิทธิ์สหสัมพันธ์ระหว่างค่าที่ทำนายได้และค่าจริง (correlation coefficient, r) ค่ารากที่สองของค่าความคลาดเคลื่อนกำลังสองเฉลี่ย (root mean squared error of prediction, RMSEP) และค่าความผิดพลาดเฉลี่ยในการทำนาย (bias) โดยโมเดลที่เหมาะสมที่สุด

ควรมีค่า r สูง RMSEP ต่ำ bias ต่ำ และค่า factor ที่เหมาะสมที่สุดตามข้อมูลและโมเดลใน PLSR ที่

เหมาะสมควรเป็นค่าที่ทำให้ความคลาดเคลื่อนจากการ cross-validation ต่ำที่สุด

Table 1 Description statistics of total soluble solid (TSS) in watermelon for calibration and validation set

Sample set	Number of samples	Min	Max	Standard deviation
Calibration	67	6.21	12.0	1.47
Validation	33	7.21	11.9	1.46

5. การกระจายตัวของค่าปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้

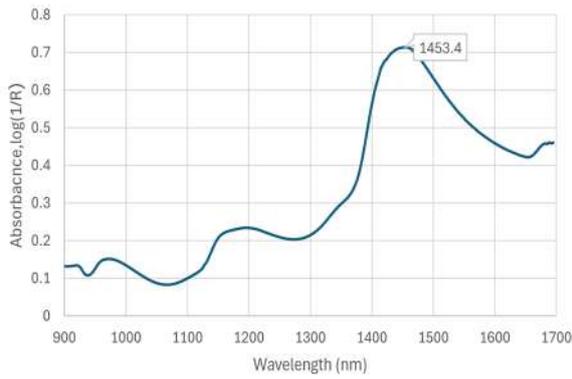
สมการทำนายที่สร้างมาจากข้อมูลการดูดกลืนของสเปกตรัมเฉลี่ยจาก NIR-HSI ที่ผ่านการปรับแต่งข้อมูลสเปกตรัม และข้อมูล TSS เฉลี่ย จากการวัดค่าด้วยวิธีการมาตรฐาน นำมาใช้ในการทำนายค่า TSS ในแต่ละพิกเซลของภาพสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ด้วยการใช้โปรแกรม Matlab R2020b (MathWorks, Natick, MA, USA) ในการประมวลผล TSS แสดงเป็นสีต่างๆ (jet colormap) โดยสีแดงแสดงถึงปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ที่มีค่าสูง และสีน้ำเงินแสดงถึงปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ที่มีค่าต่ำ แผนภาพการกระจายตัวที่ได้สามารถเปรียบเทียบปริมาณของแข็งทั้งหมดที่ละลายน้ำได้ที่แตกต่างกันในแต่ละตำแหน่งของแตงโมเพื่อบ่งบอกถึงคุณภาพของแตงโมได้

ผลการทดลองและวิจารณ์

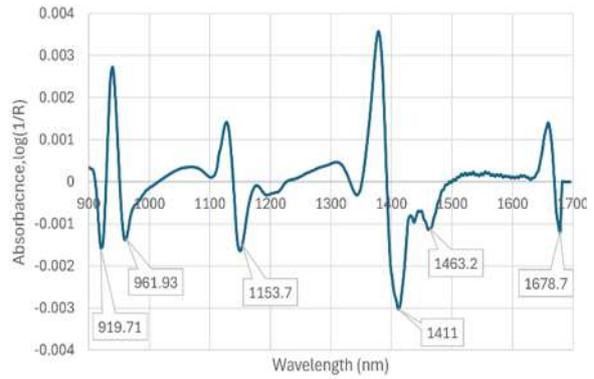
1. ค่าสเปกตรัมและข้อมูลภาพถ่าย

จากการวัดการดูดกลืนแสงของผลแตงโมในช่วง 900–1,700 nm ด้วยเครื่อง NIR-HSI พบว่าในช่วงความยาวคลื่น 1,400–1,500 nm มีการดูดกลืนแสงที่มากที่สุด ซึ่งแตงโมมีน้ำเป็นองค์ประกอบหลักสูงถึง 90–92% ทั้งในส่วนเปลือกและเนื้อ การวิเคราะห์คุณภาพภายในผลแตงโมด้วยเทคนิค NIR-HSI แสดงให้เห็นว่าในช่วง

ความยาวคลื่น 1,400–1,500 nm ซึ่งเป็นช่วงของโอเวอร์โทนอันดับหนึ่งของพันธะ O–H มีการดูดกลืนแสงอย่างชัดเจน โดยเฉพาะที่ความยาวคลื่น 1,450 nm ซึ่งสัมพันธ์กับการดูดกลืนของน้ำ และ 1,480 nm ซึ่งสัมพันธ์กับกลูโคส (Workman and Weyer, 2012) อย่างไรก็ตาม พิกเซลในช่วงนี้มักทับซ้อนกันระหว่างน้ำและองค์ประกอบสำคัญอื่น ๆ ส่งผลให้การวิเคราะห์คุณภาพบางประการทำได้ไม่ชัดเจน จากการวิเคราะห์สเปกตรัมดิบในช่วง 900–1,700 nm พบว่า พิกเซลที่เกี่ยวข้องกับน้ำบดบังพิกเซลของน้ำตาลบางชนิด (Figure 2A) จึงมีการปรับแต่งข้อมูลด้วยเทคนิคอนุพันธ์อันดับสองแบบ Savitzky-Golay เพื่อแยกพิกเซลที่สำคัญได้ชัดเจนยิ่งขึ้น (Figure 2B) ซึ่งได้พิกเซลเด่นที่ตำแหน่ง 919.7 961.9 1,153.7 1,411 1,463.2 และ 1,678.7 nm โดยพิกเซลเหล่านี้สัมพันธ์กับการสั่นของพันธะ C–H และ O–H ที่พบในโมเลกุลของน้ำและน้ำตาล (Workman and Weyer, 2012) จากข้อมูลองค์ประกอบของแตงโม พบว่า นอกจากน้ำซึ่งเป็นองค์ประกอบหลักแล้ว ยังมีน้ำตาล 6–7% โยอาหาร 0.4–0.6% โปรตีน 0.5% และไขมัน 0.2% ชนิดของน้ำตาลที่พบมากที่สุด คือ ฟรุคโตส รองลงมาคือ กลูโคส และซูโครส (Maheshwari et al., 2022) ซึ่งสารเหล่านี้ล้วนมีโครงสร้างโมเลกุลที่ตอบสนองต่อคลื่นในช่วงอินฟราเรดย่านใกล้ และสามารถใช้เป็นดัชนีบ่งชี้คุณภาพภายในของแตงโมได้อย่างแม่นยำ



(A)



(B)

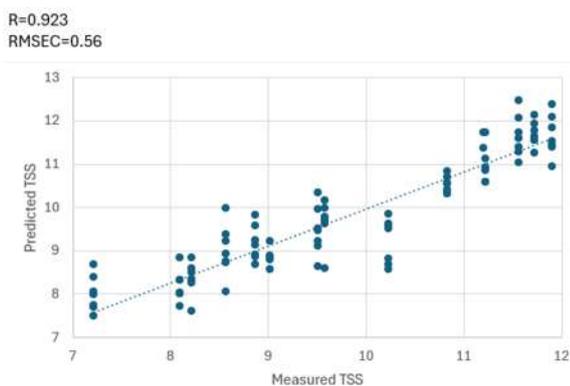
Figure 2 Original (A) and second derivative (B) spectra of watermelon

2. การทำนายค่า TSS

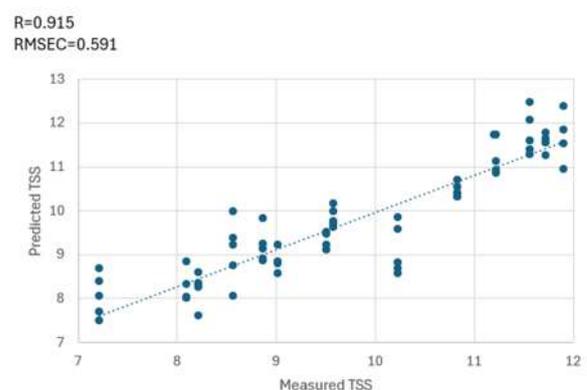
จากการวิเคราะห์การเปรียบเทียบการทำนายค่า TSS (Table 2) พบว่า สมการที่มีการปรับแต่งด้วยวิธีทางคณิตศาสตร์แบบ smoothing ร่วมกับ second derivative และ standard normal variate (Smt+2D+SNV) ให้ค่าความแม่นยำมากที่สุดคือ $r = 0.977$ $RMSEP = 0.231$ $bias = 0.047$ และ $factors = 16$ เนื่องจากค่า r มีค่าสูงที่สุด $RMSEP$ ต่ำที่สุด มีค่า $bias$ น้อยและเข้าใกล้ศูนย์ จำนวน factor มีค่าสูงแสดงให้เห็นว่า ข้อมูลของตัวอย่างแตงโมมีความหลากหลาย จึงต้องใช้ข้อมูลสเปกตรัมจาก factor จำนวนมาก ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ แก้วกานต์และคณะ (2560) ในการวิเคราะห์ภาพ NIR-HSI สำหรับการคัดแยกเมล็ดถั่วเขียวโดยมีค่า $factors = 20$

ซึ่งให้ค่า r สูงสุด และ $RMSEP$ ต่ำสุด จากสมการที่ได้ควรมีการพัฒนาสมการโดยใช้ข้อมูลตัวอย่างหลากหลายฤดูกาลมากขึ้น จะทำให้สมการมีความครอบคลุมมากขึ้น

การกระจายตัวของข้อมูลในการสร้างสมการทำนายค่า TSS ระหว่างค่าที่วัดได้จริงเปรียบเทียบกับค่าที่ได้จากการทำนาย (Figure 3) โดย Figure 3(A) เป็นการแสดงให้เห็นการกระจายตัวของกลุ่มข้อมูลเทียบกับเส้นแนวโน้มของสมการทำนายมีค่า $r = 0.923$ ในกลุ่ม calibration และ Figure 3(B) เป็นการแสดงให้เห็นการกระจายตัวของกลุ่มข้อมูลเทียบกับเส้นแนวโน้มของสมการทำนายมีค่า $r = 0.915$ ในกลุ่ม validation



(A)



(B)

Figure 3 Scatter plots of measured versus predicted TSS values of watermelon in the calibration (A) and validation (B) sets

สัมประสิทธิ์การถดถอยของสมการทำนายค่า TSS พบว่า ความยาวคลื่นที่มีอิทธิพลสูง ได้แก่ 974.9 1,437.1 1,450.2 และ 1,476.3 nm (Figure 4) ซึ่งเป็นตำแหน่งของการสั่นแบบ overtone และ combination ของพันธะ O-H และ C-H ที่พบในน้ำและน้ำตาล โดย 974.9 nm (Büning-Pfaue, 2003) และ 1,450.2 nm (Golic et al., 2003) สัมพันธ์กับการดูดกลืนของน้ำจากการสั่นแบบ combination และ first overtone ของพันธะ O-H ขณะที่ 1,437.1 nm (Muncan et al., 2025) และ 1,476.3 nm (Burns and Ciurczak, 2008) เป็นช่วงที่สัมพันธ์กับซูโครสและกลูโคสจากการสั่นของพันธะ C-H ในโครงสร้างคาร์โบไฮเดรต ซึ่งมีผลโดยตรงต่อความหวานของแตงโม จากการสร้างสมการใช้ตัวแปรความยาวคลื่นตลอดช่วงความยาวคลื่นทดสอบ ซึ่งแต่ละความยาวคลื่นที่กล่าวมาจาก Figure 4 มีอิทธิพลต่อการสร้างสมการ เนื่องจากมีค่า regression coefficient สูง



Figure 4 Regression coefficient of the calibration model for TSS prediction

3. แผนภาพการกระจายตัวของค่าปริมาณของแข็งที่ละลายได้

สมการทำนายค่าความหวานนำไปใช้ในการทำนายค่าดูดกลืนแสงในแต่ละพิกเซลของข้อมูล hypercube ที่ได้จากเทคนิคภาพสเปกโทรสโกปีอินฟราเรดย่านใกล้ เพื่อสร้างแผนภาพการกระจายตัวของพื้นที่ผิวแตงโม การกระจายตัวของค่าความหวาน (Figure 5) บนตัวอย่างแตงโม สีแดงแสดงค่าความหวานที่มีการทำนายเป็นค่าสูง ส่วนสีน้ำเงินแสดงถึงค่าความหวานที่มีการทำนายเป็นค่าต่ำ การแสดงการกระจายตัวของความหวาน

ส่วนตรงกลางของแตงโมมีค่า TSS เฉลี่ย 11.71°Bx เนื่องจากเนื้อแตงโมเป็นส่วนที่มีน้ำตาลและสารอาหารต่าง ๆ ที่ทำให้แตงโมมีรสชาติหวาน

การกระจายตัวที่สร้างขึ้นจากสมการทำนายพบการทำนายค่า TSS ที่สูงและต่ำกว่าค่าจริงเนื่องจากการเฉลี่ยข้อมูลสเปกตรัมเพื่อนำมาสร้างสมการทำนายได้ตัดข้อมูลสเปกตรัมออกไป รวมถึงบริเวณที่เป็นขอบของภาพตัวอย่างแตงโมที่เกิดจากความโค้งงอของรูปร่างทรงกลมของแตงโม ที่ทำให้เกิดระยะห่างระหว่างแตงโมกับกล้องเมื่อเคลื่อนที่ผ่านไตกล้อง ระยะห่างที่ไกลที่สุดระหว่างกล้องกับตัวอย่างแตงโม คือบริเวณขอบของแตงโม และระยะห่างที่ใกล้ที่สุดของแตงโมคือ บริเวณตรงกลางของแตงโม ซึ่งเป็นผลจากรูปทรงของแตงโม มีงานวิจัยที่มีลักษณะคล้ายกันในการวัดการดูดกลืนแสงรอบท่อนอ้อยด้วยวิธีการหมุนเพื่อลดผลกระทบจากผิวโค้ง (Chitrakul et al., 2022) การแก้ปัญหาลดผลกระทบดังกล่าวอาจต้องปรับปรุงแก้ไขอุปกรณ์ให้สามารถหมุนได้มากกว่า 1 แกน การกระจายตัวที่สร้างขึ้นจากสมการทำนายค่า TSS ของผลแตงโม 2 ตัวอย่าง ในการสร้างสมการทำนายโดยได้ตัดข้อมูลสเปกตรัมบริเวณที่เป็นขอบของภาพตัวอย่างแตงโมที่เกิดจากความโค้งงอของรูปร่างทรงกลมของแตงโม ที่ทำให้เกิดระยะห่างระหว่างแตงโมกับกล้องเมื่อเคลื่อนที่ผ่านไตกล้อง เนื่องจากเป็นข้อจำกัดการใช้งานที่ทำให้เกิดระยะห่างเครื่อง NIR-HSI กับแตงโมเมื่อเคลื่อนที่ผ่านไตกล้อง การที่จะให้ค่าการดูดกลืนแสงที่แม่นยำ (Sun et al., 2024) ควรวางกล้องตัวอย่างอยู่ในระนาบเดียวกับเซนเซอร์ของอุปกรณ์ ควรใช้ส่วนที่มีข้อมูลเปรียบเทียบให้เห็น และควรมีระยะห่างเท่ากันทุกตัวอย่าง (Jie et al., 2014) จึงได้แสดงการกระจายตัวจากสมการทำนายค่า TSS บริเวณส่วนกลางผลที่มีรัศมีความโค้งน้อยและอยู่ส่วนกลางผล

Table 2 Statistical results for predicting total soluble solids from PLSR models using various pretreatments

Model	Pretreatment	Factors	Calibration (n = 67)				Prediction (n = 37)		
			R	RMSEC	R	RMSECV	R	RMSEP	Bias
1	2D	8	0.923	0.560	0.809	0.867	0.915	0.591	0.019
2	Smt+1D	10	0.929	0.284	0.770	0.500	0.815	0.492	0.051
3	Smt+2D+SNV	16	0.973	0.244	0.765	0.701	0.977	0.231	0.047
4	Smt+1D+SNV	4	0.863	0.894	0.830	0.988	0.876	0.934	0.043
5	Smt+2D+SNV	9	0.835	0.531	0.620	0.777	0.806	0.571	-0.029
6	Smt+1D	11	0.878	0.391	0.692	0.609	0.769	0.555	0.123
7	Smt	13	0.890	0.412	0.674	0.705	0.790	0.615	-0.072

Smt = Savitzky-Golay smoothing
 1D = Savitzky-Golay first derivative
 2D = Savitzky-Golay second derivative
 SNV = Standard normal variate

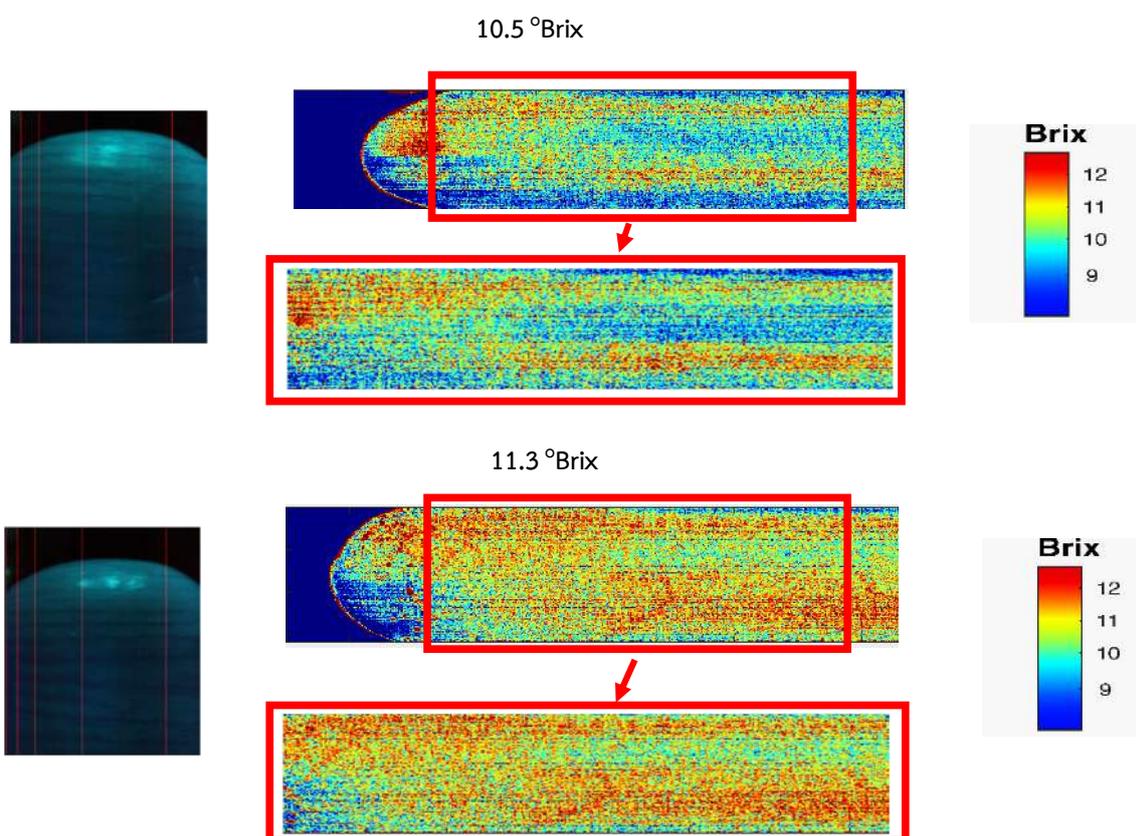


Figure 5 Total soluble solids mapping in watermelon using color illustrations from NIR-HSI system

จากผลการศึกษาแสดงให้เห็นว่า NIR-HSI เป็นเทคนิคที่มีศักยภาพสูงในการประเมินคุณภาพภายในของแตงโมแบบไม่ทำลาย โดยเฉพาะการทำนายค่า TSS ซึ่งสามารถใช้เป็นดัชนีสำคัญในการจัดเกรด

ผลผลิตและตัดสินความเหมาะสมในการเก็บเกี่ยว อย่างไรก็ตาม การเพิ่มประสิทธิภาพของแบบจำลองควรดำเนินการเพิ่มเติมด้วยการใช้ตัวอย่างที่หลากหลายทั้งในด้านพื้นที่เพาะปลูก ฤดูเก็บเกี่ยว และช่วงอายุของ

แต่งโม เพื่อเพิ่มความแม่นยำและความสามารถในการประยุกต์ใช้ในระดับอุตสาหกรรม

สรุปผลการทดลอง

การศึกษานี้ประยุกต์ใช้เทคนิค NIR-HSI เพื่อทำนาย TSS โดยพัฒนาแบบจำลองการทำนายจากข้อมูลการสะท้อนแสงในช่วง 900–1,700 nm ร่วมกับการปรับแต่งสเปกตรัมด้วยเทคนิค smoothing derivative และ SNV ทำนายค่า TSS ได้แม่นยำที่สุด คือ $r = 0.977$ $RMSEP=0.231$ และค่า bias=0.047 ภาพการกระจายตัวของค่า TSS ที่ได้จากการประมวลผลด้วยสมการที่พัฒนา แสดงแนวโน้มความแตกต่างของค่าดังกล่าวตามตำแหน่งบนพื้นผิวแต่งโม โดยการกระจายตัว TSS ในบริเวณตรงกลางมีการกระจายตัวสีแดงมากที่สุด รองลงมาคือ ส่วนใกล้ขั้วผลและน้อยที่สุดที่ส่วนท้ายผล ความแม่นยำลดลงในบริเวณขอบของแต่งโมซึ่งมีความโค้งมากกว่าบริเวณกลางผล อันเนื่องจากระยะห่างที่ไม่สม่ำเสมอระหว่างกล้องกับพื้นผิวตัวอย่าง แสดงให้เห็นว่า NIR-HSI เป็นเทคนิคที่มีศักยภาพสูงในการประเมินคุณภาพภายในของแต่งโมแบบไม่ทำลายสามารถทำนายค่า TSS ซึ่งสามารถใช้เป็นดัชนีสำคัญในการจัดเกรดผลผลิตและตัดสินความเหมาะสมในการเก็บเกี่ยว

คำขอบคุณ

ขอขอบคุณทุนสนับสนุนจากภาควิชาวิศวกรรมเกษตร และคณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

เอกสารอ้างอิง

แก้วกานต์ พวงสมบัติ อนุพันธ์ เทอดวงศ์วรกุล ธีรภรณ์ สุทธิวิจิตรภักดี อาทิตย์ พวงสมบัติ Satoru Tsuchikawa Tetsuya Inagaki และ Te Ma. 2560. การจำแนกเมล็ดถั่วเขียวสำหรับการเพาะงอกด้วยเทคนิคสเปกโทรสโกปี

และการวิเคราะห์ภาพสเปกตรัมอินฟราเรดย่านใกล้. วารสารสมาคมวิศวกรรมเกษตรแห่งประเทศไทย. 23(1): 23-29.

ธวัช ลวะเปารยะ. 2520. การปลูกแต่งโม. วารสารพืชสวน. 13(1): 1-14.

สำนักงานมาตรฐานสินค้าเกษตรและอาหารแห่งชาติ. 2555. มาตรฐานสินค้าเกษตร มกษ. 20-2555: แต่งโม (Watermelon). กระทรวงเกษตรและสหกรณ์. แหล่งข้อมูล: <https://www.acfs.go.th/standard/detail/231>. สืบค้น: 20 พฤษภาคม 2568.

Bonifazi, G., S. Serranti and R. Gasbarrone. 2022. Watermelon seeds germination study by shortwave infrared-based hyperspectral imaging techniques. pp. 9-35. In: Proceedings of the 11th UBT Annual International Conference on Mechatronics, System Engineering and Robotics; 2022 Oct 29–30; Pristina.

Bünig-Pfaue, H. 2003. Analysis of water in food by near infrared spectroscopy. Food Chemistry. 82(1): 107–115.

Burns, D.A. and E.W. Ciurczak, eds. 2008. Handbook of Near-Infrared Analysis. 3rd ed. Boca Raton, FL: CRC Press. 834 p.

Chiatrakul, J., K. Phuangsombut, A. Terdwongworakul and A. Phuangsombut. 2022. The evaluation of total soluble solid on sugar cane stalk using near infrared spectroscopy hyperspectral imaging technique. Thai Agricultural Research Journal. 40(3): 276–287.

Golic, M., K. Walsh and P. Lawson. 2003. Short-wavelength near-infrared spectra of sucrose, glucose, and fructose with respect to sugar concentration and temperature. Applied Spectroscopy. 57(2): 139–145.

Jie, D., L. Xie, X. Rao and Y. Ying. 2014. Using visible and near infrared diffuse transmittance technique to predict soluble solids content of watermelon in an on-line detection system. Postharvest Biology and Technology. 90: 1–6.

- Maheshwari S., V. Kumar, G. Bhadauria and A. Mishra. 2022. Immunomodulatory potential of phytochemicals and other bioactive compounds of fruits: A review. *Food Frontiers*. 3(2): 221–238
- Manley, M. 2014. Near-infrared spectroscopy and hyperspectral imaging: non-destructive analysis of biological materials. *Chemical Society Reviews*. 43(24): 8200–8214.
- Martinsen, P. and P. Schaare. 1998. Measuring soluble solids distribution in kiwifruit using near-infrared imaging spectroscopy. *Postharvest Biology and Technology*. 14(3): 271–281.
- Muncan, J., M. Yamaguchi, I. Kashiwakura and R. Tsenkova. 2025. Non-invasive estimation of absorbed ionizing radiation dose in mice using near-infrared spectroscopy (NIRS) and aquaphotomics. *Radiation Physics and Chemistry*. 229: 112554.
- Qi H., M. He, Z. huang, J. Yan and C. Zhang. 2024. Application of hyperspectral imaging for watermelon seed classification using deep learning and scoring mechanism. *Journal of Food Quality*. 2024(1): 7313214.
- Rungpichayapichet, P., M. Nagle, P. Yuwanbun, P. Khuwjitjaru, B. Mahayothee and J. Müller. 2017. Prediction mapping of physicochemical properties in mango by hyperspectral imaging. *Biosystems Engineering*. 159: 109–120.
- Simón-Portillo, F.J., D. Abellán-López, M. Fabra-Rodríguez, R. Peral-Orts and M. Sánchez-Lozano. 2023. Detection of hollow heart disorder in watermelons using vibrational test and machine learning. *Journal of Agriculture and Food Research*. 14: 100779. 10 p.
- Sun, J., A. Nirere, K.D. Dusabe, Z. Yuhao and G. Adrien. 2024. Rapid and nondestructive watermelon (*Citrullus lanatus*) seed viability detection based on visible near-infrared hyperspectral imaging technology and machine learning algorithms. *Journal of Food Science*. 89(7): 4403–4418.
- Tian, H.Q., Y.B. Ying, H.S. Lu, X.P. Fu and H.Y. Yu. 2007. Measurement of soluble solids content in watermelon by Vis/NIR diffuse transmittance technique. *Journal of Zhejiang University Science B*. 8(2): 105–110.
- Torge, R., E. Morgenbrod and T. Thomas. 1994. High-precision interference refractometer for length measurements. pp. 1–6. In: *Proceedings of SPIE, Conference on Interference Refractometry*, April 11–12, 1994, Bellingham, WA, USA. Bellingham, WA: SPIE.
- Vega-Castellote, M., M.T. Sánchez, I. Torres, M.J. de la Haba and D. Pérez-Marín. 2022. Assessment of watermelon maturity using portable new generation NIR spectrophotometers. *Scientia Horticulturae*. 304: 111328.
- Vega-Castellote, M., M.T. Sánchez, J.P. Wold, N.K. Afseth and D. Pérez-Marín. 2023. Near infrared light penetration in watermelon related to internal quality evaluation. *Postharvest Biology and Technology*. 204(5): 112477.
- Workman, Jr., J. and L. Weyer. 2012. *Practical Guide and Spectral Atlas for Interpretive Near-Infrared Spectroscopy*. 2nd ed. CRC Press, Boca Raton, FL, USA. 326 p.

การออกแบบและพัฒนาเครื่องกำจัดวัชพืชแบบไม่ใช้สารเคมีต่อท้ายรถแทรกเตอร์
Design and Development of a Tractor-attached Non-chemical Weeder

พงศ์พันธุ์ ปันมยุรา^{1/} ประเทือง อุษาบริสุทธิ^{1/*} วัชรชาญ สุขเจริญวิภารัตน์^{1/}

ชัยยะ จันตรา^{1/} วันรัฐ อับดุลลากาซิม^{1/}

Pongphun Panmayura^{1/} Prathuang Usaborisut^{1/*} Watcharachan Sukcharoenvipharat^{1/}

Chaiya Jantra^{1/} Wanrat Abdullakasim^{1/}

Received 6 Jun. 2025/Revised 8 Jul. 2025/Accepted 9 Jul. 2025

ABSTRACT

Sugarcane is an important economic crop in Thailand. Farmers face challenges in weed control due to the limitations of chemical herbicides, which pose health and environmental risks, as well as mechanical methods that are constrained by field conditions and timing. This research aimed to design and develop a tractor-mounted weed control machine utilizing flame and hot water, and to evaluate its performance in sugarcane fields. Two factors were tested: three levels of forward speed and three nozzle heights (10, 20, and 30 cm). Results indicated that the flame-based system, with a nozzle height of 10 cm and a forward speed of 8.89 km/h, achieved the highest weed control efficiency at 100% within 7 days after treatment. The maximum temperature at the sugarcane base reached 48.75°C, while soil moisture decreased by 0.14%. The field capacity was 0.40 rai/h, and the field efficiency was 66.77%. LPG consumption was 10.29 kg/rai, with a break-even point of 12.19 rai/year and a payback point of 67.19 rai. Meanwhile, the hot water system, with a nozzle height of 10 cm and a speed of 8.41 km/h, achieved a maximum weed control efficiency of 93.40% within 7 days. The maximum temperature at the sugarcane base was 33.5°C, while soil moisture increased by 0.35%. The field capacity was 0.40 rai/h, and the field efficiency was 71.27%. LPG consumption was 15.14 kg/rai, with a break-even point of 30.48 rai/year and a payback point of 167.95 rai. These findings suggest that the flame-based weed control machine provides greater efficiency and economic feasibility, making it more suitable for weed management in sugarcane fields.

Keywords: agricultural machinery; thermal weed control; flame weeder; hot water weeder

^{1/} คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน จ. นครปฐม 73140

^{1/} Faculty of Engineering at Kamphaeng Saen, Kasetsart University, Kamphaeng Saen Campus, Nakhon Pathom 73140, Thailand

* Corresponding author: fengptu@ku.ac.th

บทคัดย่อ

อ้อยเป็นพืชเศรษฐกิจสำคัญของไทย เกษตรกรประสบปัญหาการกำจัดวัชพืชจากข้อจำกัดของสารเคมีซึ่งเป็นอันตราย และการใช้วิธีเชิงกลมีข้อจำกัดด้านพื้นที่และเวลา งานวิจัยนี้มุ่งออกแบบและพัฒนาเครื่องกำจัดวัชพืชด้วยเปลวไฟและน้ำร้อนแบบต่อท้ายรถแทรกเตอร์ พร้อมศึกษาประสิทธิภาพในแปลงอ้อย โดยใช้ปัจจัยการทดสอบ 2 ตัวแปร คือ ความเร็วการเคลื่อนที่ 3 ระดับ และระยะความสูงหัวพ่น 10 20 และ 30 ซม. ผลการทดสอบพบว่าเครื่องใช้เปลวไฟที่ระยะหัวพ่น 10 ซม. และความเร็วการเคลื่อนที่ 8.89 กม./ชม. มีประสิทธิภาพกำจัดวัชพืชสูงสุดถึง 100% ภายใน 7 วันหลังการทดสอบ อุณหภูมิที่กระทบกออ้อยสูงสุด 48.75°C. ความชื้นดินลดลง 0.14% มีสมรรถนะการทำงานเชิงไร่ 0.40 ไร่/ชม. และประสิทธิภาพเชิงไร่ 66.77% ใช้แก๊สแอลพีจี 10.29 กก./ไร่ จุดคุ้มทุนอยู่ที่ 12.19 ไร่/ปี และจุดคืนทุนที่ 67.19 ไร่ ขณะที่เครื่องใช้น้ำร้อนที่ระยะความสูงหัวพ่น 10 ซม. และความเร็วการเคลื่อนที่ที่ 8.41 กม./ชม. มีประสิทธิภาพการกำจัดวัชพืชสูงสุด 93.40% ภายใน 7 วันหลังการทดลอง อุณหภูมิที่กระทบกออ้อยสูงสุด 33.5°C. ความชื้นดินเพิ่มขึ้น 0.35% มีสมรรถนะการทำงานเชิงไร่ 0.40 ไร่/ชม. และประสิทธิภาพเชิงไร่ 71.27% ใช้แก๊สแอลพีจี 15.14 กก./ไร่ จุดคุ้มทุนอยู่ที่ 30.48 ไร่/ปี และจุดคืนทุนที่ 167.95 ไร่ ผลวิจัยชี้ว่า เครื่องกำจัดวัชพืชด้วยเปลวไฟมีประสิทธิภาพและความคุ้มค่าสูงกว่าสำหรับการจัดการวัชพืชในไร่อ้อย

คำสำคัญ: เครื่องจักรกลการเกษตร; การกำจัดวัชพืชด้วยความร้อน; เครื่องกำจัดวัชพืชด้วยเปลวไฟ; เครื่องกำจัดวัชพืชด้วยน้ำร้อน

บทนำ

อ้อยเป็นพืชเศรษฐกิจที่สำคัญของประเทศไทย จากรายงานสถานการณ์พื้นที่ปลูกอ้อยในปี พ.ศ. 2566/2567 มีพื้นที่ในการเพาะปลูกอ้อยรวม 11.1 ล้านไร่ (สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย, 2567) ในขั้นตอนการเพาะปลูกอ้อยมีหลายขั้นตอน เช่น การเตรียมท่อนพันธุ์ การเตรียมดิน การดูแลรักษา การเก็บเกี่ยว (กรมส่งเสริมการเกษตร, 2564; Gravois et al., 2014) ขั้นตอนการดูแลรักษาอ้อยในแปลงมีความสำคัญมาก โดยเฉพาะการกำจัดวัชพืชที่จะแก่งแย่งน้ำ แสงแดด และธาตุอาหารพืชในดินที่สำคัญยังเป็นที่อยู่อาศัยของศัตรูอ้อยและพาหะของโรคต่างๆ (Khaliq et al., 2018; Selvara et al., 2023) ส่งผลทำให้ออขนั้นไม่สามารถเจริญเติบโตได้อย่างเต็มที่และผลผลิตลดลง

เกษตรกรมีการใช้สารเคมีในการกำจัดวัชพืช เช่น พาราควอต และไกลโฟเซต โดยภาครัฐมีการจำกัดการใช้เนื่องจากเป็นสารเคมีอันตรายที่ส่งผลเสียต่อเกษตรกรและพืชประธาน (กรมวิชาการเกษตร, 2563) ในทางกลับกันการกำจัดวัชพืชด้วยวิธีเชิงกลด้วยเครื่องมือทางการเกษตร เช่น พรวนกำจัดวัชพืชคราดสปริง (ชลธิชาและธนัชสัมพันธ์, 2566) มีข้อจำกัดการใช้งานในบางพื้นที่และบางช่วงเวลา โดยเฉพาะในแปลงปลูกอ้อยที่มีความชื้นสูง และมีฝนตกอย่างต่อเนื่อง ทำให้เครื่องมือเหล่านี้ไม่สามารถทำงานได้อย่างเต็มประสิทธิภาพ จึงต้องหาวิธีการกำจัดวัชพืชด้วยวิธีอื่นมาเพื่อทดแทนวิธีการดั้งเดิม ซึ่งในต่างประเทศได้ศึกษาเปรียบเทียบวิธีการกำจัดวัชพืชด้วยเปลวไฟและน้ำร้อน ตามงานวิจัยของ Merfield et al. (2017) ได้ทำการศึกษาเปรียบเทียบการกำจัดวัชพืชด้วยความร้อนด้วยการใช้ไอน้ำและเปลวไฟ อย่างไรก็ตาม ยังไม่มีการศึกษาในบริบทการผลิตอ้อย

ในประเทศไทย ดังนั้นเพื่อลดการใช้สารเคมีที่เป็นอันตรายและลดต้นทุนในการกำจัดวัชพืชในแปลงอ้อยลง จึงจำเป็นต้องมีการพัฒนาการกำจัดวัชพืชด้วยความร้อนที่เหมาะสมกับการเพาะปลูกอ้อยในประเทศไทย โดยงานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อออกแบบและสร้างเครื่องกำจัดวัชพืชด้วยเปลวไฟและน้ำร้อนต่อท้ายรถแทรกเตอร์ รวมถึงทดสอบประสิทธิภาพการทำงานของเครื่องกำจัดวัชพืชด้วยเปลวไฟและน้ำร้อนต่อท้ายรถแทรกเตอร์

อุปกรณ์และวิธีการ

ออกแบบเครื่องกำจัดวัชพืชแบบไม่ใช้สารเคมีต่อท้ายรถแทรกเตอร์ เพื่อใช้กับรถแทรกเตอร์ category 1 ตามมาตรฐาน ASAE (American Society of Agricultural Engineers) ให้สามารถทำงานในพื้นที่ร่องอ้อยที่มีหน้ากว้างของพื้นที่ประมาณ 1.5 ม. ได้แก่ เครื่องกำจัดวัชพืชด้วยเปลวไฟ และเครื่องกำจัดวัชพืชด้วยน้ำร้อน ทำการศึกษาเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดวัชพืชด้วยความร้อนทั้ง

2 รูปแบบ ซึ่งควบคุมการทำงานด้วยระบบควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์ และใช้รถแทรกเตอร์ Kubota L2500 ขนาด 27 แรงม้า ในการทดสอบ

1. การออกแบบเครื่องกำจัดวัชพืชด้วยเปลวไฟต่อท้ายรถแทรกเตอร์

เครื่องกำจัดวัชพืชด้วยเปลวไฟต่อท้ายรถแทรกเตอร์ (Figure 1) มีส่วนประกอบหลัก 3 ส่วน ได้แก่ (1) โครงยึดจุดต่อพวง 3 จุด สำหรับต่อพวงกับรถแทรกเตอร์ตามมาตรฐาน ASAE โดยออกแบบใช้สำหรับรถแทรกเตอร์ category1 (2) ถังแก๊สแอลพีจี สำหรับใช้เป็นเชื้อเพลิงหลักในการกำจัดวัชพืชด้วยเปลวไฟ (3) หัวพ่นไฟ มีทั้งหมด 6 หัวพ่นติดตั้งให้ทำมุมเอียง 45° กับแนวระนาบเพื่อป้องกันการไหลย้อนกลับของแก๊ส และช่วยในการถ่ายเทความร้อนไปยังวัชพืช มีหน้ากว้างในการทำงาน 1 ม. สำหรับการใช้งานในร่องอ้อย ควบคุมการเปิดแก๊ส-ปิดแก๊สด้วยโซลินอยด์วาล์วที่ได้รับคำสั่งจากระบบควบคุมไมโครคอนโทรลเลอร์

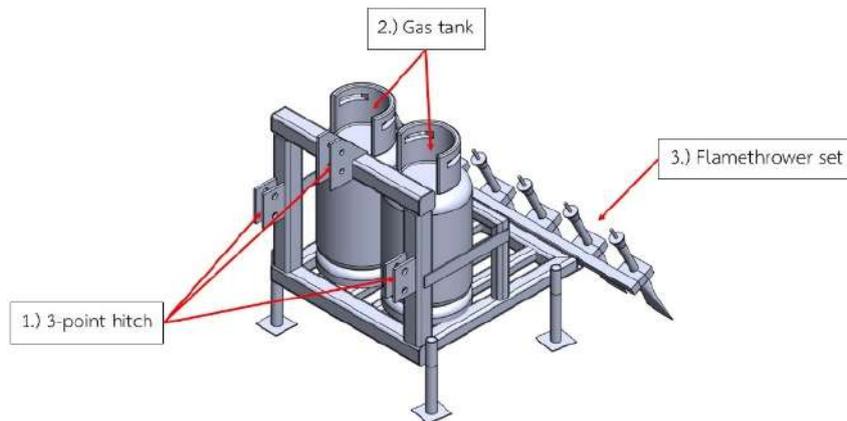


Figure 1 Components of a tractor-mounted flame weeder

2. ระบบควบคุมการทำงานของเครื่องกำจัดวัชพืชด้วยเปลวไฟต่อท้ายรถแทรกเตอร์

ควบคุมการทำงานของเครื่องกำจัดวัชพืชด้วยเปลวไฟโดยใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino UNO R3 มีสวิตช์สั่งการทำงาน 2 ตัว เมื่อ

กดสวิตช์ตัวที่ 1 จะสั่งให้ relay ตัวที่ 1 ทำงาน และ relay ตัวที่ 2 ไม่ทำงาน ซึ่งทำให้โซลินอยด์ตัวที่ 1 ทำงาน และโซลินอยด์ตัวที่ 2 ไม่ทำงาน ทำให้เปลวไฟที่ออกจากหัวพ่นไฟมีลักษณะเป็นเปลวไฟเลี้ยงอ่อนๆ เมื่อต้องการพ่นไฟกำจัดวัชพืชจึงทำการกดสวิตช์

ตัวที่ 2 สั่งให้ relay ตัวที่ 1 ไม่ทำงาน และ relay ตัวที่ 2 ทำงาน เพื่อสั่งให้โซลินอยด์ตัวที่ 2 ทำงาน และโซลินอยด์ตัวที่ 1 ไม่ทำงาน เป็นการพ่นไฟแบบ เต็มประสิทธิภาพ

3. การออกแบบเครื่องกำจัดวัชพืชด้วยน้ำร้อน ต่อท้ายรถแทรกเตอร์

เครื่องกำจัดวัชพืชด้วยน้ำร้อนต่อท้ายรถแทรกเตอร์ (Figure 2) มีส่วนประกอบที่สำคัญ ได้แก่ (1) โครงยึดจุดต่อพ่วง ใช้สำหรับต่อพ่วงกับจุดต่อพ่วง 3 จุดของรถแทรกเตอร์ตามมาตรฐาน ASAE โดยออกแบบใช้สำหรับรถแทรกเตอร์ Category1(2) ถังแก๊สแอลพีจี

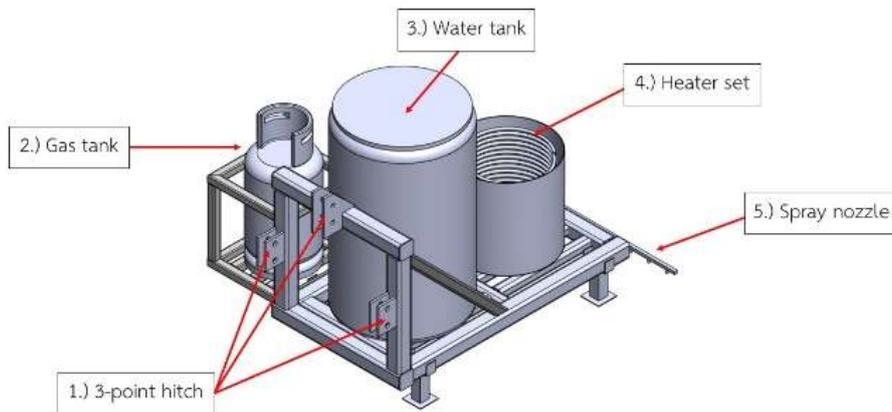


Figure 2 Components of a tractor-mounted hot water weeder

4. ระบบควบคุมการทำงานของเครื่องกำจัดวัชพืชด้วยน้ำร้อนต่อท้ายรถแทรกเตอร์

ใช้บอร์ดไมโครคอนโทรลเลอร์ Arduino UNO R3 ควบคุมการทำงานของระบบ โดยใช้โมดูลเซนเซอร์ MAX6675 คู่กับ thermocouple type K ที่สามารถวัดอุณหภูมิได้ในช่วง -200 ถึง 1,350°ซ. เพื่อวัดอุณหภูมิที่ออกจากชุดทำความร้อนโดยแสดงค่าอุณหภูมิผ่านจอ LCD ใช้การกดสวิตช์เพื่อสั่งการทำงานของระบบทั้งหมด 3 ตัว ตัวที่ 1 เป็นการสั่งสลับโหมดการทำงาน 2 โหมดคือ โหมด auto เป็นการสั่งให้ relay module 2 channel ทำงานอัตโนมัติ โดยมีเงื่อนไขในการทำงาน คือ เมื่ออุณหภูมิของน้ำ

ใช้สำหรับเป็นเชื้อเพลิงให้แก่ น้ำร้อนจาก (3) ถังน้ำ 200 ลิตร ที่จะไหลไปยัง (4) ชุดทำน้ำร้อนโดยภายในชุดทำความร้อนจะมีแผงทำความร้อนแบบอินฟราเรดจำนวน 5 แผง ติดตั้งไว้บริเวณโดยรอบของชุดทำความร้อนเพื่อให้ความร้อนแก่น้ำที่อยู่ในท่อสแตนเลสที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลาง 4 นิ้ว ความยาว 16 ม. ที่ขดอยู่ในชุดทำน้ำร้อน โดยมีเซนเซอร์เทอร์โมคัปเปิล (thermocouple) เป็นตัววัดอุณหภูมิ น้ำร้อนที่ทางออกของชุดทำความร้อน ก่อนทำการฉีดพ่น (5) หัวพ่นแบบ flat fan ความละเอียด 0.66 มม. 65°

ร้อนสูงตั้งแต่ 95°ซ. ขึ้นไป จะสั่งให้ relay ตัวที่ 2 ทำงาน แล้วสั่งให้โซลินอยด์ตัวที่ 2 ทำงาน และฉีดน้ำร้อนกำจัดวัชพืช หากอุณหภูมิ น้ำร้อนต่ำกว่า 95°ซ. จะสั่งให้ relay ตัวที่ 1 สั่งโซลินอยด์ตัวที่ 1 ทำงาน น้ำร้อนไหลเวียนกลับเข้าถังน้ำเพิ่มจนอุณหภูมิถึงจุดที่กำหนด และโหมด manual เป็นการสั่งการด้วยการกดสวิตช์ควบคุมการทำงานของ relay แต่ละตัว โดยเมื่อกดสวิตช์ตัวที่ 2 จะสั่งให้ relay ตัวที่ 1 สั่งให้โซลินอยด์ตัวที่ 1 ทำงาน ให้น้ำร้อนไหลเวียนกลับเข้าถังน้ำเพิ่มความร้อนให้สูงขึ้น หากกดสวิตช์ตัวที่ 3 จะสั่งให้ relay ตัวที่ 2 สั่งให้โซลินอยด์ตัวที่ 2 ทำงาน เพื่อทำการฉีดน้ำร้อนกำจัดวัชพืช

5. การทดสอบเครื่องกำจัดวัชพืชด้วยความร้อนต่อท้ายรถแทรกเตอร์

5.1 ประสิทธิภาพการกำจัดวัชพืช

วางแผนการทดสอบแบบแฟคทอเรียลสมบูรณ์ (full factorial design) ทดสอบแยกกันระหว่างเครื่องกำจัดวัชพืชด้วยเปลวไฟต่อท้ายรถแทรกเตอร์ และเครื่องกำจัดวัชพืชด้วยน้ำร้อนต่อท้ายรถแทรกเตอร์ด้วย manual mode ในพื้นที่เพาะปลูกอ้อย อ.กำแพงแสน จ.นครปฐม ขนาดแปลง 13.5×70 ม. มีระยะระหว่างแถว 1.5 ม. อายุอ้อย 3 เดือน ความหนาแน่นของวัชพืชในพื้นที่ 70% แบ่งพื้นที่เป็นแปลงย่อยขนาด 1.5×20 ม. ปัจจัยที่ใช้ในการทดสอบ ได้แก่ 1) ความเร็วในการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ 3 ระดับ คือ Low1 Low2 และ Low3 โดยใช้การกำหนดเกียร์ของรถแทรกเตอร์ที่ใช้ทดสอบ ที่ความเร็วรอบเครื่องยนต์ 1,000 รอบ/นาที 2) ระยะความสูงของหัวพ่นไฟ/หัวฉีดพ่นน้ำร้อน จากพื้นดิน 3 ระยะ คือ 10 20 และ 30 ซม. แต่ละเครื่องทำ 3 ซ้ำ รวม 27 การทดสอบ นับจำนวนวัชพืชก่อนและหลังการทดสอบ 1 3 5 7 วัน ซึ่งตัดแปลงจากวิธีการของ Aekrathok et al. (2021)

5.2 ปัจจัยที่ส่งผลต่อสภาพแวดล้อม

ระหว่างการทดสอบ อาจมีผลกระทบต่อพื้นที่โดยรอบ อาทิเช่น พืชประธาน(อ้อย) ความชื้นภายในดิน จึงได้ทำการเก็บข้อมูลเพิ่มเติม ได้แก่ อุณหภูมิการแผ่ความร้อนของเครื่องกำจัดวัชพืชด้วยความร้อนด้วยโมดูลเซนเซอร์ MAX6675 คู่กับ thermocouple type K เก็บบันทึกอุณหภูมิลงใน SD card ทุก 1 วินาที โดยติดตั้งไว้แนวเดียวกับแถวที่เพาะปลูกอ้อยซึ่งจะติดตั้งไว้ข้างกออ้อยเพื่อหาอุณหภูมิที่มากกระทบกับอ้อย สุ่มเก็บตัวอย่างหน้าดินก่อนและหลังการทดสอบด้วยอุปกรณ์เก็บตัวอย่างดินแบบกระบอก (soil core sampler) ในแปลงทดสอบ

20 ตัวอย่าง/เครื่อง แบ่งเป็นก่อนและหลังการทดสอบละ 10 ตัวอย่าง นำดินมาอบที่อุณหภูมิ 105°C. เป็นเวลา 24 ชม. เพื่อนำมาวิเคราะห์หาความชื้นที่สูญเสียไปจากหน้าดินภายหลังจากการทดสอบด้วยเครื่องกำจัดวัชพืชด้วยความร้อน และวัดอุณหภูมิของเปลวไฟกับน้ำร้อนด้วยเครื่องวัดอุณหภูมิแบบอินฟราเรด ยี่ห้อ Flir รุ่น C5 ที่มีช่วงการวัดอุณหภูมิอยู่ที่ -20 ถึง 400°C. โดยวัดอุณหภูมิขณะที่เครื่องกำจัดวัชพืชด้วยความร้อนต่อท้ายรถแทรกเตอร์กำลังทำงาน เพื่อนำมาวิเคราะห์ปัจจัยที่ส่งผลต่ออ้อย และพื้นที่ที่ใช้ในการทดสอบ

5.3 การวิเคราะห์ประสิทธิภาพการกำจัดวัชพืชในการทดสอบ

นับจำนวนวัชพืช โดยใช้กรอบสี่เหลี่ยมขนาด 50 ตร.ซม. สุ่ม 3 กรอบ/1 การทดสอบ 5 ครั้ง คือ ก่อนการทดสอบ 1 3 5 และ 7 วันหลังการทดสอบ ตามวิธีการของ Randell et al. (2020) ทำการเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดวัชพืชในแต่ละช่วงวันหลังการทดสอบ และประสิทธิภาพในการกำจัดวัชพืช (weeding efficiency) คำนวณได้จากสมการดังนี้

$$\text{Weeding efficiency} = \frac{(N_1 - N_2)}{N_1} \times 100$$

เมื่อ N_1 = จำนวนวัชพืชก่อนทดสอบ (ต้น)

N_2 = จำนวนวัชพืชหลังทดสอบ (ต้น)

5.4. การวิเคราะห์ข้อมูลทางเศรษฐศาสตร์

วิเคราะห์ทางเศรษฐศาสตร์ กรณีที่มีรถแทรกเตอร์ต้นกำลังแล้ว โดยคิดต้นทุนการทำงานรวม/ปี (total cost) มี 2 ส่วนตาม RNAM test code & procedures for farm machinery (ESCAP and RNAM, 1983) ได้แก่ ต้นทุนคงที่ (fixed cost) ต้นทุนผันแปร (variable cost) ของเครื่องกำจัดวัชพืชด้วยความร้อนต่อท้ายรถแทรกเตอร์ เพื่อคำนวณหาจุดคุ้มทุน (break-even point) และจุดคืนทุน (payback period)

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. เครื่องกำจัดวัชพืชด้วยความร้อนต่อท้ายรถแทรกเตอร์

1.1 เครื่องกำจัดวัชพืชด้วยเปลวไฟต่อท้ายรถแทรกเตอร์

เครื่องกำจัดวัชพืชด้วยเปลวไฟต่อท้ายรถแทรกเตอร์ (Figure 3) มีขนาดเครื่อง (กว้างxยาวxสูง) 120x95x96.5 ซม. ใช้สำหรับรถแทรกเตอร์ category 1 ที่มีกำลังตั้งแต่ 20-50 แรงม้า ใช้ถังแก๊สแอลพีจี 2 ถัง เพื่อเป็นเชื้อเพลิงให้กับหัวพ่นไฟทั้งหมด 6 หัวเรียงกันในแนวขนานกับเครื่อง ซึ่งแต่ละหัวพ่นไฟติดตั้งห่างกัน 20 ซม. โดยใช้โซลินอยด์วาล์วควบคุมแก๊สแอลพีจีที่ถูกส่งไปยังหัวพ่นไฟ มีพื้นที่การพ่นไฟเฉลี่ย 1.2 ม. ค่าความร้อนของเปลวไฟเฉลี่ย 289°ซ.



Figure 3 Tractor-mounted flame weeder

1.2 เครื่องกำจัดวัชพืชด้วยน้ำร้อนต่อท้ายรถแทรกเตอร์

เครื่องกำจัดวัชพืชด้วยน้ำร้อนต่อท้ายรถแทรกเตอร์ (Figure 4) มีขนาดเครื่อง (กว้างxยาวxสูง) 137x139x82 ซม. ใช้สำหรับรถแทรกเตอร์ category 1 ที่มีกำลังตั้งแต่ 20-50 แรงม้า ใช้ถังแก๊สแอลพีจี 1 ถัง เป็นเชื้อเพลิงให้กับแผงทำความร้อนของชุดทำความร้อน ซึ่งมีแผงทำความร้อนแบบอินฟราเรด

ติดตั้งอยู่บริเวณโดยรอบ 5 แผง และภายในมีชุดท่อน้ำสแตนเลส ขนาด 4 นิ้ว ยาว 16 ม. ขดอยู่ภายในชุดทำความร้อน และใช้ถังน้ำ 200 ลิตร เป็นถังบรรจุน้ำ โดยในการฉีดพ่นน้ำร้อนใช้ปั๊มน้ำ 12 โวลต์ ดึงน้ำจากถังบรรจุน้ำไปยังชุดทำความร้อน และหัวฉีดพ่นแบบ flat fan 7 หัว ที่ติดตั้งแต่ละหัวห่างกัน 10 ซม. ใว้ยังส่วนท้ายของเครื่อง โดยมีหน้ากว้างในการฉีดพ่นน้ำร้อน 100 ซม. และอัตราการฉีดพ่นต่อหัว 1.9 ลิตร/นาที่



Figure 4 Tractor-mounted hot water weeder

2. ประสิทธิภาพการกำจัดวัชพืชของเครื่องกำจัดวัชพืชด้วยความร้อนต่อท้ายรถแทรกเตอร์

2.1 เครื่องกำจัดวัชพืชด้วยเปลวไฟต่อท้ายรถแทรกเตอร์

ผลการทดสอบพบว่า ความสูงของหัวพ่นไฟที่ระยะ 10 ซม.จากพื้นดิน และความเร็วในการเคลื่อนที่รถแทรกเตอร์ Low1 มีประสิทธิภาพในการกำจัดวัชพืชสูงสุดในช่วง 1 3 5 และ 7 วันหลังการทดสอบ อยู่ที่ 86.53 ± 2.07 98.33 ± 2.89 100 ± 0.00 และ $100 \pm 0.00\%$ ตามลำดับ (Table 1) ซึ่งเป็นระยะความสูงของหัวพ่นไฟที่ต่ำ และความเร็วในการเคลื่อนที่ที่ช้า จึงทำให้ความร้อนจากเปลวไฟมีระยะเวลาที่กระทบกับวัชพืชภายในแปลงมากกว่าวิธีอื่นสอดคล้องกับงานวิจัยของ Upadhyay et al.

(2024) ที่ได้ประเมินประสิทธิภาพการกำจัดวัชพืชด้วยเปลวไฟของเครื่องชนิดใช้มือเช่น พบว่า ที่ความเร็วการเคลื่อนที่ 1 กม./ชม. และแรงดันเชื้อเพลิง 40 psi มีประสิทธิภาพการกำจัดวัชพืชสูงสุด 91.1% ซึ่งเปรียบเทียบกับงานวิจัยของ Merfield et al (2017) ได้ศึกษาประสิทธิภาพการกำจัดวัชพืชของเครื่องกำจัดวัชพืชแบบเปลวไฟที่ใช้ความเร็วการเคลื่อนที่ของรถแทรกเตอร์ 3 4 5 6 และ 7 กม./ชม. มีประสิทธิภาพการกำจัดวัชพืชอยู่ที่ 92 29 4 1 และ 1% ตามลำดับ

2.2 เครื่องกำจัดวัชพืชด้วยน้ำร้อนต่อท้ายรถแทรกเตอร์

พบว่า ระยะหัวพ่นไฟความสูง 10 ซม.จากพื้นดิน ที่ความเร็วในการเคลื่อนที่รถแทรกเตอร์ Low1 มีประสิทธิภาพในการกำจัดวัชพืชสูงสุดใน 1 3 5 และ 7 วันหลังการทดสอบ อยู่ที่ 60.51±2.91

82.25±6.40 90.37±4.20 และ 93.40±2.96% ตามลำดับ (Table 2) โดยมีการวิจัยของ Martelloni et al. (2021) ที่ศึกษาและเปรียบเทียบประสิทธิภาพการกำจัดวัชพืชและประสิทธิภาพการใช้พลังงานของน้ำร้อน และเปลวไฟ ในวัชพืช 4 ชนิด ที่ 3 ช่วงการเจริญเติบโต และกำหนดความเร็วการเคลื่อนที่ที่ใช้ในการทดสอบ 1 1.5 2.5 และ 3.5 กม./ชม. พบว่า น้ำร้อนมีประสิทธิภาพต่ำกว่า 48% แม้จะใช้พลังงานน้อย เมื่อเทียบกับเปลวไฟ ซึ่งเป็นวิธีที่ดีที่สุดทั้งในแง่ประสิทธิภาพการกำจัดวัชพืชและประสิทธิภาพการใช้พลังงาน ซึ่งสอดคล้องกับงานวิจัยของ Kristoffersen et al. (2008) ได้ศึกษาประสิทธิภาพการควบคุมวัชพืชบนทางเท้าด้วยน้ำร้อน จากความเร็วในการเคลื่อนที่ 1 กม./ชม. พบว่า ปริมาณความหนาแน่นของวัชพืชที่ปกคลุมอยู่ที่ 0.9%

Table 1 Efficiency of weed control with a tractor-mounted flame weeder

Testing factors		Weed control efficiency ^{1/}			
Flamethrower height (cm)	Travel speed (km/h) (Tractor gear)	1 DAT ^{2/}	3 DAT	5 DAT	7 DAT
10	8.89 (Low 1)	86.53 a	98.33 a	100 a	100 a
	13.05 (Low 2)	81.60 ab	89.51 ab	94.32 abc	94.32 ab
	16.16 (Low 3)	74.72 bcd	80.96 b	86.42 cd	87.53 bc
20	8.89 (Low 1)	83.01 a	84.68 b	98.33 ab	92.78 ab
	13.05 (Low 2)	80.34 abc	84.04 b	82.42 de	80.34 c
	16.16 (Low 3)	68.89 de	84.44 b	90.37 bcd	80.74 c
30	8.89 (Low 1)	60.92 f	80.60 b	74.77 e	57.22 de
	13.05 (Low 2)	66.73 ef	90.20 ab	84.79 d	67.27 d
	16.16 (Low 3)	74.00 cd	87.00 b	63.57 f	50.57 e
CV (%)		11.27	6.35	13.49	21.76

^{1/} The values followed by the same lowercase letter in the same column were not significantly different (p<0.05) according to the Duncan's new multiple range test analysis

^{2/} DAT=Days after testing

Table 2 Efficiency of weed control with a tractor-mounted hot water weeder

Testing factors		Weed control efficiency ^{1/}			
Hot water nozzle height (cm)	Travel speed (km/h) (Tractor gear)	1 DAT ^{2/}	3 DAT	5 DAT	7 DAT
10	8.41 (Low 1)	60.51 a	82.25 a	90.37 a	93.40 a
	9.77 (Low 2)	56.44 a	80.40 a	90.10 a	90.51 a
	15.63 (Low 3)	55.51 a	74.89 a	86.25 a	88.81 a
20	8.41 (Low 1)	38.80 b	48.49 b	53.87 b	58.21 b
	9.77 (Low 2)	33.05 b	39.09 c	48.42 bc	57.41 b
	15.63 (Low 3)	18.75 c	30.21 cd	41.67 cd	56.94 b
30	8.41 (Low 1)	14.32 c	24.13 d	36.61 de	42.22 c
	9.77 (Low 2)	13.70 c	23.89 d	28.59 e	38.88 c
	15.63 (Low 3)	12.93 c	23.70 d	28.58 e	37.04 c
CV (%)		58.92	53.11	46.38	36.27

^{1/} The values followed by the same lowercase letter in the same column were not significantly different ($p < 0.05$) according to the Duncan's new multiple range test analysis

^{2/} DAT=Days after testing

3. ผลของปัจจัยที่ส่งผลต่อสภาพแวดล้อม

อุณหภูมิที่วัดได้จากเครื่องวัดอุณหภูมิอินฟราเรด Flir C5 ระหว่างทำงาน พบว่า อุณหภูมิของเครื่องกำจัดวัชพืชด้วยเปลวไฟที่ทุกระยะความสูงจากพื้นดินของหัวพ่นไฟมีอุณหภูมิบริเวณเปลวไฟที่ปล่อยออกมาจากหัวไฟเฉลี่ย 288.7°ซ. (Figure 5) และอุณหภูมิของน้ำร้อนที่ออกจากหัวฉีดพ่นของเครื่องกำจัดวัชพืชด้วยน้ำร้อนเฉลี่ย 72.25°ซ. (Figure 6) โดยบริเวณภายในของชุดทำความร้อนมีอุณหภูมิเฉลี่ย 225.9°ซ. อุณหภูมิภายนอกอยู่ที่ 223.1°ซ. และอุณหภูมิภายนอกของถังน้ำอยู่ที่ 75.57°ซ.

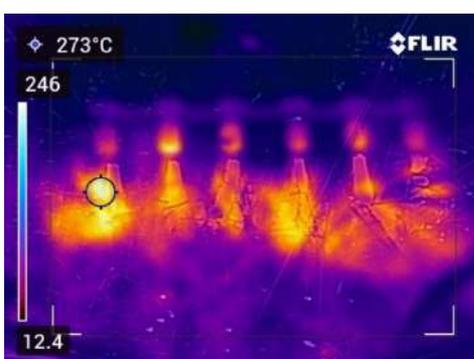


Figure 5 Flame temperature of flame weeder



Figure 6 Hot water temperature of hot water weeder

การทดสอบในพื้นที่จริง การเก็บข้อมูลการแผ่ความร้อนของเครื่องกำจัดวัชพืชด้วยความร้อนต่อท้ายรถแทรกเตอร์ บันทึกค่าอุณหภูมิทุก ๆ 1 วินาที พบว่า อุณหภูมิสูงสุดที่แผ่ไปถึงอ้อยจากเครื่องกำจัดวัชพืชด้วยเปลวไฟต่อท้ายรถแทรกเตอร์เฉลี่ย 48.75°ซ. (Figure 7) อุณหภูมิสูงสุดที่แผ่ไปถึงอ้อยจากเครื่องกำจัดวัชพืชด้วยน้ำร้อนต่อท้ายรถแทรกเตอร์ 33.50°ซ. (Figure 8) ซึ่งไม่ส่งผลต่ออ้อย และจากงานวิจัยของ Inman-Bamber and Smith (2005) ได้ศึกษาเกี่ยวกับ

อุณหภูมิที่สูงกับอ้อยและบริเวณโดยรอบที่ได้รับอุณหภูมิสูงเกิน 40°C. เป็นเวลานานจะส่งผลให้อ้อยสูญเสียน้ำที่ใบ และหากดินมีน้ำไม่เพียงพอจะทำให้เกิดความเครียดจากความแห้งแล้ง

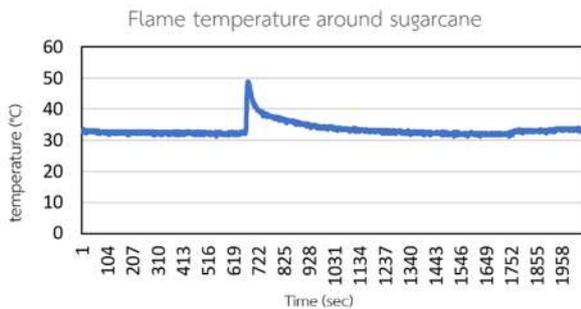


Figure 7 Heat radiation temperature of flame weeder

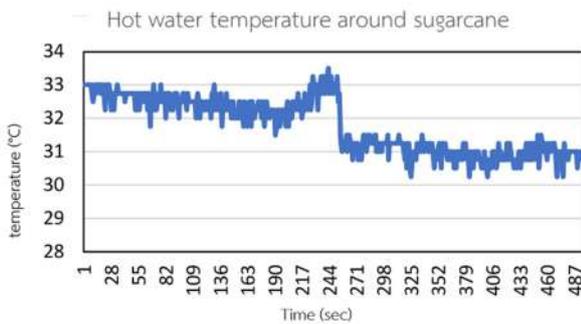


Figure 8 Heat radiation temperature of hot water weeder

เครื่องกำจัดวัชพืชด้วยความร้อนต่อท้ายรถแทรกเตอร์ ใช้ความร้อนที่สูงในการกำจัดวัชพืช ผลการเก็บตัวอย่างดินก่อนและหลังการทดสอบเพื่อหาความชื้นที่อาจสูญเสียไปภายในดิน พบว่า เครื่องกำจัดวัชพืชด้วยเปลวไฟต่อท้ายรถแทรกเตอร์มีความชื้นในดินก่อนการทดสอบ 17.31% และหลังการทดสอบ 17.18% ซึ่งลดลงเพียงเล็กน้อย 0.14% ส่วนเครื่องกำจัดวัชพืชด้วยน้ำร้อนต่อท้ายรถแทรกเตอร์มีความชื้นในดินก่อนการทดสอบ 18.14% และหลังการทดสอบ 18.49% ซึ่งมีการเพิ่มขึ้นของความชื้นภายในดิน 0.35% (Figure 9)

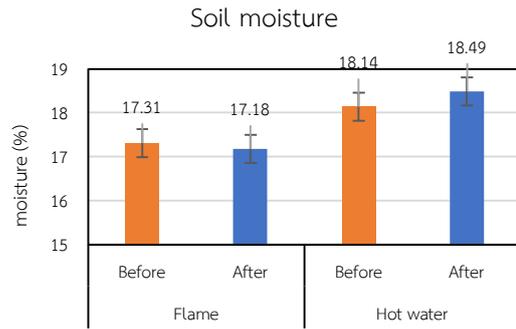


Figure 9 Soil moisture percentage before and after testing

4. ประสิทธิภาพและสมรรถนะการทำงานเชิงไร่

ประสิทธิภาพการทำงานเชิงไร่ และสมรรถนะการทำงานเชิงไร่ ที่ได้มาจากการทดสอบจริงในพื้นที่เพาะปลูกอ้อย เครื่องกำจัดวัชพืชด้วยเปลวไฟต่อท้ายรถแทรกเตอร์ มีประสิทธิภาพการทำงานเชิงไร่ $66.77 \pm 0.27\%$ สมรรถนะการทำงานเชิงไร่อยู่ที่ 0.40 ± 0.00 ไร่/ชม. อัตราการใช้แก๊สแอลพีจี 10.29 กก./ไร่ และเครื่องกำจัดวัชพืชด้วยน้ำร้อนต่อท้ายรถแทรกเตอร์ มีประสิทธิภาพการทำงานเชิงไร่ $71.27 \pm 1.23\%$ สมรรถนะการทำงานเชิงไร่ 0.40 ± 0.01 ไร่/ชม. อัตราการใช้แก๊สแอลพีจี 15.14 กก./ไร่

5. การวิเคราะห์ข้อมูลทางเศรษฐศาสตร์

กรณีมีรถแทรกเตอร์ต้นกำลังแล้ว ต้นทุนแต่ละเครื่องประกอบด้วย เครื่องกำจัดวัชพืชด้วยเปลวไฟต่อท้ายรถแทรกเตอร์ ราคาเครื่อง 16,985 บาท เมื่อคิดค่าเสื่อมราคาที่อยู่การใช้งาน 5 ปี มูลค่า 3,057.3 บาท/ปี เมื่อคิดดอกเบี้ยจากอัตราดอกเบี้ยเงินฝากตามธนาคารแห่งประเทศไทย 0.25% (ธนาคารแห่งประเทศไทย, 2568) มูลค่า 25.05 บาท/ปี รวมต้นทุนคงที่ 3,082.35 บาท/ปี ค่าน้ำมันเชื้อเพลิง 160.34 บาท/ไร่ ค่าแก๊สแอลพีจี 290.18 บาท/ไร่ ค่าจ้างแรงงาน 93.75 บาท/ไร่ และค่าบำรุงรักษา 2.95 บาท/ไร่ รวมเป็นต้นทุนผันแปร 547.22 บาท/ไร่ หากคิดค่าบริการต่อไร่ 800 บาท

จะมีกำไรต่อไร่ 252.78 บาท จุดคุ้มทุน 12.19 ไร่/ปี (Figure 10) และจุดคืนทุน 67.19 ไร่

เครื่องกำจัดวัชพืชด้วยน้ำร้อนต่อท้ายรถแทรกเตอร์ ราคาเครื่อง 18,840 บาท เมื่อคิดค่าเสื่อมราคาที่ยอายุการใช้งาน 5 ปี มูลค่า 3,391.2 บาท/ปี คิดดอกเบี้ยจากอัตราดอกเบี้ยเงินฝากตามธนาคารแห่งประเทศไทยมีมูลค่า 27.79 บาท/ปี รวมต้นทุนคงที่ 3,418.99 บาท/ปี ค่าน้ำมันเชื้อเพลิง 163.85 บาท/ไร่ ค่าแก๊สแอลพีจี 426.95 บาท/ไร่ ค่าจ้างแรงงาน 93.75 บาท/ไร่ และค่าบำรุงรักษา 3.27 บาท/ไร่ รวมเป็นต้นทุนผันแปร 687.82 บาท/ไร่ หากค่าบริการต่อไร่ 800 บาท จะมีกำไรต่อไร่ 112.18 บาท จุดคุ้มทุน 30.48 ไร่/ปี (Figure 11) และจุดคืนทุน 167.95 ไร่

ผลการวิจัยพบว่า เครื่องกำจัดวัชพืชด้วยเปลวไฟต่อท้ายรถแทรกเตอร์มีประสิทธิภาพที่สูงกว่าเครื่องกำจัดวัชพืชด้วยน้ำร้อนต่อท้ายรถแทรกเตอร์ ในด้านประสิทธิภาพการกำจัดวัชพืช ต้นทุนของเครื่อง อัตราการสิ้นเปลืองแก๊สแอลพีจี จุดคุ้มทุน และจุดคืนทุน ส่วนเครื่องกำจัดวัชพืชด้วยน้ำร้อนต่อท้ายรถแทรกเตอร์ในโหมด auto อุณหภูมิที่วัดได้จากเซนเซอร์เทอร์โมคัปเปิล (thermocouple) มีการขยับขึ้น-ลงของอุณหภูมิที่ไม่คงที่จึงทำให้การฉีดพ่นน้ำร้อนที่ออกมายังหัวฉีดพ่นไม่สม่ำเสมอ จึงต้องมีการพัฒนาเพิ่มเติมในด้านการควบคุมอุณหภูมิให้คงที่ เพื่อให้การทำงานของโหมดนี้เสถียรมากขึ้น

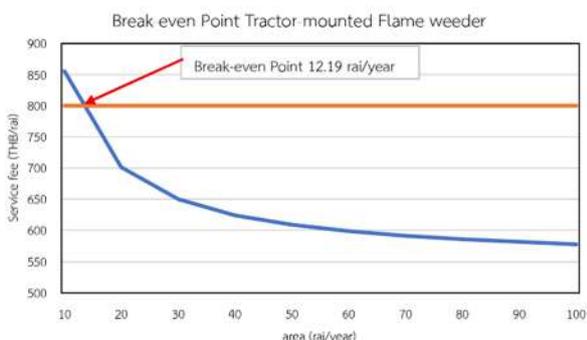


Figure 10 Break-even point tractor-mounted flame weeder

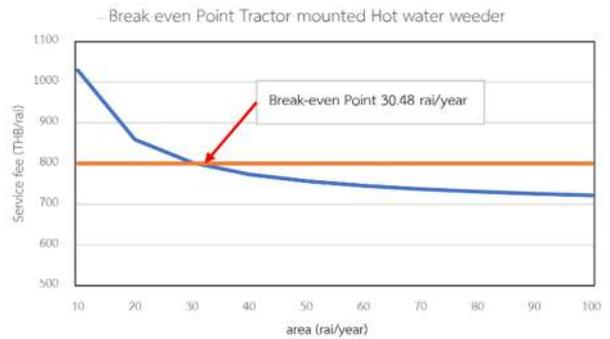


Figure 11 Break-even point tractor-mounted hot water weeder

สรุปผลการทดลอง

การทดสอบประสิทธิภาพการกำจัดวัชพืชด้วยเครื่องกำจัดวัชพืชด้วยความร้อนต่อท้ายรถแทรกเตอร์ โดยเครื่องกำจัดวัชพืชด้วยเปลวไฟต่อท้ายรถแทรกเตอร์ ที่ความสูงของหัวพ่นไฟที่ระยะ 10 เซนติเมตรจากพื้นดิน และความเร็วในการเคลื่อนที่รถแทรกเตอร์ Low1 มีประสิทธิภาพในการกำจัดวัชพืชสูงสุดในช่วง 1 3 5 และ 7 วันหลังการทดสอบ 86.53 ± 2.07 98.33 ± 2.89 100 และ 100% ตามลำดับ โดยมีการแผ่ความร้อนไปยังพืชประมาณ 48.75°C . การสูญเสียความชื้นภายในดิน 0.14% ประสิทธิภาพการทำงานเชิงไร่ $66.77 \pm 0.27\%$ และสมรรถนะการทำงานเชิงไร่ 0.40 ± 0.00 ไร่/ชม. และมีอัตราการใช้เชื้อเพลิง 10.29 กก./ไร่ และเครื่องกำจัดวัชพืชด้วยน้ำร้อนต่อท้ายรถแทรกเตอร์ ที่ความสูงของหัวพ่นไฟ 10 ซม.จากพื้นดิน และความเร็วในการเคลื่อนที่รถแทรกเตอร์ Low1 มีประสิทธิภาพในการกำจัดวัชพืชสูงสุดในช่วง 1 3 5 และ 7 วันหลังการทดสอบ 60.51 ± 2.91 82.25 ± 6.40 90.37 ± 4.20 และ $93.40 \pm 2.96\%$ ตามลำดับ โดยมีการแผ่รังสีความร้อนไปยังพืชประมาณ 33.5°C . การเพิ่มขึ้นของความชื้นภายในดิน 0.35% ประสิทธิภาพการทำงานเชิงไร่ $71.27 \pm 1.23\%$ และสมรรถนะการทำงานเชิงไร่ 0.40 ± 0.01 ไร่/ชม. และมีอัตราการใช้เชื้อเพลิง 15.14 กก./ไร่ จากผลการวิจัยพบว่า

เครื่องกำจัดวัชพืชด้วยเปลวไฟต่อท้ายรถแทรกเตอร์ มีประสิทธิภาพที่สูงกว่าเครื่องกำจัดวัชพืชด้วยน้ำร้อน ต่อท้ายรถแทรกเตอร์ ในด้านประสิทธิภาพการกำจัด วัชพืช ต้นทุนของเครื่อง อัตราการสิ้นเปลืองแก๊สแอลพีจี จุดคุ้มทุน และจุดคืนทุน

คำขอบคุณ

ขอขอบคุณทุนวิจัยมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ โครงการระบบการพัฒนาศักยภาพการวิจัยขั้นสูง เพื่อการแข่งขันด้านการเกษตรและอาหาร รหัสโครงการ FF(KU) 51.67 ขอขอบคุณทุนสนับสนุนภาควิชา วิศวกรรมเกษตร คณะวิศวกรรมศาสตร์ กำแพงแสน มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ วิทยาเขตกำแพงแสน

เอกสารอ้างอิง

กรมวิชาการเกษตร. 2563. การดำเนินการเกี่ยวกับวัตถุอันตราย ชนิดที่ ๔ ที่กรมวิชาการเกษตรเป็นผู้รับผิดชอบ. น. 28-29. ใน: รายงานราชกิจจานุเบกษา 2563. สำนักเลขาธิการ คณะรัฐมนตรี.

กรมส่งเสริมการเกษตร. 2564. เทคโนโลยีการผลิตอ้อย. กลุ่มโรงพิมพ์ สำนักงานพัฒนาการถ่ายทอดเทคโนโลยี กรมส่งเสริมการเกษตร กระทรวงเกษตรและสหกรณ์ กรุงเทพฯ. แหล่งข้อมูล: <https://esc.doae.go.th/wp-content/uploads/2022/01/A2.pdf>. สืบค้น: 16 มิถุนายน 2568.

ชลธิชา เบิกใจ และธนชสิทธิ์ พูนไพบุลย์พิพัฒน์. 2566. ผลของไบออยคลุมดินต่อการจัดการวัชพืชเพื่อประยุกต์ใช้ในอ้อยอินทรีย์. วารสารเกษตรนเรศวร. 20(1): e0200104.

ธนาคารแห่งประเทศไทย. 2568. อัตราดอกเบี้ยประจำวันของธนาคารพาณิชย์. อัตราดอกเบี้ยเงินฝากสำหรับบุคคลธรรมดาของธนาคารพาณิชย์ ประจำวันที่ 30 มิถุนายน 2568. แหล่งข้อมูล: <https://www.bot.or.th/th/statistics/interest-rate.html>. สืบค้น: 16 มิถุนายน 2568.

สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย. 2567. รายงานสถานการณ์การปลูกอ้อยประจำปีการผลิต 2566/2567. กลุ่มเทคโนโลยีสารสนเทศและการสื่อสาร กองยุทธศาสตร์และแผนงาน สำนักงานคณะกรรมการอ้อยและน้ำตาลทราย. 78 หน้า.

Aekrathok, P., P. Songsri, N. Jongrunklang and S. Gonkhamdee. 2021. Efficacy of post-emergence herbicides against important weeds of sugarcane in North-East Thailand. *Agronomy*. 11(3): 429.

ESCAP and RNAM (Economic and Social Commission for Asia and the Pacific, Regional Network for Agricultural Machinery). 1983. RNAM Test codes and procedures for farm machinery (12): 297. 297 p.

Gravois K., H. Viator, G. Reagan, J. Beuzelin, J. Griffin, B. Tubana and J. Hoy. 2014. *Sugarcane Production Handbook*. Louisiana State University Agricultural Center Pub. 2859. 84 p.

Inman-Bamber, N. and D. M. Smith. 2005. Water relations in sugarcane and response to water deficits. *Field Crops Research*. 92(2-3): 185-202.

Khaliq, A., N. Ahmad, M. S. Afzal, M. Yasin, H. Abdulrauf and S. Rahseed. 2018. Impact of weed control methods on yield and quality of sugarcane crop. *Global Scientific Journal*. 6(11): 464-472.

Kristoffersen, P., A. M. Rask and S. U. Larsen. 2008. Non-chemical weed control on traffic islands: A comparison of the efficacy of five weed control techniques. *Weed Research*. 48(2): 124-130.

Martelloni, L., C. Frascioni, M. Sportelli, M. Fontanelli, M. Raffaelli and A. Peruzzi. 2021. Hot foam and hot water for weed control: A comparison. *Journal of Agricultural Engineering*. 52(3): 1-10.

Merfield, C. N., J. G. Hampton and S. D. Wratten. 2017. Efficacy of heat for weed control varies with heat source, tractor speed, weed species and size. *New Zealand Journal of Agricultural Research*. 60(4): 437-448.

Randell, T. M., L. C. Hand, J. C. Vance and A. S. Culpepper. 2020. Interval between sequential glufosinate applications influences weed control in cotton. *Weed Technology*. 34(4): 528-533.

Upadhyay, A., K. P. Singh, K. B. Jhala, M. Kumar and A. Salem. 2024. Non-chemical weed management: Harnessing flame weeding for effective weed control. *Heliyon*. 10(12): e32776.

ความไวของเชื้อรา *Exserohilum turcicum* ต่อสารคาร์เบนดาซิมและประสิทธิภาพของ
สารกำจัดเชื้อราในการควบคุมโรคใบไหม้แผลใหญ่ข้าวโพดในประเทศไทย
Sensitivity of *Exserohilum turcicum* to Carbendazim and the Fungicide's Efficacy
in Controlling Northern Corn Leaf Blight in Thailand

ธนดา นาคเงิน^{1/} กิตติธัช ทรายชู^{2/} ศุภฤกษ์ ลีมดลธรรม^{1/} วีระณีย์ ทองศรี^{1/} ธิดา เดชฮวบ^{1/} ปัฐวิภา สงกุมาร^{1/*}
Thanada Nakngoen^{1/} Kittithud Trachu^{2/} Supharoek Limdoltham^{1/} Veeranee Tongsrri^{1/}
Tida Dethoup^{1/} Pattavipha Songkumarn^{1/*}

Received 27 May 2025/Revised 1 Aug. 2025/Accepted 26 Aug. 2025

ABSTRACT

Northern corn leaf blight is caused by *Exserohilum turcicum*. The use of carbendazim in combination with demethylation inhibitor fungicides is included in the recommendations for controlling this disease in Thailand. However, the efficacy of carbendazim against *E. turcicum* remains unclear. This research assessed the sensitivity of *E. turcicum* isolates (n = 36), collected during 2021–2022, to carbendazim along with sequence analysis of the β 2-tubulin (*Tub2*) gene at codons 167, 198, and 200 of the *E. turcicum* isolates with the highest and lowest sensitivity to carbendazim (n = 2/group). Field efficacy of carbendazim and other fungicides for controlling *E. turcicum* in sweet corn was also determined. The results revealed that approximately half of the *E. turcicum* isolates exhibited EC₅₀ values exceeding the established baseline sensitivity (1.23–8.70 μ g/mL). The frequency distribution of EC₅₀ values showed a unimodal distribution with positive skewness, indicating a shift towards reduced sensitivity in the population. Sequence analysis of the *Tub2* gene revealed no differences between the isolates with the highest and lowest sensitivity to carbendazim. Field trials with natural infection revealed that carbendazim (50%SC) was less effective at disease suppression compared to tebuconazole+trifloxystrobin (50+25%WG) and azoxystrobin+difenoconazole (20+12.5%SC), applied at recommended rates. These findings suggest a decline in sensitivity to carbendazim within the *E. turcicum* population in Thailand. The control efficacy of carbendazim on *E. turcicum* was relatively low compared to the other recommended chemical mixtures.

Keywords: northern corn leaf blight; *Exserohilum turcicum*; carbendazim; fungicide sensitivity

^{1/} ภาควิชาโรคพืช คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

^{1/} Department of Plant Pathology, Faculty of Agriculture, Kasetsart University, Chatuchak, Bangkok 10900, Thailand

^{2/} สถานีวิจัยลพบุรี มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ อ.โคกเจริญ จ.ลพบุรี 15250

^{2/} Lop Buri Research Station, Kasetsart University, Kok Charoen, Lop Buri 15250, Thailand

* Corresponding author: fagrpps@ku.ac.th

บทคัดย่อ

โรคใบไหม้แผลใหญ่ของข้าวโพดจากเชื้อรา *Exserohilum turcicum* มีคำแนะนำการใช้สารคาร์เบนดาซิมร่วมกับสารกลุ่ม demethylation inhibitors เพื่อควบคุมโรคนี้ แต่ประสิทธิภาพของสารคาร์เบนดาซิมต่อเชื้อ *E. turcicum* ยังไม่ชัดเจน งานวิจัยนี้จึงประเมินความไวต่อคาร์เบนดาซิมของประชากรเชื้อรา *E. turcicum* (n=36) ซึ่งรวบรวมระหว่างปี พ.ศ. 2564–2565 ตรวจสอบลำดับนิวคลีโอไทด์บริเวณยีน β_2 -tubulin (*Tub2*) ที่ตำแหน่งโคดอน 167 198 และ 200 ในไอโซเลทเชื้อ *E. turcicum* ซึ่งไวต่อสารคาร์เบนดาซิมต่ำสุดและสูงสุดสองลำดับแรกในประชากรเชื้อราทดสอบ และประเมินศักยภาพของคาร์เบนดาซิมในแปลงปลูกข้าวโพด ผลการทดลองความไวต่อคาร์เบนดาซิมโดยพิจารณาค่าความเข้มข้นที่ยับยั้งการเจริญเส้นใยเชื้อรา 50% (EC_{50}) พบว่า เชื้อราในประชากรมากกว่าครึ่งมีค่า EC_{50} สูงกว่า baseline sensitivity (1.23–8.70 $\mu\text{g}/\text{mL}$) และกราฟแจกแจงความถี่ค่า EC_{50} บ่งชี้แนวโน้มความไวต่อสารคาร์เบนดาซิมลดลง การวิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทด์ของยีน *Tub2* ไม่พบความแตกต่างในไอโซเลทเชื้อราที่ไวต่อสารคาร์เบนดาซิมสูงและต่ำสุดในสองลำดับแรก การทดสอบสารเคมีในแปลงปลูกซึ่งเกิดโรคตามธรรมชาติ พบว่า การพ่นคาร์เบนดาซิม (50% SC) มีประสิทธิภาพในการลดความรุนแรงของโรคได้น้อยกว่าการใช้สารผสมระหว่าง tebuconazole+trifloxystrobin (50+25% WG) และ azoxystrobin+ difenoconazole (20+12.5% SC) ตามอัตราแนะนำ สรุปได้ว่าประชากรเชื้อ *E. turcicum* ของประเทศไทยมีความไวต่อคาร์เบนดาซิมลดลง และการพ่นสารคาร์เบนดาซิมเพียงชนิดเดียวโดยไม่ได้ผสมสารอื่นมีประสิทธิภาพค่อนข้างต่ำ

คำสำคัญ: ใบไหม้แผลใหญ่ข้าวโพด; *Exserohilum turcicum*; คาร์เบนดาซิม; ความไวต่อสารกำจัดเชื้อรา

บทนำ

โรคใบไหม้แผลใหญ่มักพบมีการระบาดในข้าวโพดหวาน (องอาจ, 2567) มีสาเหตุจากเชื้อรา *Exserohilum turcicum* หรือในระยะเวลาการสืบพันธุ์แบบอาศัยเพศเรียกว่า *Setosphaeria turcica* จัดเป็นโรคทางใบของข้าวโพดที่สำคัญส่งผลกระทบต่อเศรษฐกิจ (Ahangar et al., 2022) เกิดความสูญเสียผลผลิต 24-91% ขึ้นอยู่กับระยะเวลาการเจริญเติบโตของพืช ความรุนแรงของการระบาดโรค ระดับความต้านของพันธุ์และความรุนแรงของเชื้อก่อโรค (Nwanosike and Mabagala, 2017) การจัดการโรคใบไหม้แผลใหญ่ข้าวโพดในประเทศไทยเกษตรกรใช้สารกำจัดเชื้อราเป็นหลัก สารเคมีกลุ่ม demethylation inhibitors (DMI) และquinone outside inhibitors (QoI) จัดเป็นกลุ่มสารเคมีที่มีประสิทธิภาพสูงในการใช้งานแบบเดี่ยวหรือแบบผสมซึ่งมีรายงานในสหรัฐอเมริกาและจีน (Weems, 2016; Weems and Bradley, 2017; Dai et al., 2018) ส่วนประเทศไทย วิไลวรรณและคณะ (2552) รายงานว่าสารเคมีกลุ่ม DMI เช่น สารโพรพิโคนาโซลแบบเดี่ยว หรือสารเคมีผสมระหว่างโพรพิโคนาโซลและสารอะซอกซีสโตรบิน (กลุ่ม QoI) มีประสิทธิภาพสูงในการป้องกันกำจัดโรคใบไหม้แผลใหญ่ในข้าวโพดหวานโดยไม่มีสารตกค้างในผลผลิต และให้ผลผลิตข้าวโพดหวานฝักสดทั้งเปลือกสูงกว่าการไม่ใช้สารควบคุมโรค รวมถึงวราภรณ์และคณะ (2558) พบว่าความรุนแรงของโรคใบไหม้แผลใหญ่ลดลง 45.89–55.45% เมื่อนี้ดพ่นด้วยสารเคมีแบบเดี่ยวหรือแบบผสมระหว่างกลุ่ม DMI และ QoI เปรียบเทียบกับชุดควบคุมที่ฉีดพ่นด้วยน้ำเปล่า ทั้งนี้การฉีดพ่นสารเคมีจากกลุ่ม DMI เพียงเดี่ยว และสารเคมีผสมระหว่าง DMI และ QoI มักปรากฏในคำแนะนำเพื่อใช้ควบคุมโรคใบไหม้แผลใหญ่ในประเทศไทย นอกจากนี้ สารคาร์เบนดาซิม (carbendazim) ซึ่งอยู่ในกลุ่ม methyl benzimidazole

carbamates (MBC) เป็นสารเคมีอีกหนึ่งชนิดที่มีการแนะนำให้ใช้ร่วมกับสารอีพอกซีโคนาโซล (กลุ่ม DMI) ในการควบคุมโรคดังกล่าว (วิไลวรรณและคณะ, 2552) ทั้งนี้ De Rossi et al. (2015) ศึกษาระดับความไวของ *E. turcicum* ในการตอบสนองต่อสารเคมีหลายชนิด โดยรวบรวมไอโซเลทเชื้อราจากแปลงปลูกข้าวโพดในประเทศบราซิลและอาร์เจนตินา และบ่งชี้ระดับความเข้มข้นสารเคมีที่สามารถยับยั้งการเจริญของเส้นใยเชื้อราที่ระดับ 50% (half maximal inhibitory concentration, IC₅₀) พบว่า *E. turcicum* มีความไวในการตอบสนองต่อสารคาร์เบนดาซิมต่ำกว่าสารเคมีชนิดอื่น ๆ โดยพบว่าระดับค่า IC₅₀ มีค่าสูงกว่า 50 µg/mL ในขณะที่เชื้อราดังกล่าวมีความไวต่อสารไอโพรโดโคนสูงที่สุด มีค่า IC₅₀ เท่ากับ 0.01 µg/mL จึงจัดสารคาร์เบนดาซิมอยู่ในกลุ่มสารที่ไม่เป็นพิษต่อเชื้อรา *E. turcicum* รวมถึง Yelgurty et al. (2019) พบว่าสารคาร์เบนดาซิมยับยั้งการเจริญของเส้นใยเชื้อรา *E. turcicum* ได้น้อยที่สุดเมื่อเปรียบเทียบกับสารเคมีจากกลุ่มเดียวกัน ได้แก่ ไทโอฟาเนต-เมทิล รวมถึงสารเคมีจากกลุ่ม DMI ได้แก่ โพรพิโคนาโซล ไดฟีโนโคนาโซล เฮกซะโคนาโซล ไตรอะโดเมฟอน และทีบูโคนาโซล เมื่อพิจารณาเทียบเคียงในระดับความเข้มข้นของสารออกฤทธิ์ที่เท่ากันหรือใกล้เคียงกัน

คาร์เบนดาซิมเป็นสารที่จัดอยู่ในกลุ่มที่มีความเสี่ยงสูงต่อการต้านทานสารเคมีของเชื้อโรค โดยออกฤทธิ์เฉพาะกับตำแหน่งโปรตีน β -tubulin ในเชื้อราทำให้ยับยั้งการรวมตัวของไมโครทิวบูล (microtubule) ระหว่างการแบ่งนิวเคลียส ส่งผลให้การเจริญเติบโตของเส้นใยและการยึดตัวของ germ-tube หยุดชะงัก เชื้อราจึงไม่สามารถเจริญเติบโตได้อย่างปกติ (Wang et al., 2022) การใช้คาร์เบนดาซิมในปริมาณมากและบ่อยครั้งในช่วงที่มีการระบาดของโรคพืชเป็นแรงกดดันที่ทำให้เกิดการคัดเลือกสายพันธุ์

เชื้อราต้านทานต่อสารคาร์เบนดาซิม ส่งผลให้โครงสร้างประชากรเชื้อราเปลี่ยนแปลงไปจากเดิม โดยเชื้อราสายพันธุ์ต้านทานสารเคมีเพิ่มจำนวนจนกลายเป็นสมาชิกหลักของประชากรแทนเชื้อราสายพันธุ์เดิมที่ไวต่อสารเคมี (Liu et al., 2019) ส่งผลให้ประสิทธิภาพของสารคาร์เบนดาซิมในการควบคุมโรคใบไหม้แผลใหญ่ลดลง มีรายงานเชื้อราก่อโรคพืชหลายชนิดต้านทานต่อสารคาร์เบนดาซิม เช่น *Botrytis cinerea* (Liu et al., 2016; He et al., 2020) *Botryosphaeria dothidea* (Wang et al., 2022) *Colletotrichum* spp. (Kongtragoul et al., 2011) *Colletotrichum gloeosporioides* (Kongtragoul et al., 2011) *Fusarium graminearum* (Liu et al., 2019) และ *Sclerotinia sclerotiorum* (Zhu et al., 2016) โดยกลไกในการต้านทานต่อสารคาร์เบนดาซิมเกี่ยวข้องกับการกลายพันธุ์ระดับยีนแบบเฉพาะจุด (point mutation) ที่ตำแหน่งยีนเบต้าทูบูลิน 2 (β_2 -tubulin, *Tub2*) โดยรูปแบบการกลายพันธุ์บนบริเวณยีนดังกล่าวที่ปรากฏในรายงานวิจัย ได้แก่ โคดอน 167 (F167Y) เปลี่ยนแปลงกรดอะมิโนจากฟีนิลอะลานีน (F) เป็นไทโรซีน (Y) โคดอน 198 (E198A E198V E198G E198L E198K E198Q) เปลี่ยนแปลงกรดอะมิโนจากกรดกลูตามิก (E) เป็นเอลานีน (A) วาลีน (V) ไกลซีน (G) ลิวซีน (L) ไลซีน (K) และกลูตามีน (Q) ตามลำดับ และโคดอน 200 (F200Y) เปลี่ยนแปลงกรดอะมิโนจากฟีนิลอะลานีนเป็นไทโรซีน

อนึ่ง ข้อมูลความไวต่อคาร์เบนดาซิมของประชากรเชื้อราก่อโรคใบไหม้แผลใหญ่ข้าวโพดที่รวบรวมจากแหล่งปลูกในประเทศไทย รวมถึงข้อมูลประสิทธิภาพของสารคาร์เบนดาซิมในแปลงปลูกข้าวโพดที่มีการเข้าทำลายของโรคดังกล่าวยังไม่ชัดเจน และความไวต่อคาร์เบนดาซิมของประชากรเชื้อรา *E. turcicum* ในประเทศไทยเกี่ยวข้องอย่างไร

กับการกลายพันธุ์ที่ตำแหน่งยีน *Tub2* ดังนั้นงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินความไวต่อสารคาร์เบนดาซิมของประชากรเชื้อราก่อโรคใบไหม้แผลใหญ่ ซึ่งรวบรวมจากแหล่งปลูกข้าวโพด ในปี พ.ศ. 2564–2565 ตรวจสอบลำดับนิวคลีโอไทด์บริเวณยีน *Tub2* ที่ตำแหน่งโคดอน 167 198 และ 200 ในไอโซเลทเชื้อรา *E. turcicum* ซึ่งไวต่อสารคาร์เบนดาซิมต่ำสุดและสูงสุดสองลำดับแรกในประชากรเชื้อราทดสอบ และประเมินศักยภาพของสารคาร์เบนดาซิมในแปลงปลูกข้าวโพดที่มีการเข้าทำลายของเชื้อก่อโรคใบไหม้แผลใหญ่ข้าวโพด เพื่อได้ข้อมูลด้านศักยภาพของสารคาร์เบนดาซิมในการควบคุมโรคใบไหม้แผลใหญ่ของข้าวโพดที่สอดคล้องกับประชากรเชื้อราก่อโรคในปัจจุบัน

อุปกรณ์และวิธีการ

1. เชื้อรา *E. turcicum* ที่ใช้ในงานวิจัย

เชื้อรา *E. turcicum* 36 ไอโซเลท ได้รับความอนุเคราะห์จากห้องปฏิบัติการโรคพืชที่เกิดจากเชื้อรา ภาควิชาโรคพืช คณะเกษตร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ โดยเป็นเชื้อราสายพันธุ์บริสุทธิ์ซึ่งผ่านการแยกเชื้อจากใบข้าวโพดแสดงอาการใบไหม้แผลใหญ่จากแหล่งปลูกข้าวโพดหวาน 35 แปลง 10 จังหวัด ในปี พ.ศ. 2564–2565 (Table 1) อนึ่งเชื้อราทุกไอโซเลทผ่านการบ่งชี้ชนิดเชื้อโดยการตรวจสอบลักษณะสัณฐานวิทยาและระบุชนิดด้วยวิธีการทางชีววิทยาโมเลกุลอาศัยการวิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทด์บริเวณไรโบโซมอลดีเอ็นเอ (บริเวณ ITS1-ITS2 และยีนกำหนดการสร้าง 5.8 rRNA) รวมถึงผ่านการพิสูจน์โรคตามหลักการของ Koch's postulates

$$\% \text{ การยับยั้งการเจริญเส้นใย} = [(a-b)/a] \times 100$$

โดย a คือ เส้นผ่าศูนย์กลางโคโลนีของเชื้อราที่เจริญเติบโตในชุดควบคุม

b คือ เส้นผ่าศูนย์กลางโคโลนีของเชื้อราที่เจริญเติบโตในอาหารพืชแต่ละความเข้มข้น

2. การประเมินระดับความไวของคาร์เบนดาซิมในการยับยั้งเส้นใยเชื้อรา

ประเมินระดับความไวของเชื้อราในการตอบสนองต่อสารคาร์เบนดาซิม โดยอาศัยการอ้างอิงค่าความเข้มข้นของสารเคมีที่สามารถยับยั้งการเจริญของเชื้อราแต่ละไอโซเลทที่ 50% (half maximal effective concentration, EC₅₀) ทั้งนี้พิจารณาแนวโน้มการเปลี่ยนแปลงระดับความไวโดยอาศัยการกำหนดค่า baseline sensitivity หากพบไอโซเลทเชื้อราแสดงค่า EC₅₀ สูงกว่า baseline sensitivity แสดงให้เห็นถึงประชากรเชื้อราชุดทดสอบดังกล่าวปรากฏไอโซเลทของเชื้อราที่แสดงแนวโน้มการตอบสนองลดลง มีดังนี้

2.1 ประเมินความไวของเชื้อราแต่ละไอโซเลทโดยการวิเคราะห์หาค่า EC₅₀ ด้วยวิธีอาหารพิษ (poison food method) วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ อย่างน้อย 2 ซ้ำที่แตกต่างกันอย่างอิสระ ซ้ำละ 3 จาน ทั้งนี้ก่อนการทดสอบด้วยวิธีอาหารพิษเลี้ยงเชื้อราแต่ละไอโซเลทในอาหาร potato dextrose agar (PDA) โดยบ่มเลี้ยงเชื้อราที่อุณหภูมิห้องเป็นเวลา 7 วัน เตรียมอาหารพิษโดยผสมสารคาร์เบนดาซิมในอาหาร PDA เข้มข้น 7 ระดับ (0 0.1 1 10 100 1,000 และ 10,000 µg/mL) รวมชุดควบคุมซึ่งไม่มีสารเคมี ทดสอบการเจริญเติบโตของเชื้อราบนอาหารพิษโดยเจาะขึ้นวันอาหาร PDA ที่มีเส้นใยเชื้อราอายุ 7 วัน ด้วย cork borer ขนาดเส้นผ่าศูนย์กลาง 0.5 ซม. ย้ายขึ้นวันไปยังจานอาหารพิษที่มีสารคาร์เบนดาซิม บ่มเลี้ยงเชื้อ 7 วัน บันทึกเส้นผ่าศูนย์กลางโคโลนีของเชื้อราที่โตบนอาหารพิษ คำนวณหาค่าเปอร์เซ็นต์การยับยั้งการเจริญเติบโตของเชื้อรา โดยใช้สูตร

Table 1 Identity, location and GenBank accession numbers of *E. turcicum* obtained from this study during 2021–2022

Location	Isolate code (GenBank accession number ^{1/})
Nakhon Ratchasima	ET-NMA-9-1-1 (PV436745), ET-NMA-10-1-1 (PV436746), ET-NMA-15-1-1 (PV436747)
Ratchaburi	ET-RBR-1-2-2 (PV436748), ET-RBR-6-2-1 (PV436749)
Kamphaeng Phet	ET-KPT-1-1-1 (PV436750)
Tak	ET-TAK-1-2-1 (PV436751), ET-TAK-8-1-1 (OQ733355), ET-TAK-10-1-1 (PV436753), ET-TAK-11-2-1 (PV436754), ET-TAK-12-1-1 (PV436755)
Mae Hong Son	ET-MSN-1-1-1 (PV436756), ET-MSN-6-1-1(PV436757), ET-MSN-7-2-1 (PV436758), ET-MSN-8-1-1 (OQ733356), ET-MSN-10-2-1 (PV436759), ET-MSN-12-1-1 (PV436760), ET-MSN-14-1-1 (PV436761), ET-MSN-16-1-1 (PV436762)
Chiang Mai	ET-CMI-2-1-1 (PV436763), ET-CMI-12-2-1 (PV436764), ET-CMI-19-1-1 (PV436765), ET-CMI-21-1-1 (PV476778)
Chiang Rai	ET-CRI-1-1-1 (PV436766), ET-CRI-3-1-1 (PV436767), ET-CRI-4-2-1 (PV436768), ET-CRI-6-1-1 (PV436769), ET-CRI-7-1-1 (PV436770)
Lop Buri	ET-LRI-1-1-1 (PV436771)
Kanchanaburi*	ET-KRI-1-1-1 (PV436772), ET-KRI-4-1-1 (PV436773), ET-KRI-6-1-1 (PV436774), ET-KRI-7-1-1 (PV436775), ET-KRI-9-1-1 (PV436776)
Nakhon Pathom*	ET-NPT-1-2-1 (PV436777)

^{1/} Accession numbers of specimens deposited in GenBank (NCBI), * Samples were obtained in 2022

2.2 วิเคราะห์หาค่า EC_{50} ของสารคาร์เบนดาซิม ในการยับยั้งการเจริญของเส้นใย *E. turcicum* ในแต่ละไอโซเลทด้วยวิธีโพรบิต (probit analysis) โดยจัดทำกราฟเส้นตรงและสมการเส้นตรง กำหนดให้แกน x คือ ลอการิทึมของความเข้มข้นสารเคมี และแกน y คือ ตัวเลขโพรบิตซึ่งเทียบเคียงค่าจากเปอร์เซ็นต์การยับยั้งการเจริญเติบโต คำนวณหาค่า EC_{50} โดยอาศัยการแทนค่าตัวแปร $y = 5$ (ค่าโพรบิตที่เทียบเท่า 50%) ในสมการเส้นตรงข้างต้น จากนั้นคำนวณหาค่าแอนติลอการิทึมของค่า x หนึ่งการทดลองซ้ำอิสระ 1 ซ้ำ แยกคำนวณค่า EC_{50} จากชุดทดลองซ้ำแต่ละชุด ซึ่งได้ค่า EC_{50} 3 ชุด/ไอโซเลท ทดสอบความแปรปรวนทางสถิติค่า EC_{50} จากชุดการทดลองซ้ำอิสระ 2 ซ้ำ ($n=3$ each) โดยใช้สถิติทดสอบของเลวิน ทั้งนี้ จะนำชุดข้อมูลของซ้ำอิสระที่ไม่มีความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ ($p>0.05$) มาหาค่าเฉลี่ยเพื่อรายงานค่าระดับความไวของเชื้อราแต่ละไอโซเลทต่อ

สารคาร์เบนดาซิม กำหนดค่า baseline sensitivity ของประชากรเชื้อราทดสอบต่อสารคาร์เบนดาซิมโดยอ้างอิงวิธีการของ Fang et al. (2023) ซึ่งอาศัยวิธีการแจกแจงความถี่และทดสอบความแตกต่างระหว่างความถี่ของชุดข้อมูล และทดสอบความแตกต่างระหว่างความถี่ของชุดข้อมูลโดยอาศัยสถิติทดสอบ Shapiro-Wilk ตรวจสอบค่าเฉลี่ย EC_{50} ของเชื้อราเพื่อหาช่วงการแจกแจงแบบปกติของชุดข้อมูลในการรายงานค่า baseline sensitivity ของประชากรเชื้อราทดสอบต่อสารคาร์เบนดาซิม

3. การตรวจสอบลำดับนิวคลีโอไทด์บริเวณยีนเบต้าทูบูลิน 2 ในไอโซเลทที่แสดงค่า EC_{50} ต่ำและสูงสุด

การปรากฏไอโซเลทเชื้อราที่มีระดับความไวต่อสารเคมีลดลงในประชากรเชื้อรา รวมถึงการตรวจพบระดับความไวต่อสารเคมีที่มีความแตกต่างกันอย่างมากระหว่างไอโซเลทเชื้อราในประชากรทดสอบอาจบ่งชี้ถึงการพัฒนาของสายพันธุ์เชื้อราต้านทานต่อ

สารเคมี (Chen et al., 2020) ทั้งนี้การกลายพันธุ์บริเวณยีน *Tub2* ถือเป็นกลไกหลักนำไปสู่การต้านทานสารเคมีกลุ่ม MBC (Ma and Michailides, 2005) โดยการเปลี่ยนแปลงของนิวคลีโอไทด์บริเวณยีน *Tub2* ที่ตำแหน่งโคดอน 167 198 และ 200 มีความสัมพันธ์กับการต้านทานสารคาร์เบนดาซิมในเชื้อราก่อโรคพืชหลายชนิด งานวิจัยนี้ตรวจสอบลำดับนิวคลีโอไทด์บริเวณยีน *Tub2* ที่ตำแหน่งโคดอน 167 198 และ 200 ในไอโซเลทเชื้อรา *E. turcicum* ที่แสดงค่า EC₅₀ ต่อสารคาร์เบนดาซิมต่ำสุดและสูงสุดสองลำดับแรก (n=4) โดยเลี้ยงเชื้อราแต่ละไอโซเลทในอาหารเหลว PDB (potato dextrose broth) 5 มล. เป็นเวลา 48 ชม. และเก็บเกี่ยวเส้นใยเชื้อราเพื่อนำมาสกัดดีเอ็นเอด้วยวิธี CTAB (Doyle and Doyle, 1987) ดำเนินการตามขั้นตอนที่ปรากฏในงานวิจัยของ Boonkorn et al. (2024) ทำปฏิกิริยาพีซีอาร์เพื่อเพิ่มปริมาณดีเอ็นเอบริเวณยีน *Tub2* โดยออกแบบไพรเมอร์จากบริเวณยีน *Tub2* ของเชื้อรา *E. turcicum* อาศัยข้อมูลลำดับนิวคลีโอไทด์บริเวณยีนที่คาดว่ากำหนดการสร้างโปรตีนเบต้าทูบูลิน 2 ของเชื้อรา *E. turcicum* สายพันธุ์ Et28A (accession number = XM_008032318) ซึ่งปรากฏในฐานข้อมูล GenBank ซึ่งชุดไพรเมอร์ที่ออกแบบได้แก่ Tub2F (5'-CCCCGACAACCTTCGTCTTTGG-3') และ Tub2R (5'-AGAGGAGCGAATCCAACCAT-3') สามารถเพิ่มปริมาณดีเอ็นเอบริเวณยีน *Tub2* ที่ครอบคลุมตำแหน่งโคดอน 167 198 และ 200

เตรียมส่วนผสมสำหรับทำปฏิกิริยาพีซีอาร์ 50 ไมโครลิตร โดยใช้เอนไซม์ FIREPol® DNA polymerase (Solis BioDyne, Estonia) ตามคำแนะนำที่ระบุไว้ในคู่มือผลิตภัณฑ์ ทำปฏิกิริยาในเครื่องพีซีอาร์โดยตั้งโปรแกรมดังต่อไปนี้ ขั้นตอน initial denaturation ที่อุณหภูมิ 94°C. เป็นเวลา 2 นาที ตามด้วย 25 รอบ

ของขั้นตอนดังต่อไปนี้ denaturation 94°C. เป็นเวลา 20 วินาที ขั้นตอน annealing 58°C. เป็นเวลา 30 วินาที และขั้นตอน extension 72°C. เป็นเวลา 1 นาที เมื่อครบ 25 รอบของขั้นตอนดังกล่าวแล้วตามด้วยขั้นตอนสุดท้ายคือ 72°C. เป็นเวลา 5 นาที วิเคราะห์ลำดับนิวคลีโอไทด์ของผลผลิตพีซีอาร์ขนาด 561 คู่เบสด้วยวิธี Sanger ภายใต้การดำเนินการของบริษัทยูทูไปโอ (ประเทศไทย) จำกัด นำลำดับนิวคลีโอไทด์ของยีน *Tub2* ของแต่ละไอโซเลท รวมถึง *E. turcicum* สายพันธุ์ Et28A (accession number = XM_008032318) *E. turcicum* isolate ET001 (accession number = KU670340) และ *E. turcicum* isolate Et-09 (accession number = PV778075) มาเปลี่ยนให้เป็นลำดับกรดอะมิโนด้วยโปรแกรม Protein translation tool จากนั้นเปรียบเทียบลำดับนิวคลีโอไทด์และลำดับกรดอะมิโนในเชื้อราทั้ง 7 ไอโซเลท ด้วยโปรแกรม Clustal Omega เพื่อเปรียบเทียบลำดับนิวคลีโอไทด์และกรดอะมิโนที่ตำแหน่งโคดอน 167 198 และ 200 ในไอโซเลทเชื้อราที่แสดงค่า EC₅₀ ต่อสารคาร์เบนดาซิมต่ำและสูงสุดสองลำดับแรกร่วมกับ *E. turcicum* ไอโซเลทอื่น ๆ ซึ่งปรากฏในฐานข้อมูล GenBank

4. ประสิทธิภาพของสารเคมีในการควบคุมโรคในแปลงปลูก

ทดสอบประสิทธิภาพของสารเคมีในการควบคุมโรคใบไหม้แผลใหญ่ของข้าวโพดหวานในสภาพแปลงปลูกที่มีการติดเชื้อโดยธรรมชาติ 2 การทดลอง ใน ต.ห้วยป่าหวาย อ.พระพุทธรบาท จ. สระบุรี ซึ่งปลูกข้าวโพดหวานพันธุ์ไฮบริด 3 ทดสอบระหว่างวันที่ 1 ส.ค.-30 ต.ค. 2564 และ ต. โคกมะม่วง อ. ปะคำ จ. บุรีรัมย์ ซึ่งปลูกข้าวโพดหวานพันธุ์ไฮบริด 59 ทดสอบระหว่างวันที่ 1 ส.ค.-30 ส.ค. 2565 วางแผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ 2 ซ้ำ 4 กรรมวิธี ได้แก่ (1) พันด้วยสารคาร์เบนดาซิม

(2) พันด้วยสารอะซอกซิสโตรบิน+ไดฟิโนโคนาโซล
 (3) พันด้วยสารทีบูโคนาโซล+ไตรฟลอกซีโตรบิน
 ในอัตราแนะนำที่ระบุไว้ในฉลากผลิตภัณฑ์ (Table 2)
 และ (4) พันด้วยน้ำเปล่า (วิธีควบคุม) ทั้งนี้สารเคมี
 ผสมที่เลือกใช้จัดเป็นกลุ่มสารเคมีที่มีประสิทธิภาพสูง
 ในการควบคุมโรคใบไหม้แผลใหญ่ (วิไลวรรณและ
 คณะ, 2552; วราภรณ์และคณะ, 2558) และมีการใช้
 ในพื้นที่ปลูกข้าวโพดหวานที่ดำเนินการเก็บรวบรวม
 ไอโซเลทเชื้อรา ปลูกแบบแถวคู่ ร่องกว้าง 120 ซม. ปลูก
 กลางสันร่องทั้งสองข้าง ระหว่างต้น 30 ซม. หลุมละ
 2 เมล็ด ถอนให้เหลือ 1 ต้น/หลุม เมื่ออายุ 15 วัน ใส่ปุ๋ย
 2 ครั้ง ครั้งที่ 1 เมื่อข้าวโพดอายุ 25-30 วัน ใส่ปุ๋ย
 15-15-15 อัตรา 30 กก./ไร่ ครั้งที่ 2 เมื่อข้าวโพดอายุ
 40-45 วัน ใส่ปุ๋ย 46-0-0 อัตรา 30 กก./ไร่ ฉีดพ่น
 สารเคมีตามกรรมวิธี 2 ครั้ง ในระยะออกดอกหรือ
 ที่อายุ 45 วัน และ 60 วัน เมื่อข้าวโพดมีอายุ 65 วัน
 สุ่มเก็บใบในแต่ละกรรมวิธี 50 ต้น นับจำนวนแผล/ต้น
 คำนวณเปอร์เซ็นต์แผลเฉลี่ย/ต้น เปรียบเทียบกับชุด
 ควบคุมเพื่อคำนวณเปอร์เซ็นต์การลดปริมาณโรค
 วิเคราะห์ความแปรปรวนของข้อมูลด้วยวิธี ANOVA
 และความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี Duncan's
 multiple range test

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. การประเมินระดับความไวของคาร์เบนดาซิมใน การยับยั้งเส้นใยเชื้อรา

ค่า EC_{50} ของสารคาร์เบนดาซิมในการยับยั้ง
 เส้นใยเชื้อรา *E. turcicum* อยู่ในช่วง 1.23–670.19
 $\mu\text{g/mL}$ โดยมีค่ามัธยฐาน 10.24 $\mu\text{g/mL}$ และค่าเฉลี่ย±
 ค่าความคลาดเคลื่อนมาตรฐาน (SE) 62.36 ± 24.59
 $\mu\text{g/mL}$ (Figure 1A) ทั้งนี้ค่า EC_{50} ในการยับยั้งเชื้อรา
 ไอโซเลทที่ไวต่อสารเคมีต่ำสุดแตกต่างกัน 544.8 เท่า
 เมื่อเทียบกับไอโซเลทที่ไวต่อสารเคมีสูงสุด แสดงให้

เห็นว่าประชากรเชื้อราก่อโรคใบไหม้แผลใหญ่
 ทั้ง 36 ไอโซเลท มีความแปรผันด้านความไวต่อสาร
 คาร์เบนดาซิมอย่างมาก ซึ่งสอดคล้องกับกราฟแจก
 แจงความถี่จำนวนไอโซเลทเชื้อราทดสอบในแต่ละ
 ช่วงของค่า EC_{50} ที่แสดงลักษณะการกระจายตัวใน
 รูปแบบการแจกแจงฐานนิยมเดี่ยวเบ้ขวา (Figure 1B)
 ซึ่งให้เห็นถึงความไวต่อสารคาร์เบนดาซิมของเชื้อรา
 ทดสอบในงานวิจัยนี้ลดระดับลง (ค่า EC_{50} สูงขึ้น)
 ทั้งนี้การทดสอบความแตกต่างระหว่างความถี่ของ
 ชุดข้อมูลในแต่ละช่วงระดับค่า EC_{50} พบว่าเชื้อรา 17
 ไอโซเลท หรือ 47.22% ซึ่งมีค่า EC_{50} ในช่วง 1.23–
 8.70 $\mu\text{g/mL}$ ให้ค่า p-value 0.078 ซึ่งสูงกว่าระดับ
 นัยสำคัญ ($p>0.05$) ดังนั้นค่า EC_{50} ในช่วงดังกล่าว
 ไม่แสดงความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ
 หรือกล่าวได้ว่าเป็นช่วงข้อมูลค่า EC_{50} ที่มีการแจก
 แจงแบบปกติ ดังนั้นค่า EC_{50} ในช่วง 1.23–8.70
 $\mu\text{g/mL}$ อาจพิจารณาใช้เป็นค่า baseline sensitivity
 ของประชากรเชื้อรา *E. turcicum* ซึ่งรวบรวมในปี
 พ.ศ. 2564–2565 (Figure 1B) ทั้งนี้พบว่า ไอโซเลท
 เชื้อราทดสอบในงานวิจัยนี้กว่า 52.78% แสดงค่า
 ความไวต่อสารคาร์เบนดาซิมสูงกว่าค่า baseline
 sensitivity ซึ่งให้เห็นว่าไอโซเลทส่วนใหญ่มีการ
 ปรับตัวโดยมีระดับความไวต่อสารคาร์เบนดาซิมลดลง
 ซึ่งอาจเป็นข้อบ่งชี้ว่ามีการพัฒนาของสายพันธุ์เชื้อรา
 ที่ต้านทานต่อสารคาร์เบนดาซิมในประชากรเชื้อรา
 ก่อโรคใบไหม้แผลใหญ่ของข้าวโพดในประเทศไทย
 หนึ่ง He et al. (2020) ได้จัดกลุ่มความไวต่อสาร
 คาร์เบนดาซิมของ *S. sclerotiorum* และ *B. cinerea*
 โดยเชื้อที่แสดงค่า EC_{50} น้อยกว่า 1 $\mu\text{g/mL}$ จัดอยู่ใน
 กลุ่มเชื้อที่ไวต่อสารเคมี (sensitivity) เชื้อที่แสดงค่า
 EC_{50} มากกว่า 1 $\mu\text{g/mL}$ แต่น้อยกว่า 10 $\mu\text{g/mL}$ จัดอยู่
 ในกลุ่มต้านทานต่อสารเคมีในระดับต่ำ (low resistance)
 เชื้อที่แสดงค่า EC_{50} มากกว่า 10 $\mu\text{g/mL}$ แต่น้อยกว่า

100 µg/mL จัดอยู่ในกลุ่มต้านทานต่อสารเคมีในระดับปานกลาง (moderate resistance) และเชื้อที่แสดงค่า EC₅₀ มากกว่า 100 µg/mL จัดอยู่ในกลุ่มต้านทานต่อสารเคมีสูง (high resistance) ทั้งนี้ งานวิจัยนี้พบว่า ความไวต่อสารคาร์เบนดาซิมในทุกไอโซเลทของเชื้อราทดสอบแสดงค่า EC₅₀ มากกว่า 1 µg/mL ดังนั้นอาจเป็นไปได้ว่า *E. turcicum* ทุกไอโซเลทที่รวบรวมได้ในงานวิจัยนี้จัดอยู่ในกลุ่มต้านทานต่อสารคาร์เบนดาซิม โดยเชื้อรา 50% ที่รวบรวมในงานวิจัยนี้ต้านทานต่อสารคาร์เบนดาซิมในระดับปานกลางถึงสูง ดังนั้น การใช้สารคาร์เบนดาซิมอาจมี

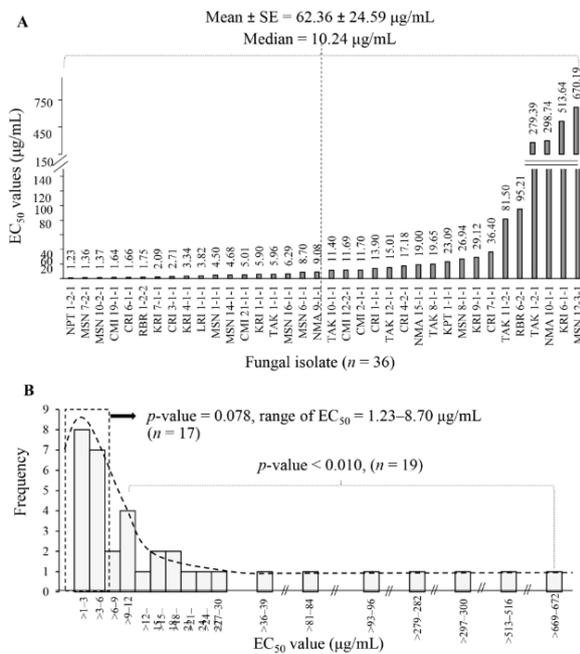


Figure 1 Sensitivity of *E. turcicum* (n=36 isolates) to carbendazim. (A) Carbendazim sensitivity of each isolate represented as EC₅₀ value (µg/mL) with mean±SE and median. (B) Frequency distribution of carbendazim sensitivity in *E. turcicum* population (n=36). The Shapiro–Wilk test was performed for a test of normality, and p>0.05 indicates normal distribution of the data. The range of EC₅₀ values within the normally distributed data represents the baseline sensitivity

ประสิทธิภาพต่ำในการควบคุมเชื้อรากอโรคใบไหม้แผลใหญ่ในบางพื้นที่ของประเทศไทย อนึ่งผลการวิจัยฉบับนี้สอดคล้องกับงานวิจัยของ De Rossi et al. (2015) ซึ่งพบว่าเชื้อรากอโรคใบไหม้แผลใหญ่ข้าวโพดทุกไอโซเลทที่รวบรวมได้จากประเทศอาเจนตินาและบราซิลจัดอยู่ในกลุ่มไม่ไวต่อสารคาร์เบนดาซิม (carbendazim insensitivity) และระบุว่าสารเคมีดังกล่าวไม่เป็นพิษต่อ *E. turcicum*

2. การตรวจสอบลำดับนิวคลีโอไทด์บริเวณยีนเบต้าทูบูลิน2 ในไอโซเลทที่แสดงค่า EC50 ต่ำและสูงสุด

ไอโซเลทเชื้อราที่มีความไวต่อสารคาร์เบนดาซิมสูงสุดแสดงค่า EC₅₀ ต่างจากไอโซเลทเชื้อราที่มีความไวต่อสารคาร์เบนดาซิมต่ำสุดถึง 544.8 เท่า จึงตรวจสอบสมมติฐานที่วางไว้ว่า ระดับความไวต่อสารคาร์เบนดาซิมที่แตกต่างกันอย่างมากระหว่างตัวแทนไอโซเลทเชื้อราที่ไวต่อสารเคมีต่ำสุดและสูงสุดในสองลำดับแรกนั้น อาจมีสาเหตุเกิดจากการกลายพันธุ์บริเวณยีน *Tub2* ที่ตำแหน่งโคดอน 167 198 และ 200 จากการอ่านลำดับนิวคลีโอไทด์ บริเวณยีน *Tub2* ของเชื้อรา *E. turcicum* ไอโซเลท MSN12-3-1 และ KRI6-1-1 ซึ่งแสดงความไวต่อสารคาร์เบนดาซิมต่ำสุดและไอโซเลท NPT1-2-1 และ MSN7-2-1 ซึ่งแสดงความไวต่อสารเคมีสูงสุด รวมถึงลำดับนิวคลีโอไทด์ของยีนดังกล่าวจากเชื้อรา *E. turcicum* สายพันธุ์ Et28A (accession number = XM_008032318) *E. turcicum* isolate ET001 (accession number = KU670340) และ *E. turcicum* isolate Et-09 (accession number = PV778075) พบว่า เชื้อราทั้ง 7 ไอโซเลท แสดงลำดับนิวคลีโอไทด์บริเวณโคดอน 167 198 และ 200 เหมือนกัน (Figure 2) โดยตำแหน่งโคดอน167 พบการแปลรหัสกรดอะมิโนชนิดไทโรซีน ทั้งนี้ Liu et al. (2019) รายงานถึงรูปแบบการกลายพันธุ์บริเวณยีนเบต้าทูบูลินที่ตำแหน่งโคดอน167

จากฟีนิลอะลานีน (F) เปลี่ยนเป็นไทโรซีน มีความสัมพันธ์กับความต้านทานสารคาร์เบนดาซิม ระดับปานกลาง และพบในสัดส่วนสูงสุดเมื่อเปรียบเทียบกับรูปแบบการกลายพันธุ์อื่น ๆ ในประชากรเชื้อรา *F. graminearum* ก่อโรค Fusarium head blight ของข้าวสาลีในมณฑลเหอหนานของประเทศจีน อนึ่ง งานวิจัยนี้พบกรดอะมิโนชนิดไทโรซีน ที่ตำแหน่งโคดอน 167 ในตัวแทนไอโซเลทเชื้อรา *E. turcicum* ทั้ง 4 ไอโซเลท รวมถึงหากพิจารณาการจัดกลุ่มระดับความต้านทานคาร์เบนดาซิมโดยอ้างอิงงานของ He et al. (2020) ตัวแทนไอโซเลทเชื้อราดังกล่าวอาจจัดอยู่ในกลุ่มต้านทานต่อคาร์เบนดาซิม อย่างไรก็ตาม งานวิจัยนี้ยังไม่สามารถสรุปได้อย่างชัดเจนว่าไทโรซีนที่ปรากฏในตำแหน่งดังกล่าวมีความเกี่ยวข้องกับการต้านทานสารคาร์เบนดาซิม เนื่องจากข้อมูลที่จำกัด เช่น ขาดข้อมูลสายพันธุ์เชื้อรา *E. turcicum* ที่พบฟีนิลอะลานีนที่ตำแหน่งโคดอน 167 เพื่อใช้ในการเทียบเคียง รวมถึงขาดข้อมูลความไวในการตอบสนองต่อคาร์เบนดาซิมของ *E. turcicum* สายพันธุ์ Et28A ไอโซเลท ET001 และ Et-09 เป็นต้น ทั้งนี้เป็นไปได้ว่าไทโรซีนเป็นกรดอะมิโนตามธรรมชาติ (wild-type) ที่ตำแหน่งโคดอน 167 ของเชื้อรา *E. turcicum* เนื่องจากการตรวจสอบลำดับนิวคลีโอไทด์ที่ตำแหน่งดังกล่าวใน *E. turcicum* สายพันธุ์ Et28A ไอโซเลท ET001 และ Et-09 (Figure 2) รวมถึงไอโซเลทอื่น ๆ ทั้งหมดที่ปรากฏในฐานข้อมูล GenBank (n = 15) (ไม่ได้แสดงข้อมูล) พบว่า ลำดับนิวคลีโอไทด์บริเวณโคดอนดังกล่าวแปลรหัสกรดอะมิโนชนิดไทโรซีนในทุกไอโซเลท สำหรับการตรวจสอบลำดับนิวคลีโอไทด์บริเวณตำแหน่งโคดอนที่ 198 และ 200 ในเชื้อราทั้ง 7 ไอโซเลท พบกรดกลูตามิกและฟีนิลอะลานีนตามลำดับ ซึ่งยังคงเป็นรูปแบบโคดอนที่สัมพันธ์กับ

ลักษณะของเชื้อราที่มีความไวสูงในการตอบสนองต่อสารคาร์เบนดาซิม

กลุ่มตัวแทนเชื้อราทดสอบซึ่งมีทั้งไอโซเลทที่ไวต่อสารเคมีสูงสุดและต่ำสุดสองลำดับแรก พบการแปลรหัสโคดอนในตำแหน่ง 167 198 และ 200 เป็นกรดอะมิโนชนิดเดียวกัน คือ Y E และ F ตามลำดับ แสดงให้เห็นว่าตำแหน่งโคดอนดังกล่าวไม่มีความสัมพันธ์กับระดับความไวต่อสารคาร์เบนดาซิมที่แตกต่างกันอย่างยิ่งในกลุ่มเชื้อทดสอบ ทั้งนี้ การตอบสนองต่อสารคาร์เบนดาซิมที่แตกต่างกันนี้อาจเกี่ยวข้องกับตำแหน่งโคดอนอื่น ๆ เช่น โคดอนที่ 6 รูปแบบ H6N ซึ่งพบใน *F. graminearum* ไอโซเลทที่ต้านทานปานกลางต่อสารกลุ่มเบนซิมิดาโซลโดยพบการเปลี่ยนแปลงจากฮีสทีดีน (H) ไปเป็นแอสพาราจिन (N) (Sevastos et al., 2016) หรือโคดอนที่ 134 รูปแบบ Q134L (กลูตามีนเป็นลิวซีน) และโคดอนที่ 351 รูปแบบ T351I (ทรีโอนีนเป็นไอโซลิวซีน) ซึ่งค้นพบโดยวิธีการชักนำ *Fusarium proliferatum* ให้เกิดการกลายพันธุ์ต่อสารคาร์เบนดาซิมในหลอดทดลอง (*in vitro*) (Xu et al., 2019) นอกจากนี้อาจเป็นไปได้ว่าไอโซเลท *E. turcicum* ที่มีความไวต่อสารคาร์เบนดาซิมในระดับต่ำซึ่งรายงานในงานวิจัยนี้ อาศัยกลไกอื่น ๆ ในการต้านทานต่อสารคาร์เบนดาซิม ดังปรากฏในงานวิจัยของ Song et al. (2012) ที่พบว่าการต้านทานสารเคมีคาร์เบนดาซิมของ *Isaria fumosorosea* เชื้อราในแมลงนั้นไม่ได้อาศัยกลไกการกลายพันธุ์ที่ตำแหน่งยีนเบต้าทูปูลิน แต่อาศัยกลไกการเพิ่มการแสดงออกของยีน *ifT1* โดยยีนดังกล่าวเกี่ยวข้องกับการสร้างโปรตีนในการทำหน้าที่ขนส่งโมเลกุลผ่านเยื่อหุ้มเซลล์ หรือที่เรียกว่า ABC transporters เพื่อลดระดับสารเคมีหรือลดความเป็นพิษของสารเคมีในเซลล์ ดังนั้น การศึกษาถึงกลไกการต้านทานสารคาร์เบนดาซิมในเชื้อรา *E. turcicum* ควรมีการตรวจสอบลำดับอะมิโน

ที่ตำแหน่งโคดอนอื่น ๆ ของ *Tub2* ร่วมด้วย รวมถึงขยายการศึกษาให้ครอบคลุมถึงกลไกการต้านทานสารคาร์เบนดาซิมในรูปแบบอื่น อาทิ ติดตามการแสดงออก

ของยีนที่กำหนดการสร้างโปรตีนในกลุ่ม ABC transporters เพื่อทำความเข้าใจถึงกลไกของเชื้อรา *E. turcicum* ในการปรับตัวเพื่อลดระดับความไวต่อสารคาร์เบนดาซิม

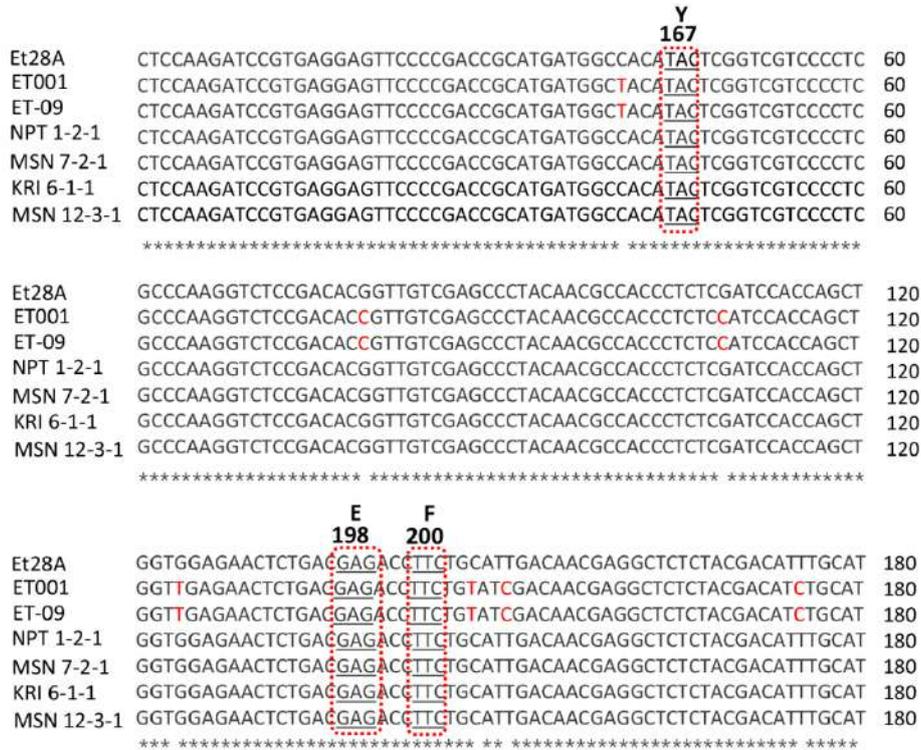


Figure 2 Comparison of nucleotide and amino acid sequences at codons 167, 198, and 200 in the partial nucleotide sequences of the *E. turcicum* β_2 -tubulin (*Tub2*) region among the most highly sensitive isolates (NPT 1-2-1 and MSN 7-2-1) and less sensitive isolates (KRI 6-1-1 and MSN 12-3-1) to carbendazim, alongside the reference strain *E. turcicum* Et28A (GenBank accession no. XM_008032318), *E. turcicum* isolate ET001 (accession number = KU670340) and *E. turcicum* isolate Et-09 (accession number = PV778075). Mutations at codons F167Y, E198A/V/G/L/K/Q, and F200Y in the *Tub2* gene are commonly associated with resistance to carbendazim. Asterisks indicate positions with identical nucleotides across sequences, while red letters represent nucleotide polymorphisms observed in certain isolates

3. ประสิทธิภาพของสารเคมีในการควบคุมโรคในแปลงปลูก

ประสิทธิภาพการควบคุมโรคใบไหม้แผลใหญ่ของข้าวโพดที่เกิดจากเชื้อรา *E. turcicum* ในข้าวโพดหวานพันธุ์ไฮบริดส์ 3 และไฮบริดส์ 59 มีความสอดคล้องกัน (Table 2) การฉีดพ่นสารคาร์เบนดาซิมมีประสิทธิภาพในการลดการเกิดโรคได้น้อยกว่าการฉีดพ่นสารเคมีผสมระหว่างอะซอกซีสโตรบิน+ไดฟีโนโคนาโซล และทีบูโคนาโซล+ไตรฟลอกซีสโตรบิน

ตามอัตราแนะนำซึ่งระบุที่ฉลาก โดยเฉพาะอย่างยิ่งในแปลงปลูกข้าวโพดหวานพันธุ์ไฮบริดส์ 3 ซึ่งจัดเป็นพันธุ์อ่อนแอ (วรารักษ์และคณะ, 2558) พบว่าประสิทธิภาพในการลดโรคของสารคาร์เบนดาซิมน้อยกว่าการฉีดพ่นสารเคมีผสมทั้ง 2 กรรมวิธี 2.82 และ 1.74 เท่า ตามลำดับ สำหรับการทดสอบในแปลงข้าวโพดหวานพันธุ์ไฮบริดส์ 59 พบว่า การฉีดพ่นสารคาร์เบนดาซิมแสดงประสิทธิภาพในการลดโรคน้อยกว่าการฉีดพ่นสารเคมีผสมทั้ง 2 กรรมวิธี 1.43 และ

1.35 เท่า ตามลำดับ ทั้งนี้สารเคมีผสมอะซอกซิสโตรบิน+ ไดฟิโนโคนาโซล และทีบูโคนาโซล+ไตรฟลอกซิสโตรบิน เป็นสารเคมีผสมระหว่างกลุ่มสารเคมีต่างกลุ่มกลไก การออกฤทธิ์ ซึ่งประกอบด้วยสารเคมีจากกลุ่ม DMI และ QoI โดยสารเคมีผสมจากกลุ่มดังกล่าวมีประสิทธิภาพสูงในการควบคุมโรคใบไหม้แผลใหญ่ข้าวโพดในแปลงปลูกของสหรัฐอเมริกา (Weems, 2016) ทั้งนี้สารเคมีซึ่งแนะนำเพื่อการจัดการโรคใบไหม้แผลใหญ่ในประเทศไทยนั้นมีความเกี่ยวข้องกับกลุ่มกลไกการออกฤทธิ์ 3 กลุ่มด้วยกัน ได้แก่กลุ่ม MBC ได้แก่

คาร์เบนดาซิม กลุ่ม DMI ได้แก่ ไดฟิโนโคนาโซล โพรพิโคนาโซล ทีบูโคนาโซล และอีพอกซีโคนาโซล และจากกลุ่ม QoI ได้แก่ อะซอกซิสโตรบิน และไตรฟลอกซิสโตรบิน ทั้งนี้ วิไลวรรณและคณะ (2552) รายงานว่า การฉีดพ่นสารคาร์เบนดาซิมผสมกับสารอีพอกซีโคนาโซล สารอะซอกซิสโตรบินผสมกับสารไดฟิโนโคนาโซลและสารโพรพิโคนาโซลเชิงเดี่ยวเมื่อเริ่มพบอาการของโรค แสดงประสิทธิภาพในการป้องกันกำจัดโรคใบไหม้แผลใหญ่ของข้าวโพดได้ดี

Table 2 Efficacy of fungicides in controlling Northern corn leaf blight caused by *Exserohilum turcicum* in sweet corn cultivars, Hy-brix3 and Hy-brix59

Treatment	Application rate/ 1 L of water	Average leaf lesions/plant ^{1/} (%)		Disease reduction ^{2/} (%)	
		Hy-brix3	Hy-brix59	Hy-brix3	Hy-brix59
Carbendazim (50%SC)	1.5 mL	31.11±2.11 c	22.12±1.67 c	18.65	39.79
Azoxystrobin + difenoconazole (20%+12.5% SC)	0.5 mL	18.16±1.05 a	15.88±1.02 a	52.51 (2.82-fold) ^{3/}	56.78 (1.43-fold)
Tebuconazole + trifloxystrobin (50%+25% WG)	0.6 g	25.82±1.68 b	16.98±0.65 b	32.48 (1.74-fold)	53.78 (1.35-fold)
Water		38.24±2.83 d	36.74±2.30 d		

^{1/} Means±SD in the same column followed by the same letter are not significantly different at the 5% level, according to DMRT

^{2/} Disease reduction (%) = [(Disease in control – Disease in treatment) / Disease in control] × 100

^{3/} Values in parentheses represent the fold decrease in disease control efficacy of carbendazim relative to fungicide mixtures, calculated as: disease reduction (%) of fungicide mixture ÷ disease reduction (%) of carbendazim

อนึ่ง การใช้สารคาร์เบนดาซิมเพื่อการควบคุมโรคใบไหม้แผลใหญ่ปรากฏในงานวิจัยและคำแนะนำที่มีอยู่แต่เดิมนั้น แนะนำให้ใช้สารคาร์เบนดาซิมในลักษณะร่วมกับสารเคมีจากกลุ่ม DMI ได้แก่ อีพอกซีโคนาโซล ดังนั้น การศึกษาประสิทธิภาพของสารคาร์เบนดาซิมครั้งต่อไปควรพิจารณาเพิ่มกรรมวิธีการฉีดพ่นในรูปแบบผสมกับสารกลุ่ม DMI เพื่อประเมิน

ประสิทธิภาพของสารเคมีผสมดังกล่าวว่ายังคงสอดคล้องกับคำแนะนำที่มีอยู่เดิมหรือไม่ ข้อมูลดังกล่าวจะเป็นประโยชน์ในการปรับปรุงแนวทางการใช้สารกำจัดเชื้อราเพื่อควบคุมโรคใบไหม้แผลใหญ่ข้าวโพดในประเทศไทยได้อย่างเหมาะสม และสอดคล้องกับสถานการณ์ที่ความไวต่อสารคาร์เบนดาซิมของประชากรเชื้อรา *E. turcicum* มีแนวโน้มลดลง

สรุปผลการทดลอง

การทดสอบความไวต่อสารคาร์เบนดาซิมของเชื้อราก่อโรคใบไหม้แผลใหญ่ข้าวโพด 36 ไอโซเลทพบว่า ค่า EC₅₀ ของสารคาร์เบนดาซิมในการยับยั้งเส้นใยเชื้อรา *E. turcicum* อยู่ในช่วง 1.23–670.19 µg/mL กราฟแจกแจงความถี่จำนวนไอโซเลทเชื้อราทดสอบในแต่ละช่วงของค่า EC₅₀ แสดงลักษณะการกระจายตัวในรูปแบบการแจกแจงฐานนิยมเดี่ยวเบ้ขวา รวมถึงไอโซเลทเชื้อรา 52.78% แสดงค่าความไวต่อสารคาร์เบนดาซิมสูงกว่าค่า baseline sensitivity (1.23–8.70 µg/mL) ซึ่งให้เห็นว่า ไอโซเลทส่วนใหญ่มีการปรับตัวโดยมีระดับความไวต่อสารคาร์เบนดาซิมลดลง การตรวจสอบลำดับนิวคลีโอไทด์ที่บริเวณยีน *Tub2* ที่ตำแหน่งโคดอน 167 198 และ 200 ในไอโซเลทเชื้อราที่ไวต่อสารคาร์เบนดาซิมต่ำสุดและสูงสุดสองลำดับแรก ไม่พบความแตกต่างของลำดับนิวคลีโอไทด์บ่งชี้ว่าโคดอนทั้ง 3 ตำแหน่งไม่มีความสัมพันธ์กับระดับความไวต่อสารคาร์เบนดาซิมที่แตกต่างกันอย่างยิ่งในกลุ่มตัวอย่างเชื้อราทดสอบ นอกจากนี้การพ่นสารคาร์เบนดาซิม 30 มล./น้ำ 20 ลิตร ในแปลงปลูกข้าวโพดหวานพบว่า มีประสิทธิภาพต่ำในการลดโรคใบไหม้แผลใหญ่เมื่อเปรียบเทียบกับกรณีฉีดสารเคมีผสมระหว่างกลุ่ม DMI และ QoI ดังนั้น การปรับปรุงคำแนะนำการใช้สารคาร์เบนดาซิมร่วมกับสารเคมีกลุ่มอื่นจะช่วยให้การควบคุมโรคใบไหม้แผลใหญ่ข้าวโพดในประเทศไทยมีประสิทธิภาพมากขึ้น

คำขอบคุณ

งานวิจัยนี้ได้รับงบประมาณสนับสนุนจากทุนอุดหนุนการพัฒนาการวิจัยการเกษตร จากสำนักงานพัฒนาการวิจัยการเกษตร (องค์การมหาชน) ปีงบประมาณ 2564 รหัสโครงการวิจัย PRP6405031980

เอกสารอ้างอิง

- วิไลวรรณ พรหมคำ เขาวนาถ พุทธิเทพ พิระวรรณ พัฒนวิภาส ศิวีไล ลาภบรรจพ พิมพร โชติธรรมาวงษ์ ปัญญา พุกสุ่น และเครือวัลย์ บุญเงิน. 2552. การควบคุมโรคใบไหม้แผลใหญ่ในข้าวโพดหวานโดยการใช้สารป้องกันกำจัดโรค. แหล่งข้อมูล: <http://lib.doa.go.th/multim/e-book/EB00538.pdf>. สืบค้น: 8 พฤษภาคม 2568.
- องอาจ กิตติคุณชัย. 2567. สถานการณ์ปัจจุบันของอุตสาหกรรมข้าวโพดหวานไทย. แหล่งข้อมูล: <https://thaifood.org/main/revealed-the-currentsituation-of-thai-sweetcorn/>. สืบค้น: 8 พฤษภาคม 2568.
- วารภรณ์ บุญเกิด พัทธวิภา ใจจักรคำ สุพจน์ กาเข้ม จีรนนท์ แหม่มสูงเนิน และสุดฤดี ประเทืองวงศ์. 2558. การจัดการโรคใบไหม้แผลใหญ่ข้าวโพดด้วยการใช้พันธุ์ต้านทานโรค สารเคมี และจุลินทรีย์ปฏิปักษ์. หน้า 319-330. ใน: เรื่องเติมการประชุมวิชาการข้าวโพดและข้าวฟ่างแห่งชาติ ครั้งที่ 35. วันที่ 5-7 ส.ค. 2558. โรงแรมเดอะกรีนเนอรี รีสอร์ทเขาใหญ่, นครราชสีมา.
- Ahangar, MA., S.H. Wani, Z.A. Dar, J. Roohi, F. Mohiddin, M. Bansal, M. Choudhary, S.K. Aggarwal, S.A. Waza, K.A. Dar, A.E. Sabagh, C. Barutcular, O. Konuşkan and M.A. Hossain. 2022. Distribution, etiology, molecular genetics and management perspectives of northern corn leaf blight of maize (*Zea mays* L.). *Phyton*. 91(10): 2111–2133.
- Boonkorn, Y., V. Tongsrri, O. Piasai and P. Songkumarn. 2024. Characterization, pathogenicity, and fungicide response of *Exserohilum rostratum* causing leaf spot on rice in Thailand. *European Journal of Plant Pathology*. 170(3): 549–566.
- Chen, F., S.S. Tsuji, Y. Li, M. Hu, M.A. Bandeira, M.P.S. Câmara, S.J. Michereff and G. Schnabel. 2020. Reduced sensitivity of azoxystrobin and thiophanate-methyl resistance in *Lasiodiplodia theobromae* from papaya. *Pesticide Biochemistry and Physiology*. 162: 60–68.
- Dai, Y., L. Gan, H. Ruan, N. Shi, Y. Du, L. Liao, Z. Wei, Z. Teng, F. Chen and X. Yang. 2018. Sensitivity of *Cochliobolus heterostrophus* to three demethylation inhibitor fungicides, propiconazole, diniconazole and prochloraz, and their efficacy against southern

- corn leaf blight in Fujian Province, China. *European Journal of Plant Pathology*. 152(2): 447–459.
- De Rossi, R.L., E.M. Reis and R. Brustolin. 2015. Fungicide baseline for mycelial sensitivity of *Exserohilum turcicum*, causal agent of northern corn leaf blight. *Summa Phytopathologica*. 41(1): 25–30.
- Doyle, J.J. and J.L. Doyle. 1987. A rapid DNA isolation procedure for small quantities of fresh leaf tissue. *Phytochemical Bulletin*. 19(1): 11–15.
- Fang, A., R. Zhang, W. Qiao, T. Peng, Y. Qin, J. Wang, B. Tian, Y. Yu, W. Sun, Y. Yang and C. Bi. 2023. Sensitivity baselines, resistance monitoring, and molecular mechanisms of the rice false smut pathogen *Ustilaginoidea virens* to prochloraz and azoxystrobin in four regions of Southern China. *Journal of Fungi*. 9(8): 832.
- He, L., K. Cui, T. Li, Y. Song, N. Liu, W. Mu and F. Liu. 2020. Evolution of the resistance of *Botrytis cinerea* to carbendazim and the current efficacy of carbendazim against gray mold after long-term discontinuation. *Plant Disease*. 104(6): 1647–1653.
- Kongtragoul, P., S. Nalumpang, Y. Miyamoto, Y. Izumi and K. Akimitsu. 2011. Mutation at codon 198 of *Tub2* gene for carbendazim resistance in *Colletotrichum gloeosporioides* causing mango anthracnose in Thailand. *Journal of Plant Protection Research*. 51(4): 377–384.
- Liu, S., Z. Che and G. Chen. 2016. Multiple-fungicide resistance to carbendazim, diethofencarb, procymidone, and pyrimethanil in field isolates of *Botrytis cinerea* from tomato in Henan Province, China. *Crop Protection*. 84: 56–61.
- Liu, S., L. Fu, S. Wang, J. Chen, J. Jiang, Z. Che, Y. Tian and G. Chen. 2019. Carbendazim resistance of *Fusarium graminearum* from Henan wheat. *Plant Disease*. 103(10): 2536–2540.
- Ma, Z. and T.J. Michailides. 2005. Advances in understanding molecular mechanisms of fungicide resistance and molecular detection of resistant genotypes in phytopathogenic fungi. *Crop Protection*. 24(10): 853–863.
- Nwanosike, M.R.O. and R.B. Mabagala. 2017. Influence of metrological parameters on the development of *Exserohilum turcicum* (Pass.) Leonard and Suggs on maize in Tanzania. *International Journal of Advanced Scientific Research*. 2(2): 58–68.
- Sevastos, A., A. Markoglou, N.E. Labrou, F. Flouri and A. Malandrakis. 2016. Molecular characterization, fitness and mycotoxin production of *Fusarium graminearum* laboratory strains resistant to benzimidazoles. *Pesticide Biochemistry and Physiology*. 128: 1–9.
- Song, T.T., S.H. Ying and M.G. Feng. 2012. High resistance of *Isaria fumosorosea* to carbendazim arises from the overexpression of an ABC transporter (*ift1*) rather than tubulin mutation. *Journal of Applied Microbiology*. 112(1): 175–184.
- Wang, L., H. Tu, H. Hou, Z. Zhou, H. Yuan, C. Luo and Q. Gu. 2022. Occurrence and detection of carbendazim resistance in *Botryosphaeria dothidea* from apple orchards in China. *Plant Disease*. 106(1): 207–214.
- Weems, J.D. 2016. Evaluation of Race Population Distribution, Fungicide Sensitivity, and Fungicide Control of *Exserohilum turcicum*, the Causal Agent of Northern Leaf Blight of Corn. Doctor of Philosophy Dissertation. University of Illinois at Urbana-Champaign, Illinois, USA. 136 p.
- Weems, J.D. and C.A. Bradley. 2017. Sensitivity of *Exserohilum turcicum* to demethylation inhibitor fungicides. *Crop Protection*. 99: 85–92.
- Xu, S., J. Wang, H. Wang, Y. Bao, Y. Li, M. Govindaraju, W. Yao, B. Chen and M. Zhang. 2019. Molecular characterization of carbendazim resistance of *Fusarium* species complex that causes sugarcane pokkah boeng disease. *BMC Genomics*. 20(1): 115.
- Yelgurty, R., S.K. Jayalkshmi, B.Z. Ahamed, S.S. Chavan and G. Girish. 2019. Screening of promising sorghum genotypes against turcicum leaf blight (*Exserohilum turcicum* (Pass.) Leonard and Suggs) under glasshouse conditions. *International Journal of Current Microbiology and Applied Sciences*. 8(5): 655–658.
- Zhu, Z.Q., F. Zhou, J.L. Li, F.X. Zhu and H.J. Ma. 2016. Carbendazim resistance in field isolates of *Sclerotinia sclerotiorum* in China and its management. *Crop Protection*. 81: 115–121.

ความหลากหลายและสัณฐานวิทยาของพืชสกุล *Portulaca* L. (Portulacaceae)

Diversity and Morphology of *Portulaca* L. (Portulacaceae)

กาญจนา พฤษพันธ์^{1/*} ศิริพร ชิงสนธิพร^{2/} ธัญชนก ศรีเมือง^{2/}

Kanchana Pruesapan^{1/*} Siriporn Zungsontiporn^{2/} Tanchanok Sreemuang^{2/}

Received 4 Apr. 2025/Revised 5 Sep. 2025/Accepted 6 Sep. 2025

ABSTRACT

Many species of *Portulaca* L. (Portulacaceae) pose a significant risk of spreading in agroecosystems as weeds. Contamination of agricultural products by these plants may significantly impact international trade. Effective prevention should be based on the knowledge of their botanical names. This research aimed to study the diversity and morphology of the genus *Portulaca* by surveying plants in agroecosystems and related distribution areas, collecting samples, recording morphological data, and identifying the collected specimens. A total of 25 plant samples were collected, and 7 species were identified based on morphological characteristics: *P. amilis* Speg., *P. grandiflora* Hook., *P. oleracea* L., *P. pilosa* L., *P. quadrifida* L., *P. umbraticola* Kunth, and *Portulaca* sp. The study found that *P. amilis* and *P. umbraticola* have never been previously reported in Thailand. The distribution of *P. oleracea*, *P. pilosa*, *P. quadrifida* and *Portulaca* sp. showed their status as weeds in agricultural areas that should be monitored. Meanwhile, *P. amilis*, *P. grandiflora* and *P. umbraticola* were mostly found as ornamental plants in community areas. All plants found can serve as a reference database for plant protection and development in the future.

Keywords: botanical name; ornamental plant; purslane; weed

^{1/} สำนักคุ้มครองพันธุ์พืช อ.พหลโยธิน ลาดยาว จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

^{1/} Plant Varieties Protection Office, Phahonyothin Rd., Lat Yao, Chatuchak, Bangkok 10900, Thailand

^{2/} สำนักวิจัยพัฒนาการอารักขาพืช อ.พหลโยธิน ลาดยาว จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

^{2/} Plant Protection Research and Development Office, Phahonyothin Rd., Lat Yao, Chatuchak, Bangkok 10900, Thailand

* Corresponding author: kpruesapan@gmail.com

บทคัดย่อ

พืชสกุล *Portulaca* L. (Portulacaceae) หลายชนิดมีความเสี่ยงต่อการแพร่กระจายเป็นวัชพืชในระบบนิเวศเกษตร หากเกิดการปนเปื้อนในสินค้าเกษตรจะส่งผลกระทบต่อในด้านการค้าระหว่างประเทศได้ การป้องกันที่มีประสิทธิภาพต้องอาศัยความรู้เกี่ยวกับชื่อพฤกษศาสตร์ของพืชเหล่านี้ การวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อศึกษาความหลากหลายและสัณฐานวิทยาของสกุล *Portulaca* เพื่อการระบุชื่อพฤกษศาสตร์ที่ถูกต้อง โดยสำรวจพืชในพื้นที่เกษตรและแหล่งกระจายพันธุ์นอกพื้นที่การเกษตร เก็บรวบรวมตัวอย่างพรรณไม้อ้างอิง บันทึกข้อมูลลักษณะทางสัณฐาน และตรวจสอบระบุชื่อพืช พบตัวอย่างพืช 25 ตัวอย่าง สามารถระบุชื่อด้วยลักษณะทางสัณฐานได้ 7 ชนิด ได้แก่ *P. amilis* Speng. *P. grandiflora* Hook. *P. oleracea* L. *P. pilosa* L. *P. quadrifida* L. *P. umbraticola* Kunth และ *Portulaca* sp. พบพืชที่ไม่เคยมีการรายงานในการศึกษาทางอนุกรมวิธานของประเทศไทยมาก่อน คือ *P. amilis* และ *P. umbraticola* และพบการกระจายพันธุ์ในระบบนิเวศเกษตรของ *P. oleracea* *P. pilosa* *P. quadrifida* และ *Portulaca* sp. ที่แสดงสถานะการเป็นวัชพืชในพื้นที่เกษตรกรรมที่ควรเฝ้าระวัง ในขณะที่ *P. amilis* *P. grandiflora* และ *P. umbraticola* ส่วนใหญ่พบปลูกประดับในพื้นที่ชุมชน ทั้งนี้ ข้อมูลพืชที่ได้จากการศึกษานี้สามารถใช้เป็นฐานข้อมูลสำหรับการป้องกันกำจัดและพัฒนาเพื่อใช้ประโยชน์ต่อไป

คำสำคัญ: ชื่อพฤกษศาสตร์; ไม้ประดับ; ผักเบียร์; วัชพืช

บทนำ

พรรณพืชท้องถิ่นและพรรณพืชต่างถิ่นเข้ามา มีบทบาทในกิจกรรมต่าง ๆ ของมนุษย์ ทั้งการให้คุณค่าและให้โทษ ซึ่งหนึ่งในพรรณพืชเหล่านั้น คือ พืชสกุลผักเบียร์ หรือ *Portulaca* L. (Portulacaceae) การศึกษาพืชสกุลผักเบียร์ในประเทศไทยครั้งล่าสุดตีพิมพ์เผยแพร่ในหนังสือพรรณพฤกษชาติแห่งประเทศไทย (Flora of Thailand) ตั้งแต่ปี พ.ศ. 2518 (Geesink, 1975) จากการตรวจเอกสารพบความคลาดเคลื่อนและความสับสนในการใช้ชื่อวิทยาศาสตร์ในงานตีพิมพ์เผยแพร่ แม้พืชกลุ่มนี้จะมีคุณสมบัติเป็นพืชอาหารหรือพืชสมุนไพร แต่บางชนิดมีรายงานการเป็นวัชพืชร้ายแรง ซึ่งจะมีผลกระทบอย่างมากในด้านการค้าระหว่างประเทศ

พืชสกุล *Portulaca* มีการกระจายพันธุ์ทั่วโลกมากกว่า 100 ชนิด (Hassler, 1994 - 2025) ในเขตร้อนและเขตกึ่งร้อน โดยเฉพาะอย่างยิ่งพื้นที่การเกษตรขยายพันธุ์ได้ทั้งจากเมล็ดที่มีขนาดเล็กจำนวนมากและการปักชำลำต้น ชนิดที่สำคัญคือ *P. oleracea* L. หรือผักเบียร์ใหญ่ เป็นวัชพืชร้ายแรงที่มีการแพร่กระจายไปทั่วโลก (Holm et al., 1977) รวมทั้งประเทศไทย มีรายงานการแพร่กระจายในแหล่งเกษตรกรรม (ธวัชชัยและเจมส์, 2540; สมาคมวิทยาการวัชพืชแห่งประเทศไทย, 2545; Harada et al., 1987) ผลขนาดเล็กของ *P. oleracea* มีเมล็ดมากถึง 10,000 เมล็ด และแพร่กระจายได้ง่ายโดยลม (Holm et al., 1977) นอกจากนี้ *P. pilosa* L. ssp. *grandiflora* (Hook.) R.Geesink (ปัจจุบันเป็นชื่อพ้องของ *P. grandiflora* Hook.f.) และ *P. quadrifida* L. (ธวัชชัยและเจมส์, 2540) ยังเป็นวัชพืชที่ควรเฝ้าระวัง อย่างไรก็ตาม

พืชสกุลนี้มีคุณค่าทางโภชนาการ สารออกฤทธิ์ทางชีวภาพและประโยชน์ต่อสุขภาพเช่นกัน (Dhande and Patil, 2020; Tahir and Abbasi, 2020; Li et al., 2023) ดังนั้น การรวบรวมข้อมูลของพืชสกุล *Portulaca* ที่กระจายพันธุ์ในประเทศไทยให้เป็นปัจจุบันจึงมีความจำเป็น เพื่อให้ได้ข้อมูลพืชที่ถูกต้องสำหรับนำไปใช้ทั้งการเตรียมการเผ่าระวังและการใช้ประโยชน์พืช โดยเฉพาะชื่อวิทยาศาสตร์ ลักษณะเด่นทางพฤกษศาสตร์ การแพร่กระจายพันธุ์ ภาพประกอบเพื่อความชัดเจนถูกต้องแม่นยำ และมีความน่าเชื่อถือ การวิจัยนี้จึงมีจุดประสงค์เพื่อจำแนกและระบุชื่อพฤกษศาสตร์ของสกุล *Portulaca* ที่สำรวจพบทั้งในและนอกพื้นที่การเกษตร เป็นฐานข้อมูลสำหรับการป้องกันกำจัดและการพัฒนาเพื่อใช้ประโยชน์จากพืชสกุลนี้ต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

1. การศึกษาลักษณะของพืชสกุล *Portulaca*

ตรวจสอบสืบค้น ข้อมูล เอกสาร งานวิจัยที่เกี่ยวข้องของสกุล *Portulaca* วงศ์ Portulacaceae เพื่อเรียนรู้ลักษณะเฉพาะของพืชทั้งลักษณะวิสัย ลำต้น ใบ ดอก ผล และเมล็ด เป็นแนวทางในการสำรวจและเก็บรวบรวมตัวอย่างในภาคสนาม และใช้ข้อมูลการกระจายพันธุ์สำหรับคาดการณ์โอกาสที่จะสำรวจพบชนิดพืชนั้น ๆ โดยอ้างอิงในเบื้องต้นตามคู่มือการจำแนกพืช ดังนี้ *Portulaca* in Indo-Australia and the Pacific (Geesink, 1969), *Flora Malesiana* (Geesink, 1971), *Flora of Thailand* (Geesink, 1975), *Flora of North America* (Matthews, 2004), *Flora of China* (Lu and Gilbert, 2004), *Flora of Peninsular Malaysia* (Rafidah, 2010), *Flora of Pakistan* (Ghafoor, 2018), และเอกสารวิชาการอื่น ๆ ที่เป็นปัจจุบัน

2. การสำรวจและเก็บรวบรวมตัวอย่าง

2.1 สำรวจตัวอย่างพืชที่ศึกษาแบบสุ่มในภาคสนาม ทั้งในและนอกพื้นที่การเกษตรให้ครอบคลุมเขตภูมิศาสตร์พืชพรรณของประเทศไทย (Smitinand, 1958) เพื่อใช้เป็นตัวแทนการกระจายพันธุ์ของชนิดพืชสกุล *Portulaca* อ้างอิงจำนวนชนิดพืชตามที่มีรายงานไว้ในหนังสือพรรณพฤกษชาติของประเทศไทย (Geesink, 1975) โดยขึ้นส่วนตัวอย่างที่เก็บรวบรวมควรมีสภาพที่สมบูรณ์ ประกอบด้วยชิ้นส่วนตัวแทนกิ่งใบ ลำต้น และมีส่วนสืบพันธุ์ พร้อมจดบันทึกลักษณะต่าง ๆ ของพืชที่อาจเปลี่ยนแปลงไป เช่น สีของส่วนต่าง ๆ ความอวบน้ำ เป็นต้น

2.2 จัดทำเป็นตัวอย่างพรรณไม้แห้ง (herbarium specimen) ตามหลักการจัดทำตัวอย่างพรรณไม้แห้งอ้างอิงงานวิจัย (voucher specimen) ในคู่มือ *The Herbarium Handbook* (Bridson and Forman, 1998)

2.3 เก็บรักษาตัวอย่างเพื่อใช้เป็นหลักฐานอ้างอิง โดยการนำตัวอย่างพรรณไม้แห้งที่เก็บรวบรวมได้ในข้อ 2.2 เข้าสู่กระบวนการอบน้ำยารักษาสภาพพรรณไม้เพื่อป้องกันการกั้ทำลายของแมลงศัตรูพืช ติตฉลากรายละเอียดพืช และลงทะเบียนเก็บรักษาตัวอย่างตามกรรมวิธีดำเนินการของพิพิธภัณฑ์พืชกรุงเทพฯ กรมวิชาการเกษตร (Bangkok Herbarium, BK) (กองพฤกษศาสตร์และวิจัยพืช, 2544)

3. การจำแนกพืชและระบุชื่อวิทยาศาสตร์ที่ถูกต้อง

3.1 แยกตัวอย่างพรรณไม้ที่เหมือนกันมารวมกันเป็นกลุ่ม โดยพิจารณาลักษณะทางสัณฐานของลักษณะที่ไม่ใช่ส่วนสืบพันธุ์และลักษณะของส่วนสืบพันธุ์ร่วมกัน ซึ่งแต่ละกลุ่มยังไม่ต้องค้ำนึ่งว่าเป็นชนิดใด

3.2 ตรวจสอบเปรียบเทียบกลุ่มตัวอย่างที่จำแนกได้กับเอกสารที่แยกสกุล (genera) และชนิด (species) ของพืช โดยระบุชนิดพืชตามเอกสารที่มีการทบทวนพรรณไม้ล่าสุดของสกุล *Portulaca* ทั้งของประเทศไทยและต่างประเทศ

3.3 สร้างรูปวิธานพืชแบบ dichotomous key โดยใช้ลักษณะที่แตกต่างกันของ *Portulaca* เป็นเกณฑ์ในการแบ่งกลุ่มพืชทีละคู่ จนกระทั่งสามารถระบุชนิดของ *Portulaca* ได้

3.4 เขียนคำบรรยายพืช ประกอบด้วย ชื่อวิทยาศาสตร์ ชื่อไทยหรือชื่อสามัญ ตามด้วยลักษณะทางพฤกษศาสตร์ ดังนี้ วิสัยพืช รูปร่าง ขนาด ลักษณะพื้นผิว หรือสีของส่วนต่าง ๆ

3.5 อธิบายสถานะและการกระจายพันธุ์ของพืชสกุล *Portulaca* ที่ศึกษาในงานวิจัยนี้

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. ลักษณะของพืชสกุล *Portulaca*

ผลการตรวจสอบลักษณะเฉพาะของพืชสกุล *Portulaca* (Portulacaceae) ในเบื้องต้นจากเอกสารงานวิจัยด้านพฤกษอนุกรมวิธานของพืชสกุลนี้จาก 7 แหล่ง ได้แก่ พรรณพฤกษชาติอินโด-ออสเตรเลียและแปซิฟิก มีรายงานไว้ 11 ชนิด (Geesink, 1969) พรรณพฤกษชาติมาลีเซีย มีรายงานไว้ 5 ชนิด (Geesink, 1971) ส่วนในคาบสมุทรมาลายู มีรายงานไว้เพียง 3 ชนิด (Rafidah, 2010) พรรณพฤกษชาติไทย มีรายงานไว้ 3 ชนิด (species) 3 ชนิดย่อย (subspecies) และ 3 เผ่าพันธุ์ (race) (Geesink, 1975) พรรณพฤกษชาติจีน มีรายงานไว้ 5 ชนิด (Lu and Gilbert, 2004) พรรณพฤกษชาติอเมริกาเหนือ มีรายงานไว้ 10 ชนิด (Matthews, 2004) และพรรณพฤกษชาติปากีสถาน มีรายงานไว้ 5 ชนิด (Ghafoor, 2018) เมื่อตรวจสอบข้อมูลทาง

พฤกษศาสตร์ของชนิดพืชเหล่านั้น พบว่า มีลักษณะทางสัณฐานที่แสดงเอกลักษณ์ของสกุล *Portulaca* สอดคล้องกัน เมื่อศึกษาเปรียบเทียบลักษณะเด่น ๆ ของพืชที่สามารถมองเห็นได้ชัดเจนในการตรวจสอบตัวอย่างในภาคสนาม สามารถกำหนดเป็นลักษณะเฉพาะเพื่อใช้ในการเก็บรวบรวมพืชสกุล *Portulaca* ได้ดังนี้

1) ลักษณะวิสัย เป็นไม้ล้มลุก

2) ลำต้น มีลักษณะหนา และอวบ มีสีเขียวอมแดง จนถึงสีแดง มักแผ่ขยายติดพื้น แต่บางครั้งอาจสูงได้ถึง 15-23 ซม. ลำต้นเรียบ และมีน้ำยางใสหรือไม่มี

3) ใบ เป็นใบเดี่ยว ออกตรงข้ามหรือเรียงสลับ งอกออกมาจากข้อลำต้นหรือที่ปลายลำต้น ไม่มีก้านใบ แผ่นใบรูปทรงกระบอก หรือทรงแบน เป็นรูปแถบ รูปหอก รูปช้อน หรือรูปไข่กลับ ขนาด 1-3 ซม. ผิวใบเรียบและอวบ ปลายใบมน เนื้อใบอวบ

4) ดอก ปรากฏที่ข้อลำต้นหรือปลายลำต้น มีหลายสี เช่น สีเหลือง ขาว ชมพู ส้ม ก้านสั้น มีขนหรือเยื่อบาง ๆ รอบโคนดอก กลีบเลี้ยงเชื่อมติดกัน กลีบดอก 4 หรือ 5 กลีบ อาจมีถึง 8 กลีบหรือมากกว่า กลีบดอกแยกหรือเชื่อมติดกันที่ฐาน เกสรเพศผู้มี 4-10 อัน เชื่อมติดที่ฐานกลีบดอก รังไข่กึ่งใต้วงกลีบหรือใต้วงกลีบ ยอดเกสรเพศเมียแยกเป็น 2-9 แฉกหรือมากกว่า

5) ผลและเมล็ด เป็นแบบผลแห้งแตก (capsule) ตามขวาง รูปค่อนข้างกลม ขนาดเล็ก เมล็ดแก่สีดำเป็นเงา รูปกลม หรือรูปไต มีจำนวนมาก

ข้อมูลลักษณะทางสัณฐานดังกล่าวข้างต้น เป็นข้อมูลที่ครอบคลุมชนิดพืชสกุล *Portulaca* ที่คาดการณ์ว่าเป็นชนิดที่อาจมีการกระจายพันธุ์อยู่ในประเทศไทย เนื่องจากมีทั้งข้อมูลชนิดพืชในภูมิภาคใกล้เคียงประเทศไทย (Geesink, 1971; Lu and

Gilbert, 2004; Ghafoor, 2018) และในภูมิภาคที่ห่างไกลออกไป (Geesink, 1969, 1971; Matthews, 2004) ข้อมูลดังกล่าวจึงเหมาะสมเพียงพอสำหรับใช้เป็นแนวทางในการสำรวจและเก็บรวบรวมตัวอย่างชนิดของสกุล *Portulaca* อย่างไรก็ตาม การเก็บรวบรวมพืชในภาคสนามอาจเกิดความสับสนได้เนื่องจาก *Portulaca* มีความคล้ายคลึงกับพืชตัวอื่น เช่น รูปร่างของใบและลำต้นที่มีสีแดง โดยเฉพาะสกุล *Euphorbia* L. อย่างไรก็ตาม สามารถพิสูจน์ความแตกต่างในภาคสนามได้ โดยการตรวจสอบความอวบหนาของใบและสีน้ำยาง ซึ่งพืชสกุล *Euphorbia* มีน้ำยางสีน้ำตาลและใบไม่อวบหนา ขณะที่ *Portulaca* มีน้ำยางใสและใบอวบหนา อีกทั้งโครงสร้างของดอกและผลของพืชทั้ง 2 สกุลนี้ มีความแตกต่างกันชัดเจน นอกจากนี้ พืชอีกกลุ่มที่มีความคล้ายคลึงกับ *Portulaca* คือ พืชในวงศ์ Aizoaceae ซึ่งมีถิ่นที่อยู่และลักษณะวิสัยที่คล้ายกัน รวมถึงลักษณะทางสัณฐานที่ใกล้เคียงกันมาก (Judd et al., 2002) โดยเฉพาะอย่างยิ่งสกุล *Sesuvium* L. และ *Trianthema portulacastrum* L. ซึ่งมีลำต้นและใบอวบหนา อีกทั้งยังมีลักษณะดอกคล้ายคลึงกัน เป็นต้น ดังนั้น เพื่อไม่ให้เกิดความผิดพลาดในการเก็บรวบรวมตัวอย่างพืชในภาคสนาม การศึกษาภาพประกอบและลักษณะเด่นของชนิดพืชภายใต้สกุลนี้ก่อนการออกสำรวจและเก็บรวบรวมตัวอย่าง สามารถช่วยให้เข้าใจลักษณะเฉพาะของพืชได้ชัดเจนยิ่งขึ้น

2. การสำรวจและเก็บรวบรวมตัวอย่างพืชสกุล *Portulaca*

สำรวจและเก็บรวบรวมตัวแทนตัวอย่างของพืชสกุล *Portulaca* รวมทั้งสิ้น 25 ตัวอย่าง ในพื้นที่ตัวแทน 12 จังหวัด แยกเป็น 5 เขตภูมิศาสตร์พืชพรรณของประเทศไทย (Smitinand, 1958) ดังนี้ เขตภูมิศาสตร์พืชพรรณภาคเหนือ (northern, N)

ได้แก่ แม่ฮ่องสอน เชียงใหม่ และตาก ทั้งในและนอกพื้นที่การเกษตรได้ 9 ตัวอย่าง เขตภูมิศาสตร์พืชพรรณภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (north-eastern, NE) ได้แก่ ขอนแก่น เลย และหนองคาย ทั้งในและนอกพื้นที่การเกษตรได้ 7 ตัวอย่าง เขตภูมิศาสตร์พืชพรรณภาคกลาง (central, C) ได้แก่ นครปฐม นนทบุรี กรุงเทพฯ นอกพื้นที่การเกษตรได้ 5 ตัวอย่าง เขตภูมิศาสตร์พืชพรรณภาคตะวันตกเฉียงใต้ (south-western, SW) ได้แก่ กาญจนบุรี ในพื้นที่การเกษตรได้ 2 ตัวอย่าง และเขตภูมิศาสตร์พืชพรรณภาคใต้ (peninsular, PEN) ได้แก่ พังงา และตรัง ทั้งในและนอกพื้นที่การเกษตรได้ 2 ตัวอย่าง และได้จัดทำตัวอย่างเป็นตัวอย่างพรรณไม้อ้างอิงลงทะเบียนหมายเลขพิพิธภัณฑสถานพืชกรุงเทพฯ (BK number) ทั้งหมด 25 หมายเลข (Table 1) เพื่อใช้ในการศึกษาวิจัยและใช้ในการตรวจสอบอ้างอิงพืชสกุล *Portulaca* ต่อไปในอนาคต

การกระจายพันธุ์ของพืชสกุล *Portulaca* ที่พบในพื้นที่ตัวแทนดังกล่าวข้างต้น แสดงให้เห็นว่าพืชสกุลนี้มีความหลากหลายของชนิดเชื่อมโยงกับพรรณพืชในเขตภูมิศาสตร์พืชพรรณอินโดจีน (Indochinese region; ซึ่งครอบคลุมพม่า จีนตอนใต้ ลาว เวียดนาม และกัมพูชา) และเขตภูมิศาสตร์พืชพรรณมาเลเซีย (Malesian region; ซึ่งครอบคลุมมาเลเซีย อินโดนีเซีย และฟิลิปปินส์) เนื่องจากประเทศไทยตั้งอยู่ในเขตรอยต่อของทั้งสองเขตนี้ (Marsh et al., 2009) แม้ว่าในการศึกษานี้จะไม่ได้ศึกษาตัวอย่างในพื้นที่ป่าโดยตรง แต่ตัวอย่างพรรณพืชที่เก็บรวบรวมได้ทั้งในและนอกพื้นที่การเกษตรจากทั้ง 5 เขตภูมิศาสตร์พืชพรรณข้างต้น ก็สามารถใช้เป็นตัวแทนการกระจายพันธุ์ของชนิดพืชสกุล *Portulaca* ได้เพียงพอ

Table 1 Grouping of examined specimens of *Portulaca* spp. (All samples deposited at Bangkok Herbarium, Department of Agriculture)

Group no.	Botanical name	Collector no.	Herbarium registered no.	Collected areas	
				District	Province (Floristic region)
1	<i>Portulaca amilis</i> Spag.	KP2021-14 [#]	BK082365	Chatuchak	Bangkok (C)
		KP-CV5 [#]	BK067632	Bang Yai	Nonthaburi (C)
2	<i>Portulaca grandiflora</i> Hook.	KP-CV1 [#]	BK 067631	Chum Phae	Khon Kaen (NE)
		KP2015-25 [#]	BK 068176	Chum Phae	Khon Kaen (NE)
3	<i>Portulaca oleracea</i> L.	KP2013-4*	BK 067615	Muang	Kanchanaburi (SW)
		KP2013-9*	BK 067619	Phon Phisai	Nong Khai (NE)
		KP2013-10*	BK 067620	Phon Phisai	Nong Khai (NE)
		KP2013-14*	BK 067621	Nam Pong	Khon Kaen (NE)
		KP150513-6*	BK 067622	Muang	Chiang Mai (N)
		KP260613-5**	BK 067626	Sob Moei	Mae Hong Son (N)
		KP080114*	BK 067630	Tha Muang	Kanchanaburi (SW)
		KP2015-5*	BK 068170	Chiang Dao	Chiang Mai (N)
4	<i>Portulaca pilosa</i> L.	KP2011-66**	BK 068311	Pak Meng	Trang (PEN)
		KP250613-2 [#]	BK 067625	Muang	Tak (N)
		SZ3365**	BK 085267	Muang	Tak (N)
		KP2019-45**	BK 070948	Bang Bua Thong	Nonthaburi (C)
5	<i>Portulaca quadrifida</i> L.	KP2013-5 [#]	BK 067616	Kamphaeng Saen	Nakhon Pathom (C)
		KP2013-7*	BK 067617	Nong Hin	Loei (NE)
		KP270613-1*	BK 067627	Mae Sariang	Mae Hong Son (N)
		KP050613 [#]	BK 067623	Jatuchak	Bangkok (C)
6	<i>Portulaca umbraticola</i> Kunth	KP-CV8 [#]	BK 067634	Mae Sariang	Mae Hong Son (N)
7	<i>Portulaca</i> sp.	KP2013-8*	BK 067618	Phon Phisai	Nong Khai (NE)
		KP250613-1**	BK 067624	Muang	Tak (N)
		KP2015-6*	BK 068171	Chai Prakarn	Chiang Mai (N)

Remarks: 1) * = Weed in agricultural areas, ** = Weed outside agricultural areas, # = Ornamental plant

2) Floristic regions: Northern = N, North-Eastern = NE, Central = C, South-Western = SW, Peninsular = PEN

3) Collector numbers start with KP = collected by K. Pruesapan, SZ = collected by S. Zungsontiporn

3. การจำแนกพืชและระบุชื่อวิทยาศาสตร์ที่ถูกต้องของ *Portulaca* spp.

พืชที่เก็บรวบรวมได้ทั้ง 25 ตัวอย่าง มีลักษณะทางสัณฐานโดยทั่วไปสอดคล้องกับลักษณะเฉพาะของสกุล *Portulaca* สามารถแบ่งกลุ่มตัวอย่างตามความเหมือนกันของลักษณะทางสัณฐานได้เป็น 7 กลุ่ม

และเมื่อพิจารณาตรวจสอบลักษณะทางพฤกษศาสตร์ของตัวอย่างอ้างอิงตามเอกสารตีพิมพ์เผยแพร่ทางอนุกรมวิธานที่กล่าวในข้างต้น สามารถจำแนกลักษณะทางสัณฐานที่เป็นลักษณะเด่นเฉพาะของตัวอย่างพืชและระบุชื่อพฤกษศาสตร์ของตัวอย่างพืชทั้ง 7 กลุ่ม (Table 1) ได้ตั้งรูปวิธานชนิดและคำอธิบายลักษณะของพืชสกุล *Portulaca* L.

3.1 รูปวิธานชนิดของ *Portulaca* L.

1a. ใบเรียงตรงข้าม ลำต้นแยกที่ข้อ ดอกเดี่ยว กลีบดอก 4 กลีบ	<i>Potulaca quadrifida</i> (กลุ่ม 5)
1b. ใบเรียงสลับ ลำต้นไม่แยกที่ข้อ ดอกเป็นกลุ่ม กลีบดอก 5 กลีบ หรือมากกว่า	2
2a. ไม่มีขนที่หูใบหรือมีน้อยมาก	3
3a. ผลไม่มีปีกกว้างล้อมรอบบริเวณใต้ฝาปิด	4
4a. ลำต้นสีน้ำตาลเขียวถึงสีน้ำตาลแดง ดอกสีเหลือง	<i>Portulaca oleracea</i> (กลุ่ม 3)
4b. ลำต้นสีเขียว ดอกสีขาว	<i>Portulaca</i> sp. (กลุ่ม 7)
3b. ผลมีเนื้อเยื่อขยายเป็นปีกกว้างล้อมรอบบริเวณใต้ฝาปิด	<i>Portulaca umbraticola</i> (กลุ่ม 6)
2b. มีขนที่หูใบเด่นชัด	5
5a. ใบแบนขนาดเล็ก	<i>Portulaca amilis</i> (กลุ่ม 1)
5b. ใบทรงกระบอกเรียว	6
6a. ดอกเล็ก เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5-1.2 ซม.	<i>Portulaca pilosa</i> (กลุ่ม 5)
6b. ดอกใหญ่ เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5-5.5 ซม.	<i>Portulaca grandiflora</i> (กลุ่ม 2)

3.2 คำบรรยายรายละเอียดทางพฤกษศาสตร์ของ *Portulaca* L.

3.2.1 *Portulaca amilis* Speng. (Figure 1A-C)

ชื่อไทย: ลานแพร

พืชล้มลุก อายุปีเดียว ลำต้น ทอดนอนหรือกึ่งตั้งขึ้น สูงได้ถึง 20 ซม. แตกสาขาไปโดยรอบ กิ่งก้านยาวได้ถึง 25 ซม. อวบน้ำ ผิวเรียบ สีน้ำตาลเขียวถึงสีน้ำตาลแดง มีขนหนาแน่นที่ข้อ ใบ เรียงสลับ ทรงแบนรูปไข่กลับ รูปใบพาย หรือรูปใบหอกกลับ ยาว 0.5-2 ซม. กว้าง 0.2-0.7 ซม. ปลายแหลม ขอบใบเรียบ เนื้อใบอวบน้ำ ผิวเกลี้ยง ก้านใบสั้นมากถึงไร้ก้าน มีขนสีขาวตามซอกใบ ช่อดอก ออกที่ปลายยอด 2-6 ดอก มีขนหนาแน่น วงใบประดับ 6-9 ใบ ดอก ขนาดใหญ่ เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5-2 ซม. กลีบเลี้ยงสีเขียวรูปไข่ค่อนข้างสามเหลี่ยม ยาวประมาณ 0.15 ซม. กลีบดอก 5 กลีบ เชื่อมติดกันที่ฐาน รูปไข่กลับ ยาว 0.7-1 ซม. กว้าง 0.4-0.8 ซม. ปลายกลีบเว้าบุ่มตรงกลาง กลีบด้านบนสีชมพูม่วง ใกล้เคียงฐานดอกมีแต้มสีแดงเลือดหมู และฐานดอกเป็นสีเหลือง เกสรเพศผู้ 15-45 อัน

ยาวประมาณ 0.8 ซม. ก้านชูอับเรณูสีชมพูม่วง รั้งไข่มุขรูปไข่ ก้านเกสรเพศเมียสีชมพูม่วง ยาวประมาณ 0.4 ซม. ยอดเกสรเพศเมียแยกเป็น 5-7 แฉก รูปแถบยาวโค้งลง ยาว 0.15 ซม. ผล แบบผลแห้งแตก ทรงรูปไข่ปลายมน เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.2-0.5 ซม. แตกตามขวางตรงปลายผลหรือต่ำกว่าปลายผลเล็กน้อย เมล็ดจำนวนมาก สีดำวาว รูปกลม เส้นผ่านศูนย์กลางประมาณ 0.04-0.06 ซม. ผิวเมล็ดมีปุ่มละเอียดรูปทรงคล้ายรูปดาวและตุ่มเล็ก ๆ

ยังไม่เคยมีรายงานในพรรณพฤกษชาติของไทย มักระบุชื่อผิดเป็น *P. pilosa* หรือ *P. grandiflora* (Benoit et al., 2020) เนื่องจากความคล้ายคลึงกันของวิสัยพืช มีขนเด่นชัดตามข้อ และมีดอกสีชมพูม่วงอย่างไรก็ตาม สามารถแยกความแตกต่างได้ชัดเจนด้วยลักษณะรูปร่างใบของ *P. amilis* ที่เป็นทรงแบน ในขณะที่อีกสองชนิดใบคล้ายทรงกระบอกและความกว้างของใบน้อยกว่ามาก และดอกมีสีชมพูม่วงใกล้เคียงกับ *P. pilosa* แต่ขนาดใหญ่กว่า ขณะที่ *P. grandiflora* มีสีหลากหลายกว่า และมีขนาดใหญ่กว่า

3.2.2 *Portulaca grandiflora* Hook.

(Figure 1D-F)

ชื่อไทย: แพร่เซียงไฉ้

พืชล้มลุก อายุปีเดียวถึงหลายปี ลำต้นทอดนอนหรือตั้งขึ้น สูงได้ถึง 25 ซม. แตกสาขาไปโดยรอบ อวบน้ำ ผิวเรียบ เกลี้ยง ลำต้นสีเขียวออกม่วง ใบ เรียงสลับ กระจายตัวไม่สม่ำเสมอ ทรงกระบอกเรียวยาว รูปแถบขอบขนาน ยาว 0.5-3 ซม. กว้าง 0.1-0.5 ซม. ปลายแหลม ขอบใบเรียบ เนื้อใบอวบน้ำ ผิวเกลี้ยง ก้านใบสั้นมากถึงไร้ก้าน มีขนสีขาวตามซอกใบ *ช่อดอก* ออกที่ปลายยอด 1-3 ดอก มีขนนุ่มปกคลุมรอบโคนดอก วงใบประดับ 5-9 ใบ *ดอก* ขนาดใหญ่ เส้นผ่านศูนย์กลาง 2.5-5.5 ซม. กลีบเลี้ยงสีเขียว รูปไข่ ยาว 0.6-0.8 ซม. กว้าง 0.3-0.4 ซม. ปลายแหลม กลีบดอก 5 กลีบหรือมากกว่า เชื่อมติดกันที่ฐาน รูปไข่กลับ ยาว 1.5-2.5 ซม. กว้าง 1-2 ซม. ปลายกลีบเว้าตื้น กลีบสีขาว ชมพู แดง ม่วง ส้ม หรือเหลือง โคนกลีบมีจุดสีน้ำตาลอ่อนหรือเหลือง เกสรเพศผู้ 40-80 อัน ยาวประมาณ 0.4-0.5 ซม. ก้านชูอับเรณูสีแดงม่วง รั้งไข่ทรงรูปไข่ ก้านเกสรเพศเมียยาวประมาณ 0.7 ซม. ยอดเกสรเพศเมียแยกเป็น 5-8 แฉก รูปแถบ โค้งลง ยาว 0.2-0.3 ซม. *ผล* แบบผลแห้งแตก ทรงรูปไข่ ปลายมน เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.4-0.6 ซม. แตกตามขวางตรงกลางผล *เมล็ด* จำนวนมาก สีเทาเข้มถึงดำวาว รูปไต เส้นผ่านศูนย์กลาง ประมาณ 0.1 ซม. มีปุ่มละเอียด รูปทรงคล้ายรูปดาว และมีปุ่มนูนด้านข้าง

ในหนังสือพรรณพฤกษชาติของไทย รายงานไว้ภายใต้ *P. pilosa* L. ssp. *grandiflora* (Hook.) R. Geesink (Geesink, 1975) ซึ่งปัจจุบันชื่อดังกล่าว ถูกยุบเป็นชื่อพ้อง (synonym) ของ *P. grandiflora* การพัฒนาพันธุ์โดยการฉายรังสีซ้ำ ๆ ทำให้ได้ดอกที่มีความหลากหลายสูง (Aisyah et al., 2022) จึงมักทำให้เกิดความสับสนในการระบุชื่อกับ *P. pilosa* หรือ *P. amilis*

3.2.3 *Portulaca oleracea* L. (Figure 1 G-I)

ชื่อไทย: ผักเบี้ยใหญ่

พืชล้มลุก อายุปีเดียวถึงหลายปี ลำต้นทอดนอนหรือทอดชูยอด น้อยมากที่พบลำต้นตั้งขึ้น สูงได้ถึง 40 ซม. แตกสาขาไปโดยรอบ อวบน้ำ ผิวเรียบ เกลี้ยง ลำต้นสีน้ำตาลเขียวถึงสีน้ำตาลแดง ใบ เรียงสลับ หรือบางครั้งเรียงเกือบตรงกันข้ามเรียงตัวกันหนาแน่น ใต้ดอก ทรงแบน ค่อนข้างรูปไข่-รูปรี หรือรูปพาย ยาว 0.3-3 ซม. กว้าง 0.2-1.5 ซม. โคนสอบเรียว ปลายตัดหรือป้าน ขอบใบเรียบ เนื้อใบอวบน้ำ ผิวเกลี้ยง ก้านใบสั้นมาก ไม่มีขนตามซอกใบ หรือมีขนแข็งขนาดเล็กมาก *ช่อดอก* ออกเป็นกลุ่ม 3-6 ดอก ไม่มีขนปกคลุมโคนดอก วงใบประดับ 2-6 ใบ *ดอก* ขนาดเล็ก เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.4-0.8 ซม. กลีบเลี้ยงสีเขียว กระจุก รูปไข่ขอบขนาน ยาว 0.2-0.4 ซม. เชื่อมติดกันที่ฐานเป็นท่อยาว 0.2-0.3 ซม. เป็นสัน ร่วงง่าย กลีบดอก 5 กลีบ เชื่อมติดกันที่ฐาน รูปไข่กลับขอบขนาน หรือรูปไข่กลับ ยาว 0.5-0.7 ซม. กว้าง 0.25-0.3 ซม. ปลายกลีบเว้าตื้นมีหรือไม่มีติ่งหนามสั้น กลีบสีเหลือง เกสรเพศผู้ 6-15 อัน ยาว 0.12-0.4 ซม. ก้านชูอับเรณูสีเหลืองใส รั้งไข่ทรงรูปไข่ ก้านเกสรเพศเมียยาว 0.2-0.5 ซม. ยอดเกสรเพศเมียแยกเป็น 3-6 แฉก รูปแถบ ยาวประมาณ 0.1 ซม. *ผล* แบบผลแห้งแตก ทรงรูปไข่ ปลายมน เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3-0.4 ซม. แตกตามขวางตรงกลางผล *เมล็ด* จำนวนมาก สีดำวาว รูปไต เส้นผ่านศูนย์กลาง ≤ 0.11 ซม. มีปุ่มละเอียด รูปทรงคล้ายรูปดาว และมีปุ่มกลม มีความซับซ้อนทางอนุกรมวิธาน (Danin et al., 2016) ส่งผลให้การจำแนกตัวอย่างของพืชชนิดนี้มีความสับสนแตกต่างกันไปตามข้อมูลพรรณพฤกษชาติของแต่ละประเทศ เช่น มีรายงานพืชสกุล *Portulaca* 10 ชนิดในประเทศโปแลนด์ ซึ่ง 7 ใน 10 ชนิดนี้ ได้ถูกแยกออกมาจากตัวอย่างที่ระบุชื่อไว้ภายใต้ *P. oleracea* (Bulakh et al., 2022) เป็นต้น

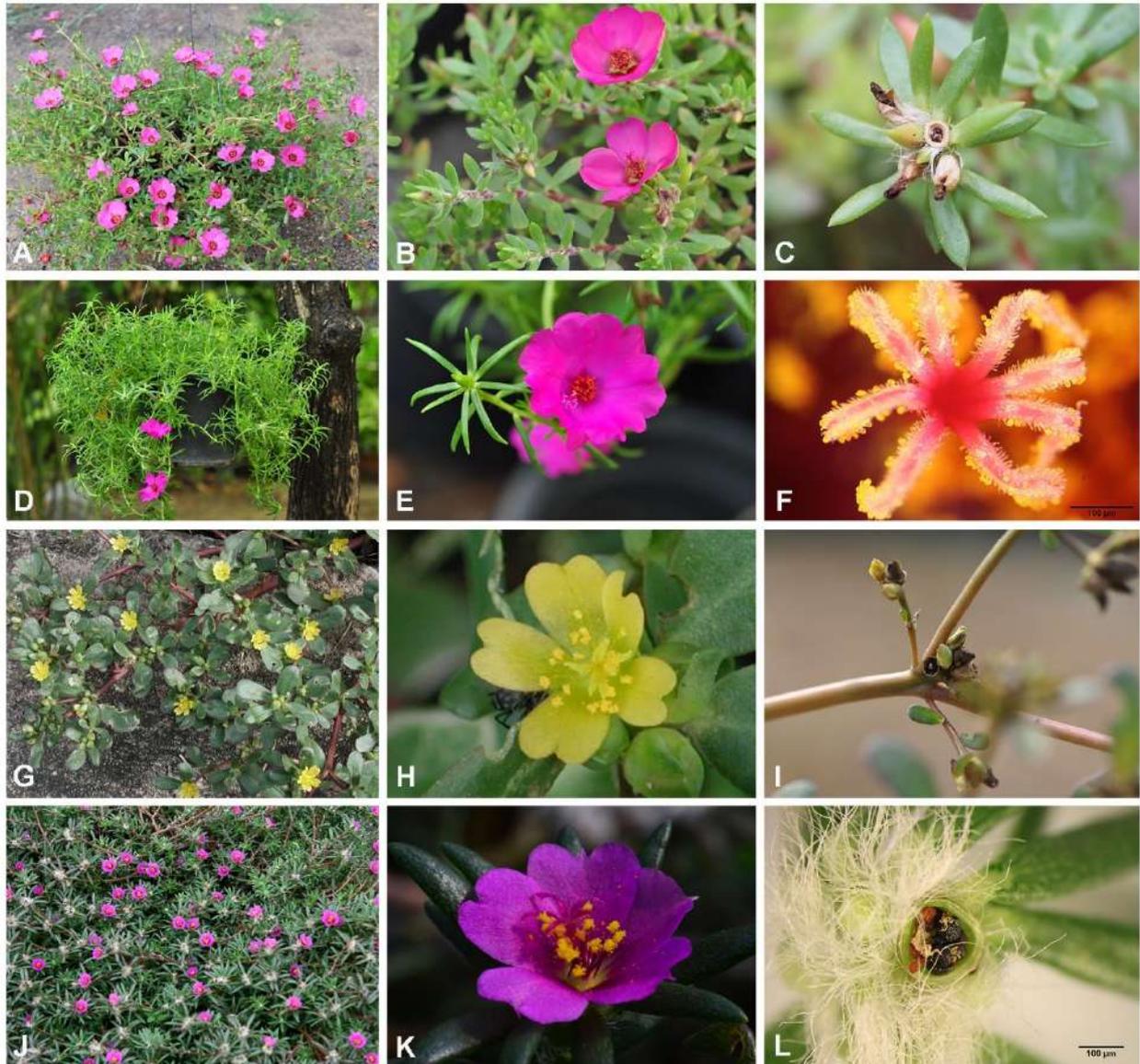


Figure 1 *Portulaca amilis* Speg., A: habit, B: flowers, C: fruit and seeds; *P. grandiflora* Hook., D: habit, E: flowers, F: stigmas; *P. oleracea* L., G: habit, H: flowers, I: fruit and seeds; *P. pilosa* L., J: habit, K: flower, L: opened fruit showing seeds with densely trichomes

3.2.4 *Portulaca pilosa* L. (Figure 1J-L)

ชื่อไทย: สารพัดพิษ

พืชล้มลุก อายุปีเดียวหรือสองปี ลำต้นทอดนอนหรือตั้งขึ้น สูงได้ถึง 20 ซม. แตกสาขาไปโดยรอบ อวบน้ำ ผิวเรียบ เกลี้ยง สีน้ำตาลเขียวถึงสีน้ำตาลแดง ใบ เรียงสลับ กระจายตัวไม่สม่ำเสมอ คล้ายทรงกระบอกเรียวยาว รูปแถบ หรือรูปหอกขอบขนาน ยาว 0.5-2 ซม. กว้าง 0.1-0.3 ซม. ปลายแหลม ขอบ

ใบเรียบ เนื้อใบอวบน้ำ ผิวเกลี้ยง ก้านใบสั้นมากถึงไร้ก้าน มีขนสีขาวตามซอกใบ ช่อดอก ออกที่ปลายยอด 2-6 ดอก มีขนนุ่มปกคลุมรอบโคนดอก วงใบประดับ 6-9 ใบ ดอกขนาดเล็ก เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.5-1.2 ซม. กลีบเลี้ยงสีเขียว รูปไข่ค่อนข้างสามเหลี่ยม หรือรูปขอบขนาน ยาวประมาณ 0.35 ซม. ปลายแหลมหรือเรียวแหลม กลีบดอก 5 กลีบ เชื่อมติดกันที่ฐาน รูปไข่กลับ ยาว 0.3-0.7 ซม. กว้าง 0.15-0.4 ซม. ปลายกลีบมนหรือ

เว้าบวมและมีติ่งตรงกลาง กลีบสีชมพูม่วง เกสรเพศผู้ 5-30 อัน ยาวประมาณ 0.3 ซม. ก้านชูอับเรณูสีชมพูม่วง รั้งไข่ทรงรูปไข่ ก้านเกสรเพศเมียสีชมพูม่วง ยาวประมาณ 0.4 ซม. ยอดเกสรเพศเมียแยกเป็น 3-6 แฉก รูปแถบยาวโค้งลง ยาว 0.15 ซม. ผล แบบผลแห้งแตก ทรงรูปไข่ ปลายมน เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.15-0.4 ซม. แตกตามขวางตรงกลางผล เมล็ด จำนวนมาก สีน้ำตาลเข้ม ถึงดำ รูปไต เส้นผ่านศูนย์กลาง ประมาณ 0.05-0.07 ซม. มีปุ่มละเอียด รูปทรงคล้ายรูปดาว และมีปุ่มเล็ก

การเจริญเติบโตในพื้นที่แห้งแล้งจะพบขนหนาแน่นกว่าที่มีความชุ่มชื้น ซึ่งความคล้ายคลึงของลักษณะความหนาแน่นขนทำให้สับสนกับ *P. amilis* ได้เสมอ (Benoit et al., 2020)

3.2.5 *Portulaca quadrifida* L. (Figure 2A-C)

ชื่อไทย: ผักเบี้ยหนู

พืชล้มลุก อายุปีเดียว ลำต้น ทอดนอน แตกสาขาไปโดยรอบ ยาวได้ถึง 25 ซม. อวบน้ำ ผิวมีขนนุ่มสั้น ลำต้นสีเขียวน้ำตาลถึงสีน้ำตาลแดง มีรากที่ข้อ ใบ ออกตรงกันข้าม แบน รูปรี รูปใบหอก รูปรี ขอบขนาน ยาวประมาณ 0.2-2 ซม. กว้างประมาณ 0.08-0.7 ซม. ปลายแหลมหรือมน ขอบใบเรียบ เนื้อใบอวบ ผิวเกลี้ยง ก้านใบสั้นมาก มีขนสีขาวที่ข้อใบ และหนาแน่นที่ข้อใบ ช่อดอก ออกที่ปลายยอด ดอกเดี่ยว น้อยมากที่พบมีถึง 3 ดอก มีขนหนาแน่นรอบโคนดอก วงใบประดับ 4 ใบ ดอก ขนาดเล็กมาก เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.6-0.8 ซม. กลีบเลี้ยงเป็นเยื่อรูปไข่ขอบขนาน ยาวประมาณ 0.3-0.45 ซม. ปลายมน กลีบดอก 4 กลีบ เชื่อมติดกันที่ฐาน รูปไข่กลับ ยาว 0.3-0.7 ซม. กว้าง 0.15-0.2 ซม. ปลายกลีบมน ค่อนข้างเว้าบวม หรือมีติ่งเล็ก กลีบสีเหลือง เกสรเพศผู้ 6-12 อัน ยาว 0.25-0.35 ซม. ก้านชูอับเรณูสีเหลืองใส รั้งไข่รูปไข่ ก้านเกสรเพศเมีย ยาว 0.2-0.4 ซม. ยอดเกสรเพศเมียแยกเป็น 4 แฉก น้อยมากที่พบเป็น 3 หรือ 5 แฉก รูปแถบ ปลายโค้ง

เล็กน้อย ยาวประมาณ 0.004 ซม. ผล แบบผลแห้งแตก ทรงรูปกรวยขอบขนาน ยาว 0.2-0.35 ซม. เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.25-0.3 ซม. แตกตามขวางที่ส่วนปลาย ประมาณ 1/3 ของขนาดผล เมล็ด จำนวนมาก สีออกดำเทา รูปไต เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.08-0.1 ซม. ผิวหยาบ เป็นตุ่มคล้ายพีระมิด

การแพร่กระจายในแปลงพืชลำต้นจะสูง แต่เมื่อปลูกประดับในกระถางจะพบขึ้นหนาแน่น ลำต้นไม่สูง

3.2.6 *Portulaca umbraticola* Kunth

(Figure 2D-F)

ชื่อสามัญ: Wingpod Purslane

พืชล้มลุก อายุปีเดียว ลำต้น ทอดนอน หรือค่อนข้างตั้งขึ้น สูงได้ถึง 22 ซม. แตกสาขาไปโดยรอบ กิ่งก้านยาวได้ถึง 20 ซม. อวบน้ำ ผิวเรียบเกลี้ยง สีน้ำตาลเขียวถึงสีน้ำตาลแดง มีขนรยางค์กระจายตัวเบาบางที่ข้อหรือไม่มี ใบ เรียงสลับ หรือบางครั้งเรียงเกือบตรงกันข้าม ทรงแบน ค่อนข้างรูปไข่-รูปรี หรือรูปพาย ยาว 1-3.5 ซม. กว้าง 0.2-1.5 ซม. โคนสอบเรียว ปลายมนหรือตัด ขอบใบเรียบ เนื้อใบอวบ ผิวเกลี้ยง ก้านใบสั้นมาก มีขนเบาบางตามข้อ ช่อดอก ออกเป็นกลุ่มแน่น 3-6 ดอก ไม่มีขนปกคลุมโคนดอก วงใบประดับ 4-5 ใบ ดอก ขนาดใหญ่ เส้นผ่านศูนย์กลาง 1.5-3 ซม. หรือใหญ่กว่า กลีบเลี้ยงสีเขียว เป็นสันคล้ายกระตุกงู รูปไข่กว้าง ยาว 0.2-0.4 ซม. เชื่อมติดกันที่ฐานเป็นท่อยาว 0.2-0.3 ซม. เป็นสัน ร่วงง่าย กลีบดอก 5 กลีบ เชื่อมติดกันที่ฐาน รูปไข่กลับ หรือรูปใบพาย ยาว 0.8-1.5 ซม. กว้าง 0.3-0.6 ซม. ปลายกลีบแหลมหรือเป็นติ่งแหลม กลีบสีเหลือง ส้ม หรือชมพู เกสรเพศผู้ 7-30 อัน ยาว 0.12-0.4 ซม. ก้านชูอับเรณูสีเหลืองใส รั้งไข่ทรงรูปไข่ ก้านเกสรเพศเมีย ยาว 0.2-0.5 ซม. ยอดเกสรเพศเมียแยกเป็น 5-18 แฉก รูปแถบ ยาวประมาณ 0.1 ซม. ผล แบบผลแห้งแตก

ทรงรูปไข่กลับหรือทรงลูกข้าง ปลายแหลมมน มีเนื้อเยื่อขยายเป็นปีกกว้าง 0.1-0.2 ซม. ล้อมรอบผลบริเวณใต้ฝาปิด ผลมีเส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3-0.5 ซม. แตกตามขวางตรงกลางผล เมล็ดจำนวนมาก สีเทา รูปกลมหรือยื่นยาวออก ทรงแบน เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.05-0.1 ซม. มีปุ่มละเอียดรูปทรงคล้ายรูปดาว และมีปุ่มยาว

ยังไม่เคยมีรายงานในพรรณพฤกษชาติของไทย มักเข้าใจผิดว่าเป็น *P. oleracea* หรือ *P. grandiflora* หรือเป็น hybrid ของทั้งสองตัว เนื่องจากมีลำต้นและใบกว้างคล้ายกับ *P. oleracea* (Jia et al., 2017) และมีส่วนดอกคล้ายกับ *P. grandiflora*



Figure 2 *Portulaca quadrifida* L., A: habit, B: flower branch showing trichomes at node, C: seed; *P. umbraticola* Kunth, D: habit, E: flowers, F: fruit; *Portulaca* sp., G: habit, H: flowers, I: fruit and seeds

3.2.7 *Portulaca* sp. (Figure 2G-I)

พืชล้มลุก อายุปีเดียวถึงหลายปี ลำต้นทอดนอนหรือทอดชูยอด แตกสาขาไปโดยรอบ กิ่งก้านยาวได้ถึง 25 ซม. อวบน้ำ ผิวเรียบ เกลี้ยง ลำต้นสีเขียว ใบเรียงสลับ หรือบางครั้งเรียงเกือบตรงกันข้าม เรียงตัวกันหนาแน่นใต้ดอก ทรงแบน ค่อนข้างรูปไข่-รูปรีหรือรูปพาย ยาว 0.3-3 ซม. กว้าง 0.2-1.5 ซม. โคนสอบเรียว ปลายตัดหรือป้าน ขอบใบเรียบ เนื้อใบบาง

ผิวเกลี้ยง ก้านใบสั้นมาก ไม่มีขนตามซอกใบ หรือมีขนแข็งขนาดเล็กมาก ช่อดอก ออกเป็นกลุ่ม 3-6 ดอก ไม่มีขนปกคลุมโคนดอก ไม่มีก้านดอก วงใบประดับ 2-6 ใบ ดอก ขนาดเล็ก เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.4-0.8 ซม. กลีบเลี้ยงสีเขียววงอ้อม รูปไข่ขอบขนาน ยาว 0.2-0.4 ซม. เชื่อมติดกันที่ฐานเป็นท่อยาว 0.2-0.3 ซม. เป็นสันร่วงง่าย กลีบดอก 5 กลีบ เชื่อมติดกันที่ฐาน รูปไข่กลับขอบขนาน หรือรูปไข่กลับ ยาว 0.5-0.7 ซม. กว้าง 0.25-

0.3 ซม. ปลายกลีบเว้าตื้นมีติ่งหนามสั้น กลีบสีขาว เกสรเพศผู้ 7-10 อัน ยาว 0.12-0.4 ซม. ก้านชูอับเรณูสีขาวเหลือง รังไข่ทรงรูปไข่ ก้านเกสรเพศเมียยาว 0.2-0.5 ซม. ยอดเกสรเพศเมียแยกเป็น 4-5 แฉก รูปแถบ ยาวประมาณ 0.1 ซม. ผล แบบผลแห้งแตก ทรงรูปไข่ ปลายมน เส้นผ่านศูนย์กลาง 0.3-0.4 ซม. แตกตามขวาง ตรงกลางผล ไม่มีก้านชู เมล็ด จำนวนมาก สีดำาว รูปไต เส้นผ่านศูนย์กลางเล็กกว่า 0.1 ซม. มีปุ่มละเอียด รูปทรงคล้ายรูปดาว และมีปุ่มกลม

Portulaca sp. มีความคล้ายคลึงกับ *P. oleracea* อย่างมาก ยกเว้นสีดอกและสีลำต้นที่ แตกต่างกัน หากไม่ได้มีการบันทึกลักษณะของสีไว้ใน ฉลากรายละเอียดพืชอย่างชัดเจน จะเป็นลักษณะที่ไม่ ค่อยนำมาใช้ในการแยกชนิด เนื่องจากตัวอย่างพรรณไม้ แห่งจะไม่เห็นลักษณะสีปรากฏอยู่เมื่อตัวอย่างเปลี่ยน สภาพไป ซึ่งถือเป็นจุดด้อยในการจัดจำแนกหากสีของพืช คือลักษณะเด่น จากการศึกษาจากฐานฐานวิทยาเบื้องต้น สันนิษฐานได้ว่า พืชทั้งสองลักษณะนี้อาจเป็นชนิด เดียวกัน แต่อาจระบุเป็นพันธุ์ (variety) ที่ต่างกัน หรืออาจจะต่างชนิดกันจริง ซึ่งการศึกษาเชิงลึกระดับ โหมดกุล ภายวิภาค หรือวิธีการเชิงลึกอื่น ๆ อาจนำมา ช่วยแก้ข้อสงสัยนี้ได้ในอนาคต

3.3 สถานะและการกระจายพันธุ์ของพืชสกุล *Portulaca*

Portulaca amilis มีสถานะเป็นไม้ประดับ เก็บรวบรวมจากพื้นที่ จ. นนทบุรี และกรุงเทพฯ (Table 1) ตัวอย่างที่พบมีลักษณะคล้ายพันธุ์ปลูก (cultivar) ชื่อ ‘Puerto Rican Hot Pink’ อย่างไรก็ตาม มีรายงานว่า เป็นวัชพืชที่แพร่กระจายได้กว้างใน สหรัฐอเมริกา (Matthews, 2004; Benoit et al., 2020) จึงจำเป็นต้องเฝ้าระวังการแพร่กระจายเข้าไปในพื้นที่ เกษตรกรรมสำคัญ เนื่องจากอาจปนเปื้อนในพืชผัก เพื่อการส่งออกได้ มีถิ่นกำเนิดจากเปรูจนถึงบราซิล

และตอนเหนือของอาร์เจนตินา เติบโตได้ดีในชีวินเวค เขตร้อนแห้งแล้ง เจริญได้ในดินทราย (Matthews, 2004) การกระจายพันธุ์ในประเทศไทยคาดว่ามีการนำเข้าเพื่อ เป็นไม้ประดับ เนื่องจากพบได้ทั่วไปตามตลาดต้นไม้

Portulaca grandiflora มีสถานะเป็นไม้ประดับ เก็บรวบรวมจากพื้นที่ จ.ขอนแก่น (Table 1) อย่างไรก็ตาม พบปลูกกระจายพันธุ์อยู่ทั่วประเทศไทย ตามบ้านเรือนและสวนสาธารณะ ซึ่งสอดคล้องกับรายงาน ของ Geesink (1975) มีถิ่นกำเนิดในทวีปอเมริกาใต้ (Ghafoor, 2018; Matthews, 2004) เติบโตในชีวินเวค กึ่งเขตร้อนเป็นหลัก (Phillips, 2002) เจริญเติบโต ตามธรรมชาติในสวนและแพร่กระจายไปยังริมถนน หรือที่รกร้าง (Matthews, 2004)

Portulaca oleracea มีสถานะเป็นวัชพืช ทั้งในและนอกพื้นที่เกษตรกรรม เก็บรวบรวมจากพื้นที่ จ.กาญจนบุรี ขอนแก่น เชียงใหม่ พังงา แม่ฮ่องสอน และหนองคาย (Table 1) พบการเจริญเติบโตในวงกว้าง ในพื้นที่ปลูกผักเศรษฐกิจ เช่น แปลงผักกาด ผักกาดขาว สะระแหน่ หน่อไม้ฝรั่ง มะเขือเทศ ผักรวม มันสำปะหลัง ดอกไม้ที่ปลูกประดับ นอกจากนี้ ยังพบการเจริญเติบโต หนาแน่นช่วงน้ำแห้งในแม่น้ำสาละวิน จ. แม่ฮ่องสอน ซึ่งสอดคล้องกับการรายงานของ Geesink (1975) ที่ พบการกระจายพันธุ์ทั่วประเทศไทย และเจริญได้ใน ทุกสภาพพื้นที่ เจริญได้ดีเช่นเดียวกับพืชผักที่เกษตรกร ปลูก หรืออาจเจริญได้ดีกว่า โดยเฉพาะอย่างยิ่งในพืช ที่ลักษณะลำต้นสูงใกล้เคียงกัน ถือเป็นวัชพืชที่แย่ง สารอาหารของพืชปลูกหลักได้ดีมาก ในออสเตรเลีย *P. oleracea* เป็นวัชพืชที่สำคัญในพืชผัก มีคู่มือ การควบคุมและกำจัดพืชชนิดนี้ อย่างเป็นระบบ (Coleman et al., 2018) ในประเทศไทยเกษตรกรใช้ การถอนทำลายซึ่งมีประสิทธิภาพมากที่สุด อย่างไรก็ตาม หากไม่ได้เผาทำลาย *P. oleracea* สามารถเจริญขึ้น ได้อีก อีกทั้งจำนวนเมล็ดที่มากและเล็ก เมื่อตั้งอยู่ใน

สภาพที่เหมาะสม สามารถเจริญเติบโตได้ง่าย มีถิ่นกำเนิดในแถบมาคาโรนีเซีย แอฟริกา ยุโรปตะวันออก ตอนกลางและตอนใต้ ไปจนถึงปากีสถาน และคาบสมุทรอาหรับ กระจายพันธุ์ได้ทั่วโลกตั้งแต่เขตหนาวไปถึงเขตอบอุ่น (Geesink, 1975; Lu and Gilbert, 2004; Matthews, 2004; Ghafoor, 2018)

Portulaca pilosa มีสถานะเป็นวัชพืช นอกพื้นที่เกษตรกรรม และเป็นไม้ประดับ เก็บรวบรวมจากพื้นที่ จ.ตรัง ตาก และนนทบุรี (Table 1) พบการเจริญเติบโตตามชายป่าธรรมชาติและริมฝั่งน้ำ ส่วนการปลูกประดับพบในกระถางที่จัดวางประดับไว้ริมถนน ซึ่งสอดคล้องกับการรายงานของ Geesink (1975) ที่พบว่าอาจกระจายพันธุ์ได้ทั่วประเทศ เจริญเติบโตในสภาพพื้นที่กร้าง และมีการปลูกเป็นไม้ประดับ พืชชนิดนี้มีถิ่นกำเนิดบริเวณตอนกลางและตอนใต้ของสหรัฐอเมริกา ไปจนถึงเขตร้อนและกึ่งเขตร้อนของอเมริกา เติบโตได้ดีในชีวนิเวศเขตร้อนแห้งแล้ง ขึ้นบนดินกรวดหรือดินทราย พื้นที่ลาดชันและมีการชะล้างหน้าดิน (Geesink, 1975; Lu and Gilbert, 2004; Matthews, 2004; Ghafoor, 2018) ซึ่งสอดคล้องกับสภาพพื้นที่การเจริญเติบโตของพืชในประเทศไทย อย่างไรก็ตาม ในต่างประเทศ *P. pilosa* จัดเป็นวัชพืชสำคัญในระบบการผลิตผักในรัฐจอร์เจีย สหรัฐอเมริกา (Shay and Prostko, 2024) จึงจำเป็นต้องเฝ้าระวังและป้องกันการแพร่กระจายของพืชในประเทศไทย เช่นเดียวกัน

Portulaca quadrifida มีสถานะเป็นวัชพืช ทั้งในและนอกพื้นที่การเกษตร และเป็นไม้ประดับ เก็บรวบรวมจากพื้นที่ จ. กรุงเทพฯ นครปฐม แม่ฮ่องสอน และเลย (Table 1) Geesink (1975) รายงานว่าเจริญเติบโตได้ในพื้นที่ต่ำกว่าระดับทะเลปานกลาง 300 ม. แต่งานวิจัยนี้พบใน อ.แม่สะเรียง จ.แม่ฮ่องสอน ซึ่งสูงกว่าระดับทะเลปานกลาง 800 ม. แสดงให้เห็นว่า มีการกระจาย

พันธุ์ขยายวงกว้างออกไป การสำรวจพบในแปลงต้นหอม ริมถนน และปลูกประดับในกระถางเพื่อตกแต่งพื้นล่าง ให้กับต้นไม้ประดับหลัก ในประเทศไนจีเรีย *P. quadrifida* จัดเป็นวัชพืชสำคัญในแปลงต้นหอม (Garba, 2021) เช่นเดียวกัน พบการแพร่กระจายของพืชชนิดนี้ในพื้นที่การเกษตรรองลงมาจาก *P. oleracea* จึงเป็นวัชพืชอีกชนิดที่ควรเฝ้าระวัง เนื่องจากสามารถกระจายพันธุ์ได้ทั่วไปในเขตร้อน ยกเว้นเขตร้อนของประเทศออสเตรเลียและแปซิฟิกตะวันออกของซามัว (Rafidah, 2010)

Portulaca umbraticola มีสถานะเป็นไม้ประดับ เก็บรวบรวมจากพื้นที่ จ.แม่ฮ่องสอน (Table 1) พบตามบ้านเรือนหรือสวนสาธารณะ อย่างไรก็ตาม ในสหรัฐอเมริกา มีสถานะเป็นวัชพืชในบางพื้นที่ มีถิ่นกำเนิดอยู่ในสหรัฐอเมริกาไปจนถึงอเมริกาเขตร้อน เติบโตได้ดีในชีวนิเวศเขตร้อนที่แห้งแล้ง (Mokni, 2025)

Portulaca sp. มีสถานะเป็นวัชพืชทั้งในและนอกพื้นที่การเกษตร เก็บรวบรวมจากพื้นที่ จ. เชียงใหม่ ตาก หนองคาย (Table 1) พบในแปลงมะเขือเทศ ยาสูบ และริมทางเดิน แม้การแพร่กระจายในพื้นที่การเกษตรน้อยกว่า *P. oleracea* แต่ในแง่ของการเป็นวัชพืชก็ส่งผลกระทบต่อเช่นเดียวกัน ดังนั้น การกำจัดและเฝ้าระวังการปนเปื้อนในสินค้าเกษตรยังเป็นประเด็นที่ต้องพิจารณา แม้พบเห็นได้โดยทั่วไปในพื้นที่เกษตรกรรม และพื้นที่ถูกรบกวน แต่ยังไม่พบรายงานของพืชที่มีลักษณะคล้ายกันกระจายพันธุ์ในต่างประเทศ

สรุปผลการทดลอง

การวิจัยนี้สามารถจำแนกและระบุชื่อพฤกษศาสตร์ของตัวอย่างพืชสกุล *Portulaca* ที่กระจายพันธุ์ทั้งในและนอกพื้นที่การเกษตร ได้แก่ *P. amilis* Speng. *P. grandiflora* Hook. *P. oleracea* L. *P. pilosa* L. *P. quadrifida* L. *P. umbraticola* Kunth

และยังไม่สามารถระบุชนิดได้ 1 ตัวอย่าง คือ *Portulaca* sp. พบชนิดพืชที่ยังไม่เคยมีรายงานในพรรณพฤกษชาติของประเทศไทยมาก่อน 2 ชนิด คือ *P. amilis* และ *P. umbraticola* สามารถแยกสถานะของพืชได้เป็นวัชพืชและไม้ประดับ ข้อมูลที่ได้สามารถใช้เป็นฐานข้อมูลสำหรับการป้องกันกำจัดและการพัฒนาเพื่อใช้ประโยชน์จากพืชสกุลนี้ต่อไป

คำขอบคุณ

การวิจัยนี้ได้รับการสนับสนุนงบประมาณจากสำนักงานการวิจัยแห่งชาติ (วช.) ผ่านการจัดสรรงบประมาณ จากกรมวิชาการเกษตร

เอกสารอ้างอิง

กองพฤกษศาสตร์และวัชพืช. 2544. ที่ระลึกในวโรกาสสมเด็จ พระเทพรัตนราชสุดาฯ สยามบรมราชกุมารี เสด็จพระราชดำเนิน ทรงเปิดอาคารพิพิธภัณฑ์พืชสิริธร. โรงพิมพ์ชุมนุมสหกรณ์การเกษตรแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ. 129 หน้า.

ธวัชชัย รัตน์เลิศ และเจมส์ เอฟ แมกซ์เวล. 2540. รายชื่อ วัชพืชที่มีรายงานพบในประเทศไทย. เวิร์คเพรส, กรุงเทพฯ. 286 หน้า.

สมาคมวิทยาการวัชพืชแห่งประเทศไทย. 2545. วัชพืชสามัญ ภาคกลาง. สมาคมวิทยาการวัชพืชแห่งประเทศไทย, กรุงเทพฯ. 135 หน้า.

Aisyah, S.I., R.A.M. Saraswati, Y.S. Yudha and W. Nurcholis. 2022. The diversity of agromorphological characters of *Portulaca grandiflora* in the MV8 population deriving from recurrent irradiation. *Biodiversitas*. 23(9): 4432-4439.

Benoit, A.D., M.G. Oliver, R.J. Vichich and J.M. Budke. 2020. Noteworthy collections: First record of the non-native plant *Portulaca amilis* (Portulacaceae) in Tennessee. *Castanea*. 85(2): 343-347.

Bridson, D. and L. Forman. 1998. *The Herbarium Handbook*. Royal Botanic Gardens, Kew. 346 p.

Bulakh, E.V., M.V. Shevera, P. Szkudlarz, P.Y. Bulakh and Z. Celka. 2022. Identification of new taxa of *Portulaca oleracea* L. aggregate from Poland based on seed coat micromorphological characteristics. *Acta Societatis Botanicorum Poloniae*. 91: 9118.

Coleman, M., P. Kristiansen, B. Sindel and C. Fyfe. 2018. *Pigweed (Portulaca oleracea): Weed Management Guide for Australian Vegetable Production*, University of New England, Armidale. 12 p.

Danin, A., F. Buldrini, M.B. Mazzanti, G. Bosi, M.C. Caria, D. Dandria, E. Lanfranco, S. Mifsud and S. Bagella. 2016. Diversification of *Portulaca oleracea* L. complex in the Italian peninsula and adjacent islands. *Botany Letters*. 163(3): 261-272.

Dhande, S.R. and V.R. Patil. 2020. An overview of *Portulaca quadrifida*. *International Journal of Vegetable Science*. 26(5): 450-456.

Garba, Y. 2021. Response of onion (*Allium cepa* L.) to plant population and weed control methods in a chicken weed (*Portulaca quadrifida* L.) infested field in Sudan Savanna, Nigeria. *Global Journal of Agricultural Sciences*. 20(1): 19-27.

Geesink, R. 1969. *Portulaca* in Indo-Australia and the Pacific. *Blumea*. 17(2): 297.

Geesink, R. 1971. Portulacaceae. pp. 121-133. In: *Flora Malesiana*. Ser. 1 Vol. 7, C.G.G.J. van Steenis (ed.). Wolters-Noordhoff Publishing, Groningen.

Geesink, R. 1975. Portulacaceae. pp. 268-273. In: *Flora of Thailand*. T. Smitinand and K. Larsen (eds.), Applied Scientific Research Corporation of Thailand, Bangkok.

Ghafoor, A. 2018. Portulacaceae in Flora of Pakistan. Available at: http://www.efloras.org/florataxon.aspx?flora_id=5&taxon_id=10724. Accessed: March 1, 2025.

Harada, J., Y. Paisooksantivatana and S. Zungsontipom. 1987. *Weeds in the Highlands of Northern Thailand: Color Illustrated. Project manual No.3.*

- Japan International Cooperation Agency and Department of Agriculture, Ministry of Agriculture and Cooperatives, Bangkok. 126 p.
- Hassler, M. 1994 – 2025. World Plants. Synonymic Checklist and Distribution of the World Flora. Version 25.03; last update March 6th, 2025. Available at: <https://www.worldplants.de/worldplants-complete-list/complete-plant-list>. Accessed: March 1, 2025.
- Holm, L.G., D.L. Plucknett, J.V. Pancho and J.P. Herberger. 1977. The World's Worst Weeds: Distribution and Biology. The University Press of Hawaii, Honolulu. 610 p.
- Jia, S., Z. Yan, Y. Wang, Y. Wei, Z. Xie and F. Zhang. 2017. Genetic diversity and relatedness among ornamental purslane (*Portulaca* L.) accessions unraveled by SRAP markers. 3 Biotech. 7(4): 241.
- Judd, W.S., C.S. Campbell, E.A. Kellogg, P.F. Stevens and M.J. Donoghue. 2002. Aizoaceae, Euphorbiaceae and Portulacaceae, in Phylogenetic relationships of Angiosperms. pp. 316-317, 343-347. In: Plant Systematics: A Phylogenetic Approach. Sinauer Associates, Inc., Sunderland, Massachusetts.
- Li, Y., L. Xiao, H. Yan, M. Wu, X. Hao and H. Liu. 2023. Nutritional values, bioactive compounds and health benefits of purslane (*Portulaca oleracea* L.): A comprehensive review. Food Science and Human Wellness. 13(5): 2480-2501.
- Lu, D. and M.G. Gilbert. 2004. *Portulaca* Linnaeus in Flora of China. Available at: http://www.efloras.org/florataxon.aspx?flora_id=2&taxon_id=126612. Accessed: March 1, 2025.
- Marsh, S.T., N.A. Brummitt, R.P.J. de Kok and T.M.A. Utteridge. 2009. Large-scale patterns of plant diversity and conservation priorities in South East Asia. Blumea. 54: 103-108.
- Matthews, J.F. 2004. *Portulaca* Linnaeus in Flora of North America. Available at: https://www.efloras.org/florataxon.aspx?flora_id=1&taxon_id=126612. Accessed: March 1, 2025.
- Mokni, R.E. 2025. *Portulaca umbraticola* (Portulacaceae), new to the succulent flora of North Africa and an updated key to Tunisian species and forms of the genus. Bradleya. 2025(43): 252-257.
- Phillips, S.M. 2002. Portulacaceae. pp. 1-40. In: Flora of Tropical East Africa. H.J. Beentje and S.A.L. Smith (eds.). Balkema, Rotterdam.
- Rafidah, A.R. 2010. Portulacaceae. pp. 203-209. In: Flora of Peninsular Malaysia Ser. 2: Seed Plants. Vol. 1, R. Kiew, R.C.K. Chung, L.G. Saw, E. Soepadmo and P.C. Boyce (eds.). Straits Digital Sdn. Bhd., Subang Jaya, Selangor Darul Ehsan.
- Shay, N.J. and E. Prostko. 2024. Pink purslane (*Portulaca pilosa*) control with postemergence herbicides. Weed Technology. 38: 1-19.
- Smitinand, T. 1958. The genus *Dipterocarpus* Gaertn.f. in Thailand. Thai Forest Bulletin (Botany). 4: 1-64.
- Tahir, M.A. and M.S.A. Abbasi. 2020. Phytochemical analysis of *Portulaca pilosa* & *Portulaca quadrifida* Linn through FTIR. South Asian Research Journal of Natural Products. 3(3): 1-6.

การวิเคราะห์เสถียรภาพและศักยภาพแบบหลายสภาพแวดล้อมของสายพันธุ์ก้ำวหน้า
มันสำปะหลังชุดลูกผสมปี 2561 ด้วย GGE Biplot

Multi-environment Evaluation of Potential and Stability for Promising Cassava
Breeding Lines Series 2018 Using GGE Biplot

รุ่งรวี บุญทุ่ง^{1/*} สุวัลักษณ์ ศันสนีย์^{1/} นราชัย โพธิ์สาร^{1/} ภาณุวัฒน์ มูลจันทร์^{2/} ศิริลักษณ์ ล้านแก้ว^{1/}
สายชล แสงแก้ว^{3/} นภา บุญสังข์^{4/} ฉัตรชวีริน ดาวใหญ่^{5/} จุฑามาศ เครื่องพาที^{6/}
Rungravee Boontung^{1/*} Suwaluk Sansanee^{1/} Narachai Phosan^{1/} Phanuwat Moonjuntha^{2/}
Sirilak Lankaew^{1/} Saichon Sangkaew^{3/} Napa Boonsang^{4/} Chatchewin Dawyai^{5/}
Juthamas Khruengpatee^{6/}

Received 9 Dec. 2024/Revised 31 Mar. 2025/Accepted 2 Apr. 2025

ABSTRACT

An ideal cassava variety should exhibit high potential and stability in key agronomic traits under diverse environmental conditions. This research aimed to assess the potential and stability of fresh root yield, starch content and starch yield in promising cassava lines series 2018 across 14 environments under field conditions during 2023–2024. Three promising lines, CMR61-51-39, CMR61-52-113 and CMR61-52-134 with 3 check varieties, DOA Rayong5, DOA Rayong9 and Kasetsart50, were evaluated using a randomized complete block design with 4 replications. The potential and stability of genotypes were assessed using GGE biplot analysis. The results revealed that CMR61-52-134 exhibited high potential and stability in fresh root yield, starch content and starch yield, with an average fresh root yield of 5,868 kg/rai, starch content of 22.4%, and starch yield of 1,359 kg/rai. Therefore, CMR61-52-134 was selected as an elite line for further study to obtain field management practice recommendation.

Keywords: GGE biplot; cassava; potential; stability

^{1/} ศูนย์วิจัยพืชไร่ระยอง อ.เมือง จ. ระยอง 21150

^{1/} Rayong Field Crops Research Center, Mueang, Rayong 21150, Thailand

^{2/} ศูนย์วิจัยและพัฒนาการเกษตรกาญจนบุรี อ.เมือง จ.กาญจนบุรี 71000

^{2/} Kanchanaburi Agricultural Research and Development Center, Mueang, Kanchanaburi 71000, Thailand

^{3/} ศูนย์วิจัยและพัฒนาการเกษตรนครราชสีมา อ.สีคิ้ว จ.นครราชสีมา 30340

^{3/} Nakhon Ratchasima Agricultural Research and Development Center, Sikhiu, Nakhon Ratchasima 30340, Thailand

^{4/} ศูนย์วิจัยและพัฒนาการเกษตรปราจีนบุรี อ.กบินทร์บุรี จ.ปราจีนบุรี 25110

^{4/} Prachin Buri Agricultural Research and Development Center, Kabin Buri, Prachin Buri 25110, Thailand

^{5/} ศูนย์วิจัยและพัฒนาการเกษตรสุโขทัย อ.ศรีสำโรง จ.สุโขทัย 64120

^{5/} Sukhothai Agricultural Research and Development Center, Si Samrong, Sukhothai 64120, Thailand

^{6/} ศูนย์วิจัยและพัฒนาการเกษตรมหาสารคาม อ.เมือง จ.มหาสารคาม 44000

^{6/} Maha Sarakham Agricultural Research and Development Center, Mueang, Maha Sarakham 44000, Thailand

* Corresponding author: lucybroom@gmail.com

บทคัดย่อ

พันธุ์มันสำปะหลังที่ดีควรมีศักยภาพและเสถียรภาพของลักษณะทางการเกษตรที่สำคัญ แม้ปลูกในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อประเมินศักยภาพและเสถียรภาพของสายพันธุ์กาวหน้ำมันสำปะหลังชุดลูกผสมปี 2561 ในการให้ผลผลิตหัวสด เปอร์เซ็นต์แป้ง และผลผลิตแป้ง ในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันใน 14 สภาพแวดล้อม ระหว่างปี พ.ศ. 2566-2567 โดยทดสอบมันสำปะหลัง 3 สายพันธุ์ ได้แก่ CMR61-51-39 CMR61-52-113 และ CMR61-52-134 ร่วมกับพันธุ์เปรียบเทียบ 3 พันธุ์ ได้แก่ พันธุ์ กวก.ระยอง5 กวก.ระยอง9 และเกษตรศาสตร์50 วางแผนการทดลองแบบ randomized complete block design 4 ซ้ำ ทำการประเมินศักยภาพและเสถียรภาพของพันธุ์กรรมโดยใช้วิธีวิเคราะห์แบบ GGE biplot พบว่า สายพันธุ์ CMR61-52-134 สามารถปรับตัวได้ดีในสภาพแวดล้อมที่หลากหลาย มีศักยภาพและเสถียรภาพของผลผลิตหัวสด เปอร์เซ็นต์แป้งและผลผลิตแป้งเฉลี่ย 5,868 กก./ไร่ 22.4% และ 1,359 กก./ไร่ ตามลำดับ ดังนั้นจึงเลือกสายพันธุ์ CMR61-52-134 เป็นสายพันธุ์ดีเด่นเพื่อนำไปศึกษาหาคำแนะนำด้านการปลูกและดูแลรักษาต่อไป

คำสำคัญ: GGE biplot; มันสำปะหลัง; ศักยภาพ; เสถียรภาพ

บทนำ

การปรับปรุงพันธุ์มันสำปะหลังเพื่อให้ได้พันธุ์ดีให้ผลผลิตหัวสดและแป้งสูง มีลักษณะทางการเกษตรที่ดีนั้น สิ่งสำคัญที่พิจารณาคือ ต้องสามารถปรับตัวได้ดีในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ที่หลากหลาย Eberhart and

Russell (1966) รายงานว่า พันธุ์ที่มีเสถียรภาพต้องมีการแสดงออกของลักษณะที่ต้องการคงที่ภายใต้สภาพแวดล้อมต่าง ๆ โดยแสดงออกค่อนข้างดีในสภาพแวดล้อมที่ไม่เอื้ออำนวย และแสดงออกตามศักยภาพของพันธุ์ในสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมมีรายงานว่าเสถียรภาพด้านผลผลิตหัวสดและลักษณะทางการเกษตรที่สำคัญมีความสัมพันธ์กับการทนทานของพืชในสภาพแวดล้อมที่เกิดจากความเครียดต่าง ๆ (Ceballos et al., 2004) ทั้งความเครียดอันเกิดจากสิ่งไม่มีชีวิต ได้แก่ อุณหภูมิ น้ำ ความเป็นกรด-ด่างของดิน และความเครียดอันเกิดจากสิ่งมีชีวิต ได้แก่ โรคและแมลงศัตรูพืช แต่อุปสรรคสำคัญคือ ปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์กรรมกับสิ่งแวดล้อม (genotype environment interactions) เนื่องจากสภาพแวดล้อมส่งผลต่อการแสดงออกทางพันธุ์กรรม การทดสอบสายพันธุ์โดยการปลูกในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ เพื่อศึกษาความสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์กรรมกับสภาพแวดล้อมยังไม่สามารถบ่งบอกถึงเสถียรภาพของสายพันธุ์ได้

การประเมินเสถียรภาพของพันธุ์กรรมต่าง ๆ ของพืชมีงานวิจัยในอดีต ได้แก่ Finlay and Wilkinson (1963) ใช้ค่าสัมประสิทธิ์รีเกรสชัน (regression coefficient) เพื่อศึกษาการพัฒนาพันธุ์บาร์เลย์ในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ต่อมา Eberhart and Russell (1966) ได้ศึกษาสมการรีเกรสชันเพื่อประเมินความเสถียรภาพของพันธุ์กรรม (stability) ภายหลัง Yan et al. (2000) ได้เสนอวิธีวิเคราะห์อิทธิพลหลักของพันธุ์กรรมบวกปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์กรรมกับสภาพแวดล้อม (genotype main effect plus genotype by environment interaction: GGE) และได้มีการพัฒนาเป็นวิธีการวิเคราะห์ GGE biplot ซึ่งเป็นวิธีการนำเสนอให้เห็นอิทธิพลของพันธุ์กรรม (G) และปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์กรรมกับสิ่งแวดล้อม (GE) ในลักษณะกราฟิก เพื่อใช้ในการประเมินศักยภาพและเสถียรภาพ

ของพันธุ์กรรมพืชจากการทดสอบในหลายสภาพแวดล้อม (multi-environment trial, MET)

ในการปรับปรุงพันธุ์มันสำปะหลังได้เริ่มมีการใช้วิธี GGE biplot เพื่อวิเคราะห์อิทธิพลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์กรรมกับสิ่งแวดล้อมที่มีต่อผลผลิตหัวสด และการตอบสนองต่อโรคใบด่างมันสำปะหลังในประเทศยูกันดา (Ntawuruhunga et al., 2006) การวิเคราะห์อิทธิพลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์กรรมกับสิ่งแวดล้อมต่อผลผลิตหัวสด และลักษณะทางการเกษตรอื่น ๆ ของมันสำปะหลังในประเทศไนจีเรีย (Egesi et al., 2007) และการใช้ GGE biplot เพื่อคัดเลือกพันธุ์มันสำปะหลังในประเทศบราซิล (Filho et al., 2024) เนื่องจากวิธีการวิเคราะห์นี้สามารถอธิบายศักยภาพและเสถียรภาพของพันธุ์กรรมพืชในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ ได้ดี และแสดงปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์กรรมและสภาพแวดล้อมได้ชัดเจน

มันสำปะหลังชุดลูกผสมปี 2561 ได้ผ่านการคัดเลือกพันธุ์และการประเมินพันธุ์ตามขั้นตอนการปรับปรุงพันธุ์มันสำปะหลัง จนถึงขั้นตอนการเปรียบเทียบพันธุ์ในท้องถิ่น 3 สายพันธุ์ ให้ผลผลิตหัวสด เปอร์เซ็นต์แป้ง และผลผลิตแป้งสูงกว่าพันธุ์เปรียบเทียบ (รุ่งรวี และคณะ, 2566) จึงนำเข้าสู่การเปรียบเทียบพันธุ์ในไร่เกษตรกรที่มีสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน 14 สภาพแวดล้อม เพื่อคัดเลือกสายพันธุ์มันสำปะหลังดีเด่นที่มีศักยภาพและเสถียรภาพในการให้ผลผลิตแบบหลายสภาพแวดล้อม ด้วยวิธี GGE Biplot

อุปกรณ์และวิธีการ

1. พันธุ์มันสำปะหลัง

สายพันธุ์ก้าน้ำมันสำปะหลังชุดลูกผสมปี 2561 จำนวน 3 สายพันธุ์ ได้แก่ CMR61-51-39 CMR61-52-113 และ CMR61-52-134 เป็นลูกผสมที่ได้รับการผสมพันธุ์ในปี พ.ศ. 2561 จากการผสม

ข้ามแบบรู้แม่และพ่อ CMR61-51-39 เป็นลูกผสมของ CMR50-73-6 ที่เป็นแม่และกวาง.ระยอง9 ที่เป็นพ่อ CMR61-52-113 และ CMR61-52-134 เป็นลูกผสมของ CMR50-73-6 ที่เป็นแม่ และกวาง.ระยอง11 ที่เป็นพ่อ (สุวลักษณ์และคณะ, 2561)

2. สภาพแวดล้อม

ดำเนินการทดลองในสภาพไร่เกษตรกรในพื้นที่ตัวแทนแหล่งปลูกมันสำปะหลัง ดังนี้ ภาคเหนือ ได้แก่ จ.สุโขทัย เพชรบูรณ์ และนครสวรรค์ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ ได้แก่ จ.กาฬสินธุ์ ร้อยเอ็ด มหาสารคาม ขอนแก่น เลย อุบลราชธานี และนครราชสีมา ภาคกลาง ได้แก่ จ.ชัยนาท และลพบุรี และภาคตะวันออก ได้แก่ จ.ระยอง และปราจีนบุรี รวม 14 สภาพแวดล้อม

3. การทดสอบพันธุ์ในสภาพแวดล้อม

แต่ละสภาพแวดล้อมวางแผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ 4 ซ้ำ ขนาดแปลงย่อย 5x8 ม. ปลูกมันสำปะหลังระหว่าง พ.ค.-มิ.ย. 2566 ปลูก 5 แถว ๆ ละ 10 ต้น ระยะปลูก 1x0.8 ม. ใส่ปุ๋ยเคมี 15-7-18 อัตรา 50 กก./ไร่ เมื่อมันสำปะหลังอายุ 1-3 เดือน โดยชุดหลุมใส่ 2 ซ้ำกล้าต้นบริเวณชายพุ่มใบแล้วพรวนดินกลบตามคำแนะนำของกรมวิชาการเกษตร (2553) เผื่อระวังการระบาดของโรคและแมลง กำจัดวัชพืชตามความเหมาะสม เก็บเกี่ยวผลผลิตเมื่อมันสำปะหลังมีอายุประมาณ 12 เดือน จาก 3 แถวกลาง เว้นแถวริมโดยรอบ พื้นที่เก็บเกี่ยว 3x6.4 ม. บันทึกผลผลิตหัวสด เปอร์เซ็นต์แป้ง และผลผลิตแป้ง

วิเคราะห์ความแปรปรวน และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วยวิธี DMRT (Duncan's new multiple range test) วิเคราะห์ศักยภาพของพันธุ์และเสถียรภาพของพันธุ์ด้วยวิธี GGE biplot (Yan and Kang, 2003)

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. ความแปรปรวนของพันธุ์กับสภาพแวดล้อม

ความแปรปรวนของผลผลิตหัวสด เปอร์เซ็นต์แป้ง และผลผลิตแป้งที่เกิดจากสภาพแวดล้อม (E) พันธุกรรม (G) และปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุกรรมกับสภาพแวดล้อม (G×E) พบว่า มีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญยิ่งทางสถิติ (Table 1) โดยความแตกต่างของผลผลิตหัวสดได้รับอิทธิพลส่วนใหญ่มาจากความแปรปรวนของสภาพแวดล้อม (62.8%) รองลงมา ได้แก่ ความแปรปรวนจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุกรรมกับสภาพแวดล้อม (25.4%) และ พันธุกรรม (11.8%) ตามลำดับ เช่นเดียวกับเปอร์เซ็นต์แป้ง และผลผลิตแป้งที่ได้รับอิทธิพลส่วนใหญ่จากความแปรปรวนของสภาพแวดล้อม (70.1 และ 63.9% ตามลำดับ) ในขณะที่พันธุกรรมมี 12.9 และ 20.3% และปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุกรรมกับสภาพแวดล้อม มี 17.0 และ 15.8% ตามลำดับ (Table 1)

แสดงให้เห็นว่า ผลผลิตหัวสด เปอร์เซ็นต์แป้ง และผลผลิตแป้งของมันสำปะหลังสายพันธุ์ก้าวหน้าชุดลูกผสมปี 2561 ที่แตกต่างกันเกิดจากอิทธิพลความแปรปรวนของสภาพแวดล้อมมากที่สุด สอดคล้องกับ Chatwachirawong et al. (1999); Gauch and Zobel (1997) และ Egesi et al. (2007) ที่รายงานว่าการแปรปรวนของพันธุกรรมที่ปลูกในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันได้รับอิทธิพลหลักมาจากสภาพแวดล้อม และสอดคล้องกับ ปิยะและคณะ (2547) ที่รายงานว่าการแปรปรวนของสภาพแวดล้อมมีอิทธิพลต่อเปอร์เซ็นต์แป้ง ผลผลิตหัวสด และดัชนีเก็บเกี่ยวของมันสำปะหลังมากกว่าอิทธิพลจากพันธุ์

2. ศักยภาพและเสถียรภาพของพันธุ์

2.1 ผลผลิตหัวสด การให้ผลผลิตหัวสดเฉลี่ยจาก 14 สภาพแวดล้อม พบว่า สายพันธุ์ CMR61-52-134

ให้ผลผลิตหัวสดเฉลี่ยสูงสุด 5,868 กก./ไร่ ในขณะที่ผลผลิตหัวสดรวมเฉลี่ย 4,666 กก./ไร่ (Table 2) จากการวิเคราะห์ศักยภาพและเสถียรภาพด้วย what-won-where biplot สามารถจัดกลุ่มสภาพแวดล้อม (mega environment) ได้ 3 กลุ่ม (Figure 1A) คือ กลุ่มที่ 1 ได้แก่ ขอนแก่น (E2) กาฬสินธุ์ (E3) เลย (E4) ลพบุรี (E5) มหาสารคาม (E6) เพชรบูรณ์ (E9) ปราจีนบุรี (E10) และระยอง (E12) โดยสายพันธุ์ CMR61-52-134 (G3) มีศักยภาพในการให้ผลผลิตหัวสดที่ดี กลุ่มที่ 2 ได้แก่ ชัยนาท (E1) นครราชสีมา (E7) และ นครสวรรค์ (E8) โดยพันธุ์เกษตรศาสตร์ 50 (G4) มีศักยภาพในการให้ผลผลิตหัวสดที่ดี และกลุ่มที่ 3 ได้แก่ ร้อยเอ็ด (E11) สุโขทัย (E13) และ อุบลราชธานี (E14) มีสายพันธุ์ CMR61-52-113 (G2) มีศักยภาพของการให้ผลผลิตหัวสดที่ดี

ในการวิเคราะห์หาพันธุ์ในอุดมคติ (ideal genotype) ด้วย GGE biplot-genotype มีค่า PC1 (แกน X หรือ AEC abscissa) 48.5% และ PC2 (แกน Y หรือ AEC ordinate) 24.1% หรือมีความแปรปรวนรวม 72.6% (Figure 1B) ซึ่งพันธุ์ในอุดมคติต้องแสดงศักยภาพและมีเสถียรภาพของพันธุ์สูงอย่างต่อเนื่องภายใต้สภาพแวดล้อมต่าง ๆ (Yan, 2001; Yan et al., 2007) ตำแหน่งของพันธุกรรมในอุดมคติ คือ จุดวงกลมที่บที่อยู่มุมศูนย์กลางของวงกลมรวม และอยู่ทางด้านบวกบนเส้นแกน AEC (หรือ AEC Abscissa คือ แนวนอนหรือแกน X ของค่าเฉลี่ยสภาพแวดล้อม) Mullualem et al. (2024) อธิบายว่า การประเมินพันธุ์ในอุดมคติด้วย GGE biplot พันธุกรรมใดที่อยู่ห่างจากจุดกำเนิดมาทางด้านบวกของแกน AEC abscissa จะมีศักยภาพสูงของลักษณะทางการเกษตรที่ต้องการ ขณะที่ พันธุกรรมที่อยู่ห่างจากจุดกำเนิดมาทางด้านลบของ AEC abscissa จะมีศักยภาพของลักษณะ

Table 1 Analysis of variation for fresh root yield, starch content, and starch yield of promising hybrid cassava series 2018 evaluated at 14 locations during 2023 to 2024

Source	df	Fresh root yield (kg/rai)			Starch content (%)			Starch yield (kg/rai)					
		SS	MS	F value	SS (%)	MS	F value	SS	MS	F value			
Location (E)	13	577,164,074	44,397,236	62.8	10.37**	57,316,162	4,408,936	70.1	14.66**	4,391	33.8	63.9	28.43**
Replication within E	42	179,778,683	4,280,445			12,631,337	300,746			499	11.9		
Genotype (G)	5	108,626,763	21,725,353	11.8	15.84**	10,541,271	2,108,254	12.9	26.12**	1,394	278.9	20.3	50.3**
G x E	65	233,252,346	3,588,498	25.4	2.62**	13,884,487	213,607	17.0	2.65**	1,088	16.7	15.8	3.02**
Pooled error	209	286,700,064	1,371,771			16,872,444	80,729			1,159	5.5		
Total	334	1,385,521,930				111,245,701				8,531			

Note: SS = sum of squares, MS = mean of squares, SS (%) = percentage of sum square, * = significant difference at p<0.05, ** = significant difference at p<0.01

Table 2 The average fresh root yield (kg/rai) across 14 locations (G-mean), average from each location (L-mean) and grand mean of promising hybrid cassava series 2018 during 2023 to 2024

Clone/ variety (G)	Location (L)														G-Mean
	RYG	PRI	CNT	LRI	NSN	PNB	STI	NMA	KKN	LEI	UBN	REI	KSN	MKM	
CMR61-51-39	4,927 ab	3,354 b	4,604	7,623 ab	3,215 a	2,929	4,119	4,622	4,188 bc	5,975	3,127	3,688	3,504	6,113 ab	4,428 b
CMR61-52-113	4,525 b	1,546 c	3,950	6,242 bc	1,743 b	2,021	7,200	4,590	4,938 ab	6,606	4,896	5,104	4,104	5,200 b	4,520 b
CMR61-52-134	6,446 a	4,788 a	4,723	8,769 a	3,819 a	3,354	6,313	6,691	6,021 a	8,729	4,708	5,083	6,029	6,675 a	5,868 a
R5	4,329 b	1,006 c	5,162	4,146 c	3,955 a	2,062	4,679	5,819	2,750 c	7,871	2,479	4,771	3,946	6,754 a	4,048 b
R9	5,413 ab	1,425 c	4,912	5,360 c	3,918 a	2,771	5,069	6,156	3,021 c	7,608	3,896	5,417	2,613	3,692 c	4,545 b
KU50	4,129 b	4,383 ab	5,958	5,948 bc	3,240 a	2,958	5,069	6,642	2,646 c	6,296	2,396	4,979	2,838	6,044 ab	4,588 b
F-test	*	**	ns	**	**	ns	ns	ns	**	ns	ns	ns	ns	**	**
CV (%)	20.0	31.3	25.1	21.9	15.9	28.9	31.1	21.2	24.6	17.7	38.0	24.2	40.8	13.0	
L-Mean	4,961	2,750	4,885	6,348	3,315	2,683	5,408	5,753	3,927	7,181	3,584	4,840	3,839	5,746	4,666

Note: STI: Sukhothai, PNB: Phetchabun, NSN: Nakhon Sawan, KSN, Kalasin, REI: Roi Et, MKM: Maha Sarakham, KKN: Khon Kaen, LEI: Loei, UBN: Ubon Ratchathani, NMA: Nakhon Ratchasima
CNT: Chai Nat, LRI: Lop Buri, RYG: Rayong, PRI: Prachin Buri

In a column, means followed by the same letter are not significantly different at 0.05 level, * = significant difference at p<0.05, ** = significant difference at p<0.01, ns = not significant

ทางการเกษตรที่ต้องการต่ำกว่าในเกือบทุกสภาพแวดล้อม บ่งชี้ว่าพันธุกรรมนั้นมีความแปรปรวนสูงจากอิทธิพลร่วมระหว่างพันธุกรรมและสภาพแวดล้อม พบว่าสายพันธุ์ CMR61-52-134 มีตำแหน่งอยู่ใกล้ตำแหน่งพันธุกรรมในอุดมคติมากที่สุด จึงเป็นสายพันธุ์ที่มีคุณค่าเนื่องจากมีศักยภาพและมีเสถียรภาพ

ของผลผลิตหัวสดสูง โดยมีผลผลิตหัวสดเฉลี่ย 5,868 กก./ไร่ สายพันธุ์ CMR61-51-39 มีเสถียรภาพในการให้ผลผลิตหัวสดที่ดี แต่มีศักยภาพในการให้ผลผลิตหัวสดต่ำ ในขณะที่สายพันธุ์ CMR61-52-113 มีศักยภาพและเสถียรภาพในการให้ผลผลิตหัวสดต่ำ

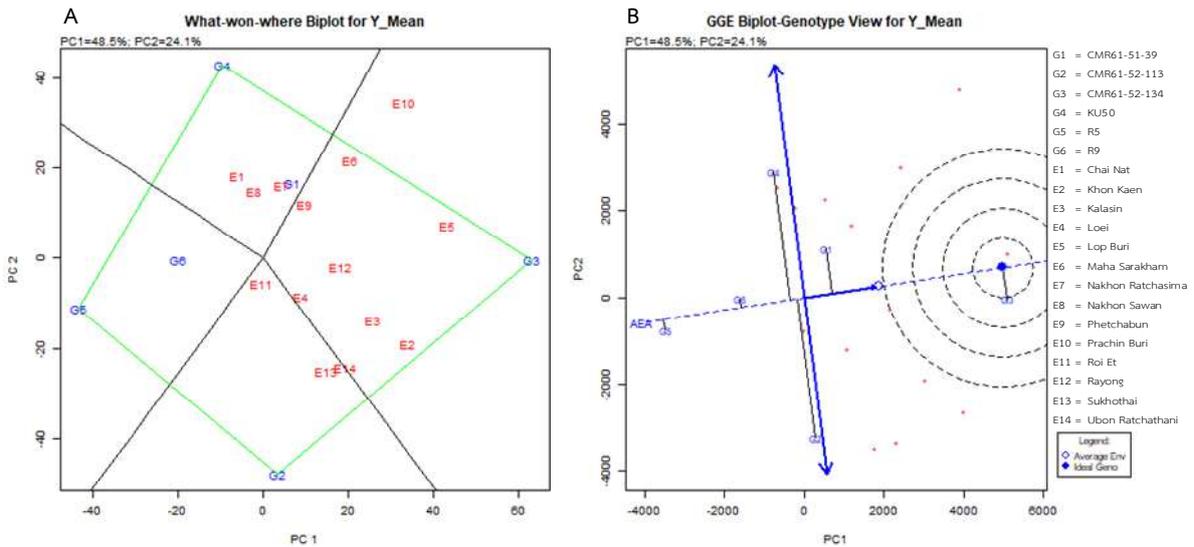


Figure 1 What-won-where (A) and GGE biplot-genotype (B) of GGE biplot for fresh root yield of promising hybrid cassava series 2018 evaluated across 14 locations during 2023 to 2024

2.2 เปอร์เซนต์แบ่ง พบว่า สายพันธุ์ CMR61-52-113 มีค่าเฉลี่ย 23.8% มากกว่าทุกพันธุ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Table 3) การพิจารณาศักยภาพด้านเปอร์เซนต์แบ่งของมันสำปะหลังในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ สามารถแบ่งได้ 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 ได้แก่ ลพบุรี นครสวรรค์ เพชรบูรณ์ และสุโขทัย ซึ่งพันธุ์กว.ระยอง9 มีศักยภาพในการให้เปอร์เซนต์แบ่งที่ดี กลุ่มที่ 2 ได้แก่ ชัยนาท ขอนแก่น กาฬสินธุ์ เลย มหาสารคาม นครราชสีมา ปราจีนบุรี ร้อยเอ็ด ระยอง และอุบลราชธานี สายพันธุ์ CMR61-52-113 มีศักยภาพด้านเปอร์เซนต์แบ่งที่ดี รองลงมา ได้แก่ CMR61-51-39 และ CMR61-52-134 ตามลำดับ

การประเมินพันธุ์ในอุดมคติ พบว่า มีความแปรปรวน 84.6% (PC1 = 68.9% PC2 = 15.7%) สายพันธุ์ CMR61-51-39 มีตำแหน่งใกล้จุดพันธุ์ในอุดมคติมากที่สุด แสดงว่าเป็นสายพันธุ์ที่มีคุณค่าด้านเปอร์เซนต์แบ่ง ในขณะที่ CMR61-52-134 ให้เปอร์เซนต์แบ่งไม่แตกต่างทางสถิติกับ CMR61-51-39 (Table 3) แต่มีเสถียรภาพมากกว่าเนื่องจากมีตำแหน่งอยู่บนเส้นแกน AEC ในขณะที่ CMR61-52-113 แม้มีเปอร์เซนต์แบ่งที่สูงสุดทางสถิติ แต่มีเสถียรภาพของสายพันธุ์น้อย

2.3 ผลผลิตแบ่ง เฉลี่ยจาก 14 สภาพแวดล้อม พบว่า สายพันธุ์ CMR61-52-134 ให้ผลผลิตแบ่งเฉลี่ยสูงสุด 1,359 กก./ไร่ มากกว่าอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Table 4) เมื่อพิจารณาศักยภาพของ

มันสำปะหลังในการให้ผลผลิตแป้ง สามารถจัดกลุ่มสภาพแวดล้อมได้ 3 กลุ่ม (Figure 2A) กลุ่มที่ 1 ได้แก่ ขอนแก่น กาฬสินธุ์ เลย ลพบุรี มหาสารคาม นครราชสีมา เพชรบูรณ์ ปราจีนบุรี ระยอง และอุบลราชธานี โดยมีสายพันธุ์ CMR61-52-134 ที่มีศักยภาพสูงด้านผลผลิตแป้ง กลุ่มที่ 2 ได้แก่ ร้อยเอ็ด และสุโขทัย มีสายพันธุ์ CMR61-52-113 ที่ให้ศักยภาพสูงด้านผลผลิตแป้ง และกลุ่มที่ 3 ได้แก่ ชัยนาท และนครสวรรค์ มีพันธุ์เกษตรศาสตร์ 50 ที่ให้ศักยภาพสูงรองลงมา คือ CMR61-51-39

GGE biplot-genotype ของผลผลิตแป้งมีความแปรปรวน 78.3% (PC1 = 61.2% PC2 = 17.1%) (Figure 2B) และบ่งชี้ว่า CMR61-52-134 เป็นสายพันธุ์ที่มีศักยภาพสูงและมีเสถียรภาพสูงด้านผลผลิตแป้ง ในขณะที่สายพันธุ์ CMR61-52-113 และ CMR61-51-39 มีเสถียรภาพในการให้ผลผลิตแป้งต่ำกว่า โดยมี

ตำแหน่งอยู่ห่างจากจุดพันธุ์ในอุดมคติและห่างจากเส้นแกน AEC abscissa การประเมินศักยภาพและเสถียรภาพของพันธุ์กรรมแสดงให้เห็นว่าสายพันธุ์ CMR61-52-134 มีความดีเด่น มีศักยภาพสูงและมีเสถียรภาพในการให้ผลผลิตหัวสด เปอร์เซ็นต์แป้ง และผลผลิตแป้ง จึงควรเลือกสายพันธุ์ CMR61-52-134 เป็นสายพันธุ์ดีเด่นเพื่อนำไปศึกษาด้านเขตกรรม การจัดการโรคและแมลง สำหรับเป็นข้อมูลสนับสนุนในการขอจดทะเบียนพันธุ์พืชใหม่ต่อไป อย่างไรก็ตาม มันสำปะหลังสามารถปลูกได้ตลอดปี ซึ่งบางพื้นที่ปลูกในช่วงฤดูแล้ง (พ.ย.-ธ.ค.) ดังนั้น หากมีการศึกษาด้านศักยภาพและเสถียรภาพเพิ่มเติมสำหรับการปลูกและการเก็บเกี่ยวในช่วงฤดูแล้ง จะช่วยให้ข้อมูลด้านศักยภาพและเสถียรภาพของมันสำปะหลังมีความแม่นยำมากขึ้น

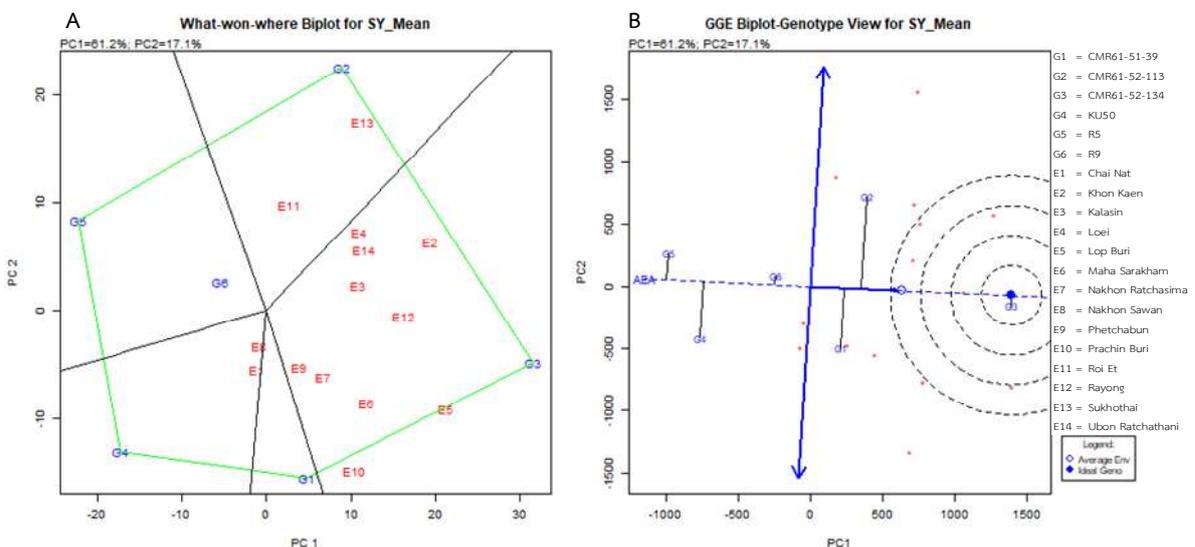


Figure 2 What-won-where (A) and GGE biplot-genotype (B) of GGE biplot for starch yield of promising hybrid cassava series 2018 evaluated across 14 locations during 2023 to 2024

การประเมินศักยภาพและเสถียรภาพของพันธุ์กรรมเพื่อการคัดเลือกพันธุ์ ควรดำเนินการในสภาพแวดล้อมที่หลากหลาย เพื่อลดอิทธิพลของปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุ์กรรมกับสิ่งแวดล้อม

(Peprah et al., 2020) และเพิ่มความแม่นยำในการคัดเลือกพันธุ์ให้มีลักษณะดีตามความต้องการ (Amelework et al., 2023) การทดลองนี้แสดงให้เห็นว่า อิทธิพลของสภาพแวดล้อม พันธุ์กรรม และ

Table 3 The average starch content (%) across 14 locations (G-mean), average from each location (L-mean) and grand mean of promising hybrid cassava series 2018 during 2023 to 2024

Clones/ variety (G)	Location (L)														G-Mean
	RYG	PRI	CNT	LRI	NSN	PNB	STI	NMA	KKN	LEI	UBN	REI	KSN	MKM	
CMR61-51-39	26.1 a	20.6 a	21.2 a	27.2 a	18.3 ab	25.5	19.7 a	29.4	18.5 a	25.8 a	15.1 bc	26.1 a	19.4	26.5 a	22.8 b
CMR61-52-113	26.3 a	20.4 a	20.3 a	27.3 a	16.4 bc	26.2	22.5 a	29.2	22.9 a	27.2 a	16.1 b	28.2 a	21.9	26.7 a	23.8 a
CMR61-52-134	25.0 a	19.8 a	18.0 ab	26.5 a	19.4 ab	24.4	20.5 a	29.4	20.5 a	26.2 a	19.8 a	18.9 b	20.4	25.1 a	22.4 bc
R5	17.1 b	13.9 b	14.6 b	27.5 a	19.8 ab	25.9	18.9 a	23.6	11.5 b	23.1 bc	13.3 bc	18.5 b	18.3	19.9 c	19.1 d
R9	24.0 a	19.2 a	20.7 a	27.0 a	21.5 a	23.9	21.0 a	26.8	13.0 b	25.3 ab	15.8 bc	21.8 b	17.3	22.3 bc	21.6 c
KU50	16.6 b	14.6 b	16.9 ab	22.7 b	13.9 c	20.7	14.0 b	25.1	13.7 b	21.4 c	12.5 c	19.6 b	20.2	24.6 ab	18.0 e
F-test	**	**	*	**	**	ns	**	ns	**	**	**	**	ns	**	**
CV(%)	7.0	12.2	14.5	4.4	11.9	12.0	11.9	12.9	16.8	5.8	13.4	11.9	13.1	7.2	7.2
L-Mean	22.5	18.1	18.6	26.3	18.2	24.4	19.4	27.3	16.7	24.9	15.4	22.2	19.6	24.2	21.3

Note: STI: Sukhothai, PNB: Phetchabun, NSN: Nakhon Sawan, KSN, Kalasin, REI: Roi Et, MKM: Maha Sarakham, KKN: Khon Kaen, LEI: Loei, UBN: Ubon Ratchathani, NMA: Nakhon Ratchasima
 CNT: Chai Nat, LRI: Lop Buri, RYG: Rayong, PRI: Prachin Buri

In a column, means followed by the same letter are not significantly different at 0.05 level, * = significant difference at p<0.05, ** = significant difference at p<0.01, ns = not significant

Table 4 The average starch yield (kg/rai) across 14 locations (G-mean), average from each location (L-mean) and grand mean of promising hybrid cassava series 2018 during 2023 to 2024

Clone/ variety (G)	Location (L)														G-Mean
	RYG	PRI	CNT	LRI	NSN	PNB	STI	NMA	KKN	LEI	UBN	REI	KSN	MKM	
CMR61-51-39	1,287 a	734 ab	976	2,090 a	590 bc	752	836 bc	1,364 b	776 b	1,548 bc	474 bc	986	702	1,616 a	1,052 b
CMR61-52-113	1,191 a	324 c	804	1,716 ab	304 d	532	1,612 a	1,340 b	1,132 ab	1,786 bc	770 ab	1,445	894	1,388 a	1,100 b
CMR61-52-134	1,612 a	947 a	862	2,317 a	740 ab	818	1,316 ab	1,994 a	1,251 a	2,303 a	939 a	1,020	1,234	1,676 a	1,359 a
R5	748 b	142 c	768	1,150 b	797 ab	618	869 bc	1,373 b	328 c	1,819 b	328 c	915	711	1,346 a	808 c
R9	1,295 a	269 c	1,060	1,439 b	841 a	545	1,100 abc	1,648 ab	391 c	1,905 ab	615 abc	1,208	469	821 b	1,028 b
KU50	707 b	646 b	1,043	1,346 b	446 cd	666	705 c	1,638 ab	354 c	1,352 c	311 c	998	613	1,482 a	866 c
F-test	**	**	ns	**	**	ns	*	*	**	**	*	ns	ns	**	**
CV(%)	27.5	34.8	38.8	23.2	22.1	32.5	32.2	18.7	35.2	16.0	42.1	29.9	46.3	15.2	15.2
Loc-Mean	1,140	510	919	1,676	620	655	1,073	1,559	705	1,786	573	1,095	771	1,388	1,034

Note: STI: Sukhothai, PNB: Phetchabun, NSN: Nakhon Sawan, KSN, Kalasin, REI: Roi Et, MKM: Maha Sarakham, KKN: Khon Kaen, LEI: Loei, UBN: Ubon Ratchathani, NMA: Nakhon Ratchasima
 CNT: Chai Nat, LRI: Lop Buri, RYG: Rayong, PRI: Prachin Buri

In a column, means followed by the same letter are not significantly different at 0.05 level, * = significant difference at p<0.05, ** = significant difference at p<0.01, ns = not significant

ปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุกรรมกับสภาพแวดล้อมมีนัยสำคัญทางสถิติที่ระดับ $p < 0.01$ โดยสภาพแวดล้อมเป็นอิทธิพลหลักต่อศักยภาพในการให้ผลผลิตหัวสดเปอร์เซ็นต์แห้ง และผลผลิตแห้งของมันสำปะหลัง (Table 1) สอดคล้องกับ Uchendu et al. (2022) ที่รายงานว่า ลักษณะของแป้งในหัวมันสำปะหลังมีความแตกต่างกัน โดยมีสภาพแวดล้อมเป็นอิทธิพลหลัก

การใช้ GGE biplot สามารถอธิบายถึงศักยภาพและเสถียรภาพของพันธุกรรมในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ แสดงให้เห็นถึงปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุกรรมและสภาพแวดล้อม และสามารถแบ่งกลุ่มของสภาพแวดล้อมที่มีลักษณะใกล้เคียงกัน เมื่อพิจารณา what-won-where biplot ของผลผลิตหัวสด เปอร์เซ็นต์แห้ง และผลผลิตแห้ง สายพันธุ์ CMR61-52-134 ให้ศักยภาพที่ดีและปรับตัวได้ดีในสภาพแวดล้อมที่หลากหลาย โดยให้ผลผลิตหัวสดสูงเมื่อปลูกที่ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (ขอนแก่น กาศสินธุ์ เลย มหาสารคาม) ภาคเหนือตอนล่าง (เพชรบูรณ์) ภาคกลาง (ลพบุรี) และ ภาคตะวันออก (ระยอง ปราจีนบุรี) ซึ่งมีเนื้อดินเป็นดินทรายปนร่วน ดินร่วนปนทราย และ ดินเหนียวปนทราย (Figure 1A) ให้เปอร์เซ็นต์แป้งดีเมื่อปลูกที่ ภาคตะวันออก เฉียงเหนือ (ขอนแก่น กาศสินธุ์ เลย มหาสารคาม นครราชสีมา ร้อยเอ็ด อุบลราชธานี) ภาคกลาง (ชัยนาท) และ ภาคตะวันออก (ระยอง ปราจีนบุรี) ซึ่งมีเนื้อดินส่วนใหญ่เป็นดินร่วนปนทราย และ ดินทรายปนร่วน และให้ผลผลิตแห้งสูงเมื่อปลูกที่ ภาคตะวันออกเฉียงเหนือ (ขอนแก่น กาศสินธุ์ เลย มหาสารคาม นครราชสีมา อุบลราชธานี) ภาคเหนือตอนล่าง (เพชรบูรณ์) ภาคกลาง (ลพบุรี) และ ภาคตะวันออก (ระยอง ปราจีนบุรี) ซึ่งมีเนื้อดินเป็นดินทรายปนร่วน ดินร่วนปนทราย และดินเหนียวปนทราย (Figure 2A) อย่างไรก็ตาม what-won-where biplot ของเปอร์เซ็นต์แป้งจัดสภาพแวดล้อมเป็น 2 กลุ่ม ในขณะที่ผลผลิตและ

ผลผลิตแป้ง แบ่งสภาพแวดล้อมได้ 3 กลุ่ม แสดงว่าเปอร์เซ็นต์แป้งมีความแปรปรวนอันเกิดจากสภาพแวดล้อมน้อยกว่าผลผลิตและผลผลิตแป้ง สอดคล้องกับ Filho et al. (2024) ที่พบลักษณะนี้ในเปอร์เซ็นต์มันแห้ง

GGE biplot-genotype สามารถใช้อธิบายความแปรปรวนโดยพิจารณาจาก PC1 และ PC2 ซึ่ง Yan and Kang (2003) อธิบายว่า PC1 และ PC2 คือองค์ประกอบหลักสำหรับ biplot โดย PC1 เป็นความแปรปรวนอันเกิดจากพันธุกรรม และ PC2 เป็นความแปรปรวนเกิดจากสภาพแวดล้อม นอกจากนี้ PC1 บ่งบอกถึงศักยภาพของพันธุกรรมมีค่ามากกว่า PC2 ที่บ่งบอกถึงความเสถียรภาพของพันธุกรรม (Khan et al., 2021) ดังนั้น พันธุ์ในอุดมคติจะเป็นพันธุ์ที่มีศักยภาพของลักษณะทางการเกษตรที่สนใจสูง (มี PC1 มาก หรืออีกนัยหนึ่งคือ ไปทางด้านบวกของแกน AEC abscissa) และมีเสถียรภาพสูงในลักษณะนั้น ๆ (มี PC2 น้อย คือ มีตำแหน่งใกล้เส้นแกน AEC abscissa) (Yan and Rajcan, 2002)

การประเมินศักยภาพและเสถียรภาพของสายพันธุ์ข้าวหม่ามันสำปะหลังชุดลูกผสมปี 2561 บ่งชี้ว่าสายพันธุ์ CMR61-52-134 เป็นสายพันธุ์ที่มีคุณค่า มีศักยภาพสูงทั้งในด้านผลผลิต เปอร์เซ็นต์แห้ง และผลผลิตแป้ง แม้ปลูกในสภาพแวดล้อมต่าง ๆ มีการปรับตัวกว้าง (general adaptation) จึงเลือกสายพันธุ์ CMR61-52-134 เป็นสายพันธุ์ดีเด่น เพื่อนำไปศึกษาหาคำแนะนำด้านการปลูกและดูแลรักษา ตลอดจนดำเนินการขอจดทะเบียนพันธุ์พืชใหม่ต่อไป ส่วน CMR61-51-39 และ CMR61-52-113 ให้ผลผลิตหัวสด และผลผลิตแป้งดีในบางสภาพแวดล้อมจึงอาจแนะนำให้ปลูกในสภาพแวดล้อมที่เอื้ออำนวย ถือได้ว่าเป็นสายพันธุ์มีการปรับตัวแบบแคบหรือเฉพาะเจาะจง (specific adaptation) ซึ่ง Koundinya et al. (2021)

ได้รายงานว่ พันธุกรรมใดที่แสดงศักยภาพดีในสภาพแวดล้อมใด อาจแนะนำให้ปลูกพันธุกรรมนั้นในสภาพแวดล้อมนั้น ๆ

Fox et al. (1997) รายงานว่าการประเมินพันธุกรรมมันสำปะหลังที่ปรับตัวได้ในสภาพแวดล้อมที่หลากหลายสามารถวิเคราะห์เสถียรภาพของพันธุกรรมได้ทางสถิติ ซึ่งพันธุกรรมที่มีความสามารถในการปรับตัวให้เข้ากับสภาพแวดล้อมที่หลากหลาย ถือว่าเป็นพันธุกรรมที่มีเสถียรภาพสูง และจัดว่าเป็นพันธุกรรมที่มีการปรับตัวแบบกว้าง ในทางกลับกัน พันธุกรรมที่ปรับตัวได้ในสภาพแวดล้อมที่จำกัด จัดว่าเป็นพันธุกรรมที่มีการปรับตัวแบบเฉพาะเจาะจง ดังนั้น การทดสอบสายพันธุ์มันสำปะหลังในหลายสภาพแวดล้อม แสดงให้เห็นถึงการแสดงออกของพันธุกรรมในสภาพแวดล้อมที่แตกต่างกัน เพื่อบ่งชี้สายพันธุ์ที่มีการปรับตัวได้ทั้งแบบกว้างและแบบเฉพาะเจาะจง (Uchendu et al., 2022) รวมถึงเพื่อคัดเลือกสายพันธุ์ที่แสดงศักยภาพดีที่สุดในสภาพแวดล้อมที่หลากหลาย หรือคัดเลือกสายพันธุ์ที่แสดงศักยภาพที่ดีในสภาพแวดล้อมที่เฉพาะเจาะจง (Akinwale et al., 2011) อย่างไรก็ตาม การทดลองนี้ปลูกและเก็บเกี่ยวในช่วงต้นฤดูฝน (พ.ค.-มิ.ย.) แต่บางพื้นที่ปลูกและเก็บเกี่ยวมันสำปะหลังในช่วงฤดูแล้ง (พ.ย.-ธ.ค.) ดังนั้น หากมีการศึกษาเพิ่มเติมสำหรับการปลูกและการเก็บเกี่ยวในช่วงฤดูแล้ง หรือศึกษาเพิ่มเติมของอิทธิพลจากปัจจัยภายนอกหลายตัวร่วมกัน เช่น สภาพแวดล้อมที่แตกต่างกันอันเกิดจากการจัดการด้านเขตกรรมจะช่วยให้ข้อมูลด้านศักยภาพและเสถียรภาพของมันสำปะหลังและปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุกรรมและสภาพแวดล้อมมีความชัดเจนมากขึ้น

สรุปผลการทดลอง

การประเมินสายพันธุ์ก้ำวหน้าของมันสำปะหลังชุดลูกผสมปี 2561 ใน 14 สภาพแวดล้อม พบว่า การให้ผลผลิตหัวสด เปอร์เซ็นต์แป้ง และผลผลิตแป้งของสายพันธุ์มันสำปะหลังที่แตกต่างกัน เกิดจากอิทธิพลความแปรปรวนของสภาพแวดล้อมมากที่สุด ซึ่งมากกว่าความแปรปรวนจากพันธุกรรม และความแปรปรวนจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุกรรมกับสภาพแวดล้อม สายพันธุ์ CMR61-52-134 มีศักยภาพในการให้ผลผลิตหัวสดและผลผลิตแป้งสูงสุด คือ 5,868 และ 1,359 กก./ไร่ ตามลำดับ และให้เปอร์เซ็นต์แป้งสูง คือ 22.4% เมื่อประเมินเสถียรภาพของพันธุ์โดยพิจารณาจาก GGE biplot-genotype พบว่า สายพันธุ์ CMR61-52-134 มีเสถียรภาพของผลผลิตหัวสด เปอร์เซ็นต์แป้ง และผลผลิตแป้งสูง จึงเลือกเป็นสายพันธุ์ดีเด่น

คำขอบคุณ

ขอขอบคุณนางทัศนีย์ บุตรทอง ศูนย์วิจัยพืชไร่นครสวรรค์ นางสาวกาญจนา กิระศักดิ์ ศูนย์วิจัยพืชไร่นอนแก่น นางสาววิไลรัตน์ แบนแก้ว ศูนย์วิจัยพืชไร่ชัยนาท นางสาวอรอนงค์ วรรณวงษ์ ศูนย์วิจัยพืชไร่อุบลราชธานี นางสาวเพชรลดา นวลताल ศูนย์วิจัยและพัฒนาการเกษตรเพชรบูรณ์ นางสาววชิราภรณ์ เปี่ยมบำรุง ศูนย์วิจัยและพัฒนาการเกษตรเลย นางสาวณเอร์ชด์พัชร เขียววิชัย ศูนย์วิจัยและพัฒนาเมล็ดพันธุ์พืชลพบุรี นายวสันต์ วรรณจักร ศูนย์วิจัยและพัฒนาการเกษตรกาฬสินธุ์ และนางสาวกุลลาภทิพย์ ขาหอมชื่น ศูนย์วิจัยและพัฒนาการเกษตรร้อยเอ็ด ที่ช่วยปฏิบัติงานและเก็บข้อมูลแปลงทดลองในพื้นที่

เอกสารอ้างอิง

- กรมวิชาการเกษตร. 2553. คำแนะนำการใช้ปุ๋ยกับพืชเศรษฐกิจ. กลุ่มวิจัยปฐพีวิทยา สำนักวิจัยพัฒนาปัจจัยการผลิตทางการเกษตร, กรุงเทพฯ. 122 หน้า.
- ปิยะ กิตติภาดากุล เจริญศักดิ์ โรจนฤทธิ์พิเชษฐ์ วิจารย์ วิชชุกิจ ประภาส ช่างเหล็ก ชเนษฏ์ ม้าลำพอง และ เกรียงไกร แก้วตระกูลพงษ์. 2547. เสถียรภาพของพันธุ์ มันสำปะหลังไทย. หน้า 191-201. ใน: เรื่องเต็มการประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 42: สาขาพืช 3-6 ก.พ. 2547 กรุงเทพฯ.
- รุ่งรวี บุญทั้ง ทศนีย์ บุตรทอง กาญจนา กิระศักดิ์ มลลิสิตธิษา เสาวรี บำรุง ฉัตรชีวิน ดาวใหญ่ กานต์รวี แสงทอง สุวลักษณ์ ศันสนีย์ กุลชาติ นาคจันทิกศิริลักษณ์ ล้านแก้ว ภาณุวัฒน์ มุลจันทะ นราชัย โพธิ์สาร และวัลลีย์ อมรพล. 2566. การปรับปรุงพันธุ์ มันสำปะหลังเพื่อผลผลิตและแป้งสูง: การเปรียบเทียบในท้องถิ่น (ลูกผสมปี 2561). หน้า 48-73. ใน: การประชุมรายงานผลงานวิจัย ปี 2565 ศูนย์วิจัยพืชไร่ระยอง. 25-26 ก.ค. 2566 ณ ห้องประชุมศูนย์วิจัยพืชไร่ระยอง.
- สุวลักษณ์ อมะวัลย์ สมศักดิ์ อธิพงษ์ และวันปิติ บัวขาว. 2561. การปรับปรุงพันธุ์มันสำปะหลังเพื่อผลผลิตและแป้งสูง: ผสมพันธุ์มันสำปะหลัง (ลูกผสมชุดปี 2561). แหล่งข้อมูล: www.doa.go.th/plan/wp-content/uploads/2021/05/1601.4-การผสมพันธุ์เพื่อผลผลิตและแป้งสูง-ลูกผสมชุดปี-61.pdf. สืบค้น 10 มิถุนายน 2568.
- Akinwale, M.G., B.O. Akinyele, A.C. Odiyi and A.G.O. Dixon. 2011. Genotype x environment interaction and yield performance of 43 improved cassava (*Manihot esculenta* Crantz) genotypes at three agro-climatic zones in Nigeria. *British Biotechnology Journal*. 1(3): 68-84.
- Amelework, A.B., M.W. Bairu, R. Marx, M. Laing and S.L. Venter. 2023. Genotype x environment interaction and stability analysis of selected cassava cultivars in South Africa. *Plants*. 12(13): 2490.
- Ceballos, H., C.A. Iglesias, J.C. Pérez and A.G. Dixon. 2004. Cassava breeding: Opportunities and challenges. *Plant Molecular Biology*. 56(4): 503-516.
- Chatwachirawong, P., O. Boonseng and A. Summatraya. 1999. The effect of genotypes and GE interaction on starch content of cassava. *Agriculture and Natural Resources*. 33(2): 171-177.
- Eberhart, S.A. and W.A. Russel. 1966. Stability parameters for comparing varieties. *Crop Science*. 6(1): 36-40.
- Egesi, C.N., P. Ilona, F.O. Ogbe, M. Akoroda and A. Dixon. 2007. Genetic variation and genotype x environment interaction for yield and other agronomic traits in cassava in Nigeria. *Agronomy Journal*. 99(4): 1137-1142.
- Filho, J.S.S., M.D.S. Campos and E.J.D. Oliveira. 2024. Stability and genetic parameters for cassava yield attributes in the tropical humid region of Brazil. *Euphytica*. 220(8): 127.
- Finlay, K.W. and G.N. Wilkinson. 1963. The analysis of adaptation in a plant-breeding program. *Australian Journal of Agricultural Research*. 14(6): 742-754.
- Fox, P.N., J. Crossa and I. Romagosa. 1997. Multi-environment testing and genotype x environment interaction. pp. 117-138. In: R.A. Kempton, P.N. Fox and M. Cerezo (eds). *Statistical Methods for Plant Variety Evaluation*. Chapman & Hall, London, UK.
- Gauch, H.G. and R.W. Zobel. 1997. Identifying mega-environments and targeting genotypes. *Crop Science*. 37(2): 311-326.
- Khan, M.M.H., M.Y. Rafii, S.I. Ramlee, M. Jusoh and M. Al Mamun. 2021. AMMI and GGE biplot analysis for yield performance and stability assessment of selected Bambara groundnut (*Vigna subterranea* L. Verdc.) genotypes under the multi-environmental trials (METs). *Scientific Reports*. 11(1): 22791.

- Koundinya, A.V.V., B.R. Ajeesh, V. Hegde, M.N. Sheela, C. Mohan and K.I. Asha. 2021. Genetic parameters, stability and selection of cassava genotypes between rainy and water stress conditions using AMMI, WAAS, BLUP and MTSI. *Scientia Horticulturae*. 281: 109949.
- Mullualem, D., A. Tsega, T. Mengie, D. Fentie, Z. Kassa, A. Fasil, D. Wondaferew, T.A. Gelaw and T. Astatkie. 2024. Genotype-by-environment interaction and stability analysis of grain yield of bread wheat (*Triticum aestivum* L.) genotypes using AMMI and GGE biplot analyses. *Heliyon*. 10(12): e32918.
- Ntawuruhunga, P., G. Ssemakula, H. Ojulung, A. Bua, P. Ragama, C. Kanobe and J. Whyte. 2006. Evaluation of advanced cassava genotypes in Uganda. *African Crop Science Journal*. 14(1): 17-25.
- Peprah, B.B., E. Parkes, J. Manu-Aduening, P. Kulakow, A. van Biljon and M. Labuschagne. 2020. Genetic variability, stability and heritability for quality and yield characteristics in provitamin A cassava varieties. *Euphytica*. 216: 31.
- Uchendu, K., D.N. Njoku, U.N. Ikeogu, D. Dzidzienyo, P. Tongoona, S. Offei and C. Egesi. 2022. Genotype-by-environment interaction and stability of root mealiness and other organoleptic properties of boiled cassava roots. *Scientific Reports*. 12: 20909.
- Yan, W. 2001. GGEbiplot-A Windows application for graphical analysis of multi-environment trial data and other types of two-way data. *Agronomy Journal*. 93(5): 1111-1118.
- Yan, W. and I. Rajcan. 2002. Biplot analysis of test sites and trait relations of soybean in Ontario. *Crop Science*. 42: 11-20.
- Yan, W. and M.S. Kang. 2003. *GGE Biplot Analysis: A Graphical Tool for Breeders, Geneticists, and Agronomists*. CRC Press, Boca Raton, Florida, USA. 267 p.
- Yan, W., L.A. Hunt, Q. Sheng and Z. Szlavnic. 2000. Cultivar evaluation and mega-environment investigation based on the GGE biplot. *Crop Science*. 40(3): 597-605.
- Yan, W., M.S. Kang, B. Ma, S. Woods and P.L. Cornelius. 2007. GGE biplot vs. AMMI analysis of genotype-by-environment data. *Crop Science*. 47(2): 643-653.

การประเมินผลผลิตและเนื้อสัมผัสของมันสำปะหลังบริโภครวมปี 2560

Evaluation of Yield and Texture Quality in 2017 Edible Cassava Hybrids

กุสุมา รอดแ้วพาล^{1*} กาญจนา กิระศักดิ์^{2/} ทนุธรรม บุญฉิม^{2/} ศยามล แก้วบรรจง^{3/} ฉัตรชีวิน ดาวใหญ่^{4/}
ทิพย์ตรีณี สิทธินาม^{5/} เอมร์ชต์พัชร เขียววิชัย^{6/} ชฎาพร อินเปลี่ยน^{1/} สุวลักษณ์ ศันสนีย์^{1/} ธนาวดี คำชู^{1/}

Kusuma Rodpeawpan^{1*} Kanjana Kirasak^{2/} Thanutham Boonchim^{2/}

Sayamol Kaewbunjong^{3/} Chatchewin Dawyai^{4/} Tipdarunee Sittinam^{5/} Choeratphatchra Khiewichai^{6/}

Chadaporn Inplean^{1/} Suwaluk Sansanee^{1/} Tanavadee Kumchoo^{1/}

Received 1 May 2025/Revised 19 Jun. 2025/Accepted 19 Jun. 2025

ABSTRACT

Evaluating the yield performance of new cassava varieties under diverse environmental conditions is a crucial step in identifying promising varieties for dissemination to farmers. The objective of this research was to evaluate the yield potential and textural quality of 2017 edible cassava hybrids across multiple environments. A randomized complete block design in three replications was conducted from May 2022 to May 2023 across six environments—Rayong, Khon Kaen, Sukhothai, Lop Buri, Kanchanaburi, and Songkhla provinces—using four edible cassava hybrids (CMRE60-03-02, CMRE60-03-13, OMRE60-01-02, and OMRE60-02-12) and two check varieties (Hanatee and DOA Rayong2). The results from combined analysis of variance indicated that the OMRE60-01-02, CMRE60-03-13, and CMRE60-03-02 lines had similar average fresh root yield of 4,794, 4,538 and 4,207 kg/rai, respectively. These three varieties showed significantly higher average fresh root yield than the two check varieties, being 70, 61 and 49% higher than Hanatee, and 57, 48 and 38% higher than DOA Rayong2, respectively. The GGE biplot analysis indicated that the OMRE60-01-02 line had the highest average fresh root yield and high yield

^{1/} ศูนย์วิจัยพืชไร่ระยอง อ.เมือง จ.ระยอง 21150

^{1/} Rayong Field Crops Research Center, Mueang, Rayong 21150, Thailand

^{2/} ศูนย์วิจัยพืชไร่ขอนแก่น อ.เมือง จ.ขอนแก่น 40000

^{2/} Khon Kaen Field Crops Research Center, Mueang, Khon Kaen 40000, Thailand

^{3/} ศูนย์วิจัยและพัฒนาการเกษตรนราธิวาส อ.สุโหงปาดี จ.นราธิวาส 96140

^{3/} Narathiwat Agriculture Research and Development Center, Su-ngai Padi, Narathiwat 96140, Thailand

^{4/} ศูนย์วิจัยและพัฒนาการเกษตรสุโขทัย อ.ศรีสำโรง จ.สุโขทัย 64120

^{4/} Sukhothai Agriculture Research and Development Center, Si Samrong, Sukhothai 64120, Thailand

^{5/} ศูนย์วิจัยพืชสวนเลย อ.ภูเรือ จ.เลย 42160

^{5/} Loei Horticultural Research Center, Phu Ruea, Loei 42160, Thailand

^{6/} ศูนย์วิจัยและพัฒนาเมล็ดพันธุ์พืชลพบุรี อ.เมือง จ.ลพบุรี 15210

^{6/} Lop Buri Seed Research and Development Center, Mueang, Lop Buri 15210, Thailand

* Corresponding author: kusuma357@gmail.com

stability, while the CMRE60-03-13 line exhibited lower yield stability but no significant difference in average fresh root yield with the OMRE60-01-02 line. Meanwhile, Hanatee exhibited the highest yield stability but the lowest yield. Steamed cassava from the CMRE60-03-13 line had a higher textural quality than that from Hanatee and OMRE60-01-02. Therefore, the hybrid cassava line CMRE60-03-13 is suitable for recommendation to farmers due to its high yield and desirable textural quality when steamed.

Keywords: edible cassava; yield performance; steamed cassava; texture; GGE analysis

บทคัดย่อ

การทดสอบผลผลิตมันสำปะหลังพันธุ์ใหม่ในหลายสภาพแวดล้อมเป็นขั้นตอนสำคัญในการคัดเลือกพันธุ์ดีเพื่อแนะนำเกษตรกร วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อประเมินศักยภาพการให้ผลผลิตและคุณภาพเนื้อสัมผัสของมันสำปะหลังบริโภคผสมปี 2560 ในหลายสภาพแวดล้อม วางแผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ 3 ซ้ำ ระหว่าง เดือน พ.ค. 2565-พ.ค. 2566 ใน 6 สภาพแวดล้อม ได้แก่ จ. ระยอง ขอนแก่น สุโขทัย ลพบุรี กาญจนบุรี และสงขลา ประกอบด้วยมันสำปะหลังบริโภคผสม 4 สายพันธุ์ คือ CMRE60-03-02 CMRE60-03-13 OMRE60-01-02 และ OMRE60-02-12 และพันธุ์เปรียบเทียบ 2 พันธุ์ คือ พันธุ์ห่านาฮี และ กวก. ระยอง2 ผลการวิเคราะห์ความแปรปรวนรวม พบว่าสายพันธุ์ OMRE60-01-02 CMRE60-03-13 และ CMRE60-03-02 ให้ผลผลิตหัวสดไม่แตกต่างกันเฉลี่ย 4,794 4,538 และ 4,207 กก./ไร่ ตามลำดับ

ทั้ง 3 สายพันธุ์นี้ ให้ผลผลิตหัวสดสูงกว่าพันธุ์ห่านาฮี และ กวก. ระยอง2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยให้ผลผลิตหัวสดสูงกว่าพันธุ์ห่านาฮี 70 61 และ 49% ตามลำดับ และสูงกว่า กวก. ระยอง2 57 48 และ 38% ตามลำดับ เมื่อวิเคราะห์ GGE biplot พบว่ามันสำปะหลังสายพันธุ์ OMRE60-01-02 ให้ผลผลิตหัวสดเฉลี่ยสูงสุด และมีเสถียรภาพการให้ผลผลิตสูง ส่วนสายพันธุ์ CMRE60-03-13 ให้ผลผลิตหัวสดเฉลี่ยสูงไม่แตกต่างจากสายพันธุ์ OMRE60-01-02 แต่มีเสถียรภาพการให้ผลผลิตต่ำกว่า ในขณะที่พันธุ์ห่านาฮีมีเสถียรภาพการให้ผลผลิตสูงสุด แต่ให้ผลผลิตต่ำที่สุด มันสำปะหลังนี้ที่ทำจากสายพันธุ์ CMRE60-03-13 มีคุณภาพด้านเนื้อสัมผัสสูงกว่าพันธุ์ห่านาฮีและ OMRE60-01-02 ดังนั้น มันสำปะหลังลูกผสมสายพันธุ์ CMRE60-03-13 จึงเหมาะสำหรับแนะนำเกษตรกร เนื่องจากให้ผลผลิตหัวสดและคุณภาพเนื้อสัมผัสหลังนี้สูง

คำสำคัญ: มันสำปะหลังบริโภค; การประเมินผลผลิต; มันสำปะหลังนี้; เนื้อสัมผัส; การวิเคราะห์ GGE

บทนำ

มันสำปะหลังเป็นพืชอาหารที่สำคัญเป็นอันดับ 5 ของโลก รองจากข้าวสาลี ข้าวโพด ข้าว และมันฝรั่ง (ชัยวัช, 2566) มันสำปะหลังมีสารประกอบไซยาโนเจนติกกลูโคไซด์ (cyanogenetic glucosides) ที่จะเปลี่ยนเป็นกรดไฮโดรไซยานิกหรือไซยาไนด์ ซึ่งเป็นพิษ พบมากที่เปลือกหัวมันสำปะหลัง และเนื้อหัวมันสำปะหลังชนิดหวานจะมีปริมาณไซยาไนด์ต่ำ และการแปรรูปอย่างถูกวิธีจะช่วยลดปริมาณไซยาไนด์ได้ (สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์, 2558) มันสำปะหลังชนิดหวานเป็นมันสำปะหลังที่มีปริมาณไซยาไนด์ต่ำ ทำให้มีรสไม่ขม มีทั้งชนิดเนื้อร่วน นุ่ม และเนื้อแน่นเหนียว นิยมนำมารับประทาน

โดยการต้ม นึ่ง ย่าง อบ และเชื่อม หรือใช้เป็นวัตถุดิบทดแทนแป้งสาลีในผลิตภัณฑ์เบเกอรี่ต่าง ๆ หรือเป็นทางเลือกสำหรับผู้แพ้อาหาร (จิณฉัตร, 2552) เกษตรกรปลูกมันสำปะหลังบริเวณภาคกระจายอยู่ใน จ.กาญจนบุรี กำแพงเพชร ขอนแก่น กาฬสินธุ์ อุบลราชธานี นครราชสีมา ลำปาง และนครสวรรค์ รวมพื้นที่กว่า 3,200 ไร่ ผลผลิตส่วนใหญ่จำหน่ายในตลาดสดราคา 15-25 บาท/กก. ขณะที่บางส่วนแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ที่มีมูลค่าเพิ่ม เช่น มันแผ่นทอดกรอบ เฟรนช์ฟรายส์มันสำปะหลัง บราวน์ มันสำปะหลังอบกรอบ และวอฟเฟิล โดยกลุ่มวิสาหกิจแปรรูปมันสำปะหลังใน จ.ระยอง นครสวรรค์ และ นครราชสีมา ซึ่งช่วยสร้างรายได้เสริมและเพิ่มมูลค่าให้แก่เกษตรกร (นิรนาม, 2561; อาทิตย์, 2561)

มันสำปะหลังชนิดหวานที่เหมาะสมสำหรับการบริโภค ได้แก่ พันธุ์ห่านาที่ ซึ่งเป็นพันธุ์พื้นเมืองที่ปลูกมานานในประเทศ มีลักษณะเด่นคือ มีเนื้ออ่อนนุ่มเหมาะสำหรับการแปรรูปเป็นขนม เช่น มันเชื่อมหรือมันย่าง มีปริมาณกรดไฮโดรไซยานิกในหัวต่ำต้านทานต่อโรคใบไหม้ ให้ผลผลิตสูงในสภาพร่องสวน 4-5 ตัน/ไร่ อย่างไรก็ตาม ในสภาพไร่พันธุ์นี้ให้ผลผลิตหัวสดค่อนข้างต่ำ 1.5-3.0 ตัน/ไร่ ปี พ.ศ. 2527 กรมวิชาการเกษตรได้รับรองพันธุ์มันสำปะหลังบริโภคพันธุ์แรก คือ พันธุ์ กวก. ระยอง 2 ซึ่งมีลักษณะเด่น คือ เนื้อแน่นเหนียว รสหวาน สีเหลือง มีปริมาณแคโรทีนสูงเหมาะสำหรับการแปรรูปเป็นมันแผ่นทอดกรอบ อีกทั้งยังมีปริมาณกรดไฮโดรไซยานิกในหัวต่ำ และให้ผลผลิตหัวสดในสภาพไร่ 2.8-3.5 ตัน/ไร่ (จิณฉัตร, 2552) มีการดำเนินการพัฒนาและปรับปรุงพันธุ์มันสำปะหลังบริโภคอย่างต่อเนื่อง โดยในปี พ.ศ. 2560 ได้สร้างมันสำปะหลังลูกผสมปี 2560 (สุวลักษณ์และคณะ, 2560ก) ผ่านการคัดเลือกในขั้นตอนการคัดเลือกปีที่ 1 (สุวลักษณ์และคณะ, 2560ข) และปีที่ 2 (กุสุมาและ

คณะ, 2561) ประเมินผลผลิตในขั้นตอนเปรียบเทียบเบื้องต้น (กุสุมาและคณะ, 2563ก) เปรียบเทียบมาตรฐาน (กุสุมาและคณะ, 2563ข) และเปรียบเทียบในท้องถิ่น สามารถคัดเลือกมันสำปะหลังสายพันธุ์ก้าวหน้าที่มีคุณสมบัติเด่น คือ ให้ผลผลิตหัวสดสูง มีรสชาติและเนื้อสัมผัสของมันสำปะหลังนึ่งและเฟรนช์ฟรายส์มันสำปะหลังใกล้เคียงกับพันธุ์ห่านาที่ 4 สายพันธุ์ ได้แก่ CMRE60-03-02 CMRE60-03-13 OMRE60-01-02 และ OMRE60-02-12 (สุวลักษณ์, 2564; กุสุมาและคณะ, 2567) และต้องนำไปประเมินศักยภาพการให้ผลผลิตในขั้นตอนการเปรียบเทียบในไร่เกษตรกร ซึ่งเป็นการทดสอบพันธุ์ในสภาพแวดล้อมที่หลากหลายเพื่อศึกษาความสามารถในการปรับตัวของแต่ละสายพันธุ์

การให้ผลผลิตมันสำปะหลังในแต่ละสภาพแวดล้อมอาจแตกต่างกันไปเนื่องจากปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุกรรมกับสภาพแวดล้อม ซึ่งส่งผลกระทบต่อเสถียรภาพของพันธุ์ (Eberhart and Russell, 1966) ลักษณะที่ปรากฏหรือฟีโนไทป์ (phenotype, P) เป็นผลมาจากอิทธิพลร่วมของจีโนไทป์ (genotype, G) สภาพแวดล้อม (environment, E) และปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุกรรมกับสภาพแวดล้อม (genotype by environment interaction, GE) (ชูศักดิ์, 2562) การวิเคราะห์ข้อมูลจากการทดสอบหลายสภาพแวดล้อมสามารถทำได้หลายวิธี หนึ่งในวิธีที่มีประสิทธิภาพสูงคือ การวิเคราะห์แบบ GGE biplot ซึ่งช่วยในการคัดเลือกลูกผสมมันสำปะหลังบริโภคสายพันธุ์ใหม่ที่ให้ผลผลิตหัวสดสูง และมีเสถียรภาพการให้ผลผลิตดี (Noerwijati et al., 2014; Mtunguja et al., 2016; Lawal et. al., 2021) GGE biplot ใช้ข้อมูลอิทธิพลหลักของพันธุกรรมกับปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุกรรมกับสภาพแวดล้อม ซึ่งเป็นส่วนหนึ่งของความแปรปรวนจากการทดสอบหลายสภาพแวดล้อม

สามารถใช้ประเมินพันธุกรรมในอุดมคติ (ideal genotype) วิเคราะห์เสถียรภาพการให้ผลผลิต รวมถึงเลือกสภาพแวดล้อมที่เหมาะสมต่อพันธุ์ โดยแสดงผลในรูปแบบกราฟทำให้การแปลผลง่ายขึ้น (ชูศักดิ์, 2562; Yan et al., 2000) มีหลายงานวิจัย พบปฏิสัมพันธ์ระหว่างพันธุกรรมกับสภาพแวดล้อมใน ผลผลิตและลักษณะต่าง ๆ ของมันสำปะหลัง (Noerwijati et al., 2014; Mtunguja et al., 2016) ดังนั้น งานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อประเมิน ศักยภาพการให้ผลผลิตและคุณภาพเนื้อสัมผัส ของมันสำปะหลังบริโภคลูกผสมปี 2560 ในหลาย สภาพแวดล้อม เพื่อใช้เป็นข้อมูลประกอบการ คัดเลือกพันธุ์มันสำปะหลังบริโภคนธุ์ที่เหมาะสมแก่ การบริโภคและให้ผลผลิตสูง

อุปกรณ์และวิธีการ

1. พันธุ์/สายพันธุ์มันสำปะหลังบริโภคลูกผสมและสถานที่ ทดสอบ

มันสำปะหลังบริโภคลูกผสม 4 สายพันธุ์ ได้แก่ CMRE60-03-02 CMRE60-03-13 OMRE60-01-02 และ OMRE60-02-12 ใช้พันธุ์ห่านาที่และกวก. ระยะของ 2 เป็นพันธุ์เปรียบเทียบ ทดสอบ 6 สภาพแวดล้อม ได้แก่ อ.เมือง จ.ระยอง (RY) อ.เมือง จ.ขอนแก่น (KK) อ.ศรีสำโรง จ.สุโขทัย (STI) อ.เมือง จ.ลพบุรี (LRI) อ.เมือง จ.กาญจนบุรี (KRI) และ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา (SKA)

2. การปลูกมันสำปะหลังและการดูแลรักษา

วางแผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ 4 ซ้ำ ขนาดแปลงย่อย 5x8 ม. ระยะปลูก 100x80 ซม. ปลูก 5 แถว ๆ ละ 10 ต้น ประมาณ พ.ค.-มิ.ย. 2565 ปักท่อนพันธุ์แบบตั้งตรง เก็บเกี่ยว 3 แถวกลาง พื้นที่ เก็บเกี่ยว 3x6.4 ม. กำจัดวัชพืชโดยใช้แรงงานคนและ สารกำจัดวัชพืช ใส่ปุ๋ยเคมี 15-7-18 อัตรา 100 กก./ไร่

หลังปลูก 1 เดือนโดยขุดหลุมกึ่งกลางระหว่างต้นแล้ว ใส่ปุ๋ยจากนั้นพรวนดินกลบ เก็บเกี่ยวผลผลิตเมื่ออายุ ครบ 10-12 เดือน

3. การวิเคราะห์คุณภาพของมันสำปะหลัง

ลักษณะคุณภาพของมันสำปะหลังควบคุม ด้วยพันธุกรรมเป็นหลัก (Mtunguja et al., 2016; Ogbonna et al., 2021) จึงเลือกนำหัวมันสำปะหลัง สดจากแปลงทดลองระยะยาวมาวิเคราะห์

3.1 คุณภาพด้านเนื้อสัมผัสของมันสำปะหลัง นี้ด้วยเครื่องวัดเนื้อสัมผัส (texture analyzer) ยี่ห้อ Stable Micro Systems รุ่น TA. XT PlusC คุณภาพ ด้านเนื้อสัมผัสของมันสำปะหลังนี้ ได้แก่ ความแข็ง (hardness) และความเหนียว (adhesiveness) ใช้หัว P/2 (2 mm diameter cylinder probe) โดยใช้ pre-test speed test speed และ post-test speed ที่ความเร็ว 1 2 และ 10 มม./วินาที ตามลำดับ และ distance 15 มม. หาค่าแรงสูงสุด ค่าเฉลี่ยในแต่ละ ตัวอย่าง ๆ ละ 9 ชิ้น

3.2 วิเคราะห์ปริมาณไซยาไนด์ โดยวิธี rapid evaluation ของ Williams and Edwards (1980)

3.3 คุณสมบัติทางเคมี ได้แก่ ความชื้น โปรตีน ไขมัน แครโบไฮเดรต พลังงานทั้งหมด และพลังงาน จากไขมัน ทดสอบโดย ศูนย์บริการประกันคุณภาพ อาหาร สถาบันค้นคว้าและพัฒนาผลิตภัณฑ์อาหาร มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์

4. การวิเคราะห์ผลผลิตหัวสดและองค์ประกอบ ผลผลิต

4.1 ผลผลิตหัวสด ซึ่งน้ำหนักหัวสดในพื้นที่ เก็บเกี่ยว หลังจากขุดและสับหัวมันสำปะหลังออก จากเหง้าแล้วคำนวณผลผลิตหัวสดเป็นหน่วย กก./ไร่

4.2 ปริมาณแป้งในหัวสด โดยสุ่มหัวสดมัน สำปะหลังในพื้นที่เก็บเกี่ยว สับเป็นท่อนยาวประมาณ

7 ซม. ใช้ตัวอย่างหัวสด 5 กก./แปลงย่อย วัดด้วยเครื่องชั่ง Reimann scale

4.3 ดัชนีเก็บเกี่ยว ชั่งน้ำหนักสดของต้น ใบ เหน้ง้า และหัวสด ในพื้นที่เก็บเกี่ยว คำนวณดัชนีเก็บเกี่ยว = น้ำหนักหัวสด/(น้ำหนักต้น ใบ เหน้ง้า+น้ำหนักหัวสด)

วิเคราะห์ความแปรปรวน (analysis of variance) และความแปรปรวนรวม (combined analysis of variance) และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยโดยวิธี Duncan's new multiple range test (DMRT) และวิเคราะห์เสถียรภาพของพันธุ์ด้วยวิธี GGE biplot ตามวิธีของชูศักดิ์ (2562)

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. ลักษณะเนื้อสัมผัสของมันสำปะหลัง

ลักษณะเนื้อสัมผัสในอาหารเป็นผลประกอบกันของคุณสมบัติทางเคมี และกายภาพ ซึ่งเป็นผลมาจากโครงสร้างธรรมชาติเริ่มต้นของสาร ดังนั้นลักษณะเนื้อสัมผัสของอาหารจึงมีความจำเป็น และสำคัญอย่างมากต่อการยอมรับของผู้บริโภค การวิเคราะห์เนื้อสัมผัสของมันสำปะหลังหนึ่งจากมันสำปะหลังทั้ง 6 พันธุ์/สายพันธุ์ (Figure 1) เป็นการทดสอบที่เลียนแบบการเคี้ยวของมนุษย์ (imitative measurement) ค่าเนื้อสัมผัสแสดงความสัมพันธ์ระหว่างแรงที่กระทำกับตัวอย่างต่อเวลา ผ่านการกดของหัวกด 2 ครั้ง ค่าความแข็งของตัวอย่าง คือ แรงที่ใช้ในการทำให้ตัวอย่างเสียรูป (คุณภาพทางกายภาพ) หรือแรงที่ใช้ในการกดตัวอย่างระหว่างกรามเพื่อเปลี่ยนรูปร่างตัวอย่าง (คุณภาพทางประสาทสัมผัส) และค่าความสามารถในการเกาะติดผิววัสดุหรือความเหนียว คือ งานที่ใช้ในการเอาชนะแรงระหว่างพื้นผิวของตัวอย่างกับพื้นผิวของวัสดุอื่นที่ตัวอย่างสัมผัสอยู่ (คุณภาพทางกายภาพ) หรือ แรงที่ใช้ในการเคลื่อนย้ายตัวอย่างที่ติดอยู่ในปาก (โดยปกติ คือ เพดานปาก) ใน

ระหว่างกระบวนการเคี้ยว (คุณภาพทางประสาทสัมผัส) (อิฎญุภรณ์, 2550) พบว่า พันธุ์/สายพันธุ์ที่นำมาทดลองมีความแข็งไม่แตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยสายพันธุ์ OMRE60-02-12 มีความแข็งน้อยที่สุด 486.5 ก. รองลงมา คือ CMRE60-03-13 มีค่าความแข็ง 515.2 ก. โดยทั้ง 2 สายพันธุ์มีความแข็งใกล้เคียงกับพันธุ์ห่านาที่ Maieves et al. (2012) รายงานว่า ค่าความแข็งของหัวมันสำปะหลังสุกขึ้นอยู่กับพันธุ์มันสำปะหลัง ด้านความเหนียว พบว่า พันธุ์/สายพันธุ์ที่นำมาทดลองมีความเหนียวแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ สายพันธุ์ CMRE60-03-13 มีความเหนียวน้อยที่สุด 3,658 ก.วินาที ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญกับ ห่านาที่ และ OMRE60-02-12 ที่มีความเหนียว 3,864 และ 4,063 ก.วินาที ตามลำดับ (Table 1) นงนุช (2006) รายงานว่า หัวมันสำปะหลังที่มีไซยาไนด์ต่ำเมื่อผ่านการต้มสุกจะได้เนื้อสัมผัสที่แตกต่างกันสามารถจำแนกได้ 3 กลุ่ม คือ กลุ่มที่มีลักษณะเนื้อสัมผัสร่วนซุย (mealy) กลุ่มที่มีลักษณะเนื้อสัมผัสแบบแน่นเนื้อ (firm) และกลุ่มที่มีลักษณะแบบผสมระหว่างร่วนซุยและแน่นเนื้อ (mealy and firm) โดยมันสำปะหลังพันธุ์ห่านาที่เป็นพันธุ์ที่มีลักษณะเนื้อสัมผัสแบบร่วนซุย และเมื่อศึกษาในระดับเซลล์ของหัวมันสำปะหลัง พบว่า ทุกสายพันธุ์มีลักษณะรูปร่างเหมือนกัน คือ เป็นรูปสี่เหลี่ยมถึงหลายเหลี่ยม โดยที่หัวมันสดของสายพันธุ์ที่มีเนื้อสัมผัสแบบร่วนซุยจะมีช่องว่างระหว่างเซลล์มากกว่าสายพันธุ์ที่มีเนื้อสัมผัสแบบแน่นเนื้อ และเมื่อผ่านการต้มสุก พบว่า พันธุ์ห่านาที่ซึ่งมีเนื้อร่วนซุยจะเกิดลักษณะการแยกระหว่างเซลล์มากกว่าในเซลล์ของสายพันธุ์ที่ให้เนื้อสัมผัสแบบแน่นเนื้อ ดังนั้น คุณภาพเนื้อสัมผัสของมันสำปะหลังขึ้นอยู่กับพันธุ์ เวลาเก็บเกี่ยว และสภาพแวดล้อมในตลอดช่วงฤดูการเจริญเติบโต (Eggleston and Asiedu, 1994; Ngeve, 2003)

Table 1 HCN, hardness and adhesiveness of cassava steam from six cassava lines/varieties

Lines/varieties	HCN (ppm)	Steamed cassava	
		Hardness (g)	Adhesiveness (g.sec)
CMRE60-03-02	400	704.2	5,712 c
CMRE60-03-13	300	515.2	3,658 a
OMRE60-01-02	350	745.5	5,441 c
OMRE60-02-12	250	486.5	4,063 ab
DOA Rayong2	350	870.0	4,855 bc
Hanatee	125	553.7	3,864 ab
Mean	296	645.8	4,599
CV (%)	50.4	34.1	14.7

Means in the same column followed by a common type of letter are not significantly different at the 5% level by DMRT

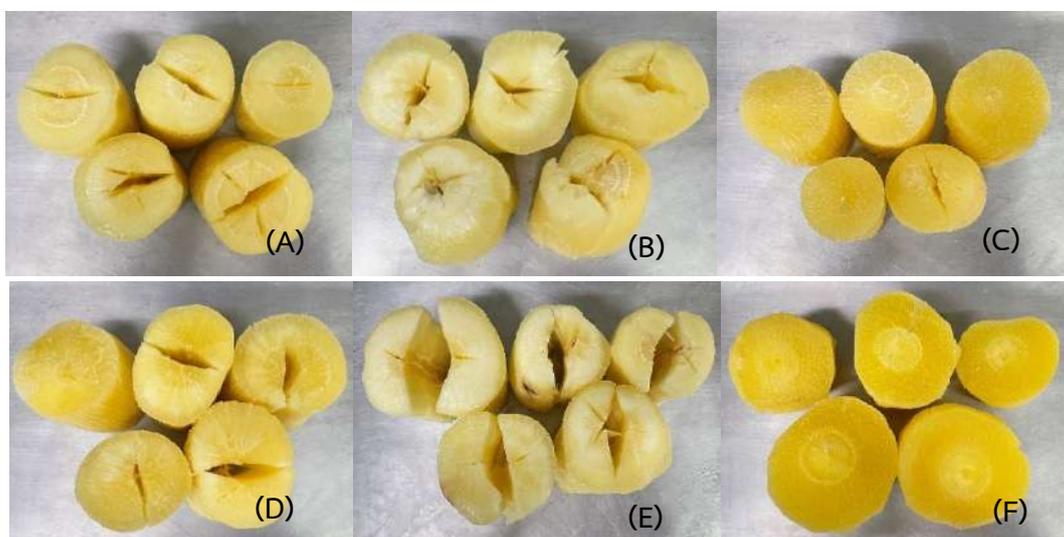


Figure 1 Six steamed cassava lines/varieties: (A) CMRE60-03-02; (B) CMRE60-03-13; (C) OMRE60-01-02; (D) OMRE60-02-12; (E) Hanatee; (F) DOA Rayong2

2. ปริมาณไซยาไนด์

Sundaresan et al. (1987) จำแนกมันสำปะหลังตามปริมาณไซยาไนด์ในหัวสด เป็น 3 กลุ่ม ได้แก่ (1) non-bitter cassava มีปริมาณไซยาไนด์น้อยกว่า 100 มก./กก.หัวสด (2) bitter cassava มีปริมาณไซยาไนด์ 100-450 มก./กก. หัวสด และ (3) very bitter cassava มีปริมาณไซยาไนด์มากกว่า 450 มก./กก.หัวสด จากการศึกษาพบว่า ทั้ง 6 พันธุ์/สายพันธุ์มีปริมาณไซยาไนด์ไม่แตกต่างกันทางสถิติ 125-400 ppm โดยสายพันธุ์ CMRE60-03-02 มีปริมาณไซยาไนด์สูงสุด 400 ppm ในขณะที่พันธุ์ห่านาที่มีปริมาณไซยาไนด์น้อยที่สุด

125 ppm (Table 1) แม้ทั้ง 6 พันธุ์/สายพันธุ์ จัดอยู่ในกลุ่ม bitter cassava แต่หากนำไปแปรรูป หรือ ประกอบอาหารอย่างถูกวิธี จะสามารถลดปริมาณไซยาไนด์ได้ ปริมาณไซยาไนด์จะแตกต่างกันไปตามพันธุ์ อายุ สภาพแวดล้อม ปุ๋ย และวิธีการวิเคราะห์ (จิณฉกร์, 2552; โอภาษ, 2563; Ndubuisi et al., 2018) ซึ่งสอดคล้องกับ Mtunguja et al. (2016) ที่รายงานว่า พันธุ์มันสำปะหลังมีผลต่อปริมาณไซยาไนด์มากกว่าสภาพแวดล้อม และ Ogbonna et al. (2021) ที่พบว่า cyanogenic potential มีค่าอัตราพันธุกรรมสูง ($H^2 = 0.82$)

3. องค์ประกอบทางเคมี

องค์ประกอบทางเคมีของมันสำปะหลังบริโภาค ทั้ง 6 พันธุ์/สายพันธุ์ พบว่า มีความชื้น โปรตีน ไขมัน แอซคาร์โบไฮเดรต พลังงานทั้งหมด และพลังงานจากไขมัน ใกล้เคียงกัน โดยมันสำปะหลังบริโภาค 4 สายพันธุ์ ได้แก่

CMRE60-03-02 CMRE60-03-13 OMRE60-01-02 OMRE60-02-12 มีปริมาณโปรตีน 0.33 0.32 0.41 และ 0.70% ตามลำดับ สูงกว่าพันธุ์เปรียบเทียบและทั้ง 4 สายพันธุ์มีปริมาณไขมัน 0.36 0.37 0.43 และ 0.30% ตามลำดับ สูงกว่าพันธุ์เปรียบเทียบ (Table 2)

Table 2 The chemical compositions of cassava six lines/varieties

Lines/Varieties	Main nutrients						
	Moisture (%)	Protein (%)	Fat (%)	Ash (%)	Total carbohydrate (%)	Total energy (kcal/100g)	Energy from fat (kcal/100g)
CMRE60-03-02	73.66	0.33	0.36	0.73	24.92	104.24	3.24
CMRE60-03-13	68.36	0.32	0.37	0.68	30.27	125.69	3.33
OMRE60-01-02	63.65	0.41	0.43	0.87	34.64	144.07	3.87
OMRE60-02-12	68.34	0.70	0.30	0.96	29.70	124.30	2.70
DOA Rayong2	68.96	0.30	0.22	0.68	29.84	122.54	1.98
Hanatee	69.54	0.26	0.27	0.60	29.33	120.79	2.43

Table 3 Mean square of combined analysis on fresh root yield and starch content of six cassava lines/varieties across six environments

Source of variation	Df	Fresh root yield	Starch content
Environment (E)	5	48,924,109**	879.8**
Genotype (G)	5	19,827,394**	90.6**
G x E	25	3,273,122**	25.9
Error	90	625,924	6.6

* Significantly difference at $p < 0.05$, ** Significantly difference at $p < 0.01$

4. ผลผลิตหัวสด

การวิเคราะห์ความแปรปรวนรวม ผลผลิตหัวสด พบว่า มีความแตกต่างกันระหว่างจีโนไทป์ สภาพแวดล้อม และปฏิสัมพันธ์ระหว่างจีโนไทป์กับสภาพแวดล้อม (Table 3) แสดงว่า มีความแปรปรวนระหว่างพันธุ์กรรมของจีโนไทป์ สภาพแวดล้อมที่ทดลองและการเพิ่มขึ้นหรือลดลงของผลผลิตหัวสดได้รับอิทธิพลอย่างมากจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อม ปริมาณแป้งในหัวสด พบว่า มีความแตกต่างระหว่างจีโนไทป์ และสภาพแวดล้อม (Table 3) แต่ไม่พบความแตกต่างของปฏิสัมพันธ์ระหว่างจีโนไทป์กับสภาพแวดล้อม แสดงว่า มีความแปรปรวนระหว่างพันธุ์กรรมของจีโนไทป์

สภาพแวดล้อมที่ทดลอง แต่การเพิ่มขึ้นหรือลดลงของปริมาณแป้งในหัวสดไม่ได้รับอิทธิพลจากการเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมเช่นเดียวกับการทดลองของจำลักษณะและคณะ (2550) พบว่า ผลผลิตหัวสดผลผลิตหัวแห้ง และปริมาณแป้งในหัวสด ได้รับอิทธิพลจากปัจจัยของสภาพแวดล้อม พันธุ์ และอิทธิพลร่วมของพันธุ์กับสภาพแวดล้อม

มันสำปะหลังลูกผสมปี 2560 ให้ผลผลิตหัวสดเฉลี่ย 2,803-4,794 กก./ไร่ ในขณะที่พันธุ์เปรียบเทียบได้แก่ พันธุ์ห่านาที่และ กวก. ระยะยง2 ให้ผลผลิตหัวสดเฉลี่ย 2,824 และ 3,058 กก./ไร่ ตามลำดับ โดยสายพันธุ์ OMRE60-01-02 CMRE60-03-13 และ

CMRE60-03-02 ให้ผลผลิตหัวสดเฉลี่ยสูงกว่าพันธุ์ห่านาที่และกวก. ระยอง2 (Table 4) แปลงทดสอบระยองและสงขลา ให้ผลผลิตหัวสดไม่มีความแตกต่างทางสถิติ แปลงทดสอบขอนแก่น สายพันธุ์ CMRE60-03-02 ให้ผลผลิตหัวสด 4,155 กก./ไร่ สูงกว่าพันธุ์ห่านาที่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แปลงทดสอบสุโขทัย สายพันธุ์ CMRE60-03-13 และ OMRE60-01-02 ให้ผลผลิตสูงสุด 9,000 และ 8,202 กก./ไร่ ตามลำดับ สูงกว่าพันธุ์ห่านาที่และ กวก. ระยอง2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แปลงทดสอบลพบุรี สายพันธุ์ CMRE60-03-13 OMRE60-01-02 และ CMRE60-03-02 ให้ผลผลิตสูงสุด 3,165 3,173 และ 2,810 กก./ไร่ ตามลำดับ สูงกว่าพันธุ์ห่านาที่และ กวก. ระยอง2 อย่างมีนัยสำคัญ

ทางสถิติ แปลงทดสอบกาญจนบุรี สายพันธุ์ OMRE60-01-02 และ CMRE60-03-13 ให้ผลผลิตสูงสุด 6,781 และ 5,667 กก./ไร่ ตามลำดับ สูงกว่าพันธุ์ห่านาที่ และกวก. ระยอง2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (Table 4)

เมื่อพิจารณาการให้ผลผลิตหัวสดเฉลี่ยทั้ง 6 สถานที่ทดสอบ พบว่า สายพันธุ์ OMRE60-01-02 ให้ผลผลิตเฉลี่ยสูงสุด 4,794 กก./ไร่ รองลงมา คือ CMRE60-03-13 และ CMRE60-03-02 ที่ให้ผลผลิตเฉลี่ย 4,538 และ 4,207 กก./ไร่ โดยทั้ง 3 สายพันธุ์ ให้ผลผลิตเฉลี่ยสูงกว่าพันธุ์ห่านาที่ 70 61 และ 49% ตามลำดับ โดยพันธุ์ห่านาที่ให้ผลผลิตหัวสดเฉลี่ย 2,824 กก./ไร่ (Table 4)

Table 4 Fresh root yield of six cassava lines/varieties evaluated across six locations in 2022/2023

Lines/varieties	Fresh root yield (kg/rai)						G-Mean	Relative to check (%)	
	RY	KK	STI	LRI	KRI	SKA		Hanatee	DOA Rayong2
CMRE60-03-02	3,858	4,155 a	6,300 b	2,810 a	5,427 ab	2,692	4,207 a	149	138
CMRE60-03-13	2,956	3,638 abc	9,000 a	3,165 a	5,667 a	2,803	4,538 a	161	148
OMRE60-01-02	2,894	3,909 ab	8,202 a	3,173 a	6,781 a	3,778	4,794 a	170	157
OMRE60-02-12	2,356	2,517 c	4,578 c	1,314 bc	4,000 bc	2,054	2,803 b	99	92
DOA Rayong2	2,780	3,625 abc	2,883 d	1,938 b	4,094 bc	3,028	3,058 b	108	100
Hanatee	2,852	2,867 bc	4,419 c	848 c	3,834 c	2,124	2,824 b	100	92
L-Mean	2,449	3,452	5,897	2,208	4,967	2,746	3,703	-	-
CV (%)	26.4	20.0	16.7	19.4	21.9	27.6	48.9	-	-

Means in the same column followed by a common type of letter are not significantly different at the 5% level by DMRT

Note: RY= Rayong, KK = Khon Kaen, STI = Sukhothai, LRI = Lop Buri, KRI = Kanchanaburi, SKA = Songkhla

5. ปริมาณแป้งในหัวสด

แปลงทดสอบระยอง พบว่า สายพันธุ์ OMRE60-01-02 และ OMRE60-02-12 มีปริมาณแป้งในหัวสด 22.1 และ 21.3% ตามลำดับ สูงกว่าพันธุ์ห่านาที่และกวก. ระยอง2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แปลงทดสอบขอนแก่น สายพันธุ์ OMRE60-01-02 CMRE60-03-02 และ OMRE60-02-12 มีปริมาณแป้งในหัวสด 22.2 20.1 และ 19.7% ตามลำดับ

ไม่แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับพันธุ์ห่านาที่ และ กวก.ระยอง2 แปลงทดสอบสุโขทัย สายพันธุ์ OMRE60-01-02 และ OMRE60-02-12 มีปริมาณแป้งในหัวสดสูงสุด 26.2 และ 24.4% ตามลำดับแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับพันธุ์ห่านาที่และกวก. ระยอง2 แปลงทดสอบลพบุรี 4 สายพันธุ์ มีปริมาณแป้งในหัวสดสูงสุดแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติกับพันธุ์ห่านาที่ และ กวก.ระยอง2 แปลงทดสอบกาญจนบุรีทั้ง 6

พันธุ์/สายพันธุ์ มีปริมาณแป้งในหัวสดไม่แตกต่างทางสถิติ แปลงทดสอบสงขลา สายพันธุ์ CMRE60-03-02 และ CMRE60-03-13 มีปริมาณแป้งในหัวสดสูงสุด 12.2 และ 11.9% ตามลำดับ แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ กับพันธุ์ห่านาทีและ กวก.ระยอง2 (Table 5)

เมื่อพิจารณาปริมาณแป้งในหัวสดเฉลี่ยทั้ง 6 สถานที่พบว่า สายพันธุ์ CMRE60-03-02 มีปริมาณแป้งในหัวสดเฉลี่ยสูงสุด 20.7% มากกว่าพันธุ์เปรียบเทียบกับทั้งสองพันธุ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ รองลงมา คือ CMRE60-03-13 และ OMRE60-01-02 ที่มีปริมาณแป้งในหัวสดเฉลี่ย 19.9 และ 19.8% ตามลำดับ ให้ปริมาณแป้งในหัวสดไม่แตกต่างจากพันธุ์ห่านาที แต่มากกว่าพันธุ์ กวก.

ระยอง2 อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติโดยสายพันธุ์ OMRE60-02-12 มีปริมาณแป้งในหัวสดเฉลี่ย 18.1% ใกล้เคียงกับพันธุ์ห่านาที (Table 5) ปริมาณแป้งในหัวสดเฉลี่ยค่อนข้างต่ำ สอดคล้องกับโอภาซ (2563) ที่รายงานว่ามีปริมาณแป้งในหัวสดลดต่ำลงในช่วงเดือน พ.ค. และ มิ.ย. เนื่องจากมีกระบวนการนำแป้งที่สะสมไว้ในหัวไปสร้างใบใหม่อีกครั้งที่เรียกว่า regrowth นอกจากนี้ยังพบว่า แปลงทดลองสงขลามีปริมาณแป้งในหัวสดเฉลี่ยต่ำที่สุด เนื่องจากมีปริมาณน้ำฝนรวมทั้งปี 3,124.7 มม. สูงกว่าแปลงอื่น ๆ ส่งผลให้ในหัวมันสำปะหลังชุ่มน้ำเมื่อวัดปริมาณแป้งจึงได้ต่ำกว่าหัวที่มีน้ำน้อย (เจริญศักดิ์และคณะ, 2530)

Table 5 Starch content and harvest index of six cassava lines/varieties from six locations in 2022/2023

Lines/varieties	Locations						G-Mean
	RY	KK	STI	LRI	KRI	SKA	
Starch content (%)							
CMRE60-03-02	19.8 abc	20.1 ab	21.1 b	19.1 a	26.8	12.2 a	20.7 a
CMRE60-03-13	18.7 bc	15.7 b	17.3 c	19.7 a	25.1	11.9 a	19.9 ab
OMRE60-01-02	22.1 a	22.2 a	26.2 a	20.9 a	28.4	4.3 c	19.8 ab
OMRE60-02-12	21.3 ab	19.7 ab	24.4 a	19.1 a	29.4	5.7 bc	18.1 abc
DOA Rayong2	13.4 d	17.7 ab	18.0 bc	14.0 b	23.3	6.9 b	15.5 c
Hanatee	17.5 c	22.0 a	19.8 bc	13.6 b	24.9	6.0 bc	17.3 bc
L-Mean	18.8	19.6	21.1	17.7	26.3	7.8	18.6
CV (%)	8.7	14.7	10.1	11.6	15.9	18.3	27.4
Harvesting index (HI)							
CMRE60-03-02	0.54 cd	0.49 a	0.50 b	0.30 b	0.49	0.38	0.45 b
CMRE60-03-13	0.58 bc	0.54 a	0.56 ab	0.29 b	0.49	0.39	0.48 b
OMRE60-01-02	0.68 a	0.55 a	0.60 a	0.38 a	0.62	0.47	0.55 a
OMRE60-02-12	0.50 d	0.43 b	0.52 b	0.16 c	0.44	0.37	0.40 cd
DOA Rayong2	0.61 b	0.50 a	0.38 c	0.25 b	0.51	0.42	0.45 bc
Hanatee	0.51 d	0.36 c	0.42 c	0.12 c	0.45	0.35	0.37 d
L-Mean	0.57	0.48	0.50	0.25	0.50	0.40	0.45
CV (%)	7.0	8.9	9.5	19.6	13.8	14.2	18.4

Means in the same column followed by a common type of letter are not significantly different at the 5% level by DMRT

Note: RY= Rayong, KK = Khon Kaen, STI = Sukhothai, LRI = Lop Buri, KRI = Kanchanaburi, SKA = Songkhla

6. ดัชนีเก็บเกี่ยว

เป็นตัวชี้ศักยภาพการให้ผลผลิตในสัดส่วนที่เหมาะสม (สถาบันวิจัยพืชไร่และพืชทดแทนพลังงาน, 2558) พันธุ์ที่มีค่าดัชนีเก็บเกี่ยวมากกว่า 0.50 แสดงว่าสามารถสร้างผลผลิตหัวสดได้มากกว่า 50 % ของผลผลิตทั้งหมด ดัชนีเก็บเกี่ยวจาก 6 สถานที่ พบว่า สายพันธุ์ OMRE60-01-02 และ CMRE60-03-13 มีค่าดัชนีเก็บเกี่ยวมากกว่าพันธุ์ห่านาที่อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติในสภาพแวดล้อมระยอง ขอนแก่น สุโขทัย และลพบุรี แต่ไม่แตกต่างในสภาพแวดล้อมที่สภาพแวดล้อมกาญจนบุรีและสงขลา (Table 5) ค่าดัชนีเก็บเกี่ยวขึ้นอยู่กับพันธุ์ (Amarullah, 2020) ขณะที่มันสำปะหลังมีการเจริญเติบโต คาร์โบไฮเดรตที่สร้างขึ้นด้วยการกระบวนการสังเคราะห์แสง จะส่งไปเพื่อกระจายน้ำหนักแห้งยังส่วนหัว ต้น และใบที่กำลังเจริญเติบโต แต่น้ำหนักแห้งที่สร้างขึ้นส่วนใหญ่จะเคลื่อนย้ายไปยังต้นและหัว น้ำหนักแห้งอยู่ที่ส่วนของหัวมากที่สุด รองลงมา คือ ต้นและใบ (โอภาษ, 2563)

7. เสถียรภาพการให้ผลผลิตหัวสดของมันสำปะหลังบริเวณ

พันธุ์กรรมในอุดมคติ (ideal genotype) ควรจะมีค่าเฉลี่ยผลผลิตสูง และมีเสถียรภาพในทุกสภาพแวดล้อม ซึ่งพันธุ์กรรมในอุดมคติจะมีตำแหน่งอยู่ตรงหัวลูกศรที่มีวงกลมล้อมรอบบนเส้นตรงค่าเฉลี่ยแกนสภาพแวดล้อม (average-environment axis, AEA) พันธุ์กรรมที่อยู่ทางด้านบวกและมีความยาวของเวกเตอร์พันธุ์กรรมมากที่สุด มีค่าเฉลี่ยผลผลิตสูงที่สุด และพันธุ์ที่อยู่ในพิกัดที่เข้าใกล้แกน AEA มากกว่าจะเป็นพันธุ์ที่มีเสถียรภาพสูง (ชูศักดิ์, 2562) เมื่อวิเคราะห์ GGE biplot ของลักษณะผลผลิตหัวสด เพื่อคัดเลือกพันธุ์ที่ให้ผลผลิตเฉลี่ยสูง และมีเสถียรภาพในการให้ผลผลิตดี พบว่า อิทธิพลหลักของพันธุ์กรรม (PC1) มีค่า 85.78% และอิทธิพล

ปฏิสัมพันธ์ของพันธุ์กรรมกับสภาพแวดล้อม (PC2) มีค่า 9.87% (Figure 2) ผลการวิเคราะห์ลำดับพันธุ์กรรมเมื่อเปรียบเทียบกับพันธุ์กรรมในอุดมคติ จากกราฟ mean vs. stability พบว่า สายพันธุ์ OMRE60-01-02 ให้ผลผลิตสูงที่สุดและมีเสถียรภาพการให้ผลผลิตสูง และเป็นพันธุ์ที่มีตำแหน่งอยู่ใกล้กับพันธุ์กรรมในอุดมคติ รองลงมา คือ CMRE60-03-13 แต่เป็นสายพันธุ์ที่มีเสถียรภาพในการให้ผลผลิตต่ำกว่า โดยมีเส้นประที่ลากจากจุดพันธุ์กรรมมาตั้งฉากกับเส้น AEA ยาวกว่า อย่างไรก็ตาม กราฟ GGE biplot แสดงเปอร์เซ็นต์ PC1 สูง แสดงให้เห็นว่า genotype มีอิทธิพลต่อการแสดงออกของลักษณะมากกว่าปัจจัยด้านสิ่งแวดล้อม ดังนั้น ถึงแม้ว่า CMRE60-03-13 มีค่าเสถียรภาพต่ำ แต่ให้ผลผลิตสูง และสูงกว่าพันธุ์ห่านาที่เป็นพันธุ์เปรียบเทียบ ดังนั้น การพิจารณาคัดเลือกพันธุ์กรรมที่น่าสนใจ สามารถพิจารณาได้จากการให้ผลผลิตได้มากกว่าเสถียรภาพการให้ผลผลิต สายพันธุ์ CMRE60-03-13 จึงเป็นสายพันธุ์ที่น่าสนใจในประเด็นการให้ผลผลิตหัวสด

8. การประเมินความจำเพาะด้านผลผลิตหัวสดของมันสำปะหลังบริเวณกับสภาพแวดล้อม

เมื่อวิเคราะห์ศักยภาพการให้ผลผลิตหัวสดของพันธุ์/สายพันธุ์มันสำปะหลังบริเวณในแต่ละสภาพแวดล้อมจากกราฟ GGE biplot (which won where/what) พบว่า สามารถแบ่งสภาพแวดล้อมทั้ง 6 ได้เป็น 2 กลุ่ม คือ กลุ่มที่ 1 ได้แก่ RY KK LRI KRI และ SKA กลุ่มที่ 2 ได้แก่ STI (Figure 3) โดยมันสำปะหลังบริเวณสายพันธุ์ OMRE60-01-02 ให้ผลผลิตดีที่สุดในสภาพแวดล้อมกลุ่มที่ 1 และสายพันธุ์ CMRE60-03-13 ให้ผลผลิตดีที่สุดในสภาพแวดล้อมกลุ่มที่ 2 อย่างไรก็ตาม สายพันธุ์ CMRE60-03-13 ให้ผลผลิตไม่แตกต่างจากสายพันธุ์ OMRE60-01-02 และ CMRE60-03-02 ทุกสภาพแวดล้อม (Table 4)

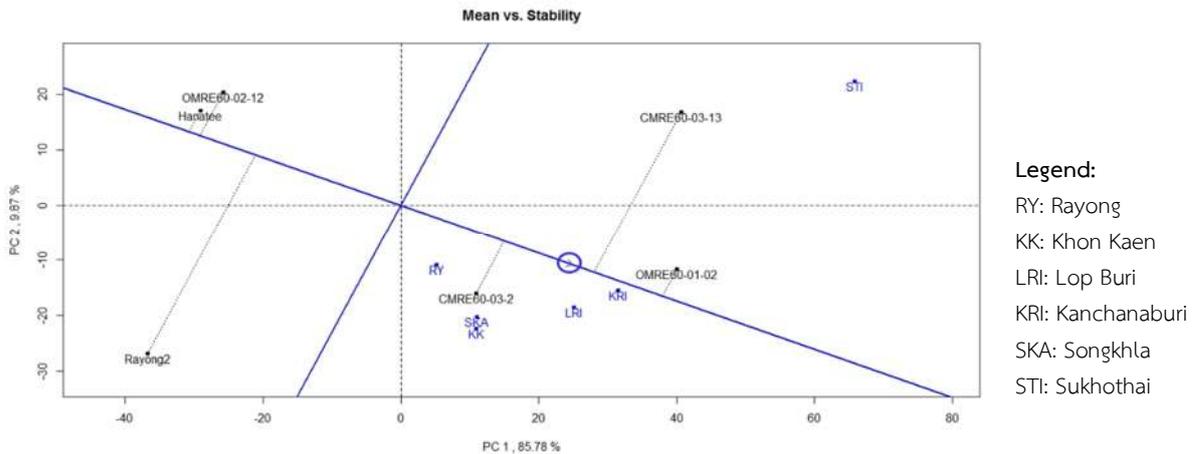


Figure 2 Evaluation of six edible cassava hybrids base mean on stability performance for fresh root yield across six environments by GGE biplot method

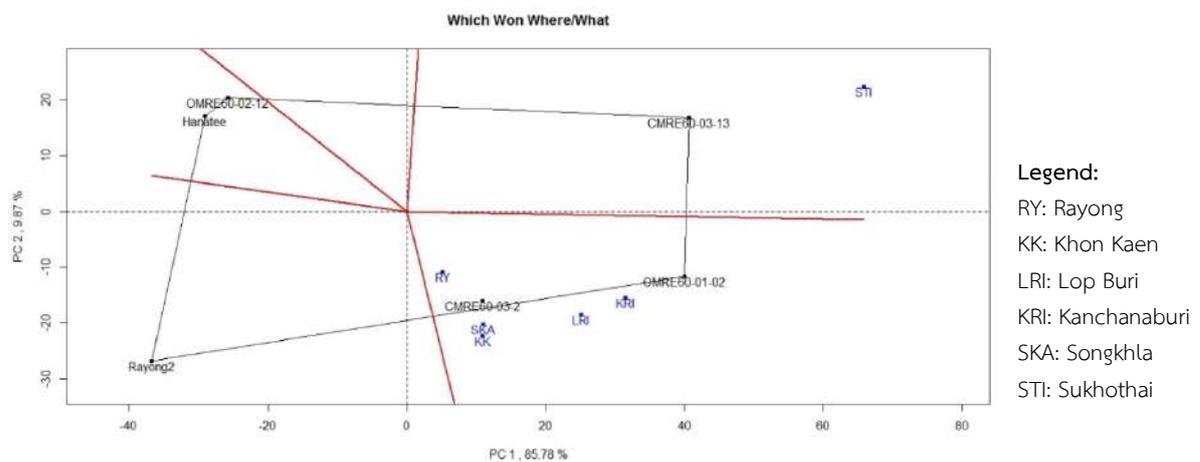


Figure 3 The which-won-where/what of the GGE biplot for fresh root yield showed six edible cassava hybrids genotypes for fresh root yield across six environments

เมื่อพิจารณาผลผลิต และคุณภาพด้านเนื้อสัมผัส เมื่อแปรรูปเป็นมันสำปะหลังหนึ่งของมันสำปะหลัง บริโภคลูกผสมปี 2560 ทั้ง 4 สายพันธุ์ พบว่า สายพันธุ์ CMRE60-03-13 ให้ผลผลิตหัวสดสูง และมีเสถียรภาพ การให้ผลผลิตปานกลาง มีคุณภาพเนื้อสัมผัสของ มันสำปะหลังนี้ดีกว่าพันธุ์ห่านาที่ ซึ่งเป็นพันธุ์ที่ เกษตรกรนิยมนำมาแปรรูปเป็นผลิตภัณฑ์ต่าง ๆ ส่วน สายพันธุ์ OMRE60-01-02 แม้จะให้ผลผลิตหัวสด เฉลี่ยสูงสุด และมีเสถียรภาพการให้ผลผลิตสูง แต่มี คุณภาพเนื้อสัมผัสด้อยกว่าสายพันธุ์ CMRE60-03-13 และพันธุ์ห่านาที่

สรุปผลการทดลอง

การประเมินศักยภาพการให้ผลผลิต ของ มันสำปะหลังบริโภคลูกผสมปี 2560 จาก 6 สภาพแวดล้อม และคุณภาพเนื้อสัมผัส พบว่า สายพันธุ์ CMRE60-03-13 ให้ผลผลิตหัวสดเฉลี่ยสูง 4,538 กก./ไร่ สูงกว่าพันธุ์ห่านาที่ 61% มีปริมาณแป้งในหัวสดเฉลี่ย 19.9% ใกล้เคียงกับ พันธุ์ห่านาที่ และมีดัชนีเก็บเกี่ยวเฉลี่ย 0.48 สูงกว่าพันธุ์ ห่านาที่ เมื่อแปรรูปเป็นมันสำปะหลังนี้มีคุณภาพด้าน เนื้อสัมผัสดีกว่าพันธุ์ห่านาที่ จึงมีความเหมาะสมใน การแปรรูปเป็นมันสำปะหลังและแนะนำเป็นมันสำปะหลัง บริโภคสายพันธุ์ใหม่ให้แก่เกษตรกรในอนาคต

เอกสารอ้างอิง

- กุสุมา รอดแผ้วพาล อติศักดิ์ สายนภา และจิณณจาร์ หาญเศรษฐ์สุข. 2561. การปรับปรุงพันธุ์มันสำปะหลังเพื่อบริโภค : การคัดเลือกปีที่ 2 (ลูกผสมปี 2560). แหล่งข้อมูล: <https://www.doa.go.th/plan/wpcontent/uploads/2021/05/142.3การปรับปรุงพันธุ์มันสำปะหลังเพื่อบริโภค-การคัดเลือกปีที่-2-ลูกผสม ปี-2560.pdf>. สืบค้น: 11 ตุลาคม 2567.
- กุสุมา รอดแผ้วพาล จิณณจาร์ หาญเศรษฐ์สุข และอติศักดิ์ สายนภา. 2563ก. การปรับปรุงพันธุ์มันสำปะหลังเพื่อบริโภค : การเปรียบเทียบเบื้องต้น (ลูกผสมปี 2560) แหล่งข้อมูล: <https://www.doa.go.th/plan/wp-content/uploads/2021/05/142.4การปรับปรุงพันธุ์มันสำปะหลังเพื่อบริโภค-เปรียบเทียบเบื้องต้น-ลูกผสมปี-2560.pdf>. สืบค้น: 11 ตุลาคม 2567.
- กุสุมา รอดแผ้วพาล รวีวรรณ เชื้อกิตติศักดิ์ ทนุธรรม บุญฉิม วารีย์ ทองมี สุวลักษณ์ อมะวัลย์ ธนาวดี คำชู ศฐาคุบุตร เคน นากาซึมา จิณณจาร์ หาญเศรษฐ์สุข และอติศักดิ์ สายนภา. 2563ข. การปรับปรุงพันธุ์มันสำปะหลังเพื่อบริโภค : การเปรียบเทียบมาตรฐาน (ลูกผสมปี 2560) แหล่งข้อมูล: <https://www.doa.go.th/plan/wp-content/uploads/2023/07/152.5.pdf>. สืบค้น: 11 ตุลาคม 2567.
- กุสุมา รอดแผ้วพาล ชฎาพร อินเปลี่ยน สุวลักษณ์ ศันสนีย์ และธนาวดี คำชู. 2567. การเปรียบเทียบสายพันธุ์/พันธุ์มันสำปะหลังบริโภค และอายุเก็บเกี่ยวที่เหมาะสมสำหรับการแปรรูปเป็นเฟรนช์ฟรายส์. วารสารวิชาการเกษตร. 42(2): 131 -144.
- จิณณจาร์ หาญเศรษฐ์สุข. 2552. คุณสมบัติและประโยชน์ของหัวและแป้งมันสำปะหลัง. ศูนย์วิจัยพืชไร่ระยะองกรมวิชาการเกษตร. 80 หน้า.
- จำลักษณ์ ศรีปัญญา วิจารณ์ วิชชุกิจ เจริญศักดิ์ โรจนฤทธิ์ พิเชษฐ์ วิชรี เลิศมงคล เอ็จ สโรบล ประภาส ช่างเหล็ก และสุภาวดี บุญมา. 2550. เสถียรภาพการให้ผลผลิตของ มันสำปะหลังสายพันธุ์ดีเด่นของมหาวิทยาลัย เกษตรศาสตร์. แหล่งข้อมูล: https://agkb.lib.ku.ac.th/ku/search_detail/result/10151. สืบค้น: 28 เมษายน 2568.
- เจริญศักดิ์ โรจนฤทธิ์พิเชษฐ์ ปิยะฉวี พูลสงวน สมยศ พุทธิเจริญ จำลอง เขียมจันรรจา และวิทยา แสงแก้วสุข. 2530.การศึกษาคุณปลูกมันสำปะหลัง. วารสารเกษตรศาสตร์ (วิทย). 21(2): 119-125.
- ชูศักดิ์ จอมพุก. 2562. วิเคราะห์ทางพันธุศาสตร์ปริมาณในการปรับปรุงพันธุ์พืช. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 507 หน้า.
- ชัยวิช โขวเจริญสุข. 2566. มันสำปะหลัง. แหล่งข้อมูล: <https://www.krungsri.com/th/research/industry/industry/outlook/agriculture/cassava/io/cassava-2023-2025>. สืบค้น: 1 พฤษภาคม 2568.
- ธัญญาภรณ์ ศิริเลิศ. 2550. การประเมินลักษณะเนื้อสัมผัสในอาหาร. วารสารเทคโนโลยีการอาหาร มหาวิทยาลัยสยาม. 3(1): 6-13.
- นงนุช สิริวงศ์. 2006. การศึกษาปัจจัยที่มีผลต่อเนื้อสัมผัสของ มันสำปะหลังต้มสุกในมันสำปะหลังชนิดไชยาไนต์ต่ำ. วิทยานิพนธ์ดุษฎีบัณฑิต. มหาวิทยาลัยพระจอมเกล้าพระนครเหนือ. กรุงเทพฯ.
- นิรนาม. 2561. เฟรนช์ฟรายส์จากมันสำปะหลังทำนาที่! อัพโหลดข่าวบนโซเชียลมีเดียมีเคล็ดลับไว้สาร. แหล่งข้อมูล: <https://www.naewna.com/likesara/342432>. สืบค้น: 11 ตุลาคม 2567.
- สถาบันวิจัยพืชไร่และพืชทดแทนพลังงาน. 2558. แบบบันทึก ข้อมูลงานวิจัยมันสำปะหลัง. หน้า 15-28. ใน: คู่มือการ บันทึกข้อมูลงานวิจัยพืชไร่และพืชทดแทนพลังงาน กรมวิชาการเกษตร, กรุงเทพฯ.
- สถาบันวิจัยและพัฒนาแห่งมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. 2558. มันสำปะหลัง: การใช้ประโยชน์ผลิตภัณฑ์จากมันสำปะหลัง แหล่งข้อมูล: <https://www3.rdi.ku.ac.th/?p=17866>. สืบค้น: 1 พฤษภาคม 2568.
- สุวลักษณ์ อมะวัลย์ จิณณจาร์ หาญเศรษฐ์สุข และอติศักดิ์ สายนภา. 2560ก. การปรับปรุงพันธุ์มันสำปะหลังเพื่อบริโภค: การผสมพันธุ์ (ลูกผสมชุดปี 2560) แหล่งข้อมูล: <https://www.doa.go.th/plan/wpcontent/uploads/2021/05/182.1การปรับปรุงพันธุ์มันสำปะหลังเพื่อบริโภค-การผสมพันธุ์-ลูกผสมชุดปี-2560-.pdf>. สืบค้น: 11 ตุลาคม 2567.
- สุวลักษณ์ อมะวัลย์ จิณณจาร์ หาญเศรษฐ์สุข กุลชาต นาคจันท์ กุสุมา รอดแผ้วพาล และวันปิติ บัวขาว. 2560ข. การปรับปรุงพันธุ์มันสำปะหลังเพื่อบริโภค: การคัดเลือกปีที่ 1 (ลูกผสมชุดปี 2560) รายงานผลงาน เรื่องเต็มการทดลองที่สิ้นสุด. แหล่งข้อมูล: <https://www.doa.go.th/plan/wp-content/uploads/2021/05/182.2 การปรับปรุงพันธุ์มันสำปะหลังเพื่อบริโภค-การคัดเลือกปีที่-1-ลูกผสมปี-2560.pdf>. สืบค้น: 11 ตุลาคม 2567.

- สุวลักษณ์ อะมะวัลย์. 2564. โครงการวิจัยและพัฒนาพันธุ์มันสำปะหลังเพื่อเพิ่มประสิทธิภาพการผลิต. แหล่งข้อมูล: <https://www.doa.go.th/research/research-detail.php?id=3097>. สืบค้น: 11 ตุลาคม 2567.
- อาทิตย์ ลมูลปลั่ง. 2561. มันสำปะหลังพันธุ์ใหม่ 'พิรุณ 4' 'ปลอดกลูเตน' สู่เมฆขนมเลิศรส. แหล่งข้อมูล: <https://www.posttoday.com/business/575452>. สืบค้น: 11 ตุลาคม 2567.
- โอภาส บุญเส็ง. 2563. มันสำปะหลังไทย ชีววิทยา การผลิต และการแปรรูป. ม.ป.พ. 425 หน้า.
- Amarullah. 2020. Evaluation of quality and variety of Indonesian cassava (*Manihot esculenta* Crantz). International Journal of Agricultural Research, Innovation and Technology. 10(1): 108-116.
- Eberhart, S.A. and W.A. Russell. 1966. Stability parameters for comparing varieties. Crop Science. 6(1): 36-40.
- Eggleston, G. and R. Asiedu. 1994. Effects of boiling on texture of cassava clones: A comparison of compressive strength, intercellular adhesion and physicochemical composition of the tuberous roots. Tropical Science. 34: 259-273.
- Lawal O.O., J.O. Yusuf, O.L. Abdulrahman, I.F. Ayanda, Y.O. Ambali and U.Y. Ibrahim. 2021. On-farm phenotypic evaluation and stability analysis of provitamin A cassava (*Manihot esculenta*) varieties for agronomic traits, stress tolerance and tuber yield across Kwara state, Nigeria. Tropical Agriculture (Trinidad). 98(1): 1-15.
- Ndubuisi, N.D. and A.C.U. Chidiebere. 2018. Cyanide in cassava: A review. International Journal of Genomics and Data Mining. 02: 1-10.
- Ngeve, J.M. 2003. Cassava root yields and culinary qualities as affected by harvest age and test environment. Journal of the Science of Food and Agriculture. 83(4): 249-257.
- Noerwijati, K., Nasrullah, T. Taryono and D. Prajitno. 2014. Fresh tuber yield stability analysis of fifteen cassava genotypes across five environments in East Java (Indonesia) using GGE biplot. Energy Procedia. 47: 156-165.
- Maieves, H.A., D.C.D. Oliveira, C. Bernardo, C.M.D.O. Müller and E.R. Amante. 2012. Microscopy and texture of raw and cooked cassava (*Manihot Esculenta* Crantz) roots. Journal of Texture Studies. 43(2): 164-173.
- Mtunguja, M.K., H.S. Laswai, E. Kanju, J. Ndunguru and Y.C. Muzanila. 2016. Effect of genotype and genotype by environment interaction on total cyanide content, fresh root, and starch yield in farmer-preferred cassava landraces in Tanzania. Food Science & Nutrition. 4(6): 791-801.
- Ogbonna, A.C., L.R. Braatz de Andrade, I.Y. Rabbi, L.A. Mueller, E.J. de Oliveira and G.J. Bauchet. 2021. Large-scale genome-wide association study, using historical data, identifies conserved genetic architecture of cyanogenic glucoside content in cassava (*Manihot esculenta* Crantz) root. The Plant Journal. 105(3): 754-770.
- Sundaresan, S., B. Nambisan and A. Eswari. 1987. Bitterness in cassava in relation to cyanoglucoside content. Indian Journal Agricultural Science. 57(1): 37-40.
- Williams, H.J. and T.G. Edwards. 1980. Estimation of cyanide with alkaline picrate. Journal of the Science of Food and Agriculture. 31(1): 15-22.
- Yan, W., L.A. Hunt, Q. Sheng and Z. Szlavnic. 2000. Cultivar evaluation and mega environment investigation based on the GGE biplot. Crop Science. 40(3): 597-605.

การวิเคราะห์เชิงเปรียบเทียบค่าดัชนีการเกิดโรคและพื้นที่ใต้กราฟพัฒนาการเกิดโรค
เพื่อจำแนกระดับความรุนแรงของโรคใบไหม้แมลงใหญ่

Comparative Analysis of Percentage Disease Index and Area Under the Curve for
Classifying Northern Corn Leaf Blight Severity

ธีรวุฒิ วงศ์วรรตน์^{1/*} เขาวานาถ พฤทธิเทพ^{2/} สุวรา วุฒิอำพล^{3/} ภาณุวัฒน์ ศิลปศักดิ์ขจร^{3/}
Theerawut Wongwarat^{1/*} Chaowanart Phruetthitthep^{2/} Suwara Wutthiaumphon^{3/}
Panuwat Sinlapasakkajohn^{3/}

Received 14 Mar. 2025/Revised 29 Apr. 2025/Accepted 7 May 2025

ABSTRACT

Northern corn leaf blight (NCLB, *Exserohilum turcicum*) is one of the most significant foliar diseases of maize, directly affecting sweet corn yield. Accurate assessment of disease severity is essential for screening resistant lines. This study compared the effectiveness of the percentage disease index (PDI) and the area under a disease progress curve (AUDPC) in evaluating the severity of NCLB in sweet corn. The experiment was conducted on the sixth generation (S_6) of self-pollinated hybrid sweet corn at the Chiang Mai Field Crops Research Center from December 2021 to February 2022. *E. turcicum* was artificially inoculated, and PDI was assessed at two time points: 28 and 55 days after planting (DAP). The AUDPC was then calculated and analyzed using the receiver operating characteristic (ROC) curve and Youden index to determine the critical threshold for disease severity classification. The correlation analysis revealed that PDI at 28 DAP was unsuitable for classifying disease severity, whereas PDI at 55 DAP and AUDPC based on observations at both 28 and 55 DAP showed a statistically significant correlation. Furthermore, the threshold value determined by AUDPC, in conjunction with ROC curve and Youden index was 910.88, with an area under the ROC curve (AUC) of 1, indicating highly accurate discrimination between resistant and susceptible sweet corn genotypes. Therefore, AUDPC combined with ROC curve and Youden's index was more effective and reliable than using PDI at 55 DAP alone and can serve as a valuable tool in future research on breeding sweet corn resistant to NCLB.

Keywords: sweet corn; northern corn leaf blight; disease severity

^{1/} ศูนย์วิจัยพืชไร่ขอนแก่น อ. เมือง จ. ขอนแก่น 40000

^{1/} Khon Kaen Field Crops Research Center, Mueang, Khon Kaen 40000, Thailand

^{2/} สถาบันวิจัยพืชไร่และพืชทดแทนพลังงาน ถ.พหลโยธิน จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

^{2/} Field and Renewable Energy Crops Research Institute, Phahonyothin Rd., Chatuchak, Bangkok 10900, Thailand

^{3/} ศูนย์วิจัยพืชไร่ชัยนาท อ. สรรพยา จ. ชัยนาท 17150

^{3/} Chai Nat Field Crops Research Center, Sapphaya, Chai Nat 17150, Thailand

* Corresponding author: theerawut6949@gmail.com

บทคัดย่อ

โรคใบไหม้แผลใหญ่ (*Exserohilum turcicum*) เป็นหนึ่งในโรคทางใบที่สำคัญของข้าวโพด ซึ่งส่งผลโดยตรงต่อผลผลิตข้าวโพดหวาน การประเมินความรุนแรงของโรคอย่างถูกต้องมีความจำเป็นต่อการคัดเลือกพันธุ์ต้านทานโรค การศึกษานี้มีวัตถุประสงค์เพื่อเปรียบเทียบความเหมาะสมของค่าดัชนีการเกิดโรค (PDI) และพื้นที่ใต้กราฟพัฒนาการเกิดโรค (AUDPC) ในการจำแนกระดับความรุนแรงของโรคใบไหม้แผลใหญ่ในข้าวโพดหวาน โดยดำเนินการศึกษาในข้าวโพดลูกผสมตัวเองชั่วที่ 6 (S₆) ณ ศูนย์วิจัยพืชไร่เชียงใหม่ ระหว่างเดือน ธ.ค. 2564 ถึง ก.พ. 2565 ทำการปลูกเชื้อรา *E. turcicum* และประเมินค่า PDI 2 ครั้ง คือ ที่ 28 วัน และ 55 วันหลังปลูก จากนั้นคำนวณค่า AUDPC ร่วมกับกราฟเส้นโค้ง ROC curve และดัชนี Youden เพื่อกำหนดจุดวิกฤต พบว่า ค่า PDI ที่ 28 วันหลังปลูก ไม่เหมาะสมสำหรับการจำแนกระดับความรุนแรงของโรค ขณะที่ค่า PDI ที่ 55 วันหลังปลูก และค่า AUDPC ที่ 28 และ 55 วันหลังปลูกมีความสัมพันธ์อย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ โดยสามารถกำหนดค่าวิกฤตที่ 910.88 และค่าพื้นที่ใต้กราฟเส้นโค้ง (AUC) เท่ากับ 1 ซึ่งบ่งชี้ว่าสามารถจำแนกสายพันธุ์ข้าวโพดหวานที่มีระดับต้านทานและอ่อนแอต่อโรคได้อย่างมีประสิทธิภาพ ดังนั้น วิธีการนี้จึงน่าเชื่อถือและเหมาะสมมากกว่าการใช้ค่า PDI ที่ 55 วันหลังปลูกเพียงอย่างเดียว และสามารถใช้เป็นเครื่องมือสนับสนุนงานด้านการปรับปรุงพันธุ์ข้าวโพดหวานต้านทานโรคได้ในอนาคต

คำสำคัญ: ข้าวโพดหวาน; โรคใบไหม้แผลใหญ่; ระดับความรุนแรงของโรค

บทนำ

โรคใบไหม้แผลใหญ่ (northern corn leaf blight; NCLB) เป็นโรคทางใบที่สำคัญของข้าวโพดมีสาเหตุมา

จากเชื้อรา *Exserohilum turcicum* (Pass.) K.J. Leonard and E.G. Suggs พบครั้งแรกในพื้นที่ปลูกข้าวโพดของประเทศอิตาลีเมื่อปี พ.ศ. 2419 (Atac, 1984) ความรุนแรงของโรค NCLB ส่งผลโดยตรงต่อผลผลิต ประชากรข้าวโพดหวานที่มีการแสดงอาการระดับอ่อนแอต่อโรค NCLB 51-100% ส่งผลให้น้ำหนักฝักสดรวมเปลือกลดลงจาก 1,481 เป็น 1,331 กก./ไร่ (เขavnานและคณะ, 2560) มีรายงานในประเทศอาร์เจนตินา พบว่า ความรุนแรงของโรค NCLB ที่เพิ่มขึ้นทุก 1% ส่งผลให้ผลผลิตลดลงเฉลี่ย 3.2 กก./ไร่ โดยค่าเฉลี่ยของเกณฑ์ความเสียหายทางเศรษฐกิจ (economic damage thresholds) อยู่ที่ 1.09% ขณะที่ค่าเฉลี่ยของเกณฑ์ความเสียหายที่ต้องจัดการ (action damage threshold) อยู่ที่ 0.88% ส่งผลให้เกิดการสูญเสียทางเศรษฐกิจเฉลี่ย 2,472-7,117 บาท/ไร่ (De Rossi et al., 2022)

การประเมินความรุนแรงของโรค NCLB จึงเป็นสิ่งจำเป็นในการวางแผนจัดการโรคอย่างมีประสิทธิภาพ ทั้งในด้านการใช้สารป้องกันกำจัดโรคพืช การคัดเลือกพันธุ์ และการบริหารจัดการโรคที่เหมาะสม โดยทั่วไปสามารถประเมินได้จากค่าดัชนีการเกิดโรค (percentage disease index, PDI) เป็นวิธีที่ได้รับการยอมรับอย่างแพร่หลายในการวิเคราะห์ข้อมูลเชิงปริมาณ และสามารถใช้เป็นเกณฑ์ในการจำแนกระดับความรุนแรงของโรค ซึ่งเป็นข้อมูลเชิงคุณภาพ โดยอ้างอิงค่าที่ได้จาก PDI ตามมาตราส่วนลำดับ (ordinal scale) ซึ่งพิจารณาจากอาการของโรคที่ปรากฏบนพืช (Willoquet et al., 2023) อาการของโรคสามารถตรวจพบได้ทุกช่วงการเจริญเติบโต โดยเฉพาะช่วงท้าย ๆ ของระยะเจริญเติบโตทางลำต้นต้นข้าวโพดหวานอ่อนแอต่อโรคสูง เชื้อรา *E. turcicum* สามารถเข้าทำลายเซลล์พืชได้หลังจากการงอกของคอนิเดีย (Levy and Cohen, 1983) ทำให้เกิดแผลไหม้ หรือแผลเนื้อเยื่อตาย (necrosis lesions) บนใบ ลักษณะของแผลเป็นรูปกระสวย สีฟางหรือ

สีน้ำตาล และมีขอบแผลสีเหลือง ส่งผลให้ประสิทธิภาพการสังเคราะห์แสงลดลง และกระทบต่อการพัฒนาการของช่อดอกตัวผู้ (Stangarlin et al., 2022) เมื่อเข้าสู่ระยะการเจริญเติบโตทางการเจริญพันธุ์ต้นข้าวโพดหวานอ่อนแอต่อโรคสูงพบแผลไหม้ขนาดใหญ่ และอาจส่งผลให้ต้นเหี่ยวตาย ขณะที่ต้นข้าวโพดหวานที่อ่อนแอต่อโรคปานกลาง มักมีอาการแคระแกร็นและพัฒนาการของเมล็ดลดลง ส่งผลให้ผลผลิตลดลงมากกว่า 50% (Setyawan et al., 2016)

Min et al. (2012) ได้ประเมินความรุนแรงของโรค NCLB หลังการปลูกเชื้อรา *E. turcicum* 1 ครั้งเมื่อข้าวโพดอายุ 60 วัน ซึ่งเป็นระยะออกดอกและจำแนกระดับความรุนแรงของโรคเป็น 5 ระดับ ได้แก่ ต้านทานโรคสูง (highly resistant) เกิดโรค 0-3% ต้านทานโรค (resistant) เกิดโรค 4-10% ต้านทานโรคปานกลาง (moderately resistant) เกิดโรค 11-30% อ่อนแอต่อโรคปานกลาง (moderately susceptible) เกิดโรค 31-70% และอ่อนแอต่อโรคสูง (highly susceptible) เกิดโรค มากกว่า 70% อย่างไรก็ตาม เซวานาถและคณะ (2560) ได้ประเมินความรุนแรงของโรคหลังการปลูกเชื้อรา 2 ครั้ง ที่อายุ 28 และ 55 วันหลังปลูก ในข้าวโพดหวานลูกผสม 36 สายพันธุ์ พบว่า การประเมินที่อายุ 28 วัน ข้าวโพดหวานทุกสายพันธุ์มีความต้านทานต่อโรคปานกลาง แต่เมื่ออายุ 55 วัน ข้าวโพดหวานทุกสายพันธุ์กลับอ่อนแอต่อโรคระดับปานกลาง ยกเว้น 2 สายพันธุ์ ได้แก่ สายพันธุ์ CH66C1)-9-311211/HX75C1)-17-221111 และ CH66C1)-9-311211/HX75C1)-8-122111 มีการเกิดโรคต่ำกว่าพันธุ์การค้า (40.9 และ 44.4% ตามลำดับ) สะท้อนให้เห็นว่าการประเมิน 1 ครั้ง อาจไม่เพียงพอ ดังนั้น การคำนวณพื้นที่ใต้กราฟพัฒนาการของโรค (area under the disease progress curve, AUDPC) จากการประเมินโรคหลายครั้ง จึงเหมาะสำหรับการประเมินความรุนแรงของโรคใน

ระดับภาคสนาม ช่วยลดความแปรปรวนของข้อมูล และให้ข้อมูลที่แม่นยำเกี่ยวกับการเจริญเติบโตของเชื้อราก่อโรคและพัฒนาการของโรคในพืช (Jeger and Viljanen-Rollinson, 2001)

แม้ AUDPC สามารถสะท้อนความรุนแรงของโรคตลอดช่วงการเจริญเติบโต แต่ AUDPC เพียงอย่างเดียวไม่เพียงพอสำหรับกำหนดเกณฑ์การจำแนก เนื่องจากไม่สามารถระบุค่าจุดตัด (threshold point) ที่เหมาะสมได้ ดังนั้น จึงใช้การวิเคราะห์กราฟเส้นโค้ง (receiver operating characteristic curve, ROC curve) เพื่อตรวจสอบประสิทธิภาพของ AUDPC ในการจำแนก (Ruopp et al., 2008) โดยมีดัชนี Youden (Youden index) กำหนดจุดตัดที่สมดุลระหว่างค่าความไว (sensitivity) และค่าจำเพาะ (specificity) (Li et al., 2013) สำหรับการจำแนกความรุนแรงของโรคระดับทวิภาค (binary classification) ตามเกณฑ์ที่กำหนด (Lobo et al., 2008) กล่าวคือ ค่า AUDPC ต่ำ บ่งชี้ถึงความต้านทานโรค ขณะที่ค่า AUDPC สูง บ่งชี้ถึงอ่อนแอต่อโรค การใช้ AUDPC ควบคู่กับ ROC curve และดัชนี Youden จะได้ค่าพื้นที่ใต้กราฟเส้นโค้ง (area under the ROC curve, AUC) ซึ่งเป็นตัวบ่งชี้ถึงความแม่นยำของการจำแนก โดยค่า AUC ที่ใกล้ 1 แสดงถึงความสามารถในการจำแนกที่แม่นยำสูงสุด และช่วยกำหนดค่าวิกฤตที่ดีที่สุด (Corbacioğlu and Aksel, 2023) สำหรับการจำแนกสายพันธุ์ระดับต้านทานโรคและอ่อนแอต่อโรคได้อย่างมีประสิทธิภาพ

วัตถุประสงค์ของงานวิจัยนี้เพื่อวิเคราะห์และเปรียบเทียบค่าดัชนีการเกิดโรคและพื้นที่ใต้กราฟพัฒนาการเกิดโรค ในการจำแนกระดับความรุนแรงของโรค NCLB เพื่อสนับสนุนงานด้านการปรับปรุงพันธุ์ข้าวโพดหวานต้านทานโรค NCLB ของประเทศไทยในอนาคตต่อไป

อุปกรณ์และวิธีการ

1. การเตรียมเชื้อรา *E. turcicum*

เก็บตัวอย่างใบข้าวโพดหวานที่แสดงอาการของแผลไหม้ของโรค NCLB ช่วงเดือน ก.พ. 2565 ที่มักพบอาการแผลไหม้รุนแรง จากแหล่งปลูกข้าวโพดหวานไร่เกษตรกร จ. เชียงใหม่ นำมาแยกเชื้อราโดยวิธี tissue transplanting และเลี้ยงเพิ่มปริมาณที่ห้องปฏิบัติการโรคพืช ศูนย์วิจัยพืชไร่ชัยนาท จากนั้นทำการเลี้ยงเชื้อราบนอาหาร potato dextrose agar ก่อนย้ายลงบนเมล็ดข้าวฟ่างที่ผ่านการฆ่าเชื้อจุลินทรีย์ แล้วนำมาบ่มที่อุณหภูมิ 25° ซ. จนเชื้อราเจริญเติบโตเต็มที่

2. การเตรียมตัวอย่างข้าวโพดหวาน

ปลูกข้าวโพดหวานลูกผสมตัวเองชั่วที่ 6 แบ่งเป็น 2 ประชากร ได้แก่ CH66C1 38 สายพันธุ์ และ HX75C1 46 สายพันธุ์ ซึ่งเป็นเชื้อพันธุ์กรรมสำหรับสร้างลูกผสมข้าวโพดหวานรุ่นใหม่ (ฉลองและคณะ, 2567) นอกจากนี้ มีข้าวโพดหวานลูกผสมสายพันธุ์การค้า 8 สายพันธุ์ ได้แก่ พันธุ์ กวก. สงขลา84-1 (DOA Song KLa84-1) อินทรี 2 (Insee2) ไฮบริกซ์ 3 (Hibrix3) ไฮบริกซ์59 (Hibrix59) ซูการ์75 (Sugar75) หวาน1351 (Wan1351) หวาน1796 (Wan1796) และหวาน 56 (Wan56) เป็นสายพันธุ์เปรียบเทียบ

ดำเนินการที่ศูนย์วิจัยพืชไร่เชียงใหม่ ระหว่างเดือน ธ.ค. 2564 ถึง ก.พ. 2565 โดยปลูกข้าวโพดหวานพันธุ์ไฮบริกซ์3 (อ่อนแอต่อโรค) เป็นแถวคู่อ้อมรอบแปลงทดสอบเพื่อเป็นแหล่งแพร่กระจายเชื้อ เมื่อมีอายุ 3 สัปดาห์ ทำการปลูกเชื้อราโดยหยอดเมล็ดข้าวฟ่างที่มีเชื้อราเจริญปกคลุมเต็มที่ลงบนยอดต้นข้าวโพด หลังจากปลูกเชื้อรา 2 สัปดาห์ จึงปลูกสายพันธุ์ทดสอบและสายพันธุ์เปรียบเทียบ ในแถวถัดจากต้นข้าวโพดที่แสดงอาการของโรค NCLB วางแผนการทดลองแบบสุ่มในบล็อกสมบูรณ์ 3 ซ้ำ ขนาดหน่วยทดลอง 20 ต้น ยกร่องปลูกเป็นแถวคู่ แถวยาว 2.5 ม. ระยะปลูก 75x20 ซม. 1 ต้น/หลุม ดูแลรักษาตามคำแนะนำของกรมวิชาการเกษตร (2565)

3. การประเมินระดับความรุนแรงของโรค

3.1 การประเมินดัชนีการเกิดโรค

ประเมินพื้นที่ใบเป็นโรค NCLB เมื่อข้าวโพดหวานอายุ 28 วัน (PDI_28DAP) ซึ่งอยู่ในระยะ V6 (ระยะพัฒนาช่อดอกตัวผู้) และเมื่ออายุ 55 วันหลังปลูก (PDI_55DAP) ซึ่งอยู่ในระยะ R1 (ระยะออกไหม) โดยนักวิชาการเกษตร 3 คนแยกอิสระกัน ภายใต้เกณฑ์การให้คะแนนระดับความรุนแรงของโรค 1-9 คะแนน ตาม Hurni et al. (2015) (Table 1)

Table 1 Scoring of northern corn leaf blight incidence useful for assessing corn

Score	Phenotype
1	Plants do not show disease symptoms
2	First small lesion appears on few plants per row and occupies less than 5% of leaf surface
3	Many plants per row present in one leaf level lesions occupying 5-10%
4	Many plants per row present in several leaf level lesions occupying 10-20%
5	Lesions occupying 20-40% of the leaf and start to merge
6	Lesions occupying 40-60% of the leaf surface
7	Lesions occupying 60-80%. Half of the leaf is dry due to disease infection
8	Lesions occupying 80-90%. More than half of the leaf is dry due to disease infection
9	Lesions occupying 90-100%. Nearly the whole plant is dry due to disease infection

ค่าคะแนนที่ได้แต่ละต้นนำมาคำนวณเป็นค่าดัชนีการเกิดโรค ตามวิธีของ Wheeler (1969) จากสูตร 1

$$PDI (\%) = \frac{\text{ผลรวมของ (ระดับความรุนแรงของโรค} \times \text{จำนวนต้นที่พบในแต่ละระดับ)}}{\text{(จำนวนต้นทดสอบทั้งหมด} \times \text{คะแนนระดับความรุนแรงโรคสูงสุด)}} \times 100 \quad (1)$$

ความรุนแรงเฉลี่ยของโรคแต่ละสายพันธุ์
จำแนกโดยค่า PDI อาศัยเกณฑ์ของ Min et al. (2012)
ดัดแปลงจาก 5 ระดับ ปรับเป็น 2 ระดับ ได้แก่ ค่า PDI
0-30% บ่งชี้สายพันธุ์/พันธุ์ที่มีระดับต้านทานต่อโรค และ
ค่า PDI 31-100% บ่งชี้สายพันธุ์ที่มีระดับอ่อนแอต่อโรค

3.2 การคำนวณค่าพื้นที่ใต้กราฟพัฒนาการเกิดโรค
ค่า AUDPC_28_55DAP คำนวณตามวิธีของ
Campbell and Madden (1990) ที่ประเมินอาการ
เริ่มต้นที่ 28 และสิ้นสุดที่ 55 หลังปลูก จากสูตร 2

$$AUDPC = \sum \frac{(y_i + y_{i+1})}{2} \times (t_{i+1} - t_i) \quad (2)$$

โดยที่ y_i = ระดับความรุนแรงของโรคที่ 28 วัน
 y_{i+1} = ระดับความรุนแรงของโรคที่ 55 วัน
 t_{i+1} = ประเมินโรคเมื่อวันที่ 55 วัน
 t_i = ประเมินโรคเมื่อวันที่ 28 วัน

3.3 การวิเคราะห์กราฟ ROC curve ใช้เพื่อ
ประเมินความแม่นยำของตัวแปรที่ใช้จำแนกระดับ
ความรุนแรงของโรค โดยในงานวิจัยนี้ได้จำแนก
สายพันธุ์/พันธุ์ข้าวโพดหวานออกเป็น 2 กลุ่ม คือกลุ่ม

ต้านทานต่อโรคและกลุ่มอ่อนแอต่อโรค แล้วใช้ค่า
ดัชนี Youden (Youden index; J) เพื่อหาค่าจุดตัด
ที่เหมาะสม (Fkih and Omri, 2012) จากสูตร 3

$$J = [\text{ค่าความไว (sensitivity)} + \text{ค่าจำเพาะ (specificity)}] - 1 \quad (3)$$

โดยที่ ค่าความไว = $TP / (TP + FN)$
ค่าจำเพาะ = $TN / (TN + FP)$
TP (true positive) = ประเมินโรคพบว่าเป็นโรค และเป็นโรคจริง
TN (true negative) = ประเมินโรคพบว่าเป็นโรค และไม่เป็นโรคจริง
FP (false positive) = ประเมินโรคพบว่าเป็นโรค แต่ไม่ปรากฏว่าเป็นโรคจริง หรือ ผลบวกกลาง
FN (false negative) = ประเมินโรคพบว่าเป็นโรค แต่ปรากฏว่าเป็นโรคจริง หรือ ผลลบกลาง

4. การวิเคราะห์สถิติ

4.1 การจัดกลุ่มสายพันธุ์ตามระดับความ
รุนแรงของโรค NCLB: ค่า PDI_28DAP PDI_55DAP
และ AUDPC_28_55DAP ปรับให้อยู่ในช่วง 0-1 (normalize)
โดย 0 หมายถึง ต้านทานสูงสุดต่อโรค NCLB ขณะที่ 1
หมายถึง อ่อนแอต่อโรคสูงสุด จากนั้นจัดกลุ่มแบบลำดับ

ชั้นด้วยวิธี Ward's linkage และคำนวณระยะห่างระหว่าง
ข้อมูลด้วย Euclidean distance แสดงผลลัพธ์ในรูปแบบ
ของแผนภาพ heatmap

4.2 การทดสอบไคสแควร์: ทดสอบความเป็น
อิสระในการจำแนกระดับความต้านทานของข้าวโพด
หวานที่ได้จาก PDI และ AUDPC โดยเปรียบเทียบค่า

สังเกตกับค่าคาดหวัง ใช้การทดสอบข้อมูลจำแนก 2 ทาง หรือตารางการถัวขนาด 2x2 โดยกำหนดตัวแปรที่ 1 (row) เป็นกลุ่มสายพันธุ์ที่จัดจำแนกด้วยค่า AUDPC_28_55DAP และตัวแปรที่ 2 (column) เป็นกลุ่มสายพันธุ์ที่จัดจำแนกด้วยค่า PDI_55DAP การคำนวณค่าไคสแควร์ทำได้โดยการเปรียบเทียบระหว่างค่าสังเกตและค่าคาดหวัง ตามวิธีของ Rahman et al. (2025)

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. การประเมินดัชนีการเกิดโรคและการจำแนก ระดับความรุนแรง

1.1 ดัชนีการเกิดโรค

ค่า PDI_28DAP และ PDI_55DAP พบมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ แสดงให้เห็นว่าระดับความรุนแรงของโรคมีการเปลี่ยนแปลงตามระยะการเจริญเติบโตของข้าวโพดหวาน PDI_28DAP มีค่า 2.6-58.3% ส่วน PDI_55DAP มีค่า 25.3-64.5%

1.2 การจำแนกระดับความรุนแรงของโรค ด้วยค่า PDI

การจำแนกระดับความรุนแรงของโรค NCLB ด้วยค่า PDI_28DAP พบว่า ข้าวโพดหวานลูกผสมตัวเอง ข้าวที่ 6 จำแนกให้อยู่ในกลุ่มต้านทานต่อโรค 65 สายพันธุ์ มีค่า PDI ระหว่าง 13.8-29.7% สายพันธุ์เปรียบเทียบ มี 2 สายพันธุ์ PDI ระหว่าง 2.6-26.2% ขณะที่กลุ่มอ่อนแอต่อโรค ข้าวโพดหวานลูกผสมตัวเอง ข้าวที่ 6 มี 19 สายพันธุ์ ค่า PDI ระหว่าง 30.3-53.8% และสายพันธุ์เปรียบเทียบมี 6 สายพันธุ์ มีค่า PDI ระหว่าง 32.2-58.3% ส่วนค่า PDI_55DAP พบว่า ข้าวโพดหวานลูกผสมตัวเอง ข้าวที่ 6 จัดอยู่ในกลุ่มต้านทาน 8 สายพันธุ์ มีค่า PDI ระหว่าง 25.3-30.0% ขณะที่กลุ่มอ่อนแอ ข้าวโพดหวานลูกผสมตัวเอง ข้าวที่ 6 มี 19 สายพันธุ์ ค่า PDI ระหว่าง 31.3-55.4% และสายพันธุ์เปรียบเทียบทั้ง 8 สายพันธุ์ มีค่า PDI ระหว่าง 44.8-64.5% แสดงให้เห็นว่าเมื่อระยะ

เวลาการเกิดโรคนานขึ้น ค่า PDI ของทุกสายพันธุ์ มีแนวโน้มเพิ่มขึ้น สะท้อนถึงพัฒนาการและการลุกลามของโรคในระยะ R1 ซึ่งเป็นช่วงที่พืชมีความไวต่อการติดเชื้อสูง ซึ่งอาจเป็นผลมาจากพันธุกรรมและปัจจัยทางสภาพแวดล้อมที่มีอิทธิพลต่อการสะสมการเกิดโรค โดยเฉพาะสภาพแวดล้อมที่มีความชื้นสูงนาน 6 ชม. ช่วยให้เชื้อรา *E. turcicum* เจริญเติบโตและเข้าทำลายสู่ต้นข้าวโพดได้ง่ายขึ้น (Levy and Pataky, 1992; Smith et al., 2004)

1.3 การจำแนกระดับความรุนแรงของโรค โดยวิธีใช้ AUDPC ร่วมกับ ROC curve และดัชนี Youden

ค่า AUDPC_28_55DAP พบว่า ข้าวโพดหวานลูกผสมตัวเอง ข้าวที่ 6 มีค่าอยู่ในช่วง 566-1,529 ส่วนสายพันธุ์เปรียบเทียบอยู่ในช่วง 664-1,722 การวิเคราะห์ ROC curve ซึ่งแสดงความสัมพันธ์ระหว่างค่าความไวและอัตราผลบวกวง โดย AUC มีค่า 1 แสดงถึงความแม่นยำสูง (Figure 1) ดัชนี Youden มีค่า 910.88 ซึ่งหมายความว่า AUDPC < 910.88 บ่งชี้ว่าสายพันธุ์นั้นอยู่ในกลุ่มต้านทานต่อโรค ขณะที่ค่า AUDPC > 910.88 อยู่ในกลุ่มอ่อนแอ โดยที่ค่าความไวและค่าความจำเพาะที่ได้อยู่ในระดับสูง แสดงว่าจุดตัดนี้มีประสิทธิภาพในการจำแนกสายพันธุ์ต้านทานโรคและอ่อนแอต่อโรคได้อย่างถูกต้อง ซึ่งสอดคล้องกับหลักเกณฑ์ของ Corbacioglu and Aksel (2023) ที่ระบุว่า AUC > 0.80 แสดงถึงความสามารถในการจัดจำแนกได้ดี และค่า AUC = 1.00 แสดงว่าเป็นการจัดจำแนกได้อย่างสมบูรณ์ นอกจากนี้ Thapa et al. (2020) รายงานว่า การใช้ค่า AUDPC ร่วมกับการวิเคราะห์ ROC curve จากข้อมูลภาพถ่าย สามารถจำแนกโรคทางใบได้อย่างแม่นยำถึง 97% แสดงให้เห็นถึงศักยภาพของการวิเคราะห์รูปแบบนี้ ขณะที่ Hajian-Tilaka (2018) ได้อธิบายว่าจุดตัดที่เหมาะสมที่สุด

คือ จุดที่มีความไวสูง ใกล้ 1 และผลบวกหลง ใกล้ 0 ส่วนค่า AUC ที่มากกว่า 0.5 ถือว่าจำแนกได้ดี โดยเฉพาะ $AUC > 0.8$ ถือว่ามีประสิทธิภาพสูง และ $AUC = 1.0$ แสดงถึงการจำแนกได้อย่างสมบูรณ์แบบ (Yang and Berdine, 2017)

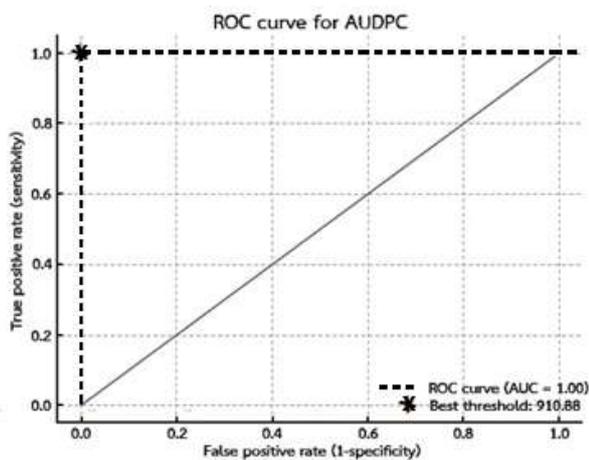


Figure 1 Receiver operating character (ROC) curve for AUDPC, with the optimal threshold set at 910.88 (asterisk), with provides the highest sensitive and specificity. The area under the curve (AUC) is 1.00 (dashed line), indicating perfect discrimination between resistant and susceptible groups

ข้าวโพดหวานลูกผสมตัวเองชั่วที่ 6 มีค่า AUDPC ระหว่าง 605-898 จัดอยู่ในกลุ่มต้านทานต่อโรค 43 สายพันธุ์ ส่วนที่เหลือ 41 สายพันธุ์ มีค่า AUDPC ระหว่าง 911-1,529 จัดอยู่ในกลุ่มอ่อนแอ ขณะที่สายพันธุ์เปรียบเทียบมีพันธุ์อินทรี 2 เท่านั้น (ค่า AUDPC = 664) ที่อยู่ในกลุ่มต้านทาน ส่วนสายพันธุ์อื่น ๆ อยู่ในกลุ่มอ่อนแอ (ค่า AUDPC ระหว่าง 1,269-1,722) แสดงให้เห็นว่า การจำแนกความรุนแรงของโรค NCLB โดยใช้ค่า AUDPC ร่วมกับ ROC curve และดัชนี Youden

มีประสิทธิภาพในการประเมินและจำแนกระหว่างสายพันธุ์ต้านทานและสายพันธุ์อ่อนแอ

2. การจัดกลุ่มพันธุ์ตามความรุนแรงของโรค

เมื่อเปรียบเทียบ PDI_28DAP PDI_55DAP และ AUDPC ด้วยแผนภาพ heatmap พบว่า ค่า AUDPC มีความสอดคล้องกับค่า PDI_55DAP มากกว่าค่า PDI_28DAP (Figure 2) ซึ่งแสดงให้เห็นว่าการประเมินความรุนแรงของโรคในระยะปลายผลแม่นยำกว่าในระยะต้น และสามารถแบ่งกลุ่มข้าวโพดหวานออกเป็น 3 กลุ่มหลัก ดังนี้

กลุ่มที่ 1 อยู่ส่วนบนของแผนภาพประกอบด้วยข้าวโพดหวาน 30 สายพันธุ์ ที่มีค่าของทั้ง PDI_28DAP PDI_55DAP และ AUDPC อยู่ในระดับต่ำทั้งหมด แสดงถึงความต้านทานต่อโรค NCLB ผลการจำแนกจากแถบ R/S annotation พบว่า PDI_28DAP และ AUDPC มีแถบแสดงความต้านทานครบทั้ง 30 สายพันธุ์ ขณะที่ PDI_55DAP ให้ผลเป็นต้านทานต่อโรค 8 สายพันธุ์ และอ่อนแอต่อโรค 22 สายพันธุ์

กลุ่มที่ 2 อยู่บริเวณตอนกลางของแผนภาพประกอบด้วยข้าวโพดหวาน 47 สายพันธุ์ มีค่า PDI_28DAP ต่ำ แต่ PDI_55DAP และ AUDPC สูง แสดงแนวโน้มว่าต้านทานต่อโรคในช่วงต้น แต่มีความไวต่อโรคในระยะปลาย ผลจาก R/S annotation พบว่า PDI_28DAP จำแนกเป็นสายพันธุ์ต้านทาน 16 สายพันธุ์ และอ่อนแอ 31 สายพันธุ์ ลักษณะดังกล่าวแสดงถึงการเปลี่ยนแปลงการตอบสนองต่อโรคตามช่วงอายุของพืช ซึ่งเมื่อเข้าสู่ระยะออกดอก กลไกความต้านทานอาจลดลง

กลุ่มที่ 3 อยู่ส่วนล่างสุดของแผนภาพประกอบด้วยข้าวโพดหวาน 15 สายพันธุ์ ที่มีค่าสูงในทุกตัวแปร และส่วนใหญ่มีแถบแสดงความอ่อนแอต่อโรค จึงจัดอยู่ในกลุ่มอ่อนแอต่อโรค

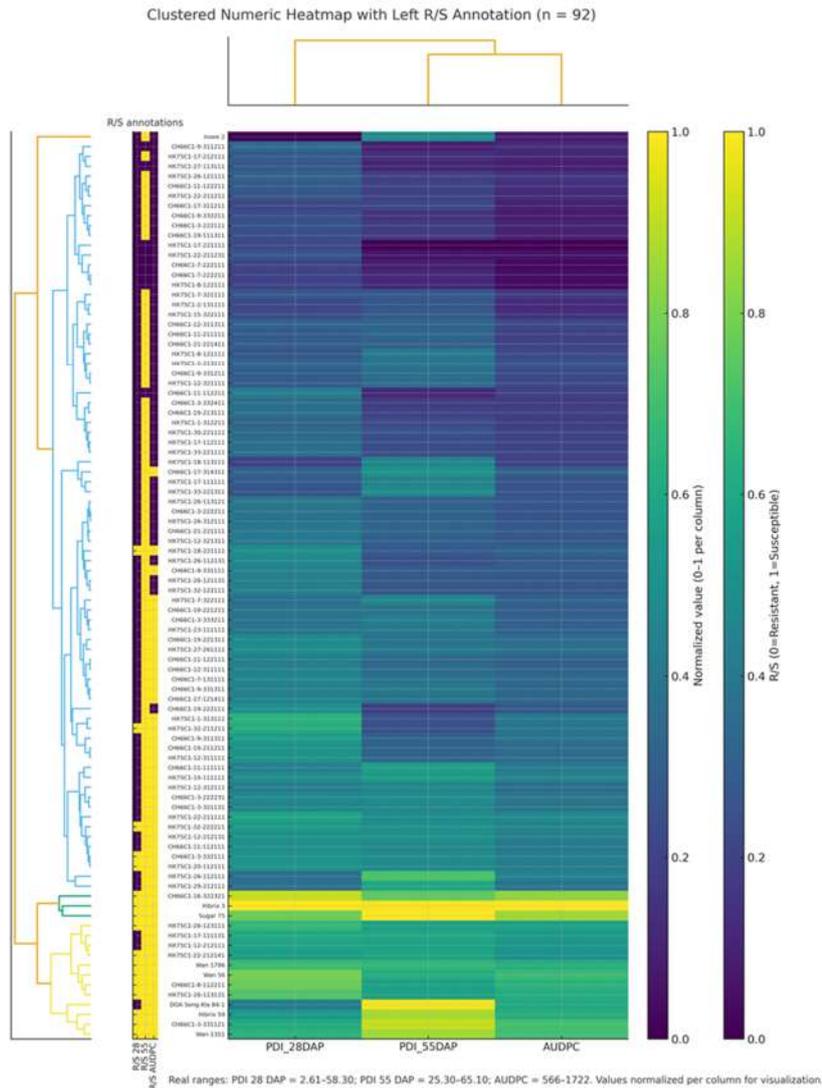


Figure 2 Clustered heatmap illustrating the grouping of sweet corn genotypes based on disease severity indices of northern corn leaf blight (NCLB), including PDI at 28 days after planting (PDI_28DAP), PDI at 55 days after planting (PDI_55DAP) and AUDPC. All values were normalized to a 0-1 scale (0 = resistant, 1 = susceptible) for cross-trait comparison. The left-side bar indicates resistant (R) and susceptible (S) classification. Hierarchical clustering was performed using Ward’s linkage and Euclidean distance

ผลการวิเคราะห์ทั้งชี้ว่าการประเมินความรุนแรงของโรคในระยะต้น หรือที่ 28 วันหลังปลูกไม่สามารถสะท้อนระดับความต้านทานต่อโรคที่แท้จริงของแต่ละสายพันธุ์ได้ ผลนี้ไม่สอดคล้องกับรายงานของประชุมและคณะ (2544) ที่ระบุว่า การประเมินที่ 28 วันหลังการปลูกเชื่อ เป็นช่วงเวลาที่เหมาะสมในการคัดเลือกสายพันธุ์ต้านทานต่อโรค

เนื่องจากอาการของโรค NCLB มักปรากฏชัดในระยะหลังออกดอกถึงใบพัฒนาเต็มที่ โดย Smith et al. (2004) รายงานว่าเชื้อรา *E. turcicum* ต้องใช้ระยะพักตัว 10-14 วัน ในสายพันธุ์อ่อนแอต่อโรค และ 20 วัน ในสายพันธุ์ต้านทานต่อโรค ดังนั้น การประเมินที่ 28 วัน อาจยังไม่สะท้อนกลไกการตอบสนองของพืชได้เต็มที่

3. การเปรียบเทียบการจำแนกระดับความรุนแรงของโรคด้วย PDI และ AUDPC

จาก Figure 2 สามารถแยกกลุ่มของ PDI_28DAP ออกจาก PDI_55DAP และ AUDPC ซึ่งอยู่ในกลุ่มเดียวกัน จึงทดสอบไคสแควร์ PDI_55DAP และ AUDPC เพื่อยืนยันความแม่นยำของการจำแนกกลุ่มด้านทานและอ่อนแอต่อโรค NCLB ผลการทดสอบแสดงให้เห็นว่าการจำแนกระดับความรุนแรง

ของโรค NCLB ทั้งสองวิธีมีความแตกต่างกันอย่างมีนัยสำคัญทางสถิติ (chi-square value = 9.17, $p < 0.01$) จำนวนข้าวโพดหวานที่จัดให้อยู่ในกลุ่มด้านทานทั้งจากค่า PDI_55DAP และค่า AUDPC มีเพียง 8 สายพันธุ์ ขณะที่สายพันธุ์ที่จัดให้ด้านทานจากค่า AUDPC แต่จัดเป็นอ่อนแอจากค่า PDI_55DAP จำนวน 37 สายพันธุ์ แสดงให้เห็นถึงความคลาดเคลื่อนในการจำแนกกลุ่มระหว่างตัวชี้วัดทั้งสอง (Table 2)

Table 2 Chi-square test of association between AUDPC and PDI of 55 days after planting

AUDPC	PDI_55 DAP: Resistant		PDI_55 DAP: Susceptible		Total of AUDPC
	Observed	Expected	Observed	Expected	
AUDPC: resistant	8	3.91	37	41.09	45
AUDPC: susceptible	0	4.09	47	42.91	47
Total of PDI-55	8		84		92
Chi-square value			9.17		
p-value			0.0025		

AUDPC มีข้อได้เปรียบในการสะท้อนพลวัตของการพัฒนาโรคตลอดช่วงเวลาได้ดีกว่า PDI ซึ่งเป็นค่าประเมินในจุดเวลาเดียว แม้ผลการทดสอบไคสแควร์แสดงความแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญแต่ความแตกต่างนี้สามารถอธิบายได้จากธรรมชาติของการประเมินที่ต่างกัน กล่าวคือ ค่า PDI_55DAP ประเมินเฉพาะอาการของโรคในระยะปลาย ขณะที่ค่า AUDPC รวมผลสะสมของการพัฒนาโรคตั้งแต่เริ่มต้นจนถึงระยะออกใหม่ ซึ่งให้ภาพรวมของการตอบสนองต่อโรคที่สมบูรณ์กว่า

เมื่อเปรียบเทียบระหว่างการใช้ค่า PDI_55DAP และ AUDPC พบว่า แม้ว่าค่า PDI จะเป็นวิธีที่ใช้สะดวก แต่สะท้อนเฉพาะ ณ เวลาที่ประเมินเท่านั้น แต่การใช้ค่า AUDPC ร่วมกับ ROC curve และดัชนี Youden สามารถประเมินการสะสมโรคได้ตลอดช่วงฤดูปลูก และกำหนดจุดตัดที่ชัดเจนในการจำแนกกลุ่มที่ด้านทานและอ่อนแอได้อย่างเป็นระบบ อย่างไรก็ตาม การใช้ AUDPC ยังไม่สามารถใช้เป็นค่ามาตรฐานในการ

จำแนกระดับความรุนแรงของโรค NCLB ได้ เนื่องจากค่าวิกฤตจาก ROC curve อาจแปรผันตามปัจจัย เช่น พันธุกรรมข้าวโพดหวานและความเปลี่ยนแปลงของสภาพแวดล้อมในแต่ละฤดูปลูก (Wilson et al., 2017) ความแตกต่างของเชื้อ *E. turcicum* รวมถึงการจัดการแปลง (Bankole et al., 2023) ช่วงเวลาที่เกิดการติดเชื้อรา พื้นฐานพันธุกรรมของพืช สภาพแวดล้อมและปัจจัยการผลิต ความหนาแน่นของเชื้อราสาเหตุ การตอบสนองในการป้องกันตนเองของพืช เป็นปัจจัยที่สำคัญที่ทำให้เกิดความแตกต่างระหว่างระดับความรุนแรงของโรค (Duffy et al., 2003; Pokhrel, 2021) ดังนั้น จึงควรมีการศึกษายืนยันในหลายพื้นที่และหลายฤดูกาล เพื่อเพิ่มความแม่นยำและความเหมาะสมของวิธีการ และเพื่อให้การประเมินความถูกต้องของวิธีการครบถ้วนมากขึ้นจึงแนะนำให้พิจารณาสถิติอื่นเพิ่มเติม เช่น accuracy sensitivity specificity หรือ Cohen's kappa

สรุปผลการทดลอง

การประเมินและการจำแนกระดับความรุนแรงของโรคใบไหม้แผลใหญ่ด้วย AUDPC ร่วมกับ ROC curve และดัชนี Youden มีประสิทธิภาพและมีความน่าเชื่อถือสูงกว่าการใช้ PDI เนื่องจากสามารถกำหนดค่าวิกฤตที่ชัดเจนในการจำแนกระดับความรุนแรงของโรค NCLB ได้ ค่า AUDPC ที่ได้มีค่า AUC=1 หรือมีความสามารถในการจำแนกสูง แต่ค่าวิกฤตที่กำหนดจาก ROC curve อาจแปรผันได้ตามพันธุกรรมและสภาพแวดล้อม จึงควรใช้ AUDPC ร่วมกับ ROC curve และดัชนี Youden เป็นเครื่องมือและมีศักยภาพในการสนับสนุนงานวิจัยการปรับปรุงพันธุ์ข้าวโพดหวานด้านทานโรค NCLB ประเทศไทยในอนาคต

คำขอบคุณ

ขอขอบคุณศูนย์วิจัยพืชไร่ขอนแก่น กรมวิชาการเกษตร และทุนสนับสนุนจากกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (ววน.)

เอกสารอ้างอิง

กรมวิชาการเกษตร. 2565. การผลิตข้าวโพดหวาน. แหล่งข้อมูล: <https://www.doa.go.th/hort/wp-content/uploads/2020/01/การผลิตข้าวโพดหวาน.pdf>. สืบค้น: 9 กันยายน 2565.

ฉลอง เกิดศรี ภาณุวัฒน์ ศิลปศักดิ์ขจร ธีรวิทย์ วงศ์วรัตน์ สุพรรณณี เป็งคำ เขาวนาถ พฤทธิเทพ วรชมน มงคล พงศ์พันธุ์ เบ้าทอง และธีรยุทธ อุดมสันติสุข. 2567. การปรับปรุงพันธุ์ข้าวโพดหวานลูกผสมต้านทานโรคใบไหม้แผลใหญ่. หน้า 21-27. ใน: เอกสารประกอบการสัมมนาวิชาการปี 2567 ศูนย์วิจัยพืชไร่ชัยนาท สถาบันวิจัยพืชไร่และพืชทดแทนพลังงาน. 31 ก.ค.-2 ส.ค. 2567. ณ บึงฉวากรีสอร์ท, สุพรรณบุรี.

เขาวนาถ พฤทธิเทพ กัลยา วิถี วรชมน มงคล กิตติภาพ วายุภาพ พิระวรรณ พัฒนวิภาส จิราลักษณ์ ภูมิไธสง ชูชาติ บุญศักดิ์ และสุนามางามผ่องใส. 2560. ผลกระทบ

ของโรคใบไหม้แผลใหญ่ที่เกิดจากเชื้อรา *Exserohilum turcicum* ต่อคุณภาพผลผลิตและคุณภาพของข้าวโพดหวาน. หน้า 235-243. ใน: เอกสารประกอบการประชุมวิชาการข้าวโพดและข้าวฟ่างแห่งชาติ ครั้งที่ 38. กรมวิชาการเกษตร. 25-27 กรกฎาคม 2560. ณ โรงแรมแกรนด์ฮิลล์ รีสอร์ท แอนด์ สปา, นครสวรรค์.

ประชุม จุฬารวณะ ธรรมศักดิ์ สมมาตย์ อุดม ภูพิพัฒน์ และ จิรพันธ์ ไหมยมสูงเนิน. 2544. การคัดเลือกพันธุ์ต้านทานข้าวโพดใบไหม้แผลใหญ่. หน้า 101. ใน: ครอบรอบสิบปีสถาบันอินทรีจันทร์สถิตย์เพื่อการค้นคว้าและพัฒนาพืชศาสตร์. มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์. กรุงเทพฯ.

Atac, A. 1984. Survey of fungus diseases of second crop maize in the Mediterranean region. *Bitki Koruma Bultini*. 24(3): 137-143.

Bankole, F.A., B. Badu-Apraku, A.O. Salami, T.D. Falade, R. Bandyopadhyay and A. Ortega-Beltran. 2023. Variation in the morphology and effector profiles of *Exserohilum turcicum* isolates associated with the Northern Corn Leaf Blight of maize in Nigeria. *BMC Plant Biology*. 23(1): 386.

Campbell, C.L. and L.V. Madden. 1990. Introduction to Plant Disease Epidemiology. John Wiley & Sons. New York. USA. 532 p.

Corbacioglu, S.K. and G. Aksel. 2023. Receiver operating characteristic curve analysis in diagnostic accuracy studies: A guide to interpreting the area under the curve value. *Turkish Journal of Emergency Medicine*. 23(4): 195-198.

De Rossi, R.L., F.A. Guerra, M.C. Plazas, E.E. Vuetic, E. Brücher, G.D. Guerra and E.M. Reis. 2022. Crop damage, economic losses, and the economic damage threshold for northern corn leaf blight. *Crop Protection*. 154: 105901.

Duffy, B., A. Schouten and J.M. Raaijmakers. 2003. Pathogen self-defense: Mechanism to counteract microbial antagonism. *Annual Review of Phytopathology*. 41(1): 501-538.

Fkih, F. and M.N. Omri. 2012. Information retrieval from unstructured web text document based

- on automatic learning of the threshold. *International Journal of Information Retrieval Research*. 2(4): 12-30.
- Hajian-Tilaka, K. 2018. The choice of methods in determining the optimal cut-off value for quantitative diagnostic test evaluation. *Statistical Methods in Medical Research*. 27(8): 2374-2383.
- Hurni, S., D. Scheuermann, S.G. Krattinger, B. Kessel, T. Wicker, G. Herren, M.N. Fitze, J. Breen, T. Presterl, M. Ouzunova and B. Keller. 2015. The maize disease resistance gene *Htn1* against northern corn leaf blight encodes a wall-associated receptor-like kinase. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)*. 112(28): 8780-8785.
- Jeger, M.J. and S.L.H. Viljanen-Rollinson. 2001. The use of the area under the disease-progress curve (AUDPC) to assess quantitative disease resistance in crop cultivars. *Theoretical and Applied Genetics*. 102(1): 32-40.
- Levy, Y. and J.K. Pataky. 1992. Epidemiology of northern leaf blight on sweet corn. *Phytoparasitica*. 20(1): 53-66.
- Levy, Y. and Y. Cohen. 1983. Biotic and environmental factors affecting infection of sweet corn with *Exserohilum turcicum*. *Phytopathology*. 73(5): 722-725.
- Li, D.L., F. Shen, Y. Yue, J.X. Peng and P.Y. Chen. 2013. Weighted youden index and its two-independent-sample comparison based on weighted sensitivity and specificity. *Chinese Medical Journal*. 126(6): 1150-1154.
- Lobo, J.M., A. Jimenez-Valverde and R. Real. 2008. AUC: A misleading measure of the performance of predictive distribution models. *Global Ecology and Biogeography*. 17(2): 145-151.
- Min, J., Z. ChunYu, H. Khalid, L. Nan, S. Quan, M. Qing, W. SuWen and L. Feng. 2012. Pyramiding resistance gene to northern leaf blight and head smut in maize. *International Journal of Agriculture and Biotechnology*. 14(3): 430-434.
- Pokhrel, B. 2021. Effects of environment factors on crop disease. *Journal of Plant Pathology and Microbiology*. 12(5): 553.
- Rahman, H.A., A.A. Noraidi, A.N.H. Khalid, A.Z. Mohamad-Adam, N.H. Zahari and N.E. Tuming. 2025. Practical guide to calculate sample size for chi-square in biomedical research. *BMC Medical Research Methodology*. 25: 144.
- Ruopp, M.D., N.J. Perkins, B.W. Whitcomb and E.F. Schisterman. 2008. Youden index and optimal cut-point estimated from observation affected by a lower limit of detection. *Biometrical Journal: Journal of Mathematical Methods in Biosciences*. 50(3): 419-430.
- Setyawan, B., I. Suliansyah, A. Anwar and E. Swasti. 2016. Resistance of eleven new hybrid maize genotypes to turicum leaf blight (*Exserohilum turcicum*). *Biodiversitas*. 17(2): 604-608.
- Smith, C.W., J. Betrán and E.C. Runge. 2004. *Corn: Origin, History, Technology, and Production* volume 4. John Wiley & Sons, USA.
- Stangarlin, J.R., E.L. Tartaro and S.F. Pascholati. 2022. Characterization of *Exserhylum turcicum* infection sites in maize genotypes. *Revista Caatinga*. 35(1): 1-13.
- Thapa, R., K. Zhang, N. Snanely, S. Belongie and A. Khan. 2020. The plant pathology challenge 2020 data set to classify foliar disease of apples. *Applications in Plant Sciences*. 8(9): e11390.
- Wheeler, B.E.J. 1969. *An Introduction to Plant Diseases*. John Wiley and Sons Ltd., London. 374 p.
- Willocquet, L., S. Savary and K.P. Singh. 2023. Revisiting the use of disease index and of disease scores in plant pathology. *Indian Phytopathology*. 76(3): 909-914.
- Wilson, C.R., N.W. Davies, R. Corkrey, A.J. Wilson, A.M. Mathews and G.C. Westmore. 2017. Receiver operating characteristic curve analysis determines association of individual potato operating characteristic curve analysis determines association of individual potato foliage volatiles with onion thrips preference, cultivar and plant age. *PLoS ONE*. 12(7): e0181831.
- Yang, S. and G. Berdine. 2017. The receiver operating characteristic (ROC) curve. *The Southwest Respiratory and Critical Care Chronicles*. 5(19): 34-36.

การชักนำสารและกลไกที่เกี่ยวข้องกับความต้านทานต่อศัตรูพืชในยาสูบ
ด้วยสารสกัดสโคพอเลตินจากผลยอบ้าน

Inducing Substances and Plant Defense Mechanisms Related to Pest Resistance
in Tobacco with Scopoletin Extracts from the *Morinda citrifolia* L. (Noni) Fruits

เขมมิการ์ โคมพัตร^{1/*} เยาวภา สุขพรมมา^{2/} ปรียากกร ฤทธิสุนทร^{1/} ฐิติกร พรหมบรรจง^{3/} วิมลวรรณ วัฒนวิจิตร^{4/}
Khemmikar Khompatara^{1/*} Yaowapa Sukpondma^{2/} Pariyakorn Ritthisoonthorn^{1/}
Thitikorn Prombanchong^{3/} Wimonwan Wattanawichit^{4/}

Received 20 Apr. 2025/Revised 17 Sep. 2025/Accepted 7 Oct. 2025

ABSTRACT

Scopoletin is a secondary metabolite found in many plants. It possesses antioxidant properties and inhibits the growth of microorganisms. This research aimed to extract scopoletin from Thai noni (*Morinda citrifolia* L.) fruit to investigate its potential role in inducing compounds and mechanisms related to pest resistance in tobacco plants. The extraction was performed using the maceration method with ethanol as the solvent. The extract was then separated by column chromatography using silica gel as the stationary phase and a mixture of ethyl acetate and hexane (0–60% v/v) as the mobile phase. The presence of scopoletin in each fraction was detected by TLC under UV light at 365 nm. The fraction containing scopoletin was further purified using 2% methanol in dichloromethane as the mobile phase. The purified compound was identified using TLC, UV-visible spectroscopy, Fourier transform infrared spectroscopy and nuclear magnetic resonance spectroscopy. The results confirmed that the obtained yellow crystal were scopoletin, with a yield of 0.038±0.01%. A resistance induction assay was performed by infiltrating scopoletin into tobacco leaves at concentrations of 100, 500 and 1,000 µM. The treatment stimulated the production of salicylic acid and increased the activities of phenylalanine ammonia-lyase, glucanase and peroxidase, with peak

^{1/} สำนักวิจัยและพัฒนาการเกษตรเขตที่ 8 อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110

^{1/} Office of Agricultural Research and Development Region 8, Hat Yai, Songkhla 90110, Thailand

^{2/} คณะวิทยาศาสตร์ มหาวิทยาลัยสงขลานครินทร์ อ.หาดใหญ่ จ.สงขลา 90110

^{2/} Faculty of Science, Prince of Songkla University. Hat Yai, Songkhla 90110, Thailand

^{3/} คณะวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี มหาวิทยาลัยเทคโนโลยีราชมงคลศรีวิชัย วิทยาเขตนครศรีธรรมราช จ.นครศรีธรรมราช 80110

^{3/} Faculty of Science and Technology, Rajamangala University of Technology Srivijaya, Nakhon Si Thammarat campus, Nakhon Si Thammarat 80110, Thailand

^{4/} กองวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร อ.พหลโยธิน จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

^{4/} Postharvest and Processing Research and Development Division, Phaholyothin Rd., Chatuchak, Bangkok 10900, Thailand

* Corresponding author: kjoy2000@hotmail.com

responses observed at different time points. These findings suggest that scopoletin isolated from Thai noni fruit may functions as a plant elicitor that enhances pest resistance in tobacco by activating signaling molecules and defense-related enzymes.

Keywords: scopoletin; noni fruit; extraction; resistance; plant elicitor

บทคัดย่อ

สโคพอเลตินเป็นสารทุติยภูมิที่พบในพืชหลายชนิด สามารถต้านอนุมูลอิสระและยับยั้งการเจริญของเชื้อจุลินทรีย์ งานวิจัยนี้มีจุดประสงค์เพื่อสกัดแยกสารสโคพอเลตินจากผลยอบ้าน (*Morinda citrifolia* L.) ของไทยและนำมาใช้ชักนำสารและกลไกที่เกี่ยวข้องกับความต้านทานต่อศัตรูพืชในต้นยาสูบ ทำการสกัดสารจากผลยอบโดยวิธีการหมักแช่ด้วยเอทานอล จากนั้นแยกสารสกัดด้วยคอลัมน์โครมาโทกราฟีที่มีซิลิกาเจลเป็นเฟสอยู่กับที่ ชะด้วยสารละลายผสมเอทิลอะซิเตทและเฮกเซน (0-60%v/v) จากนั้นตรวจสอบส่วนย่อยที่แยกได้ด้วยวิธี TLC ภายใต้แสงยูวีที่ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร แล้วแยกส่วนย่อยที่มีสโคพอเลตินให้บริสุทธิ์ด้วยคอลัมน์โครมาโทกราฟี โดยใช้ 2% เมทานอลในไดคลอโรมีเทนเป็นตัวชะพบว่า สโคพอเลตินที่ได้มีผลึกเป็นสีเหลือง ยืนยันความเป็นสโคพอเลตินโดยใช้ TLC UV-visible spectroscopy Fourier transform infrared spectroscopy และ nuclear magnetic resonance spectroscopy โดยมีผลได้ 0.038±0.01% การทดสอบการชักนำความต้านทานด้วยวิธีฉีดสารสโคพอเลตินเข้มข้น 100 500 และ 1,000 ไมโครโมลาร์ ในใบยาสูบ พบว่า สามารถกระตุ้นการผลิตกรดซาลิซิลิก และเพิ่มกิจกรรมของเอนไซม์ฟีนอลอะลานีน แอมโมเนียไลเอส กลูคาเนส และเปอร์ออกซิเดส โดยมีรูปแบบการตอบสนองสูงสุดใน

ช่วงเวลาที่แตกต่างกัน จึงมีความเป็นไปได้ว่าสโคพอเลตินที่สกัดจากผลยอบ้านของไทยมีคุณสมบัติเป็นสารกระตุ้นความต้านทานในต้นยาสูบผ่านการกระตุ้นโมเลกุลสัญญาณและเอนไซม์ที่สำคัญในระบบความต้านทานของพืช

คำสำคัญ: สโคพอเลติน; ผลยอบ้าน; การสกัด; ความต้านทาน; สารกระตุ้นความต้านทานในพืช

บทนำ

ยอบ้าน หรือ noni มีชื่อทางวิทยาศาสตร์ว่า *Morinda citrifolia* L. เป็นไม้ยืนต้น ใบมีสีเขียวเข้ม ผลทรงยาวรี เมื่ออ่อนสีเขียว พอสุกเปลี่ยนเป็นสีขาวนวล กลิ่นแรง มีเมล็ดจำนวนมาก เป็นสมุนไพรพื้นบ้านใช้ประโยชน์ได้ทั้งส่วนใบ ราก และผล (ฉวีรัฐอร, 2563) ส่วนของผลมีสารพฤกษเคมีที่สำคัญหลายชนิด เช่น กรดไขมัน ฟลาโวนอยด์ ลิกแนน แอนทราควิโนน คูมาริน และสโคพอเลติน เป็นต้น สารเหล่านี้มีฤทธิ์ทางชีวภาพที่น่าสนใจ เช่น ฤทธิ์ต้านเชื้อจุลินทรีย์ (Bushnell et al., 1950) ต้านการอักเสบ (Motshakeri and Ghazali., 2015) ต้านอนุมูลอิสระ (Su et al., 2005) ป้องกันมะเร็ง และเสริมสร้างประสิทธิภาพของระบบภูมิคุ้มกันในร่างกาย (Wang and Su, 2001)

สารสโคพอเลติน(scopoletin)หรือ 6-methoxy-7-hydroxycoumarin เป็นสารทุติยภูมิที่พบในผลยอบและพืชหลายชนิด การสังเคราะห์สารทุติยภูมินี้มักเกิดขึ้นผ่านวิถีฟีนิลโพรพานอยด์ ซึ่งมีเอนไซม์ฟีนอลอะลานีนแอมโมเนียไลเอส (phenylalanine ammonialyase; PAL: EC 4.3.1.24) ทำหน้าที่เป็นเอนไซม์แรกในวิถี (Deenamo et al., 2018) วิถีดังกล่าวยังเป็นแหล่งสังเคราะห์สารโมเลกุลสัญญาณในระบบป้องกันตนเอง เช่น กรดซาลิซิลิก (salicylic) ซึ่งเกี่ยวข้องกับการกระตุ้นให้เกิดความต้านทานแบบ systemic acquired resistance (SAR) (Kachroo et al., 2022) โดยมีการส่งสัญญาณ

จากพื้นที่ที่ถูกบุกรุกไปยังพื้นที่ห่างไกลออกไปให้มีการเตรียมความพร้อมรองรับก่อนที่การบุกรุกจะขยายขอบเขต (Huang et al., 2020) โดยการส่งสัญญาณนี้ยังกระตุ้นให้พืชสังเคราะห์โปรตีนในกลุ่ม pathogenesis-related protein (PR-protein) เช่น เปอร์ออกซิเดส (peroxidase; POD: EC 1.11.1.7) หรือ PR-9 ซึ่งทำหน้าที่กำจัดสารพิษที่เกิดในกระบวนการเมทาบอลิซึมของเซลล์ เช่น ไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ ตลอดจนเกี่ยวข้องกับกระบวนการสร้างความแข็งแรงให้กับผนังเซลล์พืช การสังเคราะห์เอนไซม์กลูคาเนส (β -1,3-glucanase; GLU: EC 3.2.1.39) หรือ PR-2 ซึ่งทำหน้าที่ตัดพันธะเบต้า 1,3 กลูโคซิดิก (β -1,3-glucosidic bond) (Du et al., 2021) ซึ่งเป็นโครงสร้างของกลูแคนที่เป็นส่วนประกอบของผนังเซลล์เชื้อราหลายชนิด ทำให้สามารถทำลายเชื้อราที่บุกรุกได้

ในการผลิตทางการเกษตรอย่างยั่งยืน การจำกัดการใช้สารเคมีสังเคราะห์ให้อยู่ในระดับที่จำเป็นควบคู่ไปกับการจัดการพืชแบบผสมผสาน การค้นหาสารธรรมชาติชนิดใหม่ที่สามารถชักนำให้พืชเพิ่มระดับความต้านทานต่อศัตรูพืชด้วยตนเองจึงเป็นอีกแนวทางที่มีความสำคัญ อย่างไรก็ตาม ข้อมูลเกี่ยวกับการสกัดสารสกัดจากผลยอดและกลไกที่เกี่ยวข้องกับความต้านทานศัตรูพืชในประเทศไทยยังมีอยู่อย่างจำกัดงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อนำผลยอดบ้านของไทยมาสกัดสารสกัดเพื่อสกัดสารสกัดจากผลยอดและกลไกที่เกี่ยวข้องกับความต้านทานศัตรูพืชในประเทศไทยยังมีอยู่อย่างจำกัดงานวิจัยนี้จึงมีวัตถุประสงค์เพื่อนำผลยอดบ้านของไทยมาสกัดสารสกัดเพื่อสกัดสารสกัดจากผลยอดและกลไกที่เกี่ยวข้องกับความต้านทานศัตรูพืชในต้นยาสูบ เพื่อนำผลการวิจัยไปประยุกต์ใช้ในการควบคุมศัตรูพืชในอนาคต

อุปกรณ์และวิธีการ

1. การสกัดแยกสารสกัดจากผลยอด

1.1 การคัดเลือกระยะสุกแก่ที่เหมาะสม

นำผลยอดที่เก็บจากพื้นที่ อ. หาดใหญ่ จ. สงขลา ล้างทำความสะอาด และจำแนกตามความสุกแก่ เป็น

4 กลุ่ม ได้แก่ ระยะที่ 1 ผลยอดอ่อน (มีสีเขียวทั้งผล) ระยะที่ 2 ผลยอดสุก 50% (มีสีเหลืองอมเขียว) ระยะที่ 3 ผลยอดสุก 100% (มีสีเหลืองทั้งผล) และระยะที่ 4 ผลสุกมากกว่า 100% (มีสีน้ำตาลเริ่มพบการเน่าสลายของผล) กลุ่มละ 10 ผล สกัดตามวิธี Ba et al. (2017) โดยหั่นผลยอดเป็นชิ้นเล็ก ๆ นำไปอบให้แห้งที่อุณหภูมิ 60°C. เป็นเวลา 7 วัน หรือจนกว่าน้ำหนักแห้งคงที่ จากนั้นบดให้เป็นผงด้วยเครื่องบดตัวอย่างพืช แล้วสกัดด้วยเอทานอลในอัตราส่วนผงยอด 1 ก./เอทานอล 95% 10 มล. แช่ไว้ 3 วัน ในที่มืด ณ อุณหภูมิห้อง จากนั้นนำไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 5,000 รอบ/นาที นาน 30 นาที เก็บสารละลายใสนำไประเหยตัวทำละลายออกด้วยเครื่องระเหยสุญญากาศแบบหมุนจนได้สารสีน้ำตาลดำมีลักษณะกึ่งของแข็ง (semi-solid) ปรับปริมาตรสุดท้ายเป็น 3 มล. ด้วยเอทานอล 95% ทำการสกัด 3 ครั้ง สารสกัดที่ได้นำมากรองผ่านเมมเบรนขนาดรูพรุน 0.25 ไมครอน บรรจุในขวดแก้วสีชาเพื่อวิเคราะห์ ปริมาณสคอพอเลตินด้วยเครื่อง high performance liquid chromatograph (HPLC: Agilent 1100)

1.2 การสกัดแยกสคอพอเลตินจากผลยอด

นำผงยอด 200 ก. จากระยะผลสุกแก่ที่เลือกได้จากข้อ 1.1 ผสมกับเอทานอล 95% อัตราส่วน 1:3 เขย่าที่ 200 รอบ/นาที วันละ 6 ชม. สลับกับวางในที่มืด เก็บส่วนสารละลายใสในวันที่ 2 แล้วสกัดซ้ำตามวิธีการเดิมอีก 2 รอบ นำสารละลายใสทั้ง 3 รอบรวมกัน กรองด้วยกระดาษกรอง Whatman เบอร์ 1 จากนั้นระเหยตัวทำละลายออกภายใต้สุญญากาศ จนได้สารสกัดเอทานอลที่มีลักษณะเป็นกึ่งของแข็ง สีน้ำตาลดำ ละลายสารสกัดโดยใช้เฮกเซน แยกส่วนสารสกัดที่ละลายในเฮกเซนออก จากนั้นนำส่วนที่ไม่ละลายในเฮกเซนมาผสมกับซิลิกาเจลในอัตราส่วน 1:1 (W/W) บดในโถรงบดยาจนได้ผงร่วนสีน้ำตาลอ่อน นำไปแยกผ่านคอลัมน์แก้วที่บรรจุซิลิกาเจล อัตราส่วนตัวอย่าง : ปริมาณซิลิกาทั้งหมด 1:10 (W/W) ทำการชะด้วย

สารละลายเอทิลอะซิเตทในเฮกเซน โดยเพิ่มความเข้มข้นของเอทิลอะซิเตทครั้งละ 10% เก็บส่วนของสาร (fraction) ที่ถูกแยกผ่านคอลัมน์ส่วนละ 50 มล. นำส่วนต่าง ๆ มาตรวจสอบด้วยเทคนิค thin layer chromatography (TLC) (silica gel 60 F254 aluminium sheet) โดยใช้เอทิลอะซิเตท : เฮกเซน อัตราส่วน 50 : 50 V/V เป็นตัวเคลื่อนที่ ตรวจสอบส่วนของสารที่แยกได้โดยส่องภายใต้แสงยูวีที่ความยาวคลื่น 365 นาโนเมตร เลือกส่วนย่อยที่มีสารเรืองแสงสีน้ำเงินและมีค่า relative of flow (R_f) ตรงกับสารมาตรฐานสคอพอเลตินไประเหยตัวทำละลายออกแล้วแยกต่อด้วยคอลัมน์อีกครั้ง โดยใช้สารละลายเมทานอล 2% ในไดคลอโรมีเทนเป็นตัวชะ ทำการทดสอบส่วนที่แยกได้อีกครั้งด้วยวิธี TLC และรวบรวมส่วนย่อยที่มีค่า R_f ของสารตรงกับสคอพอเลติน จากนั้นนำไประเหยตัวทำละลายออก ตรวจสอบความบริสุทธิ์ของสารที่แยกได้ด้วยวิธี TLC โดยใช้สารละลายเมทานอลความเข้มข้น 2% ในไดคลอโรมีเทนเป็นตัวเคลื่อนที่นำไปส่องภายใต้แสงยูวีที่ความยาวคลื่น 365 และ 254 นาโนเมตร ซึ่งน้ำหนักและคำนวณปริมาณสคอพอเลตินที่สกัดได้โดยใช้สูตรผลได้ (% yields) = (น้ำหนักของสคอพอเลตินที่สกัดได้/น้ำหนักผงยอแห้ง)×100

1.3 การพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารที่สกัดแยกได้

นำผลึกสารที่แยกได้มาตรวจวิเคราะห์ค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 190-900 นาโนเมตร ด้วยเครื่อง spectrophotometer (UV Biochrom/Libra S22) วิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค Fourier transform infrared spectroscopic (FT-IR) ด้วยเครื่อง Fourier transform infrared spectrometer (VERTEX 70, Bruker, Germany) และวิเคราะห์สเปกตรัมของ ¹H และ ¹³C NMR ด้วยเครื่อง 300 MHz Bruker AVANCE spectrometer เปรียบเทียบกับสคอพอเลตินมาตรฐาน

2. การทดสอบระดับความเข้มข้นของสารสคอพอเลตินต่อการชักนำความต้านทานในต้นยาสูบ

นำต้นยาสูบอายุ 3 เดือน ที่มีขนาดใกล้เคียงกันมาเลี้ยงในโรงเรือนป้องกันแมลงที่มุงหลังคาด้วยพลาสติกใส ภายใต้สภาวะแวดล้อมที่ได้รับแสงแดดจากธรรมชาติ แบ่งเป็น 4 กลุ่ม ๆ ละ 5 ต้น ฉีดสารละลายสคอพอเลตินความเข้มข้น 0 (น้ำกลั่น) 100 500 และ 1,000 ไมโครโมลาร์ ตามลำดับ โดยใช้หลอดฉีดยาฉีดสารทดสอบ (infiltrate) เข้าไปยังบริเวณช่องว่างระหว่างเส้นใบให้เต็มช่อง 4 ช่อง/ใบ โดยใช้ใบที่อยู่บริเวณกลางลำต้น 5 ใบ/ต้น จากนั้นเก็บใบที่เวลา 0 12 24 48 และ 120 ชม. หลังการฉีด ต้นละ 1 ใบ/ช่วงเวลา ซึ่งน้ำหนักใบสดนำไปห่อด้วยกระดาษอลูมิเนียมฟอยล์ แช่ลงในไนโตรเจนเหลวเพื่อหยุดปฏิกิริยาภายในใบ เก็บใบที่อุณหภูมิ -40°C. จนกว่าจะนำไปวิเคราะห์ปริมาณสารและกิจกรรม (activity) ของเอนไซม์ในระบบความต้านทานพืช ได้แก่ กรดซาลิซิลิก กรดแอบไซซิก เอนไซม์ฟีนิลอะลานีนแอมโมเนียไลเอส เอนไซม์กลูคาเนส และเอนไซม์เปอร์ออกซิเดส

3. การสกัดและวิเคราะห์สารทุติยภูมิด้วยเทคนิค HPLC

3.1 การสกัดสารทุติยภูมิจากใบยาสูบ

นำตัวอย่างใบยาสูบที่ได้รับการฉีดสารสคอพอเลติน 0.5 ก. มาสกัดตามวิธี Ederli et al (2011) โดยบดให้ละเอียดด้วยไนโตรเจนเหลวในโกร่งบดยาเติมเมทานอล 90% 750 ไมโครลิตร บดให้เข้ากันนำไปหมุนเหวี่ยงที่ 12,000 รอบ/นาที นาน 5 นาที นำสารละลายส่วนใสที่ได้พักไว้ จากนั้นนำส่วนตะกอนผสมกับเมทานอล 100% 500 ไมโครลิตร นำไปหมุนเหวี่ยงที่ 12,000 รอบ/นาที นาน 5 นาที รวมสารละลายส่วนใสที่ได้กับสารละลายส่วนใสเดิมที่พักไว้ วัดปริมาตรที่ได้ก่อนเติมสารละลายกรดไตรคลอโรอะซิติก 50%

ให้ได้ความเข้มข้นสุดท้ายของกรดเป็น 5% นำตัวอย่างที่สกัดได้ไปกรองผ่านเมมเบรนขนาด 0.25 ไมครอน เก็บรักษาในขวดแก้วสีชา

3.2 การวิเคราะห์ปริมาณสารทุติยภูมิด้วยเครื่อง HPLC

นำตัวอย่างมาฉีดลงเครื่อง HPLC โดยใช้คอลัมน์ชนิด reverse-phase (ZORBAX Eclipse XDB-c18, 4.6x150 mm, 5 micron) ครั้งละ 20 ไมโครลิตร ใช้เฟสเคลื่อนที่ 2 ชนิด คือ 1) อะซิโตนไนโตรล และ 2) สารละลายกรดฟอร์มิกเข้มข้น 0.1% ตั้งโปรแกรมควบคุมอัตราส่วนของเฟสเคลื่อนที่ตามระยะเวลา (นาที)/% ของอะซิโตนไนโตรล ดังนี้ นาทีที่ 0-2/80% และ นาทีที่ 8.5-10/60% โดยควบคุมอัตราเร็วของเฟสเคลื่อนที่เป็น 1 มล./นาที และควบคุมอุณหภูมิของคอลัมน์ที่ 40°C. ตรวจวัดสัญญาณของกรดแอสไซติก ด้วย diode array detector ที่ความยาวคลื่น 254 นาโนเมตร ตรวจวัดสัญญาณของสารสคอพอเลตินและกรดซาลิซิลิก ด้วย fluorescence detector โดยที่เวลา 0-8 นาทีแรก ตั้งค่าช่วงแสง excitation และ emission เป็น 337 และ 425 นาโนเมตร เพื่อวิเคราะห์สคอพอเลติน จากนั้นตั้งค่าช่วงแสงเป็น 294 และ 426 นาโนเมตร เพื่อวิเคราะห์กรดซาลิซิลิก คำนวณผลจากพื้นที่ใต้พีคด้วยโปรแกรม Chemstation เปรียบเทียบกับกราฟมาตรฐานกรดแอสไซติก สคอพอเลติน และกรดซาลิซิลิก (ช่วงของสารมาตรฐานแต่ละชนิด=0.05-10 ไมโครกรัม/มล.)

4. การสกัดและวัดกิจกรรมของเอนไซม์ในระบบความต้านทานพืช

4.1 การสกัดเอนไซม์จากใบยาสูบ

เตรียมสารสกัดเอนไซม์จากตัวอย่างใบยาสูบตามวิธี Chanwun et al. (2013) โดยมีขั้นตอนดังนี้ นำใบยาสูบ 0.5 ก. มาบดด้วยไนโตรเจนเหลวในโถรงบดยา และเติมทริสไฮโดรคลอริกบัฟเฟอร์ pH 7.0 ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ 1 มล. ที่มี Triton X-100 เข้มข้น

0.25% (V/V) ผสมอยู่ แล้วนำไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 12,000 รอบ/นาที ที่อุณหภูมิ 4°C. 30 นาที เก็บสารละลายส่วนใสที่ได้ไปวิเคราะห์กิจกรรมของเอนไซม์

4.2 การวัดกิจกรรมของเอนไซม์ในระบบความต้านทานพืช

4.2.1 เอนไซม์ฟีนิลอะลานีนแอมโมเนียไลเอส

วัดกิจกรรมของเอนไซม์ฟีนิลอะลานีนแอมโมเนียไลเอสตามวิธี Deenamo et al. (2018) โดยมีขั้นตอนดังนี้ ผสมสารละลายตัวอย่าง 100 ไมโครลิตร ลงไปในทริสไฮโดรคลอริกบัฟเฟอร์ pH 8.9 เข้มข้น 50 มิลลิโมลาร์ ที่มี L-phenylalanine เข้มข้น 0.1 โมลาร์ 930 ไมโครลิตร นำไปบ่มที่อุณหภูมิ 37°C. เป็นเวลา 1 ชม. จากนั้นหยุดปฏิกิริยาโดยเติมสารละลายกรดไฮโดรคลอริกเข้มข้น 6 นอร์มอล 160 ไมโครลิตร นำไปหมุนเหวี่ยงที่ความเร็ว 12,000 รอบ/นาที นาน 10 นาที วัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 290 นาโนเมตร คำนวณค่าการดูดกลืนแสงก่อนและหลังการบ่ม เทียบกับกราฟมาตรฐาน trans-cinnamic acid ในหน่วย nmol trans-cinnamic acid/h/gFW

4.2.2 เอนไซม์กลูคาเนส

วัดกิจกรรมของเอนไซม์ตามวิธี Santos et al. (1977) โดยปฏิกิริยาประกอบด้วย สารละลายตัวอย่าง (ความเข้มข้นที่เหมาะสม) 100 ไมโครลิตร สารละลายบัฟเฟอร์โซเดียมอะซิเตท pH 5.0 ความเข้มข้น 0.1 โมลาร์ 200 ไมโครลิตร และสารละลายลามินารินความเข้มข้น 2 มก./มล. 200 ไมโครลิตรผสมให้เข้ากัน บ่มที่อุณหภูมิ 35°C. นาน 20 นาที จากนั้นหยุดปฏิกิริยาโดยเติมสารละลายไดโนโตรซาลิซิลเลต 200 ไมโครลิตร นำไปต้มในน้ำเดือด 5 นาที รอให้เย็นลงแล้วเติมน้ำกลั่น 200 ไมโครลิตร ผสมให้เข้ากันนำไปวัดค่าการดูดกลืนแสงที่ความยาวคลื่น 540 นาโนเมตร คำนวณเทียบกับกราฟมาตรฐานกลูโคส โดยปริมาณกลูโคสที่เกิดขึ้นจากปฏิกิริยาของเอนไซม์ เท่ากับปริมาณกลูโคสทั้งหมด

ที่วัดได้ - ปริมาณกลูโคสเดิมที่มีในสารละลาย
 ลามินาริน - ปริมาณกลูโคสเดิมในตัวอย่างซึ่งไม่ใช่
 ผลผลิตจากการทำงานของเอนไซม์ และรายงานผลใน
 หน่วย $\mu\text{g glucose/min/gFW}$

4.2.3 เอนไซม์เปอร์ออกซิเดส

นำสารสกัดเอนไซม์ไปแยกด้วยไฟฟ้าบน
 แผ่นเจลที่ความเข้มข้นของโพลีอะคริลาไมด์ 7% แบบ
 ไม่แปลงสภาพ ใช้ไฟฟ้า 150 โวลต์ในการแยก ตามวิธี
 Ali et al. (2005) โพลิตตัวอย่างครั้งละ 8 ไมโครลิตร
 นำตัวอย่างที่แยกอยู่บนเจลไปย้อม ตรวจสอบกิจกรรม
 ของเอนไซม์เปอร์ออกซิเดส โดยบ่มเจลในสารละลาย
 โปแทสเซียมบัฟเฟอร์ pH 7.0 ความเข้มข้น 25 มิลลิโมลาร์
 นาน 15 นาที จากนั้นนำไปแช่ลงในสารละลายผสม
 ระหว่างโปแทสเซียมบัฟเฟอร์ ความเข้มข้น 25 มิลลิโมลาร์
 ที่มีไฮโดรเจนเปอร์ออกไซด์ความเข้มข้น 25 มิลลิโมลาร์
 ผสมอยู่ และไกวเอคอล ความเข้มข้น 18 มิลลิโมลาร์
 รอกระทั่งปรากฏแถบสีเหลืองอมน้ำตาลของเอนไซม์
 เปอร์ออกซิเดส ซึ่งสามารถมองเห็นได้ด้วยตาเปล่า

5. การวิเคราะห์ทางสถิติ

การวิเคราะห์ตัวอย่างทำการทดสอบอย่างน้อย
 3 ซ้ำ แต่ละซ้ำเมื่อนำมาวิเคราะห์ในระดับห้องปฏิบัติการ
 มีการทำซ้ำในทุกรายการ วิเคราะห์ค่าเฉลี่ย ส่วนเบี่ยงเบน
 มาตรฐาน ทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ย
 ผลทดสอบที่ได้โดยใช้การวิเคราะห์ความแปรปรวน
 ทางเดียว ทดสอบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วย
 วิธี Duncan's multiple range test ที่ระดับความ
 เชื่อมั่น 95%

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. การคัดเลือกระยะสุกแก่ที่เหมาะสม

ปริมาณสโคพอเลตินในผลย่อยสุก-แก่
 ที่แตกต่างกันทั้ง 4 กลุ่ม พบว่า ระยะที่ 1 มีปริมาณ
 น้อยที่สุด 69.18 ± 62.66 มก./กก. น้ำหนักแห้ง

ซึ่งแตกต่างอย่างมีนัยสำคัญที่ระดับความเชื่อมั่น 95%
 โดยพบในระยะที่ 2-4 ปริมาณ 321.30 ± 26.25
 353.66 ± 123.29 และ 267.41 ± 60.82 มก./กก.
 น้ำหนักแห้ง ตามลำดับ สอดคล้องกับการศึกษาของ
 Yang et al. (2007) ซึ่งระบุว่าน้ำลูกยอที่ผลิตจากผลยอ
 สุกมีปริมาณสโคพอเลตินสูงกว่าที่ผลิตมาจากผลยอ
 ที่ยังไม่สุก จากผลการวิเคราะห์ข้างชี้ให้เห็นว่าผลยอ
 ระยะสุกตั้งแต่ 50% ขึ้นไปมีความเหมาะสมสำหรับใช้สกัด
 สโคพอเลติน (Figure 1) โดยมีค่าปริมาณสโคพอเลติน
 เฉลี่ย 314.12 ± 43.57 มก./กก. น้ำหนักแห้ง อย่างไรก็ตาม
 นอกจากระยะสุกแก่ของผลแล้ว ปริมาณสโคพอเลติน
 ในผลยออาจมีความแตกต่างได้จากสิ่งแวดล้อม เช่น
 ฤดูกาล (Jia et al., 2020) หรือค่า pH ของดิน
 (Galán-Pérez et al., 2021)

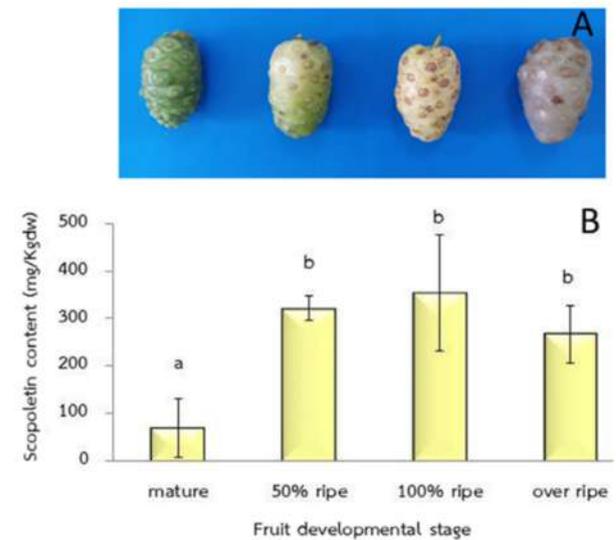


Figure 1 Changes of scopoletin content along with fruit ripening; phenotypes of noni fruit at different developmental stage (A) and changes of scopoletin content along with fruit development and ripening (B). Values are means \pm SD of three biological replicates. Different letters denote significant differences at $p < 0.05$

2. การสกัดแยกสารสโคพอเลตินบริสุทธิ์

การแยกสโคพอเลตินออกจากสารสกัดหยาบพบว่า สารสโคพอเลตินเริ่มแยกออกจากคอลัมน์เมื่อเพิ่มอัตราส่วนของเอทิลอะซิเตตถึง 60% เมื่อนำส่วนของสารที่ตรวจพบการเรืองแสงตรงกับสารสโคพอเลตินมาตรฐานจากการวิเคราะห์ด้วยเทคนิค TLC เมื่อนำส่วนย่อยดังกล่าวมาระเหยตัวทำละลายออก และตรวจสอบความบริสุทธิ์อีกครั้งด้วยเทคนิค TLC ในตัวเคลื่อนที่สารละลายเมทานอล 2% ในไดคลอโรมีเทนพบว่า มีแถบสารมากกว่า 1 แถบ ภายใต้แสงยูวีที่มีความยาวคลื่น 365 และ 254 นาโนเมตร จึงนำไปแยกต่อกับคอลัมน์โครมาโตกราฟีครั้งที่ 2 โดยชะด้วยสารละลายเมทานอล 2% ในไดคลอโรมีเทน เมื่อตรวจสอบส่วนย่อยที่แยกได้ด้วยเทคนิค TLC ปรากฏแถบของสารเพียงแถบเดียวในตำแหน่งตรงกับสารมาตรฐานสโคพอเลติน (Figure 2) โดยส่วนย่อยที่แยกได้มีลักษณะเป็นผงสีเหลือง มี yield $0.038 \pm 0.001\%$ สอดคล้องกับรายงานของอิริกซ์และคณะ (2561) ที่ระบุปริมาณสโคพอเลตินในผลยอ 0.02-0.07%

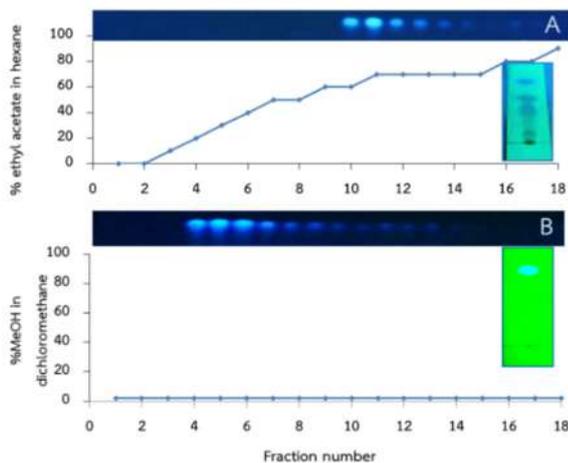


Figure 2 Two steps of scopoletin purification from noni fruit; the first separation using gradient elution (0-90% ethyl acetate) and the purity test by TLC (A) and the second separation using isocratic elution (2% methanol in dichloromethane) and the purity test by TLC (B)

3. การพิสูจน์เอกลักษณ์ของสารที่สกัดแยกได้

สารที่สกัดแยกได้มีลักษณะเป็นผงสีเหลือง จากข้อมูลยูวีสเปกตรัม (Figure 3) ปรากฏแถบดูดกลืนที่มีความยาวคลื่น 228 และ 345 นาโนเมตร แสดงว่ามีระบบคอนจูเกชัน ข้อมูลการวิเคราะห์สเปกตรัม FTIR เปรียบเทียบกับสารมาตรฐาน (Figure 4) พบว่า มีค่า correlation ที่ระบุความคล้ายคลึงกัน 94.8% โดยมีรายละเอียดหมู่ฟังก์ชัน แสดงดัง Table 1 ผลการศึกษาสเปกตรัม $^1\text{H NMR}$ และ $^{13}\text{C NMR}$ ของสารที่สกัดแยกได้จากผลยอบ้านและสารมาตรฐาน (Figure 5) โดยข้อมูล $^1\text{H NMR}$ สเปกตรัม ปรากฏ สัญญาณของ ortho-coupled aromatic proton ที่เป็นลักษณะเฉพาะของวง pyrone ที่ $\delta_{\text{H}} 6.19$ (d, $J = 9.0$ Hz, H-3) และ 7.60 (d, $J = 9.0$ Hz, H-4) และสัญญาณ singlet aromatic proton ที่ $\delta_{\text{H}} 6.82$ (s, 2H, H-6 และ H-9) นอกจากนี้ ยังพบสัญญาณของหมู่ methoxyl ที่ $\delta_{\text{H}} 3.88$ (s, 3H, 7-OCH₃) จากข้อมูล $^{13}\text{C NMR}$ ประกอบด้วย 10 คาร์บอนที่ $\delta_{\text{C}} 162.4$ 150.8 150.1 145.1 144.1 112.4 111.2 108.1 103.3 และ 56.3 จากการเปรียบเทียบข้อมูล NMR กับสารที่ได้เคยรายงานมาแล้ว ยืนยันได้ว่าสารที่แยกได้คือ สารสโคพอเลติน

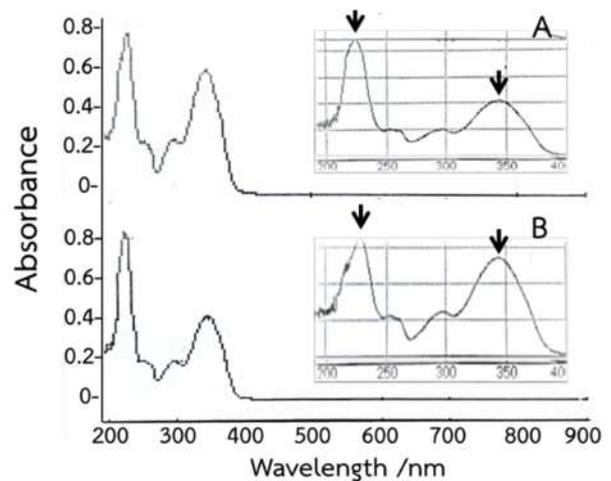


Figure 3 UV-spectrum of isolated compound from noni fruit (A) and standard scopoletin (B)

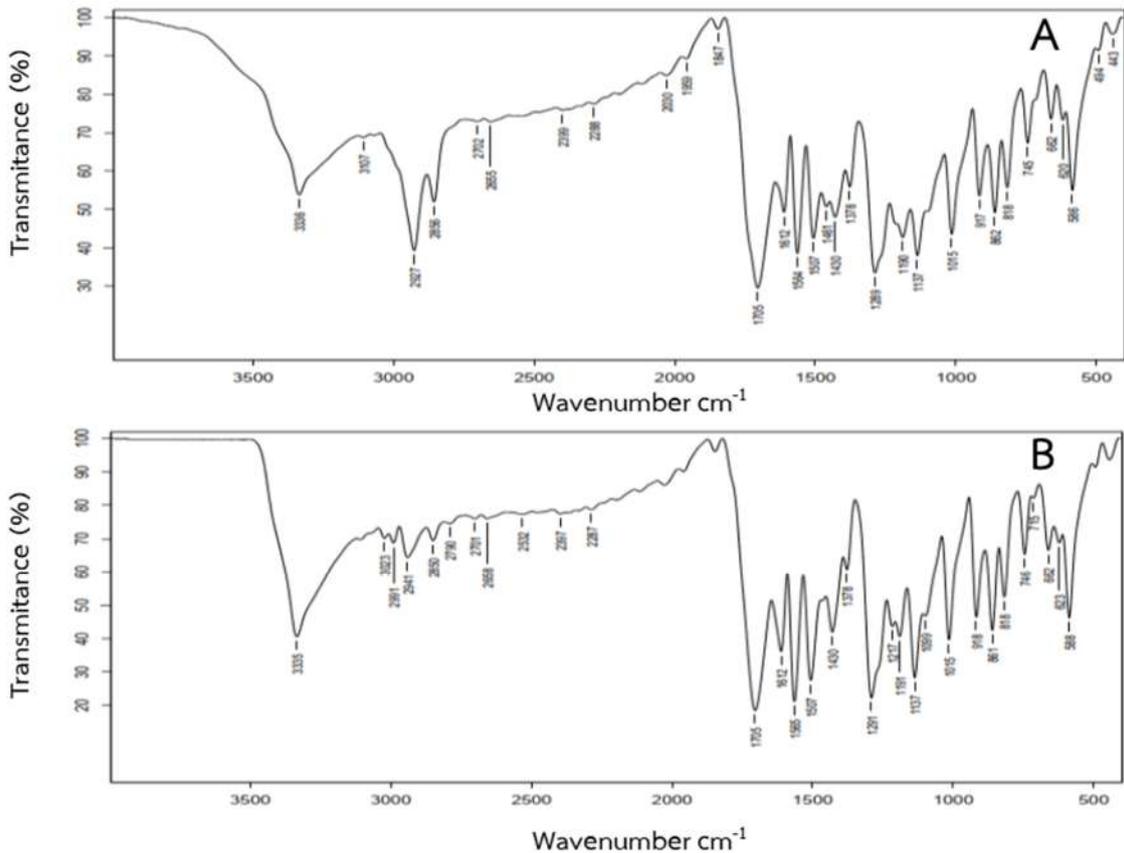


Figure 4 FTIR-spectrum of isolated compound from noni fruit (A) and standard scopoletin (B)

Table 1 The data from FTIR spectrum of isolated compound from noni fruit

Wavenumber (cm ⁻¹)		Functional group
Standard scopoletin	Isolated compound	
3,335	3,336	O-H Alcohol group present
2,850	2,856	C-H group present
1,705	1,705	Carbonyl C=O group present
1,612	1,612	CH=CH group present
1,565	1,564	Benzene ring present
1,507	1,507	Benzene ring present
861	862	Due to substitution of benzene

4. การทดสอบใช้สารสคอพอเลตินต่อการชักนำความต้านทานในต้นยาสูบ

ผลการทดสอบพบการเพิ่มปริมาณกรดซาลิซิลิกในใบที่ได้รับสคอพอเลติน 500 ไมโครโมลาร์ที่เวลา 12 ชม. โดยมีปริมาณกรดซาลิซิลิกสูงที่สุด 21.16±7.76 นาโนกรัม/ก.

น้ำหนักราก แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ (p<0.05) จากนั้นลดลงใน ชม.ที่ 24 (Figure 6A) รูปแบบการเพิ่มขึ้นของกรดซาลิซิลิกนี้มีความคล้ายคลึงกับผลการทดลองของ Dorey et al. (1997) ที่ชักนำความต้านทานในใบยาสูบด้วยการฉีดสารไกลโคโปรตีนจากเชื้อราแล้ว

พบการเพิ่มของกรดซาลิซิลิก สูงที่สุดภายในเวลา 14 ชม. ก่อนจะลดลงใน ชม.ที่ 24 และจากรายงานของ Ding and Ding (2020) ระบุว่าในสภาวะปกติปริมาณกรดซาลิซิลิกในพืชจะอยู่ในระดับต่ำ เมื่อถูกกระตุ้นด้วยสารกระตุ้นหรือเชื้อก่อโรค จะเพิ่มปริมาณขึ้นอย่างรวดเร็ว เพื่อเริ่มต้นเข้าสู่กระบวนการต้านทานภายในพืช โดยมีการเสริมความแข็งแรงแก่ผนังเซลล์ เพิ่มการผลิตสารที่มีฤทธิ์ต้านเชื้อจุลินทรีย์ รวมทั้งเพิ่มการ

สร้างโปรตีนในกลุ่ม pathogenesis-related proteins (PRs-protein) ส่งผลให้พืชสามารถต้านทานต่อการบุกรุกของเชื้อก่อโรค (Dos Santos and Franco, 2023) นอกจากนี้ Kim and Hwang (2000) รายงานว่า สคอพอเลติน 500 ไมโครกรัม/มล.ที่ฉีดบนใบยาสูบ สามารถชักนำการแสดงออกของยีน *PR-1* ซึ่งเกี่ยวข้องวิธีการป้องกันตนเองของพืช แบบ SAR โดยมีกรดซาลิซิลิกเป็นโมเลกุลส่งสัญญาณ

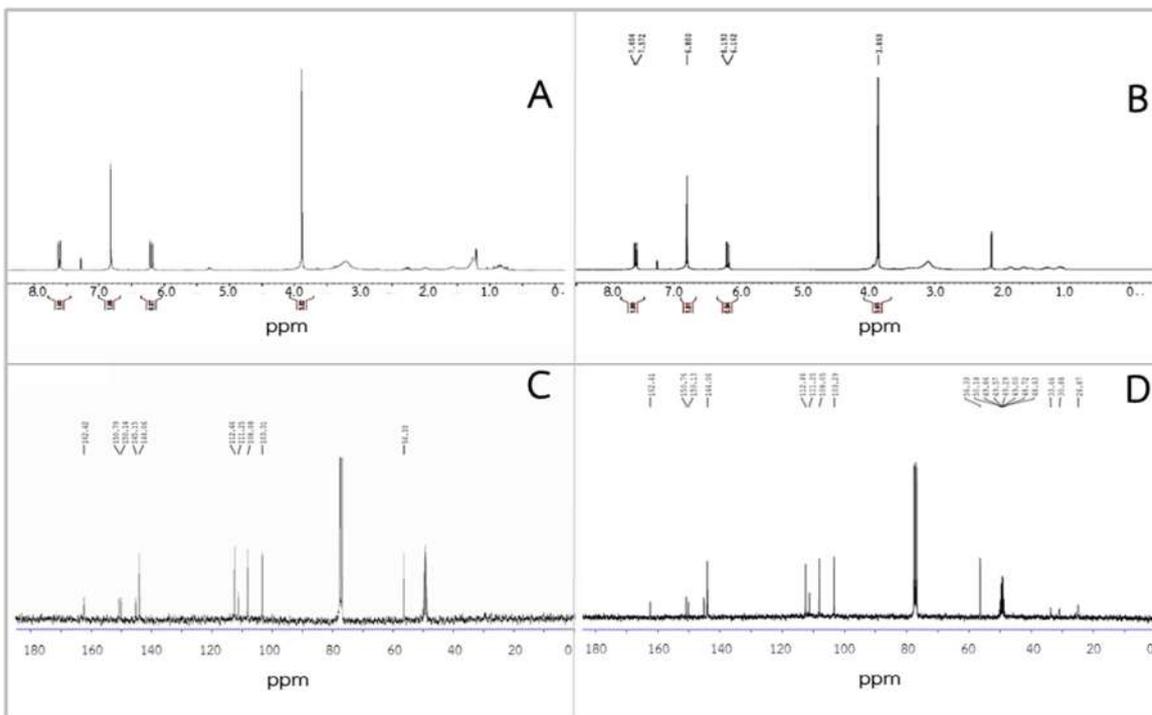


Figure 5 Representative ¹H NMR spectra of isolated compound from noni fruit and standard scopoletin (A and B) and ¹³C NMR spectra of isolated compound from noni fruit and standard scopoletin (C and D)

ในทางตรงกันข้ามพบว่า กรดแอสไซติกในใบที่ได้รับสคอพอเลติน 1,000 ไมโครโมลาร์ มีปริมาณลดลงอย่างมีนัยสำคัญที่เวลา 24 ชม. หลังเริ่มทดสอบ (Figure 6B) บ่งชี้ถึงการทำงานแบบ antagonistic interaction ระหว่างกรดแอสไซติกและกรดซาลิซิลิก อย่างไรก็ตามใน ชม.ที่ 48 พบว่า ปริมาณกรดแอสไซติกมีแนวโน้มสูงขึ้นในกลุ่มใบที่ได้รับการฉีดสารสคอพอเลติน ทั้งนี้ กรดแอสไซติกเป็นฮอร์โมนพืชที่ทำหน้าที่

เกี่ยวข้องกับการควบคุมการเจริญเติบโตรวมทั้งการเกิดความต้านทานในพืช (Iriti and Faoro, 2008) ดังนั้น การเพิ่มปริมาณของกรดแอสไซติกในช่วงดังกล่าว อาจเกี่ยวข้องกับการทำหน้าที่ในด้านการส่งเสริมการเจริญเติบโต ซึ่งสอดคล้องกับ Beyer et al. (2019) ที่ได้ทดสอบให้สคอพอเลตินแก่ต้นถั่วเหลืองที่มีผลเพิ่มผลผลิตเมล็ดถั่วเหลืองได้

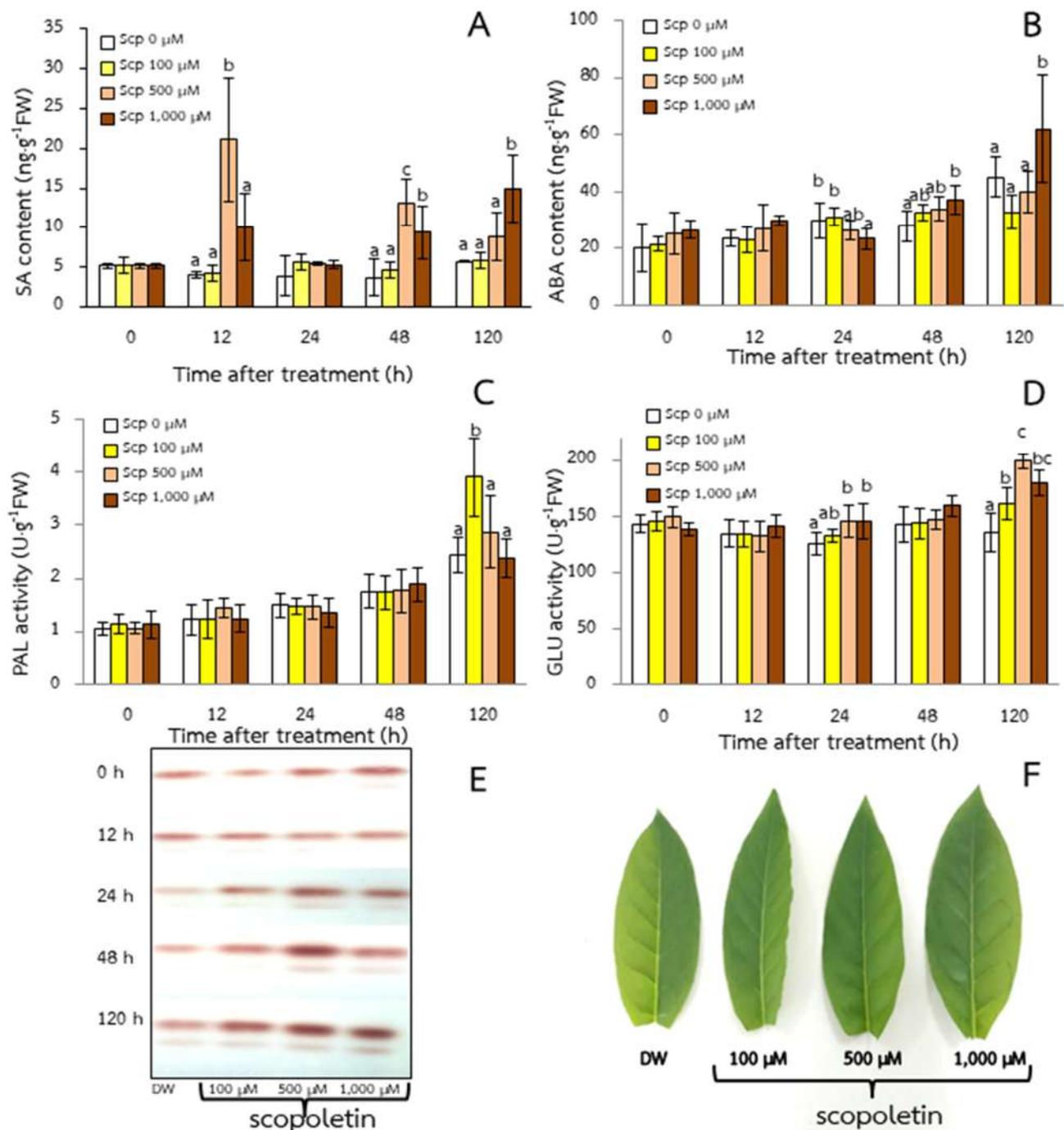


Figure 6 Physio-morphological traits of tobacco leaves after treatment with different scopoletin concentrations. Scopoletin elicited changes in salicylic acid content (A), abscisic acid content (B), activities of PAL (C), GLU (D) and POD (E) at various time. Leaf appearance in fresh tobacco leaves infiltrated with 0, 100, 500 and 1,000 μM of scopoletin for 120 h. (F). Data were means±SD. Different letters among treatments within the same time point indicated significant differences ($p < 0.05$)

ผลการเปรียบเทียบกิจกรรมของเอนไซม์ที่เกี่ยวข้องในระบบความต้านทานพืชทั้ง 3 ชนิดพบว่ากิจกรรมของเอนไซม์ฟีนอลอะลานีนแอมโมเนียไลเอสในใบยาสูบ ที่เวลา 0 12 24 และ 48 ชม. ไม่มีความแตกต่างระหว่างกลุ่มทดสอบ ทั้งนี้เอนไซม์ฟีนอลอะลานีนแอมโมเนียไลเอสเป็นเอนไซม์ตัวแรกในวิถีฟีนิลโพรพานอยด์ ทำหน้าที่เกี่ยวข้องกับการสังเคราะห์สารทุติยภูมิหลายชนิดรวมทั้งกรดซาลิซิลิก (Zhang et al., 2021) เมื่อเปรียบเทียบกับปริมาณกรดซาลิซิลิกในใบยาสูบซึ่งเพิ่มสูงที่สุดที่เวลา 12 ชม. หลังทดสอบจึงเป็นไปได้ว่าการเพิ่มขึ้นของเอนไซม์ฟีนอลอะลานีนแอมโมเนียไลเอสอาจเกิดขึ้นก่อนช่วงเวลาดังกล่าว (Figure 6C) อย่างไรก็ตาม ใบที่ฉีดสคอพอเลติน 100 ไมโครโมลาร์ มีค่ากิจกรรมของเอนไซม์นี้เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญที่เวลา 120 ชม. ทั้งนี้อาจเป็นผลจากการกระตุ้นโดยกรดซาลิซิลิกที่เพิ่มขึ้นเล็กน้อยในช่วงปลายของการเก็บตัวอย่างวิเคราะห์ ซึ่งผลการกระตุ้นในรูปแบบดังกล่าว รายงานโดย Deenamo et al. (2018) ระบุว่ากรดซาลิซิลิกสามารถชักนำการแสดงออกของยีน *HbPAL* ซึ่งควบคุมการสังเคราะห์เอนไซม์ฟีนอลอะลานีนแอมโมเนียไลเอสในยางพาราได้

เมื่อพิจารณากิจกรรมของเอนไซม์กลูคาเนสในใบยาสูบ พบว่า มีระดับเพิ่มสูงขึ้นอย่างมีนัยสำคัญภายหลังจากฉีดสคอพอเลติน 500 และ 1,000 ไมโครโมลาร์เป็นเวลา 24 ชม. สอดคล้องกับการเพิ่มของกรดซาลิซิลิกที่เป็นโมเลกุลสัญญาณก่อนหน้าที่เวลา 12 ชม. ทั้งนี้ได้เคยมีการรายงานถึงการเพิ่มกิจกรรมของเอนไซม์กลูคาเนสในพืชชนิดต่าง ๆ เช่น ยาสูบ และฝ้าย หลังถูกกระตุ้นให้เกิดความต้านทานแบบ SAR ด้วยตัวกระตุ้นชนิดต่าง ๆ (Li et al., 2003) (Figure 6D)

ระดับกิจกรรมของเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสซึ่งประเมินได้จากความเข้มของแถบเอนไซม์ที่ปรากฏบนแผ่นเจลพบว่า ที่เวลา 24 ชม. ต่อเนื่องมายัง ชม.

ที่ 48 และ 120 เอนไซม์เปอร์ออกซิเดสในใบที่ฉีดสคอพอเลตินทุกความเข้มข้นมีความเข้มของแถบเอนไซม์สูงกว่าชุดควบคุม (Figure 6E) ซึ่งผลดังกล่าวบ่งชี้ถึงการเพิ่มระดับความต้านทานขึ้นในต้นยาสูบ ซึ่งผลการกระตุ้นเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสมีความเกี่ยวข้องกับกระบวนการสร้างลิกนินในพืช (Asadi-sardari et al., 2022) และยังส่งผลกระตุ้นการแสดงออกของยีนที่ควบคุมการสังเคราะห์โปรตีนชนิดอื่น ๆ ที่เกี่ยวข้องกับการเพิ่มความต้านทานในพืช (pathogen responsive (PR) genes) ได้อีกด้วย (Kidwai et al., 2020) เมื่อพิจารณาระยะเวลาในการตอบสนองภายในต้นยาสูบหลังการกระตุ้นด้วยสคอพอเลติน ควบคุมไปกับระยะเวลาการฟักตัวของโรคพืช (incubation period) ซึ่งโดยทั่วไปอยู่ในช่วง 1-7 วัน (Oerke and Steiner, 2025) จึงเห็นได้ว่าการชักนำความต้านทานสามารถใช้รองรับการบุกรุกของเชื้อก่อโรครายได้สถานการณ์การระบาดของโรคได้ตั้งแต่ช่วงต้นของการฟักตัว นำไปสู่การลดระดับความรุนแรงของโรคได้อย่างทันท่วงที นอกจากนี้ยังพบว่า ความเข้มข้นของสคอพอเลตินที่ใช้ในการทดสอบไม่มีความเป็นพิษต่อเซลล์ของใบยาสูบเนื่องจากไม่ปรากฏการตายของเซลล์บนแผ่นใบในทุกชุดทดสอบหลังการ infiltrate สารลงบนใบพืช (Figure 6F)

สรุปผลการทดลอง

สารที่สกัดจากผลยอบ้านของไทยโดยวิธี maceration ร่วมกับการแยกผ่านคอลัมน์ซิลิกาเจล 2 ครั้ง เมื่อนำไปตรวจพิสูจน์เอกลักษณ์ด้วยเทคนิค TLC UV-spectrum scanning FTIR และ NMR ให้ค่าระบุความคล้ายคลึงกัน 94.8% และมีสูตรโครงสร้างตรงกับสารสคอพอเลติน โดยมีผลที่ได้ $0.038 \pm 0.001\%$ การนำสคอพอเลตินที่สกัดแยกได้มาทดสอบฉีดลงบนแผ่นใบของต้นยาสูบโดยวิธี infiltrate สามารถชักนำการเพิ่มปริมาณกรดซาลิซิลิกซึ่งเป็นโมเลกุลสัญญาณ

ในระบบ SAR ได้ภายใน 12 ชม. และเพิ่มกิจกรรมของเอนไซม์เปอร์ออกซิเดสและกลูคาเนสได้ภายใน 24 ชม. ซึ่งผลดังกล่าวบ่งชี้ถึงคุณสมบัติการเป็นสารกระตุ้นความต้านทานในต้นยาสูบของสคอพอเลตินที่สกัดได้จากผลยอบ้านของไทย โดยผ่านการกระตุ้นการเพิ่มขึ้นของสารและกลไกที่เกี่ยวข้องในระบบการป้องกันตนเองของพืช

คำขอบคุณ

ขอขอบคุณ นางลาภ พุฒคง ที่ให้ความช่วยเหลือปลูกและดูแลต้นยาสูบสำหรับการทดสอบ กลุ่มเกษตรกรในพื้นที่ จ. สงขลา ที่ให้ความอนุเคราะห์วัตถุบิผลยอบ้านนางสาวพรพิมล อธิปัญญาคม ผู้เชี่ยวชาญด้านโรคพืชกรมวิชาการเกษตร สำหรับคำแนะนำในการดำเนินงานวิจัยและขอขอบคุณกองทุนส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม สำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สทสว.) ที่สนับสนุนงบประมาณในการวิจัยนี้

เอกสารอ้างอิง

ณพัธอร บัวฉวน. 2563.ฤทธิ์ต้านอนุมูลอิสระ และปริมาณฟีนอลลิกรวมของสารสกัดหยาบลูกยอ. วารสารวิจัยและพัฒนาโดยองค์กร ในพระบรมราชูปถัมภ์. สาขาวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 15 (2) : 67-76.

อภิรักษ์ ศักดิ์เพชร ดวงเพ็ญ ปัทมดิลก พิธีธรรม เทียมเทียบรัตน์ ศักดิ์วิชัย อ่อนทอง และณัฐตรา จันทร์สุวานิชย์. 2561. คุณภาพทางเคมีของผลยอ. วารสารการแพทย์แผนไทยและการแพทย์ทางเลือก. 16(2): 195-204.

Ali, M.B., K.W. Yu, E.J. Hahn and K.Y. Paek. 2005. Differential responses of anti-oxidants enzymes, lipoxygenase activity, ascorbate content and the production of saponins in tissue cultured root of mountain *Panax ginseng* C.A. Mayer and *Panax quinquefolium* L. in bioreactor subjected to methyl jasmonate stress. Plant Science. 169(1): 83-92.

Asadi-sardari, A., E. Mahdikhani-Moghadam and M. Zaki-Aghl. 2022. The biochemical changes in two moderately resistant and highly susceptible tomato cultivars at the later stages of *Meloidogyne javanica* infection. Nematology. 24(10): 1085-1103.

Ba, R., T. Alfa, F. Gbaguidi, K.M. Novidzro, K. Dotse, K. Koudouvo, U. Houngue, M.T. Donou Hounsode, K.H. Koumaglo, Y. Ameyapoh and L. Baba-Moussa. 2017. Maize fungal growth control with scopoletin of Cassava roots produced in Benin. International Journal of Microbiology. 2017(1): e5671942.

Beyer, S.F., A. Beesley, P.F.W. Rohmann, H. Schultheiss, U. Conrath and C.J.G., Langenbach. 2019. The Arabidopsis non-host defence-associated coumarin scopoletin protects soybean from Asian soybean rust. The Plant Journal. 99(3): 397-413.

Bushnell, O.A., M. Fukuda and T. Makinodian. 1950. The antibacterial properties of some plants found in Hawaii. Pacific Science. 4(3): 167-183.

Chanwun, T., N. Muhamad, N. Chirapongsatongkul and N. Chungchow, 2013. *Hevea brasiliensis* cell suspension peroxidase: purification, characterization and application for dye decolorization. AMB Express. 3: 14.

Deenamo, N., A. Kuyyogsuy, K. Khompatara, T. Chanwun, K. Ekchaweng and N. Churngchow. 2018. Salicylic acid induces resistance in rubber tree against *Phytophthora palmivora*. International Journal of Molecular Sciences. 19(7): 1883.

Ding, P. and Y. Ding. 2020. Stories of salicylic acid: A plant defense hormone. Trends in Plant Science. 25(6): 549-565.

Dorey, S., F. Baillieul, M.A. Pierrel, P. Saindrenan, B. Fritig and S. Kauffmann. 1997. Spatial and temporal induction of cell death, defense genes, and accumulation of salicylic acid in tobacco leaves reacting hypersensitively to a fungal glycoprotein elicitor. Molecular Plant-Microbe Interactions. 10(5): 646-655.

- Dos Santos, C. and O.L. Franco. 2023. Pathogenesis-related proteins (PRs) with enzyme activity activating plant defense responses. *Plants*. 12(11): 2226.
- Du, H., Y. Sun, R. Yang, W. Zhang, C. Wan, J. Chen, İ. Kahramanoğlu and L. Zhu. 2021. Benzothiazole (BTH) induced resistance of Navel orange fruit and maintained fruit quality during storage. *Journal of Food Quality*. 2021(1): e6631507.
- Ederli, L., L. Madeo, O. Calderini, C. Gehring, C. Moretti, R. Buonaurio, F. Paolocci and S. Pasqualini. 2011. The *Arabidopsis thaliana* cysteine-rich receptor-like kinase CRK20 modulates host responses to *Pseudomonas syringae* pv. tomato DC3000 infection. *Journal of Plant Physiology*. 168(15): 1784-1794.
- Galán-Pérez, J.A., B. Gámiz and R. Celis. 2021. Determining the effect of soil properties on the stability of scopoletin and its toxicity to target plants. *Biology and Fertility of Soils*. 57(5): 643-655.
- Huang, W., Y. Wang, X. Li and Y. Zhang. 2020. Biosynthesis and regulation of salicylic acid and N-hydroxypipecolic acid in plant immunity. *Molecular Plant*. 13(1): 31-41.
- Iriti, M. and F. Faoro. 2008. Abscisic acid is involved in chitosan-induced resistance to tobacco necrosis virus (TNV). *Plant Physiology and Biochemistry*. 46(12): 1106-1111.
- Jia, D.D., Z.Q. Lan and T. Wu. 2020. Ethylene is the key signal in the accumulation process of scopoletin in noni (*Morinda citrifolia*). *Scientia Horticulturae*. 261(17): 108980.
- Kachroo, A., H. Liu, X. Yuan, T. Kurokawa and P. Kachroo, 2022. Systemic acquired resistance-associated transport and metabolic regulation of salicylic acid and glycerol-3-phosphate. *Essays in Biochemistry*. 66(5): 673-681.
- Kidwai, M., I.Z. Ahmad and D. Chakrabarty. 2020. Class III peroxidase: An indispensable enzyme for biotic/abiotic stress tolerance and a potent candidate for crop improvement. *Plant Cell Reports*. 39(11): 1381-1393.
- Kim, Y.J. and B.K. Hwang. 2000. Pepper gene encoding a basic pathogenesis-related 1 protein is pathogen and ethylene inducible. *Physiologia Plantarum*. 108(1): 51-60.
- Motshakeri, M. and H.M. Ghazali. 2015. Nutritional, phytochemical and commercial quality of noni fruit: A multi-beneficial gift from nature. *Trends in Food Science & Technology*. 45(1): 118-129.
- Li, Y.Z., X.H. Zheng, H.L. Tang, J.W. Zhu and J.M. Yang. 2003. Increase of β -1, 3-glucanase and chitinase activities in cotton callus cells treated by salicylic acid and toxin of *Verticillium dahliae*. *Acta Botanica Sinica*. 45(7): 802-808.
- Oerke, E.C. and U. Steiner. 2025. Intra-leaf variability of incubation period sheds new light on the lifestyle of *Cercospora beticola* in sugar beets. *Journal of Fungi*. 11(3): 211.
- Santos, T., J.R. Villanueva and C. Nombela, 1977. Production and catabolite repression of *Penicillium italicum* beta-glucanases. *Journal of Bacteriology*. 129(1): 52-58.
- Su, B.N., A.D. Pawlus, H.A. Jung, W.J. Keller, J.L. McLaughlin and A.D. Kinghorn. 2005. Chemical constituents of the fruits of *Morinda citrifolia* (noni) and their antioxidant activity. *Journal of Natural Products*. 68(4): 592-595.
- Wang, M.Y. and C. Su. 2001. Cancer preventive effect of *Morinda citrifolia* (Noni). *Annals of the New York Academy of Sciences*. 952(1): 161-168.
- Yang S.C., T.I. Chen, K.Y. Li and T.C. Tsai. 2007. Change in phenolic compound content, reductive capacity and ACE inhibitory activity in noni juice during traditional fermentation. *Journal of Food and Drug Analysis*. 15(3): 290-298.
- Zhang, H., Q. Huang, L. Yi, X. Song, L. Li, G. Deng, J. Liang, F. Chen, M. Yu and H. Long. 2021. PAL-mediated SA biosynthesis pathway contributes to nematode resistance in wheat. *The Plant Journal*. 107(3): 698-712.

การผลิตฟิล์มชีวภาพจากสตาร์ชมันสำปะหลังโดยใช้ลิกนินและนาโนเซลลูโลส
จากเปลือกทุเรียนเป็นสารเติมแต่ง

Production of Cassava Starch-based Biofilm Using Lignin and
Nanocellulose from Durian Husk as Additives

กนกศักดิ์ ลอยเลิศ^{1*} ประยูร เอ็นมาก^{1/} นภัตสร เลียบวัน^{1/} สุกัญญา นิตยนต์^{1/} ศิวัช พลายเสน^{1/}
Kanoksak Loiloes^{1*} Prayoon Enmak^{1/} Napatsorn Leabwan^{1/} Sukanya Nitiyon^{1/} Siwat Plaisen^{1/}

Received 22 Mar. 2025/Revised 5 May 2025/Accepted 7 May 2025

ABSTRACT

Biofilm made from cassava starch is not durable for packing usage due to its easy breaking and short lifespan. A large amount of durian shells was useless and unutilized by industry; therefore, they were chosen to produce additives for biofilm production. This research aims to enhance the durability of cassava starch-based biofilm by incorporating lignin and nanocellulose extracted from durian husk in biofilm. The result indicated that the lignin and nanocellulose extracted from durian husk had a lignin content of 39.5% and nanocellulose of 10% by dry basis. Cassava starch-based biofilms were prepared with varying concentrations of durian husk lignin and nanocellulose, along with 30% glycerol by weight. The biofilm containing 3% lignin exhibited the best physical and chemical properties, including a tensile strength of 142.51 ± 5.21 kgf/cm², film elongation of 10.81 ± 0.53 %, moisture content of 7.97 ± 0.18 %, and water solubility of 4.88 ± 0.65 %. The oxygen permeation rate is 109.1 ± 15.48 cm³/m²/day, similar to the biofilm without additives (109.5 ± 34.71 cm³/m²/day), a thickness of 0.185 ± 0.00 mm and a color change (ΔE) of 41.89 ± 0.85 . Cassava starch biofilms with 3% lignin from durian husk and 30% glycerol were more durable and can be used for dry food packaging because of their better physical properties.

Keywords: biofilm; agricultural waste; lignin; nanocellulose; durian husk

^{1/} กองวิจัยและพัฒนาวิทยาการหลังการเก็บเกี่ยวและแปรรูปผลิตผลเกษตร อ.พหลโยธิน จตุจักร กรุงเทพฯ 10900

^{1/} Postharvest and Processing Research and Development Division, Phahonyothin Rd., Chatuchak, Bangkok 10900, Thailand

* Corresponding author: sakagro176@gmail.com

บทคัดย่อ

ฟิล์มชีวภาพที่ทำจากสตาร์ชมันสำปะหลัง เพื่อใช้เป็นบรรจุภัณฑ์ไม่ค่อยคงทนเท่าที่ควร ขาดอายุการใช้งานสั้น เปลือกทุเรียนที่มีปริมาณมากและยังไม่มีอุตสาหกรรมที่นำไปใช้ประโยชน์จึงเลือกมาผลิตสารเติมแต่งในการผลิตฟิล์มชีวภาพ งานวิจัยนี้มีวัตถุประสงค์เพื่อผลิตแผ่นฟิล์มชีวภาพจากสตาร์ชมันสำปะหลังโดยผสมสารเติมแต่งลิกนินและนาโนเซลลูโลสที่สกัดจากเปลือกทุเรียนที่มีความคงทน พบว่าเปลือกทุเรียนสกัดลิกนินได้ปริมาณ 39.5% และนาโนเซลลูโลส 10% โดยน้ำหนักแห้ง สตาร์ชมันสำปะหลังเมื่อเติมกลีเซอรอล 30% โดยน้ำหนัก และเติมสารเติมแต่งจากลิกนินและนาโนเซลลูโลสจากเปลือกทุเรียนอัตราต่าง ๆ ขึ้นรูปเป็นแผ่นฟิล์ม พบว่า แผ่นฟิล์มชีวภาพที่เติมลิกนิน 3% โดยปราศจากนาโนเซลลูโลส ให้คุณลักษณะโดยรวมที่ดีที่สุด มีแรงดึงขาดสูง 142.51 ± 5.21 กก.แรง/ซม.² และการยืดตัวของแผ่นฟิล์ม $10.81 \pm 0.53\%$ ปริมาณความชื้น $7.97 \pm 0.18\%$ การละลายน้ำ $4.88 \pm 0.65\%$ อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน 109.1 ± 15.48 ซม³/ม²/วัน ใกล้เคียงกับแผ่นฟิล์มชีวภาพที่ไม่เติมสารเติมแต่ง 109.5 ± 34.71 ซม³/ม²/วัน ความหนา 0.185 ± 0.00 มม. และการเปลี่ยนแปลงสี (ΔE) 41.89 ± 0.85 สมบัติทางกายภาพของแผ่นฟิล์มชีวภาพจากสตาร์ชมันสำปะหลังที่เติมลิกนิน 3% จากเปลือกทุเรียนและกลีเซอรอล 30% มีความคงทนมากขึ้นสามารถนำมาใช้บรรจุอาหารแห้งได้

คำสำคัญ: ฟิล์มชีวภาพ; วัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร; ลิกนิน; นาโนเซลลูโลส; เปลือกทุเรียน

บทนำ

ฟิล์มชีวภาพได้เข้ามามีบทบาทแทนที่ฟิล์มพลาสติกจากปิโตรเคมีเนื่องจากพบปริมาณขยะจากการฝังกลบสูงถึง 30% และในมหาสมุทรเพิ่มสูงขึ้น

อย่างต่อเนื่อง ส่งผลต่อสัตว์น้ำตลอดห่วงโซ่อาหาร (Bagde and Nandanathangam, 2019) ฟิล์มชีวภาพจากมันสำปะหลังเป็นฟิล์มที่ผลิตจากสตาร์ชมันสำปะหลัง สามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติ ยืดหยุ่น โปร่งใส และใช้ทดแทนพลาสติกสังเคราะห์ได้ในหลายอุตสาหกรรม เช่น บรรจุภัณฑ์อาหารและทางการแพทย์ เป็นต้น ข้อดีของวัสดุฐานแป้งมีราคาต่ำ กระบวนการผลิตไม่ซับซ้อน แต่มีข้อเสียบางประการ เช่น สมบัติเชิงกลและความต้านทานความชื้นที่ต่ำ จึงมีการผสมสารเติมแต่งปรับปรุงคุณสมบัติของฟิล์มฐานแป้งที่นิยม ได้แก่ ลิกนิน และนาโนเซลลูโลส ลิกนินและนาโนเซลลูโลสเข้าไปเชื่อมต่อและจัดเรียงสายโซ่พอลิเมอร์ของสตาร์ชในการผลิตฟิล์มชีวภาพ การเติมลิกนินทำให้ฟิล์มมีความแข็งแรงเพิ่มขึ้น โดยไปลดความชอบน้ำของแผ่นฟิล์ม ทำให้คงทนมากขึ้น (Acosta et al., 2015) ส่วนการเติมนาโนเซลลูโลสจะลดการซึมผ่านของก๊าซและไอน้ำได้เนื่องจากไปเพิ่มสมบัติเชิงกลของแผ่นฟิล์มทำให้คงทนมากขึ้น (Bagde and Nandanathangam, 2019) คุณลักษณะของฟิล์มชีวภาพสำหรับบรรจุอาหารแห้งต้องสามารถกันการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนได้ดี ซึ่งฟิล์มชีวภาพที่เติมนาโนเซลลูโลสและลิกนิน เหมาะสำหรับเป็นชั้นเคลือบกระดาษสำหรับเพิ่มสมบัติให้กระดาษสามารถกันน้ำ ก๊าซออกซิเจนได้ดีขึ้น (Rojo et al., 2015)

ลิกนินเป็นพอลิเมอร์ชีวภาพจากธรรมชาติส่วนใหญ่ได้จากต้นไม้ มีปริมาณมากและสามารถนำกลับมาใช้ใหม่ได้ เป็นของเหลือทิ้งในอุตสาหกรรมผลิตเยื่อ ลิกนินเป็นสารประกอบพอลิฟีนอลิกแบบซับซ้อน ประกอบด้วยหมู่ฟังก์ชันหลายรูปแบบ (Aadil et al., 2016a) โครงสร้างประกอบด้วยอนุภาคที่มีความหลากหลายทั้งขนาด (polydisperse) ออสัญฐาน และโครงผลึกตาข่าย (cross-linked) โดยลิกนินมีหมู่ฟังก์ชัน ได้แก่ ไฮดรอกซิล เมทอกซิล คาร์บอนิล และคาร์บอกซิล (Aadil et al., 2016b) ซึ่งมีทั้งหมู่ที่ชอบน้ำ (hydrophilic)

และไม่ชอบน้ำ (hydrophobic) ลิกนินสามารถเข้ากันได้ทั้งในส่วนของพอลิเมอร์ที่เป็นสารอินทรีย์และสารอนินทรีย์ (Acosta et al., 2015) สามารถนำมาใช้ประโยชน์ในการพัฒนาพอลิเมอร์ สารยึดติด สารเคลือบ คาร์บอนไฟเบอร์ ถ่านกัมมันต์ โฟม และโลหะระดับอนุภาคนาโน (Aadil et al., 2016a) สารคงตัว พิวเลอร์ สารเติมแต่งในวัสดุพอลิเมอร์ที่สังเคราะห์แตกต่างกัน เช่น พอลิไวนิลแอลกอฮอล์ พอลิเอทิลีนออกไซด์ และพอลิแลกติกแอซิด (Aadil et al., 2016b)

นาโนเซลลูโลส ผลิตจากเส้นใยเซลลูโลสจากการใช้แรงเฉือน หรือการย่อยด้วยกรด ส่งผลให้ขนาดหรืออนุภาคเล็กลงจนได้เส้นใยที่อยู่ในรูปของโครงสร้างที่เป็นผลึกในระดับนาโนสเกล นาโนเซลลูโลสสามารถนำมาใช้เป็นสารเติมแต่งเพื่อเพิ่มสมบัติทางกายภาพและเคมีของวัสดุที่ยิ่งขึ้น (Habibi, 2014) และนำมาใช้เป็นสารเสริมแรงในพลาสติกประเภทที่เป็นวัสดุรวม (composite) เซลลูโลสจัดเป็นพอลิเมอร์ที่สามารถนำกลับมาใช้ใหม่

ประเทศไทยมีการใช้ประโยชน์จากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตรค่อนข้างน้อย สำหรับทุเรียนเป็นผลไม้ที่ได้รับความนิยมสูง การบริโภคทุเรียนภายในประเทศส่งผลให้มีเปลือกทุเรียนมีปริมาณมาก ทุเรียน 1 ผล มีส่วนเปลือก 58.6% ในแต่ละปีมีเปลือกทุเรียนเหลือทิ้ง 42,848 ตัน/ปี (ขจรรัชต์, 2567) ดังนั้นการนำมาเพิ่มมูลค่าโดยการเปลี่ยนให้อยู่ในรูปของสารสกัดหรือสารเติมแต่งจึงเป็นแนวทางหนึ่งในการใช้วัสดุเหลือใช้ให้เกิดประโยชน์สูงสุด ประกอบกับการผลิตสารเติมแต่งเพื่อใช้ในการผลิตฟิล์มชีวภาพมีค่อนข้างน้อย จึงทำการทดลองเพื่อผลิตแผ่นฟิล์มชีวภาพจากสตาร์ชมันสำปะหลังโดยผสมสารเติมแต่งลิกนินและนาโนเซลลูโลสจากเปลือกทุเรียนเพิ่มความคงทนในการนำมาใช้บรรจุ ห่อหุ้ม และยืดอายุการเก็บรักษาอาหารแห้ง

อุปกรณ์และวิธีการ

1. การเตรียมเปลือกทุเรียน

เปลือกทุเรียนพันธุ์หมอนทอง นำมาล้างทำความสะอาดด้วยน้ำเปล่า ผึ่งให้แห้ง หั่นให้มีขนาด 1-2 นิ้ว อบให้แห้งด้วยตู้อบลมร้อน 80°C. เป็นเวลา 24 ชม. หรือจนกว่าจะแห้งสนิทพักประมาณ 10-15 นาที แล้วเก็บรักษาในถุงพลาสติกพอลิพรอพิลีนปิดปากถุงให้สนิท

2. การสกัดลิกนินและนาโนเซลลูโลส

2.1 การสกัดลิกนิน(ดัดแปลงจากHu et al., 2013)

นำวัสดุที่ได้จากข้อ 1 ต้มด้วยสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ 18% โดยน้ำหนัก 300 มล. ที่อุณหภูมิ 80°C. เป็นเวลา 4 ชม. พักตัวอย่าง 30 นาที หรือจนกว่าจะเย็นตัว ปรับค่าความเป็นกรดต่าง (pH) ให้มีค่า 2 ด้วยสารละลายกรดซัลฟิวริก 50% กวนเป็นเวลา 1 ชม. ที่อุณหภูมิ 55°C. กรองน้ำดำ (black liquor) ที่ได้จากการต้มเยื่อด้วยชุดกรองสารแบบสุญญากาศ นำของแข็งที่ได้บนกระดาษกรองล้างด้วยน้ำกลั่น จนค่า pH เป็น 7 และสกัดลิกนินโดยใช้แอสซิโตน กวนสารละลาย 1 ชม. นำไปเหวี่ยงด้วยเครื่องหมุนเหวี่ยงที่ 6,500 รอบ/นาที เป็นเวลา 10 นาที เพื่อให้ตกตะกอนรินของเหลวทิ้ง (แยกสารอื่นออกจากลิกนิน) เก็บตะกอนที่ได้ทำให้แห้งที่อุณหภูมิ 80°C. เป็นเวลา 12 ชม. พักประมาณ 5 นาที เก็บผงลิกนินที่ได้ในถุงลามิเนตหลายชั้น หรือขวดแก้วสีชา และคำนวณปริมาณของลิกนินที่สกัดได้

นำผงลิกนินที่สกัดได้ มาเปรียบเทียบกับสมบัติกับลิกนินทางการค้าได้แก่ 1) ค่าสี 2) ความชื้น 3) การวิเคราะห์ตรวจสอบหมู่ฟังก์ชันของโมเลกุลของสาร (ATR-FTIR) ช่วงคลื่น 400–4000 cm^{-1} 4) การวัดค่าพลังงานความร้อนและอุณหภูมิของสาร (DSC) ช่วงอุณหภูมิ 10–250°C. ใช้ก๊าซไนโตรเจนที่ 40 มล./นาที 5) การวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเชิงความร้อนของสาร (TGA) ภายใต้อากาศไนโตรเจน (Watkins et al., 2015) และวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต

2.2 การสกัดนาโนเซลลูโลส (ดัดแปลงจาก

Neto et al., 2013)

นำน้ำหนักแห้งของเยื่อ โดยฟอกเยื่อ 10 ก. ด้วยสารละลายโซเดียมไฮเพอร์คลอไรท์ 100% โดยน้ำหนัก 300 มล. ที่อุณหภูมิ 80°C. เป็นเวลา 30 นาที ล้างออกด้วยน้ำกลั่น (5 รอบ) เติมกรดซัลฟิวริก 64% โดยน้ำหนัก 100 มล. ที่อุณหภูมิ 80°C. เป็นเวลา 1 ชม. และเติมกรดซัลฟิวริก 40% โดยปริมาตร 100 มล. การลดความเข้มข้นของกรดโดยให้ความร้อนที่อุณหภูมิ 80°C. อีก 1 ชม. พักสารละลายที่ได้เป็นเวลา 24 ชม. จากนั้นเติมน้ำกลั่น 10 เท่าของปริมาณกรด ทำการล้างกรดโดยใช้เครื่องปั่นเหวี่ยง 6,500 รอบ/นาที ล้างเยื่อด้วยน้ำกลั่นจน pH 7 โดยใช้ถุงเยื่อเลือกผ่าน จากนั้นนำไปโฮโมจิไนซ์เป็นเวลา 10 นาที ได้นาโนเซลลูโลส ในรูปของสารแขวนลอย ออบแห้งและบดให้อยู่ในรูปแบบผงละเอียดด้วยเครื่องบดละเอียด คำนวณปริมาณของผงนาโนเซลลูโลสที่ได้

วางแผนการทดลองแบบสุ่มสมบูรณ์ในบล็อก 3 ซ้ำ 16 กรรมวิธี ดังนี้

กรรมวิธี 1 फिल्मสตาร์ชไม่เติมสารเติมแต่ง

กรรมวิธี 2-4 फिल्मสตาร์ชเติมนาโนเซลลูโลส 1 2 และ 3% โดยน้ำหนักของสตาร์ช

กรรมวิธี 5-7 फिल्मสตาร์ชเติมลิกนิน 1 2 และ 3% โดยน้ำหนักของสตาร์ช

กรรมวิธี 8-10 फिल्मสตาร์ชเติมนาโนเซลลูโลส 1% และลิกนิน 1 2 และ 3% โดยน้ำหนักของสตาร์ช

กรรมวิธี 11-13 फिल्मสตาร์ชเติมนาโนเซลลูโลส 2% และลิกนิน 1 2 และ 3% โดยน้ำหนักของสตาร์ช

กรรมวิธี 14-16 फिल्मสตาร์ชเติมนาโนเซลลูโลส 3% และลิกนิน 1 2 และ 3% โดยน้ำหนักของสตาร์ช

ทุกกรรมวิธีเติมกลีเซอรอล 30% โดยน้ำหนักของสตาร์ช (Shankar et al., 2015) กวนให้ความร้อนที่ 75°C. ขึ้นรูปและอบแผ่นฟิล์มที่อุณหภูมิ 60°C. เป็นเวลา 4 ชม. ทดสอบ ดังนี้ 1) การต้านทานแรงดึงขาด 2) การยืดตัว 3) ความหนา 4) การเปลี่ยนแปลงสีระยะเวลา 6 เดือน 5) ความชื้น 6) การละลายน้ำ และ 7) อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน (Shankar et al., 2015) วิเคราะห์ต้นทุนการผลิต วิเคราะห์ความแปรปรวน

ศึกษาขนาดนาโนเซลลูโลสที่ได้ ได้แก่ 1) ค่าสี 2) ความชื้น 3) ขนาดอนุภาค ด้วยเครื่องวิเคราะห์ขนาดอนุภาค (mastersizer) ด้วยเทคนิค laser diffraction ใช้น้ำกลั่นช่วยกระจายตัว 4) ลักษณะของเส้นใยด้วยกล้องจุลทรรศน์อิเล็กตรอนแบบส่องผ่าน (transmission electron microscopy) 5) ความเป็นผลึกของเส้นใยจากการเลี้ยวเบนของรังสีเอ็กซ์ (X-ray diffraction; XRD) และ 6) ลักษณะพื้นผิวของวัสดุด้วยกล้องจุลทรรศน์แรงอะตอม (atomic force microscopy; AFM) (Neto et al., 2013) และวิเคราะห์ต้นทุนการผลิต

3. การผลิตแผ่นฟิล์มชีวภาพโดยใช้นาโนเซลลูโลส และลิกนินเป็นสารเติมแต่ง

เตรียมสตาร์ชมันสำปะหลังพันธุ์ห่านาที่ดัดแปลงจากวิธีของ Tsakama et al. (2010) และวิเคราะห์ปริมาณอะไมโลส ตามวิธีของวิลและคณะ (2542)

และเปรียบเทียบความแตกต่างของค่าเฉลี่ยด้วย Tukey's test ที่ระดับความเชื่อมั่น 95%

ผลการทดลองและวิจารณ์

1. การสกัดลิกนิน

การผลิตเยื่อโดยการต้มด้วยโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ เยื่อที่ต้มจะสีคล้ำลง เนื่องจากการเกิดปฏิกิริยาระหว่างสารละลายโพแทสเซียมไฮดรอกไซด์ และองค์ประกอบของพืช สามารถแยกสารประกอบต่าง ๆ

ออกจากเยื่อ ได้เส้นใย และน้ำดำซึ่งมีองค์ประกอบของสารประกอบในรูปเกลือต่าง ๆ สารประกอบคาร์โบไฮเดรต และลิกนิน (Cardoso et al., 2009) สีที่เข้มกว่ามีปริมาณสารประเภทสารอินทรีย์และลิกนินที่แยกออกจากเยื่อในปริมาณที่มากกว่า ซึ่งแยกออกได้ด้วยแอสซิโทน เพื่อให้ลิกนินตกตะกอน (Cardoso et al., 2009) สามารถสกัดลิกนินจากเปลือกทุเรียนได้ 39.5% โดยน้ำหนักแห้ง ซึ่งเป็นปริมาณที่ค่อนข้างสูง เมื่อเทียบกับที่สกัดได้จากพืชชนิดอื่น เช่น พางต้นสน (pine straw) พางข้าวสาลี และเส้นใยแฟลกซ์ (flax fiber) ที่มีปริมาณลิกนิน 22.6 20.4 และ 14.9% ตามลำดับ (Watkins et al., 2015) ปริมาณลิกนินจากพืชทางการเกษตรอยู่ในช่วง 10-40% (Li et al., 2015) แสดงว่าเปลือกทุเรียนเหมาะสมและคุ้มค่าในการนำลิกนินจากเปลือกทุเรียนมาใช้ประโยชน์ด้านอุตสาหกรรมบรรจุภัณฑ์ รวมถึงอนุภาคของลิกนินช่วยลดรูพรุนของแผ่นฟิล์มส่งผลให้ก๊าซออกซิเจนผ่านได้น้อยลง (Espinosa et al., 2019)

เมื่อเปรียบเทียบคุณสมบัติของลิกนินทางการค้ากับลิกนินที่สกัดจากเปลือกทุเรียน พบว่า ลิกนินทางการค้ามีค่าความสว่าง (L^*) น้อยกว่าเล็กน้อย แต่มีความชื้นสูงกว่า (Table 1) จากการวิเคราะห์หมู่ฟังก์ชันด้วยเทคนิค ATR-FTIR พบว่า มีหมู่ฟังก์ชันที่ใกล้เคียงกัน (Figure 1) ซึ่งยืนยันว่าเป็นลิกนิน จาก 2 ส่วนหลัก คือ 1) บริเวณลายนิ้วมือ (fingerprint region) อยู่ในช่วง $1,300-650 \text{ cm}^{-1}$ ซึ่งเป็นบริเวณที่แสดงรูปแบบการดูดกลืนแสงที่เป็นเอกลักษณ์เฉพาะตัวของโมเลกุลลิกนิน จากสเปกตรัมที่ได้ยังพบว่า มีพันธะ C-O ที่ตำแหน่ง $1,019$ และ $1,039 \text{ cm}^{-1}$ 2) บริเวณหมู่ฟังก์ชัน (functional group region) อยู่ในช่วง $4,000-1,300 \text{ cm}^{-1}$ ปรากฏพิก (peak) ที่สำคัญหลายตำแหน่ง ซึ่งบ่งชี้ถึงการมีอยู่ของหมู่ฟังก์ชันในลิกนิน ได้แก่ พันธะ C-H ที่ $2,925$ และ $2,935 \text{ cm}^{-1}$ ก๊าซ CO_2 ที่ $2,359 \text{ cm}^{-1}$ และพันธะ C=C (alkenes) ที่ $1,633 \text{ cm}^{-1}$ แสดงให้เห็นว่าลิกนินที่สังเคราะห์ได้มี

หมู่ฟังก์ชันใกล้เคียงกับลิกนินทางการค้า (Awal and Sain, 2011; Cao et al., 2013) จึงเป็นหลักฐานสำคัญที่แสดงให้เห็นว่ากระบวนการสกัดลิกนินประสบความสำเร็จ

เมื่อวิเคราะห์ปริมาณความร้อนที่ผ่านเข้าหรือออกจากระบบในกระบวนการที่ความดันคงที่ (enthalpy) พบว่า ลิกนินที่สกัดได้จากเปลือกทุเรียนมีค่าพลังงาน 71.22 จูล/ก. มากกว่าลิกนินทางการค้า ทำให้ลิกนินที่สกัดจากเปลือกทุเรียนมีความคงตัวและสามารถพัฒนาเป็นวัสดุที่ทนไฟ ความร้อน หรือวัสดุที่ให้พลังงานได้สูงกว่าลิกนินทางการค้า แต่ลิกนินทางการค้ามีจุดหลอมเหลว (T_m) สูงกว่า ซึ่งต้องใช้ความร้อนสูงในการทำลายพันธะภายในโครงสร้างผลึกให้ละลายตัว

จากการวิเคราะห์การเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเชิงความร้อน พบว่า ลิกนินทางการค้าสลายตัวได้เร็วกว่าเมื่อได้รับความร้อน มีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนัก (the negative first derivatives curve, DTG) สูงสุดที่ 65°C . (Table 1) การสูญเสียน้ำหนัก (thermogravimetric, TG) บ่งบอกถึงปริมาณกากของลิกนินที่เหลือจากการเผา ถ้าพบปริมาณกากน้อย (TG ต่ำ) แสดงว่ามีการสูญเสียน้ำหนักมาก โดยลิกนินทางการค้ามีการสูญเสียน้ำหนัก 87.05% สูงกว่าลิกนินจากเปลือกทุเรียนที่ 86.01% สำหรับช่วงอุณหภูมิในการสลายตัวของลิกนินช่วง $30-150^\circ\text{C}$. เกิดจากน้ำที่มีอยู่ในลิกนินระเหยออก ส่วนช่วง $150-200^\circ\text{C}$. เกิดจากการสลายตัวของลิกนินแปรเปลี่ยนเป็นสารประกอบอินทรีย์ที่ระเหยง่าย (volatile gases) เช่น คาร์บอนมอนอกไซด์ คาร์บอนไดออกไซด์ และมีเทน เป็นต้น จากการวิเคราะห์ด้วยการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักเชิงความร้อนของสารแสดงให้เห็นว่า ลิกนินจากเปลือกทุเรียนมีการเปลี่ยนแปลงน้ำหนักสูงสุดจึงมีสมบัติที่ดีกว่าลิกนินทางการค้า ต้นทุนการผลิตลิกนินจากเปลือกทุเรียน 15.52 บาท/ก. (ลิกนินทางการค้า 30 บาท/ก.) (โดยคำนวณต้นทุนจากค่าไฟฟ้าค่าสารเคมี)

Table 1 Color, moisture content, enthalpy, T_m of lignin, the negative first derivatives curve (DTG) and thermogravimetric (TG) of lignin

Lignin	Color			Moisture content, db (%)	Enthalpy (J/g)	T _m (°C)	DTG _{max} (°C)	TG (%)
	L*	a*	b*					
Commercial lignin	33.62	4.79	-3.32	7.93	69.85	220.2	65.00	87.05
Lignin from durian husk	35.80	5.00	-1.43	2.89	71.22	188.8	190.00	86.01

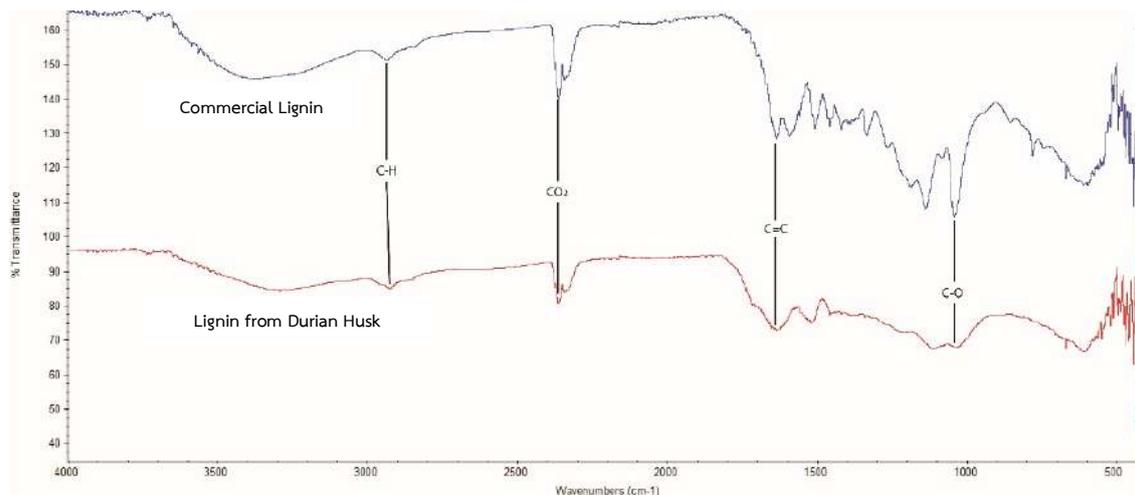


Figure 1 ATR-FTIR spectra of commercial lignin and lignin from durian husk

2. การสกัดนาโนเซลลูโลส

เปลือกทุเรียนให้ปริมาณเยื่อ 14.06% โดยน้ำหนักแห้ง ลักษณะเป็นเส้นใยเห็นชัดเจนด้วยตาเปล่า จากเศษเหลือทิ้งจากการบริโภคในช่วงฤดูกาลที่มีผลผลิตออกสู่ตลาดปริมาณมาก (นรินทร์และคณะ, 2563) สามารถสกัดได้เยื่อก่อนนำมาพัฒนาเป็นวัสดุนาโนเซลลูโลสได้ ได้ผงนาโนเซลลูโลส 10% โดยน้ำหนักผงที่ได้เป็นสีขาว เนื่องจากการใช้โซเดียมไฮเปอร์คลอไรท์เข้มข้น 100% เกิดปฏิกิริยาออกซิเดชันกับเส้นใยได้อย่างสมบูรณ์ (Heggset et al., 2017) (Figure 2a)

นาโนเซลลูโลสมีค่า L* 42.36 และความชื้น 7.05% อนุภาคนาโนเซลลูโลสที่มีขนาดเส้นผ่านศูนย์กลางช่วง 3-20 nm การใช้กรดในปริมาณที่น้อย การทำปฏิกิริยาของกรดกับเส้นใยเกิดได้ไม่สมบูรณ์ หากมากเกินไปจะส่งผลให้โครงสร้างเส้นใยถูกทำลาย (Liu et al., 2016) ลักษณะของเส้นใยกำลังขยาย

50 เท่า พบว่า เส้นใยมีขนาดเล็กกระจุกตัวกันเป็นกลุ่ม การที่เส้นใยมีขนาดเล็กนอกจากการย่อยด้วยกรดและการใช้สารฟอกสีแล้ว การใช้แรงเชิงกลในการลดขนาดเส้นใยยังเหมาะแก่การผลิตเป็นนาโนเซลลูโลส (Figure 2b) ความเป็นผลึกของสาร (XRD) เป็นการจัดเรียงตัวของอะตอม ไอออน หรือกลุ่มของอะตอมหรือไอออนเป็นโครงสร้างย่อยซ้ำกันอย่างเป็นระเบียบ พบว่า ปริมาณความเป็นผลึกของนาโนเซลลูโลสที่ได้มีปริมาณสูง สามารถหาได้จากค่าดัชนีความเป็นผลึก (CrI) มีความเป็นผลึกถึง 94.30% และความขรุขระของนาโนเซลลูโลสเป็นการสร้างภาพพื้นผิวลักษณะเชิงโครงสร้าง (Figure 2c) พบว่า ความขรุขระของนาโนเซลลูโลสอยู่ในระดับนาโน มีค่า 6.278 nm ต้นทุนการผลิต 141.93 บาท/ก. (นาโนเซลลูโลสทางการค้า 1,050 บาท/ก.) (ไม่รวมค่าวัตถุดิบซึ่งนับเป็นผลพลอยได้ รวมทั้งค่าพลังงานและบุคลากร)

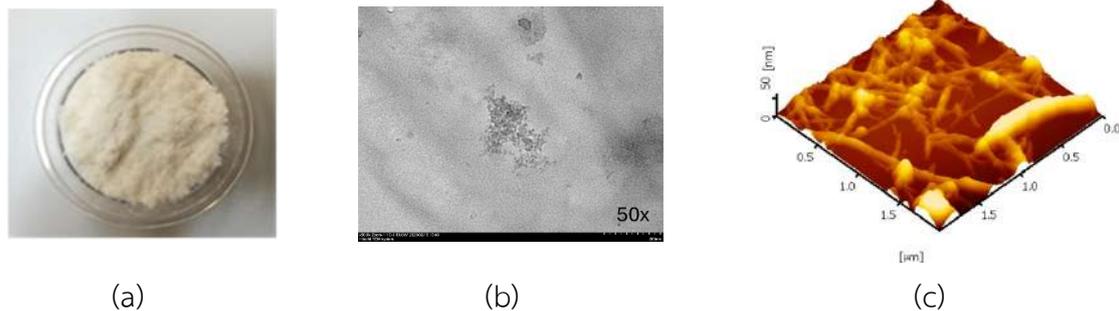


Figure 2 Nanocellulose powder from durian husk (a), transmission electron micrograph of nanocellulose (50x) (b), micromorphology and roughness of nanocellulose by AFM (c)

3. การผลิตแผ่นฟิล์มชีวภาพโดยใช้ลิกนินและนาโนเซลลูโลสเป็นสารเติมแต่ง

สตาร์ชมันสำปะหลังที่ผลิตได้ให้ค่า L^* 106.55 ปริมาณอะไมโลสของสตาร์ชมันสำปะหลัง 22% สอดคล้องกับงานวิจัย Rolland-Sabaté et al. (2012) ที่มีปริมาณอะไมโลสในสตาร์ชมันสำปะหลัง 21.5% ช่วยเชื่อมต่อและจัดเรียงสายโซ่พอลิเมอร์ของสตาร์ชร่วมกับลิกนินหรือนาโนเซลลูโลสให้สามารถขึ้นรูปแผ่นฟิล์มชีวภาพได้โดยลักษณะทางกายของแผ่นฟิล์มชีวภาพแตกต่างกันออกไปตามสารเติมแต่งที่เติมลงไปปริมาณที่ต่างกัน หากน้อยกว่าจะทำให้การขึ้นรูปแผ่นฟิล์มชีวภาพมีคุณภาพต่ำ เพราะแตกง่าย

3.1 สมบัติเชิงกล

การต้านแรงดึงขาดของแผ่นฟิล์มชีวภาพพบว่า การเติมลิกนินและนาโนเซลลูโลสมีค่าการต้านแรงดึงขาดน้อยกว่าฟิล์มสตาร์ชไม่เติมสารเติมแต่งอย่างมีนัยสำคัญ มีค่า 229.36 ± 3.06 กก.แรง/ซม² เนื่องจากลิกนินมีหมู่ฟังก์ชันที่ชอบน้ำและไม่ชอบน้ำ ส่งผลให้การรวมเป็นเนื้อเดียวกับฟิล์มสตาร์ชได้ไม่สมบูรณ์ (Acosta et al., 2015) การเติมนาโนเซลลูโลสเพิ่มขึ้นทำให้การต้านแรงดึงขาดของแผ่นฟิล์มชีวภาพลดลง โดยมีค่าต่ำสุด ที่ 93.71 กก.แรง/ซม² เนื่องจากปริมาณของนาโนเซลลูโลสที่เพิ่มขึ้นทำอันตรกิริยากับวัสดุหลัก (matrix) ลดลง ส่งผลให้ความแข็งแรงของฟิล์มลดลง (Chen et al., 2019) การเติมลิกนิน

มีค่าเพิ่มขึ้นเมื่อปริมาณลิกนินเพิ่มขึ้น มีค่าสูงสุด 151.51 ± 5.70 กก.แรง/ซม² ที่ปริมาณลิกนิน 2% และลดลงเมื่อเติมลิกนิน 3% เนื่องจากหมู่ฟังก์ชันในส่วนที่ชอบน้ำระหว่างสตาร์ชและลิกนินยึดติดได้ดีในระดับหนึ่ง จากนั้นอันตรกิริยาการยึดติดกันระหว่างสตาร์ชและลิกนินอ่อนแอลง ส่งผลให้ความแข็งแรงของฟิล์มลดลง (Bhat et al., 2013) และฟิล์มชีวภาพเติมนาโนเซลลูโลสและลิกนิน มีค่าความต้านแรงดึงขาดสูงสุด 131.98 ± 5.29 กก.แรง/ซม² ที่ปริมาณนาโนเซลลูโลส 2% ลิกนิน 3% (Figure 3a)

การยืดตัว (% elongation) ของแผ่นฟิล์มชีวภาพ พบว่า การเติมนาโนเซลลูโลสเพิ่มขึ้นส่งผลให้แผ่นฟิล์มชีวภาพมีค่าการยืดตัวลดลง เนื่องจากโครงสร้างโมเลกุลแบบร่างแห (network) ที่เกิดขึ้นจำกัดการเคลื่อนไหวสายโซ่โมเลกุลสตาร์ชและนาโนเซลลูโลส (Chen et al., 2019) การเติมลิกนินเพิ่มขึ้นส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของค่าการยืดตัวของแผ่นฟิล์มชีวภาพ เนื่องจากการกระจายตัวไม่สม่ำเสมอของอนุภาคลิกนิน เกิดการรวมตัวกันในบางจุดของฟิล์มและโมเลกุลของลิกนินสามารถเคลื่อนไหวได้ (Bhat et al., 2013) และการเติมนาโนเซลลูโลส 1%+ลิกนิน 2% มีค่าการยืดตัวสูงสุดถึง $25.16 \pm 2.97\%$ แตกต่างอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มสตาร์ชที่ไม่เติม เกิดจากสายโซ่โมเลกุลของสตาร์ชแบบอสัณฐาน (amorphous) ไม่สามารถหมุนหรือบิดตัวโครงสร้าง

ได้เช่นเดียวกับพันธะไฮโดรเจนของสตาร์ช ทำให้เกิดการเชื่อมต่อนของสายโซ่พอลิเมอร์และจัดเรียงตัวของโมเลกุลใหม่ในระบบ (ลิกนิน-นาโนเซลลูโลส-วัสดุหลัก) (Yang et al., 2020) (Figure 3b)

3.2 สมบัติทางกายภาพ

ความหนา (thickness) พบว่า การเติมลิกนินและนาโนเซลลูโลสส่งผลต่อการเพิ่มขึ้นของความหนาของแผ่นฟิล์มชีวภาพเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มสตาร์ชไม่เติมสารเติมแต่ง โดยแผ่นฟิล์มเติมนาโนเซลลูโลส 3%+ลิกนิน 3% มีค่าสูงสุด คือ 0.228 ± 0.028 มม. อย่างมีนัยสำคัญ (Table 2) เนื่องจากการเติมสารลงในแผ่นฟิล์มทำให้ปริมาตรของแผ่นฟิล์มเพิ่มขึ้นได้ (Nagar et al., 2020)

ความแตกต่างของสีโดยรวม (total color difference, ΔE) พบว่า การเติมนาโนเซลลูโลสมีค่า ΔE เพิ่มขึ้นเล็กน้อยเมื่อเปรียบเทียบกับฟิล์มสตาร์ชที่ไม่เติม เนื่องจากปริมาณของสารไฮโดรคอลลอยด์ภายในนาโนเซลลูโลสที่เกิดจากการดัดแปลงทางเคมีพอลิเมอร์ที่เพิ่มขึ้นส่งผลต่อพื้นผิวการดูดซับแสงส่งผลให้สีของฟิล์มชีวภาพเปลี่ยนแปลงไป (Nagar et al., 2020) ส่วนการเติมลิกนินมีค่า ΔE เพิ่มขึ้นอย่างมีนัยสำคัญ เมื่อเปรียบเทียบกับการเติมนาโนเซลลูโลสและฟิล์มสตาร์ชที่ไม่เติม โดยการเติมนาโนเซลลูโลส 3% ลิกนิน 3% มีค่า ΔE สูงสุด เมื่อเก็บรักษาระยะเวลา 6 เดือน เนื่องจากลิกนินอยู่ในรูปผงมีสีน้ำตาลเข้มเมื่อเติมลงในฟิล์มชีวภาพแล้วยังคงเป็นสีน้ำตาล ดังนั้น การเพิ่มปริมาณลิกนินในฟิล์มชีวภาพส่งผลให้ค่า ΔE เพิ่มขึ้นด้วย (Shankar et al., 2015) การเก็บรักษาแผ่นฟิล์มชีวภาพทุกกรรมวิธีเพื่อศึกษาค่า ΔE ระยะเวลา 6 เดือน มีการเปลี่ยนแปลงค่า ΔE เพียงเล็กน้อยโดยเปรียบเทียบในแต่ละกรรมวิธีตั้งแต่เดือนที่ 0-6 (Figure 3c)

ความชื้นของแผ่นฟิล์ม ช่วยอธิบายถึงอันตรกิริยาขององค์ประกอบหรือส่วนผสมในการผลิตฟิล์มและผลของน้ำที่มีต่อฟิล์ม (Nagar et al., 2020) พบว่า การเติมนาโนเซลลูโลสทำให้ฟิล์มมีความชื้นที่เพิ่มสูงขึ้นกว่าฟิล์มสตาร์ชไม่เติมสารเติมแต่ง และเติมลิกนิน โดยการเติมนาโนเซลลูโลส 3% มีความชื้น $13.01 \pm 1.00\%$ สูงกว่าทุกกรรมวิธีอย่างมีนัยสำคัญ โดยนาโนเซลลูโลสจัดเป็นสารประเภทไฮโดรคอลลอยด์ซึ่งเป็นพอลิเมอร์ที่ชอบน้ำ (Tan et al., 2018) การเติมไฮโดรคอลลอยด์ร่วมกับน้ำส่งผลต่อการเกิดพันธะไฮโดรเจนมากขึ้น จำกัดการระเหยของน้ำออกจากเม็ดแป้ง (starch granule) (Nagar et al., 2020) (Table 2)

การละลายน้ำ พบว่า แผ่นฟิล์มชีวภาพที่เติมนาโนเซลลูโลสเพิ่มขึ้นมีค่าการละลายน้ำลดลงเนื่องจากเกิดการเชื่อมพันธะระหว่างอนุภาคนาโนเซลลูโลส ทำให้เกิดโครงสร้างแบบร่างแหที่สามารถขัดขวางการแพร่ผ่านของน้ำเข้าสู่วัสดุหลักได้ (Pelissari et al., 2017) แผ่นฟิล์มชีวภาพที่เติมลิกนินเพิ่มขึ้นมีค่าการละลายน้ำลดลงเช่นกัน ฟิล์มที่มีลิกนิน 2% และ 3% มีค่าการละลายน้ำไม่แตกต่างกัน โดยลิกนินมีหมู่ฟังก์ชันที่ไม่ชอบน้ำ จึงทำให้บางส่วนไม่ละลายน้ำ รวมถึงความเข้ากันได้ของสารประกอบฟีนอลิกของลิกนินกับส่วนประกอบอะไมโลสของแป้งและการสร้างพันธะระหว่างโมเลกุล (cross-linking) ระหว่างแป้งกับสารประกอบฟีนอลิก (Bhat et al., 2013) ส่วนฟิล์มที่เติมนาโนเซลลูโลสร่วมกับลิกนินในทุกกรรมวิธีมีค่าการละลายน้ำไม่แตกต่างกัน เมื่อเปรียบเทียบค่าการละลายน้ำทุกกรรมวิธี พบว่า ฟิล์มที่เติมลิกนิน 2% มีค่าต่ำสุด คือ $3.80 \pm 2.48\%$ (Table 2)

Table 2 Thickness, moisture content and solubility of biofilms with different lignin and nanocellulose content

Samples	Treatment	Thickness (mm)	Moisture content (%)	Solubility (%)
C	Non additive	0.110±0.000 g	6.93±0.21 e	14.383±0.875 a
N1	1%nanocellulose	0.142±0.004 f	6.93±0.24 e	14.160±0.339 a
N2	2%nanocellulose	0.159±0.001 ef	9.18±0.48 d	13.673±0.540 a
N3	3%nanocellulose	0.169±0.009 def	13.01±1.00 a	12.180±0.859 ab
L1	1%lignin	0.144±0.005 f	7.48±0.32 e	8.327±0.887 c
L2	2%lignin	0.161±0.001 ef	7.49±0.02 e	3.806±2.482 d
L3	3%lignin	0.185±0.005 bcde	7.97±0.18 e	4.887±0.657 d
N1L1	1%nanocellulose+1%lignin	0.180±0.003 cde	7.03±0.55 e	10.463±0.392 bc
N1L2	1%nanocellulose+2%lignin	0.189±0.004 bcd	10.25±0.42 bcd	10.303±0.686 bc
N1L3	1%nanocellulose+3%lignin	0.210±0.007 ab	10.82±0.12 bc	10.690±0.644 bc
N2L1	2%nanocellulose+1%lignin	0.229±0.017 a	11.29±0.25 b	9.883±1.962 bc
N2L2	2%nanocellulose+2%lignin	0.217±0.012 a	10.14±0.17 bcd	9.577±0.559 bc
N2L3	2%nanocellulose+3%lignin	0.203±0.009 abc	10.08±0.26 cd	10.883±0.473 bc
N3L1	3%nanocellulose+1%lignin	0.207±0.003 abc	11.05±0.32 bc	8.777±1.059 c
N3L2	3%nanocellulose+2%lignin	0.226±0.006 a	10.82±0.29 bc	10.999±0.977 bc
N3L3	3%nanocellulose+3%lignin	0.228±0.028 a	10.75±0.48 bc	10.227±0.819 bc

Means within the column followed by different letters are significantly different (p<0.05) by Tukey's test

อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจน พบว่าการเติมนาโนเซลลูโลสเพิ่มขึ้นส่งผลให้อัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของแผ่นฟิล์มสูงขึ้น ทำให้เกิดการดูดซับโมเลกุลของก๊าซบนพื้นผิวของฟิล์ม การแพร่ผ่านโมเลกุลของก๊าซภายในฟิล์ม และการสลายตัวโมเลกุลของก๊าซภายในฟิล์มผ่านอีกด้านของฟิล์มได้ดีขึ้น ฟิล์มชีวภาพที่เติมลิกนินเพิ่มขึ้นมีอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของแผ่นฟิล์มลดลง เนื่องจากอนุภาคของลิกนินช่วยลดรูพรุนของแผ่นฟิล์ม ก๊าซออกซิเจนจึงผ่านได้น้อยลง (Espinosa et al., 2019) และฟิล์มชีวภาพที่เติมนาโนเซลลูโลสร่วมกับลิกนิน การซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนไม่มีความแตกต่างกันในทุกกรณีวิธี โดยอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนของฟิล์มที่เติมลิกนิน 3% มีค่า 109.1 ± 15.4 ซม³/ม²/วัน ใกล้เคียงกับฟิล์มสตาร์ช

ไม่เติมสารเติมแต่ง 109.5 ± 34.7 ซม³/ม²/วัน ดังนั้นแผ่นฟิล์มชีวภาพเติมลิกนิน 3% มีความเหมาะสมสำหรับการขึ้นรูปฟิล์มพลาสติกชีวภาพ เนื่องจากอัตราการซึมผ่านของก๊าซออกซิเจนต่ำ การต้านแรงดึงขาดและร้อยละการยืดตัวมีค่าสูง เหมาะสำหรับการเก็บรักษาอาหารแห้งและคงทน ผลิตเป็นบรรจุภัณฑ์ในรูปแบบถุง ต้นทุนในการผลิตราคาถูกกว่าการใช้นาโนเซลลูโลสและลิกนินผสมกันสำหรับเติมในฟิล์มพลาสติกชีวภาพ (Figure 3d)

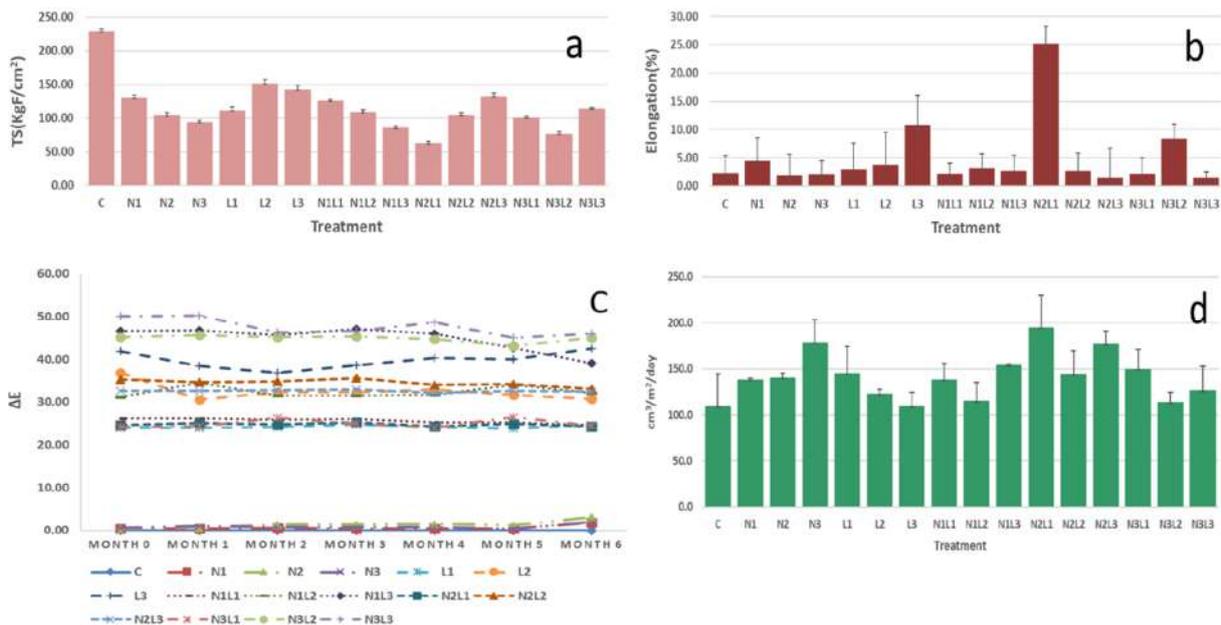
ฟิล์มชีวภาพจากสตาร์ชมันสำปะหลังสามารถย่อยสลายได้ตามธรรมชาติในสภาวะที่เหมาะสม มีสมบัติที่ยืดหยุ่น กันก๊าซออกซิเจนได้ดีเมื่อใช้บรรจุอาหารแห้ง รวมถึงความคงทนในการใช้งานแตกต่างจากฟิล์มชนิดอื่น เช่น ฟิล์มเจลลาตินมีความคงทนในการใช้งานต่ำ กันก๊าซออกซิเจนต่ำ

เป็นต้น นอกจากนี้ การใช้ลิกนินเป็นสารเติมแต่งฟิล์มชีวภาพสามารถผลิตแผ่นฟิล์มชีวภาพที่มีสมบัติเหมาะสมในการนำไปใช้งานโดยไม่ต้องเติมนาโนเซลลูโลส

3.3 ต้นทุนการผลิต

การผลิตบรรจุภัณฑ์แผ่นฟิล์มชีวภาพเติมลิกนิน 3% ขนาด 300x300x0.185 มม. มีต้นทุน 5.00 บาท (วัตถุดิบใช้สตาร์ชมันสำปะหลัง 9 ก. ราคา

0.22 บาท กลีเซอรอล 2.7 ก. ราคา 0.59 บาท ลิกนิน 0.27 ก. ราคา 4.19 บาท) เปรียบเทียบกับฟิล์มพลาสติกชีวภาพพอลิแลคติกแอซิด ที่วางจำหน่ายตามท้องตลาด โดยมีขนาดเท่าฟิล์มชีวภาพสตาร์ชมันสำปะหลัง ราคา 9.51 บาท/ชิ้น โดยฟิล์มชีวภาพสตาร์ชมันสำปะหลังใช้วัตถุดิบหลักที่เป็นผลผลิตทางการเกษตรสามารถขยายผลเชิงพาณิชย์ได้ในรูปแบบของการผลิตฟิล์มด้วยวิธีการขึ้นรูปแบบเคลือบฟิล์ม



Note: C: Non additive; N1:1%nanocellulose; N2: 2%nanocellulose; N3: 3%nanocellulose; L1: 1%lignin; L2: 2%lignin; L3: 3%lignin; N1L1: 1%nanocellulose+1%lignin; N1L2:1%nanocellulose+2%lignin; N1L3: 1%nanocellulose+3%lignin; N2L1: 2%nanocellulose+1%lignin;N2L2: 2%nanocellulose+2%lignin; N2L3: 2%nanocellulose+3%lignin; N3L1: 3%nanocellulose+1%lignin; N3L2: 3%nanocellulose+2%lignin; N3L3: 3%nanocellulose+3%lignin

Figure 3 Tensile strength (a), elongation at break (b), total color difference (ΔE) (c), oxygen transmission rate (OTR) (d) of biofilms with different lignin and nanocellulose content

สรุปผลการทดลอง

การผลิตแผ่นฟิล์มชีวภาพจากสตาร์ชมันสำปะหลังโดยผสมสารเติมแต่งลิกนินและนาโนเซลลูโลสที่สกัดจากเปลือกทุเรียนในขั้นตอนการสกัดสารเติมแต่ง พบว่า สามารถสกัดลิกนิน และนาโนเซลลูโลสได้ 39.5 และ 10% โดยน้ำหนักแห้งเปลือกทุเรียน

ตามลำดับ สารที่ได้สามารถใช้เป็นสารเติมแต่งในแผ่นฟิล์มชีวภาพได้ และจากการผลิตแผ่นฟิล์มชีวภาพที่เติมลิกนิน 3% มีสมบัติเชิงกลและกายภาพโดยรวมดีกว่ากรรมวิธีอื่น ๆ จึงเหมาะสำหรับการพัฒนาเป็นบรรจุภัณฑ์สำหรับอาหารแห้งได้ นอกจากนี้ การศึกษาการย่อยสลายของฟิล์มชีวภาพที่ผลิตจาก

สตาร์ชมันสำปะหลังและสารเติมแต่งจากวัสดุเหลือใช้ทางการเกษตร เช่น เปลือกทุเรียน ส่งผลกระทบต่อการลดปัญหาขยะพลาสติกในอนาคตได้

คำขอบคุณ

งานวิจัยนี้ได้รับเงินสนับสนุนจากสำนักงานคณะกรรมการส่งเสริมวิทยาศาสตร์ วิจัยและนวัตกรรม (สกสว.) ปีงบประมาณ 2562-2564 ขอขอบคุณข้าราชการ พนักงานราชการ ที่ให้ความช่วยเหลือในการทำวิจัยให้สำเร็จลุล่วงไปได้ด้วยดี

เอกสารอ้างอิง

- ขจรรัชช์ พุฒพัฒนศิลป์. 2567. วัน Kick Off สร้างมูลค่าเปลือกทุเรียนด้วยเทคโนโลยีและนวัตกรรม. แหล่งข้อมูล: <https://siamrath.co.th/n/564976>. สืบค้น: 13 กันยายน 2568.
- นรินทร์ เจริญพันธ์ คัดดี้ชัย เศรษฐ์ธวัช และสามารณ สายอุต. 2563. องค์ประกอบทางเคมีและแนวโน้มการใช้ประโยชน์จากผลพลอยได้และเศษเหลือทิ้งจากการแปรรูปผลไม้เขตร้อน 4 ชนิด. วารสารวิทยาศาสตร์และเทคโนโลยี. 28(1): 113-128.
- วีไล สันติโสภาคศรี กาญจนา กุโรจนวงศ์ โอภาษ บุญเส็ง และกัลลัณรงค์ ศรีรอด. 2542. สภาวะแล้งน้ำในระหว่างการผลิตเจริญเตบโตที่มีต่อคุณภาพและสมบัติทางเคมีฟิสิกส์ของแป้งมันสำปะหลัง. หน้า 154-161. ใน: การประชุมทางวิชาการของมหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ ครั้งที่ 37, 3-5 กุมภาพันธ์ 2542.
- Aadil, K.R., A. Barapatre and H. Jha. 2016a. Synthesis and characterization of *Acacia* lignin-gelatin film for its possible application in food packaging. *Bioresources and Bioprocessing*. 3: 27.
- Aadil, K.R., D. Prajapati and H. Jha. 2016b. Improvement of physico-chemical and functional properties of alginate film by *Acacia* lignin. *Food Packaging and Shelf Life*. 10: 25-33.
- Acosta, E., T. Chavez. T.C. Patricia, R. Benjamin, A.B. Luis, V. Alejandro, C.M. Ros, C.M. Elizabeth, P.J. Maribel and A.I.L. Osuna. 2015. Mechanical, thermal, and antioxidant properties of composite films prepared from durum wheat starch and lignin. *Starch/Stärke*. 67(5-6): 502-511.
- Awal, A. and M. Sain. 2011. Spectroscopic studies and evaluation of thermorheological properties of softwood and hardwood lignin. *Journal of Applied Polymer Science*. 122(2): 956-963.
- Bagde, P. and V. Nandanatham. 2019. Mechanical, antibacterial and biodegradable properties of starch film containing bacteriocin immobilized crystalline nanocellulose. *Carbohydrate Polymers*. 222: 115021.
- Bhat, R., N. Abdullah, R.H. Din and G.S. Tay. 2013. Producing novel sago starch based food packaging films by incorporating lignin isolated from oil palm black liquor waste. *Journal of Food Engineering*. 119(4): 707-713.
- Cardoso, M., D.D. Oliveira and M.L. Passos. 2009. Chemical composition and physical properties of black liquors and their effects on liquor recovery operation in Brazilian pulp mills. *Fuel*. 88(4): 756-763.
- Cao, J., G. Xiao, X. Xu, D. Shen and B. Jin. 2013. Study on carbonization of lignin by TG-FTIR and high-temperature carbonization reactor. *Fuel Processing Technology*. 106: 41-47.
- Chen, Q., Y. Liu and G. Chen. 2019. A comparative study on the starch-based biocomposite films reinforced by nanocellulose prepared from different non-wood fibers. *Cellulose*. 26(4): 2425-2435.
- Espinosa, E., I. Bascón-Villegas, A. Rosal, F. Pérez-Rodríguez, G. Chinga-Carrasco and A. Rodríguez. 2019. PVA/(ligno) nanocellulose biocomposite films. Effect of residual lignin content on structural, mechanical, barrier and antioxidant properties. *International Journal of Biological Macromolecules*. 141: 197-206.

- Habibi, Y. 2014. Key advances in the chemical modification of nanocelluloses. *Chemical Society Reviews*. 43(5): 1519-1542.
- Heggset, E.B., G. Chinga-Carrasco and K. Syverud. 2017. Temperature stability of nanocellulose dispersions. *Carbohydrate Polymers*. 157: 114–121.
- Hu, j., R. Xiao, D. Shen and H. Zhang. 2013. Structural analysis of lignin residue from black liquor and its thermal performance in thermogravimetric-Fourier transform infrared spectroscopy. *Bioresource Technology*. 128: 633-639.
- Li, C., X. Zhao, A. Wang, G.W. Huber and T. Zhang. 2015. Catalytic transformation of lignin for the production of chemicals and fuels. *Chemical Reviews*. 115(21): 11559-11624.
- Liu, C., B. Li, H. Du, D. Lv, Y. Zhang, G. Yu, X. Mu and H. Peng. 2016. Properties of nanocellulose isolated from corncob residue using sulfuric acid, formic acid, oxidative and mechanical methods. *Carbohydrate Polymers*. 151: 716–724.
- Nagar, M., V.S. Sharanagat, Y. Kumar and L. Singh. 2020. Development and characterization of elephant foot yam starch-hydrocolloids based edible packaging film: Physical, optical, thermal and barrier properties. *Journal of Food Science and Technology*: 57(4): 1331-1341.
- Neto, W.P.F., H.A. Silvério, N.O. Dantas and D. Pasquini. 2013. Extraction and characterization of cellulose nanocrystals from agro-industrial residue–soy hulls. *Industrial Crops and Products*. 42: 480-488.
- Pelissari, F. M., M.M. Andrade-Mahecha, P.J.A. Sobral and F.C. Menegalli. 2017. Nanocomposites based on banana starch reinforced with cellulose nanofibers isolated from banana peels. *Journal of Colloid and Interface Science*. 505: 154-167.
- Rojo, E., M.S. Peresin, W.W. Sampson, I.C. Hoeger, J. Vartiainen, J. Laine and O.J. Rojas. 2015. Comprehensive elucidation of the effect of residual lignin on the physical, barrier, mechanical and surface properties of nanocellulose films. *Green Chemistry*. 17(3): 1853-1866.
- Rolland-Sabaté, A., T. Sánchez, A. Buléon, P. Colonna, B. Jaillais, H. Ceballos and D. Dufour. 2012. Structural characterization of novel cassava starches with low and high-amylose contents in comparison with other commercial sources. *Food Hydrocolloids*. 27(1): 161-174.
- Shankar, S., J.P. Reddy and J.W. Rhim. 2015. Effect of lignin on water vapor barrier, mechanical, and structural properties of agar/lignin composite films. *International Journal of Biological Macromolecules*. 81: 267–273.
- Tan, C., C.K. Chua, L. Li and G. Wong. 2018. Enhancing 3D printability of puree food by addition of hydrocolloids. pp. 662-666. In: *Proceedings of the 3rd International Conference on Progress in Additive Manufacturing (Pro-AM 2018)*.
- Tsakama, M., A.M. Mwangwela., T.A. Manani and N.M. Mahungu. 2010. Physicochemical and pasting properties of starch extracted from eleven sweet potato varieties. *African Journal of Food Science and Technology*. 1(4): 90-98.
- Yang, W., G. Qi, J.M. Kenny, D. Puglia and P. Ma. 2020. Effect of cellulose nanocrystals and lignin nanoparticles on mechanical, antioxidant, and water vapour barrier properties of glutaraldehyde crosslinked PVA films. *Polymers*. 12(6): 1364.
- Watkins, D., M. Nuruddin, M. Hosur, A. Tcherbi-Narteh and S. Jeelani. 2015. Extraction and characterization of lignin from different biomass resources. *Journal of Materials Research and Technology*. 4(1): 26-32.

คำแนะนำสำหรับผู้เขียน

การส่งต้นฉบับ:

ผู้เขียนต้องส่งต้นฉบับผ่านทาง Online submission เท่านั้น ที่: tci-thaijo.org/index.php/thaiagriculturalresearch

คำแนะนำสำหรับผู้เขียนนี้ใช้กับบทความที่ตีพิมพ์ในวารสารวิชาการเกษตร ตั้งแต่ปีที่ 42 เป็นต้นไป

สามารถศึกษารายละเอียดเพิ่มเติมได้จาก <https://li01.tci-thaijo.org/index.php/thaiagriculturalresearch/guidelines> พร้อมไฟล์ตัวแบบให้ดาวน์โหลด

ต้นฉบับ: พิมพ์ด้วยโปรแกรมพิมพ์เอกสารใช้ font TH SarabunPSK ขนาด 16 pts พิมพ์บรรทัดห่าง 1 บรรทัด พิมพ์หน้าเดียว มีความยาว 10-15 หน้า กระดาษขนาด A4 มีรูปแบบการเขียนและการวางหัวข้อตามรายละเอียดดังนี้

ชื่อเรื่อง (ภาษาไทย/ภาษาอังกฤษ)

ชื่อ สกุล¹ (ผู้แต่งคนที่ 1) **ชื่อ สกุล²** (ผู้แต่งคนที่ 2) (ภาษาไทย/ภาษาอังกฤษ)

ที่อยู่ของหน่วยงานของผู้แต่ง (ภาษาไทย/ภาษาอังกฤษ)

Corresponding author: email

ABSTRACT: สรุปความสำคัญของเรื่องที่ทดลอง วัตถุประสงค์ วิธีการทดลอง สถานที่ เวลาทำการทดลอง ผลการทดลอง และสรุปสาระสำคัญที่ได้จากการทดลอง เป็นภาษาอังกฤษใช้สำนวนรัดกุมและให้รายละเอียดที่ชัดเจน มีความยาวไม่เกิน 300 คำ

Keywords: ไม่เกิน 5 คำ

บทคัดย่อ: มีเนื้อหาสาระเช่นเดียวกันกับบทคัดย่อภาษาอังกฤษ (ABSTRACT)

คำสำคัญ: ไม่เกิน 5 คำ

บทนำ: อธิบายถึงเหตุผล ความสำคัญ วัตถุประสงค์และเป้าหมายของงานวิจัยพร้อมทั้งเสนอข้อมูลสนับสนุนหรือโต้แย้งจากการตรวจเอกสาร

อุปกรณ์และวิธีการ: อธิบายการวางแผนการทดลอง ขนาดแปลงทดลอง และรายละเอียดของวิธีการดำเนินการทดลอง วัน เวลา และสถานที่ทดลอง วิธีการบันทึกข้อมูล ใช้สำนวนที่ไม่เยิ่นเย้อ และให้รายละเอียดเป็นขั้นตอนที่ชัดเจน

ผลการทดลองและวิจารณ์: อธิบายผลการทดลองที่สำคัญ อ้างอิงถึงตาราง กราฟ หรือรูปประกอบพร้อมเหตุผลสนับสนุนผลการทดลอง และวิจารณ์เหตุผลที่ทำให้ผลการทดลองเป็นเช่นนั้น รวมทั้งอ้างอิงถึงผลการทดลองของผู้อื่น (จากเอกสารอ้างอิงในบทนำ หรืออุปกรณ์และวิธีการ) เพื่อสนับสนุนหรือคัดค้านผลการทดลองนั้น ๆ

ตาราง: ชื่อตารางและรายละเอียดเป็นภาษาอังกฤษ เรียงตั้งแต่ Table 1 เป็นต้นไป

ภาพประกอบ: ภาพขาวดำ หรือภาพสี หรือภาพลายเส้น (กราฟ) เป็นต้นฉบับที่ชัดเจน สะอาดและสวยงามพร้อมคำบรรยายเป็นภาษาอังกฤษเรียงตั้งแต่ Figure 1 เป็นต้นไป

สรุปผลการทดลอง: สรุปสาระที่สำคัญของผลการทดลอง คำแนะนำในการนำไปใช้ประโยชน์ และข้อเสนอแนะในงานวิจัยเรื่องนั้น ๆ ในอนาคต (ถ้ามี)

คำขอบคุณ: กล่าวถึงบุคคลและหน่วยงานที่ช่วยเหลืองานวิจัยและทดลอง

เอกสารอ้างอิง: ตัวอย่างการเขียนเอกสารอ้างอิง ตามตัวอย่าง

1. การตรวจเอกสาร ในเรื่องของบทนำหรือ อุปกรณ์และวิธีการ หรือ ผลการทดลอง

ตัวอย่างการเขียน

- โกลล (2523) หรือ (โกลล, 2523)
- อิมจิตและคณะ (2535) หรือ (อิมจิตและคณะ, 2535)
- Krebs (1978) หรือ (Krebs, 1978)
- Lekakul et al. (1977) หรือ (Lekakul et al., 1977)

ถ้าเอกสารไม่ปรากฏชื่อผู้เขียนให้ใช้ นิรนาม (2529) หรือ (นิรนาม, 2529)

2. เอกสารอ้างอิง

2.1 การเรียงลำดับเอกสาร

- ให้เอกสารภาษาไทยอยู่ในส่วนแรก และเอกสารภาษาต่างประเทศอยู่ในส่วนที่สอง
- ให้เรียงชื่อผู้แต่งตามอักษรแต่ละภาษา ผู้แต่งชื่อเดียวกัน มีเอกสารมากกว่า 1 ฉบับ
- ถ้าตีพิมพ์ในปีต่าง ๆ กัน ให้เรียงปีที่พิมพ์จากน้อยไปหามาก
- ถ้าตีพิมพ์ในปีเดียว ให้ใส่อักษร ก, ข, ค หรือ a, b, c กำกับในเนื้อเรื่องที่ย่างถึงก่อนและหลังตามลำดับ

2.2 ประเภทของเอกสาร

ก. ตำรา

ชื่อผู้แต่ง. ปี. ชื่อหนังสือ. ชื่อสำนักพิมพ์ จังหวัด. จำนวนหน้า.

สะอาด บุญเกิด จร สดากกร และทิพย์พรรณ สดากกร. 2523. ชื่อพรรณไม้ในเมืองไทย. กองทุนจัดพิมพ์ตำราป่าไม้ คณะวนศาสตร์ มหาวิทยาลัยเกษตรศาสตร์ กรุงเทพฯ. 657 หน้า.

Holm, G.L., D.L. Plucknett, J.V. Pancho and J.P. Herberger. 1997. *Imperata cylindrical* (L.) Beauv. pp. 62-71. In: The World 's Worst weeds, Distribution and Biology. Honolulu, University Press of Hawaii.

ข. วารสาร Newsletter และ Bulletin

ชื่อผู้แต่ง. ปี. ชื่อเรื่อง. ชื่อวารสารหรือชื่อ Newsletter หรือชื่อ Bulletin. ปีที่(เล่มที่): หน้า-หน้า.

ไพศาล เหล่าสุวรรณ. 2524. วิธีการเขียนบทความทางวิชาการวิทยาศาสตร์. วารสารสงขลานครินทร์. 3(1): 27-43.

Sharwa, A.D. and C.I. Jandalk. 1986. Studies on recycling of Pleurotus waste. Mushroom Newsletter for the Tropics. 3: 13-15.

ค. รายงานประจำปี

ชื่อผู้แต่ง. ปี. ชื่อเรื่อง. หน้า-หน้า. ชื่อรายงานประจำปี พ.ศ. หน่วยงาน.

กรองทอง จันทน์ อำนวย ทองดี และบรรจง ลิกษะมณฑล. 2522. การศึกษาหาวิธีการปลูกหอมแดงในภาคเหนือ. หน้า 5-20. ใน: รายงานสรุปผลการทดลองพืชสวน 2522. กองพืชสวน กรมวิชาการเกษตร.

Lewanich, A. 1974. A Taxonomic Study on the Lipdopterous Pests of Sugar Cane. pp. 511- 513. In: Annual Research Report 1974. Division of Entomology and Zoology, Department of Agriculture, Bangkok.

ง. รายงานการประชุม

ชื่อผู้แต่ง. ปี. ชื่อเรื่อง. หน้า-หน้า. ชื่อรายงานการประชุมถ้ามีตัวย่อสากลให้พิมพ์ตัวย่อ ครั้งที่ (ถ้ามี) วัน เดือน ปีที่มีการประชุม สถานที่ประชุม.

พิสิษฐ์ เสพสวัสดิ์ ศรีสมร พิทักษ์ เตือนจิตต์ สัตยาวิรุทธิ์ และสาทร ลิริสิงห์. 2523. ประสิทธิภาพของสารฆ่าแมลงบางชนิด กับหนอนเจาะฝักถั่วเหลือง. หน้า 492-523. ใน: รายงานการประชุมวิชาการแมลงและสัตว์ศัตรูพืช ครั้งที่ 2 กองกัญและสัตววิทยา. 24-27 มิถุนายน 2532 ณ ศูนย์วิจัยการอารักขาข้าว กรุงเทพฯ.

Magee, P.N. 1992. The Future of Research on Chemical Carcinogenesis. pp. 11. In: 2nd Princess Chulabhorn Science Congress. Nov. 2-6, 1992. Bangkok.

จ. เอกสารไม่ปรากฏชื่อผู้เขียน ให้ใช้คำว่า นิรนาม หรือ Anonymous กรณีไม่ปรากฏปีที่พิมพ์ ให้ใช้ n.d. หรือ ม.ป.ป.

ฉ. สื่อวิชาการทาง Website

ชื่อผู้แต่ง. ปีที่พิมพ์. ชื่อเรื่องของเอกสาร. แหล่งข้อมูล: (ระบุ URL) สืบค้น: (วัน เดือน ปี).

นิรนาม. 2556. ชาน้ำมัน (*Camellia oleifera* Abel). ศูนย์วิจัยและพัฒนาชาน้ำมันและพืชน้ำมัน มูลนิธิชัยพัฒนา. แหล่งข้อมูล: <http://www.teaoilcenter.org/index.php/2013-12-01-03-05-52/2013-12-01-03-12-54/entry/camellia-oleifera-abel>. สืบค้น: 20 พฤษภาคม 2559.

FSANZ. 2007. Final assessment report. Application A565. Use of nisin in processed meat products .Food Standards Australia New Zealand. Available at: <http://www.foodstandards.gov.au/code/applications/documents/A565-FAR-Nissin-Final.pdf>. Accessed: March 22, 2015.

Thai Agricultural Research Journal

Production : Department of Agriculture (DOA), Thailand
Office : Department of Agriculture, Chatuchak, Bangkok 10900, Thailand
Objective : As a medium for disseminate the agricultural research and innovation for crop plant

Advisors

Director General, Deputy Director General, Technical Advisor, Senior Experts
Directors of Centre, Divisions, Institutes and Offices
Amara Chinaphuti, Ph.D.

Editor

Suprada Sukonthabhirom na Pattalung, Ph.D. Department of Agriculture (DOA), Thailand

Assistant Editors

Walaiporn Sasiyrapa	Retired government official
Kanchana Pruesapan, Ph.D.	Plant Varieties Protection Office, DOA
Sainum Udpuay, Ph.D.	Agricultural Production Science Research and Development Division, DOA

Editorial Board

Aumnuai Adthlangrong	Horticulture Institute, DOA
Suphakarn Luanmanee, Ph.D.	Agricultural Production Science Research and Development Division, DOA
Supamas Klinkajorn	Crops Processing Research and Development Group, PPRDD, DOA
Patchareewan Chongchitmate, Ph.D.	Plant Protection Research and Development Office, DOA
Jeeraporn Kansup, Ph.D.	Biotechnology Research and Development Office, DOA
Sanchai Tantayaporn, Ph.D.	National Bureau of Agriculture Community and Food Standard (ACFS)
Pornpimon Athipunyakom, Ph.D.	Retired government official
Suphasit Sngiamphongse	Retired government official
Charan Ditchaiwond, Ph.D.	Retired government official
Vichanee Ormzubsin	Retired government official
Assoc. Prof. Kamronwit Thipmanee, Ph.D.	King Mongkut's Institute of Technology Lat Krabang
Assoc. Prof. Sontichai Chanprame, Ph.D.	Kasetsart University
Asst. Prof. Rungarun Tisgratog, Ph.D.	Kasetsart University
Assoc. Prof. Phrueksa Lawongsa, Ph.D.	Khon Kaen University
Assoc. Prof. Noppol Arunrat, Ph.D.	Mahidol University
Asst. Prof. Boonsom Bussaban, Ph.D.	Chiang Mai University
Asst. Prof. Bhorchai Harakotr, Ph.D.	Thammasat University
Wanporn Khemmuk, Ph.D.	Rice Department
Patcharin Sriwarin	Rubber Authority of Thailand

Manager

Director of Research Planning Group Planning and Technical Division, DOA, Thailand

Assistant Manager

Donya Klaymala Planning and Technical Division, DOA, Thailand



THAI AGRICULTURAL RESEARCH JOURNAL

Volume 43 No. 3

September - December 2025

ISSN : 3027-7264 (Print) ISSN : 3027-7272 (Online)

CONTENTS

EDITORIAL.....229

Suprada Sukonthabhirom na Pattalung

RESEARCH PAPERS

- Evaluation of Total Soluble Solid in Sonya Watermelon Fruits Using Near Infrared Spectroscopy Hyperspectral Imaging Technique230
Pachara Subsueng Anupun Terdwongworakul Arthit Phuangsombut
Amordej Puttipipatkajorn Kaewkarn Phuangsombut
- Design and Development of a Tractor-attached Non-chemical Weeder241
Pongphun Panmayura Prathuang Usaborisut Watcharachan Sukcharoenvipharat
Chaiya Jantra Wanrat Abdullakasim
- Sensitivity of *Exserohilum turcicum* to Carbendazim and the Fungicide's Efficacy in Controlling Northern Corn Leaf Blight in Thailand252
Thanada Nakgoen Kittithud Trachu Supharoek Limdoltham Veeranee Tongstri
Tida Dethoup Pattavipha Songkumarn
- Diversity and Morphology of *Portulaca* L. (Portulacaceae)265
Kanchana Pruesapan Siriporn Zungsontiporn Tanchanok Sreemuang
- Multi-environment Evaluation of Potential and Stability for Promising Cassava Breeding Lines Series 2018 Using GGE Biplot280
Rungravee Boontung Suwaluk Sansanee Narachai Phosan Phanuwat Moonjuntha Sirlak Lankaew
Saichon Sangkaew Napa Boonsang Chatchewin Dawyai Juthamas Khruengpatee
- Evaluation of Yield and Texture Quality in 2017 Edible Cassava Hybrids292
Kusuma Rodpeawpan Kanjana Kirasak Thanutham Boonchim Sayamol Kaewbunjong
Chatchewin Dawyai Tipdarunee Sittinam Choeratphatchra Khieowichai Chadaporn Inplean
Suwaluk Sansanee Tanavadee Kumchoo
- Comparative Analysis of Percentage Disease Index and Area Under the Curve for Classifying Northern Corn Leaf Blight Severity305
Theerawut Wongwarat Chaowanart Phruetthithep Suwara Wutthiaumphon
Panuwat Sinlapasakkajohn
- Inducing Substances and Plant Defense Mechanisms Related to Pest Resistance in Tobacco with Scopoletin Extracts from the *Morinda citrifolia* L. (Noni) Fruits316
Khemmikar Khompatara Yaowapa Sukpondma Pariyakorn Ritthisoonthorn
Thitikorn Prombanchong Wimonwan Wattanawichit
- Production of Cassava Starch-based Biofilm Using Lignin and Nanocellulose from Durian Husk as Additives329
Kanoksak Loiloes Prayoon Enmak Napatsorn Leabwan Sukanya Nitiyon Siwat Plaisen